

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

JOSÉ MAURO KOCHER

VÁLVULAS ELETRÔNICAS
ajudando a definir a modernidade

RIO DE JANEIRO

2020

José Mauro Kocher

VÁLVULAS ELETRÔNICAS
ajudando a definir a modernidade

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Oliveira

Rio de Janeiro

Fevereiro

2020

CIP - Catalogação na Publicação

K76v Kocher, José Mauro
Válvulas eletrônicas: ajudando a definir a modernidade. / José Mauro Kocher. -- Rio de Janeiro, 2020.
310 f.

Orientador: José Carlos de Oliveira.
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Decania do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Programa de Pós-Graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia, 2020.

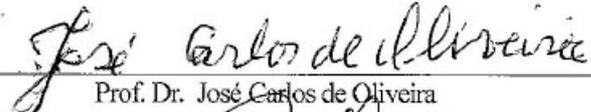
1. Válvula eletrônica. 2. Eletrônica. 3. Aplicações da eletrônica. 4. História das tecnologias. I. Oliveira, José Carlos de, orient. II. Título.

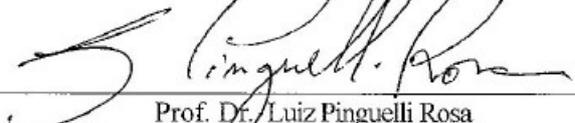
JOSÉ MAURO KOCHER

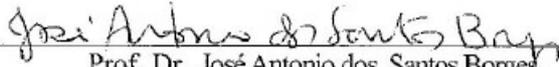
VÁLVULAS ELETRÔNICAS: AJUDANDO A DEFINIR A MODERNIDADE

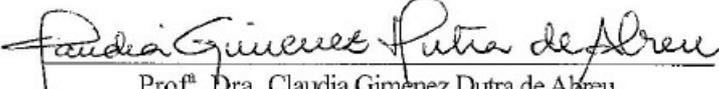
Tese submetida ao corpo docente do Programa de História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia (HCTE), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em História das Ciências, das Técnicas e Epistemologia.

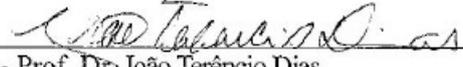
Aprovada em: 19 de fevereiro de 2020


Prof. Dr. José Carlos de Oliveira
Universidade Federal do Rio de Janeiro


Prof. Dr. Luiz Pinguelli Rosa
Universidade Federal do Rio de Janeiro


Prof. Dr. José Antonio dos Santos Borges
Universidade Federal do Rio de Janeiro


Prof.ª Dra. Claudia Gimenez Dutra de Abreu
Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil do Rio de Janeiro


- Prof. Dr. João Terêncio Dias
Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro


Prof. Dr. Jomar Gozzi
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dedico este trabalho aos meus pais:
Simão Kocher e Celina Kocher (*in memoriam*).

Agradeço ao meu orientador, professor José Carlos de Oliveira, pelo apoio e incentivo à realização deste trabalho.

A todos os professores, colegas e funcionários do Programa de Pós-Graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por todo o apoio, a orientação e a amizade que foram tão importantes para que eu conseguisse chegar ao fim desse caminho.

À minha esposa Eneida, pela revisão e formatação do texto, e pela ajuda na busca de fontes documentais acessórias.

RESUMO

KOCHER, José Mauro. **Válvulas eletrônicas**: ajudando a definir a modernidade. Tese (doutorado) - Ciências, História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.

A partir da constatação, em estudos prévios, de que a válvula eletrônica foi um ponto de confluência de conhecimentos preexistentes que formaram a ciência e a técnica da Eletrônica, e que viabilizou ou dinamizou as muitas aplicações da tecnologia eletrônica no século XX, o tema escolhido para este trabalho foi o exame da proposição de que a válvula foi um importante dispositivo facilitador para configuração da modernidade no século XX, por ter tido um papel central na constituição da infraestrutura tecnológica eletrônica. A pesquisa bibliográfica levantou documentação e estudos sobre as descobertas, invenções e construções teóricas consideradas precursoras das válvulas, sobre a criação e a evolução tecnológica das válvulas e sobre os equipamentos e sistemas técnicos em que as válvulas foram utilizadas, além de reunir dados para a contextualização histórica desses aspectos. As informações coletadas foram articuladas numa visão de conjunto da trajetória das válvulas, desde a formação das condições necessárias para seu surgimento, passando por sua criação, focalizando o modo como suas aplicações influenciaram os padrões tecnológicos durante esse período, e indo até o fim do seu uso em aplicações comerciais. O estudo mostrou que a história da válvula reproduz a história das relações de produção e trabalho no capitalismo monopolista e fordista; que, no desenvolvimento da sua tecnologia, predominaram os países e as empresas com recursos e poder para produzir conhecimentos, investir em inovações e garantir direitos comerciais; que o exemplo da Eletrônica mostra que uma tecnologia não é boa ou má em si, mas o resultado de sua utilização por uma sociedade depende da relação entre as forças dessa sociedade em torno do uso da tecnologia; e que, embora a influência direta da válvula como facilitadora da formação de um padrão social tenha acabado há muito tempo, o modelo tecnológico construído com seu auxílio continua existindo, agora com os semicondutores substituindo as válvulas, mas sem deixar de ser um modelo eletrônico.

PALAVRAS-CHAVE: Válvula eletrônica; Eletrônica; Aplicações da Eletrônica; História das tecnologias.

ABSTRACT

KOCHER, José Mauro. **Válvulas eletrônicas**: ajudando a definir a modernidade. Tese, Doutorado em Ciências, História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.

From the observation, in previous studies, that the electronic valve was a confluence point of pre-existing knowledge that formed the science and technique of electronics, and that made possible or dynamized the many applications of electronic technology in the 20th century, the chosen theme for this work was the examination of the proposition that the valve was an important facilitating device for the configuration of modernity in the 20th century, having played a central role in the constitution of electronic technological infrastructure. The bibliographic research has raised documentation and studies on the discoveries, inventions and theoretical constructions considered precursors of the valves, on the creation and technological evolution of the valves and on the equipment and technical systems in which the valves were used, besides gathering data for the contextualization of these aspects. The information collected was articulated in an overall view of the valve trajectory, from the formation of the necessary conditions for its emergence, through its creation, focusing on how its applications influenced the technological standards during this period, and going until the end of its use in commercial applications. The study showed that the history of the valve reproduces the history of the relations of production and labor in monopolistic and Fordist capitalism; whereas in developing their technology, countries and companies with resources and power to produce knowledge, invest in innovations and secure trade rights have predominated; whereas the example of electronics shows that a technology is not good or bad in itself, but the result of its use by a society depends on the relationship between the forces of that society around the use of technology; and although the direct influence of the valve as a facilitator of the formation of a social pattern has long since waned, the technological model built with its help continues to exist, now with semiconductors replacing the valves, but still an electronic model.

KEYWORDS: Electronic valve; Electron tube; Electronics; Electronics applications; History of technologies.

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|--|--------|
| Figura 1.1: Geradores usados na iluminação de arco | 45 |
| Figura 1.2: O sistema de vácuo de dois cilindros de Hauksbee | 57 |
| Figura 1.3: Desenhos esquemáticos das bombas de Geissler, Töpler e Sprengel | 59 |
| Figura 1.4: Manômetro de McLeod, sistema de Edison e bomba de Gimingham | 60 |
| Figura 1.5: Bombas Geryk de um e dois cilindros | 62 |
| Figura 1.6: Bombas de Gaede e Langmuir | 64 |
| Figura 1.7: Medidores de pressão usando válvulas | 65 |
| Figura 1.8: Equipamentos para produção de válvulas na RCA (década de 1960) | 66 |
| Figura 1.9: Dispositivos de Hauksbee para estudar os fenômenos elétricos | 68 |
| Figura 1.10: Experimentos de Jean Antoine Nollet com descargas elétricas | 69 |
| Figura 1.11: Dispositivo de Faraday para o estudo das descargas nos gases | 71 |
| Figura 1.12: Regiões da descarga dos raios catódicos | 72 |
| Figura 1.13: Globo usado por Auguste de la Rive no experimento de 1849 | 72 |
| Figura 1.14: Aparelhagem dos experimentos de Edmond Becquerel | 74 |
| Figura 1.15: Alguns modelos de tubos de Geissler | 76 |
| Figura 1.16: Aparelhagem de teste de descarga nos gases de Gassiot (1858) | 78 |
| Figura 1.17: Equipamento para produção de vácuo de W. de la Rue e H. Müller (1878) | 80 |
| Figura 1.18: Desenho original e um exemplar do tubo de Crookes | 81 |
| Figura 1.19: Aparelhagem de Hertz (experimento de 1883) | 82 |
| Figura 1.20: Dispositivo construído por Lenard para o estudo dos raios catódicos | 83 |
| Figura 1.21: Dispositivo de Perrin para estudar os raios catódicos | 84 |
| Figura 1.22: Dispositivo de Thomson para testar a deflexão dos raios catódicos | 84 |
| Figura 1.23: Primeiro tubo de raios catódicos de Braun | 86 |
| Figura 1.24: Três reguladores de arco de carbono | 90 |
| Figura 1.25: Vela Iablochkov | 91 |
| Figura 1.26: Primeira lâmpada de mercúrio de Cooper Hewitt (1900) | 96 |
| Figura 1.27: Lâmpada fosforescente com cobertura metálica de Moore (1895) | 97 |
| Figura 1.28: Processo de manufatura das lâmpadas na Swan Lamp Company | 102 |
| Figura 1.29: O indicador elétrico de Edison | 104 |
| Figura 1.30: O vidreiro tradicional e a máquina de fazer bulbos de Owens | 106 |
| Figura 1.31: Espectro eletromagnético | 109 |
| Figura 1.32: A descoberta dos raios X | 112 |
| Figura 1.33: Amplificador mecânico básico | 124 |
| Figura 1.34: Aparelhagem do experimento de Hertz | 126 |
| Figura 1.35: Transmissor de Fleming para comunicação transatlântica | 129 |
| Figura 1.36: Sinais obtidos por geradores de centelha | 131 |

| | |
|--|-----|
| Figura 1.37: Dispositivos de arrefecimento de centelhas | 132 |
| Figura 1.38: Gerador síncrono de centelhas de Fessenden | 133 |
| Figura 1.39: O “arco cantor” e “falante” de Duddell | 134 |
| Figura 1.40: Gerador de arco de Poulsen | 135 |
| Figura 1.41: Alternadores de Fessenden e Alexanderson | 137 |
| Figura 1.42: Primeiros detectores de sinais | 139 |
| Figura 1.43: Receptores com diferentes tipos de detectores | 140 |
| Figura 2.1: Panorama dos principais precursores das válvulas | 143 |
| Figura 2.2: Válvula amplificadora de Cooper Hewitt | 146 |
| Figura 2.3: Válvula para geração de C.A. de Cooper Hewitt | 146 |
| Figura 2.4: Válvula retificadora de Cooper Hewitt | 147 |
| Figura 2.5: Diodo de Fleming | 149 |
| Figura 2.6: Receptor primitivo com a válvula de Fleming | 149 |
| Figura 2.7: Amplificador de Gerdien | 150 |
| Figura 2.8: Triodo de Lieben, Reisz e Strauss (relé LRS) | 152 |
| Figura 2.9: Audion de Forest | 153 |
| Figura 2.10: Amplificador construído por Forest na Federal | 154 |
| Figura 2.11: Amplificador de Arnold | 155 |
| Figura 2.12: Triodo como amplificador | 157 |
| Figura 2.13: Equipamento da transmissão de radiotelefonia intercontinental (EUA, 1915) ... | 159 |
| Figura 2.14: A válvula TO-220 | 160 |
| Figura 2.15: Símbolos de algumas válvulas básicas | 162 |
| Figura 2.16: A válvula <i>welsh peanut</i> | 164 |
| Figura 2.17: Vista de triodo e tetrodos | 165 |
| Figura 2.18: Válvulas múltiplas | 167 |
| Figura 2.19: Válvulas miniatura e subminiatura | 169 |
| Figura 2.20: Aparelho auditivo com válvulas miniatura, cerca de 1947 | 169 |
| Figura 2.21: Nuvistor | 170 |
| Figura 2.22: Osciladores de alta frequência | 172 |
| Figura 2.23: Limitação da resposta em alta frequência dos triodos | 173 |
| Figura 2.24: Tipos de bases de válvulas | 174 |
| Figura 2.25: Tipos de encapsulamento | 175 |
| Figura 2.26: Válvulas <i>acorn</i> e <i>doorknob</i> | 176 |
| Figura 2.27: Algumas válvulas de alta frequência | 177 |
| Figura 2.28: A klystron | 179 |
| Figura 2.29: A magnetron | 180 |
| Figura 2.30: A válvula TWT | 183 |
| Figura 2.31: A gyrotron | 185 |

| | |
|--|-----|
| Figura 2.32: Símbolos de algumas válvulas industriais | 186 |
| Figura 2.33: A tungar | 187 |
| Figura 2.34: Piotron e dynatron | 188 |
| Figura 2.35: Phanotron, thyatron e trigatron | 189 |
| Figura 2.36: Retificadora de arco de mercúrio, ignitron e excitron | 191 |
| Figura 2.37: A krytron | 192 |
| Figura 2.38: Fototubo e válvula fotomultiplicadora | 194 |
| Figura 2.39: Projetor de imagens de Dieckmann e Glage | 197 |
| Figura 2.40: Sistema de transmissão e recepção de imagens de Rosing | 198 |
| Figura 2.41: Os TRCs do sistema de televisão de Zworykin | 199 |
| Figura 2.42: Tubos de imagem para câmeras de vídeo..... | 200 |
| Figura 2.43: Cinescópios..... | 201 |
| Figura 2.44: Receptor de TV com mostrador de projeção | 201 |
| Figura 2.44: O monoscópio | 202 |
| Figura 2.45: O tubo Charactron | 203 |
| Figura 2.47: O tubo Williams | 204 |
| Figura 2.48: O olho mágico | 205 |
| Figura 2.49: Dekatron | 206 |
| Figura 2.50: Tubo nixie | 206 |
| Figura 2.51: Partes constituintes de uma válvula de recepção antiga | 208 |
| Figura 2.52: Produção de componentes | 209 |
| Figura 2.53: Etapas da montagem (Marconi RVC, Toronto, 1944) | 209 |
| Figura 2.54: Produção do vácuo | 210 |
| Figura 2.55: Etapa de testes | 210 |
| Figura 2.56: Técnico de manutenção examinando uma TV (1950) | 211 |
| Figura 2.57: Testador de válvulas Sylvania (final dos anos 1950) | 212 |
| Figura 2.58: Circuito somador analógico | 215 |
| Figura 3.1: Esquema do receptor heteródino de Fessenden | 223 |
| Figura 3.2: Circuito super-heteródino original de Armstrong | 224 |
| Figura 3.3: Diagrama elétrico de um transmissor de radiodifusão AM de 50 kW | 227 |
| Figura 3.4: Rádio portátil Jewel (EUA, década de 1940) | 229 |
| Figura 3.5: Torre usada pelo sistema de retransmissão de micro-ondas (EUA) | 233 |
| Figura 3.6: Circuito do repetidor unidirecional do primeiro cabo transatlântico (1956) | 235 |
| Figura 3.7: Esquema dos transmissores do Sputnik-1 | 237 |
| Figura 3.8: Áreas de cobertura dos satélites Intelsat em 1969 | 238 |
| Figura 3.9: Panorama do desenvolvimento dos computadores (1936-1965) | 245 |
| Figura 3.10: Válvulas dos computadores IBM série 700 | 247 |
| Figura 3.11: Primeiras telas de computador | 250 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.12: O Dataphone | 251 |
| Figura 3.13: Geração de CC com válvulas retificadoras de arco de mercúrio | 254 |
| Figura 3.14: Circuito de ativação e controle de uma máquina de solda | 254 |
| Figura 3.15: A invenção do transistor e a instrumentação valvulada | 255 |
| Figura 3.16: Diagramas do aparelho de raios X e do microscópio eletrônico | 256 |
| Figura 3.17: Diagrama do espectrômetro de massa de Aston | 256 |
| Figura 3.18: Diagrama de um ciclotron | 258 |
| Figura 3.19: Circuito disparador de um ciclotron e instrumentação associada | 258 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | Página |
|---|--------|
| Gráfico 1.1: Níveis máximos de vácuo obtidos de 1660 a 1900 | 62 |
| Gráfico 1.2: Níveis máximos de vácuo obtidos no século XX | 66 |
| Gráfico 2.1: Potência de saída em função da frequência de operação | 184 |
| Gráfico 2.2: Produção anual de lâmpadas incandescentes e válvulas nos EUA (1880-1940) . | 207 |
| Gráfico 2.3: Produção anual de válvulas receptoras nos EUA e no Japão (1900-1990) | 216 |

LISTA DE QUADROS

| | Página |
|---|--------|
| Quadro 1.1: Comparação entre dois tipos de dínamos de 1878 usados na Europa | 45 |
| Quadro 1.2: Primeiras lâmpadas incandescentes – 1835-1880 | 99 |
| Quadro 1.3: Evolução da rede de cabos submarinos | 116 |
| Quadro 2.1: Lista dos descobridores da oscilação segundo país e ano | 158 |
| Quadro 2.2: Parâmetros das válvulas de potência TO-220 | 160 |
| Quadro 2.3: Famílias de válvulas de eletrodos planares | 176 |
| Quadro 2.4: Válvulas (recepção) X transistores bipolares (baixa e média potência) | 217 |
| Quadro 3.1: Panorama das aplicações das válvulas | 221 |
| Quadro 3.2: Faixas de frequência utilizadas em radiotelefonia e radiodifusão | 227 |
| Quadro 3.3: Receptores de rádio por 1.000 habitantes em alguns países (1936-1937) | 228 |
| Quadro 3.4: Características dos principais computadores valvulados criados até 1950 | 246 |
| Quadro 3.5: Características dos principais computadores valvulados criados após 1950..... | 249 |
| Quadro 3.6: Descobertas, invenções e inovações ligadas às válvulas (séc. XVII-XX) | 261 |

SUMÁRIO

| | Página |
|---|--------|
| INTRODUÇÃO | 13 |
| O TEMA: DOS CABOS SUBMARINOS À VÁLVULA | 13 |
| POR QUE ABORDAR UMA TECNOLOGIA APARENTEMENTE SUPERADA? | 16 |
| QUADRO TEÓRICO | 18 |
| METODOLOGIA | 32 |
| 1 CONCEPÇÕES, DESCOBERTAS E INVENÇÕES PRECURSORAS | 36 |
| 1.1 A ELETRICIDADE | 38 |
| 1.1.1 Os primeiros instrumentos de pesquisa | 38 |
| 1.1.2 Eletricidade e magnetismo até o século XVIII | 39 |
| 1.1.3 A corrente elétrica e a indução magnética | 41 |
| 1.1.4 A Revolução Elétrica e o surgimento da indústria elétrica | 46 |
| 1.1.5 O caminho para o elétron | 48 |
| 1.2 A PRODUÇÃO DO VÁCUO | 51 |
| 1.2.1 Primeiro período: Descoberta do vácuo (1600 a 1660) | 53 |
| 1.2.2 Segundo período: Experimentos no vácuo (1660 a 1850) | 55 |
| 1.2.3 Terceiro período: Tecnologia do vácuo (1850 a 1900) | 58 |
| 1.2.4 Quarto período: O vácuo na indústria (1900 a 1950) | 63 |
| 1.3 AS DESCARGAS ELÉTRICAS NOS GASES | 67 |
| 1.3.1 As descargas nos gases como fenômenos elétricos | 67 |
| 1.3.2 A relação entre fenômenos eletromagnéticos e óticos | 76 |
| 1.3.3 A natureza dos raios catódicos | 81 |
| 1.3.4 O tubo de raios catódicos | 85 |
| 1.4 AS LÂMPADAS ELÉTRICAS | 87 |
| 1.4.1 As lâmpadas de arco | 88 |
| 1.4.2 As lâmpadas frias | 94 |
| 1.4.3 As lâmpadas incandescentes | 97 |
| 1.5 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO | 109 |
| 1.5.1 A luz visível e as regiões próximas | 110 |
| 1.5.2 As ondas de rádio e as micro-ondas | 110 |
| 1.5.3 Os raios X e os raios gama | 111 |
| 1.6 PANORAMA DAS TELECOMUNICAÇÕES | 113 |
| 1.6.1 A telegrafia | 113 |
| 1.6.2 A telefonia | 117 |
| 1.6.3 A radiotelegrafia e a radiotelefonia | 125 |
| 2 TECNOLOGIA DAS VÁLVULAS | 142 |
| 2.1 A INVENÇÃO DAS VÁLVULAS | 144 |

| | |
|--|-----|
| 2.1.1 As primeiras válvulas: Cooper Hewitt | 145 |
| 2.1.2 A válvula termoiônica | 147 |
| 2.2 DESENVOLVIMENTO E DIVERSIFICAÇÃO DAS VÁLVULAS | 161 |
| 2.2.1 Válvulas para aplicações em baixas e médias frequências | 162 |
| 2.2.2 Válvulas para aplicações em altas frequências | 171 |
| 2.2.3 Outras válvulas para aplicações industriais, militares e científicas | 185 |
| 2.2.4 Válvulas para aplicações em imagem | 195 |
| 2.3 PRODUÇÃO E MANUTENÇÃO | 207 |
| 2.3.1 A produção das válvulas | 207 |
| 2.3.2 Os novos técnicos | 211 |
| 2.4 A CHEGADA DO TRANSÍSTOR | 212 |
| 3 CONSEQUÊNCIAS | 219 |
| 3.1 APLICAÇÕES DE CONSUMO: COMUNICAÇÕES | 221 |
| 3.1.1 O rádio | 222 |
| 3.1.2 A televisão | 230 |
| 3.1.3 Os satélites de comunicações | 236 |
| 3.2 APLICAÇÕES EM INFORMAÇÕES | 239 |
| 3.2.1 O radar | 239 |
| 3.2.2 O computador | 243 |
| 3.3 OUTRAS APLICAÇÕES | 253 |
| 3.3.1 Aplicações industriais | 253 |
| 3.3.2 Aplicações científicas e de instrumentação | 255 |
| 3.3.3 Aspectos da paz e da guerra | 257 |
| 3.4 CENTROS DE PODER | 261 |
| CONCLUSÃO | 262 |
| REFERÊNCIAS | 272 |
| APÊNDICE: Lista de pessoas citadas, com alguns dados | 300 |
| ANEXOS: Folhas de dados de algumas válvulas | 308 |

INTRODUÇÃO

O presente estudo examina a história da válvula eletrônica, abordada sob três enfoques distintos mas entrelaçados. O primeiro consiste no estudo da válvula em si mesma: suas características técnicas, suas variedades, as inovações e os aperfeiçoamentos de que foi objeto, e a dinâmica da sua produção. O segundo enfoque examina as relações entre esse dispositivo singular e uma série de invenções e descobertas que foram suas precursoras e aplicações, a fim de avaliar a relação da válvula com os desenvolvimentos científicos e tecnológicos, na área da Eletrônica, anteriores e posteriores à sua criação. O terceiro enfoque insere essa história no contexto social em que ela ocorreu, examina motivações, condições de ocorrência e consequências dos eventos, e busca identificar algumas lições que possam ser aproveitadas para o presente e o futuro. O foco do estudo não é apenas a válvula em si mesma, mas também seu papel na configuração da infraestrutura tecnológica que permitiu a criação e a difusão de produtos, serviços e recursos de exercício do poder característicos da modernidade do século XX.

O TEMA: DOS CABOS SUBMARINOS A VÁLVULA

Minha intenção original, ao iniciar a pesquisa para a tese de Doutorado, era dar continuidade ao estudo iniciado na dissertação de Mestrado, que discutiu o contexto tecnológico dos cabos submarinos telegráficos no século XIX (KOCHER, 2014). Esse trabalho gerou duas indagações principais. A primeira refere-se à maneira como a tecnologia de comunicação por cabos submarinos, para se formar e evoluir, apropriou-se de saberes teóricos e práticos construídos coletivamente ao longo do tempo, inclusive dentro de outras áreas de aplicação, como os conhecimentos acerca de materiais, da construção de aparelhos e de outras partes que foram incorporadas ao seu sistema. A segunda indagação refere-se ao modo como se desenvolveram as tecnologias de comunicação nos séculos XIX e XX: como a rede de cabos submarinos, criada para a telegrafia, evoluiu até se tornar a infraestrutura da Internet; paralelamente a ela, como se deu a evolução das tecnologias de comunicação alternativas surgidas ao longo desse tempo - rádio, telefonia e satélites -, e qual foi a relação destas com a tecnologia de cabos submarinos. Essas indagações, combinadas, formaram o tema do projeto inicial da nova pesquisa que, avançando pelos séculos XX e XXI, focalizaria

a moderna infraestrutura que suporta os serviços de telecomunicações de longa distância.

Ao concluir a dissertação, estava claro para mim que, para as tecnologias de comunicações, em especial para as de média e longa distância, o grande divisor de águas, em termos tecnológicos, foi o surgimento da Eletrônica. Equipamentos eletrônicos, portáteis ou não, com a capacidade de comunicação instantânea; computadores dos mais diversos tipos e desempenhos; sistemas de controle e instrumentos de laboratório, tornados possíveis pelos circuitos integrados com escalas de integração que abrigam milhares e, em certos casos, milhões de transístores: todo esse mundo foi criado graças às técnicas de tratamento de sinais desenvolvidas pela Eletrônica e pelos métodos de produção industrial. Por causa dessa percepção, o projeto original da pesquisa deu grande peso ao estudo do desenvolvimento das teorias e técnicas que formaram o corpo de conhecimentos da Eletrônica.

No curso das pesquisas iniciais, um dispositivo se destacou por sua presença constante como elemento-chave nas tecnologias abordadas: a válvula eletrônica. Começando a estudar os aspectos tecnológicos dos sistemas de telegrafia, telefonia, rádio, computadores e satélites, precisei recuar, no exame dos pré-requisitos de cada um deles, até chegar à válvula. Desta forma, esse dispositivo emergiu do estudo como uma espécie de nó do qual derivaram (ou onde se encontraram) os diferentes sistemas de comunicações desenvolvidos no século XX com tecnologia eletrônica. A importância da válvula foi tal, que motivou a publicação de obras exclusivamente dedicadas a ela, abordando sua história em geral, como *The thermoionic vacuum tubes and its applications* (BIJL, 1920), *Vacuum tubes* (SPANGENBERG, 1948), *Saga of the vacuum tube* (TYNE, 1994), *70 years of radio tubes and valves* (STOKES, 1997) e *History of electron tubes* (OKAMURA, 1994) ou de um tipo específico de válvula, como *Storage tubes and their basic principles* (KNOLL; KAZAN, 1952), *Soviet development of gyrotrons* (KASSEL, 1986) e *Power vacuum tubes handbook* (WHITAKER, 2012). As válvulas também têm posição de destaque em algumas obras sobre Eletrônica em geral, como *Electronic inventions & discoveries* (DUMMER, 1983), e sobre tecnologias e sistemas específicos, como *Introduction to radar systems* (SKOLNIK, 1962), *La historia y cronología de la radiocomunicación* (MORENO QUINTANA, [199-]), *The first computers* (ROJAS; HASHAGEN, 2000), *Television innovations* (HOWETT, 2006) e *History of wireless* (SARKAR, 2006).

A válvula possibilitou o desenvolvimento da Eletrônica em sua primeira fase, antes do surgimento dos transístores, que permitiram todo o desenvolvimento posterior com facilidade e desenvoltura (BHUYAN, 2019; BIJL, 1920; DUMMER, 1983; TYNE, 1994; STOKES, 1997). A criação das válvulas foi estimulada pelas necessidades das telecomunicações, e

inicialmente foi levada adiante para atender à demanda de amplificação da voz nos enlaces telefônicos terrestres de longa distância. A seguir, as válvulas foram utilizadas nos enlaces radiotelegráficos e radiotelefônicos transoceânicos. No começo do século XX, a descoberta de que elas poderiam gerar frequências bem mais altas do que as que até então vinham sendo empregadas, e a criação de válvulas de potência, propiciaram o desenvolvimento da nascente tecnologia da radiodifusão, no sentido de favorecer o abandono das tecnologias eletromecânicas de geração de onda portadora, e permitiram, em um segundo momento, estabelecer comunicações de longa distância empregando ondas curtas, o que teve consequências econômicas e geopolíticas substanciais (HEADRICK, 1991; HEADRICK; GRISSET, 2001). Em termos tecnológicos, as válvulas permitiram que os sistemas eletrônicos proporcionassem maior velocidade de sinalização e trabalhassem com maiores faixas de frequência (banda passante). Tratou-se portanto de uma mudança qualitativa, porque, pela sua própria natureza, os dispositivos eletromecânicos possuem tempos de comutação e, portanto, velocidades de transmissão limitadas pela inércia inerente às suas partes móveis.

As válvulas também foram usadas na criação e no aperfeiçoamento do receptor de rádio, da televisão, do cinema, dos computadores, satélites e outros dispositivos e sistemas (TYNE, 1994; WHITAKER, 2012). Além de representar um enorme avanço em termos de desempenho em relação à tecnologia eletromecânica em suas áreas de aplicação tradicionais, a válvula proporcionou a abertura de novos campos de aplicação, como a indústria elétrica, que, devido às necessidades de controle de potência, também contribuiu para o desenvolvimento tecnológico das válvulas, seguindo caminhos paralelos de pesquisa e desenvolvimento na mesma época em que as válvulas começavam a ser utilizadas nos sistemas de rádio. Do ponto de vista da história da ciência e da técnica, essa trajetória tem um interesse especial, pois permitiu a criação da eletrônica de potência, voltada para aplicações industriais e comerciais, desenvolvidas no contexto da disseminação da eletrificação, processo intensificado nas primeiras décadas do século XX (BRITAIN, 1980; GUARNIERI, 2018).

Assim, a válvula foi um dos dispositivos que contribuíram para dinamizar, além do desenvolvimento científico e tecnológico, também o surgimento da sociedade de consumo e das indústrias de entretenimento. Ela teve uma presença pervasiva, não apenas nas telecomunicações, mas também em outros equipamentos e sistemas técnicos que surgiram e se consolidaram em outros ramos de atividades comerciais, industriais, militares e científicas que marcaram o século XX, como a instrumentação científica e industrial, que, antes da chegada do transistor e demais dispositivos semicondutores, já existiam como tecnologias maduras no tempo das válvulas. Em suma, a válvula teve grande importância na formação de

tecnologias que ajudaram a configurar a modernidade do século XX.

As válvulas começaram a perder terreno conforme os transístores foram se mostrando capazes de igualar ou superar seu desempenho (e seu preço) em aplicações comerciais de consumo. Entretanto, não é verdade que elas desapareceram subitamente, sendo massivamente substituídas pelos novos componentes. As duas tecnologias coexistiram por bastante tempo e foi comum a criação de aparelhos híbridos, que combinavam as vantagens das válvulas com as dos transístores.

Mas a universalidade e a persistência não são as únicas características notáveis da válvula. Pensemos em outros dispositivos tecnológicos utilizados em artefatos emblemáticos do mundo moderno como, por exemplo, os motores a combustão interna ou os motores elétricos. O que faz um motor? Ele converte alguma forma de energia em energia mecânica, gerando movimento. E o que faz uma válvula? Dependendo de suas características físicas e dos valores de tensão aplicados aos seus eletrodos, ela pode amplificar sinais de áudio ou de rádio, oscilar, retificar, modular ou demodular (na detecção); regular tensão; detectar radiações ionizantes; converter luz em eletricidade; captar ou produzir imagens; e atuar como elemento de comutação. Durante boa parte do século XX, não houve outro dispositivo que se prestasse a tal variedade de funções. Essa versatilidade é outra característica que tornou a válvula um dispositivo único, ou pelo menos bastante peculiar, no universo das tecnologias.

POR QUE ABORDAR UMA TECNOLOGIA APARENTEMENTE SUPERADA?

As reflexões descritas nos parágrafos anteriores levaram-me a considerar que o estreitamento do foco do estudo, elegendo a válvula como tema, seria um caminho fecundo de trabalho. Através da válvula, é possível examinar como se deu o processo de criação científica e tecnológica, rastreando, desde a sua criação e ascensão, até o seu declínio, um dispositivo típico de quase todo o século XX, cuja influência contribuiu para a criação e dinamização de diferentes ramos industriais e científicos.

A abordagem do tema foi determinada pelas lacunas que percebi em seu estudo. Entre as obras que falam especificamente das válvulas, poucas as examinam do ponto de vista histórico (TYNE, 1994; STOKES, 1997). São mais comuns as obras descritivas dos aspectos técnicos dos dispositivos (SPANGENBERG, 1948; WHITAKER, 2012). Alguns autores reconhecem o papel da válvula como inauguradora da Eletrônica, mas tratam dela rápida e

superficialmente, passando logo a detalhar a dita “Eletrônica moderna” dos transístores (BHUYAN, 2016). Existem ainda os autores que fazem uma abordagem histórica, mas limitada a uma linha tecnológica, como o desenvolvimento da eletrônica de potência na *General Electric* citado em Brittain (1980), ou o papel de corporações como a AT&T, que foi fundamental pelo seu protagonismo no aperfeiçoamento da válvula original amplificadora de áudio e no desenvolvimento de válvulas de potência de RF (FAGEN, 1975), ou uma aplicação, como as válvulas receptoras usadas em comunicações (TYNE, 1994; STOKES, 1997). Mas não encontrei qualquer estudo que faça uma abordagem histórica do conjunto de conhecimentos científicos e posteriores desenvolvimentos tecnológicos associados à válvula, relacionando-os com o contexto histórico de sistemas técnicos e equipamentos relevantes para o século XX.

É verdade que, após fazer parte da cultura popular por várias décadas do século XX, as válvulas estavam praticamente desaparecidas dos aparelhos de uso cotidiano nos primeiros anos do século XXI, sobrevivendo apenas na memória popular com uma dose de nostalgia, talvez por estarem associadas a lembranças pessoais ou familiares de equipamentos de consumo em que eram usadas, como televisores, receptores de rádio e amplificadores de áudio de alta fidelidade (*hi-fi*), que foram perdendo espaço à medida que entravam em cena equipamentos transistorizados. Como a prestação de serviços em relação a esses aparelhos era um importante mercado de trabalho para os técnicos de eletrônica, o estudo das válvulas foi sendo progressivamente retirado dos cursos de formação desses profissionais, e substituído pelo de dispositivos presentes nos produtos de consumo mais modernos (ROSSI; MARTINS, 2016). Os profissionais mais jovens provavelmente nunca fizeram alguma montagem com válvulas, e talvez nunca as tenham visto como material comum de trabalho (BRAGA, 2019). Mas isso não significa que elas tenham desaparecido totalmente ou que não sejam importantes.

No caso dos audiófilos e músicos, a sobrevivência das válvulas se fundamenta na defesa das suas virtudes quanto à qualidade de reprodução do som dos equipamentos valvulados, comparados com os transistorizados. O mesmo se pode dizer quanto ao radioamadorismo que, mesmo com a sofisticação dos equipamentos mais modernos, ainda encontra emprego para as válvulas no estágio final de amplificação de radiofrequência. E, no fim da segunda década do século XXI, ainda é possível encontrar, na Internet, comunidades de amadores de válvulas, que colecionam esses dispositivos e até os propõem e utilizam para a criação e confecção de projetos eletrônicos, tal é o fascínio das válvulas (RADIOMUSEUM, 2019; ROSSI; MARTINS, 2016; WYATT, 2019).

É importante ressaltar ainda que, em 2019, válvulas continuavam sendo produzidas e usadas em alguns outros nichos importantes, embora, em sua maioria, invisíveis para as pessoas distantes dessas áreas de aplicação específicas (WHITAKER, 2012). Em alguns casos, inclusive, as válvulas **têm** sido ao longo do tempo os dispositivos de primeira escolha para determinadas operações, pois seu desempenho nessas situações é superior ao dos dispositivos mais modernos. Este é o caso, por exemplo, dos elementos submetidos aos altos níveis de radiação das armas nucleares, que afetam os dispositivos de estado sólido (MOE, 1959; BROAD, 1981). Na época da realização desta pesquisa, os usos das válvulas incluíam equipamentos militares como, por exemplo, a arma não-letal de “raio de calor” (US, 2019), e aplicações industriais como o processamento de plasma na produção de semicondutores e também os sistemas de aquecimento dielétrico (HITACHI, 2019; TOSHIBA, 2019). E vale lembrar que a válvula, na mesma época, ainda era usada em um aparelho eletrodoméstico bastante difundido: o forno de micro-ondas que, segundo pesquisa feita em uma amostra de países, em 2008, chegou a estar presente em até 95,8% das residências, sendo essa proporção, de modo geral, diretamente associada à renda *per capita* de cada país (USDA, 2019).

QUADRO TEÓRICO

Abordagem metodológica

O projeto da metodologia do estudo recorreu principalmente, como fontes de recursos conceituais, às obras de José d'Assunção Barros (2004, 2005, 2010, 2011, 2012) e à síntese da teoria da História de Jörn Rüsen elaborada por Rogério C. da Silva (2009), Pedro Spinola P. Caldas (2010), Luiz Sérgio D. da Silva (2017) e William Carlos C. Barom (2017).

A primeira decisão tomada referiu-se ao modelo adotado para orientar o projeto do estudo. A escolha foi o modelo da história-problema, interpretativa, baseada em hipóteses elaboradas a partir de um problema extraído do tema da pesquisa, e que servem como fio condutor para a análise das fontes de informações (BARROS, 2012). Esse modelo se contrapõe a modelos como a história factual, descritiva e baseada na acumulação de dados desconexos que, lidos em ordem cronológica, supostamente “falam por si”; a história “dos grandes homens”, que reduz a história à trajetória de indivíduos isolados, considerados o motor dos acontecimentos; e a história-conjectura, que constrói uma narrativa apoiada em

ideias predefinidas, sem recorrer à pesquisa científica. Concordando com o autor citado, considero que, no âmbito da produção de conhecimentos de cunho científico, “sem problema não há História” (Lucien Febvre, citado por BARROS, 2012, p. 310).

O ponto seguinte foi estabelecer os recortes necessários para a definição do problema da pesquisa. Já estava decidido, na escolha do tema, que o estudo iria correlacionar três linhas de desenvolvimento teórico e tecnológico. A principal é a história da válvula; as secundárias são as histórias dos precursores e das aplicações das válvulas. Para lidar com essas linhas de tempo de modo organizado e adequado ao método da história-problema, cheguei à conclusão de que a melhor abordagem é a serial, que trabalha com a construção de séries históricas a respeito de problemas individualizados (BARROS, 2005). Como afirma esse autor,

[...] optar pelo caminho serial pressupõe necessariamente escolher ou construir um problema condutor muito específico – problema este que é fator fundamental na constituição da própria série. A História Serial veio assim diretamente ao encontro de uma História Problema. [...] A História Serial constitui-se necessariamente de uma leitura da realidade social através da série que foi construída pelo historiador em função de um certo problema [...] nesta modalidade historiográfica, o problema e as fontes chegam juntos: fazem parte um do outro. O que o historiador serial estuda é precisamente a série: este é basicamente o seu recorte e a essência de seu objeto. (BARROS, 2011)

Assim, a seleção das fontes é indissolúvel da definição do problema e de seus recortes temporal e espacial. Em algumas situações, a existência ou não de fontes documentais determina a especificação do problema da pesquisa, estreitando-o num determinado tempo ou lugar. No caso deste estudo, a disponibilidade de fontes documentais (patentes de dispositivos e sistemas, artigos e livros dos próprios autores dos estudos e projetos, relatórios técnicos de organizações), em quantidade e qualidade aceitáveis, permitiu que a delimitação temporal e espacial fosse feita a partir da definição do problema. Existe documentação que pode ser considerada a “certidão de nascimento” de determinado tipo de válvula, estabelecendo assim o início desta série histórica; e documentos que podem ser usados para marcar o fim da série, de acordo com o critério definido para isso. O mesmo vale para as séries temporais dos precursores e das aplicações, que contam com boas fontes documentais para definir seus marcos históricos. Quanto ao recorte espacial, os estudos iniciais demonstraram uma grande concentração dos esforços de desenvolvimento e produção das válvulas nos Estados Unidos e em alguns países europeus (DUMMER, 1983; SETHI, 2013; TYNE, 1994). Essa concentração determinou o recorte geográfico para a busca das principais fontes documentais, mas outros lugares onde houve desenvolvimento e uso de válvulas e/ou suas aplicações não foram ignorados. O assunto será retomado em outros momentos.

Outras escolhas necessárias referem-se a aspectos de método que determinaram quais dados deveriam ser coletados e como seriam manipulados. Segundo Barros (2004), o campo da História contém uma grande quantidade de subdivisões, definidas de acordo com o tema ou domínio (sujeitos ou objetos específicos: mulheres, arte, meio urbano etc.), o método ou abordagem (como e com quem trabalhar: fontes, formas de coleta e análise de dados, campos de observação - local, regional etc.) e o enfoque ou dimensão (o ponto de vista do estudo do objeto: político, demográfico, cultural, técnico, econômico etc.). Barros ressalta que um estudo não se insere numa única subdivisão, e que é usual combinar temas, enfoques e métodos de formas variadas, conforme a conveniência do estudo em pauta. Este foi o modelo usado para definir os traços gerais do projeto. Tendo como domínio geral de estudo o das tecnologias, a proposta da pesquisa foi tomar como ponto de partida uma visão técnico-científica do desenvolvimento da válvula, de seus precursores e aplicações. Este enfoque foi necessário para mostrar as trajetórias e interconexões das contribuições científicas e tecnológicas que colaboraram para a criação da válvula e de suas aplicações. Mas a história técnica foi contextualizada recorrendo principalmente a visões políticas e econômicas, já que o estudo se propôs discutir as motivações e os interesses envolvidos na produção e utilização das tecnologias baseadas em válvulas, bem como as consequências para a sociedade do uso dessas tecnologias.

A organização e análise dos dados foi basicamente qualitativa, embora em alguns momentos tenha recorrido a quantificações para ilustrar o estudo, detalhar e fundamentar conceitos. Isso foi feito porque a abordagem qualitativa não entra em conflito com o paradigma serial, que permite examinar as séries para "perceber tendências, repetições, variações, padrões recorrentes e [...] discutir o documento integrado em uma série mais ampla", sem recorrer a uma abordagem numérica (BARROS, 2011).

Um desafio em toda pesquisa é a criação de instrumentos de análise que evitem a transformação do relatório da pesquisa em simples resumo ou descrição do conteúdo das fontes examinadas. Um desses instrumentos, que se aplica bem ao uso de fontes documentais em pesquisas qualitativas, é a análise de conteúdo, que utiliza um conjunto de categorias (rubricas usadas para organizar os dados em classes ou grupos) criadas pelo pesquisador para extrair dos documentos suas informações essenciais (GUERRA, 2014; CARLOMAGNO; ROCHA, 2016). Segundo esses autores, a elaboração das categorias de análise deve seguir algumas regras: as categorias devem ser bem definidas, homogêneas (uma categoria não pode incluir elementos diferentes), excludentes (um conteúdo não pode ser classificado em duas categorias), exaustivas (devem abranger todo o conteúdo disponível) e pertinentes aos

objetivos da pesquisa. Elaine Guerra (2014, p. 38) lembra que existem diversas modalidades de análise de conteúdo; dentre as citadas pela autora, a que se ajusta às necessidades desta pesquisa é a análise temática. A autora também ressalta que a decisão final sobre quais informações serão relevantes para a análise será tomada após a leitura “livre” de todo o material coletado, a fim de identificar e registrar os dados disponíveis. No caso do presente estudo, uma identificação inicial foi feita durante os estudos exploratórios, de modo que, ao traçar o projeto da pesquisa, eu já contava com um esboço das informações a serem tomadas como categorias de análise. Entretanto, esse conjunto inicial foi revisto e aperfeiçoado no decorrer do exame das fontes utilizadas.

Para a compreensão plena do significado e das implicações da escolha do método de interpretação dos dados, foram de grande utilidade as concepções de método de Jörn Rüsen descritas por Luiz Silva (2017) e Rogério Silva (2009). Para Rüsen, o pesquisador pode entender o fato histórico a partir de três pontos de vista: o humano, que interpreta os fatos como determinados por intenções de indivíduos; o natural, que explica os fatos por condições externas e incontroláveis; e o histórico, que leva em conta o relacionamento entre intenções subjetivas e condições objetivas. Segundo Rüsen, cada um desses modelos explicativos pede um método de interpretação: para o modelo humano, o método hermenêutico, que busca nas fontes a expressão das intenções dos indivíduos; para o natural, o método analítico, que busca nas fontes indicações dos fatores que influenciaram as ações; e para o histórico, o método dialético, que busca nas fontes indicadores de intencionalidade da ação humana e de fatores de contexto. O modelo de Rüsen explica e justifica minha escolha de um caminho dialético para a discussão dos resultados desta pesquisa que se propõe histórica.

Para terminar, uma palavra sobre a construção do texto histórico que, no caso, é este relatório de pesquisa. Trata-se da distinção entre narrativa e narrativismo, termos às vezes confundidos e mal entendidos. De acordo com Luiz Sérgio D. da Silva (2017), a narrativa é a forma de apresentar textualmente, de forma orientada e unificada, o significado dado a fatos que ocorreram num período de tempo. A narrativa em si, como forma de produção textual, não determina o valor do seu conteúdo: no âmbito da História, uma narrativa tanto pode ser factual como crítica, por exemplo. Quanto ao narrativismo, Leonardo de Jesus Silva (2012) explica que, no campo específico da História, é um paradigma da historiografia que se contrapõe ao historicismo. A diferença entre os dois, dita de forma resumida, é que, no historicismo, a pesquisa predomina sobre o texto, que serve para dar forma aos resultados, e no narrativismo, a narrativa substitui a pesquisa, torna-se o centro das reflexões do historiador (SILVA, L. J., 2012). Essa digressão serve para afirmar que o relatório deste estudo consiste

em uma narrativa de cunho historicista, tomando o cuidado de articular as três fases do trabalho histórico - "escrituralidade, explicação compreensiva e prova documental" -, para que o texto seja capaz de colocar o leitor frente a frente com a representação do fato histórico reconstruído (SILVA, L. J, 2012, p. 112-113).

Referencial teórico

Para abordar os processos de pesquisa e desenvolvimento que levaram à configuração da infraestrutura tecnológica da modernidade no século XX, o presente estudo se apoiou num referencial teórico cujo ponto de partida é a visão geral do relacionamento entre ciência e sociedade desenvolvida por Hilton Japiassu (1975), em *O mito da neutralidade científica*, e Álvaro Vieira Pinto (1969) em *Ciência e existência*. Segundo Japiassu, se observarmos como a ciência funciona,

[...] perceberemos [...] que as condições reais em que são produzidos os conhecimentos objetivos e racionalizados, estão banhadas por uma [...] atmosfera sócio-político-cultural. É esse enquadramento sócio-histórico, fazendo da ciência um produto humano, [...] que leva os conhecimentos objetivos a fazerem apelo [...] a pressupostos teóricos, filosóficos, ideológicos ou axiológicos nem sempre explicitados. Em outros termos, não há ciência "pura", "autônoma" e "neutra" [...] se [...] examinarmos [o cientista] em [...] suas condições concretas de trabalho, constataremos que a "Razão" científica não é imutável. [...] É histórica. Suas normas [são] historicamente condicionadas. [...] A produção científica se faz numa sociedade determinada que condiciona seus objetivos, seus agentes e seu modo de funcionamento. [...] Carrega em si os traços da sociedade que a engendra, reflete suas contradições, tanto em sua organização interna quanto em suas aplicações. (JAPIASSU, 1975, p. 10-11)

Álvaro Vieira Pinto (1969) discute essa dinâmica afirmando que a finalidade da investigação, realizada de modo sistemático pela ciência, é a apropriação da natureza, fundando-se assim num projeto de incremento da capacidade produtiva, transformadora, do trabalho. Desta forma, a ciência tem uma finalidade social. Entretanto, o autor ressalta que

[...] a questão é quem dita ou define essa finalidade [...] na sociedade onde reinam contradições [...] reduzidas minorias [...] se apropriam do direito de estabelecer as finalidades sociais, entre as quais se conta a de conceber os programas da pesquisa científica, criar as instituições educacionais e os laboratórios para tal fim, recrutar o pessoal [...] Desse modo, desde o início o trabalho científico assume caráter de dependência em relação a certas classes sociais [...]. (PINTO, 1969, p. 246)

Para o aprofundamento do presente estudo em seu campo de conhecimento específico, que é o técnico, uma referência fundamental é *O conceito de tecnologia* de Álvaro Vieira

Pinto (2005), onde esse autor examina detalhadamente os conceitos de técnica e tecnologia em si e em suas relações com a sociedade. Criticando as concepções da técnica como o “milagre” moderno ou como a grande vilã desumanizadora, esse autor ressalta que ambas ocultam as dimensões política, econômica e social da técnica. O que é um erro, pois

[...] o que produz o que atualmente se produz é a estrutura econômica e política da sociedade. Os homens nada criam, nada inventam nem fabricam que não seja expressão das suas necessidades, tendo de resolver as contradições com a realidade. (PINTO, 2005, p. 49)

Dentro do escopo deste estudo, tornou-se necessário então buscar instrumentos eficazes para identificar os “traços da sociedade” presentes na produção científica e técnica na área da Eletrônica. Vieira Pinto propõe alguns pontos a serem usados como fios condutores do estudo das técnicas: 1) investigar o processo histórico gerador das técnicas; 2) estudar as condições que levam à substituição de uma técnica por outra; 3) ao invés de buscar o que há de novo ou extraordinário na tecnologia atual, examinar o que existe em comum entre o que foi o “novo” nas fases tecnológicas sucessivas (PINTO, 2005, p. 51-52).

Estão aí colocadas, no pensamento dos dois autores, as duas dimensões do método dialético aplicado à pesquisa histórica, minuciosamente examinado por Vieira Pinto (1969). De um lado, temos o objeto individualizado, com suas características únicas; do outro, o contexto em que ele existe. Na visão dialética, o objeto não se reduz a uma única dessas dimensões nem à simples justaposição delas. Ele não existe isolado: sua realidade consiste na relação entre individual e universal, entre objeto e contexto.

Saga of the vacuum tube (TYNE, 1977), embora seja obra de divulgação, é um bom exemplo de uma narrativa histórica fundamentada em pesquisa, articulada e contextualizada, que por isso tomei como modelo do caminho a seguir na organização final do produto da pesquisa. Após apresentar o conjunto de pesquisas e invenções precursoras, realizadas em instituições acadêmicas e laboratórios industriais, o autor fala da produção de válvulas e suas aplicações. Essa narrativa é contextualizada com o exame das demandas externas que afetaram a direção e o ritmo do desenvolvimento das válvulas, além da dinâmica da produção industrial nos países onde ela ocorreu e o panorama da utilização dos dispositivos.

Diálogos interdisciplinares

Para fundamentar a discussão do contexto sociopolítico e econômico em que as

válvulas e suas aplicações se desenvolveram, recorri a pensadores das áreas de ciências sociais e filosofia. Da economia política adotei os conceitos de modo de produção (em particular o capitalismo), de valor-trabalho e classes de Karl Marx (2008, 2013). Também levei em conta Pomeranz (2000) e Gunder Frank (1998), que dão ênfase à retomada do Leste Asiático como centro do dinamismo da economia mundial. A discussão de Amin (2009) sobre as assimetrias e a crítica ao eurocentrismo foi particularmente importante para esta pesquisa porque, por força da concentração das atividades de pesquisa, desenvolvimento e produção das válvulas e suas aplicações em parte da Europa, notadamente Grã Bretanha, França, Alemanha e Holanda, e nos Estados Unidos, conforme as leituras exploratórias indicaram, o estudo pode dar a impressão de se vincular ao ponto de vista eurocêntrico, mas isso não é verdade. Na análise do contexto, levei em consideração o sistema capitalista como um todo com suas determinações e recorri às colocações de Harvey (2001) e Arrighi (2007) nas respectivas análises da dinâmica de acumulação e circulação do capital em relação à lógica geográfica, além de Echeverría (1997) nas suas colocações sobre a relação entre modernidade e capitalismo.

Para analisar a relação entre técnica e sociedade, busquei apoio em obras de historiadores e filósofos que focalizaram o tema. Leo Marx e Merritt Smith (1994), além de Claudio Katz (1998), examinaram questões como a relação entre tecnologia e cultura, a qualidade real ou ilusória do conceito de progresso, a validade da noção de determinismo tecnológico e a visão distópica da relação entre a tecnologia e uma sociedade "pré-tecnológica" idealizada. De modo crítico, também levei em consideração os comentários de Daniel Bell (1979, 1999) sobre as soluções tecnocráticas para problemas sociais. Álvaro Vieira Pinto (2005) criticou o que chamou de maravilhamento da técnica, não adotando uma visão tecnocrática nem pessimista da tecnologia. Justificando a abordagem problematizante que escolhi, Milton Santos (2006) afirma que uma técnica é um meio pelo qual o ser humano realiza sua vida relacionando-se com o ambiente. Lembra ainda que uma técnica só existe quando é incorporada à vida da sociedade que a utiliza e que, por isso, não faz sentido contar a história de uma técnica isolada da sociedade. A respeito do potencial de ação das técnicas na configuração espacial de uma sociedade, Pierre Gourou afirma que a civilização moderna dispõe de "técnicas de enquadramento irresistíveis (transporte, telefone, rádio, televisão, publicidade comercial e propaganda política) que podem controlar vastos espaços, numerosas populações, cidades enormes" (Gourou, citado por SANTOS, 2006, p. 20).

Para a análise das relações entre ciência, técnica, empresas e governos quanto ao desenvolvimento científico e tecnológico, recorri principalmente aos conceitos desenvolvidos

por David Noble (1979) que apresentou a tecnologia como força que configura a gestão numa sociedade capitalista industrial, analisando o papel das estruturas corporativas e o estabelecimento da filosofia industrial nos EUA, com a ascensão do capitalismo corporativo que, no seu entender, controla a ciência e a tecnologia. Drucker (1970), tecendo considerações sobre o impacto da ciência e da técnica na sociedade, entende que a ciência é direcionada à aquisição de um conhecimento racional, enquanto a tecnologia, de caráter eminentemente utilitário, diz respeito ao controle. Ainda sobre esse tema, Nathan Rosenberg e David Mowery (2005) analisam as continuidades e descontinuidades no desenvolvimento tecnológico: articulam o conceito de que limitações do desempenho dos dispositivos (“gargalos”) levam a saltos qualitativos periódicos, analisando as motivações que levaram ao desenvolvimento de novos dispositivos. Ainda sobre as motivações das inovações tecnológicas, Katz (1997, 1999) propõe que a tecnologia é uma força produtiva e, argumentando quanto à abordagem culturalista da tecnologia, enfatiza o caráter objetivo desta, sendo o processo de atualização uma decorrência da necessidade constante de lucro; em função disso, Dussel (1984), para melhor estudar o processo de inovação, propõe a distinção entre “tecnologia em geral” e “tecnologia como capital”.

Procurando identificar os locais de produção do conhecimento, levei em conta as considerações de David Edgerton (2004), bem como Robert Fox e Anna Guagnini (1999), que destacam o fato de que o desenvolvimento da ciência ocorreu não somente na academia, mas também em laboratórios industriais.

O modelo de interdependência de Hugh Aitken (1976) foi útil para entender as interações entre ciência, tecnologia e economia. Aitken define três momentos na interação entre esses elementos: 1) a descoberta dos princípios científicos (a construção da teoria); 2) o desenvolvimento tecnológico; 3) a produção e comercialização com suas consequências econômicas. Aitken explica como se dá essa interação: no seu modelo, ciência, tecnologia e economia constituem três sistemas de ação humana que podem ser entendidos como sistemas de processamento de informação, cada um gerando, absorvendo e armazenando informações, e ligados por uma rede de trocas de informações. Os elementos são interdependentes e a informação pode fluir em qualquer direção entre os sistemas. Entretanto, a passagem não é direta, pois a informação produzida num sistema não é diretamente utilizável pelos outros, precisando ser traduzida, o que ocorre na interface entre cada par de sistemas. Aitken ressalta que a tradução não é uma simples duplicata do texto original numa nova linguagem; se fosse assim, na passagem de informação entre ciência e tecnologia, esta seria apenas ciência aplicada, sem criação própria. Ao contrário, a tradução é reinterpretação ou recriação baseada

no texto original, produzindo um conteúdo inserido no contexto do sistema a que se destina.

Definições

Esta seção apresenta apenas as definições necessárias de termos relacionados com o objeto do estudo, e que precisam ser esclarecidos previamente. Definições e explicações que fazem parte da própria pesquisa são apresentadas nas seções correspondentes.

O primeiro ponto a esclarecer é o conceito e a padronização do uso do termo *válvula*, que tem diferentes significados, dependendo do contexto em que é usado. Dentro do escopo deste estudo, o termo se refere sempre à válvula *eletrônica*, e não aos diferentes tipos de válvulas mecânicas que controlam a passagem de fluidos por tubulações. A válvula aqui abordada, em última análise, é um recipiente fechado, geralmente de vidro e, em alguns casos, de metal, dentro do qual existe um conjunto de eletrodos. Ao receber um impulso elétrico, o catodo libera elétrons que, diretamente ou controlados por um ou mais eletrodos internos, são coletados pelo anodo. O que caracteriza a válvula é esse controle do fluxo de elétrons. Algumas qualificações das válvulas usadas neste estudo exigem esclarecimento:

- *Válvula de catodo frio* - também chamada tubo de catodo frio, é realmente uma válvula, pois atende aos requisitos de controle desse dispositivo. Seu princípio de funcionamento é a descarga elétrica em um gás.
- *Válvula termoiônica* - é baseada no fenômeno da emissão termoiônica. Às vezes o nome é erroneamente usado como sinônimo de válvulas “verdadeiras”, dentre as quais as válvulas de catodo frio são assim excluídas (VÁLVULA, 2019; VÁLVULAS, 2019).
- *Válvula eletrônica* - é o nome dado na literatura às válvulas em geral, por serem os dispositivos que marcam o início da Eletrônica. O nome é às vezes erroneamente usado como sinônimo de válvula termoiônica (VÁLVULA, 2019; VÁLVULAS, 2019).

A adjetivação *válvula eletrônica* é desnecessária no contexto desta pesquisa, pois o estudo não trata de outros tipos de válvulas. Por este motivo, sempre que o texto se referir às válvulas em geral, será usada apenas a palavra *válvula*. Quando for necessária uma especificação, será usada uma expressão como *válvula de catodo frio* ou *válvula termoiônica*, dependendo do caso.

Note-se que, nos textos em língua inglesa, a válvula é referida alternativamente como *valve*, *vacuum tube* ou simplesmente *tube*. Os três nomes se referem ao mesmo objeto: o primeiro é usado na Comunidade Britânica, e os outros, nos Estados Unidos (STOKES, 1997, p. vi). Uma outra denominação, conforme Ryder e Fink (1984, p. 117), foi usada nos Estados Unidos, por volta de 1929, quando esses dispositivos começaram a ser referenciados como *electron tubes*, abrangendo assim as válvulas cujo fluxo de elétrons se dá no vácuo e as preenchidas com gás.

Para o presente estudo, é necessário também definir e diferenciar os conceitos de eletricidade e eletrônica. O termo *eletricidade* pode ser entendido como fenômeno e como campo de conhecimento. No primeiro sentido, é um conjunto de fenômenos associados com a presença e movimentação de partículas com carga elétrica (elétrons). No segundo sentido, é a área da Física que estuda os fenômenos associados às cargas elétricas. Ela se divide em três ramos (Eletrostática, Eletrodinâmica e Eletromagnetismo) e constitui o cerne de várias tecnologias modernas, entre elas a eletrônica.

Segundo uma definição de 1961, a *eletrônica* é um ramo da ciência e da tecnologia que inclui a Física, a engenharia e as aplicações que lidam com emissão, fluxo e controle de elétrons em vácuo, gases, líquidos, semicondutores e materiais condutores e supercondutores (SUSSKIND, 1966). O adjetivo *eletrônico(a)* foi usado pela primeira vez por Fleming, em 1902, e o nome *Eletrônica*, designando o ramo da Física que lida com as propriedades de partícula dos materiais e o comportamento dos elétrons, apareceu em títulos de revistas em 1904; mas o termo só foi usado como nome de um ramo de tecnologia e indústria em 1930, no título da revista *Electronics* (SUSSKIND, 1966).

Um conceito central para as tecnologias de que este estudo trata é o de *signal*. Uma definição simples é dada por Roland Priemer (1991): um sinal é uma função que transporta informação sobre o comportamento de um sistema ou os atributos de um fenômeno. Um sinal não é necessariamente uma quantidade elétrica: o termo pode se referir a muitos tipos de informação, como ondas acústicas, temperatura, pressão, nível de acidez etc. Entretanto, para realizar operações como modular, propagar, analisar e modificar sinais, convém usar um sinal na forma de quantidade elétrica, obtida pela conversão do sinal original em voltagem, que pode ser modificada por dispositivos eletrônicos, transportada por condutores elétricos e convertida no sinal original. Esta pesquisa trata de sinais elétricos e do uso dos equipamentos eletrônicos para manipular sinais de diversas naturezas convertidos em sinal elétrico.

A definição dos termos *técnica* e *tecnologia* presta-se a confusões, pois os dois termos são usados em diferentes áreas com diversos significados, e muitas vezes a distinção entre ambos não fica clara. De acordo com as necessidades deste estudo, esses termos devem ser entendidos aqui da seguinte forma:

- *Técnica* - um conjunto organizado de procedimentos cujo objetivo é atingir um resultado específico em algum campo de atividade. Nas palavras de Hilton Japiassu (2010, p. 64), “a arte de fazer isto ou aquilo”. Por exemplo, as técnicas de fabricação de válvulas, instalação de aparelhos, encadernação etc. Neste estudo, serão focalizados conjuntos de procedimentos derivados da aplicação de conhecimentos científicos.
- *Tecnologia* - o conjunto de técnicas de um campo de atividade específico. Por exemplo, as tecnologias de processamento de dados, de radiodifusão etc.

Um termo de definição bastante difícil é *ciência*. Hilton Japiassu (1975) começa *O mito da neutralidade científica* alertando sobre a inexistência de uma única definição objetiva ou neutra de ciência, embora o termo tenha muitas definições. Mas o próprio Japiassu (2010, p. 64-65) fornece uma definição que se mostra operacional e útil para as reflexões realizadas neste estudo. Segundo esse autor, a ciência é uma atividade de produção de conhecimento que estuda fenômenos (construções intelectuais derivadas de coisas e fatos) a fim de extrair deles relações universais e necessárias que constituem as leis desses fenômenos; e organiza as leis em teorias que devem atender a critérios de validade (coerência interna das leis e teorias) e verdade (adequação entre as teorias e os fatos). Ainda segundo esse autor, o objetivo da ciência é produzir conhecimento sobre seu objeto, gerar conteúdos que caracterizem o objeto, sem visar uma aplicação imediata. Nisto ela se diferencia claramente do conhecimento técnico, definido pelas necessidades imediatas e utilitárias a que responde.

Outro conceito essencial para este estudo, por sua presença quase universal nas reflexões sobre as sociedades do século XX, é o de *modernidade*. Jacques Ellul (1964) tem uma visão determinista e distópica, prevendo uma inevitável tirania da tecnologia. Outros são mais otimistas, como Habermas (2000), que acha possível um projeto de emancipação dentro da modernidade e reflete sobre a história do conceito, destacando seu caráter eurocêntrico, o que é retomado por Dussel (2016). Sergio Rouanet (1993) examina o significado, as características e os caminhos da modernidade, partindo das ideias iluministas. Zygmunt Bauman (2008, 2013), além de comentar seus conceitos de modernidade sólida e líquida, examina a cultura e o consumo nos contextos da modernidade e da pós-modernidade. David

Harvey (1992) discute os fatores determinantes dos caminhos pelos quais a modernidade se desenvolveu, apresentando sua visão dos períodos ou fases em que ela pode ser dividida.

É difícil escolher um conceito que represente, de forma simples, clara, sintética e sem desvios ideológicos, o padrão de cultura e consumo que, durante o século XX, se difundiu dos países capitalistas centrais para os periféricos (FRANK, 1967), mas que pode não ser um padrão universal, nem no conjunto dos países do mundo, nem no da população de um país. A solução encontrada foi utilizar o conceito de modernidade, pelo fato de que ele é *apresentado* como o padrão universal vigente no século XX, mas tendo em mente que essa apresentação é uma estratégia ideológica surgida a partir de um foco eurocêntrico, dentro do “projeto civilizatório da modernidade [que] tem como ingredientes [...] universalidade, individualidade e autonomia [e onde a] universalidade significa que ele visa todos os seres humanos, independentemente de barreiras nacionais, étnicas ou culturais” (ROUANET, 1993, p. 9). Como ressalta Bolívar Echeverría (1997, p. 137, 147), é a modernidade específica do capitalismo industrial mecanizado de corte europeu, formada, a partir do século XVI, em torno da subordinação do processo de produção e consumo ao capitalismo, entendido como uma forma específica de acumulação de riqueza; pois Echeverría defende a possibilidade de outras modernidades diferentes desta, desde que se defina o termo como um conjunto de possibilidades exploradas a partir de um determinado ponto de vista (num determinado contexto social, em qualquer tempo ou lugar), mas aberto a outras abordagens.

Sergio Rouanet (1993, p. 9) define a modernidade como “o projeto moderno de civilização, elaborado pela Ilustração europeia a partir de motivos da cultura judeo-clássica-cristã [que] tem como ingredientes [...] universalidade, individualidade e autonomia”. David Harvey (1992, p. 23) detalha as características desse projeto, cuja meta era

[...] usar o acúmulo de conhecimento [...] em busca da emancipação humana e do enriquecimento da vida diária. O domínio científico da natureza prometia liberdade da escassez, da necessidade e da arbitrariedade das calamidades naturais. O desenvolvimento de formas racionais de organização social [...] prometia a libertação [...] do lado sombrio da [...] natureza humana.

Harvey continua o raciocínio esclarecendo que o conhecimento foi visto (e usado) como “ferramenta básica para a construção de uma nação, transformando o populacho num corpo cívico” através da educação. Assim, no projeto iluminista de modernidade, a felicidade individual e coletiva se fundamentava no progresso através da ciência e de sua aplicação, a tecnologia. Mas esse modelo assumiu diferentes formas desde sua criação, no século XVIII, até o início do século XXI, e, como complicador adicional, diferentes autores que estudaram o tema, elaboraram definições e cronologias mais ou menos diferentes (BAUMAN, 2008;

DUSSEL, 2016; EAGLETON, 1996; HABERMAS, 2000; HARVEY, 1992; ROUANET, 1993). Foi preciso, então, escolher uma abordagem, embora sabendo que não é a única possível. Assim, para utilizar o termo com uma definição precisa, correspondente ao período em que o estudo foi realizado (e aos eventos que o caracterizaram incluídos no foco do estudo), recorri a autores que discutem a periodização da modernidade, definindo assim dois conceitos operacionais para minha pesquisa.

- *Modernidade* - é o termo que uso para designar o que Bauman (2008, 2013) chama de modernidade sólida e Harvey (1992) denomina modernidade fordista. De acordo com esses autores, a modernidade é centrada na produção e apoiada na inovação tecnológica e na difusão de cultura e informação. A felicidade é buscada na segurança (expressa pela durabilidade dos bens) e o consumo é justificado pela necessidade. Assim definida, a modernidade é o padrão característico do período que vai dos primeiros anos do século XX até os últimos anos da década de 1960, e no qual decorreu a história da válvula, desde sua criação até sua substituição pelos transistores nos produtos eletrônicos de consumo.
- *Pós-modernidade* - é o termo que uso para designar o que Bauman (2008, 2013) chama de modernidade líquida e Harvey (1992) denomina pós-modernidade flexível. De acordo com esses autores, a pós-modernidade é centrada no consumo e apoiada na inovação acelerada de bens de consumo. A felicidade é buscada na satisfação imediata (expressa pela efemeridade dos bens) e o consumo é justificado pelo desejo. A pós-modernidade interessa a este estudo apenas por contextualizar o período em que as tecnologias criadas com o uso da válvula sobreviveram e continuaram definindo padrões de cultura e consumo mesmo após a substituição das válvulas pelos dispositivos eletrônicos mais modernos.

Os termos *consumo* e *cultura* também tiveram seus significados explicitados em função das necessidades deste estudo.

- *Cultura* - de acordo com Álvaro Vieira Pinto (1969, p. 121-123), é o acervo de saberes e suas expressões resultantes da transformação em ideias das experiências de contato do ser humano com o mundo natural. De acordo com Bauman (2013), no ideário do que chamo de modernidade, a cultura era entendida como instrumento para o esclarecimento do povo e o progresso da nação, tornando assim prioritária a criação de mecanismos para a difusão de informações e expressões culturais. Na pós-

modernidade, a cultura se torna um depósito de artigos destinados ao consumo em que o que importa é a quantidade e velocidade, não a seletividade.

- *Consumo* - Bauman (2008, p. 41-44) define o consumo como “uma característica e uma ocupação dos seres humanos como indivíduos”, cujo objetivo é satisfazer suas necessidades. É uma característica da sociedade de produtores da modernidade, orientada para a segurança a longo prazo, e garantida pela posse de bens fortes, confiáveis e resistentes ao tempo. Ainda segundo Bauman, esse padrão difere do *consumismo* da pós-modernidade, que é um atributo da sociedade, uma força externa aos indivíduos que os impulsiona a desejar cada vez mais e a buscar produtos para satisfazer os desejos renovados numa velocidade crescente.

O termo *informação*, sem qualificação específica, é empregado neste estudo no sentido de conteúdo de divulgação (científica, artística etc.) ou notícia. O uso no sentido de produto do processamento de dados, dentro das tecnologias da informação, terá o significado esclarecido no contexto.

O *sistema de periodização do tempo* adotado é o da Era Comum, que é uma tendência crescente no meio acadêmico. Embora tenha surgido no âmbito do cristianismo e seu ponto zero seja o mesmo da Era Cristã, a Era Comum tem a vantagem de não se referir a uma religião específica. O sistema usa o calendário gregoriano (o padrão de uso internacional) e as abreviaturas dos períodos são: EC (Era Comum) e AEC (Antes da Era Comum).

As *unidades de medida* adotadas são as do Sistema Internacional e algumas outras aceitas por ele. Quando são usadas medidas antigas, seus valores em unidades do SI são informados. No caso das medidas de pressão, como o uso do Torr é desaconselhado pelo *Bureau International des Poids et Mesures*, foram usadas a unidade de pressão do SI, que é o Pascal (BIPM, 1991, p. 22), e o mmHg, aceito pelo SI (BIPM, 2006, p. 38). A equivalência de medidas é: $1 \text{ Pa} = 0,0075 \text{ mmHg}$; $1 \text{ mmHg} = 133,32 \text{ Pa}$; $1 \text{ Torr} \sim 1 \text{ mmHg}$ (a 0°C).

A *grafia* segue o Vocabulário Comum da Língua Portuguesa. O termo *ótica* é usado desta forma porque é assim registrado como variante legítima da grafia antiga (e a correta no caso do ‘p’ mudo), não se confundindo com a otologia (especialidade médica que trata do aparelho auditivo) nem a acústica (campo da Física), como é erroneamente afirmado.

METODOLOGIA

A estratégia da pesquisa

As reflexões apresentadas nas seções anteriores levam de volta ao propósito do trabalho, descrito no início desta Introdução: minha intenção, com este estudo, não foi apenas traçar um quadro descritivo da história da válvula, mas, partindo desse dispositivo, examinar os padrões de relacionamento entre tecnologia e sociedade associados a ele. Do tema geral selecionado para o estudo - a história da válvula -, extraí um objeto de pesquisa mais específico e operacional: qual foi o papel da válvula eletrônica na configuração do padrão tecnológico que permitiu a criação e a difusão de produtos, serviços e recursos de exercício do poder, característicos da modernidade do século XX, através das tecnologias surgidas da sua aplicação?

A tese que defendo com este trabalho é que a válvula foi um importante dispositivo facilitador da configuração da modernidade no século XX, e que teve um papel central na constituição da infraestrutura tecnológica eletrônica. Esta tese se apoiou em dois argumentos e produziu uma conclusão. O primeiro argumento diz que a válvula foi o dispositivo para o qual confluíram conhecimentos preexistentes, formadores da ciência e da técnica da Eletrônica, tais como: estudos sobre eletricidade e eletromagnetismo, bem como suas aplicações práticas; estudos sobre fenômenos do campo da Física, como calor, pressão dos gases e radiações do espectro eletromagnético; estudos sobre as características químicas e físicas de diferentes materiais; e técnicas de produção de objetos como bulbos de vidro com vácuo e filamentos metálicos.

De acordo com o segundo argumento, as válvulas viabilizaram e/ou dinamizaram diferentes sistemas técnicos criados ou transformados a partir do desenvolvimento da Eletrônica. Entre esses sistemas, os mais visíveis, e onde ocorreu mais massivamente o uso das válvulas, foram os do campo das telecomunicações, que constituíram um dos motivadores para as pesquisas que levaram à criação das válvulas e de novos sistemas derivados da comunicação por ondas de rádio: a radiotelegrafia, a radiotelefonia e a radiodifusão. Outro motivador foi a pressão das necessidades da indústria elétrica. Mas essas não foram as únicas atualizações ou criações a partir das válvulas: elas também permitiram a abertura de novos ramos tecnológicos, como o de captura e processamento de dados, que inclui os radares e os computadores, e também o da instrumentação técnica e científica.

A conclusão resultante da tese é que, dadas as transformações de diversas ordens

decorrentes da utilização das válvulas, a válvula ajudou a definir, não somente a modernização tecnológica, mas a própria modernidade do século XX.

Para desenvolver os argumentos e chegar à conclusão, a estratégia adotada para a realização da pesquisa dividiu-se em três etapas: estudo dos conhecimentos precursores, das válvulas e de suas aplicações. A primeira etapa consistiu em elaborar um quadro das descobertas e invenções que viabilizaram a criação das válvulas eletrônicas, identificando motivações de ordem política, econômica e social, necessidades a atender e caminhos seguidos. Na segunda etapa, foi elaborado um quadro do desenvolvimento das válvulas, identificando motivações para a criação do dispositivo e para as inovações de que foi objeto, além de atores envolvidos em sua criação e produção (instituições de ensino e pesquisa, empresas, corporações). Na terceira etapa, a partir do panorama do desenvolvimento das válvulas, foi elaborado um quadro de suas principais aplicações nos diferentes campos de atividade em que isso ocorreu, identificando as características da atividade antes (quando era o caso) e depois do uso das válvulas, motivações e repercussões dessas aplicações (seu impacto sobre a sociedade).

Fontes de dados

As primeiras fontes examinadas, que serviram para levantar os elementos a serem pesquisados, foram obras de divulgação, em formato impresso ou eletrônico, que forneceram um esboço da cronologia das descobertas e invenções precursoras, do desenvolvimento dos diversos tipos de válvulas e das tecnologias em que as válvulas foram utilizadas. Neste grupo se incluem os livros *Vacuum tubes* (SPANGENBERG, 1948), *Saga of the vacuum tube* (TYNE, 1994), *History of electron tubes* (OKAMURA, 1994) e *70 years of radio tubes and valves* (STOKES, 1997), e sítios da Internet como *Vacuum tubes patents and inventions* (2019), *Valve technology timeline* (2019) e *Vacuum tube* (2019).

A partir do esboço montado com a ajuda dessas fontes, foi realizada uma pesquisa sistemática com as finalidades de: 1) confirmar ou corrigir as informações já coletadas; 2) preencher lacunas; 3) obter maiores detalhes sobre os objetos em si; 4) coletar as informações necessárias para compor o contexto sociopolítico e econômico em que os objetos estudados estavam inseridos.

No caso das descobertas científicas, as fontes documentais buscadas na pesquisa foram artigos publicados em periódicos acadêmicos e livros também acadêmicos. A meta foi chegar,

para cada evento, a uma descrição ou comunicação oficial redigida pelo próprio autor da descoberta ou invenção. Na falta desta, foram utilizados relatos de autores contemporâneos ou bem próximos no tempo, ou pesquisas de historiadores que citassem alguma forma fidedigna de confirmação do fato descrito.

No caso das invenções, a fonte buscada em primeiro lugar foi a patente dos dispositivos. Na falta da patente, foram buscados anúncios do lançamento dos dispositivos, como artigos publicados pelos inventores, demonstrações públicas, notícias divulgadas pelas empresas fabricantes e documentos com a descrição dos dispositivos (folhetos técnicos, artigos e livros publicados pelos inventores ou pelas empresas fabricantes), além de relatos escritos por profissionais que trabalharam nas indústrias ou em sistemas de aplicação das válvulas.

Para coletar as informações necessárias para construir o quadro de contextualização, foram utilizadas obras de historiadores que abordaram, no todo ou em parte, o período abrangido pela cronologia construída.

No caso da reconstrução da história das tecnologias de aplicação das válvulas, foram utilizadas obras de historiadores que focalizaram cada uma delas. Para traçar a história das empresas envolvidas na produção de válvulas, além de obras de historiadores, foram consultados documentos produzidos pelas próprias empresas e por profissionais que trabalharam nelas.

Coleta e análise dos dados

A partir da visão geral da história das válvulas construída pela leitura das fontes iniciais, foi criado um esquema com os tópicos a serem abordados em cada subdivisão do estudo, que orientou a consolidação das informações em textos organizados.

- Precusores:
 - Eletricidade: das primeiras teorias à Revolução Elétrica no final do século XIX;
 - Vácuo: criação e aperfeiçoamento das máquinas para produzi-lo;
 - Descargas nos gases: teorias e técnicas que permitiram a criação das válvulas;
 - Lâmpadas: descobertas e invenções associadas à criação das válvulas;
 - Telecomunicações: determinantes mais imediatos para a criação das válvulas.
- Válvulas:

- Criação das primeiras válvulas: século XX, antes da 1ª Guerra Mundial;
- Inovações e diversificação posteriores;
- Fim das presença das válvulas em aplicações comerciais;
- Continuação do emprego das válvulas.
- Aplicações:
 - Comunicações: radiotelefonia, radiodifusão, TV, satélites;
 - Informações: radar, computadores;
 - Outras aplicações: industriais, militares e de instrumentação.

A fim de cumprir a etapa final do estudo, foi elaborado um conjunto de categorias para analisar os conteúdos obtidos. Essas categorias, apresentadas a seguir, foram utilizadas para examinar cada tipo de válvula, comparando diferentes momentos ao longo da sua história.

- Esfera de decisão de origem (científica, industrial, governamental);
- Empresas envolvidas no desenvolvimento, na produção e na comercialização;
- Número/tipo de áreas e dispositivos de aplicação;
- Período e amplitude de utilização.

As análises parciais foram articuladas numa visão de conjunto da trajetória das válvulas, desde sua criação até o fim do uso em aplicações comerciais, focalizando o modo como essas aplicações influenciaram os padrões tecnológicos durante esse período.

Este roteiro de trabalho corresponde à organização do relatório final da pesquisa. O Capítulo 1 trata da trajetória dos precursores científicos e suas concepções; como os conhecimentos foram sendo obtidos gradualmente através das pesquisas da ciência elétrica, com destaque para a descarga nos gases e a iluminação; e como esses conhecimentos foram incorporados às primeiras válvulas eletrônicas. O Capítulo 2 aborda a evolução tecnológica das válvulas, bem como os contextos que estimularam a criação de diferentes tipos de válvulas para aplicações de baixa e alta potência, e de alta frequência. O Capítulo 3 aborda as aplicações das válvulas em equipamentos e/ou sistemas técnicos que foram marcos da tecnologia do século XX; e a Conclusão procura articular uma rápida síntese dos dados apresentados nos capítulos anteriores.

1 CONCEPÇÕES, DESCOBERTAS E INVENÇÕES PRECURSORAS

Este capítulo aponta o caminho trilhado através de pesquisas experimentais físicas e químicas, procurando identificar como os conhecimentos teóricos adquiridos, bem como a tecnologia desenvolvida nesse processo, levaram à criação da válvula. Como foi dito na Introdução, a válvula foi criada para atender às necessidades das telecomunicações que, no início do século XX, contavam com sistemas de telegrafia transoceânica, telefonia terrestre e radiocomunicação, todos com tecnologia eletromecânica (HUUDERMAN, 2003; KOCHER, 2014; MORENO QUINTANA, [199-]; SKOLNIK, 1962). Mas o uso das instalações e as mudanças nas necessidades revelaram falhas e limitações desses sistemas, e a busca de meios para superar as deficiências culminou, como veremos, com a invenção da válvula. Vejamos primeiro um quadro sucinto das motivações políticas, econômicas e sociais que levaram à sua criação. Esse quadro se concentra na Europa Ocidental e, mais tardiamente, nos Estados Unidos, pelas razões já apontadas na definição do objeto do estudo.

Entre os séculos XI e XIV, a Europa viveu uma fase de expansão econômica dinamizada pelo comércio intra e intercontinental, liderado por cidades mediterrâneas e do Leste Europeu que dominavam as antigas rotas terrestres para o Oriente. Enquanto isso, as cidades do litoral atlântico da Europa desenvolviam a navegação de cabotagem que estendeu rotas marítimas do Mar do Norte até o Mediterrâneo. Quando as rotas terrestres foram dominadas pelos italianos e turcos, os reinos ocidentais, com riqueza, tecnologia e experiência em navegação, abriram rotas marítimas para o Leste, e o eixo econômico da Europa se deslocou para a costa ocidental, no Atlântico Norte. Entre o final do século XV e o século XIX, as principais potências europeias da época disputaram, por meio de repetidas guerras, a hegemonia política e econômica mundial, buscando o controle dos caminhos marítimos, das atividades comerciais e dos territórios conquistados na África, Ásia, América e Oceania (SOARES; SILVA, 2010). A tríade “navegação de longo alcance - comércio de importação e exportação - base territorial distante” criou um novo tipo de relacionamento entre a Europa e os outros continentes: o sistema econômico colonial, baseado em trabalho compulsório, cuja produção era voltada para o mercado europeu (HOBSBAWM, 1978).

Paralelamente à implantação do sistema colonial, ocorreu na Europa o processo de industrialização, dominado inicialmente pela Inglaterra e possibilitado pela acumulação de conhecimentos científicos, recursos tecnológicos e capitais disponíveis para investir (HOBSBAWM, 1978). Dito em termos simples, a industrialização dividiu as bases territoriais das potências europeias em dois grandes segmentos: a metrópole, onde estavam as indústrias,

as sedes administrativas e os centros comerciais e financeiros, e onde se dava um processo de urbanização; e as colônias, que forneciam matérias-primas e mão de obra barata transferindo valor. Assim, a industrialização precisou enfrentar dois problemas básicos: a necessidade de aperfeiçoar os recursos tecnológicos para garantir a lucratividade do sistema, e a urgência em garantir comunicações ágeis entre a metrópole e suas colônias, e entre as diversas metrópoles.

No período descrito podem ser identificadas as necessidades que levaram ao desenvolvimento da tecnologia eletrônica e, em particular, da válvula. Por um lado, a busca de formas cada vez mais eficientes e rápidas de comunicação marítima e terrestre – de navios entre si, entre a terra e as embarcações, entre fortalezas e cidades, entre metrópole e colônia –, levou à criação dos sistemas de comunicação a distância que, com o passar do tempo, exigiam crescentes inovações tecnológicas. Ao mesmo tempo, as indústrias e os serviços implantados nas grandes cidades também exigiam inovações análogas.

Estes eram os estímulos existentes para impulsionar a pesquisa e a criação da válvula. Mas a motivação não basta para a concretização de um projeto. É preciso contar com um conjunto dos recursos: a teoria que orienta os projetos técnicos, os materiais adequados, as técnicas para a produção dos componentes, e os equipamentos para a implementação desses projetos. No caso das válvulas, os recursos necessários incluíram conhecimentos sobre a natureza, o comportamento e as formas de produção da eletricidade; a relação entre eletricidade, calor e pressão dos gases, e as técnicas a ela associadas de produção de vácuo, descarga elétrica em gases e emissão de radiação pelo efeito termoelétrico; as propriedades e os modos de produção de eletrodos e filamentos de diferentes materiais, de tubos e bulbos de vidro; além de conhecimentos sobre gases e radiações eletromagnéticas que informaram aperfeiçoamentos e aplicações das válvulas.

O processo de construção desse acervo de recursos se insere na história das ciências modernas, especialmente da Física e da Química. O estudo dos fenômenos e objetos do mundo material começou a se configurar como um ramo distinto dentro da Filosofia no século V AEC com a *Φυσική* (*fysikí*, física) grega. Mas a Física era posta em segundo lugar em relação à Metafísica, e esta ordem se manteve durante boa parte da Idade Média europeia. No final dessa era, após a criação das grandes universidades na Europa, a Física foi adotada como disciplina, com o nome de Filosofia Natural, e, tendo como escopo a investigação dos fenômenos naturais, substituiu aos poucos os antigos métodos lógicos pela observação empírica (NATURAL, 2019; PHILOSOPHY, 2019). Na chamada Revolução Científica, ocorrida na Europa a partir do século XV (BERNAL, 1969), foram retomadas antigas concepções acerca da constituição da matéria e foi desenvolvido o método experimental, no

qual ocorreu uma mudança que permitiu incluir uma abordagem quantitativa dos fenômenos. A Filosofia Natural reuniu nomes como Galileu, Descartes, Francis Bacon, Isaac Newton, Robert Boyle e William Thomson; incluiu materialistas, que propunham um modelo mecânico e atomista da natureza, e idealistas, que adotavam a ideia de um mundo físico orgânico e dinâmico, defendida pela *Naturphilosophie* (movimento intelectual alemão do final do século XVIII e início do XIX) (NATURAL, 2019; PHILOSOPHY, 2019). Veremos adiante como essas ideias influenciaram o desenvolvimento das teorias e técnicas que estamos estudando.

1.1 A ELETRICIDADE

Os fenômenos elétricos e magnéticos eram conhecidos, de forma empírica, desde vários séculos antes do início da Era Comum. O magnetismo teve aplicação desde a antiguidade: na China, a bússola era usada aproximadamente desde o século II AEC, sendo levada para a Europa no século XII EC (KOCHER, 2014). Fenômenos elétricos foram observados no século VI AEC por Tales, na Grécia (que descobriu a eletrização por fricção no âmbar), e descritos por filósofos romanos e europeus medievais; entretanto, a eletricidade permaneceu apenas como um exercício intelectual no estudo das propriedades dos corpos até o fim do século XVI. O físico inglês William Gilbert pode ser considerado o iniciador dos estudos modernos da eletricidade e do magnetismo, pelas pesquisas cujos resultados publicou em 1600 na obra *De magnete [...]*. Em seus estudos sobre o magnetismo, Gilbert fez descobertas sobre campo, indução magnética, polaridade e efeito do calor sobre os ímãs (MEYER, 1972). A partir de seus experimentos com a eletrização por fricção, Gilbert identificou materiais que podem ser eletrificados, aos quais deu o nome de “elétricos” (do grego *eléktron*, âmbar) e criou o conceito de “eflúvio material” para explicar a eletrificação. Esse conceito exerceu grande influência no pensamento dos pesquisadores dos séculos XVII e XVIII, sendo o precursor dos conceitos de fluido elétrico e carga elétrica (BAIGRIE, 2007).

1.1.1 Os primeiros instrumentos de pesquisa

Após os trabalhos de Gilbert, a eletrização dos corpos tornou-se a principal linha de pesquisas no campo da eletricidade e, para estudá-la, os físicos experimentais criaram os

primeiros geradores eletrostáticos e instrumentos de medição da eletricidade.

No campo dos geradores, o pioneiro foi o alemão Otto von Guericke que, em 1660, criou uma máquina eletrostática usando uma bola de enxofre eletrizada por fricção. O dispositivo proporcionou um grande avanço aos estudos dos fenômenos elétricos, pois era capaz de gerar uma quantidade de eletricidade estática bem maior do que era possível até então. Em 1706, o inglês Francis Hauksbee (1709) aperfeiçoou a máquina de Guericke, adicionando um dispositivo para intensificar o atrito aplicado a um globo de vidro. As primeiras pesquisas focalizaram a natureza da eletricidade e sua relação com diferentes corpos. Stephen Gray (1720) descobriu a condução elétrica ao ligar um bastão eletrificado a diferentes corpos por um fio de seda ou latão. Jean Theophilus Desaguliers (1739), testando a descoberta de Gray em muitos materiais, classificou-os em dois grupos: os que são excitados e transmitem eletricidade (condutores) e os que não o são (dielétricos). Charles Dufay (1734) identificou dois tipos de eletricidade: vítrea, gerada em pele, vidro, cristal, chumbo, seda, alumínio, papel e algodão (atualmente denominada positiva), e resinosa, gerada em prata, bronze, enxofre, cobre, níquel, ouro, cera e resinas (a negativa). Essas descobertas forneceram a base de conhecimentos para a escolha de materiais para os eletrodos e dielétricos dos aparelhos usados para estudar as centelhas e os arcos elétricos até o fim do século XVIII. Para atingir esses resultados, pesquisadores como Hauksbee, Gray, Dufay e Tiberio Cavallo desenvolveram instrumentos detectores de eletricidade (eletroscópios); outros, como Jean Antoine Nollet (ex-abade Nollet), William Henley e Charles Augustin Coulomb, criaram medidores de eletricidade (eletrômetros) que permitiram o início dos estudos quantitativos da eletricidade. Em 1745, um grande impulso nas pesquisas da eletrostática foi dado pela criação do primeiro dispositivo capaz de acumular eletricidade: a garrafa de Leiden, inventada por Ewald G. von Kleist. Associadas a garrafas de Leiden, as máquinas eletrostáticas eram capazes de produzir descargas de alta voltagem, mas a descarga era intermitente, por causa do tempo necessário para recarregar os condensadores (MATTOX, 2017; MEYER, 1972; SEGRÈ, 1984).

1.1.2 Eletricidade e magnetismo até o século XVIII

Um dos temas que motivaram mais disputas nas ciências modernas foi a natureza da eletricidade e do magnetismo. Durante muito tempo, os pesquisadores discutiram se essas formas de energia eram constituídas por ondas ou partículas, e se havia ou não ligação entre

elas. A solução dessas questões foi fundamental para o avanço das teorias e técnicas que formaram a base da Eletrônica.

Os conceitos modernos da Física sobre matéria e energia derivaram de duas teorias presentes em filosofias asiáticas desde aproximadamente o século VIII AEC e sistematizadas na Grécia a partir do século V AEC. Na teoria dos elementos de Empédocles, a matéria era vista como formada por substâncias elementares (ar, terra, água e fogo) submetidas à ação das forças de atração e repulsão, a que Aristóteles acrescentou a força do movimento e o elemento éter. Na teoria atômica de Demócrito, a matéria era entendida como constituída por átomos, partículas indivisíveis que se moveriam no vazio. Pitágoras criou o conceito que faltava para unir os dois modelos ao propor o caráter matemático da realidade (ANASTOPOULOS, 2008). Esse conjunto de ideias foi a origem das concepções que levaram às teorias da eletricidade e do magnetismo, e à sua posterior unificação.

A teoria dos elementos dominou a filosofia europeia durante a Idade Média, mas, entre o fim do século XV e meados do XVI, os trabalhos de Copérnico, Kepler e Galileu levaram à criação de um modelo atomista, matemático e mecanicista do mundo, no qual o movimento era expresso em termos de forças atuando entre corpos (WHITTAKER, 1910). Na mesma época, havia uma linha empírica de desenvolvimento científico baseado em experimentação, ligada a uma outra corrente que pretendia dar à ciência uma base metafísica adotando a ideia de “espírito da natureza” ou “espírito etéreo”, através do qual a vontade divina se expressaria na matéria. Os estudos sobre magnetismo e eletricidade estavam incluídos nessa linha experimentalista (BURTT, 1954).

O modelo mecanicista não admitia o vazio, que não permitia explicar fenômenos como magnetismo, eletricidade e luz sem recorrer à ação a distância. Para resolver o problema, os filósofos recuperaram o conceito de éter. No século XVII, Descartes adotou a ideia aristotélica de uma “matéria primária” (o *plenum*) que preencheria o espaço, permitindo que os movimentos fossem comunicados de um corpo a outro por impacto direto; Robert Boyle adotou os conceitos de eflúvios e éter (BURTT, 1954; KOCHER, 2014; STANFORD, 2019); Christiaan Huygens e Robert Hooke, esboçando a teoria ondulatória, afirmaram que a luz seria um movimento transmitido através de um meio ou éter; e Isaac Newton, embora rejeitasse a teoria ondulatória, propôs a existência de um meio elástico ou éter, capaz de propagar vibrações. Para Newton, o éter conteria diversos “espíritos etéreos” que, conforme sua natureza, produziriam fenômenos elétricos, magnéticos e gravitacionais, além de interagir com os corpúsculos da luz, influenciando seu movimento (WHITTAKER, 1910).

Após a publicação, em 1687, das leis matemáticas da força e do movimento

elaboradas por Newton, muitos filósofos naturais procuraram explicar a luz, o magnetismo, o calor e a eletricidade por forças atuantes entre partículas, suscetíveis a um tratamento matemático. Uma ferramenta teórica importante para esses estudos foi a reformulação da mecânica newtoniana feita entre 1772 e 1788 por Joseph Louis Lagrange, que usou o conceito de energia de interação entre partículas (depois chamada energia potencial) nas equações que elaborou para descrever um sistema físico. Seu trabalho foi estendido por Laplace, que apresentou, em 1782, a equação para o potencial no vácuo, que Siméon-Denis Poisson, em 1813, aplicou à presença de cargas elétricas (SEGRÈ, 1984). Charles Coulomb, em 1785, divulgou os resultados de experimentos em que conseguiu, pela primeira vez, medir as forças eletrostáticas. Além de demonstrar que a eletricidade se limita ao exterior do corpo carregado, e de medir a distribuição da eletricidade na superfície desse corpo, Coulomb descobriu que as cargas elétricas seguem uma regra análoga à lei da gravitação de Newton, ou seja, que a força de atração entre dois corpos com cargas elétricas opostas é diretamente proporcional ao produto das quantidades de carga dos corpos e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Com isso, foi possível completar a descrição matemática dos fenômenos eletrostáticos dentro do quadro teórico newtoniano (HUNT, 2010; KOCHER, 2014).

O magnetismo continuou sendo estudado; entretanto, como os experimentos permitiam identificar apenas pares de cargas de polaridades opostas, e não cargas magnéticas isoladas, os pesquisadores não conseguiram estender a matemática da eletrostática para a magnetostática (SEGRÈ, 1984). Entre os avanços do século XVIII em relação ao magnetismo, destacaram-se: a descoberta de Nollet de que um corpo não isolado era eletrificado quando colocado dentro de um campo; a construção de magnetos potentes feitos de aço; e a descoberta do efeito da aurora boreal sobre a agulha magnética que, segundo as teorias da época, sugeria uma relação entre eletricidade e magnetismo (MEYER, 1972).

1.1.3 A corrente elétrica e a indução magnética

Até o final do século XVIII, as pesquisas físicas enfrentavam um obstáculo: o instrumento disponível para a geração de cargas elétricas era a máquina eletrostática, que tinha a desvantagem de gerar apenas uma descarga elétrica momentânea, uma centelha. Esse problema foi superado quando Alessandro Volta, em 1800, comunicou à *Royal Society* de Londres a invenção de uma pilha eletroquímica, cujo princípio de funcionamento era o contato entre substâncias condutoras de tipos diferentes: uma peça de cobre ou prata,

encostada de um lado numa peça de estanho ou zinco, e do outro lado numa peça de cartão ou pano embebida num líquido condutor. O instrumento era formado por uma pilha de grupos desses três materiais, sempre dispostos na mesma ordem. Unindo as extremidades da pilha por meio de um material condutor (placa ou fio metálico), era gerada uma corrente elétrica contínua, mantida enquanto o circuito estivesse fechado (VOLTA, 1800). A vantagem da pilha de Volta era que, embora uma célula da pilha fosse capaz de gerar apenas pouco mais de um volt, a possibilidade de associar em série o número desejado de pilhas, permitia gerar valores de corrente milhares de vezes maiores do que os produzidos pelas máquinas eletrostáticas (SEGRÈ, 1984). Além disso, pela primeira vez na história, era possível gerar uma corrente elétrica contínua, mantida por um tempo maior que a duração de uma centelha.

A pilha de Volta possibilitou o estudo do comportamento das correntes elétricas, permitindo a realização de trabalhos fundamentais como a demonstração experimental da relação entre a eletricidade e o magnetismo, feita por Hans Christian Oersted em 1820, na Dinamarca (HUNT, 2010). Essa descoberta despertou em vários pesquisadores grande interesse e originou estudos voltados para sua elucidação. Assim, a invenção da pilha de Volta teve um enorme impacto na ciência e na tecnologia do começo do século XIX, pois permitiu o desenvolvimento de dois novos ramos de pesquisa, a eletroquímica e o eletromagnetismo, e da tecnologia baseada na eletricidade, que não seriam possíveis usando máquinas eletrostáticas. Em termos científicos, a inovação possibilitou as pesquisas que iriam culminar com o entendimento das relações entre a eletricidade e o magnetismo. Mas as primeiras células tinham limitações: sua alta resistência interna restringia a duração da corrente a alguns segundos, e a formação de depósitos nos eletrodos alterava o funcionamento. Para resolver esses problemas, vários pesquisadores aperfeiçoaram a célula voltaica. Entre eles destacou-se o químico inglês John Daniell, cuja célula, criada em 1836, gerava uma corrente tão estável, que foi usada até a década de 1870 (KING, 1963a, p. 241-245).

Outra linha de desenvolvimento de instrumentos para gerar e manipular correntes elétricas foi iniciada em 1821 com a descoberta da indução magnética, por Michael Faraday, e a invenção do eletroímã por William Sturgeon (MEYER, 1972). Essas inovações originaram três dispositivos-chaves para a tecnologia elétrica: o relé, o dínamo e a bobina de indução. O relé, uma chave eletromecânica, foi inventado em 1835 por Joseph Henry e, juntamente com a bateria eletroquímica, possibilitou a criação dos sistemas telegráficos do século XIX; foi usado nos circuitos das centrais de comutação telefônica do século XX e, mais tarde, como dispositivo de comutação em alguns computadores digitais.

As descobertas relacionadas à indução, feitas por Faraday e Henry a partir de 1831,

foram a base teórica da bobina de indução, inventada de forma independente em 1835 por Charles Grafton Page, nos Estados Unidos, e em 1836 por Nicholas Callan, na Irlanda (PAGE, 1867). Precursora do transformador, ficou conhecida como bobina de Ruhmkorff após ter sido aperfeiçoada, por volta de 1851, pelo fabricante de instrumentos científicos alemão radicado em Paris, Heinrich Ruhmkorff, que passou a produzi-la em grande escala. A maior vantagem da bobina de indução, em relação às máquinas eletrostáticas, era a obtenção de altas voltagens sendo alimentada por uma única bateria. Em termos de história da ciência e da técnica, é importante ressaltar que a bobina de indução foi empregada no experimento de Hertz que testou a teoria de Maxwell, nos primeiros transmissores de radiotelegrafia e nas pesquisas sobre descargas em gases e radiações (MEYER, 1972; SHIERS, 1971).

O modelo para os dínamos foi criado por Faraday que, em 1831, inventou um gerador de corrente contínua formado por um disco metálico que girava entre os braços de um ímã em ferradura (MEYER, 1972). O passo inicial na trajetória de evolução dos geradores magnetoelétricos foi dado pelo francês Antoine Hippolyte Pixii, fabricante de instrumentos científicos que, em 1832, criou o primeiro gerador prático de corrente elétrica: a “máquina magnetoelétrica”, em que um ímã em ferradura, acionado por manivela, girava junto de uma ferradura de ferro doce, coberta por uma espiral de fio condutor. Como a máquina produzia corrente alternada, Pixii adicionou um comutador criado por Ampère para retificar a corrente quando um experimento o exigisse (AMPÈRE, 1832). Assim, enquanto outros inventores faziam motores para transformar eletricidade em movimento, a máquina de Pixii transformava movimento em eletricidade.

Outros inventores criaram máquinas magnetoelétricas, derivadas ou não do gerador de Pixii, todas com ímãs permanentes. Em 1845, Wheatstone sugeriu o uso de eletroímãs para substituí-los, e, na década de 1860, os primeiros geradores de autoindução foram criados por Moses Farmer, nos EUA, Alfred Varley e Charles Wheatstone, na Inglaterra, e Werner Siemens na Alemanha (MEYER, 1972). Entre os vários aperfeiçoamentos do gerador, destacou-se o de Zénobe Gramme, que em 1870 projetou um dispositivo com várias bobinas interconectadas em torno de um anel de ferro. Isso eliminou as descargas intermitentes dos modelos anteriores, produzindo uma corrente constante. Com a transformação da corrente alternada em contínua, os dínamos foram os primeiros geradores capazes de fornecer energia para instalações industriais, e deram grande impulso à criação de aplicações dependentes de motores elétricos como trens, elevadores e máquinas industriais (HUNT, 2010; MEYER, 1972).

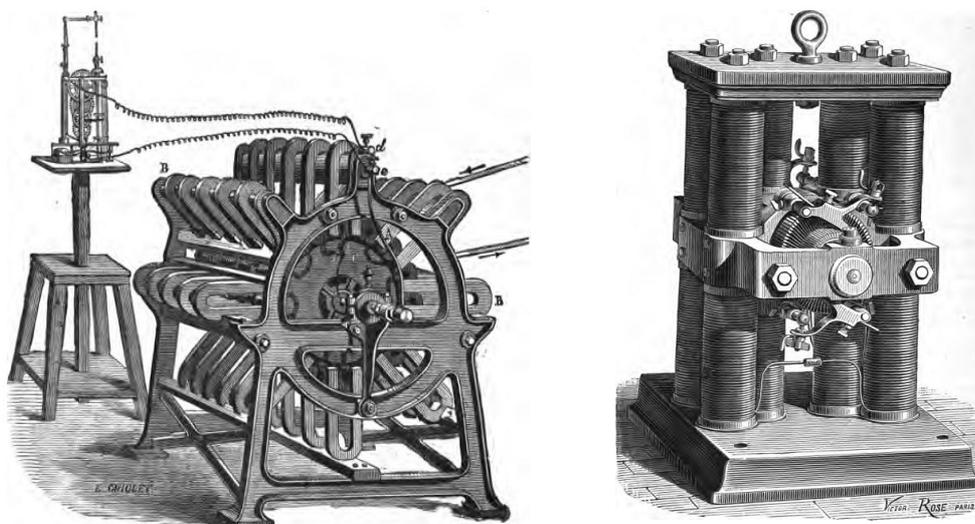
Porém, mesmo com a euforia em relação à possibilidade de substituição dos motores a

vapor pelos elétricos - “a febre elétrica” –, foi preciso esperar algumas décadas até que os geradores magnetoelétricos sofressem melhorias consideráveis para poderem substituir as baterias e os motores a vapor (KOCHER, 2014). Entre as primeiras melhorias destacou-se a do estadunidense Joseph Saxton, de 1834, que serviu de base para desenvolvimentos posteriores e consistiu no emprego de três enrolamentos ao invés de dois, na substituição do ímã único por ímãs separados, e na colocação do eixo da máquina na posição vertical. Em 1849, na França, o belga Floris Nollet, professor de Física na *École Militaire* em Bruxelas e sobrinho-neto de Jean Antoine Nollet (de que já falamos entre os primeiros pesquisadores da eletricidade), criou um gerador com melhoramentos em relação ao de Saxton, e cuja patente foi comprada em 1855 pela empresa *Société Alliance*. Nesse gerador, devido a problemas de surgimento de centelhas, o comutador foi removido, gerando assim corrente alternada, inclusive com uma eficiência maior (KING, 1963b, p.345-362).

A produção de corrente elétrica nos geradores antigos era prejudicada pela ausência de campos magnéticos suficientemente intensos. Houve tentativas de resolver isso desde 1845, quando Wheatstone utilizou eletroímãs no gerador. Em 1856, Werner Siemens substituiu a armadura de disco por uma estrutura semelhante a uma lançadeira de tear, mais eficiente, que foi adotada por outros fabricantes nos anos seguintes. A mudança para o dínamo começou a ocorrer com a elaboração do princípio da autoexcitação, em 1867, por Charles Wheatstone, Alfred Varley e Werner Siemens. A evolução comercial dos dínamos foi lenta na década de 1860, e as mudanças elétricas e mecânicas que foram desenvolvidas demoraram aproximadamente uma década para estarem combinadas nos dínamos, de modo a contribuírem para o aumento do desempenho. Essas mudanças foram feitas: a) no projeto da armadura; b) na substituição dos eletromagnetos por ímãs permanentes para a produção do campo; e c) na introdução da autoexcitação. Um outro marco importante na trajetória dos dínamos se deu com o belga Zénobe Gramme, que em 1867, trabalhando em Paris como fabricante de instrumentos, deu entrada no primeiro pedido de patente de um gerador, cujas especificações incluíam a autoexcitação, e nos três anos seguintes patenteou adições ao projeto. Gramme foi o primeiro a tornar o dínamo um sucesso comercial. Fundou uma empresa em 1871 para produzir comercialmente o aparelho, patenteado na versão comercial em 1872, e oferecido em vários modelos, incluindo dois para usar com lâmpadas de arco. A demanda por geradores pode ser avaliada pelo número anual de dínamos Gramme vendidos, que cresceu de 4, em 1874, para 1.000 em 1879. Mecanicamente, o aparelho era eficiente, compacto e durável; eletricamente, produzia uma saída relativamente constante e maior que as de outros modelos, e sua eficiência ficava entre 80 e 90%. Uma descoberta, mostrada na

Exposição de Viena de 1873, abriu novas possibilidades para aplicações futuras da transmissão de energia elétrica e sua utilização em transportes: foi a interligação entre dois dínamos Gramme, um servindo como gerador e outro como motor. Mas a principal aplicação do dínamo, até o fim da década de 1870, foi na indústria eletroquímica, onde era usado para a eletrodeposição, e só depois surgiram a iluminação e a transmissão de energia como novas possibilidades de uso (KING, 1963b, p. 342-344, 364-385).

Figura 1.1: Geradores usados na iluminação de arco



Esquerda: Gerador Alliance ligado a um regulador Serrin. **Direita:** Exemplo de máquina de Gramme – 700 kg; altura 0,9 m; comprimento 0,65 m (tinham que ter maior tensão do que as usadas em eletrodeposição; isso foi resolvido alterando o enrolamento e aumentando a velocidade).

Fonte: Fontaine (1878, p. 68, 94).

Quadro 1.1: Comparação entre dois tipos de dínamos de 1878 usados na Europa

| Tipo | RPM | Velas* | HP | Peso (kg) | Custo (libras) |
|------------------|-----|--------|----|-----------|----------------|
| Siemens/modelo A | 850 | 1.200 | 2 | 113 | 70 |
| Gramme/modelo C | 700 | 15.000 | 5 | 363 | 300 |

Nota: * Quantas velas Iablochkov o dínamo era capaz de acionar simultaneamente.

Fonte dos dados: King (1963).

A princípio, um método de medir a eficiência de um dínamo era compará-lo com o número de células eletroquímicas: por exemplo, em 1863, um teste mostrou que um dínamo de seis discos da Alliance produzia uma voltagem equivalente a 226 células de Bunsen, quando os enrolamentos eram associados em série, e a 38 células quando os enrolamentos eram associados em paralelo. Com a disseminação da iluminação pública e a necessidade de máquinas menos volumosas, as características a serem observadas nos dínamos eram as dimensões físicas, o peso, o número de velas a serem alimentadas (no caso, as lâmpadas de

Iablochkov, que veremos mais adiante), o número de rotações por minuto, a quantidade de potência mecânica gerada, a eficiência e o custo.

1.1.4 A Revolução Elétrica e o surgimento da indústria elétrica

Com a invenção da lâmpada de arco (patenteada pelo químico John Thomas Way em 1857, na Inglaterra) e do gerador, a iluminação a gás começou a ser substituída nas grandes cidades pela iluminação elétrica. A corrente alternada mostrou-se a mais adequada para essa aplicação, pois a queima das barras de carbono das lâmpadas de arco era mais uniforme, e também se mostrou eficiente com as lâmpadas incandescentes. O surgimento das lâmpadas de filamento juntamente com as lâmpadas de arco para fins de iluminação pública e de ambientes comerciais, industriais e residenciais, e também a chegada dos motores e geradores elétricos para fins de tração mecânica, serviram de estímulo poderoso para o surgimento dos sistemas de geração e distribuição de energia elétrica, proporcionando mais uma revolução tecnológica em fins do século XIX.

No final da década de 1870, já havia sistemas locais de iluminação pública e eletrificação industrial e, a partir de 1880, os países que já dominavam a tecnologia começaram a construir grandes redes de distribuição de energia, implantadas inicialmente nas áreas centrais das principais cidades. Enquanto empresas estadunidenses, como a de Edison, utilizavam corrente contínua (CC), países da Europa começavam a usar os geradores de corrente alternada (CA): as empresas Ferranti, da Inglaterra, Ganz, da Hungria, e AEG (*Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft*), da Alemanha, instalaram sistemas CA em muitas cidades e começaram a planejar a transmissão de energia hidrelétrica a longas distâncias. Os sistemas de corrente contínua tinham limitações: só eram capazes de atender a uma pequena área, por causa das grandes perdas na transmissão, além de serem mais caros; por isso, começaram a perder terreno no campo da iluminação, e empresários estadunidenses voltaram a atenção para a alternativa europeia. Em 1886, William Stanley, engenheiro da *Westinghouse Electric Company* (fundada nesse mesmo ano em Pittsburgh), inventou um transformador para transmissão de CA a longas distâncias (patente US 349.611) e a empresa instalou a primeira estação comercial de geração de CA em Great Barrington (Massachusetts). O negócio cresceu rapidamente: em 1888, a Westinghouse estava instalando mais usinas elétricas em um mês do que Edison instalou em um ano, e outras empresas, como a Thomson-Houston de Massachusetts, passaram a produzir sistemas de iluminação com CA (HUGHES,

1983; WESTINGHOUSE, 2019).

A grande limitação inicial do sistema CA era a impossibilidade de ser usado na indústria, pois os motores existentes eram acionados por CC. Engenheiros na Itália, Alemanha, Suíça e Estados Unidos estavam trabalhando em motores de indução, e o problema foi resolvido quando Nikola Tesla, também engenheiro da Westinghouse, desenvolveu, em 1888, o primeiro motor CA (patente US 381.968). Em 1890, a Westinghouse começou a instalar linhas de transmissão de longa distância em estados do centro e oeste do país, utilizando quedas d'água como as cataratas do Niágara; em 1894, lançou os primeiros motores de indução polifásicos de CA e, em 1895, produziu a primeira locomotiva elétrica prática. Com o declínio do uso da CC, as pequenas empresas europeias e estadunidenses fecharam ou se fundiram. Este foi o caso da empresa Edison, que em 1892 se uniu à Thomson-Houston, dando origem à *General Electric*. Até o final da década de 1890, o setor elétrico se consolidou em relativamente poucas empresas de grande porte (MEYER, 1972; WESTINGHOUSE, 2019).

A implantação dos grandes sistemas de energia elétrica configurou uma verdadeira revolução porque provocou a mudança da matriz energética em nível internacional: nas instalações industriais, as máquinas a vapor foram substituídas pelas elétricas; nos espaços públicos, nos estabelecimentos comerciais e nas residências, a iluminação elétrica substituiu a de gás. Trens e bondes elétricos substituíram os veículos a vapor e tração animal. Os elevadores possibilitaram a construção de prédios com muitos andares. Todas essas inovações causaram um profundo impacto nas estruturas urbanas, tanto dos países centrais, como dos periféricos do capitalismo. Vários sistemas de iluminação usando CC continuaram em funcionamento, mas a maioria das empresas passou a usar conversores para transformar a energia CA das usinas elétricas em corrente CC. O mesmo método foi usado para fornecer energia às linhas de bondes elétricos, uma vez que os motores CA existentes não eram adequados à tração. Estes exemplos demonstram a versatilidade dos sistemas de CA, que podiam até cobrir as necessidades em CC. Assim, após 1900, a indústria de energia elétrica passou a se organizar rumo ao sistema unificado que se tornaria dominante no século XX: grandes usinas, transmissão de longa distância através do emprego de linhas CA de alta tensão, e distribuição local em tensões mais baixas através de subestações e transformadores (HUGHES, 1983). O sistema, embora eficiente, consolidava padrões de produção e consumo em larga escala que resultariam posteriormente em grandes problemas ambientais.

1.1.5 O caminho para o elétron

As teorias da eletrodinâmica e do magnetismo foram elaboradas desde o início do século XIX. Naquele momento, a teoria dominante no meio científico era a concepção newtoniana de Coulomb, tratada matematicamente por Poisson em 1813, na qual os fenômenos físicos eram de naturezas diferentes e não podia haver interação entre eles. A afirmação de Coulomb desencadeou resistência contra as ideias de Oersted que, influenciado pela *Naturphilosophie*, provou a relação entre a eletricidade e o magnetismo. Mas Ampère aceitou a nova teoria e dirigiu seus estudos para as forças eletrodinâmicas e eletromagnéticas (PURRINGTON, 1987). Entre 1820 e 1826, Ampère publicou artigos mostrando como fenômenos eletromagnéticos podiam ser explicados por forças de atração e repulsão atuando entre segmentos curtos de corrente elétrica, e apresentando a teoria matemática das forças entre correntes constantes. Em 1828, mais um passo foi dado quando o inglês George Green publicou a obra em que desenvolveu o tratamento matemático da eletricidade e do magnetismo, recorrendo ao conceito de potencial. A partir de 1831, Carl Gauss e Wilhelm Weber, na Alemanha, realizaram pesquisas que expandiram os conhecimentos do magnetismo e, na década de 1840, Franz Neumann e Weber, de forma independente, estenderam a teoria de Coulomb para explicar a indução eletromagnética (HUNT, 2010; SEGRÈ, 1984).

As ideias de Ampère, principalmente em relação à origem do magnetismo como resultado de correntes elétricas, influenciaram Faraday, orientando suas experiências. A unificação de eletricidade e magnetismo, que foi um dos maiores resultados do trabalho de Faraday, apoiou-se fortemente na eletrodinâmica de Ampère (PURRINGTON, 1987). Além da descoberta da indução magnética, as pesquisas de Faraday também lhe permitiram afirmar que todos os tipos de eletricidade, de várias origens (térmica, galvânica e estática), são uma só, e que a eletricidade não é uma substância, mas um estado de deformação ou polarização das moléculas do meio, ideia que foi muito importante para o conceito de campo proposto por ele. Em 1832, ao estudar a eletrólise, descobriu que a eletricidade, como a matéria, é formada por unidades isoladas que ele chamou de “átomos de eletricidade”. Nas décadas de 1830 e 1840, Faraday elaborou sua teoria de campo, segundo a qual corpos separados entre si poderiam exercer uma força um sobre o outro, dentro da sua área de influência. Para Faraday, a ação não se dava diretamente a distância através de um espaço vazio, mas era exercida de uma partícula do meio para outra: as linhas de força entre os polos do ímã representavam tensões no espaço e eram associadas à matéria. Por analogia, com essa concepção dos fenômenos do magnetismo, Faraday pensava em linhas de força elétrica espalhando-se pela

superfície do corpo eletrificado e percorrendo o meio circundante; para ele, essas forças eram o verdadeiro fundamento dos fenômenos elétricos; as cargas eram secundárias, apenas efeitos superficiais da passagem das linhas de força pelo meio. Em 1837, Faraday realizou uma série de experimentos que demonstraram o papel ativo do dielétrico nos fenômenos elétricos; entretanto, ele não conseguiu estender os resultados aos fenômenos no vácuo (HUNT, 2010; PURRINGTON, 1987; SERRA; VIEGAS; MAIA, 2008).

O conceito de campo não foi bem aceito por físicos, que o consideravam um artifício resultante da incapacidade de expressar os fenômenos matematicamente, nem por engenheiros, acostumados com o conceito de fluido elétrico. Nas décadas de 1840 e 1850, foram elaboradas teorias alternativas, algumas considerando as cargas elétricas atributos de partículas, e outras afirmando que as cargas elétricas eram fluidos. A situação só começou a mudar com os trabalhos de William Thomson (Lorde Kelvin) e James Clerk Maxwell, que deram forma matemática às teorias de Faraday. Thomson se concentrou na eletrostática e recorreu à analogia com o fluxo de calor para apresentar o conceito de campo, além de substituir o conceito de fluido elétrico pelo de um meio elástico onde se daria a propagação. Maxwell começou a divulgar os resultados de seus estudos em 1861, e em 1873 publicou o *Treatise on electricity and magnetism*, onde apresentou um conjunto de equações para sintetizar a teoria eletromagnética, apoiada nos seguintes conceitos: 1) eletricidade e magnetismo são partes de um único campo eletromagnético; 2) existe um éter que permeia o espaço e é capaz de propagar as forças elétricas e magnéticas, e também a luz. Em sua forma final, a teoria de Maxwell foi responsável pela formulação da teoria eletromagnética, da teoria cinética dos gases e da mecânica estatística de Boltzmann, Gibbs e Einstein, chegando assim a influenciar a teoria quântica e a teoria da relatividade. Ela foi organizada e corrigida, após sua morte em 1879, por um grupo de físicos e engenheiros (os Maxwellianos) cujo núcleo era formado por Oliver Heaviside, George FitzGerald e Oliver Lodge, em torno dos quais se reuniam outros como John Poynting, Silvanus Thompson e Heinrich Hertz. Nesse processo, Joseph John Thomson e Oliver Heaviside perceberam que as cargas elétricas possuíam “massa eletromagnética”, pois sua interação com o campo circundante lhes dava uma resistência a mudanças de velocidade ou direção semelhante à causada pela massa inercial de partículas comuns de matéria (HUNT, 2010; KOCHER, 2014; PURRINGTON, 1987).

Durante esse período, houve poucas tentativas de trazer à tona a questão da existência do elétron. Em 1874, George Stoney, propôs a existência de uma unidade mínima para a eletricidade, como o átomo era para a matéria; a princípio chamou-a de *electrine* e, posteriormente, adotou o nome de *electron* para essa carga unitária (STONE, 1881, 1894).

Em 1881, Hermann Helmholtz lembrou-se dos átomos de eletricidade de Faraday, uma ideia interessante mas sem utilidade prática naquele momento. A controvérsia sobre a natureza da eletricidade só voltou a se acender após 1883, quando Hittorff explicou a fluorescência observada nos tubos de descarga em gases como emissões do catodo, e as pesquisas dos raios catódicos começaram. Para alguns, como Crookes, os raios eram partículas carregadas; para outros, como Eugen Goldstein, eram “éter” (HUNT, 2010; SERRA; VIEGAS; MAIA, 2008).

Em 1888, Hertz divulgou a descoberta das ondas eletromagnéticas, o que parecia confirmar a opinião dos Maxwellianos mais rigorosos, que rejeitavam o conceito de partícula elétrica. No entanto, em 1890, Arthur Schuster, na Inglaterra, partindo da hipótese de que os raios catódicos são partículas, conseguiu medir carga e massa dessas partículas. No início da década de 1890, pesquisadores como Oliver Heaviside, Hendrik Lorentz e Joseph Larmor trabalharam na teoria eletromagnética, procurando conciliar a hipótese do elétron com a teoria maxwelliana. Em 1892, Hendrik Lorentz divulgou uma combinação da lei elétrica fundamental de Weber (de 1846), que atribuíra os fenômenos eletrodinâmicos ao movimento de cargas elétricas, com a ideia de que os elétrons não agiam diretamente uns sobre os outros, mas sim sobre o meio, descrito como o éter de Maxwell. A princípio, a teoria eletromagnética estaria completa em 1895; entretanto, os elétrons ainda permaneciam hipotéticos, com a existência negada por autoridades como Hertz. A situação só mudou na segunda metade da década de 1890, quando começaram a ser apresentadas evidências experimentais da existência e onipresença de partículas com carga negativa. Na Holanda, as pesquisas de Pieter Zeeman permitiram calcular a massa do elétron, mas as partículas ainda eram concebidas como presas dentro dos átomos. No entanto, os estudos que vinham sendo realizados com tubos catódicos permitiram descobrir o movimento livre dos elétrons no espaço: em 1895, Jean Perrin encontrou provas de que os raios catódicos são partículas com carga negativa e Roentgen descobriu os raios X; em 1896, Henri Becquerel, investigando uma possível relação entre os raios X e a fluorescência, descobriu a radioatividade. A partir desses experimentos, cujos resultados coincidiam com os achados de Zeeman, J. J. Thomson (1904, p. 90-94), em 1897, divulgou sua hipótese de que os átomos deviam ser formados por pares de corpúsculos, cada par com uma carga negativa e outra positiva. Vários pesquisadores repetiram os experimentos de Thomson e conseguiram “ver” os elétrons, não deixando mais dúvidas sobre sua existência; mas ainda existia a dúvida sobre se o elétron era onda ou partícula (HUNT, 2010; SERRA; VIEGAS; MAIA, 2008; WHITTAKER, 1910).

As pesquisas sobre a relação entre luz e temperatura levaram Max Planck a propor, em 1900, que a emissão e absorção de energia é descontínua, composta por partes finitas: a

partícula seria uma forma de radiação, o “quantum”. Einstein usou esse conceito para interpretar o efeito fotoelétrico, publicando suas ideias num artigo de 1905 em que propunha a existência do fóton, o quantum da luz, em contraposição à teoria de Maxwell de que a luz seria uma onda eletromagnética. Dando continuação a essas pesquisas, em 1909, Einstein afirmou que não era o caso de escolher uma ou outra teoria, pois certos fenômenos só podiam ser explicados recorrendo simultaneamente às duas visões: onda e partícula. Em 1910, Robert Millikan, nos Estados Unidos, provou que a carga do elétron é uma constante, reforçando a hipótese da descontinuidade do conceito de carga quantizada. O modelo atômico de Bohr, de 1913, também incluiu o conceito do elétron como partícula. Finalmente, entre 1924 e 1926, Louis De Broglie, Paul Dirac e Erwin Schrödinger desenvolveram o modelo da mecânica quântica, incluindo o conceito de dualidade onda-partícula que já fora proposto por Einstein (BUCHWALD, 2001; NORTON, 2019; SERRA; VIEGAS; MAIA, 2008; WARWICK, 2001).

1.2 A PRODUÇÃO DO VÁCUO

A importância da abordagem do vácuo deriva do fato de que essa tecnologia foi instrumental para o estabelecimento de alguns ramos industriais e científicos. Nas indústrias, são do nosso interesse a das lâmpadas elétricas, no século XIX, e a das válvulas eletrônicas no século XX; em relação à pesquisa científica, a tecnologia do vácuo habilitou a criação de instrumentos como o espectrômetro de massa e os aceleradores de partículas (HABLANIAN, 1983). No caso das descargas elétricas nos gases em tubos de vidro, as experiências mostraram que, à medida que eram produzidos valores de rarefação do ar cada vez mais elevados, surgiam fenômenos que estimularam a realização de estudos para entendê-los cientificamente. Ainda do ponto de vista científico, foi levantada uma questão cuja resposta demorou décadas para ser respondida, que consistia em como era possível a propagação da eletricidade através de um gás rarefeito num meio em que fora produzido vácuo. Outro fator de ordem científica, que diz respeito à estrutura da matéria, é o fato de que os primeiros cientistas envolvidos na tecnologia do vácuo ainda não tinham uma ideia clara do mesmo, isto é, não sabiam que o ar era composto de átomos e moléculas que são extraídos quando há a produção do vácuo. A possibilidade prática de criar vácuo assumiu uma importância ímpar para o estabelecimento do método experimental, sendo capaz de produzir conhecimento científico; a importância em torno desse assunto pode ser avaliada pelo questionamento de

Thomas Hobbes acerca da validade dos experimentos da *máquina pneumática* criada por Robert Boyle em 1659 (SHAPIN; SCHAFFER, 1985).

Assim como ocorreu com os conceitos de matéria e energia, vistos anteriormente, a ideia de vazio ou vácuo tem raízes muito antigas. O vácuo, definido como espaço vazio, está presente desde a antiguidade no taoísmo, no hinduísmo e no judaísmo (EMPTINESS, 2006). Nos séculos VI e V AEC, desenvolveram-se na Grécia as visões antagônicas já descritas. Segundo a teoria dos elementos de Empédocles, o ar tinha corporeidade; por isso, o vazio era apenas aparente. Leucipo e seu discípulo Demócrito sustentavam que o mundo é composto de diminutas partículas indivisíveis – os átomos – e, entre eles, haveria um espaço vazio em que eles se moveriam de acordo com as leis da mecânica. A ideia de que na natureza não há vácuo, porque um espaço vazio seria invadido pelo material denso circundante, ficando cheio (*plenum*) e, portanto, a existência do vácuo seria logicamente impossível, foi defendida por Aristóteles que, em aproximadamente 350 AEC, fez acréscimos à teoria de Empédocles. Esta foi a teoria dominante na filosofia europeia durante a Idade Média, mas, durante esse período, o debate continuou entre plenistas, que acreditavam que o vácuo não poderia existir na natureza – o *horror vacui* –, e vacuístas, que acreditavam na sua existência. Ao lado das discussões filosóficas, foram realizadas experiências, muitas conhecidas desde a antiguidade, como a ventosa, a cúpula aquecida que não se solta, a água que não cai do frasco invertido, a água que sobe num vaso invertido onde uma lamparina consome o ar, a clepsidra e a bomba de sucção (sifão), usadas para tentar provar a inexistência do vácuo. Relacionada à questão do vácuo, havia uma linha de estudos sobre o ar, vinda também desde os gregos, que buscava determinar seu peso e o modo como ele exerce pressão sobre os corpos (WAARD, 1936).

Foi nesse contexto que os filósofos naturais procuraram responder a essas questões através de experimentos bem concebidos; em torno de 1600, a possibilidade de existir um espaço com vácuo era bastante debatida pelos filósofos da Itália, da França e da Alemanha (MADEY, 1984; JOUSTEN, 2016). A trajetória da tecnologia do vácuo avançou quando o conceito deixou de ser uma questão filosófica e passou a ser um assunto do âmbito experimental a partir do meio do século XVII, tornando-se, a partir do século XIX, uma questão científica e tecnológica. Com base nestes marcos, Redhead (1999b) divide a história da tecnologia do vácuo em quatro períodos: o primeiro entre 1630 e 1660, o segundo entre 1660 e 1850, o terceiro entre 1850 e 1900, e o quarto a partir de 1900. Aqui será utilizada uma forma ligeiramente adaptada dessa periodização.

1.2.1 Primeiro período: Descoberta do vácuo (1600 a 1660)

Nesse período, caracterizado pela descoberta experimental do fenômeno do vácuo, surgiram contribuições fundamentais para resolver o problema filosófico discutido por plenistas e vacuístas e para instrumentalizar os desenvolvimentos teóricos e técnicos ligados à produção de vácuo. Seus marcos inicial e final são os experimentos de Galileu e a divulgação dos trabalhos de Otto von Guericke (REDHEAD, 1999a).

Os estudos sistemáticos sobre a pressão do ar se originaram de pesquisas de pneumática e hidráulica. No campo da pneumática, em 1614, Galileu Galilei já havia desenvolvido um método para calcular o peso do ar, conforme sua correspondência com Giovanni Baliani. Ele e outros pesquisadores exploravam também os conceitos de pressão, densidade, compressão e rarefação do ar, considerados importantes para explicar e prever fenômenos meteorológicos (WAARD, 1936). No campo da hidráulica, havia a necessidade de resolver um problema prático: as falhas no funcionamento dos sifões usados no bombeamento de água para encher e esvaziar reservatórios. Em 1630, Baliani, que enfrentava este problema em Gênova, perguntou a Galileu por que a água não podia ser elevada, por uma bomba de sucção, a mais de 18 braças (10,5 m). Galileu, que aparentemente já havia observado o fato ao examinar a limpeza de cisternas e fontes públicas em Florença, explicou que o que elevava a água era a força de um vácuo, e que, quando a coluna de água atingia uma certa altura, ficava pesada demais para aquela força agir. A partir dessa reflexão, Galileu planejou, entre 1630 e 1634, um experimento para medir a "força do vácuo", usando um protótipo de uma bomba de pistão, com um recipiente para água (servindo de peso) pendurado embaixo (MAFFIOLI, 2011; SHEA, 2003; USHER, 1929).

As descobertas de Galileu foram publicadas em *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, impresso em 1638. O matemático Gasparo Berti, após ler a obra, resolveu conferir os achados de Galileu: entre 1639 e 1641, construiu em Roma um aparelho formado por um cano de chumbo de 22 braças (30 m), com um braço curto em ângulo reto no alto, e terminando em cada extremidade por uma válvula imersa num recipiente com água, o que permitia encher o tubo e depois verificar a descida da água. Este dispositivo foi o protótipo do barômetro de água (JOUSTEN, 2016; SHEA, 2003). Logo após a morte de Berti, em 1643, o matemático Raffaello Magiotti sugeriu a Evangelista Torricelli que repetisse o experimento de Berti usando água do mar (que, segundo Galileu, seria melhor). Torricelli discutiu o assunto com o físico Vincenzo Viviani: decidiram usar o mercúrio, 14 vezes mais denso que a água, e reduzir o experimento nessa escala, usando um tubo de ensaio com um

metro de altura e uma cuba, ambos cheios com mercúrio. Segundo Carlo Dati, discípulo de Torricelli, na verdade, o experimento de 1644 foi montado e realizado pela primeira vez por Viviani: a extremidade do tubo, tampada com o dedo, foi mergulhada na cuba, e então aberta; e o mercúrio desceu no tubo até o nível de 760 mm, deixando um vazio no alto do tubo. Em carta ao amigo Michelangelo Ricci, Torricelli explicou o resultado pela pressão do ar circundante e lamentou não conseguir realizar seu objetivo principal, que era medir a pressão do ar. Isso foi obtido por Blaise Pascal e Florin Périer que, em 1648, repetiram o experimento na montanha Puy-de-Dôme e obtiveram uma coluna de mercúrio de 711 mmHg no sopé da montanha, cerca de 400 metros acima do nível do mar (onde foi realizado o experimento de Viviani e Torricelli), e de 627 mmHg no alto, cerca de 1.000 metros acima do sopé. Pascal também descobriu que a pressão de uma massa de ar é maior quando ela está mais carregada de vapores ou mais comprimida pelo frio (MATTOX, 2017; WAARD, 1936). Assim, a altura da coluna de mercúrio provou ser útil como unidade de medida da pressão do ar: o mmHg. A altura da coluna de mercúrio no nível do mar em temperatura ambiente, 760 mmHg, foi depois denominada atmosfera (1 atm). Mais tarde, a unidade de 1 atmosfera a 0 °C foi denominada Torr, em homenagem a Torricelli.

Pode-se dizer que a história da tecnologia do vácuo começou com Otto von Guericke, que foi burgomestre de Magdeburgo, na atual Alemanha. Matemático e com experiência em engenharia, Guericke decidiu provar através da experimentação a existência do vácuo. A série de dispositivos que criou e de experimentos que realizou está descrita em seu livro *Experimenta nova (ut vocantur) Magdeburgica de vacuo spatio*. Guericke baseou seus inventos na seringa, utilizada havia vários séculos como instrumento médico. O primeiro experimento, realizado por volta de 1640, consistiu em extrair água de um barril de madeira, usando uma enorme seringa operada por vários homens; quando a água começou a sair, o ar entrou pelas frestas da madeira com grande ruído. Guericke repetiu o experimento extraíndo o ar de uma esfera de cobre, que foi quebrada pela pressão atmosférica exterior. Em 1650, Guericke construiu uma máquina de fazer vácuo, formada por uma bomba pneumática (uma seringa aperfeiçoada) sustentada por um tripé e acionada por uma alavanca. Em 1654, Guericke realizou seu experimento mais famoso, dos hemisférios de Magdeburgo, em que demonstrou que um globo formado por dois hemisférios acoplados exigia uma enorme força para ser aberto após ser feito vácuo em seu interior. A bomba de ar, que Guericke aperfeiçoou nos anos seguintes, possibilitou a realização de muitos experimentos, incluindo a demonstração do vácuo em dispositivos com água e com mercúrio; o exame do fogo, da luz, do som e de animais no vácuo; o peso, a dilatação e a compressão do ar; e a relação entre

pressão atmosférica, altitude e fenômenos meteorológicos, que permitiu a Guericke, em 1660, prever uma tempestade pela queda da pressão (GUERICKE, 1672; MADEY, 1984; MATTOX, 2017).

1.2.2 Segundo período: Experimentos no vácuo (1660 a 1850)

O trabalho de Guericke iniciou uma fase de pesquisas quantitativas e de experimentos em ambiente com vácuo. Sua bomba de ar foi descrita por Gaspar Schott (1657) no livro *Mechanica hydraulica-pneumatica*, influenciando Robert Boyle e seu assistente Robert Hooke, que criaram dispositivos semelhantes. O curto período passado entre a divulgação dos experimentos de Guericke, na Alemanha, e sua adaptação por Boyle, na Inglaterra, provavelmente se deve à estreita ligação deste com algumas das sociedades filosóficas inglesas criadas desde o início do século XVII, como o Círculo de Hartlib (criado pelo *intelligencer* Samuel Hartlib em Londres), que mantinha uma rede de troca de informações entre pensadores de toda a Europa, e o *Experimental Philosophy Club* de Oxford, que explorava os mais recentes avanços científicos.

A partir de 1656, trabalhando em Oxford, Boyle intensificou suas pesquisas em Física e mecânica, e, juntamente com Hooke, decidiu reproduzir o experimento de Viviani e Torricelli, cuja explicação era objeto de disputas entre vacuístas e plenistas. Hooke projetou uma bomba de ar baseada na de Guericke, que baixava a pressão a 6 mmHg. Os dois criaram também o primeiro medidor de pressão sub-atmosférica: um manômetro de mercúrio baseado no de Torricelli, posto dentro de uma campânula selada, com uma escala para identificar o nível da coluna de mercúrio, e acoplado à bomba de vácuo. Em 1659, a bomba estava pronta e Boyle começou a usá-la em estudos de pneumática. Suas primeiras descobertas sobre a pressão do ar e o vácuo foram publicadas em 1660 em *New experiments physico-mechanical*, que na segunda edição, de 1662, incluiu novos experimentos e a lei de Boyle, que descreve a relação entre a pressão e o volume de um gás. Após 1675, com a assistência do francês Denis Papin, Boyle construiu uma bomba de ar com dois cilindros, que produzia pressões abaixo de 1,6 mmHg. O aparelho de Boyle recebeu outros aperfeiçoamentos ao longo do tempo, mas, nos dois séculos seguintes, o projeto básico permaneceu o mesmo, pois era fácil de usar e os experimentos com vácuo ainda não exigiam pressões muito baixas (BOYLE, 1725, 1738a,b; PRINCIPE, 2019; REDHEAD, 1999a; SHAPIN; SCHAFFER, 1985; TYNE, 1994).

Os experimentos de Boyle influenciaram o matemático neerlandês Christiaan

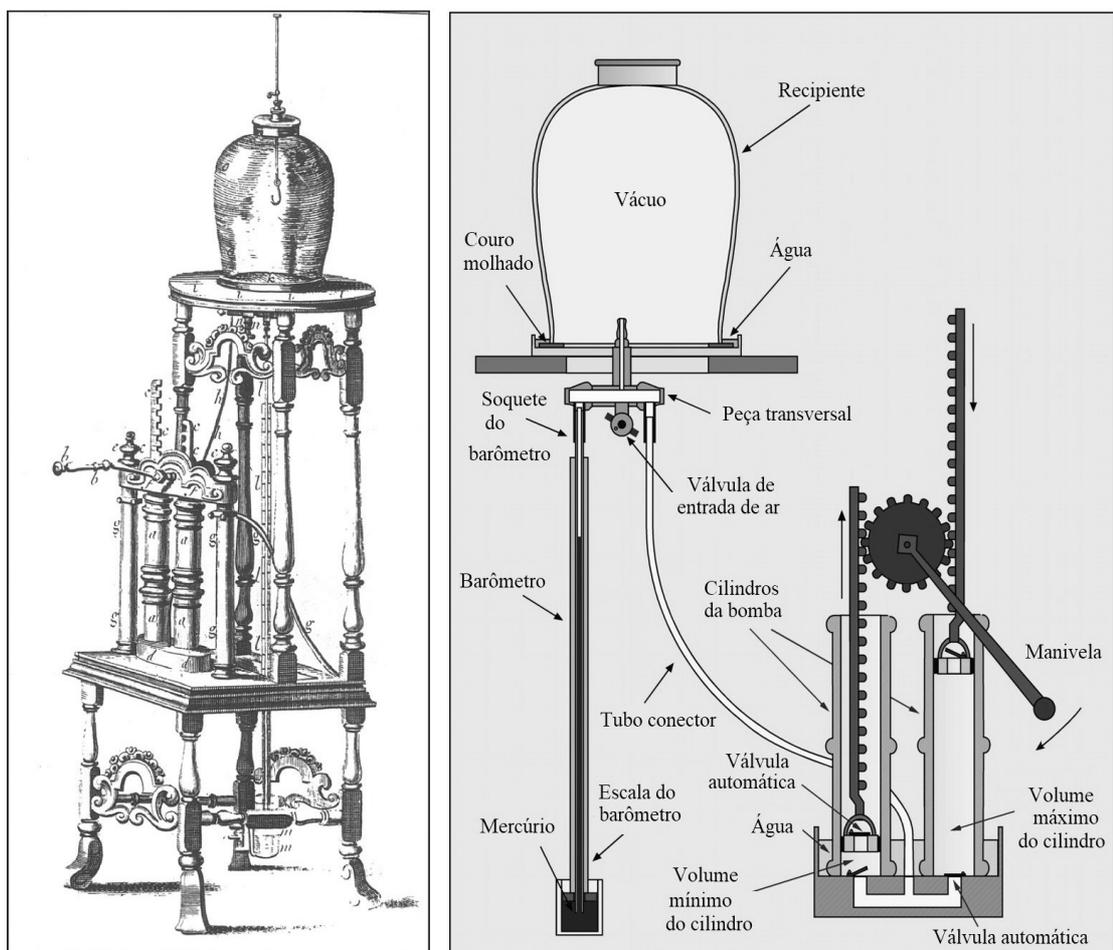
Huygens, embora a principal área de pesquisa deste fosse a astronomia. Em 1661, numa viagem a Londres, Huygens viu a bomba de vácuo de Boyle e, ao voltar para Haia, reproduziu o experimento com um manômetro de água e uma bomba de sua autoria. Entretanto, ao contrário de Boyle e Hooke, observou uma “suspensão anômala” da água no tubo. A divulgação em 1662 desse resultado, que ninguém conseguiu explicar satisfatoriamente na época, reforçou a posição dos plenistas (MATTOX, 2017; NAUENBERG, 2015; O'CONNOR; ROBERTSON, 1997). Em *Leviathan and the air-pump*, Shapin e Schaffer (1985) analisam a disputa entre vacuístas e plenistas focalizando os ataques do plenista Thomas Hobbes a Boyle e seu programa experimental, que Hobbes considerava inferior à filosofia na elaboração de teorias explicativas. Hobbes alimentou essa disputa, atacando vários cientistas, até o início da década de 1670, quando a *Royal Society* condenou seu dogmatismo.

Um nome importante para a tecnologia do vácuo é o de Francis Hauksbee, que fabricava e vendia utensílios médicos e laboratoriais em Londres. No início de 1699, Hauksbee lançou um modelo novo de ventosa, com uma seringa para extrair o ar do bulbo de vidro, e, em 1701, lançou uma seringa grande que denominou “aparelho combinado”, pois servia como bomba de ar, dispositivo condensador e seringa para injetar ar ou líquidos (MEYER, 1972).

Em 1702, Hauksbee lançou sua primeira bomba de ar, com um único cilindro, baseada no aparelho combinado, caracterizada pela facilidade de uso e com várias inovações em relação às bombas então usadas: além da bomba em si, incluía um recipiente para o experimento, um barômetro embutido, válvulas mecânicas para impedir a entrada de ar no pistão, e uma entrada de ar no recipiente para o fim do experimento; tanto o recipiente como os cilindros da bomba assentavam numa base com água, para impedir a passagem de ar. Na verdade, não era só uma bomba, mas um sistema de vácuo completo. O sistema era acompanhado por um conjunto de acessórios e instruções para a realização de uma série de experimentos. Esse sistema, simples e barato, esteve disponível na loja de Hauksbee durante toda a sua carreira, e depois foi vendido por outros comerciantes ao longo do século XVIII. Entretanto, tinha uma limitação: conforme a pressão diminuía dentro do recipiente, ficava cada vez mais difícil puxar o êmbolo da bomba. Para resolver isso, Hauksbee lançou em 1705 um novo sistema em que a bomba tinha dois cilindros cujos êmbolos eram acionados por cremalheiras movidas por uma engrenagem, subindo e descendo alternadamente. Com isso, o esforço de fazer o vácuo era bem menor, e era possível atingir uma pressão de 6,35 mmHg, ou 846,59 Pa (HAUKSBEE, 1709; MEYER, 1972).

Além de criar o projeto inovador do sistema de vácuo, Hauksbee também foi pioneiro no fato de estabelecer um comércio estável de bombas de ar, que não eram mais projetos individuais de pesquisadores, mas “caixas pretas” que só exigiam que o usuário seguisse as instruções do fabricante. Além de expandir o acesso aos sistemas de vácuo, essa característica permitiu que experimentos fossem reproduzidos por diferentes pesquisadores usando equipamentos com comportamento previsível e padronizado. Mais tarde, foram construídas bombas ainda mais eficientes, com princípios de funcionamento diversos, como a bomba em que o espaço abaixo do pistão era preenchido com óleo em vez da água, utilizada como isolante nos primeiros modelos. Além disso, para serem mais robustas, foram posteriormente construídas bombas de metal (MEYER, 1972).

Figura 1.2: O sistema de vácuo de dois cilindros de Hauksbee



Fontes: Imagens adaptadas de Hauksbee (1709, Pl. I, pre p.1) e Brundtland (2012, Fig. 2, p. 257).

Boa parte da atenção de Hauksbee foi dada aos experimentos, tanto em seu trabalho como assistente de laboratório na *Royal Society*, como em conferências, cursos e

demonstrações particulares. No livro *Physico Mechanical Experiments*, de 1709, Hauksbee descreveu mais de 50 experimentos; até 1713, esse total chegou a 120, abordando eletricidade, luz, capilaridade, som, vida, ar, fluidos, magnetismo, ótica e peso específico. Nos experimentos de luz e eletricidade, Hauksbee usou a bomba para fazer vácuo em globos e cilindros de vidro rotativos, criando dentro deles, pelo atrito na superfície externa, uma luz azulada tremulante que desaparecia quando o ar era injetado no recipiente (BRUNDTLAND, 2008, 2012; HAUKSBEER, 1709).

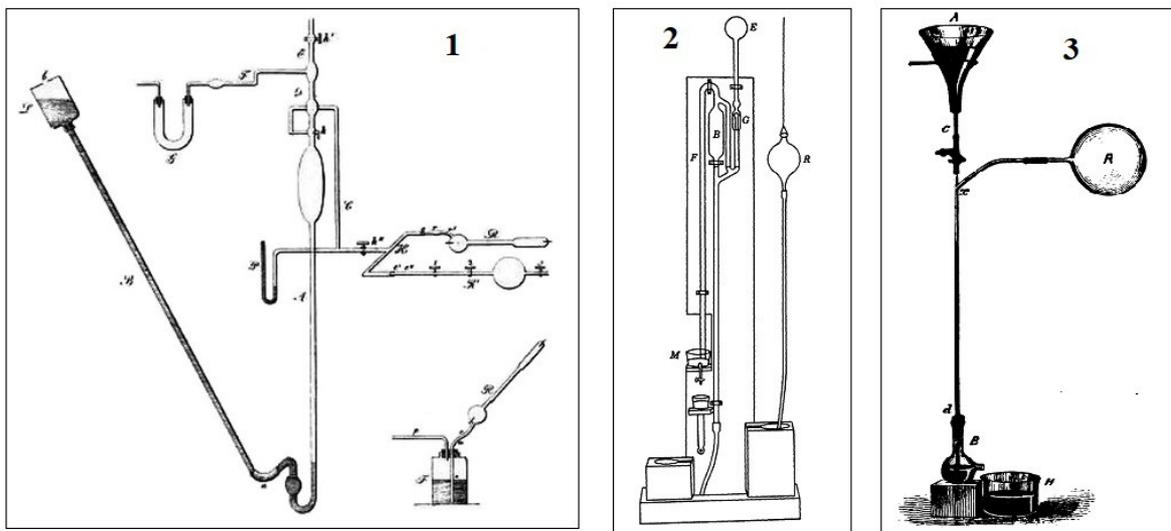
1.2.3 Terceiro período: Tecnologia do vácuo (1850 a 1900)

O terceiro período na história da tecnologia do vácuo teve como marco inicial a Grande Exposição de Londres, em 1851, em que foi oferecido um prêmio para a melhor bomba de vácuo; o vencedor foi John F. Newman, cuja bomba produziu uma pressão de 0,5 mmHg (66,66 Pa). Nesse período, as preocupações principais foram a demonstração das propriedades mecânicas do vácuo, a melhoria da facilidade de uso das bombas e a expansão dos limites da produção do vácuo. Em termos de tecnologia, ocorreu o desenvolvimento das bombas de vácuo e dos manômetros. A motivação inicial era a necessidade de instrumentos acurados para as pesquisas científicas; mais tarde foi a demanda da indústria de lâmpadas, dependente da produção de alto vácuo. Entre os grandes nomes, constata-se uma cena alemã em que se destacaram nesse período Geissler, Töpler e Sprengel (REDHEAD, 1999a).

Heinrich Geissler, vidreiro alemão com oficina em Bonn e trabalhando como mecânico na universidade dessa cidade, produzia vidraria e aparelhos de laboratório, incluindo instrumentos e aparelhos então de uso difundido, e também inovações criadas por ele para atender a demandas específicas. Uma demanda crescente na época era pela obtenção de alto vácuo, essencial para os estudos de descargas elétricas. A tentativa de usar bombas operadas mecanicamente e reduzir o espaço morto na base dos cilindros se mostrou insuficiente para atingir os níveis de vácuo desejados, abaixo de 7 mmHg (933,25 Pa). O problema só foi resolvido quando, em 1855, por solicitação de Julius Plücker, da Universidade de Bonn (com quem posteriormente se associou para as investigações de descargas elétricas nos gases), Geissler projetou uma bomba baseada no projeto de Emmanuel Swedenborg (1847), de 1722, que por sua vez havia adaptado a bomba de Guericke, substituindo o pistão por uma coluna de mercúrio. Geissler modificou o modelo de Emanuel Swedenborg, conectando o reservatório de mercúrio a um bulbo de vidro, por um tubo de

borracha, mais tarde munido de uma torneira bidirecional que permitia conectá-lo ao ar exterior ou ao recipiente a ser exaurido; o bulbo recebia o ar tirado do recipiente. A bomba estava pronta em 1857. Entretanto, embora fosse muito eficiente e capaz de produzir vácuo na faixa de 0,1 mmHg (13,33 Pa), era cara, muito lenta e exigia muito cuidado na manipulação (MATTOX, 2017; REDHEAD, 1999a; REIF-ACHERMAN, 2015; TYNE, 1994).

Figura 1.3: Desenhos esquemáticos das bombas de Geissler, Töpler e Sprengel



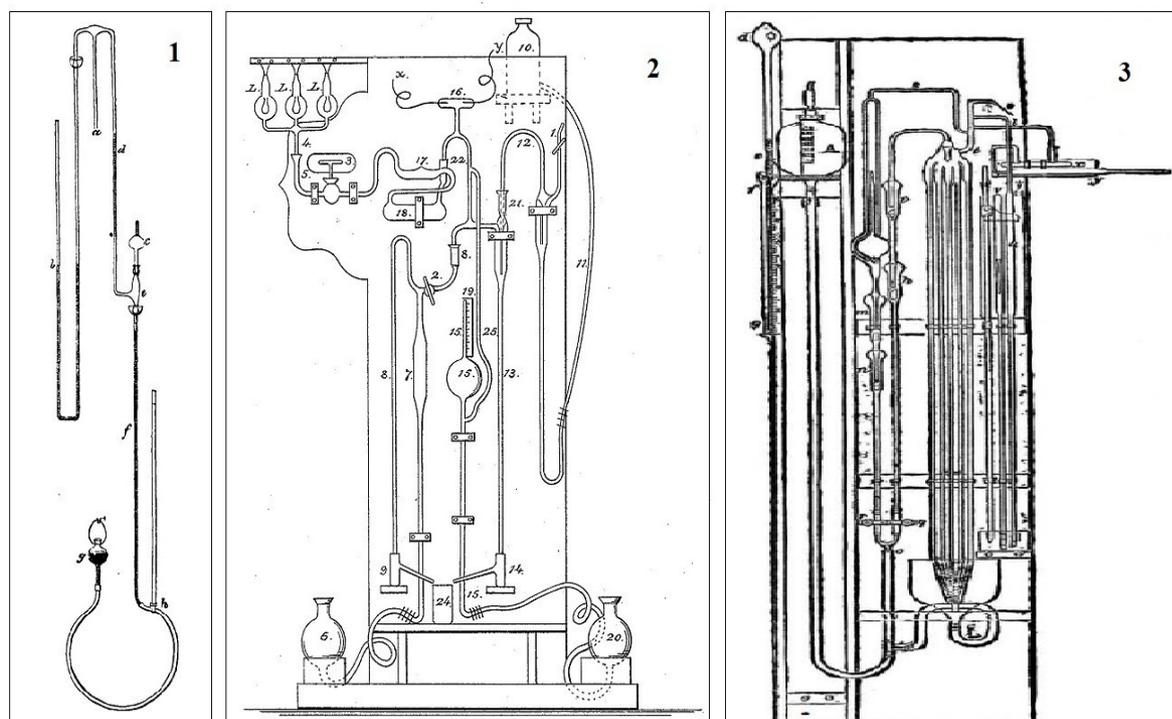
Legenda: 1. bomba de Geissler; 2. bomba de Töpler; 3. bomba de Sprengel.
Fontes: Dushman (1949), Reif-Acherman (2015) e Sprengel (1865).

Para resolver esses problemas, dois outros fabricantes alemães, August Töpler e Hermann Sprengel, dedicaram-se a aperfeiçoar a bomba. Em 1862, Töpler substituiu a torneira por uma junção T, usando o próprio mercúrio como selador: esse arranjo melhorou a passagem do ar a ser expelido e permitiu alcançar pressões de 0,006 mmHg (800 mPa). Em 1873, Sprengel projetou uma bomba em que o mercúrio gotejava de um recipiente, agindo como um pistão num cilindro que capturava porções do ar do tubo e as levava para fora. As porções de ar iam ficando cada vez menores, até que o fluxo de mercúrio se tornava contínuo quando um nível bem baixo de pressão era alcançado (ANDRADE, 1960). No primeiro modelo, o mercúrio era repostado manualmente no sistema, mas, três anos depois, Lambert Babo desenvolveu um modelo autorreciclante. Essa nova bomba podia funcionar praticamente sem supervisão e alcançava pressões na faixa de 0,006 mmHg (800 mPa), o que compensava sua lentidão de funcionamento. A bomba de Geissler recebeu possivelmente a primeira aplicação industrial, nas pesquisas de Edison que possibilitaram o desenvolvimento e produção em massa da lâmpada de filamento de carbono (MATTOX, 2017; REDHEAD,

1999a; REIF-ACHERMAN, 2015; TYNE, 1994). Os modelos de Töpler e Sprengel têm especial importância em termos históricos porque foram utilizados nos experimentos clássicos de raios catódicos, além de serem empregados no equipamento de Röntgen onde foram descobertos os raios X e na eletrônica em geral (ANDRADE, 1960; REDHEAD, 2005).

Aproveitando a bomba de Sprengel, William Crookes, na década de 1870, em função de suas pesquisas de descargas elétricas nos gases, decidiu aprimorar a técnica de vácuo para obter maiores valores de rarefação. Seu assistente Charles Gimmingham fez alterações na bomba de Sprengel, de modo que o dispositivo usava sete tubos e era capaz de atingir valores de vácuo na ordem de 2×10^{-5} mmHg (2,7 mPa). Além do aumento do número de tubos, a melhora obtida na produção de vácuo deveu-se a três fatores: 1) substituição dos tubos de borracha por tubos de vidro; 2) emprego de juntas de vidro; e 3) utilização do processo de desgaseificação através do aquecimento dos recipientes usados para a produção de vácuo. Foi com esse tipo de bomba que Crookes realizou seus experimentos com o radiômetro (ANDRADE, 1960; REDHEAD, 1999a).

Figura 1.4: Manômetro de McLeod, sistema de Edison e bomba de Gimmingham



Legenda: 1. manômetro de McLeod; 2. sistema de Edison; 3. bomba de Gimmingham.
Fontes: 1. McLeod (1874); 2. Edison (1881); 3. Thompson (1888, fig. 23, p. 10.066).

Em termos de medição de vácuo, até 1874, o único instrumento disponível era o tubo de Torricelli, limitado a medir valores em torno de 0,5 mmHg (66,66 Pa). O passo importante

foi a invenção de novo tipo de manômetro pelo químico inglês Herbert McLeod, possibilitando medidas até 10^{-8} mmHg (1 μ Pa), adequadas às necessidades das bombas de vácuo que estavam sendo desenvolvidas na época e posteriormente (JOUSTEN, 2016). O princípio de funcionamento era baseado na compressão do gás em uma coluna de mercúrio para obter uma pressão maior, facilmente medida, sendo que o uso da Lei de Boyle permitia calcular a pressão original. No final da década de 1870, as técnicas desenvolvidas por Crookes foram empregadas na indústria e, para atender às necessidades da produção de lâmpadas incandescentes, Edison desenvolveu um sistema de vácuo formado por duas bombas de Sprengel, um bomba de Geissler e um manômetro de McLeod. O sistema atingia pressões de 10^{-3} mmHg (133 mPa) e, além de ser operado manualmente, era lento e imperfeito demais para o uso industrial (REDHEAD, 1999a; TYNE, 1994).

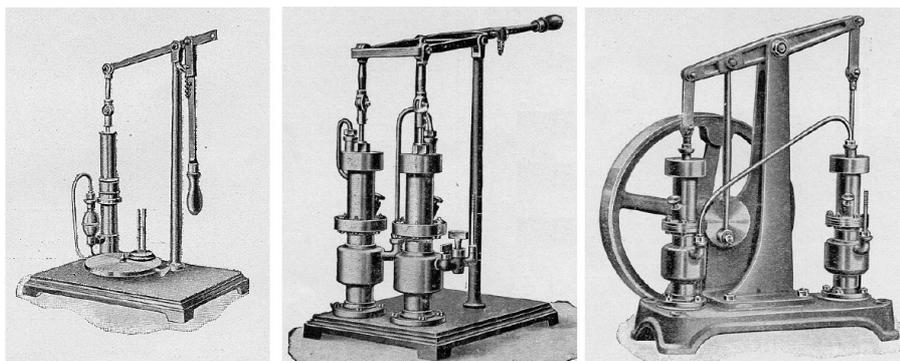
As bombas de Sprengel usadas por Edison para fazer vácuo nas lâmpadas estavam em operação contínua; foi relatado em 1884 que havia 500 bombas em Menlo Park funcionando. Vários outros tipos de bombas baseadas nas de Sprengel por operação contínua também foram desenvolvidos. Em 1886, W. Maxwell e T. V. Hughes desenvolveram uma versão de metal automatizada, adequada para uso em fábricas de lâmpadas, com nove tubos para a queda de mercúrio em paralelo para aumentar a velocidade de bombeamento. Tanto a bomba de Geissler-Töpler como a de Sprengel com um tubo de queda eram extremamente lentas, tendo velocidades de bombeamento inferiores a 10 ml/s; no entanto, eram capazes de atingir 10^{-5} mmHg quando usadas com cuidado (REDHEAD, 2005).

Para se ter uma ideia do interesse das pesquisas sobre o assunto, em um artigo escrito para a revista *Scientific American*, Sylvanus Thompson (1888) enumerou alguns tipos de sistemas de produção de vácuo usando bombas de mercúrio, por diferentes experimentadores, com modificações a partir das propostas feitas por Geissler, Töpler e Sprengel; um deles foi Lane-Fox, na Inglaterra, criador de lâmpadas de filamento, contemporâneo de Edison. Seguindo linha semelhante, Nikola Tesla (1892) em suas pesquisas sobre iluminação, também propôs um sistema de produção de vácuo a partir de bomba de Sprengel.

Nesse período, também foram feitos aperfeiçoamentos na bomba de pistão sólido. Em 1892, o engenheiro inglês Henry Fleuss criou uma bomba que chamou de Geryk, em homenagem a Guericke. Tinha pistão selado a óleo e êmbolo movido mecanicamente, e atingia um vácuo de 2×10^{-4} mmHg (27 mPa). A Geryk foi produzida na Inglaterra pela Pulsometer e, na Alemanha, pela Pfeiffer. Foi largamente empregada na indústria de lâmpadas elétricas, substituindo as bombas de pistão de mercúrio, até o início do século XX. Em 1900, era possível obter pressões na faixa de 10^{-6} mmHg (100 μ Pa) e as bombas dos sistemas de

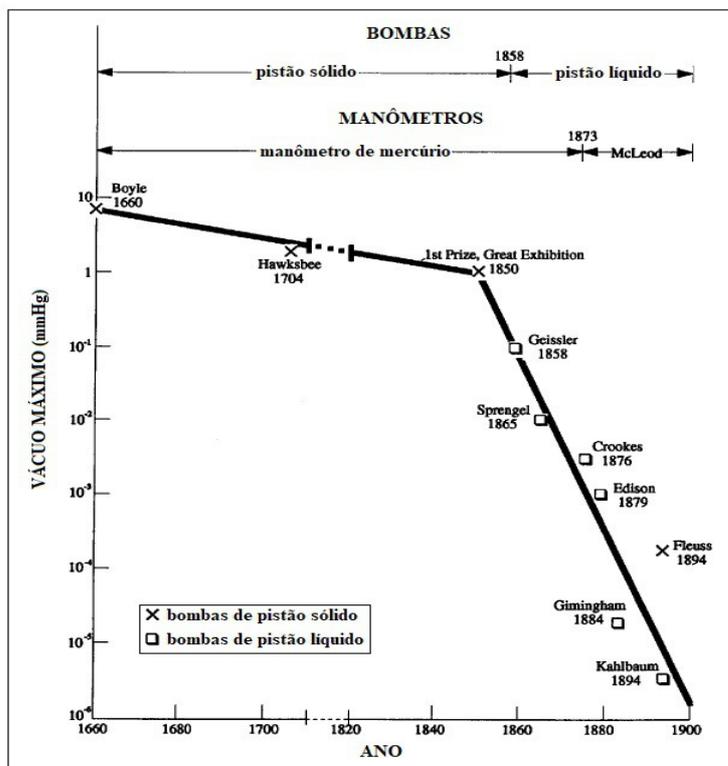
vácuo de uso industrial estavam se tornando motorizadas: a Geryk foi aperfeiçoada em vários modelos e adaptada para a operação por um motor elétrico (GERYK, 1914; MATTOX, 2018; REDHEAD, 1999a).

Figura 1.5: Bombas Geryk de um e dois cilindros



Fonte: Geryk (1905).

Gráfico 1.1: Níveis máximos de vácuo obtidos de 1660 a 1900



Fonte: Redhead (1999a).

1.2.4 Quarto período: O vácuo na indústria (1900 a 1950)

A tecnologia do vácuo no século XX pode ser dividida em etapas, em função dos estímulos que recebeu desde a criação das válvulas até a década de 1960. Nos primeiros anos, a tecnologia do vácuo adotada pela indústria das válvulas foi a mesma usada na indústria das lâmpadas; esta situação durou até o início da 1ª Guerra Mundial, quando os dispositivos industriais precisaram ser aperfeiçoados para atender à demanda crescente de válvulas para equipamentos militares. Na década de 1920, o grande fator de motivação foi a criação da indústria do rádio. Nas décadas de 1930 e 1940, o aperfeiçoamento da automatização dos sistemas produtores de vácuo possibilitou a produção maciça de válvulas desde a 2ª Guerra Mundial até a década de 1960. A demanda por equipamentos de radar promoveu o desenvolvimento de técnicas de produção em grande escala de válvulas de micro-ondas e de tubos de raios catódicos para visualização dos sinais, que por sua vez forneceram as técnicas para a produção de tubos de imagem de TV (REDHEAD, 2005).

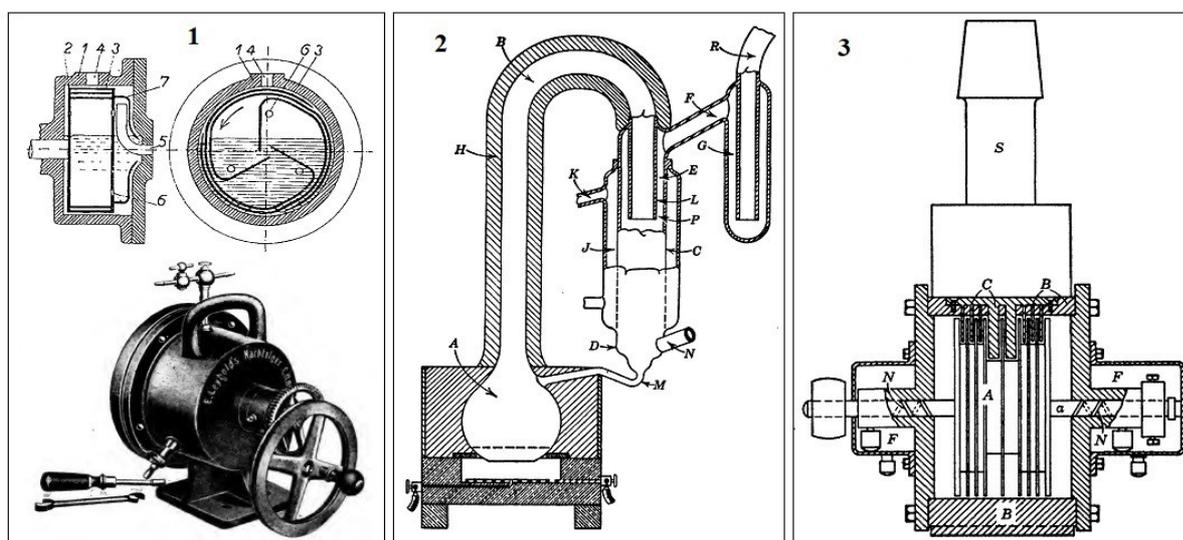
Nas primeiras duas décadas do século XX, a ciência e a tecnologia de produção de vácuo obtiveram grandes progressos. A tecnologia avançou com a criação das bombas de rotação mecânica e de difusão, o desenvolvimento de medidores de condutividade térmica e de ionização, e de técnicas para a eliminação de gases residuais. As melhorias nas bombas para a indústria de lâmpadas reduziram o tempo de bombeamento, de algumas horas no início da década de 1880, para cerca de um minuto. O desenvolvimento científico ocorreu com os estudos realizados para a melhor compreensão das descargas nos gases, dos raios X, da emissão termoiônica, da fotoemissão eletrônica, da vaporização dos sólidos e da química das superfícies.

Seguindo essa linha de pesquisa, em 1905, W. Kaufmann inventou uma máquina de vácuo rotativa que podia ser acionada manualmente ou por um motor elétrico, era capaz de produzir pressões na faixa de 10^{-6} mmHg (133 μ Pa) e, por volta de 1910, era usada em laboratórios dedicados a estudos do vácuo. Também em 1905, Wolfgang Gaede inventou uma bomba rotativa usando mercúrio, que poderia ser acionada por um motor, além de ser mais prática que a de Kaufmann. Gaede foi procurado pela empresa Leybold e sua bomba passou a ser produzida em 1907. Com um modelo similar desenvolvido por Fleuss em 1909, esse tipo de bomba foi muito utilizado nas indústrias de lâmpadas e de válvulas (ANDRADE, 1960; HABLANIAN, 1997; MATTOX, 2018; REDHEAD, 1999b, 2005).

Nos anos seguintes, voltaram a ser produzidas bombas de mercúrio, mas com um novo princípio de funcionamento. Em 1913, Gaede criou uma bomba difusora de jato de vapor de

mercúrio, que também foi produzida pela Leybold, mas não se tornou popular. Em 1916, Irving Langmuir, trabalhando em associação com outros pesquisadores, como Saul Dushman, no laboratório industrial da *General Electric* nos Estados Unidos, aperfeiçoou a bomba de Gaede, mudando a configuração do injetor e fazendo a primeira bomba de metal. Em 1917, William W. Crawford aperfeiçoou a bomba de Langmuir, tornando-a operacional, e desenvolveu uma bomba multiestágios; em 1922, Gaede desenvolveu uma bomba de quatro estágios, de aço, altamente eficiente (MATTOX, 2018; REDHEAD, 1999b, 2005; TYNE, 1994). Além das bombas rotativas, foram desenvolvidas bombas de arrasto molecular e bombas por difusão de vapor inventadas de forma independente por Gaede e Langmuir, que se caracterizam por não possuir partes móveis.

Figura 1.6: Bombas de Gaede e Langmuir



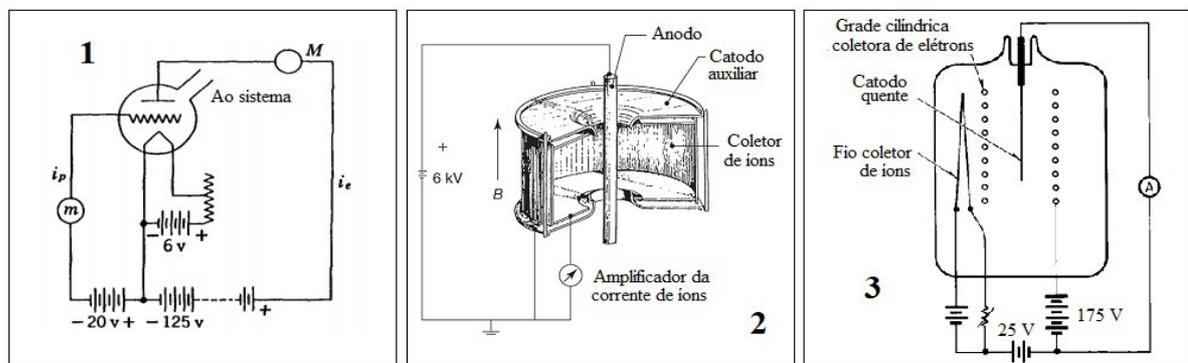
Legenda: 1. bomba rotativa de mercúrio de Gaede; 2. bomba de difusão de Langmuir; 3. bomba molecular de Gaede.

Fontes: Dushman (1922, fig. 8, p. 46; 1949, p. 154).

Um exemplo do impacto das válvulas eletrônicas é a influência que elas exerceram sobre a instrumentação científica e industrial, permitindo a operação em escalas de valores que os medidores com tecnologias anteriores não eram capazes de atingir. No caso do vácuo, a possibilidade de medidas em faixas de pressão cada vez menores se deu à medida que foram sendo aproveitados os princípios de funcionamento de novos tipos de válvulas desenvolvidas. Antes de 1916, havia três tipos de medidores para valores muito pequenos de pressão: os medidores de McLeod, de Knudsen e de Dushman, que mediam valores até 10^{-7} mmHg (10 μ Pa). Com o surgimento das válvulas termoiônicas no começo do século XX, surgiu o barômetro de ionização de catodo quente. Em 1909, Otto von Baeyer sugeriu que um triodo

podia ser usado para a medição de vácuo; em 1916, o estadunidense Oliver Buckley, quando trabalhava na *Western Electric*, desenvolveu o triodo, que foi quase universalmente adotado para medir alto vácuo até 1950, embora tenham surgido outras alternativas, como o barômetro de catodo frio de Penning, criado em 1937. Apesar dessa aceitação, aparentemente, o barômetro de catodo quente não era capaz de detectar valores abaixo de $1 \mu\text{Pa}$ (perto de 10^{-8} mmHg). A situação mudou quando, em 1950, surgiu o barômetro de Bayard-Alpert, que possibilitou medir níveis de alto vácuo e desenvolver os dispositivos de vácuo mais modernos (REDHEAD, 1999b; JOUSTEN, 2016).

Figura 1.7: Medidores de pressão usando válvulas



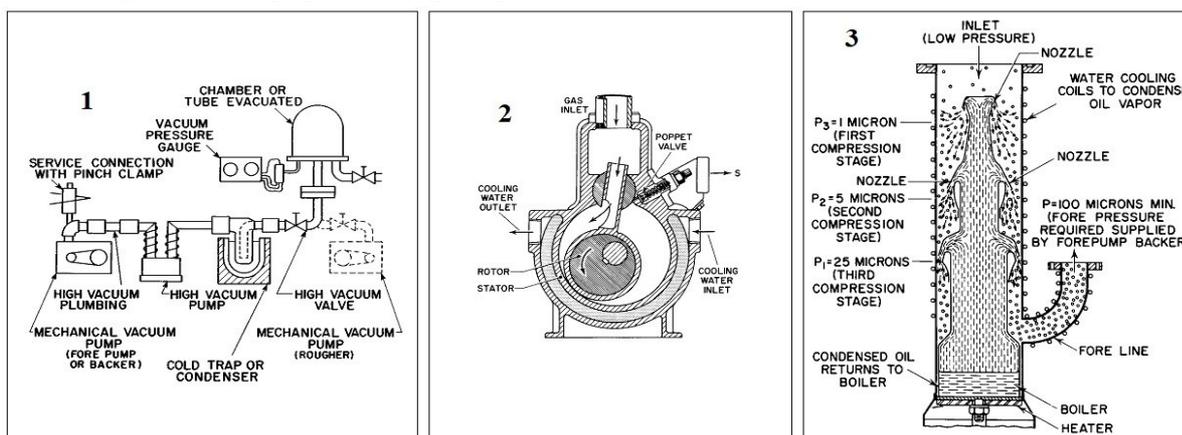
Legenda: 1. Circuito para medição de ionização com triodo. 2. Magnetron invertida de acordo com o princípio de Penning. 3. Princípio de funcionamento do triodo invertido de Bayard-Alpert.
Fontes: 1. Jousten (2016, p. 608); 2. Jousten (2016, p. 630); 3. Weissler e Carlson (1979, p. 68).

A evolução da tecnologia de vácuo perseguiu a capacidade de produzir menor pressão de vácuo e a redução do tempo de produção de vácuo. Para alcançar isso, vários métodos de produção e medição foram propostos e implementados, como as bombas rotativas de óleo e de difusão, bem como a associação de bombas, que foram empregadas por várias décadas depois de serem implantadas.

A técnica de produzir vácuo, herdada da indústria de lâmpadas de filamento, constituiu uma tecnologia habilitadora, orientando e sendo um dos fatores determinantes da indústria de válvulas. Nesse aspecto, as duas primeiras décadas do século XX foram de particular interesse quanto à tecnologia do vácuo, devido ao fato de que a primeira válvula amplificadora de Lee de Forest pôde ser transformada em dispositivo comercial, entre outras coisas, graças a um valor adequado de exaustão no seu invólucro de vidro. No século XX, os maiores usuários de equipamentos de vácuo foram justamente os fabricantes de válvulas. Henderson e Lucarelli (1962, p. 485), ambos trabalhando na RCA, consideravam que a produção de vácuo era o coração do processo de fabricação das válvulas. A indústria eletrônica e elétrica precisou de

valores de pressão de vácuo variando de 100 mPa a 100 nPa ($7,5 \times 10^{-3}$ a $7,5 \times 10^{-9}$ mmHg) para a fabricação de dispositivos como cinescópios usados em TVs e monitores de vídeo de computadores, bem como válvulas de ondas progressivas (TWT) usadas em satélites de comunicações.

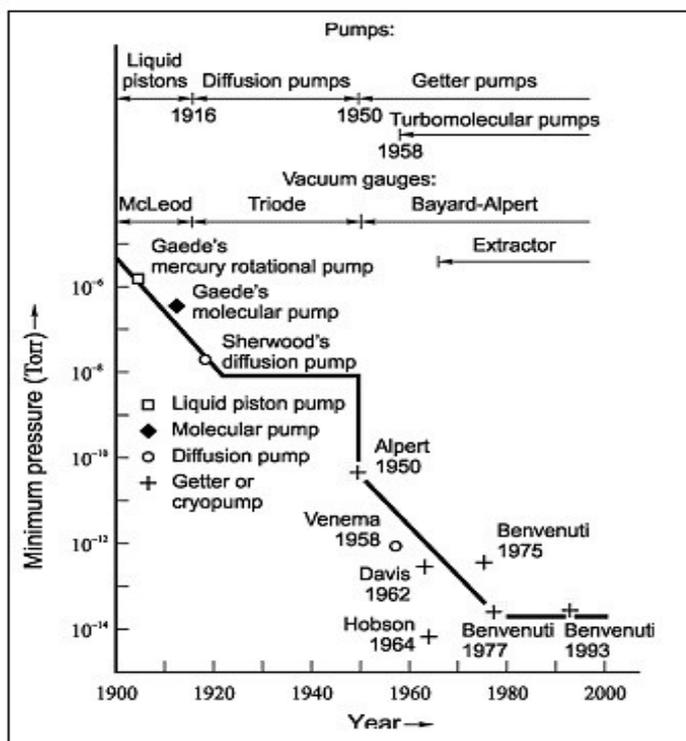
Figura 1.8: Equipamentos para produção de válvulas na RCA (década de 1960)



Legenda: 1. Sistema de vácuo. 2. Bomba rotativa de óleo. 3. Bomba de difusão de óleo.

Fonte: Henderson e Lucarelli (1962).

Gráfico 1.2: Níveis máximos de vácuo obtidos no século XX



Fonte: Redhead (1999a).

1.3 AS DESCARGAS ELÉTRICAS NOS GASES

Uma linha de pesquisa em eletricidade que se mostrou fundamental para o desenvolvimento das válvulas foi a dos experimentos com descargas elétricas em gases. Esses estudos levaram diretamente à invenção dos tubos de catodo frio e forneceram uma base de conhecimentos para o desenvolvimento das válvulas termoiônicas.

1.3.1 As descargas nos gases como fenômenos elétricos

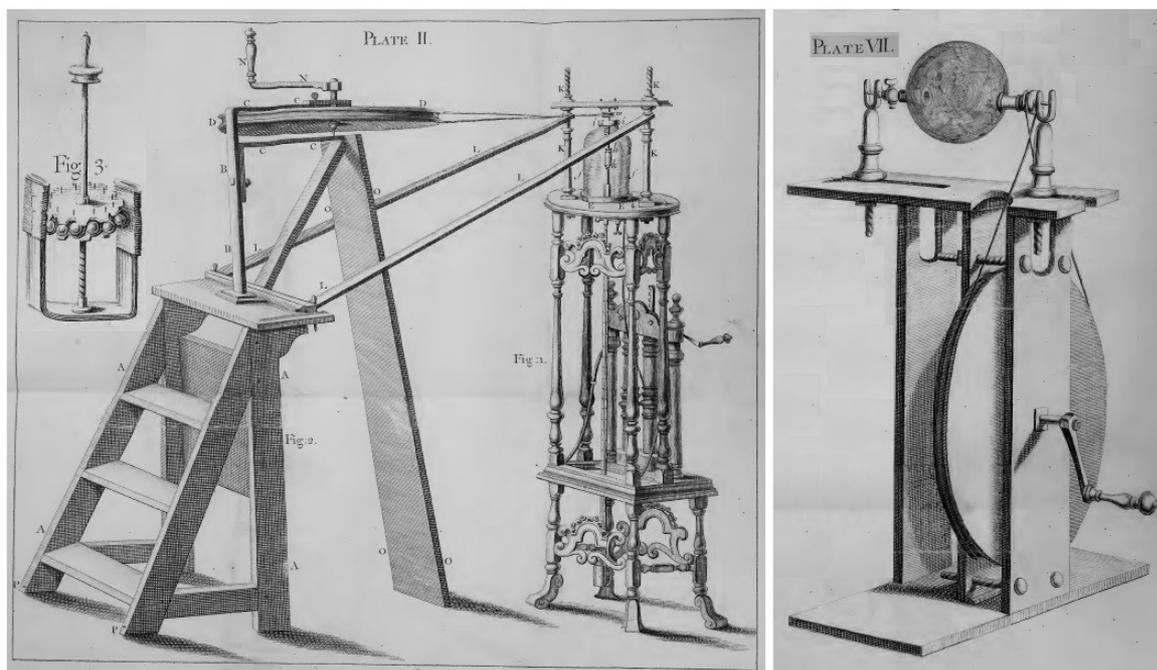
A pesquisa das descargas elétricas nos gases, apesar de ter início no século XVIII, ganhou impulso na segunda metade do século XIX. As indagações científicas acerca dos fenômenos que intrigavam os pesquisadores foram surgindo progressivamente e evoluíram no sentido de trabalhar com outras variáveis além do vácuo e da tensão aplicada, ou seja, com o calor e a luz. Uma questão inicial consistiu em desvendar os mecanismos responsáveis pela descargas nos gases; em outras palavras, como ocorria a transformação de um gás isolante em condutor de eletricidade sob a forma de centelhas ou arcos. O esclarecimento desse ponto levantou interrogações sobre a necessidade de continuidade ou descontinuidade da própria matéria para que houvesse a condução da corrente elétrica. Isso levou à postulação da existência de partículas portadoras de carga elétrica e de massa, identificadas posteriormente como elétrons, como já foi visto.

Essas questões foram sendo respondidas por meio de técnicas experimentais que se tornaram cada vez mais sofisticadas à medida que as pesquisas iam se desenrolando, até que foram incorporadas posteriormente nas indústrias de lâmpadas elétricas de filamento e válvulas eletrônicas, entre o último quartel do século XIX e as primeiras décadas do século XX. Por este motivo, a descrição de alguns experimentos que foram marcos para o desenvolvimento científico e técnico na área contribui para o entendimento das bases da tecnologia das válvulas.

A primeira observação documentada do fenômeno foi feita por Hauksbee em 1705, quando estudava os efeitos do atrito entre diferentes pares de materiais e em diferentes meios (do ar na pressão normal até o máximo vácuo obtido na época). A Figura 1.9 (Plate II) mostra o equipamento utilizado. Dentro de um pote de vidro montado no suporte da bomba de ar (fig. 1), era posto o eixo mostrado na fig. 3, com amostras do material a atritar (como contas de âmbar) presas na borda de um disco que iria girar entre os braços de uma placa de metal dobrada em “U”, forrados com o material atritante (como a lã). O resultado era o surgimento

de uma luz que se mantinha enquanto o atrito era realizado, e que era inversamente proporcional à densidade do ar. A luz gerada pelo atrito entre vidro e lâ era violeta, e acompanhada pelo aquecimento do recipiente; vidro contra concha produzia luz vermelha, e vidro contra vidro, uma luz brilhante que lembrava vidro derretido (HAUKSBEE, 1709, p. 17-50).

Figura 1.9: Dispositivos de Hauksbee para estudar os fenômenos elétricos

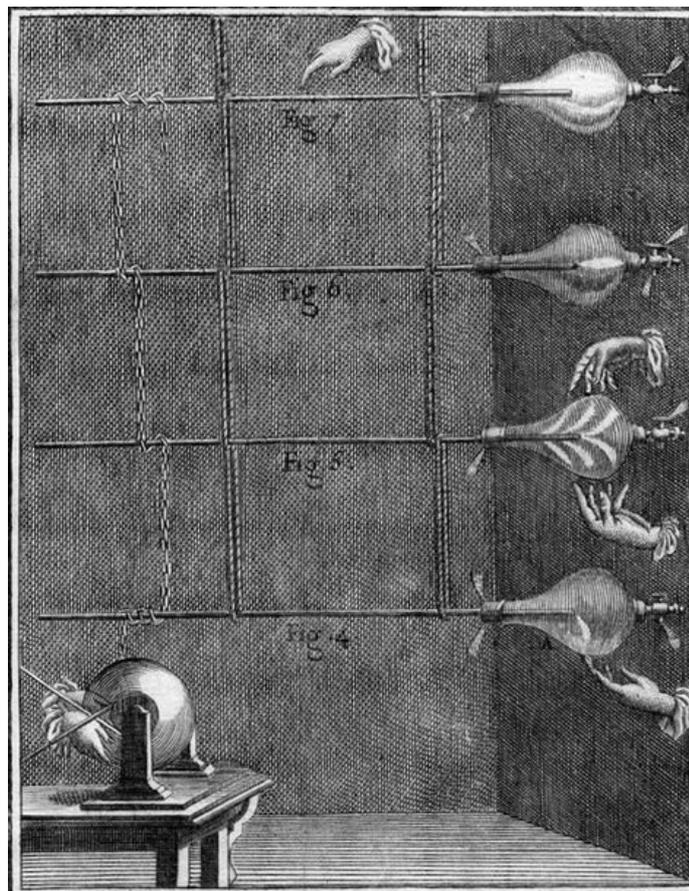


Fonte: imagens adaptadas de Hauksbee (1709, Pl. II, fig. 1, 2; V, fig. 2[3]; VII, pre p. 1).

Para continuar a pesquisa, Hauksbee fez o dispositivo mostrado na Figura 1.9, Plate VII. Um tubo de vidro recebeu um eixo com uma válvula que permitia ligá-lo à bomba de vácuo. O eixo era ligado por uma correia a uma roda semelhante à do dispositivo anterior. Ao girar a roda, o vidro foi atritado com o dedo. O experimento no vácuo ocorreu como os outros, mas, quando repetido com o tubo cheio de ar, surgiu uma luz violeta intensa, acompanhada por um ruído, entre o vidro e o dedo do experimentador que estava próximo dele (HAUKSBEE, 1709, p. 51-52). Embora essas descobertas tenham sido feitas a partir de experimentos com eletricidade estática, o texto de Hauksbee sugere que ele via dois fenômenos diferentes: a eletricidade, que produzia os fenômenos de atração e repulsão, e a luz, em relação à qual sua preocupação foi diferenciá-la do fogo. Esse esforço de Hauksbee foi fundamental para o entendimento da luz porque, no século XVIII, a teoria dominante na Filosofia Natural via a luz e o calor como componentes do fogo (TUFTS, 1829, p. 6-7).

Durante as décadas seguintes, o fenômeno continuou a ser estudado por outros pesquisadores do campo da eletricidade. Em 1746, o físico Jean Antoine Nollet, apresentando à Academia Real de Ciências francesa notícias sobre a invenção da garrafa de Leiden, descreveu as centelhas observadas no aparelho por Pieter van Musschenbroek (professor na Universidade de Leiden), e as interpretou como fenômenos elétricos (NOLLET, 1751). O próprio Nollet continuou estudando o fenômeno e identificou fatores relacionados à geração e ao comportamento de descargas elétricas. Nollet usou um frasco de vidro, o “ovo elétrico”, com um eletrodo em cada extremidade, e conectado a uma máquina eletrostática. O vácuo era feito no início de cada experimento, o que permitia trabalhar em um mesmo frasco com gases diferentes e pressões variadas (NOLLET, 1749; REIF-ACHERMAN, 2015).

Figura 1.10: Experimentos de Jean Antoine Nollet com descargas elétricas



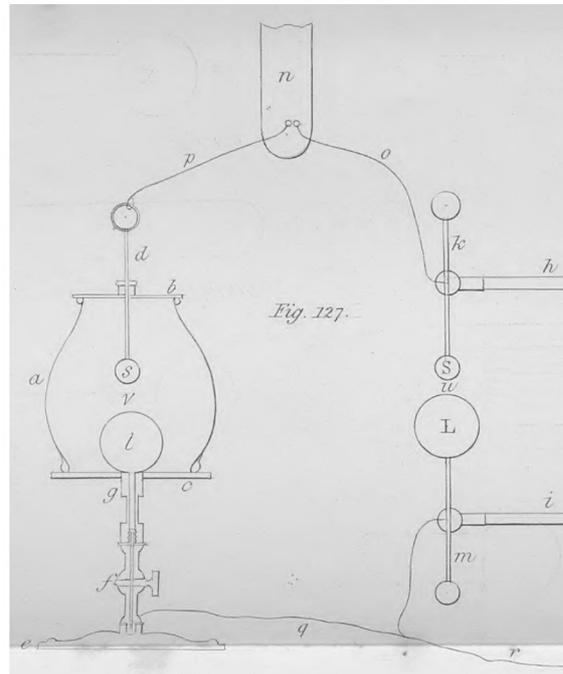
Fonte: Nollet (1749, Pl. 2, pos p. 164).

Um marco importante dessa linha de pesquisas, na primeira metade do século XIX, foi a contribuição de Michael Faraday, que intensificou as pesquisas sistemáticas sobre as descargas nos gases encaradas como fenômenos elétricos (WILLIAMS, 2019). A descoberta

da indução elétrica, em 1831, e a série de experimentos que levou Faraday ao estabelecimento da lei da eletrólise que leva seu nome, em 1834, marcaram o início de um extenso programa de pesquisas nesse campo (FARADAY, 1839, p 1-41, 127-300). O levantamento dos trabalhos mais recentes na área, em particular as pesquisas dos ingleses William Snow Harris e Humphry Davy, mostrou a Faraday que as características da condução elétrica em corpos sólidos e líquidos já estavam bem estabelecidas, mas ainda não havia nada bem definido acerca dos gases, embora Harris tivesse estabelecido alguns pontos sobre a quantidade de eletricidade num corpo carregado necessária para desencadear uma descarga, relacionando-a com a distância entre os pontos de descarga, a densidade, a pressão e a temperatura do ar (FARADAY, 1839, p. 435-438). Faraday estava convencido de que, para entender a eletricidade, era necessário, além do estudo nos sólidos e líquidos, estudar também os fenômenos associados à condução da eletricidade nos gases. Esta lacuna foi então uma extensão lógica de sua linha de pesquisa, que consistia em testar a sua teoria de que os fenômenos elétricos dependiam da ação de partes contíguas da matéria. Em janeiro de 1838, Faraday apresentou à *Royal Society* uma série de estudos sobre os fenômenos elétricos nos gases, reunidos sob o nome de descargas disruptivas, manifestas nas formas de centelhas, raios luminosos e brilhos (FARADAY, 1839, p. 417-515). O problema da pesquisa era: qual é a tensão necessária para que ocorra uma descarga disruptiva nos gases, mantendo-se pressão e temperatura constantes?

O aparelho construído por Faraday (Figura 1.11) consistia em um pote de vidro aberto no alto e no fundo, de modo a ser fechado com duas placas de bronze. A placa superior tinha no centro uma caixa de vedação por onde passava uma haste com uma bola de bronze na extremidade inferior (dentro do pote) e um anel também de bronze na superior (fora do pote). A placa inferior tinha no centro um soquete conectado a um registro ligado ao pé do dispositivo; no meio do soquete passava uma haste que sustentava uma bola de bronze dentro do pote. A outra parte do aparelho era formada por dois pilares isolantes, cada um com uma esfera de bronze na ponta, pela qual passava uma haste deslizante com uma esfera de bronze em cada ponta. O anel acima do pote e a bola de um dos pilares eram conectados por fios a um condutor isolado que podia receber carga positiva ou negativa de uma máquina elétrica. A haste dentro do soquete do pote e a bola do outro pilar eram conectadas por fios a um retorno. As esferas eram de dimensões diferentes e a distância entre elas podia ser alterada. Nos experimentos, o ar foi substituído por outros gases como oxigênio, gás carbônico etc. (FARADAY, 1839, p. 440-441).

Figura 1.11: Dispositivo de Faraday para o estudo das descargas nos gases.

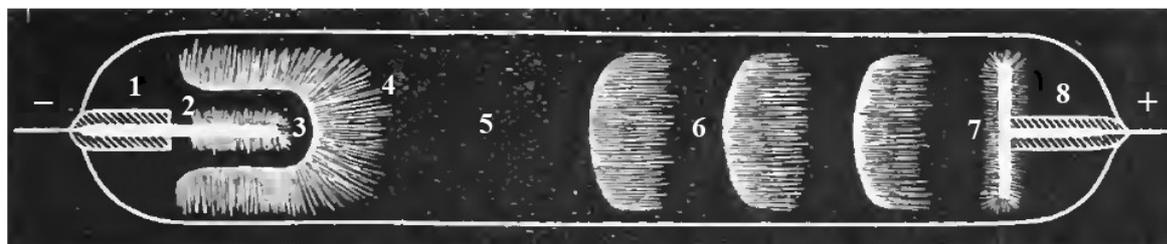


Fonte: Faraday (1839, Fig. 127, pos p. 574).

Com esse dispositivo, Faraday, além de analisar as descargas do ponto de vista da condução elétrica, fez algumas observações inovadoras. Verificou que, em cada gás, a centelha transmitida entre os condutores tinha uma cor diferente: azulada e brilhante no ar (com lacunas escuras quando a eletricidade é baixa), violeta-azulada (e muito sonora) no nitrogênio, azul pálida no oxigênio, carmesim no hidrogênio, azul-esverdeada no gás carbônico, branca no gás de ácido clorídrico, e vermelho, verde ou bicolor no gás de hulha. Em relação aos feixes de luz, Faraday confirmou a afirmação de Charles Wheatstone, de que são formados por uma sucessão de descargas descontínuas, e observou as diferenças que ocorriam variando o tamanho dos terminais condutores, a distância entre eles, a natureza da carga aplicada (positiva ou negativa) e o gás no recipiente. Quanto ao brilho, Faraday supôs que seria dependente de um carregamento rápido e quase contínuo do ar próximo e em contato com o condutor. Observou que a descarga de brilho era produzida diminuindo a superfície do condutor (ou seja, seu diâmetro), aumentando a potência da máquina geradora e rarefazendo o ar (ou outro gás) no frasco, e estabeleceu as conexões entre a centelha, o feixe de luz e o brilho, descrevendo a transição de um tipo de descarga para outro. Faraday também buscou explicação para a descarga negativa e o espaço escuro junto ao condutor, verificando que o fenômeno ocorria em geral no ar muito rarefeito, na faixa de 112 mmHg, ou um pouco acima quando outros gases eram usados (FARADAY, 1839, p. 452-495). Os experimentos de

Faraday ficaram sem explicação durante algum tempo e acabaram por servir de inspiração para que outros pesquisadores dessem continuidade a esse tipo de pesquisa (HIEBERT, 1995).

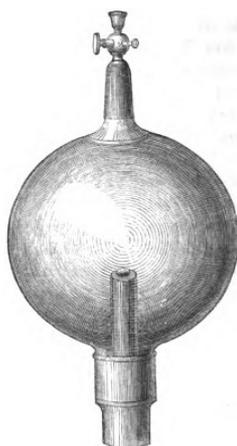
Figura 1.12: Regiões da descarga dos raios catódicos



Legenda: 1- catodo; 2- luz negativa (1ª camada); 3- espaço escuro de Crookes; 4- luz negativa (2ª camada); 5- espaço escuro de Faraday; 6- linhas de pressão molecular; 7- luz positiva; 8- anodo.
Fonte: imagem adaptada de Graetz (1925, fig 295, p. 322).

Uma década depois dos experimentos de Faraday, uma linha de pesquisas empreendida consistia em comparar os resultados obtidos em laboratório com aqueles observados na natureza. Um deles dizia respeito à natureza da aurora boreal, em relação à qual, conforme o pesquisador inglês William Grove, havia a crença de que seria de origem eletromagnética, e os experimentos de laboratório com descargas nos gases poderiam ajudar no esclarecimento do fenômeno (HIEBERT, 1995, p. 98).

Figura 1.13: Globo usado por Auguste de la Rive no experimento de 1849



Fonte: Rive (1856, p. 248)

Para estudar o assunto, o físico suíço Auguste de la Rive, em 1849, elaborou um experimento que consistia em um tubo de vidro com diâmetro variando de 30 a 40 cm, com dois pescoços, cuja pressão interna foi diminuída através de uma torneira; dentro do tubo

havia uma barra de ferro de 2 cm de diâmetro posicionada alcançando quase a metade do centro do globo. A barra era coberta por goma laca em toda a sua extensão, exceto na extremidade. Um tubo de vidro foi colocado sobre a goma laca e coberto com uma camada de cera e, o conjunto foi envolvido por um anel de cobre próximo ao pescoço inferior. Uma alta tensão, aplicada através de uma máquina eletrostática ao anel de cobre através de um fio, dava origem a centelhas irregulares oriundas de vários pontos, como no ovo elétrico; porém, à medida que um eletromagneto era posto próximo ao globo, observava-se um anel luminoso contínuo em torno da barra (RIVE, 1856).

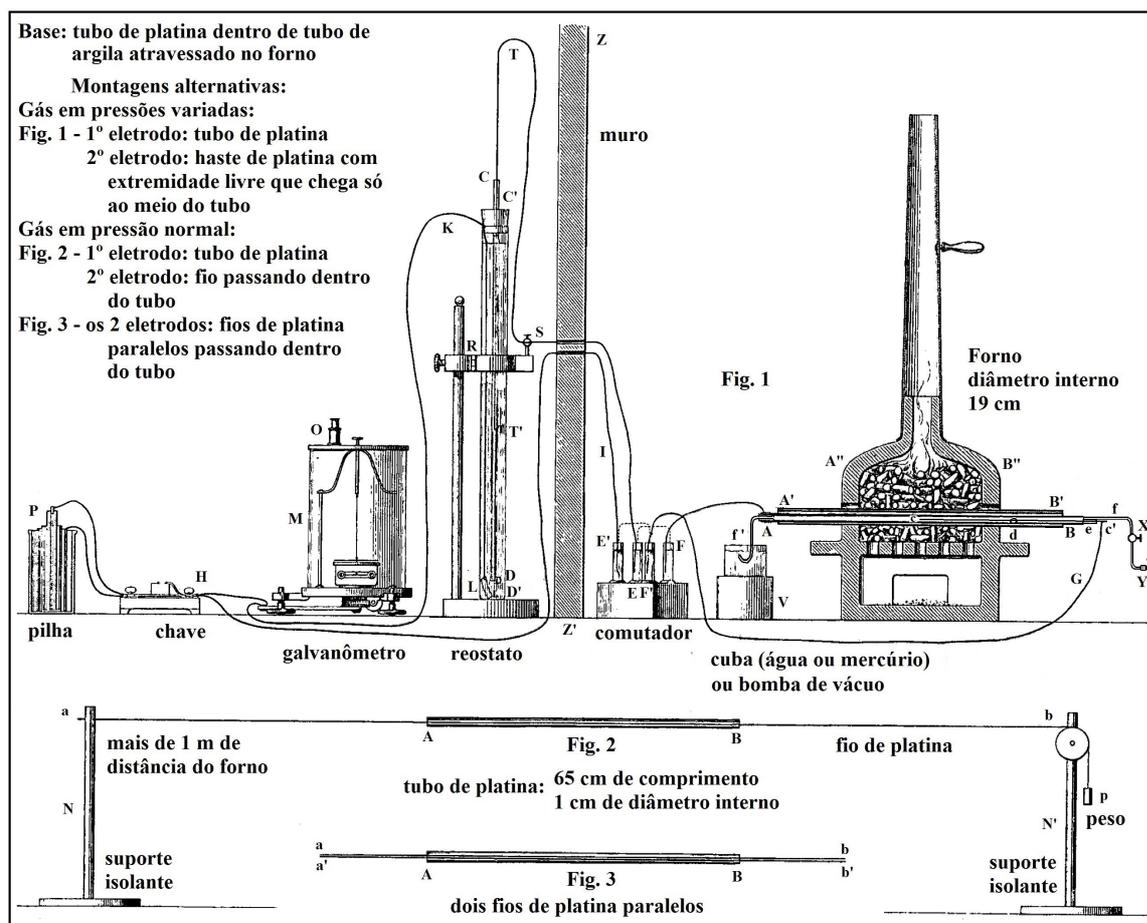
Os experimentos do físico Alexandre Edmond Becquerel, na França, realizados a partir de 1853, foram um marco nas pesquisas com descargas nos gases devido ao fato de Becquerel ter sido o primeiro a combinar eletricidade, calor e gases rarefeitos. Em 1851, o químico e físico alemão Heinrich Buff tinha descoberto a eletrificação produzida pelo calor, aquecendo a extremidade de duas tiras de platina postas em um tubo de vidro fechado, o que produziu uma corrente elétrica entre as tiras dentro do tubo, que se deslocava da parte quente para a fria. Mas foi Becquerel, com sua série de experimentos, quem explicou os fenômenos envolvidos na emissão termoiônica (TYNE, 1994).

Becquerel partiu de uma revisão dos estudos existentes sobre a condutividade dos corpos, os quais mostravam que: 1) Na temperatura ambiente, os gases, em pressão normal ou rarefeitos, não são condutores, desde que a eletricidade não tenha tensão suficiente para estabelecer um arco voltaico entre as extremidades dos fios metálicos. 2) A condutividade diminui nos metais aquecidos e surge em diversos materiais não condutores aquecidos. 3) As chamas conduzem eletricidade. 4) Independentemente do poder condutor da chama, o efeito aumenta quando se aquece o corpo, especialmente o condutor positivo. A partir dessa base, Becquerel planejou um experimento para responder às seguintes perguntas: 1) Essa propriedade condutora das chamas ocorre nos gases aquecidos? 2) O calor age da mesma maneira sobre todos os gases? 3) Qual é a influência da sua força elástica? 4) A transmissão de eletricidade nos gases é acompanhada pela decomposição como ocorre nos líquidos? (BECQUEREL, 1853).

A Figura 1.14 mostra o equipamento usado por Becquerel. O centro da aparelhagem era um par de eletrodos colocado dentro do tubo de argila **A'B'** que atravessava o forno: Tyne (1994, p. 27) ressaltou que essa estrutura pode ser considerada o protótipo do diodo termoiônico. A aparelhagem permitia montagens diferentes. Se o gás utilizado fosse o ar em pressão normal, as extremidades do tubo de platina **AB** ficariam abertas e os eletrodos podiam ser montados como mostram as figs. 2 e 3. A montagem da fig. 1 era destinada ao uso com

outros gases em pressão normal e com qualquer gás (inclusive o ar) em pressões diferentes da atmosférica. Para esses fins, a extremidade **B** levava uma rolha de cortiça com dois pequenos tubos, **e** e **f**, revestidos com goma laca; o tubo **f** deixava passar o gás e o **e** deixava passar a haste de platina que era o segundo eletrodo. Se o gás fosse diferente do ar, **f** era ligado a um gasômetro, de modo a fazer passar uma corrente de gás no tubo, no qual uma torneira de cobre permitia interromper o fluxo; a extremidade **A** do tubo também recebia uma rolha com um tubo **f'** que levava o gás para uma cuba com água ou mercúrio, se a operação fosse realizada na pressão normal. Se fosse preciso rarefazer o gás, o tubo **f'** seria substituído por outro que comunicava a extremidade **A** com uma máquina pneumática; o tubo **f** deixava entrar o ar ou o gás vindo do gasômetro, e podia-se, fechando a torneira instalada em **f**, diminuir a pressão do gás ou ar no tubo. O reostato e o galvanômetro permitiam controlar a corrente fornecida pela pilha; o comutador permitia alternar entre eletricidade positiva e negativa.

Figura 1.14: Aparelhagem dos experimentos de Edmond Becquerel



Fonte: Figura adaptada de Becquerel (1853, Pl. I, *Recherches...*, pos p. 512).

O experimento mostrou que, após o ponto de aquecimento ao rubro do tubo (e não

abaixo dele), a resistência do gás à eletricidade diminui com o aumento da temperatura e, numa mesma temperatura, a resistência do gás é inversamente proporcional à intensidade da corrente aplicada. Na pressão atmosférica normal, mantendo a temperatura constante, a resistência não parece depender da intensidade da corrente; mas, conforme se diminui a pressão do gás, a influência da intensidade elétrica se manifesta e, numa pressão de 3 ou 4 mmHg, todos os gases rarefeitos transmitem igualmente bem. Com o aquecimento ao rubro, ocorre transmissão mesmo em pressão normal; mas na temperatura ambiente, nem no vácuo mais perfeito ocorre transmissão elétrica apreciável. A partir dessas observações, Becquerel questionou a hipótese da transmissão da eletricidade por partículas materiais, contrariada pela constatação da melhor condutividade no vácuo. Por outro lado, segundo o pesquisador, a hipótese da transmissão por descargas não explicava a variação com a temperatura (BECQUEREL, 1853). As conclusões dos experimentos de Becquerel foram importantes sobretudo devido a essa dúvida final em relação à natureza da condução da eletricidade nos gases, o que abriu novas linhas de investigação. O próprio Becquerel estendeu suas pesquisas sobre os fenômenos da então chamada fosforescência, identificando várias causas do fenômeno, como o aquecimento, a aplicação de eletricidade e a exposição à luz (BECQUEREL, 1859).

Na sequência dos experimentos com eletrodos, o engenheiro francês Jean Mothée Gaugain, no início da década de 1850, estudou as correntes elétricas que já se sabia serem formadas pela sucessão rápida de correntes fluindo em direções alternadamente opostas. Para realizar os experimentos, Gaugain produziu o que denominou “ovo válvula” (*oeuf soupape*): um ovo elétrico de Nollet, no qual revestiu a esfera superior, junto com a haste e o anel que a sustentam, com uma substância isolante, deixando exposto apenas um pequeno ponto da esfera. Ligando esse ovo a uma bobina Ruhmkorf e um galvanômetro, Gaugain comprovou que, quando as correntes induzidas seguiam da esfera coberta para a esfera nua, a intensidade da corrente aumentava à medida que o ar contido no ovo se tornava cada vez mais rarefeito; mas quando as correntes se moviam da esfera nua para a coberta, a intensidade da corrente aumentava primeiro, à medida que a pressão do ar diminuía; mas, quando essa pressão caía abaixo de um certo limite, o desvio do galvanômetro diminuía e, atingindo uma pressão muito baixa, tornava-se nula e depois mudava de sinal. A constatação de que as correntes atravessam livremente o “ovo” enquanto seguem num sentido, e não podem seguir na direção oposta, levou Gaugain a afirmar que o ovo elétrico, assim preparado, poderia desempenhar, em relação às correntes elétricas, papel similar ao das válvulas hidráulicas em relação aos líquidos, e poderia ser usado em alguns tipos de pesquisas (GAUGAIN, 1855). Com este

experimento, Gaugain descobriu a função retificadora dos tubos de descarga em gases, e foi o primeiro a aplicar o termo “válvula” (*soupe*) a um dispositivo controlador de corrente elétrica.

1.3.2 A relação entre fenômenos eletromagnéticos e óticos

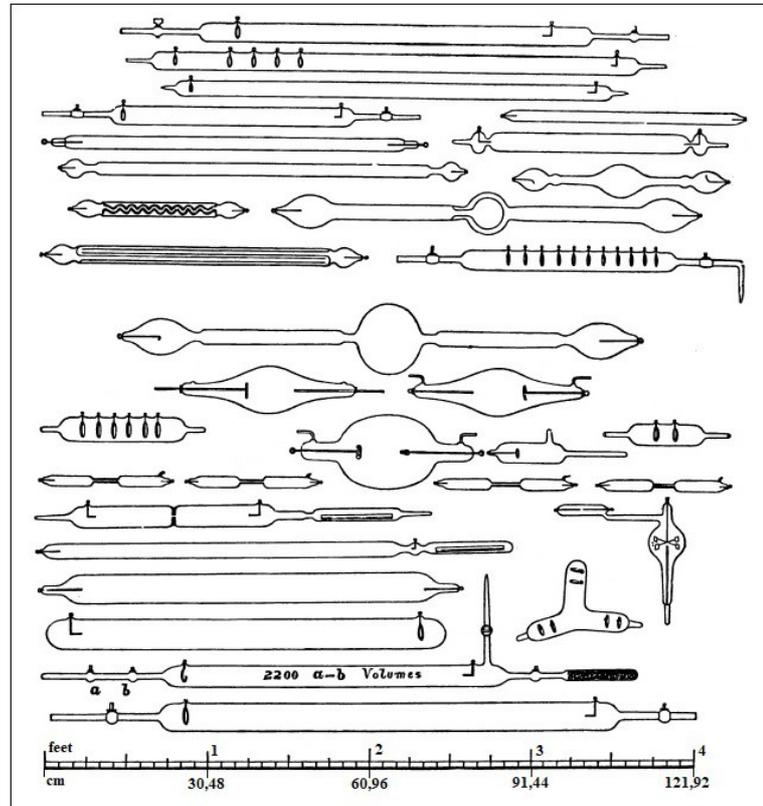
Ao lado desses estudos do comportamento das correntes elétricas no vácuo, pesquisadores em vários países continuaram estudando a relação entre fenômenos eletromagnéticos e óticos. Por volta de 1855, o físico alemão Julius Plücker, da Universidade de Bonn, que seguia um programa de pesquisas em magnetismo, decidiu reproduzir os estudos de Faraday. Para realizar os experimentos sobre descarga em gases rarefeitos, Plücker pediu a Henrich Geissler, um vidreiro e fabricante de instrumentos científicos que trabalhava no gabinete de Física da universidade, que desenvolvesse uma bomba capaz de atingir os níveis de vácuo que ele desejava.

Além da bomba de vácuo, Geissler criou, na mesma época, tubos de vidro para os experimentos com descargas elétricas. Baseando-se no ovo elétrico de Nollet, inventou um método para fixar os eletrodos nas extremidades do tubo em um selo feito com chumbo misturado na massa de vidro. Como a selagem era realizada após fazer vácuo no tubo, este estava sempre pronto para usar, sem precisar da preparação com a bomba de vácuo. Os tubos de Geissler não podiam ser reabertos e adaptados para diferentes experimentos, mas foram fabricados numa grande variedade de formatos, em vidro puro ou com minerais adicionados, preenchidos com diferentes gases e partículas, e até inseridos em ampolas cheias com líquidos coloridos, de modo a gerar descargas luminosas e brilhos em cores variadas. Pelo fato de receberem eletrodos feitos com fios de platina, que tem um coeficiente de expansão próximo ao do vidro, os tubos de Geissler eram muito confiáveis para experimentos em temperaturas variáveis, pois apresentavam pouco risco de rachar (DIJKSTRA, 2019; GRAETZ, 1927; GUARNIERI, 2018; HIEBERT, 1995; REIF-ACHERMAN, 2015).

Os tubos de descarga em gás, de Geissler e de outros fabricantes, foram vendidos por empresas alemãs dedicadas a materiais e instrumentos científicos até pelo menos o final da década de 1920. Os catálogos dessas empresas incluíam tubos de raios-X e de raios catódicos, além de bulbos e tubos para experimentos e demonstrações de Química e Física (DIJKSTRA, 2019, *Traders*). Esses tubos, além de serem utilizados para pesquisa e ensino, tornaram-se objetos decorativos usados em demonstrações públicas, e constituíram a base para o posterior

desenvolvimento de lâmpadas, tubos e válvulas de catodo frio.

Figura 1.15: Alguns modelos de tubos de Geissler



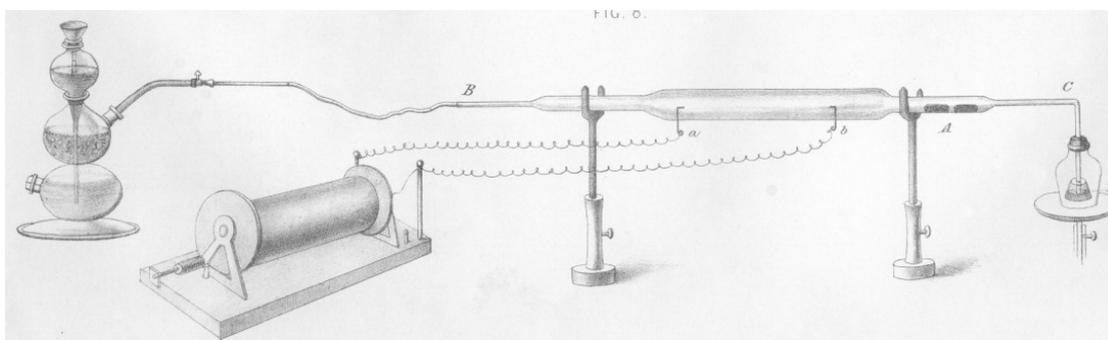
Fonte: Rue e Müller (1878, fig. 37, p. 77).

Utilizando tubos Geissler ativados por bobinas de Ruhmkorff, Plücker estudou o efeito do magnetismo sobre as descargas elétricas nos gases e o espectro da emissão luminosa. Além de verificar que o campo magnético de um ímã provocava o desvio da corrente elétrica, observou as diferenças entre os efeitos do ímã nas proximidades dos eletrodos positivo e negativo, revelando a formação de uma luminescência esverdeada na área próxima ao catodo. Como rejeitava a ideia de vácuo absoluto e considerava necessária a presença de matéria para a formação da corrente elétrica, Plücker explicou os efeitos luminosos da descarga como o espectro do gás existente no tubo (HIEBERT, 1995; PLÜCKER, 1858a, 1858b). Entretanto, apesar dessa interpretação que se mostrou errônea, a observação de Plücker, estudada posteriormente por outros pesquisadores, levou à descoberta e ao entendimento dos raios catódicos e do elétron.

Nesse entretempo, na cena inglesa, os estriamentos, estratificações e regiões escuras que surgiam, formados nos tubos de descargas e observados por Michael Faraday, continuavam a intrigar os pesquisadores. Com essa perspectiva, John Peter Gassiot, cientista

amador e membro da *Royal Society*, resolveu estudar o problema. Inspirado pelas pesquisas de Faraday e incentivado por William Grove, Gassiot estava convencido de que esses fenômenos poderiam ser melhor observados em tubos em que fosse feita uma boa rarefação dos gases e, para isso, empregou os melhores equipamentos disponíveis no momento e tubos fabricados por Geissler, dos quais chegou a testar 60. Seguindo os trabalhos de outros cientistas, Gassiot estava atento, por exemplo, à pesquisa de Plücker quanto à influência exercida pelo campo magnético sobre as descargas elétricas. Gassiot inseriu mercúrio nos tubos para posteriormente ser vaporizado por aquecimento, misturado com ar, nitrogênio e oxigênio; também experimentou o gás carbônico. A técnica de utilizar mercúrio foi usada posteriormente, principalmente nas válvulas de potência, no século XX. Gassiot descreveu experimentos com tubos curtos, de 25 cm, ou longos, de 96 cm de comprimento, com diâmetro interno de 2,5 cm e os eletrodos separados por 81 cm. Dependendo do gás inserido, o comprimento da região escura variava; o vapor de mercúrio, por exemplo, produziu uma região escura de 25 cm de comprimento (GASSIOT, 1859; HIEBERT, 1995).

Figura 1.16: Aparelhagem de teste de descarga nos gases de Gassiot (1858)



Fonte: Gassiot (1859, Plate IX, fig. 8, pos p. 160).

Apesar do esforço de experimentação na Inglaterra, o avanço na elucidação dos fenômenos das descargas elétricas nos gases seria dado pelos pesquisadores da Alemanha. As pesquisas de Plücker sobre as descargas elétricas foram continuadas por seu assistente, Wilhelm Hittorf, que examinou em detalhes as descargas nos tubos de Geissler, dando atenção ao espaço escuro identificado por Faraday entre o catodo e a “luz negativa” (do catodo) que o circundava. Hittorf observou que, nos níveis de pressão usualmente atingidos nos tubos de Geissler – 1 a 3 mmHg (133,32 a 400 Pa) –, o espaço escuro era muito estreito, mas, conforme a pressão era reduzida, esse espaço ia crescendo, enquanto a luz positiva (do anodo) diminuía, até o tubo ficar totalmente preenchido pelo espaço escuro. Ao chegar a esse ponto

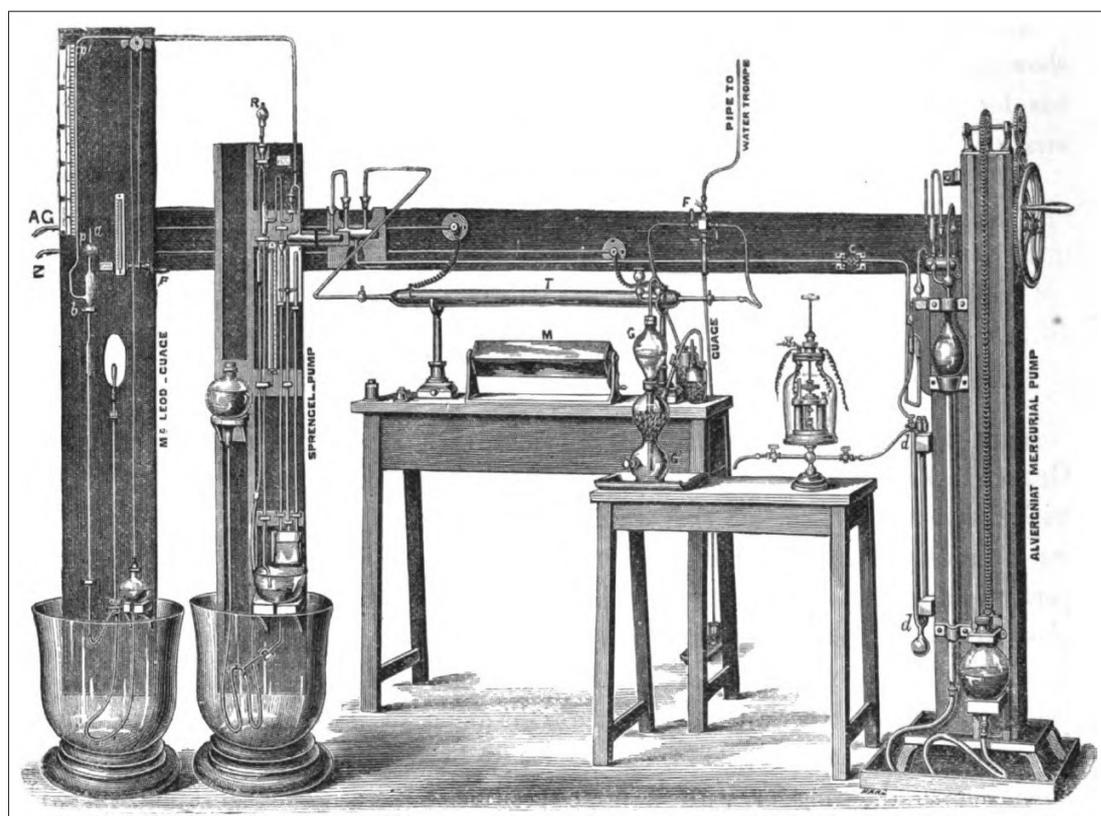
de rarefação do ar, na faixa de 2,66 a $133,32 \times 10^{-3}$ Pa (0,02-0,001 mmHg), Hittorf viu surgir uma luminosidade no vidro do tubo, mais intensa no lado oposto ao catodo, e cuja cor dependia do vidro usado: verde nos alemães, azul nos ingleses etc. Na publicação dos resultados da pesquisa, em 1869, Hittorf afirmou que essa luminosidade emanava do catodo sob a forma de raios semelhantes aos da luz, embora fossem invisíveis (GRAETZ, 1927, p. 318-347; HIEBERT, 1995).

A partir dos trabalhos de Plücker e Hittorf, outro físico alemão, Eugen Goldstein, assistente de Hermann Helmholtz, estudou a luminosidade do catodo e é conhecido por ter criado o termo “raio catódico” (*kathodenstrahlen*). Em artigo publicado em 1876, Goldstein criticou a teoria da existência de duas descargas nos gases rarefeitos, as chamadas luzes positiva e negativa, e afirmou que existe apenas um tipo de luz. Para provar sua hipótese, elaborou uma série de experimentos com os quais comprovou que a luz positiva (*positivenlichte*) tem as mesmas características que pareciam ser peculiares da luz do catodo (*kathodenlicht*), com exceção dos espectros de alguns gases. Ao contrário de Plücker e Hittorf, segundo os quais, sob a influência magnética, a luz negativa se ajusta às curvas magnéticas e a positiva é apenas desviada em curva, Goldstein verificou que a luz positiva se comporta de modo igual à negativa sob a ação do ímã. Concluiu que a forma que a luz de qualquer descarga assume sob a influência do ímã, depende da quantidade de eletricidade que passa de cada vez. Em relação à luminosidade verde no tubo, Goldstein confirmou a ideia de Hittorf de que é uma radiação retilínea que se propaga do catodo para o espaço circundante. Mas não considerou que fosse um fenômeno secundário de fluorescência que ocorresse em certas densidades do gás e intensidades da descarga, e sim uma fosforescência, uma vez que supera bastante a descarga geradora. Verificou que a luz fosforescente é produzida pelos raios catódicos na parede do tubo, e as imagens resultantes do objeto usado como catodo são formadas pela deflexão desses raios. Finalmente, Goldstein descreveu as condições que permitiriam construir um tubo sem luz positiva, totalmente preenchido por luz negativa (GOLDSTEIN, 1876; OBITUARY, 1931).

Como foi visto na seção sobre a produção do vácuo, entre 1860 e 1875 surgiram diversos aperfeiçoamentos tecnológicos que, além de auxiliar no campo dos experimentos científicos sobre as descargas nos gases, foram fundamentais para o desenvolvimento da indústria de lâmpadas implantada pouco tempo depois. Em relação à produção de vácuo, destacou-se a bomba de mercúrio de Sprengel (de 1873); no campo das medidas de pressão, o principal avanço foi o manômetro de McLeod (de 1874). A Figura 1.17 mostra o instrumental usado por Rue e Müller (1878) para o estudo de descargas nos gases usando banco de

baterias: ele dá uma boa ideia da complexidade e dos prováveis custos dos aparelhos necessários. Para avaliar a evolução dos experimentos, é interessante comparar com a Figura 1.16, que mostra os equipamentos usados por Gassiot, 20 anos antes. Apesar dos experimentos de descargas nos gases guardarem semelhanças quanto à aparelhagem usada, é interessante notar a complexidade de que esta começou a se revestir a partir de certo momento, de modo a atender às necessidades da pesquisa científica.

Figura 1.17: Equipamento para produção de vácuo de W. de la Rue e H. Müller (1878)

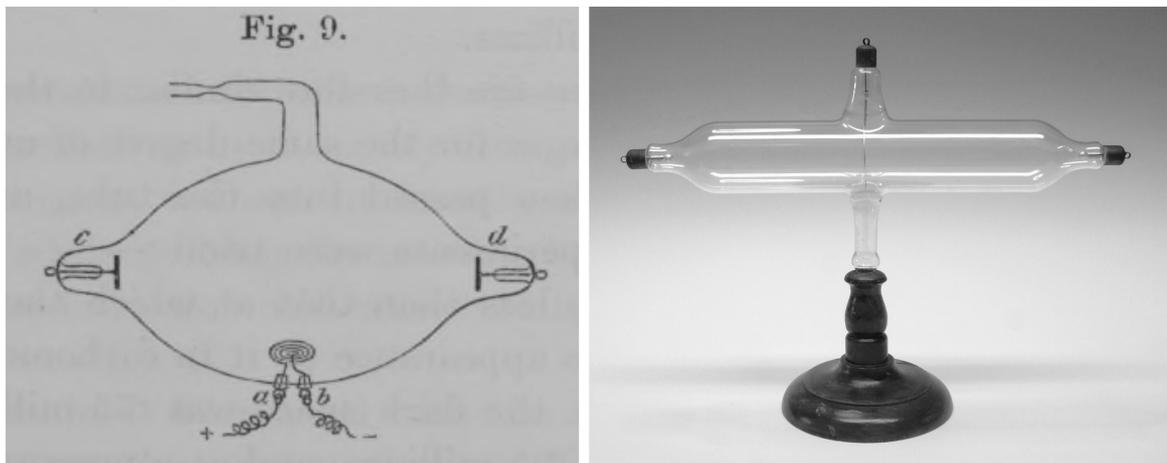


Fonte: Rue e Müller (1878, fig. 35, p. 158).

Outro marco, não somente científico, mas da própria técnica, foram as pesquisas sobre os raios catódicos do químico inglês William Crookes, que utilizou uma versão aperfeiçoada da bomba de Sprengel. A primeira notícia dessas pesquisas apareceu num artigo publicado no periódico *Philosophical Transactions* da *Royal Society* (CROOKES, 1879). Crookes fez um tubo com dois fios de platina fundidos ao vidro, cada um sustentando um disco metálico no interior do tubo (os “polos” positivo e negativo). Crookes observou que, quando a excitação elétrica era realizada com o ar em pressão normal, o espaço escuro se limitava a uma pequena distância do disco de metal; mas com a pressão de 10,4 Pa (0,078 mmHg) usando a bomba de

Sprengel, a região escura formava em torno do disco um esferoide cujo diâmetro variava de acordo com o grau de vácuo, com a temperatura do polo negativo e, em menor grau, com a intensidade da descarga elétrica. Crookes chamou essa emissão de luz molecular ou emissiva, e avançou a hipótese de que corresponderia a um quarto estado da matéria, que denominou “matéria radiante” – atualmente identificada como plasma (CROOKES, 1883; D'ALBE, 1923; OBITUARY, 1920). Do interesse da tecnologia, é o fato de que o tubo de Crookes foi aperfeiçoado e usado por outros pesquisadores. Entre suas aplicações destacaram-se a descoberta dos raios X, por Wilhelm Röntgen, e a criação do tubo de raios catódicos por Ferdinand Braun, que serão vistos posteriormente.

Figura 1.18: Desenho original e um exemplar do tubo de Crookes



Fonte: Crookes (1879, p. 137); Crookes tubes 4 (DIJKSTRA, 2019).

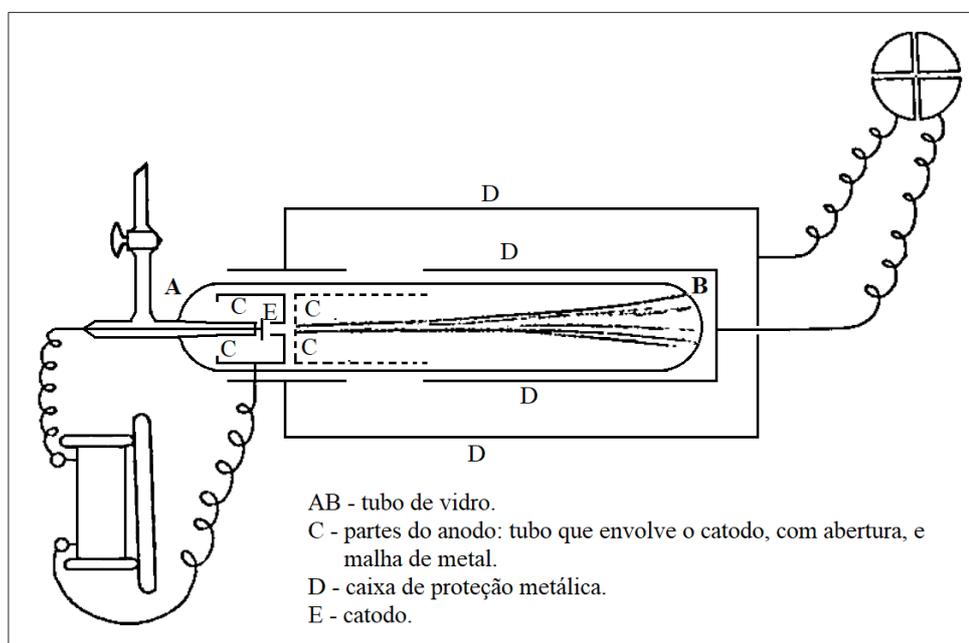
1.3.3 A natureza dos raios catódicos

Desde a descoberta dos raios catódicos por Plücker, a natureza desses raios era objeto de intensas disputas entre os físicos. De um lado estavam os defensores da teoria do éter, principalmente alemães, para os quais os raios eram algum tipo de onda que se propagava no éter. Do outro lado estavam os adeptos da teoria da partícula, principalmente ingleses e franceses, para os quais os raios eram formados por partículas eletrificadas. Um argumento a favor da teoria da partícula era o achado experimental de que os raios eram defletidos por um campo magnético, mas esse argumento foi abalado pela descoberta de que o campo magnético interferia num campo elétrico. Para os defensores da teoria da onda, isso significava que a ligação entre os raios e o campo magnético era acidental, não causal. Mas o principal

argumento dessa vertente era a opinião de um físico do peso de Heinrich Hertz, que, em 1883 (muito antes de iniciar seus trabalhos mais conhecidos), realizou um experimento sobre o desvio dos raios catódicos por um campo elétrico.

Hertz utilizou um tubo de descarga no vácuo e instalou, de cada lado dele, uma placa de metal ligada a um dos polos de uma bobina de indução. Como não detectou desvio dos raios catódicos, Hertz usou um outro tubo com as placas em seu interior, para evitar a interferência de uma possível eletrificação do vidro. Mais uma vez não detectou desvio, e daí concluiu que os raios catódicos não eram partículas (THOMSON, G., 1970).

Figura 1.19: Aparelhagem de Hertz (experimento de 1883)

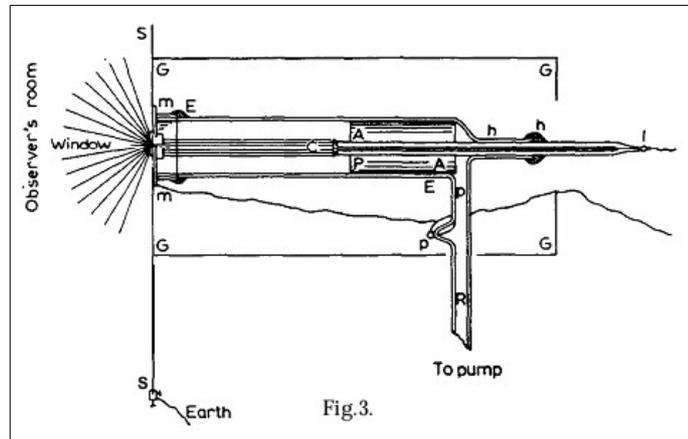


Fonte: imagem adaptada de Hertz (1883, Taf. X, Fig. 6, pos p. 936).

Em 1892, Hertz considerou sua teoria confirmada quando verificou que os raios catódicos podiam atravessar uma folha fina de ouro, prata ou alumínio, sem furá-la, e produzir fosforescência num pedaço de vidro posto atrás do metal. Por solicitação de Hertz, seu assistente, o físico austríaco Philipp von Lenard, após experimentar folhas de alumínio de várias espessuras, divulgou, em 1894, a invenção da “janela de Lenard” em que, substituindo a placa de quartzo, usada para fechar o tubo, por uma placa de alumínio, grossa o bastante para manter o vácuo no tubo, mas fina o bastante para permitir a saída dos raios catódicos, tornou possível estudá-los fora do tubo, independentemente do processo de descarga. Vale notar que Lenard, inicialmente, seguiu a ideia de Hertz de que os raios catódicos eram ondas

propagadas no éter, e só mudou de ideia depois que Jean Perrin, em 1895, J. J. Thomson, em 1897, e Wilhelm Wien, em 1898, provaram sua natureza corpuscular (PHILIPP, 2019).

Figura 1.20: Dispositivo construído por Lenard para o estudo dos raios catódicos

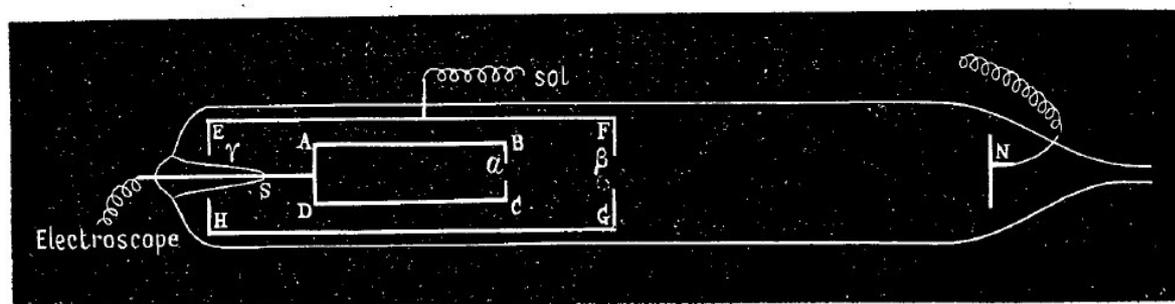


Fonte: Nobel (1998; p. 109).

Em mais um passo importante no estabelecimento das propriedades dos raios catódicos, o químico francês Jean Baptiste Perrin (1895) realizou um estudo decisivo com o objetivo de esclarecer a polêmica entre os que consideravam os raios catódicos uma forma de luz na faixa do ultravioleta, e os que os viam formados por partículas com carga elétrica. Perrin usou um tubo de vácuo (Figura 1.21) em que um eletrodo era uma placa comum N e o outro era um tubo metálico **EFGH** envolvendo um tubo menor **ABCD**, também metálico, ligado a um eletroscópio. O tubo **EFGH** era aterrado e sua função era proteger o tubo **ABCD** contra radiações do exterior. Assim, o gás rarefeito no interior do tubo menor só podia ser alcançado pelos raios que penetrassem pelas aberturas α e β , respectivamente nos tubos interno e externo, e alinhadas entre si. Com esse dispositivo, Perrin demonstrou, não apenas a natureza dos raios catódicos, mas também a existência e a natureza dos raios anódicos. (PERRIN, 1895).

Perrin concluiu que os resultados pareciam compatíveis com a teoria da radiação material, para a qual propôs o seguinte enunciado: na vizinhança do catodo, o campo elétrico é suficientemente intenso para partir algumas das moléculas de gás residual em íons. Segundo ele, os íons negativos vão para a região onde o potencial cresce, adquirem uma velocidade considerável e formam os raios catódicos; sua carga elétrica e, conseqüentemente, sua massa é facilmente mensurável. Já os íons positivos se movem na direção oposta; eles formam um feixe difuso, sensível ao ímã e sem radiação propriamente dita (PERRIN, 1895).

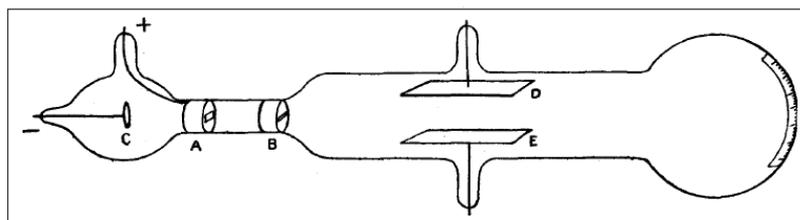
Figura 1.21: Dispositivo de Perrin para estudar os raios catódicos



Fonte: Perrin (1895, p. 1131).

Seguindo o mesmo caminho de Perrin, o físico inglês Joseph John Thomson, após mais de uma década de pesquisas sobre as propriedades da matéria, eletricidade e magnetismo, divulgou, em 1897, os resultados de sua primeira grande pesquisa sobre os raios catódicos, cujo objetivo era testar algumas consequências da teoria de que os raios catódicos seriam formados por partículas com carga elétrica. Num primeiro experimento, J. J. Thomson reproduziu o estudo de Perrin, comprovando seus achados. Em seguida, repetiu o experimento de Hertz que havia demonstrado a ausência de deflexão dos raios com descargas de baixa potência, e, inicialmente, obteve os mesmos resultados, mas experimentos posteriores mostraram que a falta de deflexão resultava da condutividade que os raios catódicos davam ao gás rarefeito. Decidiu, então repetir o experimento de Hertz com níveis mais altos de vácuo e um tubo aperfeiçoado, visto na Figura 1.22 (THOMSON, J., 1897).

Figura 1.22: Dispositivo de Thomson para testar a deflexão dos raios catódicos



Fonte: J. J. Thomson (1897, Fig. 2, p. 296).

Os raios do catodo **C** passavam através de uma fenda no anodo **A**, que era um tampão de metal que se encaixava firmemente no tubo e era conectado à terra; depois de passarem por uma segunda fenda em outro tampão semelhante **B**, também conectado à terra, os raios viajavam entre duas placas de alumínio paralelas, **D** e **E**, com uma distância de 1,5 cm entre ambas; chegando no fim do tubo, os raios produziam uma marca fosforescente estreita e

nítida. Em alto vácuo, os raios sofreram deflexão quando as placas foram conectadas aos terminais de uma bateria. Thomson realizou o experimento de várias formas: invertendo os polos ligados às placas, variando o grau de vácuo e a intensidade da eletricidade fornecida. Com outros dispositivos, Thomson testou a ação do campo magnético sobre os raios catódicos, e também avaliou a condutividade do gás. Como resultado desse conjunto de experimentos, Thomson concluiu que os raios catódicos são formados por partículas que transportam a eletricidade; determinou a relação entre carga e massa, verificando que a carga é independente do gás utilizado; e verificou que a velocidade dos elétrons no tubo é proporcional à diferença de potencial entre o anodo e o catodo (THOMSON, J., 1897).

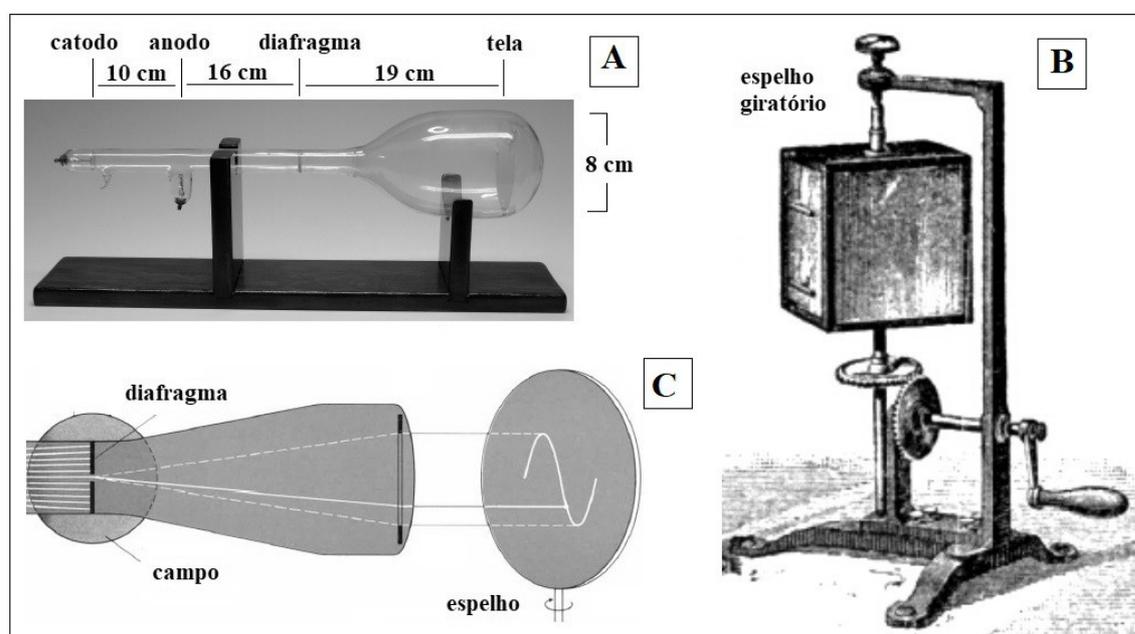
1.3.4 O tubo de raios catódicos

A última grande invenção do século XIX derivada das pesquisas em tubos de descarga foi o aperfeiçoamento do tubo de Crookes, feito pelo físico alemão Ferdinand Braun em 1897. O desenvolvimento do dispositivo insere-se em um contexto em que havia o interesse em visualizar os sinais das redes de energia elétrica usando corrente alternada, que estavam surgindo; a natureza da reversão periódica da polaridade dessas correntes impunha dificuldades de medidas aos instrumentos existentes. Além da variação da amplitude do sinal, era importante também medir a diferença de fase entre os sinais alternados de corrente e a tensão, ou entre duas tensões que ocorriam simultaneamente. Braun percebeu também que a inércia do feixe era quase nula, podendo aumentar enormemente a frequência do sinal a ser analisado, permitindo visualizar tanto sinais periódicos como os rápidos transientes, pois o feixe responderia quase instantaneamente às mudanças dos sinais estudados, podendo mover-se em qualquer direção sobre uma superfície plana e traçar padrões complexos para a comparação de fase entre dois sinais periódicos (BRAUN, 1897).

Dois foram os desafios que tiveram que ser resolvidos: o primeiro consistia em focalizar o feixe de elétrons a ser aplicado a uma tela fosforescente, o que foi feito pela colocação de um disco de alumínio na trajetória do feixe. O segundo desafio consistiu em posicionar o feixe de forma precisa na tela fosforescente, o que foi feito através da variação de um campo magnético próximo ao pescoço do tubo e perpendicular à trajetória do feixe, onde era aplicado o sinal a ser estudado. Em termos de montagem, como o catodo não era aquecido, foi necessário aplicar uma alta tensão da ordem de 50.000 V para atrair o feixe para o anodo; isso foi feito através de uma máquina eletrostática de Töpler acionada manualmente,

e às vezes, para certos experimentos, foi utilizada uma bobina de indução com a distância ajustável entre os pontos extremos da geração de centelhas. A tela consistia em um disco fino e translúcido de mica, revestido com um tipo de fósforo como platinocianeto de bário ou silicato de zinco (BRAUN, 1897; SHIERS, 1974). A fig. A da Figura 1.23 mostra o tubo projetado por Braun. Para visualizar a forma de onda resultante da deflexão dos raios pela ação do campo gerado, Braun usou um espelho rotativo de König (um fabricante de aparelhos científicos), muito usado na época para esse tipo de experimento, e que é visto na fig. B. A deflexão dos raios catódicos era proporcional à intensidade da corrente aplicada, o que permitia fazer uma série de medições com esse equipamento (BRAUN, 1897).

Figura 1.23: Primeiro tubo de raios catódicos de Braun



Legenda: A – Tubo original de Braun. B – Espelho giratório de König. C – Processo de formação da imagem dos raios defletidos no espelho.

Fontes: A – The Braun tube (DIJKSTRA, 2019). B – Miroir tournant (KOENIG, 1889, p. 84, Fig. 113). C – Adaptação de Shiers (1974, p. 97).

Em 1899, Jonathan Zenneck, assistente de Braun, aperfeiçoou o tubo de raios catódicos, adicionando uma segunda bobina defletora, em ângulo reto com a primeira. Este aperfeiçoamento permitiu a eliminação do espelho, que não era mais necessário para a visualização bidimensional de uma forma de onda (GUARNIERI, 2018; MARTON; MARTON, 1980). Os tubos de Braun e Zenneck foram fundamentais para a criação de aplicações científicas, industriais e comerciais, como telas de radares, computadores e televisores, o osciloscópio, o eletrocardiógrafo, as câmaras e os projetores de vídeo.

1.4 AS LÂMPADAS ELÉTRICAS

A iluminação é uma das tecnologias a que as sociedades deram maior atenção, desde o tempo das fogueiras noturnas na Idade da Pedra. Mais tarde, as lamparinas a óleo (usando gorduras animais ou vegetais) e as velas de cera foram a forma universal de iluminação até o desenvolvimento, no fim do século XVIII, da técnica de produção de gás a partir do carvão mineral. Com a nova tecnologia, redes de iluminação a gás se expandiram rapidamente, em muitas cidades da Europa e dos Estados Unidos, nas primeiras décadas do século XIX. Essas redes adotaram o modelo do sistema de abastecimento de água: uma usina de produção de gás, da qual o combustível era distribuído por encanamentos. A iluminação a gás era até 75% mais barata que a iluminação a óleo e cera, e teve um grande impacto na sociedade: os escritórios e as fábricas puderam funcionar por muito mais tempo, e a iluminação das ruas favoreceu as atividades culturais e de entretenimento (GUARNIERI, 2015).

Mas a técnica apresentava limitações. As lâmpadas de gás só forneciam uma luz de 15 velas: menos de um terço da fornecida por uma lâmpada incandescente de 20 W ou uma lâmpada eletrônica de 6 W (TABELA, 2019). Além disso, havia os riscos de explosão (por causa dos canos usados na época) e de liberação de vapores tóxicos resultantes da combustão. Por exigir o encanamento, a rede de gás era lucrativa em grandes áreas densamente povoadas, mas, nas áreas rurais e localidades pequenas, a iluminação a óleo e velas continuou sendo a única opção viável, e a substituição do óleo pelo querosene, na segunda metade do século XIX, não resolveu os impasses da iluminação por meios químicos. Essas foram as questões que impulsionaram a busca de formas de aplicar a eletricidade à iluminação em grande escala, assim que o desenvolvimento de geradores potentes e estáveis, juntamente com dispositivos capazes de produzir luz a partir de correntes elétricas, o permitiu (GUARNIERI, 2015).

A iluminação elétrica se desenvolveu de modo entrelaçado com as tecnologias precursoras das válvulas e colaborou com seu surgimento no que se refere à pesquisa e ao desenvolvimento de materiais (vidros, condutores, gases etc.), técnicas (produção de vácuo, geração de eletricidade, produção de bulbos e de componentes metálicos, instrumentação) e equipamentos (bombas de ar, geradores, medidores etc.). Além disso, como veremos adiante, algumas válvulas derivaram diretamente de certos tipos de lâmpadas. Como esta seção do estudo focaliza as tecnologias precursoras das válvulas, será apresentada apenas a etapa inicial do desenvolvimento das lâmpadas, que termina no final do século XIX. A divisão adotada corresponde às três tecnologias que surgiram no período: as lâmpadas de arco elétrico, as de descarga em gases (lâmpadas frias) e as incandescentes.

1.4.1 As lâmpadas de arco

O princípio de funcionamento das lâmpadas de arco é a descarga de arco: uma descarga contínua de eletricidade entre dois pontos de um circuito elétrico, diferente da centelha, que consiste numa descarga de curta duração entre dois eletrodos causada por um campo elétrico de valor elevado. As primeiras observações de descargas que, para alguns autores, seriam arcos, foram feitas no contexto dos experimentos com descargas em gases: em 1759, o inglês Benjamin Wilson observou uma luz sobre mercúrio, que podia ser (ou não) mancha do catodo; em 1766, Joseph Priestley, também inglês, viu crateras de erosão nas manchas do catodo, associando-as ao relato de Wilson. Mas esse primeiro achado não teve consequências porque na época a descarga só podia ser gerada de forma intermitente, através da quantidade limitada de energia armazenada em garrafas de Leiden (ANDERS, 2003).

Foi somente após a invenção da pilha de Volta que as descargas puderam ser geradas de forma contínua e o estudo do arco se desenvolveu com aplicações práticas. Diferentes datas são atribuídas à descoberta porque ela se deu em várias etapas, e a definição de arco é confusa (ANDERS, 2003; AYRTON, 1902). Os marcos históricos são os experimentos do inglês Humphry Davy e do russo Vasili Petrov. Em 1800, Davy observou a produção de descargas usando uma bateria voltaica de 200 células, e fechando o circuito com dois botões de metal; em 1801, trocou os botões de metal por eletrodos de carvão e constatou que estes tinham melhor desempenho que os metálicos. Em 1803, Petrov, com uma bateria de 4.200 células, divulgou seus experimentos “galvano-voltaicos” em que produziu luz com eletrodos de grafite (ANDERS, 2003; KARTSEV, 1983). Essas primeiras descargas tinham duração curta porque as pilhas não sustentavam arcos contínuos; por este motivo, a engenheira inglesa Herta Ayrton (1902, p. 25-26) considera que esses fenômenos não eram arcos verdadeiros. Para a autora, só em 1809, quando a *Royal Institution* instalou uma grande bateria com 2.000 células, Davy conseguiu produzir arcos usando eletrodos de carbono: essa demonstração marcou a época em que a descarga de arco foi realmente descoberta e entendida.

Entretanto, a curta duração do arco e o baixo valor da potência fornecida pelas baterias ainda eram obstáculos para a aplicação prática da descarga de arco, e vários pesquisadores procuraram resolver esses problemas. Em 1840, William Grove criou uma célula com eletrodo de platina em ácido nítrico e de zinco em ácido sulfúrico, com baixa resistência interna e saída de 1,9 V, que fornecia uma corrente de 10 A, mas era cara e produzia vapores tóxicos. Essas falhas foram corrigidas pelo alemão Robert Bunsen que, em 1841, usou carvão no lugar da platina: a voltagem era um pouco menor que a da célula de Grove, mas a corrente

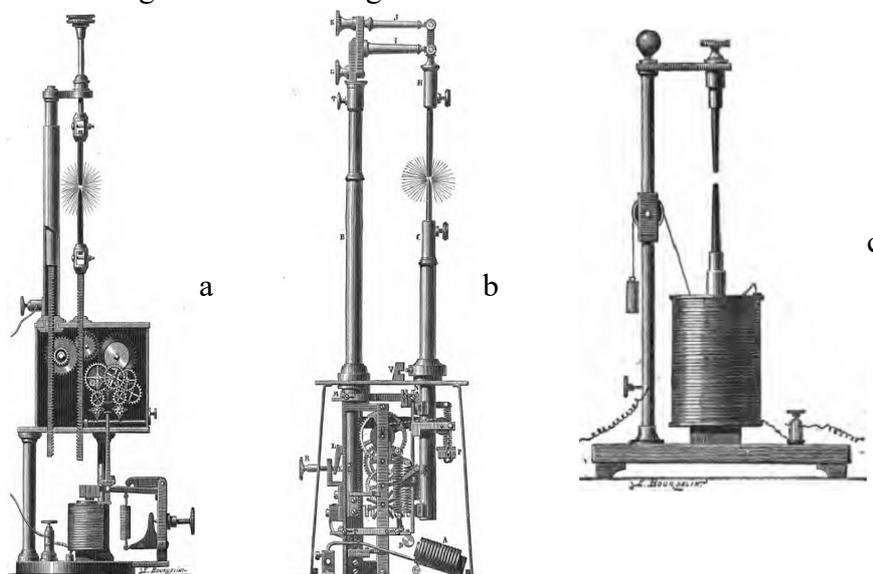
era o dobro, e era muito mais barata; por isso, apesar dos vapores que gerava, foi amplamente usada (GUEDES, 2001; KING, 1963a, p. 240-244).

Depois da invenção das células de Bunsen e Grove, a possibilidade de usar o novo recurso para iluminação começou a ser pesquisada. A primeira tentativa bem-sucedida foi a do francês Louis J. Deleuil que, em 1843, iluminou uma praça em Paris. Mas essa iluminação apresentava vários problemas: não era contínua, porque os eletrodos de carvão se consumiam rapidamente; era trabalhosa, porque era preciso ajustar manualmente a distância entre os eletrodos; era cara, porque as baterias tinham duração curta e havia a necessidade de pessoal especialmente contratado para a troca dos bastões de carbono; e era incômoda para o usuário, por causa do ruído produzido pelo arco e da intensidade da luz. A vantagem é que a iluminação era excelente, e isso estimulou a busca de soluções. Em 1844, o francês Léon Foucault descobriu que o coque (resíduo da produção de gás) queimava de modo mais lento e uniforme que o carvão de madeira, e vários projetistas adotaram o coque nos dispositivos de arco. Os ingleses Thomas Wright (em 1845) e W. Edward Staite (em 1847), e os franceses Léon Foucault (com Jules Duboscq) e Henri Archereau, ambos em 1849, lançaram as primeiras lâmpadas em que a posição dos carbonos era ajustada por reguladores automáticos: os três primeiros com mecanismos de relógio, e o último usando a força de atração de um solenoide. Essas lâmpadas começaram a ser instaladas em laboratórios, teatros, salas de conferência e, mais tarde, em portos e praças; com as melhorias posteriores, tornaram-se cada vez mais confiáveis, e o tempo médio de operação contínua das lâmpadas, que em 1849 era de 45 minutos, passou, em 1854, para 5 horas (GUEDES, 2001; KING, 1963b, p. 333-339; HISTORY, 1905, p. 86-87).

As décadas de 1850 e 1860 foram dedicadas a resolver problemas referentes à qualidade do carbono, à eficiência dos reguladores, à fonte de energia e ao controle da luz fornecida pelas lâmpadas de arco, que era muito intensa. Para tentar resolver isso, o caminho das pesquisas foi buscar formas de distribuir a luz elétrica. O italiano Giovanni Querini, em 1849, e o francês Louis Deleuil, em 1855, tentaram fazer a distribuição da luz de um arco por várias lâmpadas de menor intensidade, mas o circuito só podia ser mantido por pouco tempo. Na montagem em série, a falha de uma lâmpada desabilitava todo o sistema; na montagem em paralelo, uma das lâmpadas, devido à sua resistência elétrica, tendia a drenar a maior parte da corrente, diminuindo o brilho das outras. Diante desses problemas, muitos consideravam na época que a distribuição da luz elétrica não podia ser feita. Quanto aos reguladores, apesar dos aperfeiçoamentos realizados, os primeiros só funcionavam de modo satisfatório por um período curto; então, os pesquisadores continuaram buscando outros meios para regular o

posicionamento dos eletrodos. O químico Joseph Lacassagne e o fabricante Rodolphe Thiers criaram um regulador diferencial, com coluna de mercúrio e dois eletroímãs separados, em que a corrente resultante da diferença de dois circuitos movia os carbonos com uma velocidade adequada. Em 1857, Victor Serrin desenvolveu um regulador melhor que o de Foucault-Duboscq, que dominou o mercado na França e em outros países até o final da década de 1870. Um modelo parecido, produzido por Siemens, foi muito usado na Inglaterra e na Alemanha, e luzes de arco também foram usadas em operações militares na guerra da Crimeia, em 1855, e na guerra da independência da Itália, em 1859 (HISTORY, 1905; KING, 1963b, p. 340-342).

Figura 1.24: Três reguladores de arco de carbono

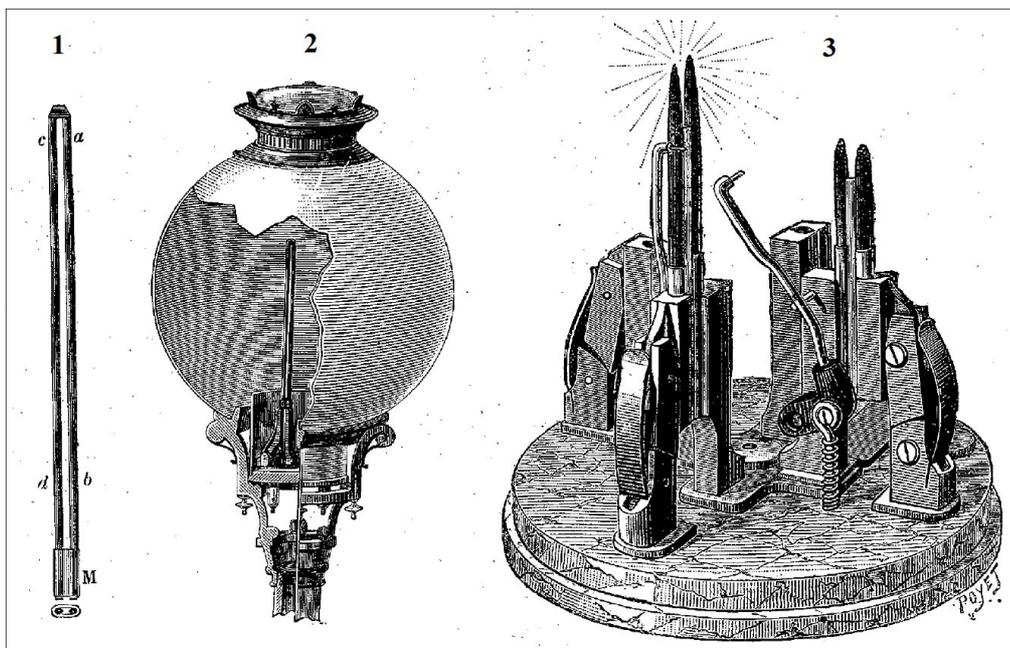


Legenda: a- regulador de Duboscq; b- regulador de Serrin; c – regulador de Archer. Fonte: Fontaine (1878, p. 25, 31).

Com esses e outros aperfeiçoamentos, a qualidade da luz de arco melhorou, mas a lâmpada ainda tinha uma séria limitação: o uso da bateria como fonte de energia. Com o aumento progressivo da necessidade de energia elétrica conforme o espaço entre os carbonos ia diminuindo, era preciso um grande número de baterias para manter uma única lâmpada funcionando. Não era possível expandir o uso das lâmpadas de arco sem inovações na fonte de energia, que vieram com a criação dos geradores de corrente contínua, entre os quais se destacaram o do estadunidense Joseph Saxton, de 1834, e o do belga Floris Nollet, de 1849 (comercializado a partir de 1855 pela *Société Alliance*), e mais tarde com os dínamos Gramme e Siemens. Após o surgimento dos dínamos de Gramme e de Siemens, a iluminação elétrica se tornou possível, mas ainda não era prática comercialmente. O regulador de Serrin era muito

frágil e de difícil manuseio; o custo da instalação da central elétrica era alto comparado com os do gás e do vapor, principalmente considerando que a central seria usada apenas para iluminação. Apesar da boa iluminação fornecida, o sistema era muito caro para ser usado nas ruas em lugar do gás; por isso, tanto na Inglaterra quanto na França, a administração pública adotou a política de usá-lo em situações especiais que justificassem o gasto. Assim, entre 1857 e 1878, foram instaladas lâmpadas de arco, usando várias combinações de reguladores Duboscq e Serrin com geradores Saxton e Alliance e dínamos Siemens, em diversos faróis do estreito de Dover-Calais, nos portos de Marselha e Havre, e em mais alguns pontos litorâneos importantes (HISTORY, 1905; KING, 1963b, p.345-362).

Figura 1.25: Vela Iablochkov



Legenda: 1 – vela Iablochkov. 2 – globo para iluminação elétrica pelas velas Iablochkov. 3 – castiçal Iablochkov com derivação.

Fonte: Figuiet (1891, p. 395 [fig. 310, 311], 411 [fig. 328]).

A fase comercial das lâmpadas de arco começou com a invenção do russo (radicado na França) Pavel Iablochkov que, em 1876, patenteou uma lâmpada chamada “vela Iablochkov”. Era formada por dois eletrodos de carbono paralelos e próximos, separados por uma pasta de caulim, e unidos na ponta por uma pasta de metal. Esta era derretida quando o dínamo era ligado, e então um arco se formava entre as pontas e se mantinha até os carbonos terminarem de queimar; no processo, o isolador era volatilizado (PERCIVAL, 1920).

A vela operava melhor com corrente alternada, pois, com a contínua, o carbono positivo queimava duas vezes mais rápido que o negativo. Cada vela Iablochkov produzia luz

equivalente a 200 ou 500 velas padrão, dependendo do gerador e do circuito. O dispositivo resolveu os dois problemas da distribuição: colocar várias lâmpadas no mesmo circuito e reduzir a intensidade da luz. Embora a luz tremulasse um pouco e os eletrodos só durassem de uma hora e meia a duas horas, a luz era mais clara que a do gás, não cegava como a luz de arco comum e era difusa, pois a vela ficava dentro de um globo translúcido. As velas de Iablochkov tornaram possível fazer iluminação em grande escala: após serem testadas em edifícios de Paris, em 1877 e 1878, a prefeitura decidiu compará-las com a iluminação a gás. Em Londres, as velas foram instaladas, entre 1878 e 1879, em avenidas, pontes e viadutos. Em 1880, uma única estação elétrica em Charing Cross alimentava 75 velas num sistema que se estendia por 3,2 km (2 milhas). Primeiro foram usados os geradores Alliance, depois os Gramme se mostraram mais eficientes; os dínamos de Siemens também foram usados para excitar o alternador Gramme. Por algum tempo, pareceu que o sistema Iablochkov tinha resolvido o problema da iluminação elétrica e, nos anos seguintes, suas aplicações cresceram rapidamente (HISTORY, 1905; KING, 1963b, 393-405).

Nos Estados Unidos, embora as velas Iablochkov tenham sido utilizadas, houve vários inventores com projetos próprios, como Charles Brush e Edward Weston, que desenvolveram lâmpadas de arco e métodos de iluminação de arco em série, e William Wallace e Moses Farmer, que produziram industrialmente lâmpadas, dínamos e carbonos. Em 1878, Brush começou a fabricar um pequeno dínamo muito simples, para iluminação de arco destinada a interiores, que usava carbonos quadrados sem revestimento. O sistema de Brush para iluminação externa começou a ser usado em 1879: foi muito difundido nos Estados Unidos, e também foi utilizado na Inglaterra, no Japão e na China. As lâmpadas eram instaladas no alto de mastros ou torres de metal, e eram controladas pela empresa Brush de energia estabelecida na cidade. Entre os aperfeiçoamentos dos sistemas estadunidenses destacam-se a adição de mecanismos para que o circuito continuasse funcionando mesmo que uma ou mais lâmpadas fossem desativadas, e a colocação de dois conjuntos de carbonos na lâmpada, para que um entrasse em operação quando o outro acabasse. A iluminação pública começou a se tornar um grande negócio. As companhias de iluminação a arco começaram a fazer contratos para iluminação das ruas das cidades, sendo o preço usual na época \$1 por lâmpada por noite. A expansão da iluminação de rua exigiu o aumento da capacidade dos geradores e da extensão dos circuitos a que a energia era fornecida: as máquinas de Weston podiam ser acopladas num único circuito em série com 40 a 50 lâmpadas; os arcos requeriam 20 a 30 volts por lâmpada e 18 a 20 ampères no circuito (HISTORY, 1905).

Ao contrário do que aconteceu mais tarde entre a iluminação a arco e a incandescente,

que, principalmente na Europa, colaboraram entre si, as empresas de iluminação a gás nunca contribuíram para o desenvolvimento das lâmpadas, vistas como uma ameaça aos seus investimentos. As lâmpadas de arco eram competidoras fortes no mercado da iluminação externa, mas esta constituía apenas 10% dos negócios de iluminação. Entretanto, o sucesso rápido da lâmpada incandescente após 1880 ameaçou os outros 90%. As empresas de gás, que eram numerosas e fortes, reagiram promovendo os próprios produtos e opondo obstáculos à iluminação elétrica. As estratégias de oposição foram: depreciar suas vantagens, exagerar suas desvantagens, tentar influenciar os governos municipais contra leis permitindo a iluminação elétrica e contra concessões a empresas elétricas, e tentar influenciar as empresas de seguros na definição de padrões de segurança. Em relação ao próprio produto, a indústria de gás passou a usar a “camisa incandescente”, criada em 1885 pelo químico austríaco Carl Auer von Welsbach, formada por uma tela de tecido impregnada com uma mistura de tório e terras raras, e que, posta nos bicos de gás, não produzia chama exposta, mas gerava uma luz branca. Como era barata e aumentava muito a eficiência da iluminação a gás, a camisa fez o custo da iluminação a gás voltar a um nível inferior ao da elétrica, situação que só foi revertida no início do século XX, com a difusão de lâmpadas incandescentes mais baratas e eficientes e com a redução do custo da energia elétrica (BRIGHT, 1949; KLINE, 1992; WEISBUCH, 2018).

Mesmo com as desvantagens que possuía, a iluminação com lâmpadas de arco estava bem disseminada entre o final do século XIX e o começo do século XX, e ainda havia interesse em criar técnicas para melhorar o seu desempenho. A primeira foi o arco flamejante, desenvolvido na Alemanha por Hugo Bremer, por volta de 1900: empregava carbonos tratados com sais não condutores, que evaporavam e produziam uma luminosidade maior do que nas técnicas de arco anteriores. As desvantagens desse esquema eram que a luz resultante era menos estável do que a das outras lâmpadas de arco, e que ele somente podia ser usado em ambientes externos, devido à produção de gases tóxicos; porém, a utilização de globos fez com que a instabilidade do arco diminuísse e a vida útil fosse aumentada para 100 horas (BREMER, 1903; BRIGHT, 1949). Seguindo a mesma preocupação com o desempenho, em 1903, Charles Steinmetz, chefe do laboratório de pesquisas da *General Electric*, com ajuda de colaboradores, substituiu os eletrodos de carbono por magnetita, aumentando a vida útil para 150 horas e também aumentando a eficiência luminosa. Essa foi a última contribuição da tecnologia da iluminação por arco (STEINMETZ, 1909; BRIGHT, 1949).

A vela de Iablochkoff tornou possível a iluminação em escala comercial; durante a década de 1870, pensou-se que esse sistema seria a solução para a iluminação elétrica e sua

disseminação foi rápida, mas o surgimento da lâmpada incandescente durante essa mesma década veio mudar esse quadro, e a iluminação pública usando lâmpadas de arco foi declinando após a década de 1910. Entretanto, a luz de arco permitiu resolver os principais problemas relacionados à iluminação elétrica, como o transporte de energia de uma única estação para vários locais, os problemas da distribuição, o uso dos transformadores e a viabilidade da indústria elétrica como investimento. Ao ser abandonado, o sistema deixou como herança a tecnologia de iluminação elétrica já organizada (KING, 1963b, 406-407).

Após sua substituição pelas lâmpadas incandescentes no uso comum, as lâmpadas de arco se mantiveram em uso em aplicações específicas como projetores de filmes; nas primeiras décadas do século XX, pequenos holofotes usando lâmpadas de arco com persianas foram utilizados para comunicações em navios de guerra e, em 1915, Elmer Sperry, posteriormente famoso pelo desenvolvimento dos giroscópios, criou um potente holofote por arco, usado também para aplicações militares e empregado nas duas guerras mundiais (BRIGHT, 1949; HOWETH, 1963). As lâmpadas de arco também tiveram uma participação, embora relativamente pequena, no desenvolvimento das válvulas: o princípio de funcionamento do arco elétrico foi utilizado em um tipo de transmissor de rádio criado pelo engenheiro dinamarquês Valdemar Poulsen, em 1903, e as lâmpadas de arco de vapor de mercúrio serviram de base para alguns tipos de válvulas de controle de potência.

1.4.2 As lâmpadas frias

O princípio de funcionamento desses dispositivos é o fenômeno da luminescência, ou, mais especificamente, dois de seus tipos: a eletroluminescência e a fotoluminescência. Entretanto, muito antes de sua apropriação pela ciência, a luminescência foi utilizada empiricamente para fins decorativos (em tintas e esculturas luminosas) e para identificar substâncias. O conhecimento da existência de pedras e outros materiais que brilham no escuro, quando são expostos à luz, aquecidos ou friccionados, está registrado na literatura e nas técnicas de vários povos desde a antiguidade; mas essas observações misturavam luminescências de origem luminosa, elétrica, térmica, mecânica, química e até biológica.

O estudo sistemático da luminescência no contexto científico moderno começou no século XVII, depois que a emissão de luz por pedras calcinadas foi descoberta acidentalmente em experimentos alquímicos; em meados do mesmo século, os minerais luminescentes receberam o nome de fósforos (do grego *Fosfóros*, portador da luz, nome de Vênus como

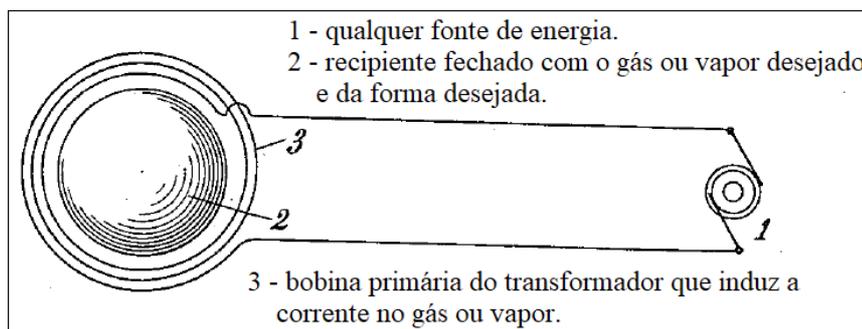
estrela da manhã). O fenômeno também atraiu a atenção de cientistas como Galileu, Boyle e Newton, que, ao longo dos séculos XVII e XVIII, realizaram alguns experimentos na tentativa de entender e explicar a chamada fosforescência. No século XIX, Edmond Becquerel, em 1842, e George Stokes, em 1852, identificaram uma forma de luminescência que Stokes denominou fluorescência. Assim, a fotoluminescência foi dividida em fluorescência e fosforescência. Na época os fenômenos eram diferenciados por sua duração: na fluorescência, a luz desaparece quando o estímulo cessa, e na fosforescência, a luz permanece. A explicação exata só foi dada pela teoria quântica, que permitiu entender que, na fluorescência, a emissão é imediata, enquanto que, na fosforescência, há um estado intermediário entre o estímulo e a emissão (BALL, 1938; GARCÍA, 2012; PASCHOTTA, 2019; VALEUR; BERBERAN-SANTOS, 2011; YEN; SHIONOYA; YAMAMOTO, 2007).

O grande avanço no conhecimento da eletroluminescência ocorreu na primeira metade do século XIX com Faraday (1838), que estudou a descarga de raios catódicos em tubos com gases rarefeitos, e Edmond Becquerel que, a partir de 1840, pesquisou detalhadamente a “fosforescência”, publicando o resultado de seus estudos na obra *La lumière: ses causes et ses effets* (BECQUEREL, 1867). Os recipientes de vidro usados nos experimentos com a eletricidade no vácuo, que inicialmente eram simples campânulas ou bulbos, foram se tornando mais sofisticados até que, entre 1855 e 1857, os tubos Geissler (já discutidos na seção sobre as descargas elétricas em gases) foram criados na Alemanha e logo copiados por vários fabricantes no mesmo país e em outros locais da Europa. Embora fossem feitos a princípio como equipamento laboratorial, em poucos anos os tubos Geissler começaram a ser produzidos como luminárias decorativas de luxo que exploravam as propriedades luminescentes dos componentes usados nos tubos. Em primeiro lugar, o próprio vidro que, dependendo das impurezas que continha, podia apresentar uma luminosidade verde, azul etc.; a partir desse conhecimento, os vidreiros começaram a produzir vidros com substâncias específicas para obter as cores desejadas, como o verde do urânio, que foi muito usado. O segundo componente era o gás do interior do tubo, que, conforme Faraday (1838) já havia observado, determinava a cor da descarga. O terceiro componente, usado em alguns casos, era um líquido que enchia um tubo externo, dentro do qual era posto o tubo de descarga: esse líquido continha um dos vários corantes já utilizados na época em química e biologia. O quarto componente era uma variedade de pedras fosforescentes conhecidas na época, como fluorita, fósforo e rubi, que permitiam a criação de formas coloridas dentro do tubo (CROOKES, 2019; DIJKSTRA, 2019).

A primeira lâmpada elétrica fria utilizando a eletroluminescência foi inventada pelo

químico inglês John Thomas Way, que em 1857 patenteou uma lâmpada de descarga com eletrodos de mercúrio, propondo seu uso em faróis e para sinalização (WAY, 1857). Em 1862, o engenheiro de minas francês Alphonse Dumas e o médico Camille Benoit patentearam uma “lâmpada fotoelétrica” para uso em ambientes com risco de explosões, como as minas de carvão. O aparelho, formado por uma célula de Bunsen, uma bobina de Ruhmkorff e um tubo de Geissler, foi usado em minas de carvão francesas (BULLETIN, 1864, p. 639; PORTABLE, 2019). Em 1892, o físico alemão Martin Leo Arons inventou uma lâmpada de descarga em vapor de mercúrio (o tubo de Arons) que foi comercializada pela *Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft* (Companhia Geral de Eletricidade) e, em 1900, o estadunidense Peter Cooper Hewitt deu entrada no pedido de patente de uma lâmpada de descarga em alto vácuo com vapor de mercúrio. Embora fossem inadequadas para uso residencial, as lâmpadas de mercúrio foram bastante usadas em estúdios de fotografia e aplicações industriais (ARONS, 2019; HEWITT, 1907, 2019).

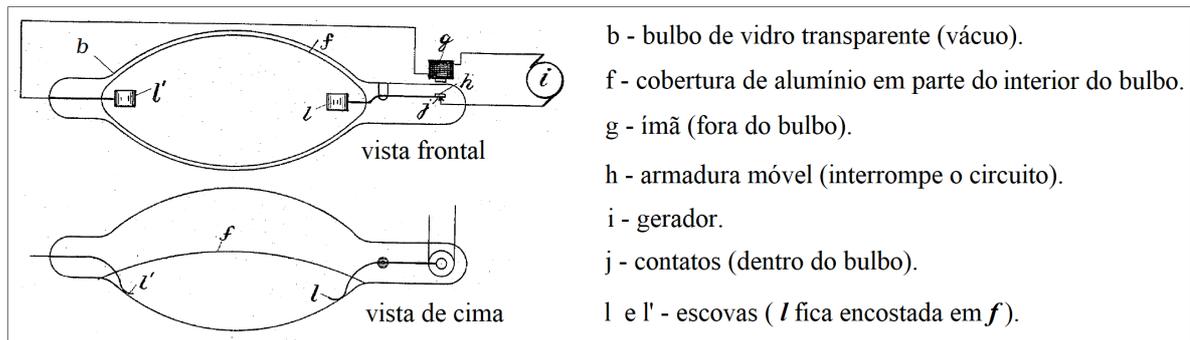
Figura 1.26: Primeira lâmpada de mercúrio de Cooper Hewitt (1900)



Fonte: imagem adaptada da patente US 843.533 (HEWITT, 1907).

O pioneiro do uso da fotoluminescência na iluminação de forma comercialmente viável foi o engenheiro estadunidense Daniel McFarlan Moore, que trabalhou com Edison e, em 1895, deu entrada no pedido de patente da sua primeira lâmpada fosforescente, que logo começou a produzir na *Moore Electric Company*, fundada em 1894. Moore revestiu a superfície interna do tubo de descarga com um material luminescente; esse recurso, inventado por Edmond Becquerel, foi usado mais tarde nas lâmpadas fluorescentes. O sistema era complicado, mas apresentava uma eficácia alta para os padrões da época; por isso, teve um sucesso razoável, sendo instalado em grandes estabelecimentos, mas caiu em desuso quando a lâmpada incandescente igualou seu nível de eficácia, já no século XX (MOORE, 1896, 2019; VALEUR; BERBERAN-SANTOS, 2011).

Figura 1.27: Lâmpada fosforescente com cobertura metálica de Moore (1895)



Fonte: imagem adaptada de Moore (1896).

Além de formarem a base para o desenvolvimento das modernas lâmpadas fluorescentes, de descarga em gás (de mercúrio e sódio), eletrônicas e neon, as primeiras lâmpadas luminescentes foram precursoras de uma variedade de válvulas de catodo frio. As lâmpadas de descarga em vapor de mercúrio deram origem a válvulas como o retificador de mercúrio inventado por Cooper Hewitt em 1901, que teve aplicações importantes na indústria e nos sistemas de fornecimento de energia (HEWITT, 1914; TIKU, 2014). As lâmpadas neon, derivadas dos tubos de descarga no vácuo após a descoberta dos gases raros (em torno de 1898), originaram válvulas usadas como indicadores de sintonia, monitores, estabilizadores, osciladores, armazenadores de pulso, moduladores de audiodfrequência, relés, contadores, chaves e *displays* de caracteres (COLD, 1964; ERB, 2019; TUNEON, 2019). Além disso, os conhecimentos sobre os materiais fosforescentes e o modo de ativá-los por meio da corrente elétrica foram fundamentais para a criação do tubo de raios catódicos, cujo desenvolvimento por Braun foi quase simultâneo ao da lâmpada fosforescente.

1.4.3 As lâmpadas incandescentes

O fato de que metais mudam de cor quando aquecidos é conhecido desde pelo menos 1500 AEC, quando foi inventada a modelagem do ferro amolecido pelo calor: o segredo dos ferreiros antigos era conhecer a cor do ferro quente que indicava quando o metal estava no ponto certo para ser martelado (FORRESTER, 2019; NÚÑEZ; PANIAGUA, 2001). Esse efeito do calor continuou a ser estudado no contexto da antiga teoria dos elementos e, modernamente, da filosofia natural. No fim do século XVIII, já eram conhecidos o ponto de incandescência e as cores associadas às diferentes temperaturas (LARDNER, 1833). Mas esse

conhecimento veio de experimentos em que o aquecimento era feito pelo fogo; somente após o início das experiências modernas com a eletricidade é que foi descoberta a possibilidade de obter o mesmo efeito com a corrente elétrica.

O primeiro experimento registrado foi feito em 1763, nos Estados Unidos, por Ebenezer Kinnersley, que, investigando se a eletricidade seria capaz de “enfraquecer a coesão das partículas” do metal, descobriu que a passagem da corrente aquecia o metal ao rubro (KINNERSLEY, 1763). O achado foi retomado por Humphry Davy que, em 1802, aqueceu tiras de metal, pela aplicação de uma corrente elétrica, e viu o material brilhar por um curto período e ser destruído. Comparando vários metais, Davy verificou que a platina não era destruída rapidamente; por isso, podia fornecer luz por um período considerável (BRIGHT, 1949; HOWELL; SCHROEDER, 1927).

Nos anos seguintes, vários experimentos contribuíram para o avanço dos conhecimentos sobre a incandescência de origem elétrica. Segundo Humphry Davy (1812, p. 151-153), as primeiras pesquisas foram realizadas pelos franceses Fourcroy, Vauquelin e Thénard, e pelo inglês John George Children que, entre 1809 e 1813, observou o comportamento de diversos materiais diante da corrente elétrica (CHILDREN, 1815). Em torno de 1820, os italianos Gazzeri, Antinori e Bardi (1821, p. 304) observaram a incandescência e citaram estudos semelhantes do suíço Auguste de la Rive. Um avanço importante para a aplicação prática da incandescência foi realizado pelo químico estadunidense John Draper (1847), que determinou o ponto de incandescência, verificou que essa temperatura é a mesma para todos os materiais, e identificou a temperatura em que um corpo emite radiação de cada cor, do vermelho ao branco.

A ideia de substituir o condutor descontínuo, gerador de centelhas, por um condutor contínuo incandescente, foi uma das alternativas surgidas, logo no início do desenvolvimento da iluminação elétrica, para resolver dois problemas: a intensidade excessiva da luz de arco e a dificuldade de subdividi-la em unidades menores, de modo a gerar uma luz aceitável em ambientes interiores e distribuir os pontos de luz. A partir das primeiras décadas do século XIX, inventores de diversos países começaram a testar lâmpadas incandescentes. Algumas foram apenas experimentais, mas algumas das criadas no fim da década de 1870 atingiram o estágio comercial (BRIGHT, 1949; HISTORY, 1905; HOUSTON; KENNELLY, 1896).

Quadro 1.2: Primeiras lâmpadas incandescentes – 1835-1880

| Ano | Inventor | Iluminante | Atmosfera | País |
|------|-----------------------------------|-------------------|-------------------------------|------------|
| 1835 | James B. Lindsay ¹ | [Sem informação] | Ar livre ou vácuo (bulbo) | Escócia |
| 1838 | Marcellin Jobard ² | Carvão | Vácuo (bulbo) | Bélgica |
| 1841 | Frederick de Moleyns ³ | Carvão | Vácuo (bulbo) | Irlanda |
| 1844 | John W. Starr ^{4,5} | Carvão | Vácuo (bulbo) | EUA |
| 1844 | Charles de Changy ² | Carvão | Vácuo (bulbo) | Bélgica |
| 1845 | William R. Grove ⁶ | Platina | Ar (frasco invertido em água) | Inglaterra |
| 1848 | William E. Staite ² | Iridio | [Sem informação] (bulbo) | Inglaterra |
| 1852 | Floris Nollet ² | Carvão | Vácuo (bulbo) | Bélgica |
| 1852 | M. J. Roberts ² | Grafite | Vácuo (bulbo) | Inglaterra |
| 1858 | Charles de Changy ² | Platina | Vácuo (bulbo) | Bélgica |
| 1859 | Moses G. Farmer ¹ | Platina | Ar livre | EUA |
| 1860 | Joseph Swan ¹ | Papel carbonizado | Vácuo (bulbo) | Inglaterra |
| 1872 | Alexandre Lodyguine ¹ | Carbono | Nitrogênio (bulbo) | Rússia |
| 1872 | S. W. Konn ² | Carbono | Nitrogênio (bulbo) | Inglaterra |
| 1874 | Woodward e Evans ⁷ | Carbono | Nitrogênio (bulbo) | Canadá |
| 1875 | S. A. Kosloff ⁸ | Grafite | Nitrogênio (bulbo) | Rússia |
| 1878 | S. G. Lane Fox ¹ | Platina e irídio | Ar ou nitrogênio (bulbo) | Inglaterra |
| 1878 | W. Sawyer e A. Man ⁹ | Carbono | Nitrogênio (câmara) | EUA |
| 1879 | S. G. Lane Fox ¹⁰ | Carbono | Vácuo (bulbo) | Inglaterra |
| 1879 | Moses Farmer ¹¹ | Carbono | Nitrogênio (bulbo) | EUA |
| 1879 | Joseph Swan ¹² | Linha carbonizada | Vácuo (bulbo) | Inglaterra |
| 1879 | Thomas A. Edison ¹³ | Platina | [Ar] (bulbo) | EUA |
| 1880 | Hiram Maxim ¹⁴ | Papel carbonizado | Vácuo (bulbo) | EUA |

Nota: Foram omitidas as lâmpadas de la Rue, confundido com de la Rive, que fez apenas aparelhos de pesquisa; de Shepard, agente de Nollet, e de King, agente de Starr; de Goebel, que foi uma fraude; e as híbridas incandescente-arco ou semi-incandescentes (GAZZERI; ANTINORI; BARDI, 1821; RIVE, 1845; CONTE, 2011; DREDGE, 1882; COVINGTON, 2003).

Fontes de informação: ¹ Covington (2017); ² Dredge (1882); ³ Benjamin (1901); ⁴ Bright (1949); ⁵ History (1905) ⁶ Grove (1846); ⁷ Woodward e Evans (1874); ⁸ Blatchford (1894); ⁹ Sawyer e Man (1878); ¹⁰ US (1894, p. 272); ¹¹ Farmer (1879); ¹² Swan (1880a); ¹³ Edison (1879); ¹⁴ Maxim (1880).

Um problema encontrado nas lâmpadas incandescentes foi a rapidez com que o iluminante se desintegrava ao queimar exposto ao ar livre ou dentro de recipiente com ar. Outro problema era a necessidade de correntes muito intensas para o condutor atingir a emissão de luz branca: quando essa temperatura era muito próxima do ponto de fusão dos materiais testados, um pequeno aquecimento acidental podia romper o condutor; e se a

lâmpada ficasse numa temperatura mais baixa, a luz emitida era fraca e parda. Os testes mostraram que, com o condutor no vácuo, vários problemas seriam resolvidos: a desintegração do iluminante seria retardada; como não haveria perda de calor, seria necessária uma corrente menor para atingir o ponto de incandescência; e sem as mudanças na temperatura do ar, a luz seria mais constante (HOUSTON; KENNELLY, 1896).

Em meados do século XIX, já existiam conceitos e recursos para a produção de recipientes de vidro fechados, contendo diferentes gases em diversas pressões; mas ainda não havia bombas capazes de gerar o vácuo necessário para que as lâmpadas se tornassem objetos práticos. Ao mesmo tempo, a iluminação a gás se expandia, mostrando-se uma opção prática, barata e lucrativa para as cidades. Então, por volta de 1860, a ideia da produção comercial de iluminação elétrica foi quase abandonada, e só voltou a ser examinada com seriedade em meados da década de 1870, após a criação da bomba de ar de Sprengel e do dínamo, que resolveram os problemas da produção de alto vácuo e da geração de energia com a intensidade e a estabilidade necessárias para sustentar um sistema de iluminação elétrica (BRIGHT, 1949; HISTORY, 1905; HUNT, 2010).

No fim da década de 1870, as lâmpadas de arco estavam sendo usadas para iluminar ruas e edifícios em cidades de vários países, mas ainda não tinha sido resolvido o problema da subdivisão dos circuitos elétricos das lâmpadas. Por isso, essas lâmpadas eram usadas apenas na iluminação de espaços abertos, deixando inexplorado o grande mercado potencial da iluminação de interiores. A combinação do sucesso dessa fase da iluminação elétrica com a lacuna nas possibilidades de aplicação do arco deu, a inventores da Inglaterra e dos Estados Unidos, principalmente, motivação para aperfeiçoar a lâmpada incandescente: de 1878 a 1881, foram registradas, na Inglaterra, 90 patentes de lâmpadas incandescentes, e, nos Estados Unidos, 51 patentes de dispositivos de iluminação incandescente. Esse curto período marcou o início da formação do setor de iluminação elétrica, que abrangia, por um lado, a produção industrial de lâmpadas e outros componentes para os sistemas de iluminação, e, por outro lado, a geração e distribuição de energia (BRIGHT, 1949; DREDGE, 1882, Appendix).

O principal problema que faltava resolver em relação à lâmpada era a criação de um elemento iluminante que produzisse luz por um longo tempo sem se desintegrar, que fosse barato, que não exigisse correntes intensas para emitir luz e que tivesse o mínimo possível de perda de energia na forma de calor, permitindo a produção de lâmpadas capazes de competir com os bicos de gás em termos de intensidade da luz, tamanho, facilidade de controle e custo. Como pode ser visto no Quadro 1.2, os materiais preferidos para o iluminante foram a platina e o irídio, já utilizados ou testados em aparelhos elétricos experimentais ou comerciais

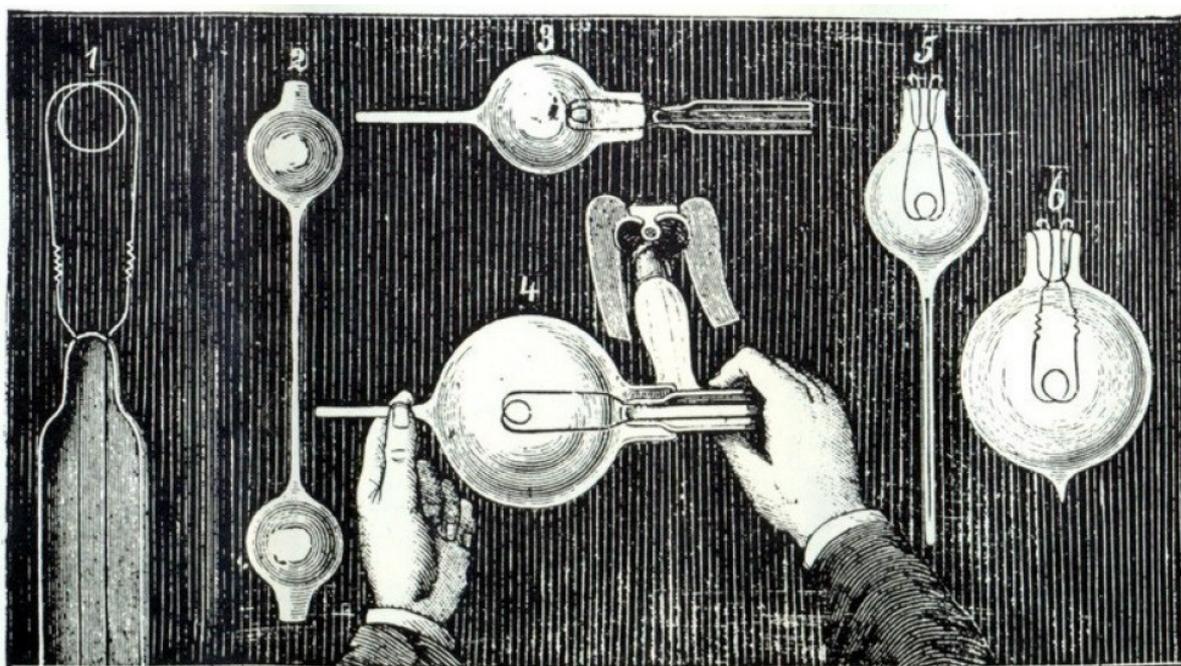
(MCDONALD; HUNT, 1982), e o carbono, que já era usado na iluminação de arco. A platina e o irídio foram pouco usados e logo abandonados pela maioria dos pesquisadores, porque o ponto de fusão da platina (1768,3 °C) é próximo da temperatura de emissão de luz branca (1165,56 °C), e o irídio, embora com ponto de fusão mais alto (2446 °C), era muito caro. A melhor opção era o carbono, bem mais barato que os metais e que não se funde em pressão normal, tendo o ponto de sublimação em 3642 °C (DRAPER, 1847; QUIMILAB, 2019). O carbono foi usado na forma de bastões de carvão vegetal, hulha ou grafite, até que, em meados do século XIX, o químico inglês Joseph Swan começou a testar a produção de filamentos de papel.

A lâmpada que Swan testou em 1860 tinha como elemento iluminante uma tira de papel carbonizado, que queimou de modo desigual e se partiu. Avaliando que parte do problema era o vácuo imperfeito, e sem poder resolvê-lo naquele momento, Swan só retomou a lâmpada em 1877. Para obter um filamento homogêneo, Swan aplicou ao papel, antes da carbonização, o método, já conhecido na indústria, de fundir a celulose por imersão em ácido sulfúrico. Em 1879, Swan apresentou em Newcastle uma lâmpada com filamento de papel sulfurado; pouco depois, começou a produzir lâmpadas em parceria com Charles Stearn, fabricante de tubos e bulbos com alto vácuo. Em 1880, Swan patenteou a lâmpada com filamento de papel e um filamento de linha de algodão sulfurada, e as lâmpadas Swan começaram a ser instaladas em residências, ruas e edifícios de várias cidades, com um soquete aparafusado em luminárias de gás (BRIGHT, 1949; COVINGTON, 2017, Swan; DREDGE, 1882; SWAN, 1880b; VEGETABLE, 1860). Em 1881, Swan fundou a *Swan Lamp Company*; para montar sistemas de iluminação, aliou-se a Crompton, que fabricava geradores e fazia instalações elétricas. No início, cada sistema (uma rua, um edifício, uma residência) tinha a energia fornecida por um gerador instalado no local; a primeira experiência inglesa com uma estação central de energia foi realizada em 1881, em Godalming, cujas ruas foram iluminadas por lâmpadas Swan e de arco, alimentadas por um gerador e fiação instalados por Siemens; a falha do sistema foi a atenuação da energia que chegava às lâmpadas do final do circuito (CHARLES, 2019; MCNEIL, 1990, p. 366, 368-369; IET, 2019; LAMPTECH, 2019; STEARN, 2019).

O outro inventor importante na Inglaterra foi Saint George Lane-Fox-Pitt, que registrou, em 1878, três patentes referentes a um sistema de iluminação incandescente que incluía geradores formados por células de Planté em série, ativados por máquinas a vapor; condutores de cobre isolados, passando dentro dos canos de gás; e eletrômetros de quadrante como reguladores. Nessas patentes, Lane-Fox descreveu as lâmpadas usadas, cujo bulbo

podia ter um gás inerte ou vácuo. O iluminante, inicialmente de platina, passou a ser feito de um núcleo não-condutor revestido com carbono, ou de carbono puro. Segundo Dredge (1882, p. 650-651), o filamento era feito por deposição de carbono (resultante de um banho de gás de hidrocarboneto) sobre uma fibra vegetal carbonizada. A lâmpada de Lane-Fox foi fabricada pela *Anglo-American Brush Electric Light Corporation* (BRIGHT, 1949; COVINGTON, 2017, Lane Fox-Pitt; LAMPTECH, 2019; US, 1894, p. 272-273).

Figura 1.28: Processo de manufatura das lâmpadas na *Swan Lamp Company*



Legenda:

- 1) os fios de platina, aos quais o filamento foi fixado, são fundidos numa rolha de vidro.
- 2) um tubo de vidro é soprado na forma de bulbos, com uma haste para fazer o vácuo.
- 3) a rolha de vidro, com os fios de platina e o filamento presos a ela, é inserida no bulbo.
- 4) a rolha de vidro é aquecida e o filamento fica selado dentro do bulbo.
- 5) o ar é retirado da lâmpada pela haste.
- 6) a lâmpada pronta, com a haste já selada e aparada.

Fonte: South Benwell (LAMPTECH, 2019).

Entre os inventores ligados às lâmpadas incandescentes nos Estados Unidos, os mais relevantes foram Edison, Latimer, Farmer e Maxim. Os três últimos trabalharam na *United States Electric Lighting Company*. Moses Farmer, engenheiro, foi mais importante pelos conhecimentos que produziu do que por inventos práticos. Além de testar materiais, formas de montagem da lâmpada e de controle da corrente, patenteou, em 1879, uma lâmpada com filamento de carbono em bulbo com nitrogênio. A *US Company* adquiriu a patente, mas a lâmpada devia ter pouco valor comercial, pois não aparece no catálogo da empresa de 1882

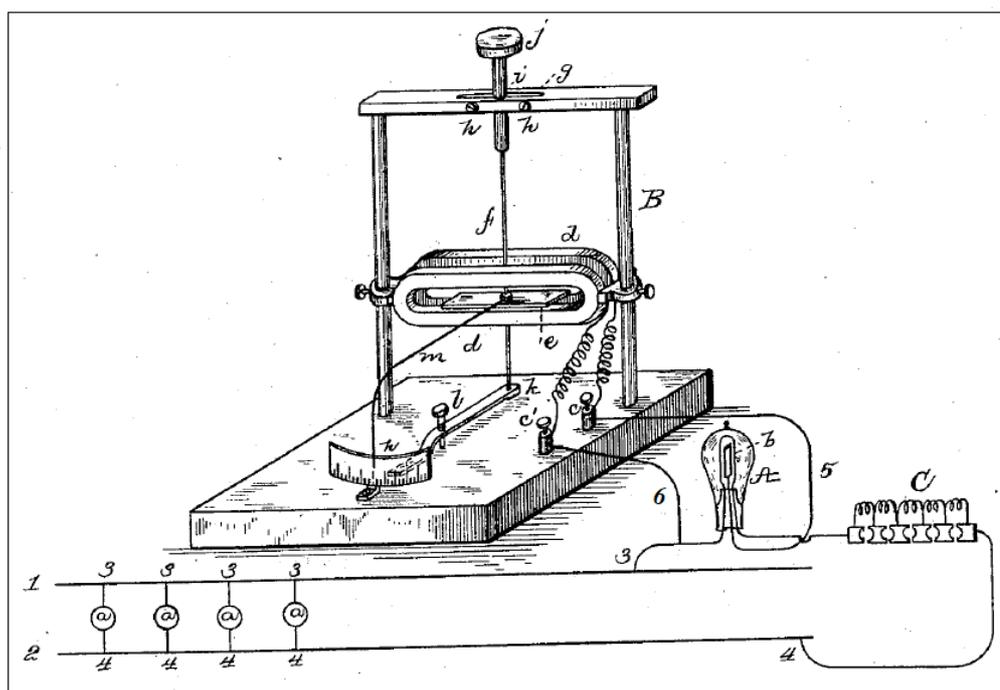
(COVINGTON, 2017, Farmer; FARMER, 1879; US, 1882). Lewis Latimer, um jovem negro, aprendeu desenho técnico e aspectos legais das patentes trabalhando numa firma de advocacia. Em 1880, foi contratado como desenhista pela *US Company*, onde se familiarizou com a iluminação elétrica. Em 1881, patenteou, com J. Nichols, uma lâmpada com filamento de papel carbonizado, e, em 1882, um processo de produção do filamento, ambos aproveitados pela *US Company*; a partir de 1884, trabalhou na *Edison Electric Lighting Company* e nas empresas que a sucederam, incluindo a *General Electric* (KOOLAKIAN, 1993; LATIMER, 1882; NICHOLS; LATIMER, 1881). Hiram Maxim, técnico e mecânico prático, foi contratado como eletricitista, em 1878, pela *US Company*, que comprou nesse ano a patente da sua lâmpada de arco e, em 1880, as de um processo de produção do filamento de papel carbonizado banhado em gás de hidrocarboneto e de uma lâmpada incandescente, que foi fabricada até a *US Company* ser adquirida pela Westinghouse em 1888 (BRIGHT, 1949; COVINGTON, 2017, Maxim; MAXIM, 1880a, 1880b; US, 1882).

Edison foi o último dos inventores da década de 1870 a se interessar pelas lâmpadas, após ver seu potencial comercial, em 1878, na fábrica de lâmpadas de arco da *Wallace & Sons*; mas avançou rapidamente porque, no final dos anos 1860, já havia montado uma oficina para criação, produção e venda de dispositivos elétricos. Mais tarde, trabalhando na *Western Union* como operador de telégrafo, adquiriu experiência, contatos e recursos que lhe permitiram montar, em 1876, um laboratório de pesquisa em Menlo Park (New Jersey) e, em 1878, a *Edison Electric Light Company* (BRIGHT, 1949; DYER; MARTIN, 1910). Reunindo uma equipe de técnicos, cientistas e engenheiros, Edison em pouco tempo fez adaptações de lâmpadas e sistemas de iluminação criados por outros inventores, adotando métodos de produção de vácuo, modelos de lâmpada e tipos de filamento de Swan, Lane-Fox e Maxim, entre outros. Em 1879, patenteou uma lâmpada com filamento de platina e, em 1880, duas lâmpadas com condutor de carbono feito com uma mistura de material carbonizado (algodão, madeira, papel, carvão etc.) e alcatrão, amassada e modelada (BRIGHT, 1949; EDISON, 1879, 1880a, 1880b; MCNEIL, 1990, p. 368).

Enquanto testava as lâmpadas de carbono, Edison fez uma descoberta fundamental para o desenvolvimento das válvulas: a possibilidade de utilizar o efeito termoiônico que ocorria na lâmpada incandescente. Edison não foi o primeiro a observar o fenômeno: ele foi descoberto em 1851 pelo físico alemão Heinrich Buff e estudado em 1853 por Edmond Becquerel, que produziu corrente elétrica entre dois eletrodos de platina aquecidos ao rubro (BECQUEREL, 1853; TYNE, 1994). Em 1873, o físico inglês Frederick Guthrie estudou o que chamou de “termoeletricidade”, obtida pelo aquecimento simultâneo de um dos extremos

de dois fios de metais diferentes (estando o outro extremo de cada fio ligado a um dos polos de um galvanômetro), e identificou detalhes como o sentido inicial do fluxo da corrente, a inversão do sentido com o resfriamento súbito dos metais, e as temperaturas de emissão máxima, de inversão da corrente e de sua queda a zero para diferentes pares de metais (GUTHRIE, 1876, p. 289-292).

Figura 1.29: O indicador elétrico de Edison



Legenda: Os elementos **a** são lâmpadas ligadas aos condutores principais **1-2** pelos fios **3** (positivo) e **4**. **A** é a lâmpada indicadora, ligada como as outras aos condutores **1-2**, e com a placa de platina **b** entre os braços do filamento de carbono. **B** é um galvanômetro com os terminais **c, c'**. O fio **5** liga a platina **b** ao terminal **c** e o fio **6** liga o fio positivo **3** ao terminal **c'**. **C** é uma resistência ajustável para manter o circuito na resistência padrão da lâmpada.

Fonte: Patente US 307.031, Fig. 1 (EDISON, 1884).

Edison fez a mesma descoberta em 1880, quando instalou uma placa de platina perto do filamento de uma das lâmpadas. Edison nunca soube explicar o achado, do ponto de vista teórico, mas encontrou uma forma de usá-lo: verificando (como Guthrie) que a corrente no bulbo variava com a temperatura do filamento, e, portanto, dependia da quantidade de energia fornecida, construiu e patenteou, em 1883, um “indicador elétrico”, usando essa lâmpada conectada ao sistema de iluminação e ligada a um galvanômetro (EDISON, 1884; GARNER, 1963; SHIERS, 1969). O nome “efeito Edison” foi criado por William Preece, no relato que apresentou à *Royal Society* em 1884, e foi usado até que Owen Richardson (Prêmio Nobel de Física em 1928) chamou de “termoiônicos” os fenômenos cujas leis formulou em 1901

(PREECE, 1885; RICHARDSON, 1916, 1929).

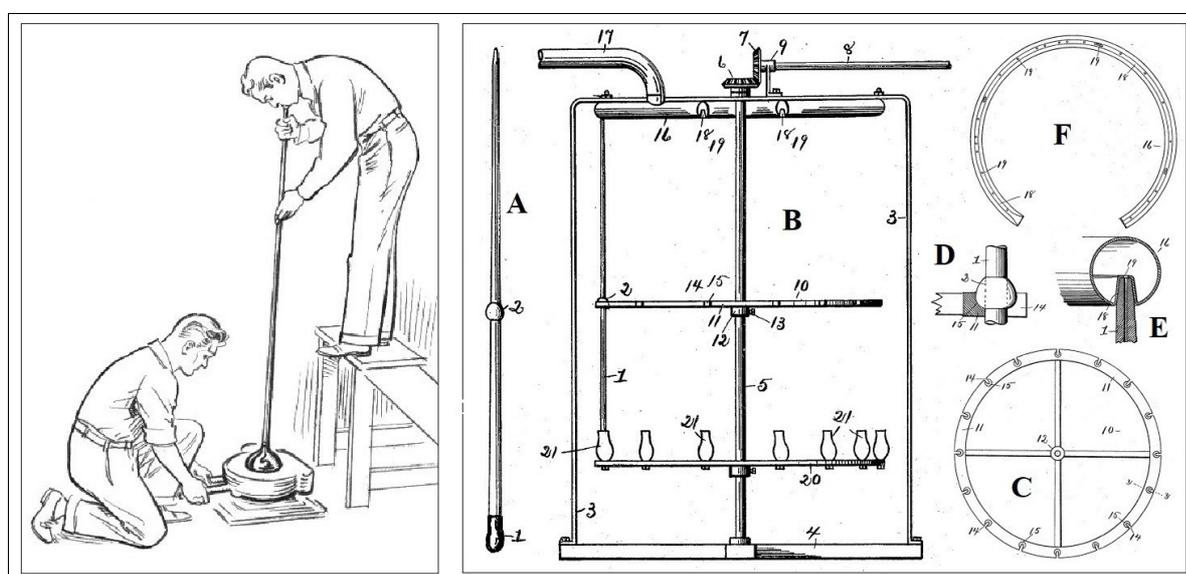
A partir de 1880, com as primeiras lâmpadas sendo produzidas e comercializadas, os empresários se voltaram para os outros problemas do sistema de iluminação. O primeiro era o projeto do sistema de distribuição da luz, que incluía: 1) a geração e condução da energia; 2) a subdivisão da luz, ou seja, o modo de ligar várias lâmpadas num único circuito, de modo que cada uma pudesse ser operada de forma independente; e 3) a garantia de que todas as lâmpadas receberiam a mesma energia. Além disso, era preciso criar modelos satisfatórios de acessórios para a instalação das lâmpadas, como bases, soquetes e luminárias, além de fusíveis, medidores e outros dispositivos do sistema. Também era preciso criar métodos eficientes de produção para as lâmpadas e os outros componentes (BRIGHT, 1949).

Em relação ao projeto do sistema, assim como a iluminação a gás copiou o modelo do sistema de fornecimento de água, a iluminação elétrica adotou o modelo das redes de distribuição de gás: a geração de energia numa estação central, e a distribuição por uma rede de condutores. Vários fabricantes de lâmpadas incandescentes fizeram parcerias com empresas que instalavam sistemas elétricos, mas a intenção de Edison, desde o início, foi criar um sistema de iluminação elétrica que seria o produto da sua empresa, e que patenteou em 1882 (BRIGHT, 1949; EDISON, 1883). Mas enquanto, na Europa, os sistemas de iluminação incandescente foram implantados aproveitando a tecnologia dos sistemas de arco, que utilizavam corrente alternada, o sistema de Edison usava corrente contínua. Isso criou um problema nos Estados Unidos: a incompatibilidade entre os dois sistemas de iluminação. A entrada de George Westinghouse na disputa, com o sistema de corrente alternada criado por William Stanley em 1886, formou a base para a produção unificada de energia em grande escala e sua distribuição a grandes distâncias, com transformadores postos em subestações onde eram associados a conversores quando era necessário converter a CA gerada pelos dínamos em CC (COVINGTON, 2017, Stanley; HISTORY, 1905).

O aperfeiçoamento dos métodos de produção de lâmpadas e acessórios foi fundamental para o desenvolvimento posterior da indústria de válvulas, que encontrou os seus problemas básicos já resolvidos. Durante a década de 1880, a produção anual de lâmpadas cresceu muito, mas o setor ainda enfrentava dois obstáculos: a fabricação quase toda manual (que impunha limites ao volume da produção) e o alto custo da lâmpada. Na época, só eram usadas algumas máquinas simples na fabricação do filamento e na montagem da lâmpada. O processo gastava muito tempo e exigia grande habilidade dos trabalhadores que faziam e montavam as partes da lâmpada. Um dos avanços mais importantes foi o aperfeiçoamento da bomba de Sprengel, que reduziu o tempo de exaustão, de 5 horas, para 30 minutos; além

disso, foram criadas técnicas para absorver impurezas e resíduos de gases no processo de exaustão, o que aumentava a vida útil da lâmpada. Por volta de 1889, Edison começou a usar uma máquina de selagem, que juntava a haste de vidro e o suporte do filamento ao pescoço do bulbo. Finalmente, em 1895, a *Libbey Glass Company*, grande fornecedora de bulbos para a indústria de lâmpadas, começou a usar a máquina semiautomática para fazer bulbos de vidro inventada pelo seu funcionário Michael J. Owens; com isso, o custo do trabalho para produzir o bulbo, em 1902, baixou para 10% do custo em 1882 (BRIGHT, 1949; HISTORY, 1905).

Figura 1.30: O vidreiro tradicional e a máquina de fazer bulbos de Owens



Aparelho (B): a moldura 3-4 sustenta o eixo 5, girado pelo movimento do eixo 8, transmitido pelas engrenagens 6-7. O eixo 5 faz girarem dois suportes: o 10 (C) tem em toda a volta recessos (14-15) onde vários tubos de sopro (A) são encaixados, já com a massa de vidro 1 na ponta, e mantidos em posição pela saliência 2 (D). O suporte inferior (20) sustenta os moldes (21), cada um alinhado com um dos recessos do suporte 10, de modo que cada molde recebe um tubo de sopro. No alto da moldura há um tubo em forma de anel (F), que recebe o ar do tubo 17. Na face inferior, o anel tem uma guia (E) onde as pontas dos tubos de sopro se encaixam e deslizam conforme o suporte 10 se move. A guia tem orifícios por onde o tubo de sopro recebe ar quando passa por cada um deles; os diâmetros e as posições dos orifícios determinam a forma da peça moldada.

Fontes: Texto e imagens adaptados de Owens (1895) e Foresman (2019).

A introdução dessas e outras máquinas permitiu a substituição, na linha de montagem das lâmpadas, dos homens com experiência técnica por mulheres sem experiência prévia (e com salário menor). Os métodos e aparelhos usados para testar as lâmpadas na fábrica também foram aperfeiçoados, de modo que o custo de alguns testes, em 1902, era 9% do custo em 1882. No campo do projeto da lâmpada, uma meta foi fazê-la com os materiais mais baratos possíveis e reduzir a quantidade da platina usada para conduzir a eletricidade entre a base e o filamento, mas que tinha grande peso no custo total: a solução foi usar o “selo

Siemens”, de 1893, que usava um fio de platina muito pequeno para atravessar o vidro, e ligava-o a um fio condutor para trazer a corrente da base e outro para levá-la ao filamento. A base das lâmpadas também foi aperfeiçoada, para dar maior estabilidade e firmeza de contato às lâmpadas, e foi enfrentado o problema da falta de padronização de bases e soquetes dos diversos fabricantes: em 1897, havia vários modelos diferentes de bases de lâmpadas, cada um incompatível com os soquetes de outros fabricantes, mas, em 1900, 70% das lâmpadas usavam o padrão Edison. Isso levou a uma padronização de estilos e dimensões de lâmpadas, de voltagens e equipamentos das estações geradoras etc. Em resumo, o conjunto dos aperfeiçoamentos reduziu drasticamente o custo de produção das lâmpadas: na fábrica de Edison, em 1881, o custo era 70 *cents* (centavos de dólar) e, em 1884, 22 *cents*; o custo das lâmpadas alemãs, em 1895, era 11 *cents*. Com isso, o preço ao consumidor caiu de até um dólar, em 1882, para 35 *cents* em 1902 (BRIGHT, 1949; HISTORY, 1905).

Os fabricantes também investiram na melhoria da eficiência e da durabilidade das lâmpadas: entre 1881 e 1896, a eficiência passou de cerca de 1,7 para 3,5 lúmens por watt, e o tempo de vida da lâmpada, com no mínimo 80% da eficiência inicial, passou de 200 para 400 horas; com o desafio do lançamento das camisas incandescentes para as lâmpadas de gás, foram criadas lâmpadas com uma vida de 600 horas, chegando a 10.000 horas em 1902. Também foram desenvolvidas lâmpadas especiais para corrigir problemas específicos, como o brilho do filamento, e atender a necessidades especiais, como as miniaturas para aparelhos médicos, as grandes para iluminação de rua e as decorativas em formatos variados. As lâmpadas incandescentes também se tornaram mais vantajosas para os consumidores: enquanto as primeiras lâmpadas de filamento de papel consumiam 100 W para fornecer uma luz de 16 candelas, a lâmpada com essa intensidade de luz consumia 50 W em 1902 (BRIGHT, 1949; HISTORY, 1905).

Do ponto de vista das válvulas, o desenvolvimento dos filamentos de carbono foi importante por servir de campo de experimentação e permitir a criação dos processos de produção, o estabelecimento de padrões de produtos e outras definições realizadas durante o desenvolvimento das lâmpadas; mas foi necessário o retorno, em novas bases, ao condutor metálico para que as válvulas se tornassem viáveis. Durante a década de 1880, a indústria procurou aperfeiçoar o filamento de carbono, mas não conseguiu aumentar sua eficiência: como a taxa de evaporação do carbono é muito alta a partir de 1600 °C, e essa temperatura permitia obter uma eficiência máxima de 3,4 lúmens por watt, apenas 1 a 2% da energia fornecida à lâmpada era convertida em luz, e o resto era desperdiçado como calor. Foram experimentados então filamentos de diversos materiais, metálicos e não-metálicos, usados

isoladamente ou depositados sobre um núcleo de carbono, magnésio, porcelana etc., mas sem sucesso. Para obter um filamento sem carbono, havia duas possibilidades. Uma era usar um material iluminante não-seletivo (em que o pico de irradiação se desloca para as frequências mais altas com o aumento da temperatura), que poderia atingir uma eficiência de 85 lúmens de luz visível por watt a 6200 °C, mas não havia materiais conhecidos com essas características. A outra opção era usar iluminantes seletivos concentrados na faixa de luz visível: com menor perda na região invisível do espectro, a lâmpada poderia ter uma eficiência mais alta com temperaturas de operação mais baixas. Com a expansão das pesquisas sobre os metais e o preço baixo das terras raras na década de 1890, foram testados nesse período vários substitutos para o carbono (BRIGHT, 1949).

Em 1897, o alemão Walther Nernst desenvolveu uma lâmpada incandescente que não precisava funcionar em um invólucro com vácuo, e cujo material iluminante, que operava a cerca de 2350 °C, era um bastão feito de materiais refratários sobre os quais já era sabido que, embora fossem isolantes em temperatura baixa, tornavam-se condutores em alta temperatura e emitiam uma luz branca forte, além de serem seletivos, com pouca perda na faixa infravermelha. A base era um óxido não-metálico (magnésio, zircônio) com traços de terras raras (tório, ítrio, cério); o aquecedor era uma espiral de platina posta em torno do bastão. A eficiência das primeiras lâmpadas era 50% maior que a da lâmpada de filamento de carbono comum, e caía com o uso; mas esses aspectos foram melhorados em modelos posteriores. Patentada em vários países em 1897, a lâmpada foi fabricada a partir de 1900 pela Westinghouse, que produzia para os Estados Unidos e o Canadá, e as firmas europeias AEG, Ganz e Nernst, que atendiam os outros continentes. Sua grande vantagem sobre a lâmpada de filamento de carbono levou ao seu uso extensivo até 1912, embora fosse cara. Além de ter sido usada por algum tempo como fonte de radiação infravermelha em espectrômetros, a lâmpada de Nernst foi notável por ter utilizado o primeiro eletrólito sólido produzido comercialmente (BRIGHT, 1949; MILLS, 2013).

Em 1898, o austríaco Carl Auer von Welsbach (criador da camisa incandescente para a lâmpada de gás) fez uma lâmpada incandescente com iluminante de ósmio, com eficiência de 5,5 lúmens/watt e vida de 1000 horas, mas com limitações: o ósmio era raro e caro, e sua baixa resistência exigia filamentos longos que aumentavam muito o custo do dispositivo. A lâmpada foi produzida comercialmente, mas sua maior importância foi tecnológica, pois foi a primeira lâmpada com filamento prático de metal. Em 1902, a empresa alemã Siemens & Halske criou uma lâmpada com filamento de tântalo, menos eficiente e durável que a de ósmio, mas melhor que a de carbono e barata, que foi produzida comercialmente com sucesso.

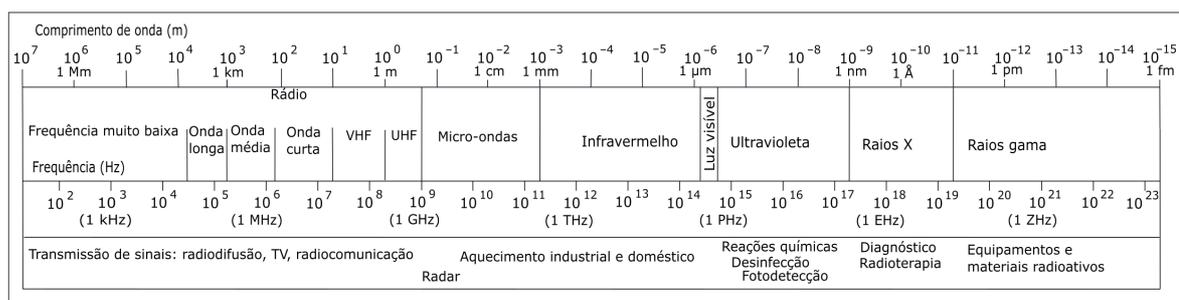
Em 1904, o desenvolvimento de métodos para manipular o tungstênio (disponível em grande quantidade desde 1890) permitiu a pesquisa para a criação de filamentos de tungstênio; as empresas mais bem-sucedidas foram a de Welsbach, que em 1906 criou a lâmpada Osram (com filamento de ósmio com tungstênio) e a de Siemens, que patenteou filamentos feitos de várias ligas contendo tungstênio. Também em 1906, William Coolidge, da GE, desenvolveu um método de amálgama para fazer tungstênio não-dúctil, usado em lâmpadas com eficiência de 7,85 lúmens/watt e vida de 800 horas. Mas o tungstênio não-dúctil é frágil e quebradiço; então, adaptando a técnica usada para produzi-lo, Coolidge conseguiu, em 1910, usar um método comercialmente viável para fazer filamentos de tungstênio dúctil, com eficiência de 10 lúmens/watt e vida de 1000 horas (BRIGHT, 1949). Este foi o material usado para fazer os filamentos das válvulas termoiônicas.

1.5 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

A descoberta das radiações que formam o espectro eletromagnético, o entendimento do funcionamento de suas várias regiões e sua posterior administração, abriram caminho para uma grande variedade de aplicações científicas, industriais e comerciais, com implicações militares e econômicas.

A referência ao espectro eletromagnético é necessária por sua ligação com as motivações que levaram ao desenvolvimento de vários tipos de válvulas, para serem usadas nos sistemas de rádio e em aplicações específicas, como as válvulas geradoras de raios X e detectoras de luminosidade e de radiação ionizante.

Figura 1.31: O espectro eletromagnético e suas aplicações



1.5.1 A luz visível e as regiões próximas

Por muito tempo, a estreita faixa da luz visível foi a única região identificada do espectro. A partir do início dos estudos modernos sobre a eletricidade, a luz esteve sempre entrelaçada com ela. Edmond Becquerel (1867), além de estudar a eletricidade, foi um grande pesquisador dos fenômenos luminosos, e criou uma forma primitiva de célula fotoelétrica para medir a eletricidade produzida por reações fotoquímicas (FATET, 2005). A partir do trabalho de Becquerel, que constatou a grande sensibilidade do selênio à luz, vários outros cientistas desenvolveram dispositivos semelhantes. O precursor da célula fotoelétrica moderna, ou fototubo (uma válvula de catodo quente), foi criado pelos físicos alemães Hans Geitel e Julius Elster, que em 1889 demonstraram que a eletricidade flui sempre do catodo quente para o frio, e depois construíram uma fotocélula formada por um bulbo de vidro a vácuo, com uma liga de potássio e sódio que liberava elétrons quando irradiada com luz de ondas curtas (IVES, 1926; WEISER, 1964).

A primeira radiação não-visível identificada foi a infravermelha, em fenômenos com essa forma de energia como efeito ou origem. Foi descoberta em 1800 pelo astrônomo inglês William Herschel, quando estudava a temperatura das cores da luz decomposta por um prisma, e localizou uma temperatura mais alta além do vermelho. Herschel (1800) levantou a hipótese de que o calor devia ser produzido por “raios caloríficos”.

O outro tipo de radiação não-visível foi descoberto em 1801, por Johann Ritter. O químico alemão, ao aprofundar os estudos de Herschel, verificou que o cloreto de prata (um material já conhecido como fotossensível) era decomposto de maneira eficiente quando submetido às radiações além do violeta, mais tarde chamadas de ultravioleta (UV) por essa localização (RITTER, 2013). Pesquisas subsequentes levaram à descoberta de efeitos biológicos da radiação UV e da emissão nessa faixa de algumas lâmpadas de arco, que tiveram assim garantido um nicho como fontes de radiação ultravioleta para desinfecção, fototerapia e espectrofotometria (KOWALSKI, 2010).

1.5.2 As ondas de rádio e as micro-ondas

Por volta de 1873, Maxwell, ao elaborar suas equações do campo eletromagnético, lançou a hipótese da existência de um número infinito de ondas eletromagnéticas com frequências diferentes: seu trabalho foi o ponto de partida para pesquisas, como as

experiências de Heinrich Hertz em 1888 com as ondas de rádio, que completaram o quadro geral do espectro eletromagnético.

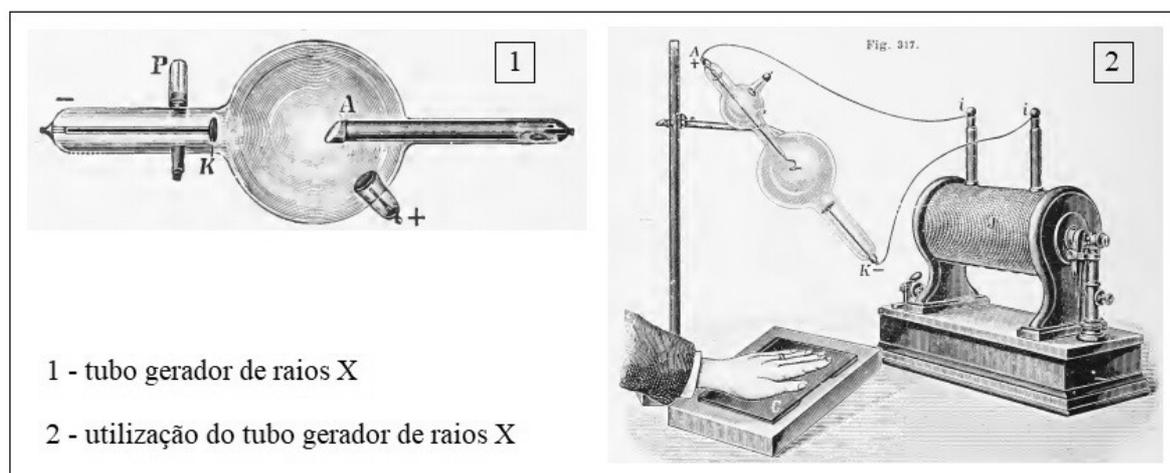
Nos anos seguintes, com as necessidades dos sistemas de rádio em geral, cresceu a tendência de usar faixas de frequências cada vez mais altas, conseqüentemente com comprimentos de ondas cada vez menores, pressionando a fronteira tecnológica de construção de válvulas até a região de micro-ondas. A geração e detecção de micro-ondas foi desenvolvida, de forma pioneira, com as pesquisas de Jagadish Chandra Bose no período entre 1894 e 1900, na Índia, e, posteriormente, com a necessidade de fabricação de válvulas de micro-ondas de potência para serem utilizadas em radares militares na 2ª Guerra Mundial (SARKAR, 2006).

1.5.3 Os raios X e os raios gama

Na mesma época em que estavam sendo realizadas as pesquisas que levaram à comprovação da existência do elétron (descritas na seção sobre a eletricidade), outra linha de experimentos com raios catódicos levou à descoberta dos raios X. O primeiro registro, embora acidental e não identificado, foi feito por Crookes na década de 1880: durante experimentos em que trabalhava com níveis de vácuo e voltagens suficientes para gerar raios X, e usando um catodo côncavo para focalizar a emissão, ele otimizou a produção dos raios X e várias chapas fotográficas do laboratório foram veladas. Em 1888, Philipp Lenard, assistente de Hertz, tentou observar as “radiações invisíveis de alta frequência” previstas por Maxwell, mas falhou, porque os raios foram absorvidos pelo quartzo do tubo. Como vimos na seção sobre a natureza dos raios catódicos, em 1892, após Hertz descobrir que os raios catódicos atravessam o alumínio, Lenard utilizou um tubo com um novo selo feito desse metal. Obteve então duas radiações diferentes: os raios catódicos, que atingiam apenas poucos centímetros no ar, e os efeitos elétricos dos raios, que iam a 30 cm. Esses novos raios produziram fluorescência em fosfossulfureto de cálcio e velaram chapas fotográficas, mesmo cobertas por placas de papelão preto de espessura suficiente para barrar os raios catódicos (SELIGER, 1995). Ao ler um artigo de Lenard sobre a descoberta, em maio de 1894, Röntgen decidiu pesquisar os raios de longo alcance descritos. Repetiu todos os experimentos de Hertz e Lenard, e, para identificar a radiação, escolheu o platinocianeto de bário, muito usado na época para detectar radiações invisíveis do espectro solar (CROWTHER, 1945). Após o experimento básico, em 1895, em que viu a emissão no laboratório totalmente escurecido, Röntgen testou a

permeabilidade à radiação de anteparos com várias espessuras e de diferentes materiais, registrando os achados em chapas fotográficas (ARRUDA, 1996; SELIGER, 1995).

Figura 1.32: A descoberta dos raios X



Fontes: 1) Aparelho de Lenard (GRAETZ, 1912; p. 307). 2) Aparelho de raios X (GRAETZ, 1912, p. 322).

Logo após a divulgação das pesquisas de Röntgen, no início de 1896, Henri Becquerel (filho de Edmond Becquerel) iniciou uma série de pesquisas sobre os raios X, que o levaram a uma nova descoberta. Henry tentou identificar a fonte da nova radiação expondo chapas fotográficas a materiais expostos à luz solar; quando revelou as fotos, encontrou pontos pretos onde tinha posto amostras de urânio. Repetindo o experimento em diferentes condições, verificou que os raios não dependiam de luz visível, nem de fosforescência ou fluorescência, e que eram emitidos por todas as formas de urânio: esse estudo marcou a descoberta da radioatividade em 1896 (FLAKUS, 1981). Em 1897, Pierre Curie sugeriu à esposa, Marie Curie, que, seguindo a linha de pesquisa de Becquerel, fizesse sua tese de doutorado em Física sobre os “raios urânicos” descobertos por aquele pesquisador. Como Becquerel havia comprovado que os raios do urânio tornavam o ar condutor (ionizavam o ar), Pierre Curie teve a ideia de medir a intensidade da radiação através da intensidade de uma corrente elétrica passando por uma câmara de ionização, que construiu aperfeiçoando o eletrômetro de quadrante inventado por Kelvin em 1872 (BOUQUET, 2011). Finalmente, em 1899, Ernest Rutherford identificou as radiações que denominou alfa, beta e gama, ao pesquisar as propriedades das radiações emitidas pelo urânio (RUTHERFORD, 1899).

1.6 PANORAMA DAS TELECOMUNICAÇÕES

O objetivo desta seção é apresentar um panorama do desenvolvimento das tecnologias de telecomunicações, destacando o papel dos personagens e das instituições de pesquisa, e mostrando como as necessidades e os objetivos dos sistemas de telegrafia, telefonia e rádio, de forma direta e indireta, contribuíram para o desenvolvimento das válvulas. Para isso serão abordadas cenas de pesquisa e desenvolvimento, notadamente nos Estados Unidos, para verificar como se deu a interação das diferentes tecnologias de comunicações com o projeto de integração territorial e internacional. Em termos técnicos, o foco será voltado para as variáveis dos sistemas de telecomunicações que ao longo do tempo foram objeto de atenção dos pesquisadores e desenvolvedores: o aumento da velocidade de sinalização, o aumento do número de canais simultâneos de comunicação e, o que foi importante para as válvulas, a pesquisa de métodos que visassem o aumento da extensão dos enlaces terrestres de telefonia e via rádio. Neste caso, esse processo teve como consequência uma melhor compreensão do funcionamento das linhas de transmissão, a adoção das técnicas de carregamento na telefonia e na telegrafia submarina e, sobretudo, de amplificação de sinais de voz.

1.6.1 A telegrafia

Há um aspecto da história da ciência e da técnica que diz respeito à relação entre tecnologias empregadas em diferentes sistemas técnicos que surgem em uma determinada época e sua ligação com o território e com outras tecnologias. No caso estudado, pode-se citar a interação entre a telegrafia e as estrada de ferro, que foi chave para a integração econômica de regiões dispersas geograficamente e para a formação de mercados nacionais, como destacou Chandler (1977) sobre os Estados Unidos; o mesmo poderia ser considerado para países com diferentes tipos de subalternidade, como a Índia e o Brasil no século XIX.

A telegrafia é relevante, para a nossa discussão das válvulas, pelo papel que teve no começo do rádio, no final do século XIX. Naquele momento, quando a telefonia surgiu, as comunicações telegráficas começaram a ser incorporadas dentro das redes de telefonia e, apesar dos grandes avanços de outras modalidades de comunicações, atravessou o século XX, sendo superada completamente apenas com o surgimento da Internet.

Historicamente, a telegrafia constituiu-se em um sistema técnico de comunicações que passou por fases usando as tecnologias disponíveis em cada período: mecânica,

eletromecânica e, a partir do final do século XIX, implementada por rádio, com aplicações civis e militares. A fase mecânica se desenvolveu a partir de 1792, inaugurada com o telégrafo de Claude Chappe, desenvolvido em função das necessidades militares da Revolução Francesa. Chappe construiu telégrafos visuais instalados aproximadamente a cada 12 km, nos quais a mensagem ia sendo repetida até chegar ao destino. A rede foi sendo ampliada ao longo do tempo, cobrindo o território francês e alcançando países vizinhos, com o nó concentrador em Paris, do qual derivavam cinco ramos. Outras redes de telégrafos visuais foram construídas na Suécia, em Portugal e na Inglaterra, principalmente por ocasião das guerras napoleônicas, e em outros países. Do ponto de vista histórico, a importância da telegrafia visual reside nas práticas de administração que instituiu e nas técnicas de sinalização que foram incorporadas aos sistemas subsequentes de telegrafia eletromecânica e influenciaram a implementação dos futuros sistemas de comunicação de dados com técnicas eletrônicas (KOCHER, 2014).

O marco seguinte da telegrafia surgiu após a descoberta da relação entre a eletricidade e o magnetismo em 1820, pelo dinamarquês Hans Oersted, e da indução eletromagnética, de maneira independente, por Michael Faraday (na Inglaterra) e Joseph Henry (nos Estados Unidos), em 1831. A descoberta desses fenômenos propiciou as bases para o surgimento de uma indústria telegráfica com tecnologia eletromecânica. A princípio, foram criados alguns tipos de telégrafos experimentais por vários desenvolvedores, inclusive por pesquisadores eminentes como Karl Friedrich Gauss e Wilhelm Weber, em 1833, na Alemanha, e Joseph Henry, em 1835, nos Estados Unidos. Após a fase experimental, os primeiros telégrafos comerciais foram criados por Samuel Morse, Alfred Vail e Leonard Gale, nos Estados Unidos, e por William Cooke e Charles Wheatstone, na Inglaterra, em 1837; ambos os sistemas tiveram o aconselhamento de Henry (KOCHER, 2014).

O sistema de Cooke e Wheatstone consistia, na primeira versão, de um mostrador de cinco agulhas, na transmissão e na recepção, com pequenas alavancas que acionavam duas agulhas de cada vez, para apontar para a letra da mensagem no mostrador; o sistema era caro devido ao número de condutores. O sistema de Morse acabou sendo adotado amplamente devido à simplicidade de suas partes constituintes e também ao código que levou o seu nome. Era composto por manipuladores, relés e, em alguns casos, por galvanômetros na recepção; diferentemente da iluminação, os requisitos de energia elétrica dos telégrafos eram modestos, sendo operados por conjuntos de células eletroquímicas; as redes externas eram compostas por postes com condutores, a princípio de ferro e posteriormente de cobre. O aumento da extensão das redes telegráficas foi possibilitado graças à utilização de repetidores de sinal,

compostos por relés, que tinham a função de regenerar o sinal atenuado. Com isso, a partir da década de 1840, começaram a ser formadas redes em vários países do mundo, e as já existentes foram expandidas. A rede terrestre inglesa passou de cerca de 3.600 km, em 1850, para perto de 30.000 km em 1868. Um exemplo de utilização do telégrafo para fins coloniais foi a linha construída para a comunicação da Inglaterra com a Índia: uma linha predominantemente terrestre (com dois trechos submarinos), passando pela Prússia, Rússia e Pérsia, com uma extensão total de 10.000 km (KOCHER, 2014).

Diante das limitações de velocidade dos telégrafos manuais, ao longo da segunda metade do século XIX e começo do século XX, foram sendo desenvolvidos diferentes tipos de mecanismos automáticos, usados na transmissão e na recepção, capazes de proporcionar velocidades de sinalização de caracteres cada vez maiores, que conviveram com os telégrafos manuais. Pode-se enxergar esse período como o precursor das técnicas de comunicações de dados que estariam plenamente desenvolvidas no século XX, implementadas com tecnologias como, por exemplo, as redes de máquinas Telex e o rádio.

O outro marco no aprimoramento da telegrafia eletromecânica foi o desenvolvimento de esquemas de transmissão bidirecional, com a criação do sistema duplex, demonstrado em 1854 por Julius Wilhem Gintl, na Áustria, e patenteado por Joseph B. Stearns, nos Estados Unidos, em 1872. Cromwell Varley desenvolveu sistema semelhante na Inglaterra em 1862. No mesmo caminho de desenvolvimentos da época, Edison, em 1874, criou o sistema quadruplex, cuja patente acabou vendendo para a *Western Union*. Ainda com o objetivo de enviar maior número de mensagens, o engenheiro francês Émile Baudot criou, em 1874, um sistema composto por chaves rotativas (distribuidores), sincronizadas no transmissor e no receptor, e um teclado de cinco teclas usado na transmissão. Esse teclado era operado por um código binário de 5 bits, com dois conjuntos de 30 símbolos cada. Esse esquema permitia acomodar até 12 comunicações telegráficas simultâneas. A exemplo de Morse, o sucesso do sistema deveu-se também ao código usado que, apesar de ser associado com o nome de Baudot, inicialmente foi desenvolvido por Gauss e Weber; com isso, estava inaugurada a técnica de multiplexação por divisão de tempo que posteriormente foi empregada em telefonia e no rádio (BEAUCHAMP, 2001; KOCHER, 2014).

Além dos aspectos tecnológicos, essas técnicas de envio de mensagens simultâneas tiveram especial importância em termos comerciais porque proporcionavam a economia do número de condutores da rede externa. Logo após a disseminação inicial das redes terrestres, em 1851 foi lançado o primeiro cabo submarino bem sucedido ligando a Inglaterra à França, interligando-se às respectivas redes terrestres com o objetivo de colocar em comunicação as

bolsas de ações dos dois países. Aos poucos, foi-se formando uma rede mundial que, no começo do século XX, abrangia todo o planeta, com um número expressivo de cabos ligando a América do Norte à Europa, pelo Atlântico Norte, e disseminando-se também com importantes rotas pelos oceanos Pacífico e Índico, e também pelo mar Mediterrâneo. Em 1876, a rede telegráfica mundial tinha uma extensão de mais de 1.000.000 km de condutores, dos quais 50.000 km eram cabos submarinos interligando 20.000 localidades. Em 1895, a rede mundial apresentava uma extensão total de 2.066.496 km de linhas e, no ano anterior, tivera um trânsito de cerca de 350 milhões de telegramas (KOCHER, 2014).

Em termos de construção, os cabos telegráficos eram constituídos por um núcleo formado por um ou mais condutores de cobre, revestidos por um látex de origem natural, a guta-percha (parente da borracha), encontrada na Ásia; a alimentação elétrica era feita por um banco de baterias na ordem de 50 V, de modo a não danificar o envoltório do cabo. Em termos científicos, a rede submarina telegráfica, devido aos fenômenos de eletrização que surgiam nos cabos de grande extensão, teve importante papel para a confirmação da ideia de campo proposta por Faraday e a consolidação da teoria eletromagnética. Em termos tecnológicos, a princípio, a telegrafia submarina seguiu a terrestre usando equipamentos eletromecânicos e, posteriormente, foi sendo atualizada, à medida que surgiam novas tecnologias, com equipamentos eletrônicos e óticos; a última, composta por cabos de fibra ótica, constitui a infraestrutura da Internet (KOCHER, 2014).

Quadro 1.3: Evolução da rede de cabos submarinos

| Fases | Período |
|--|----------------|
| Rede inglesa (monopólio da <i>Atlantic Telegraph Company</i>) | 1850 – 1880 |
| Rede mundial (empresas de vários países) | 1880 – 1920 |
| Competição entre rádio e cabos | 1920 – 1960 |
| Cabos submarinos telefônicos | 1950 – 1980s |
| Cabos submarinos por fibras óticas | 1990s – ~ |

Fontes dos dados: Chesnoy (2002); Kocher (2014).

A Inglaterra foi pioneira na implantação da telegrafia submarina e boa parte da rede de cabos submarinos foi dominada por ela, durante um certo período, em função da posse da tecnologia (as fábricas de cabos e equipamentos), do controle das fontes de guta-percha (suas colônias) e da propriedade de boa parte das empresas de cabos em nível mundial. Isso contribuiu para a hegemonia da Inglaterra, durante a segunda metade do século XIX, no

campo da telegrafia internacional (KENNEDY, 1971). Enquanto isso, nos Estados Unidos, a prioridade era formar uma rede terrestre capaz de integrar todo o território nacional. A maior empresa do ramo da telegrafia do país foi a *Western Union*, criada em 1856 com a aquisição de várias empresas pela *New York and Mississippi Valley Printing Telegraph Company*, que em 1861 fez a primeira linha telegráfica intercontinental (BRITANNICA, 2019).

Até a primeira década do século XX, os cabos submarinos eram a única tecnologia de comunicação transoceânica, e esse quadro só mudou com o surgimento da radiotelegrafia e da radiotelefonia que, por sua vez, serviram de estímulo para o desenvolvimento das válvulas de potência.

1.6.2 A telefonia

Como os outros inventos que já vimos neste estudo, o telefone teve uma gênese e um desenvolvimento em que diferentes pesquisadores contribuíram. Desde a década de 1840, alguns modelos experimentais foram criados na Inglaterra e na Alemanha, destacando-se o telefone do físico alemão Philipp Reis, demonstrado pela primeira vez em 1851: o transmissor era uma membrana estendida num cone de madeira e ligada a um contato elétrico (uma placa de bronze e um fio de platina) que fazia parte do circuito do receptor, formado por uma bobina em volta de uma agulha; a vibração, gerada na membrana por um som, fazia o contato abrir e fechar, gerando um pulso elétrico que, pela magnetização e desmagnetização da agulha, reproduzia o som. Na década de 1860, Reis produziu alguns exemplares do aparelho aperfeiçoado; esse telefone também foi fabricado em oficinas de outros países, inclusive nos Estados Unidos, onde, em 1874, Joseph Henry o mostrou a Alexander G. Bell, incentivando-o a desenvolver o telefone (HUUDERMAN, 2003).

Desde o começo da década de 1870, Alexander G. Bell e Elisha Gray estavam trabalhando no desenvolvimento do telégrafo harmônico, que consistia no envio de múltiplas notas musicais simultaneamente, cada uma delas com uma mensagem, em um único condutor, constituindo assim o que seria os primórdios de um sistema de multiplexação por frequência (HOCHHEISER, 2014). Após a sugestão de Henry, Bell começou a trabalhar também no telefone e, em 1876, patenteou um aparelho formado por um diafragma cuja vibração era transmitida por um pulso elétrico entre dois dispositivos iguais, usados alternadamente como transmissor e receptor. Ainda em 1876, Bell patenteou seu “aperfeiçoamento em telegrafia”: uma montagem de vários aparelhos telegráficos operando simultaneamente numa mesma

linha, cada um sintonizado numa frequência. No mesmo dia, Elisha Gray deu entrada na patente de um aparelho semelhante ao de Reis, para transmissão de voz (HUUDERMAN, 2003). O telefone progrediu pouco até 1878, quando D. E. Hughes inventou o microfone eletromagnético que amplificava as fracas correntes de voz produzidas no telefone de Bell, tornando-o adequado para a comunicação de longa distância. A telefonia, assim, foi a segunda indústria de comunicações a fazer uso dos fenômenos do eletromagnetismo (MCNEIL, 1990).

Após a invenção de Hughes, o telefone foi adotado com entusiasmo pela comunidade empresarial dos Estados Unidos e, embora com um progresso mais lento que nesse país, tornou-se também uma ferramenta de negócios e comunicação doméstica na Europa. A exemplo da disseminação das redes telegráficas, a construção das redes telefônicas foi feita de forma gradual, de modo a oferecer cobertura nacional; em termos econômicos, a telefonia cumpria um papel semelhante ao da telegrafia, isto é, a capacidade de integração econômica, política e social de regiões geográficas diversas no mesmo espaço nacional, ou de diferentes países como na Europa (BIJL, 1920).

A primeira companhia telefônica inglesa foi formada em 1878, e logo depois foram estabelecidas redes telefônicas nas principais cidades do país e linhas entre as cidades. Em 1884, havia 11.000 “estações de telefone” (ou seja, escritórios e residências com telefones) na Grã-Bretanha, enquanto os Estados Unidos tinham na mesma época 148.000. Assim como no desenvolvimento do sistema de telégrafo, a telefonia britânica começou com empresas privadas e depois foi assumida pelo *General Post Office* (GPO), sendo dirigida como monopólio do governo. A rede telegráfica havia sido adquirida em 1868 e, em 1912, a maior parte da rede telefônica havia sido adquirida da mesma forma. Em 1958, o GPO era responsável por cerca de 7 milhões de telefones, totalizando cerca de um para cada sete habitantes da Grã-Bretanha, comparados com os 67 milhões de telefones nos EUA – cerca de um para cada dois habitantes e meio (MCNEIL, 1990).

Numa era em que o capitalismo começou assumir características monopolistas, no período entre 1887-1894, o economista Richard Ely, nos Estados Unidos, popularizou o conceito de que as empresas telegráficas, devido à abrangência, natureza e importância da prestação do serviço, deveriam ser um *monopólio natural*, com supervisão governamental, diferente do modelo europeu em que os serviços de comunicações – telegrafia, telefonia e correios – eram gerenciados por agências governamentais (HOCHFELDER, 2012). No caso da telegrafia nos Estados Unidos, era exercido um monopólio virtual pela *Western Union Telegraphic* que, inclusive, controlava a adoção ou não de novas tecnologias em função da perspectiva de lucratividade, como foi o caso da demora para a adoção do sistema quadruplex

criado por Edison, citado anteriormente (HOCHFELDER, 2012).

Hochheiser (2014) considera que a história da telefonia é, em grande parte, uma história estadunidense porque as grandes inovações na telefonia se deram naquele país. A AT&T foi a protagonista principal dessas mudanças, sendo importante pelo seu papel no desenvolvimento de componentes básicos para as telecomunicações em geral, e para a eletrônica em particular: no caso, o aprimoramento da válvula eletrônica inventada em 1906 por de Forest (o audion), e também a invenção do transistor em 1948. Os Bell Labs e a *Western Electric* destacaram-se em outro aspecto relevante para esse trabalho: aquele que diz respeito às tecnologias contemporâneas dos cabos coaxiais, como a telefonia terrestre e os sistemas da radiotelefonia transatlântica estabelecidos nas primeiras décadas do século XX. Além dessas, outras contribuições dos Bell Labs, que dizem respeito ao presente trabalho, foram a concepção do primeiro satélite de comunicações dos EUA (o Telstar) e as pesquisas relativas ao *laser* e sua aplicação em comunicações óticas (O'NEILL, 1985).

A *Bell Telephone Company* foi formada em 1877; em 1879, foi assinado um acordo com a *Western Union* para partilhar a indústria de comunicações elétricas: a *Western Union* concordou em sair do mercado de telefonia e a Bell se comprometeu a não entrar no mercado de telegrafia. Tendo como empresa-mãe a *Western Union*, a *Bell Telephone Company* foi reorganizada como *American Bell Telephone Company*. Em 1885, a *American Telephone and Telegraph Company* (AT&T) foi estabelecida como subsidiária da *American Bell* com a tarefa de implantar linhas comerciais de longa distância, sendo que, em 1886, estabeleceu um enlace entre Nova York e Filadélfia. Em 1900, a AT&T tornou-se a empresa-mãe dos interesses da *American Bell* através da troca de ações. Em 1909, sob a presidência de Theodore Vail (neto de Alfred Vail, um dos desenvolvedores do telégrafo de Morse), a Bell adquiriu a *Western Union*. Vail trabalhou o conceito de sistema de condutor universal (*universal wire system*), que combinava as redes telefônicas e telegráficas, e levou adiante um programa cujo objetivo era incorporar todo o sistema telefônico nacional no *Bell System*. Para isso, era necessário estender redes por todo o território estadunidense, o que implicava em enviar o sinal de voz a distâncias de cerca de 4.800 km; para alcançar tal feito, era necessário traçar programas de pesquisas que criassem tecnologias para implementar o projeto (HOCHFELDER, 2012).

O sistema Bell era composto por operadoras de telefonia terrestre que cobriam as várias regiões dos Estados Unidos e do Canadá; além disso, era encarregado das comunicações com o exterior, como os enlaces de radiotelefonia transoceânicos a partir de 1915. A *Western Electric*, incorporada ao *Bell System* em 1882, tinha a tarefa de produzir equipamento telefônico para esta. Até 1907, tinha um laboratório modesto de pesquisa

própria. Posteriormente ficou responsável pela fabricação de todos os equipamentos: desde aparelhos até centrais telefônicas e equipamentos associados, enquanto o *Long Lines Department* tinha as tarefas de construir, manter e operar as instalações de comunicações internacionais, proporcionar telefonia de longa distância e serviços de linhas privadas para a telegrafia Morse e interligação de assinantes, inclusive de outras operadoras (FAGEN, 1975).

Devemos ressaltar que o impacto da ciência na indústria era muito presente nessa fase, e moldou o rumo das pesquisas industriais. Nas duas primeiras décadas do século XX, foram sendo criados grupos de pesquisa científica dedicados à resolução de problemas técnicos específicos, em ambiente corporativo e em ramos diversos da atividade industrial. Nações industrializadas, com suas corporações, criaram os respectivos laboratórios industriais, como o da Siemens & Halske, na Alemanha, no campo específico da indústria elétrica (FOX; GUAGNINI, 1999, 2004). Nos Estados Unidos, os laboratórios de pesquisa e desenvolvimento (P&D) foram implantados nas empresas *General Electric*, Westinghouse, DuPont, *United States Steel Corporation*, *Bell System* e *Eastman Kodak*, entre outras. A Primeira Guerra Mundial aumentou a percepção da importância desses laboratórios, tanto como parte essencial das indústrias em geral, quanto como elemento de apoio às atividades militares, e esse sentimento foi expresso por John Carty, vice presidente da AT&T, em 1916 (HODDESON, 1981; NEBEKER, 2009; CARTY, 1916).

A diferença entre as pesquisas básica e aplicada fica indistinta quando analisamos os laboratórios industriais. No caso do *Bell System*, no começo do século XX, surgiu a percepção de que os problemas complexos encontrados na construção e operação dos sistemas telefônicos deveriam ser abordados cientificamente e por engenheiros trabalhando na própria empresa, de modo a serem encontradas soluções eficientes. Isso levou à contratação, em 1904, de um pequeno grupo de engenheiros com formação acadêmica, com pós-graduações feitas sob supervisão de respeitados cientistas e matemáticos na Europa, que iriam criar a primeira divisão de pesquisas do *Bell System*. Essa percepção aumentou quando a válvula de Forest foi aperfeiçoada e utilizada nas linhas terrestres no período 1912-1915. Nessa linha, foram criados em 1925 os Bell Labs (*Bell Telephone Laboratories*), que eram partilhados pela AT&T e a *Western Electric*, tinham a responsabilidade de realizar pesquisa e desenvolvimento (P&D) para o *Bell System* e também para a área militar, estrutura que durou até 1984 quando ocorreu a desinvestidura do monopólio (NOLL, 2005; HODDESON, 1981).

Em termos tecnológicos, os desafios da telefonia terrestre se assemelharam aos da telegrafia, isto é, consistiram em aumentar a distância dos enlaces, manter a qualidade das conversações assegurando a inteligibilidade, eliminar as interferências de origem elétrica e

promover a capacidade de acomodar uma boa quantidade de conversações simultâneas na mesma linha de transmissão (HODDESON, 1981). A exemplo da telegrafia, os problemas precisaram ser tratados, em boa parte dos casos, por engenheiros com sólidos conhecimentos científicos. Novos problemas tiveram que ser resolvidos para acomodar a voz, com uma faixa de frequências bem mais alta (então com uma faixa de 2.500 Hz) do que vinha até então sendo usada na telegrafia, de modo que as conversações apresentassem inteligibilidade e alcance adequado, para poder tornar o sistema economicamente rentável.

Entre os problemas que afetavam a qualidade das redes telefônicas estava a interferência de fontes como as redes elétricas, motores e outros dispositivos elétricos que começavam a surgir. A segunda causa de interferência era a diafonia entre pares adjacentes de condutores nos postes, que foi resolvida com o trançamento dos condutores. Além dos problemas anteriores, uma limitação da extensão das redes era a atenuação do sinal devida à resistência ôhmica dos condutores, já que, para se obter uma menor resistência, era necessário aumentar a área dos condutores, o que implicava em um custo maior de instalação. Esses problemas já eram objeto de pesquisa no *Bell System* desde a década de 1880. Por volta de 1900, a máxima distância para uma ligação telefônica estava limitada a 1920 km (1200 milhas), a extensão entre Boston e Chicago, nos Estados Unidos (HOCHHEISER, 2014; HODDESON, 1981).

O problema da propagação do sinal elétrico nos condutores foi objeto de preocupação durante décadas, sendo abordado por William Thomson (Kelvin) que, em 1854, propôs a lei KR para a telegrafia, estabelecendo que a velocidade máxima de transmissão era inversamente proporcional ao produto da capacitância total (K) pela resistência total da linha (R), cujo resultado era um valor adimensional. A teoria desenvolvida por Thomson para explicar a velocidade de propagação era aplicável somente aos sinais telegráficos de baixa frequência, usados em telegrafia, mas não aos sinais de voz (FAGEN, 1975). Em 1884, John Strat (Lorde Rayleigh) achou a relação entre frequência, capacitância e atenuação quando estudava o máximo alcance de um cabo submarino se o mesmo transportasse um sinal telefônico. Heaviside, de forma independente, desenvolveu uma teoria mais abrangente quando estudava o comportamento elétrico das linhas telegráficas terrestres, e concluiu que a adição da indução favorecia a transmissão do sinal. A teoria considerava a linha de transmissão uniforme e tratava simultaneamente a resistência (R), a capacitância (C), a condutância (G) e a indutância (L). Heaviside descobriu que, para evitar a distorção, era necessário fazer com que as relações entre indutância e resistência, e capacitância e condutância, fossem iguais ($L/R = C/G$). Heaviside não foi o único a estudar o problema: a

mesma solução foi formulada de forma independente, em 1887, pelo físico e engenheiro telegráfico francês Aimé Vaschy (KRAUGH, 1994).

A ideia de acrescentar indutância às linhas era uma proposição inovadora que encontrou resistências por parte de vários engenheiros da época, devido ao paradigma que considerava o comportamento dos condutores como se fossem canos de água, sem levar em conta o campo que se formava à volta dos mesmos. Entre 1885 e 1887, Oliver Heaviside, através de uma série de artigos escritos para o *The Electrician*, desenvolveu uma teoria matemática sobre como se dava a propagação das correntes elétricas nos condutores; quando Heaviside aplicou a teoria às linhas telefônicas, tendo em conta os efeitos da autoindução, sofreu a oposição cerrada de William Preece, chefe do *British Post Office*, uma liderança hostil à teoria de Maxwell, que considerava que a autoindução nos fios de cobre era desprezível (HUNT, 1983; HEAVISIDE, 1894).

John Stone Stone, engenheiro da *American Bell Telephone Company* na década de 1890, foi aparentemente o primeiro a aplicar a teoria de Heaviside à transmissão telefônica: propôs que fosse usado um condutor bimetálico composto por ferro e cobre, de modo a proporcionar um valor de autoindutância maior que o do cabo comum. A ideia de produzir fios com maior valor de indutância também ocorreu ao engenheiro e fabricante de fios francês Lazare Weiller, que patenteou um fio com um liga de cobre e estanho, e fez, em 1889, uma demonstração de suas vantagens diante da Academia Francesa das Ciências (BRITTAIN, 1970). Posteriormente, George Campbell, que estudou matemática avançada com Felix Klein na Alemanha, eletricidade e mecânica com Ludwig Boltzman na Áustria e com Henri Poincaré na França, foi encarregado pela AT&T de continuar estudando o cabo bimetálico de Stone após este ter saído da empresa em 1899; mas Campbell acabou optando pelo emprego de bobina de carga, devido ao custo de fabricação do fio de Stone e dos poucos recursos disponíveis. Fez o projeto, mandou fabricar 400 bobinas em uma companhia local e fez colocá-las distribuídas pelos bueiros. Os resultados foram relatados em gráficos que mostravam os valores e o espaçamento ótimo entre elas; os primeiros testes bem-sucedidos usando bobinas de carga foram realizados por Campbell e seu assistente na época, Edwin Colpitts (que posteriormente teve um papel destacado na pesquisa de válvulas), em setembro de 1899, em uma linha que partia do laboratório da Bell em Boston. Foi possível estabelecer uma conversação de qualidade em um enlace de mais de 73,6 km, com a mesma qualidade de uma linha não-carregada com a metade de extensão (BRITTAIN, 1970).

Concomitantemente ao trabalho de Campbell, o físico Michael Pupin (sérvio radicado nos Estados Unidos) também estava trabalhando na questão. Antes de realizar uma

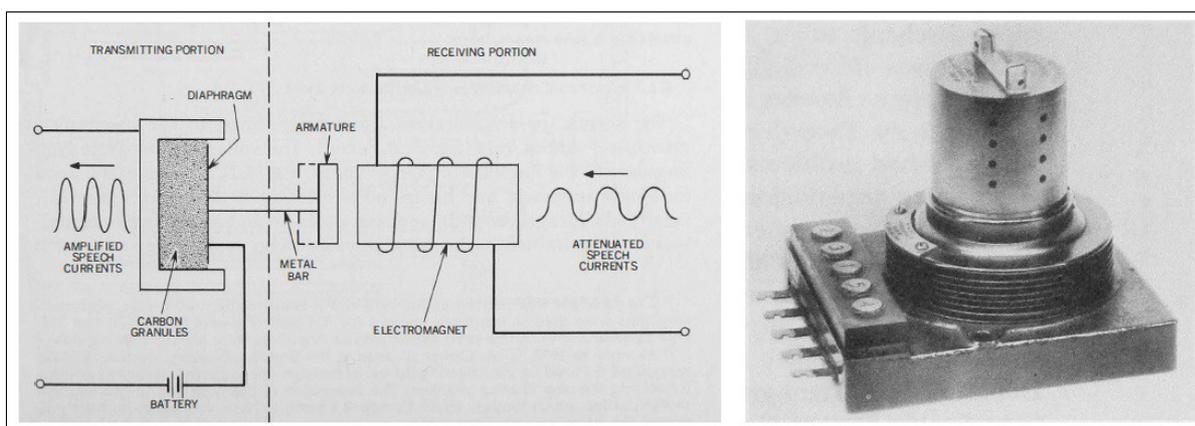
investigação sistemática, em 1894, Pupin propôs aumentar a faixa das conversações telefônicas *através da adição de capacitores* em série com a linha, a intervalos periódicos; entre 1895 e 1900, baseado na fórmula de Heaviside, Pupin, junto com seus estudantes, trabalhou no problema do carregamento, fazendo apenas testes no laboratório da Universidade de Columbia (Nova York) usando uma linha de transmissão artificial. Pupin submeteu a patente com a técnica do carregamento em 1899 e começou um litígio com a AT&T, até que a patente foi concedida em 1904; a AT&T evitou que dados passíveis de serem copiados e/ou apropriados pela concorrência estivessem presentes no pedido de patente de Campbell, e isso acabou fazendo com que Pupin recebesse a patente, após todo o trabalho teórico e prático de Campbell. A AT&T estava ciente da importância econômica da técnica, pois já havia feito um estudo que mostrou a economia de US\$ 700.000 na ligação planejada entre Nova York e Nova Jersey, se fosse usada a técnica de carregamento. Também temia que, diante do litígio de patentes, perdesse o controle sobre o direito de uso da mesma. Por isso, resolveu comprar os direitos de Pupin por US\$ 200.000. A partir de então, o método de carregamento ficou conhecido como *pupinização* (*pupinization*) e é empregado até hoje. Em um artigo técnico de 1926, publicado no *Transactions of the AIEE*, é dito que a AT&T estimou que economizou US\$ 100.000.000 no tempo de vigência da patente, pois a bobina de carregamento permitia a utilização de condutores com diâmetro menor, mais baratos (BRITTAIN, 1970; HOCHHEISER, 2014). Nas linhas terrestres, o motivo para a rápida adoção da técnica de carregamento dos cabos foi o fato de que ela era capaz de reduzir a distorção e diminuir a atenuação por um fator de três a quatro vezes na frequência de 1.000 Hz e a valores ainda maiores em frequências mais altas. Para obter as mesmas características sem carregamento, era necessário aumentar dez vezes a quantidade de cobre empregada no cabo, aumentando em muito o custo; antes da implantação dos amplificadores, o carregamento era a única técnica capaz de aumentar a extensão das linhas telefônicas (FAGEN, 1975). As linhas utilizando bobinas de carga foram introduzidas na Europa em 1903 pela *Western Electric*. Nos Estados Unidos, a linha Nova York - Denver, aberta em 1911, tinha 3.200 km, o limite para uma linha usando a técnica de carregamento (HUUDERMAN, 2003).

Um dos problemas mais prementes para a telefonia que nascia era transformar as variações da voz em variações elétricas de maneira eficiente. Um dos primeiros dispositivos criados para buscar a solução desse problema, e que dinamizou a telefonia, foi um microfone que variava a sua resistência à medida que a voz incidia na membrana de uma cápsula preenchida com grânulos de carvão. Seu princípio de funcionamento baseava-se na variação da resistência do carvão entre dois condutores à medida que o sinal sonoro incidente variava a

pressão do diafragma da cápsula. Esse dispositivo, que se tornaria o transmissor mais eficaz em telefonia por muitos anos, foi criado em 1877, de forma independente, nos Estados Unidos por Edison, e na Inglaterra por David Hughes, este já famoso pelo invento do telégrafo de impressão que usava um tipo de teclado de piano.

Por volta de 1900, várias patentes foram registradas para repetidores de telefonia, como os de Thomas Edison, Oliver Lodge, David Hughes e outros. Porém, um projeto bem-sucedido, que foi adotado, foi o de Herbert Shreeve, que trabalhava nos Bell Labs. Entre 1903 e 1904, Shreeve desenvolveu um amplificador eletromecânico, com princípio de funcionamento semelhante ao dos microfones com cápsula de carvão, que foi adotado pela AT&T e provou ser efetivo para linhas relativamente curtas. Um modelo mais aprimorado operou entre Nova York e Chicago entre 1904 e 1905 (FAGEN, 1975; TYNE, 1994).

Figura 1.33: Amplificador mecânico básico



Esquerda: Diagrama esquemático. **Direita:** Amplificador tipo cartucho.
 Fonte: Fagen (1975, p. 255, 257).

A vantagem do amplificador era que o ganho do sinal de voz poderia chegar a 100 vezes, valor característico dos microfones de carvão, porém com uma banda passante e uma linearidade pobres afetando a fidelidade, limitando assim o número de dispositivos em um enlace, que chegavam no máximo a três amplificadores em série; além da distorção do sinal, os amplificadores apresentavam falta de sensibilidade para as diminutas correntes da linha telefônica que incidiam sobre o diafragma. Para aumentar o desempenho, algumas medidas foram tomadas, como o emprego de material bem leve nas partes móveis, o que aumentou a frequência de ressonância do sistema; uma outra medida adotada foi usar uma tira de zinco entre a saída e a entrada para a compensação do sinal, o que constituía uma forma primitiva de realimentação. Um modelo desenvolvido em 1912, mais sofisticado, foi usado até a adoção

dos amplificadores valvulados poucos anos depois (FAGEN, 1975).

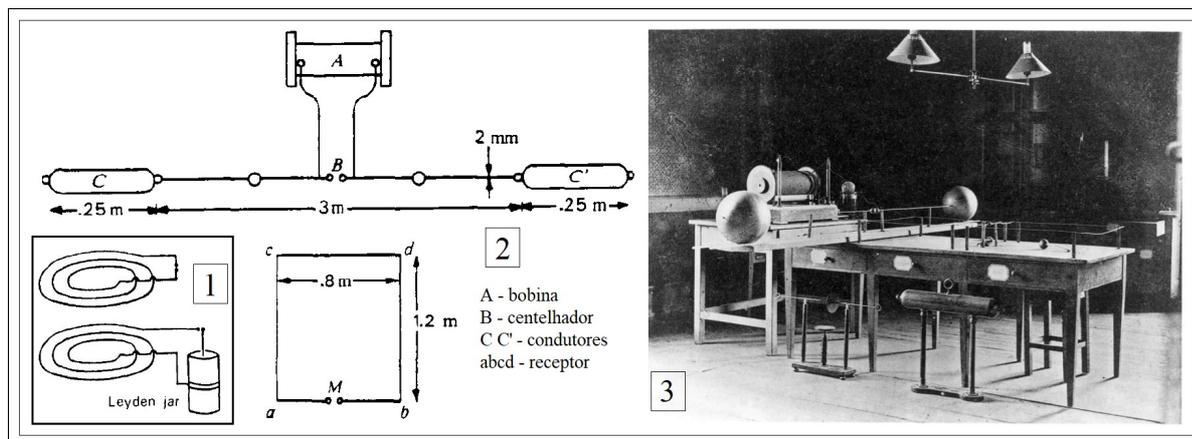
Além dos Estados Unidos, foram desenvolvidos na Inglaterra amplificadores eletromecânicos semelhantes, quanto ao princípio de funcionamento, ao de Shreeve. O engenheiro e inventor Sidney George Brown inventou o *telephone relay* em 1908, e o primeiro enlace que usou tal dispositivo foi estendido entre as cidades de Londres e Glasgow em 1914. Proporcionava um ganho de 20 vezes do sinal entrada e podiam ser colocados três desses dispositivos em série de forma unidirecional, apresentando também problemas de distorção (TYNE, 1994). Veremos posteriormente como as limitações dos amplificadores eletromecânicos contribuíram para a criação e o aprimoramento das válvulas eletrônicas para amplificação do sinal.

1.6.3 A radiotelegrafia e a radiotelefonia

Além da telefonia, as técnicas de rádio foram influenciadas profundamente pela criação das válvulas, sendo a evolução destas marcada, por sua vez, pelas necessidades da indústria de rádio. O objetivo da seção é traçar um panorama das tecnologias usadas na transmissão e recepção dos sinais de rádio; para isso, será abordada a experiência de Hertz, mostrando como ela influenciou a primeira geração de transmissores de radiofrequência, e como outras tecnologias de transmissão foram desenvolvidas para resolver os problemas de transmissão de voz, antes da chegada das válvulas.

O caminho para os sistemas de comunicação por rádio foi iniciado por Heinrich Hertz, na Alemanha que, por sugestão de Helmholtz, escolheu como tema de estudo a teoria eletromagnética de Maxwell (CICHON, 1995; WIESBECK, 1995). Seguindo uma linha de investigação bem definida, Hertz idealizou uma série de experimentos, que realizou entre 1886 e 1887. Para construir o equipamento em que tentaria comprovar a existência e propagação das ondas previstas por Maxwell, Hertz baseou-se no princípio de funcionamento de um aparelho comumente encontrado nos laboratórios de Física na época, denominado espirais de Knochenhauer (ou de Riess), que era um tipo de bobina de indução composta por dois enrolamentos planos posicionados paralela e coaxialmente: quando o enrolamento primário era ligado a uma garrafa de Leiden, centelhas surgiam e saltavam para o enrolamento secundário (KRAUS, 1988).

Figura 1.34: Aparelhagem do experimento de Hertz (1886)



Legenda: 1- Espirais de Knochenhauer; 2- Desenho esquemático da aparelhagem (KRAUS, 1988, p. 825, Fig. 2 e 3). 3- Fotografia da aparelhagem original, supostamente tirada por Hertz (ASHWORTH, 2017).

O equipamento construído por Hertz era composto por uma bateria com um vibrador que acionava o enrolamento primário de uma bobina de Ruhmkorff; no enrolamento secundário, a bobina estava ligada a dois condutores separados por um intervalo de 0,75 cm, onde as centelhas eram geradas. O conjunto formava uma antena dipolo de meia onda em que, nas extremidades, foram colocadas, a princípio, esferas de metal, e, posteriormente, placas de metal. Como detector, Hertz usou um condutor com conformação circular ou retangular, podendo neste último variar a largura do lado do retângulo e, conseqüentemente, o comprimento de onda captado; nas extremidades do condutor, havia uma pequena fenda, que variava de 0,3 a 3 mm; nesse intervalo surgiam diminutas centelhas. Estimativas posteriores sugerem que os experimentos de Hertz operaram numa faixa de frequência variando entre 50 e 500 MHz (KRAUS, 1988; CICHON; WIESBECK, 1995; HERTZ; 1893).

A descrição dos detalhes do experimento de Hertz é importante por ele ter antecipado uma série de aspectos que mais tarde seriam objeto da atenção dos projetistas dos sistemas de comunicação de rádio: a faixa de frequência de operação, que define as dimensões das antenas, a potência de saída e as outras partes constituintes dos transmissores e receptores (BUCHWALD, 2001).

Paralelamente às experiências de Hertz, Oliver Lodge, na Inglaterra, pesquisava o funcionamento dos para-raios. Nas suas experiências, para simular as descargas, usou garrafas de Leiden aplicadas a condutores; e com os resultados dos experimentos, escreveu em 1888 o artigo *On the theory of lightning conductors* em que confirmou a existência de ondas eletromagnéticas em meios guiados, complementando os experimentos de Hertz, que usou o ar. Foi durante esse período que Lodge lançou uma ideia que causaria impacto nos futuros

sistemas de rádio: percebeu a importância da sintonia, propriedade em que os circuitos respondem a determinada frequência de ressonância (AITKEN, 1977; BURNS, 2004).

As publicações de Hertz e Lodge acabaram influenciando o curso das pesquisas da primeira geração de investigadores em várias partes do mundo. Em 1894, Oliver Lodge proferiu uma palestra na Universidade de Oxford, sobre os trabalhos de Hertz, demonstrando as propriedades de propagação das ondas hertzianas. Na Itália, em 1894, Augusto Righi, na Universidade de Bolonha, fez modificações no aparelho de Hertz e introduziu três centelhadores esféricos, permitindo obter radiações na faixa de 1,5 a 4 GHz. Em 1895, Jagadish Chandra Bose, em Calcutá, na Índia, construiu um aparelho capaz de produzir ondas milimétricas na frequência de 60 GHz, utilizando um gerador de centelhas e ressonadores feitos de esferas metálicas (SARKAR, 2006). Para a nossa discussão, cabe salientar que a operação em faixas de frequências tão altas como as obtidas por Righi e Bose, seriam retomadas somente décadas depois, após a criação de válvulas especiais projetadas para serem operadas na faixa de micro-ondas e utilizadas no radar.

Na Rússia, em 1896, Alexander Popov também fez experimentos com ondas de rádio: inicialmente aplicou seus dispositivos à pesquisa e detecção de tempestades e, em 1900, construiu um enlace de emergência de 48 km para a operação de salvamento de um cruzador imobilizado pelo inverno no Golfo da Finlândia (VENDIK, 2010). Dos que perceberam as aplicações práticas que as experiências de Hertz poderiam ter para a radiotelegrafia, destacaram-se Crookes, na Inglaterra, Henry Jackson, nos Estados Unidos, e Marconi, na Itália, e somente este acabou desenvolvendo um sistema de rádio que se tornou comercial (BEAUCHAMP, 2001; BURNS, 2004; HONG, 2001).

Esses esforços de desenvolvimento se inseriam num contexto em que o objetivo era alcançar comunicações cada vez mais distantes, para serem utilizadas de forma estratégica para fins comerciais, políticos e militares: o rádio, como uma nova tecnologia de comunicação, poderia competir com e/ou complementar as comunicações de longo alcance, que há décadas eram feitas por cabos submarinos, de cuja rede mundial as empresas inglesas eram proprietárias de boa parte. O estímulo para o desenvolvimento, tanto da radiotelegrafia como da radiotelefonía, era captar o rentável tráfego das comunicações do Atlântico Norte: foi com esse objetivo que Marconi e seus rivais, Tesla e Fessenden, desenvolveram técnicas, dispositivos e sistemas de comunicação (BELROSE, 1995).

Marconi começou a fazer experimentos em 1895, com uma bobina de indução, um centelhador e um coesor de Bramly, e conseguiu enviar mensagens telegráficas a uma curta distância. Em 1896, fez uma demonstração bem-sucedida para a equipe do *British Post Office*,

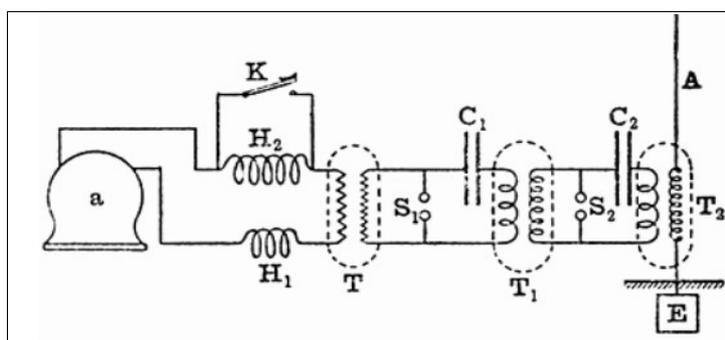
transmitindo a uma distância de 100 metros. Em 1897, transmitiu a uma distância de 14 km através do canal de Bristol, no oeste da Inglaterra. Ainda em 1897, com a patente concedida, criou a primeira empresa de telegrafia sem fio (*Wireless Telegraph and Signal Company*) para instalar transmissores e receptores de centelha, e estabeleceu a primeira estação permanente na Inglaterra, a uma distância de 22 km, inaugurando a telegrafia sem fio comercial. Em 1899, Marconi fez a primeira transmissão através do canal da Mancha, cobrindo uma distância de 48 km. Em 1900, mudou o nome da empresa para *Marconi's Wireless Telegraph Company*; esta se tornou uma protagonista internacional na área de rádio, atendendo aos interesses britânicos (AITKEN, 1976; HONG, 2001).

O outro investigador mencionado, Nikola Tesla, além de atuar na área de engenharia elétrica (como já vimos), construiu vários alternadores de alta frequência com um projeto inovador, incluindo a utilização de uma armadura em forma de disco, antecipando os projetos posteriores da *General Electric*. Em 1890, havia construído um alternador com 384 polos, capaz de gerar frequências na ordem de 10-20 kHz, e esta parece ter sido a frequência mais alta alcançada por qualquer alternador antes de 1900. Mas, apesar do pioneirismo, esses alternadores não foram usados em transmissão de rádio. Seguindo a tendência da época de transmissão de ondas de rádio, e aproveitando sua experiência em engenharia elétrica, em 1897 Tesla fez experimentos com um sistema de rádio usando uma antena elevada e aterrada na extremidade inferior, e com circuitos ressonantes conseguiu enviar sinais para manobrar um pequeno bote no rio Hudson (em Nova York) através de um receptor (TESLA, 1898). Com isso, todos os elementos para montar um sistema de comunicações estavam presentes. Apoiado pelo banqueiro John Pierpont Morgan, do qual recebeu US\$ 125.000, propagandou um projeto, baseado em um sistema que havia patenteado, para enviar sinais de rádio dos Estados Unidos para Portugal. Com parte do dinheiro, comprou um terreno em Long Island e construiu uma torre de metal de 60 m de altura com um domo no topo de quase 21 m, com um transmissor de centelhas que seria mais poderoso do que o que Marconi estava construindo em Cornualha, na Inglaterra. Com a realização da transmissão de Marconi, o projeto foi abandonado (TESLA, 1900; RABOY, 2016; VALONE, 2002).

Em 1900, sabendo dos planos de Tesla e pressionado por Fleming e por investidores que estavam comprando ações oferecidas pela sua companhia, Marconi decidiu antecipar-se e tentar a transmissão transatlântica. Na implementação, o circuito de geração de sinal foi criado por Marconi baseado em patentes anteriores, e Fleming, consultor científico da empresa, projetou a etapa de potência do transmissor, combinando a engenharia de comunicações sem fio com a engenharia elétrica. A transmissão ocorreu em 12 de dezembro

de 1901, à distância de 3.500 km, enviando um sinal da Cornualha à Terra Nova (Canadá), a letra “s”, com uma frequência gerada por um transmissor de centelhas, estimada por Marconi na década de 1930 de 166 kHz (1800 m) com uma potência de 15 kW; recentemente, estudos baseados nas características do transmissor e antena estimam que a frequência de transmissão foi 500 kHz. Houve dúvidas sobre se a comunicação teria realmente ocorrido, devido às condições atmosféricas e à inadequação do equipamento (BELROSE, 1995).

Figura 1.35: Transmissor de Fleming para comunicação transatlântica



Legenda: **a**- alternador; **H1**, **H2**- bobinas de reação (choques); **K**- chave sinalizadora; **T**- transformador elevador de tensão; **S1**, **S2**- espaçadores de centelhas; **T1**, **T2**- transformadores de acoplamento; **A**- antena; **E**- terra (FLEMING, 1903).

Mesmo sendo um hábil experimentador, Marconi estava ciente das suas limitações técnicas, e cercou-se de notáveis engenheiros como Richard Norman Vyvyan, Henry Joseph Round e John Ambrose Fleming, sendo que os dois últimos exerceram importante papel na história das válvulas. Fleming, por não ter recebido o reconhecimento do seu trabalho pela construção da etapa de potência, afastou-se da empresa, mas retornou posteriormente (BELROSE, 1995; HONG, 2001; RABOY, 2016).

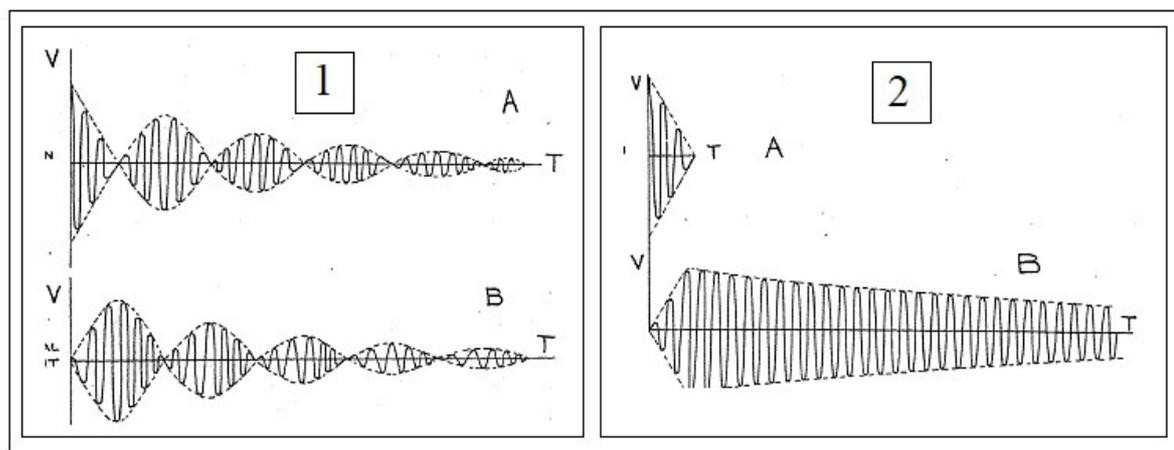
O contexto em que o rádio surgiu foi o momento da vigência dos cabos submarinos para comunicações de longa distância, o que criou contradições entre os interesses de lucro de uma indústria que nascia e outra já bem estabelecida por décadas. Considerando essa situação em perspectiva, podemos sugerir que essa situação estimulou o desenvolvimento da tecnologia do rádio em diferentes países, pois, no caso, a indústria de cabos era de alta tecnologia e de uso intensivo de capital, cujo acesso era privilégio de empresas e governos com grande disponibilidade de recursos. Certa vez, em 1901, Marconi, referindo-se às vantagens do seu sistema, destacou que o preço da palavra enviada em uma mensagem via rádio podia ser 25 vezes menor do que aquele cobrado pelas empresas de cabo. Na época, o custo de uma estação do sistema de Marconi completa era US\$ 60.000, enquanto um sistema

de cabos submarinos transatlântico, com estações e equipamentos, podia custar cerca de US\$ 4.000.000. Marconi, em 1904, inaugurou o serviço de radiotelegrafia comercial para a comunicação entre navios e, em outubro de 1907, inaugurou o serviço regular de radiotelegrafia entre as estações de Glace Bay, no Canadá, e Clifden, na Irlanda (RABOY, 2016).

Além da Inglaterra e dos Estados Unidos, pesquisadores de outros países, como a Alemanha, o Japão, a Itália e a França, também estavam desenvolvendo sistemas de rádio visando o atendimento dos interesses econômicos e políticos das respectivas nações, entre os quais estava o registro das patentes de dispositivos e sistemas de comunicação para serem vendidos nos mercados interno e externo, como as estações costeiras. Em relação à Alemanha, em 1897, a convite de Preece, e contra a vontade de Marconi, Adolph Slaby, professor em Berlim, e seu assistente Georg von Arco, assistiram aos testes de Marconi de transmissão através do Canal da Mancha. Depois de retornar a Berlim, Slaby e Arco montaram um sistema de centelha e, em outubro de 1897, realizaram uma transmissão à distância de 21 quilômetros. Ferdinand Braun, na Universidade de Estrasburgo, fez experimentos usando um transmissor de centelhas acoplado com uma bobina de indução de Tesla e um projeto próprio de coesor. Em 1898, inventou a técnica de acoplamento usando circuitos ressonantes através dos enrolamentos de transformadores, o que aumentava a distância das comunicações – fator que contribuiu para o sucesso da comunicação transatlântica de Marconi em 1901 (RUSSER, 2009; FLEMING, 1903). Como alternativa ao sistema de Marconi, no final do século XIX, a Alemanha produzia os sistemas Braun-Siemens e Slaby-AEG para a Europa continental e os Estados Unidos. Em 1903, foi criado o consórcio Telefunken para exploração das patentes de rádio, e, em 1906, foi criada a estação transmissora de ondas longas de Nauen que desempenhou importante papel nas duas guerras mundiais (BEAUCHAMP, 2001; DUMMER, 1983; SARKAR, 2006).

Na França, Eugène Ducretet fez transmissões experimentais em 1898, a partir da Torre Eiffel, recebidas próximo ao Panthéon (a pouco mais de 4 km de distância). Em 1899, Alexander Popov visitou a Alemanha e a França, e, juntamente com Ducretet, desenvolveu um sistema de radiotelegrafia cuja transmissão alcançava 50 km (HUUDERMAN, 2003). Podemos mencionar ainda, fora do circuito Estados Unidos e Europa, o brasileiro Landell de Moura, autodidata, que também inventou um sistema de radiocomunicação (sem válvulas), chegando a patentear-lo nos Estados Unidos em 1901, com o nome de *Wireless Telephone*. A patente foi concedida em 1904 sob o número 776.337, mas, por falta de recursos e apoios institucionais, o sistema acabou não sendo comercializado (FORNARI, 1984).

Figura 1.36: Sinais obtidos por geradores de centelha



Sinais: excitação (A) e na antena (B), gerando: (1) Ondas amortecidas; (2) ondas quase contínuas com dispositivo de arrefecimento de arco.

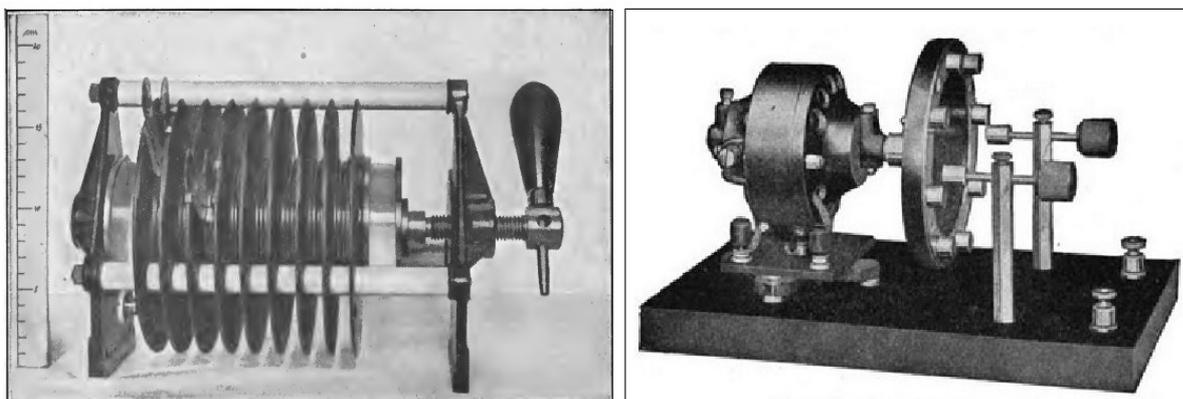
Fonte: Legett (1921, p. 55, 57).

Na fase inicial, a radiotransmissão enfrentava dois problemas. Um era o tempo de duração das centelhas, que implicava na irradiação do sinal em uma ampla faixa de frequências por falta de circuitos de sintonia. Além disso, o outro inconveniente era a geração de ondas amortecidas, o que fazia com que o sistema só pudesse ser utilizado para os serviços de telegrafia. Esta era uma desvantagem dos transmissores por centelhas, herdados dos experimentos de Hertz, e o problema foi se tornando cada vez mais sério à medida que o número de estações foi aumentando: em 1909, havia nos Estados Unidos 475 estações de rádio usando transmissores de centelha (AITKEN, 1976; MANN, 1946).

Por volta de 1900, Reginald Fessenden, pesquisador de origem canadense trabalhando nos Estados Unidos, percebeu que, para o envio de áudio, a tecnologia do rádio teria que trilhar um caminho diferente do da telegrafia: na transmissão, seria necessário criar dispositivos capazes de gerar um sinal senoidal de amplitude constante, as ondas contínuas (CW – *continuous waves*), para servir de suporte (ondas portadoras) para que o sinal de áudio pudesse ser enviado; e, na recepção, era necessário desenvolver detectores adequados, diferentes dos coesores, capazes de operar continuamente e de reproduzir os sinais de áudio, o que, na época, já estava sendo feito (HOWETH, 1963). Assim, na primeira década do século XX, dois problemas eram colocados para os pesquisadores de sistemas de rádio: como gerar ondas contínuas, com frequência e amplitude constantes, e como fazer isso de forma eficiente, com alta potência na saída dos transmissores. Por conta disso, em torno de 1900, começaram a ser delineadas três diferentes tecnologias, desenvolvidas nos anos seguintes, que procuravam atender à necessidade crescente de radiotelegrafia: a) transmissores de centelhas

arrefecidas, b) alternadores eletromecânicos e c) transmissores de arco voltaico. Os três tipos de transmissores foram superados com a introdução das válvulas (AITKEN, 1976; BEACHAMP, 2001).

Figura 1.37: Dispositivos de arrefecimento de centelhas



Esquerda: Dispositivo de arrefecimento de centelha da Telefunken (ZENNECK, 1915, fig. 232, p. 188).

Direita: Gerador de centelhas com disco rotativo (JANSKY, 1919, p. 167).

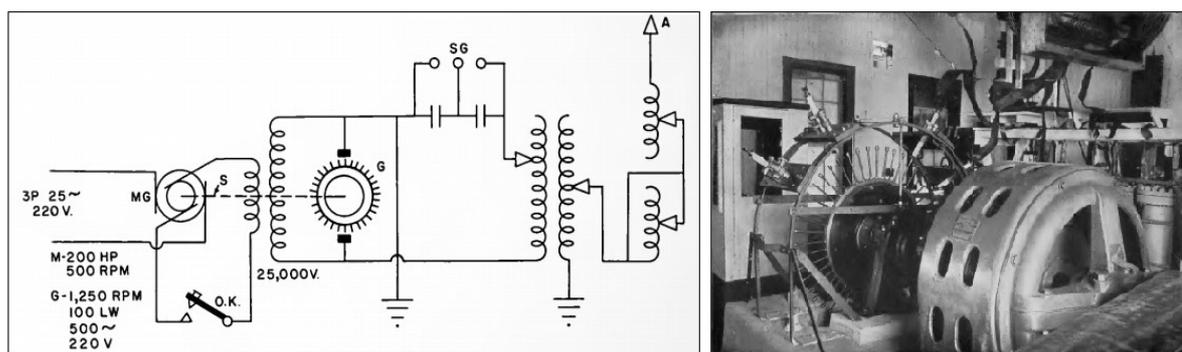
Um outro desenvolvimento, ainda com a tecnologia de geração de centelhas, foi feito em 1906 por Max Wien que, quando trabalhava na Telefunken, estudou os problemas dessa tecnologia. Wien propôs a construção de um centelhador composto por um conjunto de discos metálicos, com espaçamento muito pequeno (0,1 a 0,3 mm), em que somente uma frequência era irradiada e o arrefecimento ocorria naturalmente. Outros tipos de geradores de centelhas arrefecidas foram criados por Egbert von Lepel, Galletti e Marconi, que criou um dispositivo de disco rotativo de centelhamento. A técnica de arrefecimento fez com que se prolongasse o período de utilização dos transmissores de centelhas; o período entre 1900 e 1915 foi a fase áurea da tecnologia dos geradores de centelha, dominada por Marconi, que divergia de qualquer tecnologia alternativa (AITKEN, 1976; BEAUCHAMP, 2001; BELROSE, 1995).

Reginald Fessenden criou uma solução eletromecânica para o aperfeiçoamento dos geradores de centelhas num intervalo de seu projeto de desenvolvimento de um alternador. As pesquisas desenvolvidas por Fessenden foram realizadas na empresa que ele criou em 1902, em parceria com dois sócios milionários de Pittsburg, a *National Electric Signaling Company* (NESCO), que fechou em 1912. Dentro da linha de pesquisa perseguida, cujo objetivo era implementar um sistema de rádio, Fessenden fez pesquisas com propagação a partir de 1899. Entre 1903 e 1906, enquanto aguardava um alternador encomendado à GE, Fessenden abordou a produção de ondas contínuas a partir de uma ideia de Tesla, que consistia em

aumentar consideravelmente a frequência de geração de centelhas. Fessenden conseguiu resolver isso por meio de uma máquina rotativa síncrona, com geração de centelhas arrefecidas (*quenched*), com baixo coeficiente de amortecimento, cujo desempenho estava próximo de um transmissor de ondas contínuas. Um motor a vapor acionava um gerador CA, que foi diretamente acoplado a um centelhador rotativo, sincronizado para disparar no valor de pico dos semiciclos positivos e negativos de 125 Hz, produzindo 750 centelhas por segundo, gerando um tom audível de 750 Hz. Com o aparelho terminado em 1905, foram instaladas estações idênticas em Brant Rock (Massachusetts, EUA) e Machrihanish (Escócia). Fessenden começou a fazer testes em 1906, descobrindo a variação da intensidade do sinal entre o dia e a noite, durante o ano, e foi o primeiro a realizar uma comunicação bidirecional transatlântica. Entretanto, após uma tempestade, a antena de Machrihanish foi destruída e não foi reconstruída, e, na Primeira Guerra Mundial, a estação de Brant Rock foi dinamitada para a antena de 128 m de altura não ser vista pelos barcos alemães (BELROSE, 1994, 1995; HOWETH, 1963; SARKAR, 2006)

Fessenden vendeu um transmissor de 100 kW, para experimentos de comunicações transatlânticas, para a Marinha dos Estados Unidos, que estava procurando estabelecer comunicação direta entre Washington e a Zona do Canal do Panamá. Esse tipo de gerador foi pouco utilizado porque era afetado pelos ruídos atmosféricos e sofria interferência de outros transmissores. (BELROSE, 1994, 1995; HOWETH, 1963; SARKAR, 2006).

Figura 1.38: Gerador síncrono de centelhas de Fessenden



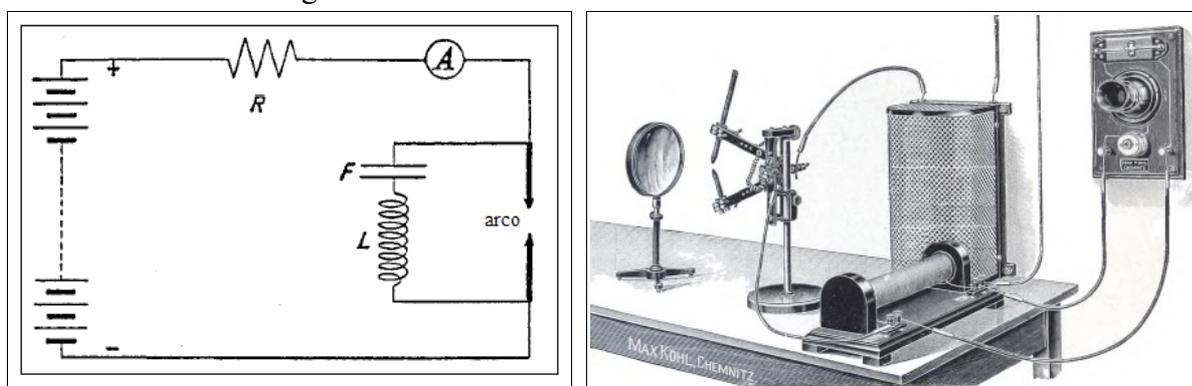
Esquerda: esquema elétrico (HOWETH, 1963, p. 140). **Direita:** aspecto (ZENNECK, 1915, p. 205).

A outra tecnologia de transmissão, a do arco, teve o seu começo na Inglaterra, onde George FitzGerald foi o primeiro a propor uma forma de obter verdadeiras ondas contínuas através da eliminação do efeito de resistência do circuito oscilador. Seu primeiro experimento, usando um dínamo associado a um condensador, não obteve sucesso. Propôs então o uso da

propriedade de resistência negativa do arco de carbono, estudada por Herta Ayrton para a iluminação das lâmpadas de arco, mencionada em seção anterior (HONG, 2001).

Quem resolveu o problema foi um ex-aluno de William Ayrton, William Duddell, que havia inventado um oscilógrafo para fotografar formas de onda CA. Usando esse dispositivo, Duddell criou, em 1900, um aparelho para transformar o arco num oscilador de alta frequência, combinando a resistência negativa do arco com um circuito oscilador L-R-C, cuja resistência era cancelada. O aparelho só funcionava na faixa de áudio (15.000 Hz), daí ser apelidado de “arco cantor” (*singing arc*) (HONG, 2001).

Figura 1.39: O “arco cantor” e “falante” de Duddell

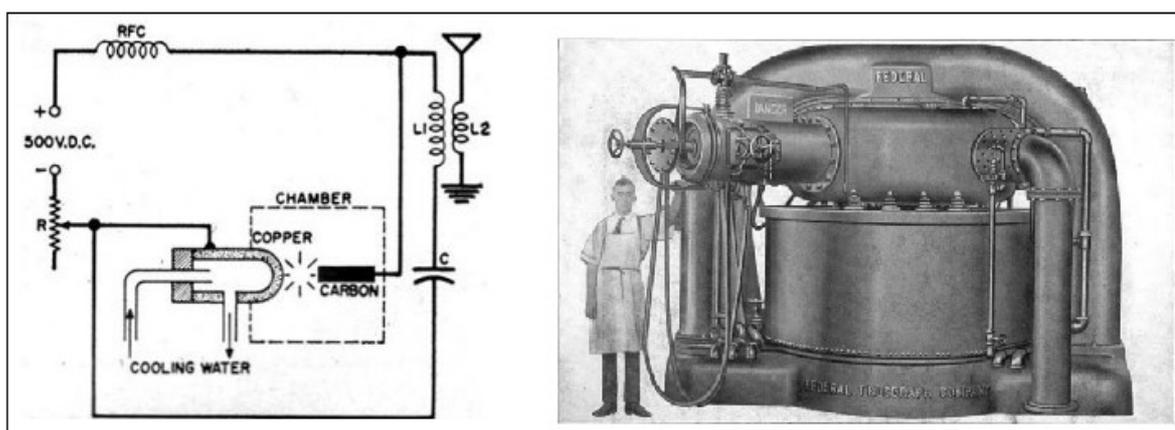


Esquerda: circuito oscilador (HONG, 2001, p. 164). **Direita:** aparelho para experiências com o “arco falante”: regulador, resistência em série, bobina e microfone (KOHL, 190-, p. 481-482). O arco “fala” quando a corrente oriunda da fala ao microfone modula a CC do arco, cujas variações produzem os sons. O arco “canta” ao ser ligado a um capacitor variável: a alteração da capacitância do circuito faz variar a frequência, gerando sons como notas musicais. Ambos podem ser vistos no vídeo produzido pela *Fondazione Scienza e Tecnica* de Florença (SPEAKING, 2016).

Aperfeiçoando o “arco cantor”, os engenheiros dinamarqueses Valdemar Poulsen e Peder Oluf Pedersen criaram, em 1902, um gerador de arco que produzia ondas contínuas na faixa de mega-hertz. Adotaram os elementos-chave que, segundo suas pesquisas, aumentavam a frequência e tornavam o arco mais estável: os eletrodos foram instalados numa câmara com hidrogênio e submetidos à ação de um campo magnético; o anodo era de cobre e resfriado a água, e o catodo, de carbono, foi rotacionado. Logo formou-se em Copenhague um consórcio para explorar a patente do dispositivo e, em 1907, o gerador de Poulsen começou a ser usado para produzir ondas contínuas em radiotelegrafia e radiotelefoneia: construído com potências variando de 5 até 1000 kW, foi utilizado até meados da década de 1920. A Marinha de Guerra dos Estados Unidos adquiriu unidades de 1000 kW para o estabelecimento de comunicações com navios de guerra e, durante a Primeira Guerra, instalou também duas unidades, com a mesma potência, em uma estação na França para comunicação transatlântica. Esse aparelho, mostrado na Figura 1.40 (à direita), era o maior transmissor construído até então: tinha no

centro uma câmara de hidrogênio com os dois eletrodos dispostos na horizontal; em torno da câmara ficava uma peça em forma de U invertido: o magneto; a peça projetada para fora, acima do operador, era o anodo (BEAUCHAMP, 2001; HONG, 2001; MANN, 1946).

Figura 1.40: Gerador de arco de Poulsen



Esquerda: diagrama (NEGATIVE, 2016). **Direita:** gerador de 1 MW construído pela Federal (STONE, 1919, p. xxv).

Em 1908, o engenheiro Cyril Elwell foi contratado pelos irmãos Henshaw (banqueiros em Oakland, EUA) para finalizar o sistema de comunicação sem fio criado em 1902 por Francis McCarty, mas concluiu que ele não era operacional. Sendo rejeitada sua proposta de desenvolver um novo sistema para os Henshaw, Elwell decidiu trabalhar por conta própria. Ele conhecia os dispositivos de arco de Poulsen, Fessenden e Forest, e decidiu adquirir o direito de produzir o arco de Poulsen nos Estados Unidos. Após reunir recursos, foi a Copenhague, onde comprou as patentes do sistema. Em 1909, de volta aos Estados Unidos, e com a promessa de apoio do *staff* da Universidade Stanford, fundou, em Palo Alto (Califórnia), a *Poulsen Wireless Telephone and Telegraph Company* e começou a produzir seu gerador de arco, que era muito simples de fazer. Mas a empresa não conseguiu se firmar no mercado; fechou em 1911 e todos os seus ativos foram passados para a *Poulsen Wireless Corporation*, de Beach Thompson, depois chamada *Federal Telegraph Corporation* e mais conhecida como Federal (AITKEN, 1985; MANN, 1946).

Em 1912, a Federal tinha dois grupos de engenheiros trabalhando em linhas independentes no seu laboratório em Palo Alto. Um, ao qual pertencia Lee de Forest, desenvolvia a válvula termoiônica; o outro, liderado por Leonard Fuller, aperfeiçoava os transmissores de arco. A tarefa de Fuller era entender como funcionava o circuito oscilador de arco. O resultado do trabalho, concluído em 1919, forneceu a base teórica necessária para

projetar transmissores de arco de qualquer tamanho; a partir desse conhecimento, a Federal, nos cinco anos seguintes, forneceu à Marinha transmissores para sua cadeia de alta potência (AITKEN, 1985).

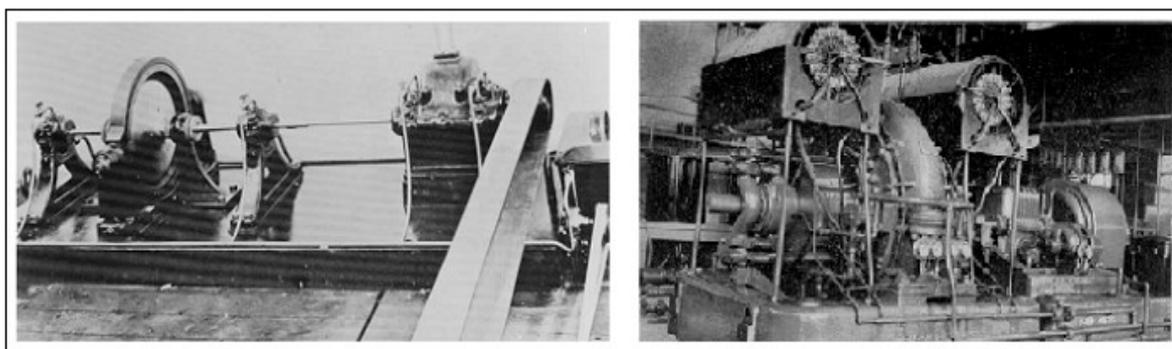
O transmissor de arco mostrou-se superior aos transmissores de centelha pelo fato de gerar ondas contínuas com menor ruído e menor potência; por isso, foi usado nos sistemas de rádio por mais de 20 anos. Nos Estados Unidos, a posse das patentes que envolviam essa tecnologia foi considerada estratégica, e foi um dos motivos da criação da RCA – *Radio Corporation of America*. Entretanto, essa história não correu sem conflitos. Desde seu surgimento, o arco de Poulsen foi objeto de críticas por parte de criadores de outros dispositivos, como Marconi, Fleming e Forest, que, em 1906 e 1907, patenteou o audion como oscilador e amplificador para telegrafia sem fio. Quando o audion aperfeiçoado começou a ser produzido pela AT&T, em torno de 1914, imediatamente começou a ser usado em aparelhos transmissores e receptores de rádio, marcando o início do fim da era dos geradores de arco (HONG, 2001).

A etapa seguinte de desenvolvimento foi a substituição do transmissor de arco pelo alternador. Entre 1890 e 1905, a única maneira de gerar ondas contínuas era usar alternadores de alta frequência que geravam no máximo 10 kHz. A ideia de construir um alternador, uma máquina elétrica com princípio de funcionamento idêntico aos geradores de correntes alternadas usados para iluminação e fornecimento de energia elétrica, mostrou que as adaptações necessárias estavam longe de serem simples ou óbvias por volta de 1900: para gerar altas frequências, as máquinas precisavam operar em velocidades muito mais altas que as usuais na época, com a necessidade de regulação da velocidade do rotor e da criação de circuitos especiais para injeção do sinal de áudio; a vantagem era que a frequência irradiada não seria função do circuito de sintonia na antena de transmissão, e sim do número de rotações por minuto do alternador (BELROSE, 1995; SARKAR, 2006).

Fessenden trabalhou no desenvolvimento de um oscilador de HF de onda contínua, cuja frequência era determinada pela velocidade do alternador. Em 1904, Fessenden entrou em contato com Charles Steinmetz, chefe do laboratório da GE, projetista de máquinas elétricas e autoridade em corrente alternada, e forneceu as especificações para que fosse construído um alternador que gerasse frequências entre 50 e 100 kHz. Steinmetz destacou, como responsável pelo projeto, o engenheiro elétrico Ernst Alexanderson, projetista de motores para trens e bondes. O projeto demorou dois anos para ser concluído e, quando foi entregue pela GE, em 1905, não atendia às especificações de Fessenden, sendo-lhe recomendado que não operasse a máquina além de 10 kHz; Fessenden, então, optou por

desenvolver o seu próprio gerador, de menores dimensões. O resultado foi uma máquina com uma velocidade de 139 revoluções por segundo, capaz de gerar frequências na faixa de 50 kHz, com uma saída de 300 W; com ela, no final de 1906, a partir de sua estação de Brant Rock, Fessenden fez testes com frequências na faixa de 50 a 200 kHz, e conseguiu transmitir áudio (música e voz) em amplitude modulada, ouvida por operadores de telegrafia de navios posicionados no Atlântico Norte e Sul. Portanto, Fessenden pode ser considerado o criador da radiodifusão AM. Mais tarde, Fessenden desenvolveu um alternador eletromecânico com potência de saída de 50 kW. Desenvolveu também um tipo de detector de áudio e o método de heterodinagem, que serão abordados mais adiante. Em 1920, suas patentes foram vendidas para a Westinghouse, e daí passadas para a RCA em 1921; e as máquinas de Fessenden teriam servido de protótipo para as da GE (BELROSE, 1994, 1995; SARKAR, 2006).

Figura 1.41: Alternadores de Fessenden e Alexanderson



Esquerda: versão primitiva da alternador de Fessenden (BELROSE, 2002). **Direita:** conjunto do alternador de 200 kW de Alexanderson com 13,6 m de comprimento (ALEXANDERSON, 1919).

Após a consolidação dos enlaces intercontinentais, Frank Jewett (presidente da AT&T, engenheiro e com PhD em Física) incentivou a AT&T a implementar um sistema de comunicação transatlântica via rádio. Por volta de 1914, foi reconhecido que o alternador de Alexanderson seria a primeira escolha, porém era necessário aumentar consideravelmente sua potência de saída. Para isso, Alexanderson projetou um de 50 kW que foi instalado em Brunswick (Nova Jersey), na estação pertencente à empresa Marconi, no começo de 1917. Com a entrada dos Estados Unidos na Primeira Guerra, a estação foi tomada pela Marinha de Guerra e usada para a comunicação com a Europa. Alexanderson então construiu um alternador de 200 kW que foi instalado em Brunswick em 1918. A máquina tinha uma velocidade de rotação de 2170 rpm, com uma variação de 0,1%. Dependendo da velocidade do rotor, da razão de engrenagens e do número de polos, poderia gerar um faixa de frequência

de 10 a 30 kHz. Em 1919, a AT&T instalou o primeiro serviço transatlântico de rádio operado continuamente usando esse alternador, operando em ondas longas, na faixa de 16,647 a 24 kHz. O emprego desses alternadores durou um pouco mais do que havia sido previsto, indo até o meio da década de 1920; foram usados também para a comunicação com navios em alto mar e submarinos antes de serem substituídos (BRITTAIN, 1999; ALEXANDERSON, 1919).

Esse tipo de gerador tornou-se fundamental para a estratégia dos Estados Unidos de estabelecer uma rede global de comunicações, sendo alguns deles instalados também na Europa; as antenas eram direcionadas para atender o tráfego da América do Sul e do Pacífico. Estrategicamente, o governo estadunidense excluiu as estações de rádio em seu território cujos proprietários eram estrangeiros. A política de proteger capitais e interesses nacionais na área de comunicações levou à criação da RCA, de que Alexanderson foi o primeiro presidente, dividindo o seu tempo com atividades na GE (BRITTAIN, 1999).

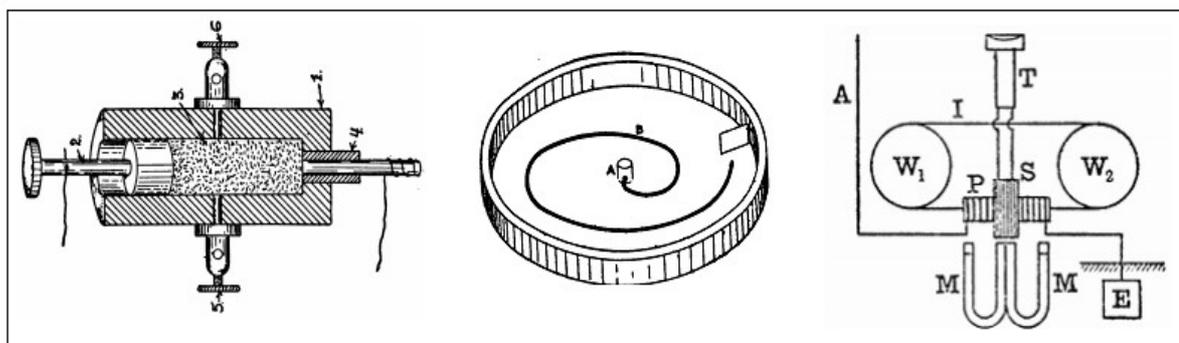
Vimos, assim, que vários dos desenvolvedores de transmissores de rádio trabalharam na fronteira entre as culturas de engenharia elétrica e de comunicações. Posteriormente, com o desenvolvimento das válvulas, capazes de gerar apreciáveis valores de potência de saída e operar em faixas de frequências bem altas, os engenheiros, que antes trabalhavam apenas com a engenharia elétrica, passaram a trabalhar também com a eletrônica.

Além das novas tecnologias dos transmissores, foi necessário também desenvolver novos tipos de detectores: o princípio de funcionamento dos mesmos definiu o tipo de aplicação – radiotelegrafia ou radiotelegrafia –, e também a sensibilidade para o sinal captado, a robustez, a velocidade de ativação e a confiabilidade. Após o detector de centelhas criado por Hertz, foram criados dispositivos de atuação eletromecânica para detecção das ondas de rádio. Temistocle Calzecchi-Onesti, físico italiano, em 1884 (portanto antes das experiências de Hertz), quando estudava pós metálicos, percebeu que as partículas ficavam unidas devido à ocorrência de centelhas causadas pela comutação de circuitos elétricos próximos e por descargas atmosféricas, pois com isso a resistência elétrica diminuía; extinta a centelha, as partículas se soltavam com um golpe aplicado no tubo. Concebeu então um detector composto por um tubo preenchido com pó de níquel e prata com traços de mercúrio, que foi usado na pesquisa geofísica para alerta de microssismos (GUIDONE, 2019). Em 1890, Édouard Branly, na França, descobriu que a propriedade já conhecida de Calzecchi-Onesti para os pós metálicos em geral, também era aplicável às limalhas de ferro, e então criou o coesor (*coherer*, termo cunhado por Lodge), composto de uma pequena ampola de vidro preenchida com limalhas de ferro; após o sinal não estar mais presente, era necessário dar uma leve batida no corpo do coesor para liberar as limalhas, o que era feito com um pequena haste ativada por

um relé, para então captar um novo sinal. Esse tipo de detector foi bastante utilizado nos primeiros receptores de radiotelegrafia. Em 1895, Oliver Lodge criou uma nova versão de coesor que era um aperfeiçoamento dos de Branly e Calzechi-Onesti. Em versões posteriores, substituiu as limalhas por um condutor sensível para usar nos seus experimentos (LODGE, 1903; FLEMING, 1903).

Depois dos dispositivos pioneiros, outros tipos de coesores, com outros tipos de materiais e conformação, foram desenvolvidos com o objetivo de serem usados nos respectivos sistemas de rádio, como os de Marconi na Itália e na Inglaterra, Eugène Ducretet na França, Braun e Slaby-Arco na Alemanha, Popov na Rússia e outros. Foram também criados coesores autorregenerativos, como os de A. Blondel e Lodge-Muirhead. Jagadish Bose, em suas pesquisas, fez um estudo sistemático do comportamento de vários metais em coesores e desenvolveu um tipo autorregenerativo, empregando um tubo em U, usando ferro e gotas de mercúrio; o resultado das suas pesquisas foi relatado em um artigo publicado nos *Proceedings da Royal Society* (BOSE, 1899). Marconi, em sua primeira transmissão transatlântica, usou um coesor com modificações, mas com o princípio de funcionamento similar ao de Bose; o aparelho é atribuído ao tenente da marinha italiana Luigi Solari, amigo de Marconi, e teria sido feito de carbono, aço e gotas de mercúrio (FLEMING, 1903). O dispositivo, que ficou conhecido como *italian navy coherer*, foi cercado de controvérsias desde que surgiu, pois, segundo Bondyopadhyay (1998), o detector usado por Marconi teria sido na verdade o diodo de galena criado por Bose.

Figura 1.42: Primeiros detectores de sinais

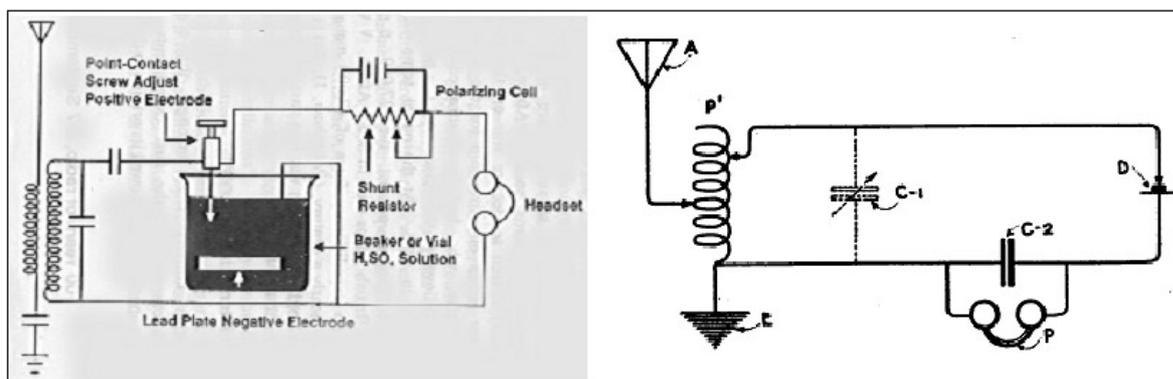


Esquerda: coesor de Branly (COLLINS, 1905, p. 146). **Centro:** coesor de Lodge (COLLINS, 1905, p. 147). **Direita:** detector magnético de Marconi (FLEMING, 1903, p. 61).

Também foram desenvolvidos detectores com princípios de funcionamento diversos dos coesores, como o tipo de galvanômetro criado por Bjerknæs e Fessenden. Além desses, em 1902 Marconi introduziu o detector magnético usando fita de metal em movimento: descobriu

que a histerese do ferro podia ser anulada através de uma oscilação e, toda vez que um sinal era detectado, era gerado um som (clique) que podia ser ouvido em um fone (COLLINS, 1905; FLEMING, 1908).

Figura 1.43: Receptores com diferentes tipos de detectores



Esquerda: receptor de radiotelegrafia com detector eletroquímico (*barretter*) de Fessenden (BELROSE, 1995). **Direita:** receptor de rádio usando detector a cristal (BUCHER, 1919).

O fato de os receptores de radiotelegrafia precisarem recuperar o sinal de áudio (banda base) levou ao desenvolvimento de detectores que atuassem continuamente em substituição aos dispositivos eletromecânicos de resposta binária. Para tanto, foram experimentados detectores com diferentes princípios de funcionamento que foram surgindo a partir do final do século XIX: químicos, térmicos, elétricos, mecânicos, microfônicos e até fisiológicos (LODGE, 1903; PHILIPS, 1980). Somente alguns acabaram por prevalecer, mesmo assim, por algum tempo. O destaque foi para o detector eletrolítico de Fessenden que ele denominou *barretter*, composto com um fio de platina recoberto com prata imerso em um recipiente de vidro selado contendo ácido nítrico e prata. Esse detector foi usado durante vários anos e considerado padrão, sendo substituído pelo detector de galena e posteriormente pela válvula, por volta de 1913. Apesar de o detector eletrolítico ter sido projetado pensando em áudio, ele foi aplicado em radiotelegrafia, o que aumentava a velocidade de sinalização. De Forest tentou contornar a patente de Fessenden e criou uma versão de detector que foi usada por sua empresa. Foi usado no equipamento de Forest, na batalha naval do estreito de Tsushima, em 1904, na guerra russo-japonesa, em que a radiotelegrafia foi decisiva para a vitória da esquadra japonesa (LEE, 2012).

Por essa época, os detectores sólidos se destacaram devido às suas propriedades de robustez, menores dimensões físicas e desempenho. A investigação das propriedades dos sólidos levou à descoberta por Ferdinand Braun, em 1874, de que as piritas de cobre e ferro

apresentavam a propriedade de condução unidirecional de corrente, mas só no começo do século XX percebeu-se que os cristais eram bem adaptados para a detecção das ondas de rádio: em 1904, no seu sistema de alta frequência, Bose introduziu o detector de galena, que foi popular entre os radiomadores; em 1906, Henry Dunwoody, nos Estados Unidos, usou o carborundum, e, em 1908, Greenleaf Pickard desenvolveu o primeiro detector cristal-cristal com o nome comercial de Perikon. Esses tipos de detectores, conhecidos como bigode de gato (*cat whisker*), baseavam-se no princípio de retificação na junção de um metal com o cristal e, para isso, era necessário fazer o ajuste de uma fina haste metálica, geralmente de aço, que precisava ser pressionada contra o corpo do cristal, em determinada região do mesmo, para obter a melhor resposta. O destino do emprego dos detectores sólidos dependia das facilidades de utilização: o carborundum precisava de um baixo valor de polarização para retificação, que podia ser fornecido por uma pilha; e detectores como o Perikon, apesar de não requererem fontes de alimentação, precisavam de reajustes constantes (THACKERAY, 1983).

Os detectores acabaram exercendo papéis de relevo para o futuro da Eletrônica: o primeiro deles foi o estímulo para a criação da primeira válvula, um diodo, projetada para detecção, e o segundo foi o emprego de diodos de materiais cristalinos, cujos estudos das suas propriedades, contribuíram para o desenvolvimento dos materiais semicondutores décadas depois, resultando na criação do transistor em 1948.

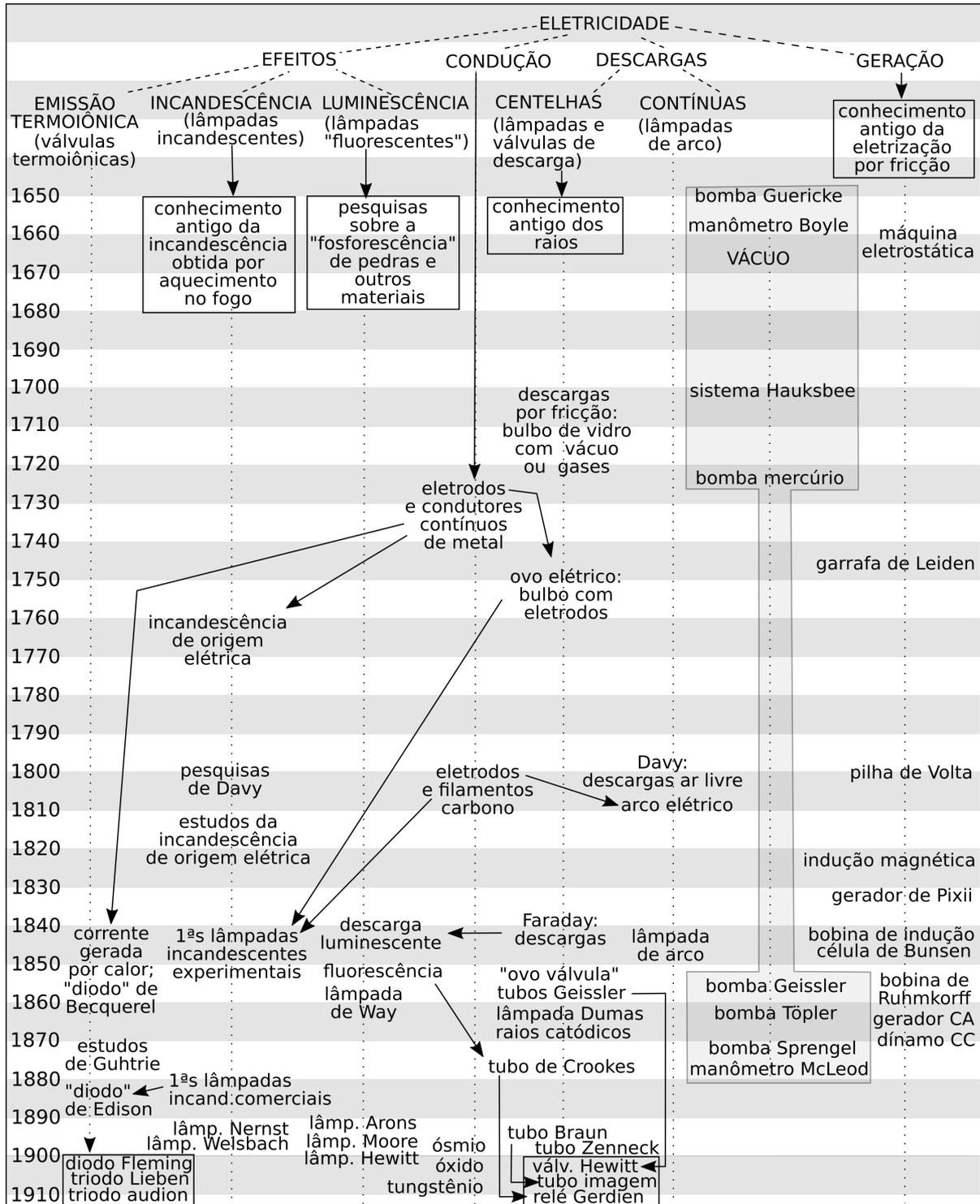
2 TECNOLOGIA DAS VÁLVULAS

Este capítulo aborda a criação e evolução das válvulas eletrônicas, que compreendem dois diferentes princípios de funcionamento: as válvulas de catodo frio, descendentes dos tubos de descarga, e as válvulas termoiônicas, descendentes das lâmpadas de filamento. Minha intenção foi destacar como os vários tipos de válvulas foram criados para atender a determinadas necessidades, e como seu processo de criação e/ou desenvolvimento foi realizado, em sua maioria, nos laboratórios industriais. Em termos históricos, chamo atenção para três componentes: os personagens envolvidos com a criação das válvulas, os locais de desenvolvimento e as respectivas motivações. Para reunir as informações necessárias à formação de um quadro das contribuições das válvulas para a tecnologia eletrônica no século XX, serão descritos os seguintes aspectos das válvulas estudadas: 1) o princípio de funcionamento; 2) as trajetórias de evolução; e 3) suas principais aplicações em comunicações eletrônicas e em atividades industriais, científicas e militares.

Ainda com o objetivo de rastrear as trajetórias científicas e tecnológicas que culminaram com a criação das válvulas, a Figura 2.1 apresenta um resumo dos vários caminhos percorridos no capítulo anterior. Nela podemos ver como as válvulas termoiônicas foram o resultado da confluência de conhecimentos e técnicas acumulados nos campos das descargas elétricas, da condução da eletricidade e dos fenômenos da incandescência e da emissão termoiônica, enquanto as válvulas de catodo frio resultaram da combinação de conhecimentos e técnicas relacionados às descargas elétricas, à condução da eletricidade e à eletroluminescência. Mas o simples conhecimento empírico e/ou isolado desses fenômenos não seria suficiente sem o avanço das pesquisas no campo da eletricidade, que levaram à aceitação da existência do elétron e, conseqüentemente, à ideia de controlar o fluxo de elétrons, que é a característica essencial das válvulas.

Ao longo deste capítulo, vamos examinar os aspectos principais da criação e do desenvolvimento das válvulas. Na primeira parte são descritas as pioneiras – as válvulas de catodo frio de Cooper Hewitt e as primeiras válvulas termoiônicas –, e sua ligação com o surgimento da Eletrônica. Para um melhor entendimento, as primeiras válvulas de catodo frio desenvolvidas para serem usadas em sistemas de TV serão abordadas posteriormente. A segunda parte fala do desenvolvimento e da diversificação das válvulas após sua transformação em um produto comercial; a terceira parte descreve aspectos da produção das válvulas, e a quarta comenta a chegada dos transístores e a substituição das válvulas por eles.

Figura 2.1: Panorama dos principais precursores das válvulas



Legenda:

- Linhas verticais pontilhadas:** seqüências cronológicas de descobertas e invenções referentes a cada fenômeno descrito.
- Setas:** início de uma seqüência; caminho pelo qual uma seqüência origina ou influencia outra; fim de algumas seqüências nas primeiras válvulas (quadros inferiores).
- Faixas horizontais:** décadas. O **ano** indicado por cada número inicia no limite entre duas faixas (o ponto onde o número está localizado).

2.1 A INVENÇÃO DAS VÁLVULAS

O período em que ocorreu a criação das primeiras válvulas foi marcado por uma atividade intensa, tanto no campo acadêmico da Física, quanto no das pesquisas voltadas para a solução de problemas técnicos, principalmente na área das comunicações. Embora tenha havido desenvolvimentos paralelos na Europa, o esforço para a criação do novo dispositivo se concentrou no Estados Unidos, que tinha fortes motivações para isso: dos pontos de vista econômico e político, era necessário integrar os vários polos de desenvolvimento dispersos pelo vasto território nacional. Em 1901, o país contava com uma extensa rede terrestre de telegrafia, além de conexões transcontinentais, principalmente com a Europa, mas também com as Américas Central e do Sul, Austrália e Sudeste da Ásia, passando pelo Havaí (KOCHER, 2014). Também estava se formando uma rede de telefonia terrestre: em 1885, fora criada a *American Telephone & Telegraph Company* (AT&T), com a finalidade de construir e operar um grande sistema de linhas telefônicas ligando os países da América do Norte e se estendendo para outros continentes; e a telegrafia começava a ser incorporada às redes telefônicas. Com o uso da tecnologia eletromecânica, as soluções adotadas para resolver o problema da atenuação das correntes produzidas a partir das ondas sonoras não eram as ideais para a transmissão de voz de um extremo a outro do país (FAGEN, 1975).

Para que possamos compreender melhor os tópicos técnicos e científicos que serão mencionados posteriormente, convém começar por algumas considerações acerca dos esforços de pesquisa e desenvolvimento realizados nas primeiras décadas do século XX. Para que as válvulas termoiônicas pudessem alcançar seu melhor desempenho, a tecnologia teve que avançar em termos de materiais e técnicas utilizados na confecção dos primeiros dispositivos práticos; destacaram-se os avanços na criação de filamentos mais eficientes que os das lâmpadas da época, e na produção do alto vácuo exigido pelas válvulas. Uma primeira abordagem foi a descoberta feita na Alemanha, em 1903, pelo químico Arthur Wehnelt que, ao testar a emissão termoiônica de fios de platina revestidos com óxidos de cálcio, bário ou estrôncio, verificou que, no vácuo, o fio revestido emitia maior quantidade de elétrons por área, sendo essa técnica amplamente usada nas primeiras válvulas. Posteriormente, em uma segunda abordagem, as soluções foram desenvolvidas pela indústria de lâmpadas e transferidas para as válvulas recém-criadas. Como vimos na seção sobre as lâmpadas incandescentes, entre aproximadamente 1890 e 1910, os filamentos de carbono das lâmpadas foram substituídos pelos de tungstênio dúctil, que já estava sendo empregado regularmente pela indústria em 1911. Em 1914, Irving Langmuir e William Rogers, trabalhando na *General*

Electric, descobriram que catodos de tungstênio revestidos com uma fina camada de tório, eram capazes de emitir uma corrente muitas vezes maior que os de tungstênio puro na mesma temperatura; o tungstênio toriado foi usado em catodos de válvulas de alta potência, enquanto o catodo metálico revestido com óxidos de Wehnelt dominou a indústria de válvulas receptoras na década de 1920 (REDHEAD, 1998).

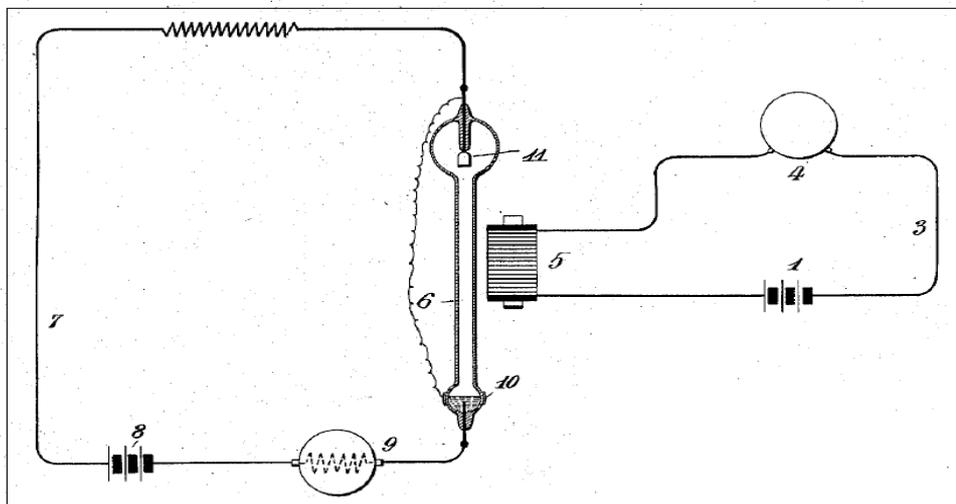
Além das inovações tecnológicas, permaneciam as disputas teóricas em torno da existência e da natureza do elétron, que só começaram a ser resolvidas no final do século XIX; essas disputas repercutiram nas discussões acerca da natureza da emissão termoiônica e, conseqüentemente, acerca do melhor nível de vácuo para otimizar o desempenho das válvulas. Enquanto na Europa ainda predominava a teoria de que a emissão tinha natureza química e exigia a presença de um pouco de gás para ocorrer, nos Estados Unidos, as pesquisas de Owen Richardson e Langmuir conseguiram provar, em 1913, que o alto vácuo favorecia a emissão. A divulgação dos resultados desses estudos, além de proporcionar fortes argumentos para a reação contra os defensores do emprego de baixo vácuo, provocou um rápido aperfeiçoamento nas bombas de vácuo, destacando-se a bomba molecular de Gaede (criada em 1913), a de Leybold e a bomba de difusão de mercúrio de Langmuir (de 1916), e nos medidores, entre os quais se destacou o manômetro de ionização de Buckley (criado em 1916) que, juntamente com a bomba de difusão, permitiu a produção rotineira de alto vácuo na indústria (REDHEAD, 1998).

2.1.1 As primeiras válvulas: Cooper Hewitt

Como vimos na seção sobre as lâmpadas, no Capítulo 1, em 1900, o engenheiro estadunidense Peter Cooper Hewitt registrou o pedido de patente de uma lâmpada de descarga em alto vácuo com vapor de mercúrio. Nos anos seguintes, Hewitt utilizou essa lâmpada para criar vários dispositivos, como um amplificador, um alternador e um retificador de corrente. Quando buscava meios para manter o mais constante possível o fluxo da descarga de elétrons das lâmpadas, Hewitt descobriu que esse fluxo era afetado pelas variações de um campo magnético próximo. Portanto, a lâmpada poderia ser usada para fazer variar a corrente de um circuito elétrico. Pensando em aplicações de rádio, em 1902, Hewitt deu entrada na patente de um amplificador de lâmpada de vapor de mercúrio, que recebia o sinal de um magneto e, por sua vez, alterava a corrente dirigida a um receptor. Hewitt propôs o uso do amplificador em telefonia, embora ressaltando que ele poderia ser utilizado em outros circuitos, tanto para

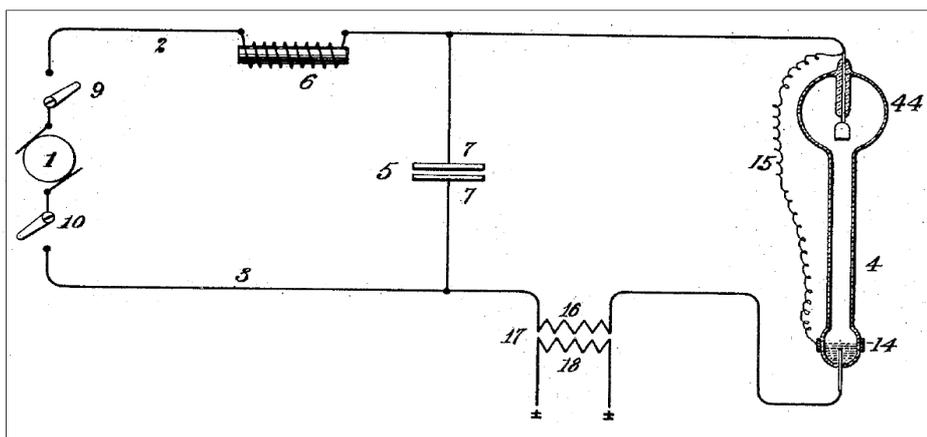
amplificar as variações originais da corrente, como para reproduzi-las com a amplitude original, ou mesmo para reduzi-las (HEWITT, 1904).

Figura 2.2: Válvula amplificadora de Cooper Hewitt



Legenda: 1- fonte de alimentação do circuito de voz [3]. 4- entrada do sinal para a variação do campo magnético. 5- bobina geradora do campo magnético. 6- lâmpada a vapor de mercúrio. 7- circuito de saída. 8- fonte de alimentação de anodo. 9- carga sobre a qual agem as variações de corrente no circuito [7]. 10- eletrodo de mercúrio (com faixa metálica de ativação – ver fig. 2.3). 11- eletrodo metálico. Fonte: Hewitt (1901, 1904).

Figura 2.3: Válvula para geração de C.A. de Cooper Hewitt



Legenda: 1- fonte CC. 2 e 3- condutores. 4- lâmpada a vapor de mercúrio. 5, 7, 7- capacitor. 6- indutor. 9 e 10 – interruptores. 14- faixa metálica para ativar o dispositivo. 15- condutor que liga a faixa metálica [14] ao eletrodo positivo ou ao condutor [2]. 16, 17, 18- transformador de saída de CA. A combinação da faixa metálica [14] com o fio [15] era uma das opções possíveis do sistema de ativação do dispositivo, e a que Hewitt usava nos alternadores com que trabalhava.

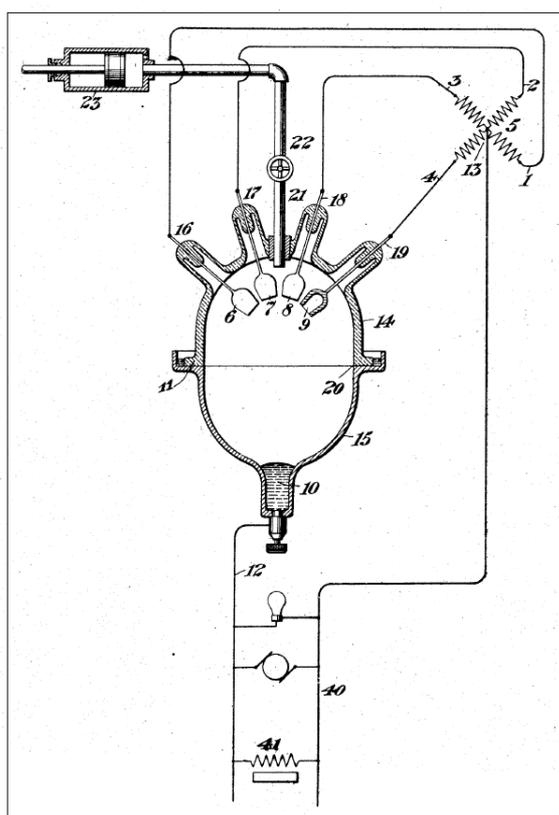
Fonte: Hewitt (1905).

Também em 1902, Hewitt criou um alternador que, segundo ele, produzia correntes alternadas de alta frequência, pelo fato ter uma ação muito rápida e uniforme. Ele propôs,

como formas de uso, a radiotelegrafia e outras aplicações que exigissem correntes de períodos definidos e alternações rápidas.

Em 1903, Hewitt apresentou o primeiro pedido de patente de seu retificador, que definiu como um dispositivo de vapor de mercúrio, com as características gerais da lâmpada já descrita, contendo quatro anodos, com conexões para os terminais de uma fonte de corrente alternada polifásica, e um catodo com conexão para o circuito de trabalho. Os anodos eram feitos de cromo, cobre ou ferro; e o catodo, de mercúrio (HEWITT, 1914). O estímulo para a criação dos retificadores foi a existência de várias aplicações em que o uso de corrente contínua era mais adequado que o de corrente alternada, como o fornecimento de energia para ferrovias, bondes e alguns processos industriais, a que se somava o fato de não ser econômico gerar corrente contínua e transmiti-la por longas distâncias (MARTI; WINOGRAD, 1930).

Figura 2.4: Válvula retificadora de Cooper Hewitt



Legenda:

Entrada CA:

a) transformador polifásico [5] com os enrolamentos [1 a 4].

Retificador [11]:

a) anodos [6 a 9] e terminais [16 a 19].

b) catodo de mercúrio [10].

c) câmara dividida em duas partes:

- superior [14] de vidro ou outro material isolante;

- inferior [15] de metal (cobre, ferro).

- Junta de união das partes [20]

d) bocal [21] e registro [22] para ligação à bomba de vácuo [23].

Saida CC:

Condutor [12] de ligação do catodo à carga [41], ligação de retorno da carga [40] ao neutro do transformador [13].

Fonte: Hewitt (1914).

2.1.2 A válvula termoiônica

Como vimos anteriormente, a ideia de adaptar uma lâmpada incandescente para usá-la

no controle de correntes elétricas foi registrada pela primeira vez em 1883, quando Edison patenteou seu “indicador elétrico”. Mas este invento, derivado de uma observação casual e não explicada do efeito termoiônico, não foi levado adiante por Edison. O trabalho imediato de pesquisa e desenvolvimento que resultou na invenção da válvula termoiônica foi realizado na primeira década do século XX por John Ambrose Fleming, que criou a primeira válvula prática – um diodo –, além de Robert von Lieben e Lee de Forest, que inventaram triodos, de modo independente.

Do ponto de vista da história da válvula, John Ambrose Fleming foi um personagem ímpar pelas funções que exerceu, tanto na indústria elétrica, quanto na do rádio que estava nascendo. Trabalhando na Inglaterra como consultor da *Edison Electric Light Company* desde 1882, começou a estudar o problema do escurecimento das lâmpadas que levava Edison a observar o efeito termoiônico. Apoiando-se também no trabalho de William Preece (do *British Post Office*) e dos físicos alemães Wilhelm Hittorf, Eugen Goldstein, Julius Elster e Hans Geitel, que estudaram a relação entre condutividade e calor, Fleming realizou experimentos com diferentes configurações de lâmpadas, derivadas do modelo de Edison com uma placa de platina entre os braços verticais do filamento de carbono em “U” de uma lâmpada comum (GARNER, 1963a; REDHEAD, 2005; SHIERS, 1969). Nesses estudos, Fleming confirmou a ocorrência de uma corrente elétrica unilateral, do catodo incandescente para o anodo frio, e estudou suas propriedades (FLEMING, 1890, 1896). A partir de 1899, Fleming tornou-se consultor da *Marconi Wireless Telegraphy Company*, com a tarefa de projetar o sistema de transmissão e recepção para a estação experimental de radiotelegrafia que Marconi pretendia instalar em Poldhu (no sudoeste da Inglaterra). Em 1904, quando buscava um detector de ondas de rádio mais confiável que os dispositivos usados na época, Fleming experimentou usar uma lâmpada modificada das pesquisas anteriores, e verificou que ela atuava como um retificador de alta frequência, adequado para detectar sinais de rádio (GARNER, 1963a; REDHEAD, 2005; SHIERS, 1969).

Em 1905, Fleming patenteou sua “válvula elétrica”. Constatou também que podia associar suas válvulas em paralelo, de modo a obter uma corrente total na saída que seria a soma das correntes retificadas de cada válvula, técnica utilizada daí por diante nas válvulas (e nos dispositivos semicondutores) para obter maiores valores de corrente em retificadores e amplificadores (FLEMING, 1905; GARNER, 1963a).

Siemens, inventou um dispositivo que é considerado o primeiro tipo de válvula magnetron. O controle do feixe de elétrons usando campos magnéticos não era novo, pois o efeito de deflexão nos tubos de descarga já era conhecido desde as experiências de Plücker e Hirtoff em 1869. A propriedade foi empregada no tubo de Braun, de 1897, no amplificador de Hewitt, de 1902, e na válvula de Lieben, de 1906. A descrição do comportamento do movimento dos elétrons foi feita por alguns pesquisadores, com destaque para Gerdien e o físico suíço de origem alemã Heinrich Greinacher, em 1912, que elaborou a teoria do movimento dos elétrons em um diodo com montagem coaxial dos eletrodos sob a ação de um campo magnético, que é o comportamento dos elétrons nas magnetrons (GOERTH, 2010).

O dispositivo de Gerdien era um amplificador projetado para uso em radiotelegrafia e telegrafia por cabo, em telefonia, para sinalização e controle de máquinas a distância etc. Consistia em um tubo semelhante aos utilizados por Crookes, com eletrodos cilíndricos em ambiente de alto vácuo, associado aos elementos de circuitos. Segundo Gerdien, o que caracterizava o seu invento era o fato de que, nele, não apenas a posição e a direção dos raios catódicos, mas a energia da descarga luminosa total era diretamente influenciada por um campo magnético. Com a inclusão de um catodo adicional, o dispositivo tornava-se adequado para transmitir correntes de alta frequência (GERDIEN, 1911). A válvula de Gerdien pode ser considerada como precursora remota das magnetrons que foram desenvolvidas para o radar décadas mais tarde e serão vistas posteriormente.

Figura 2.7: Amplificador de Gerdien

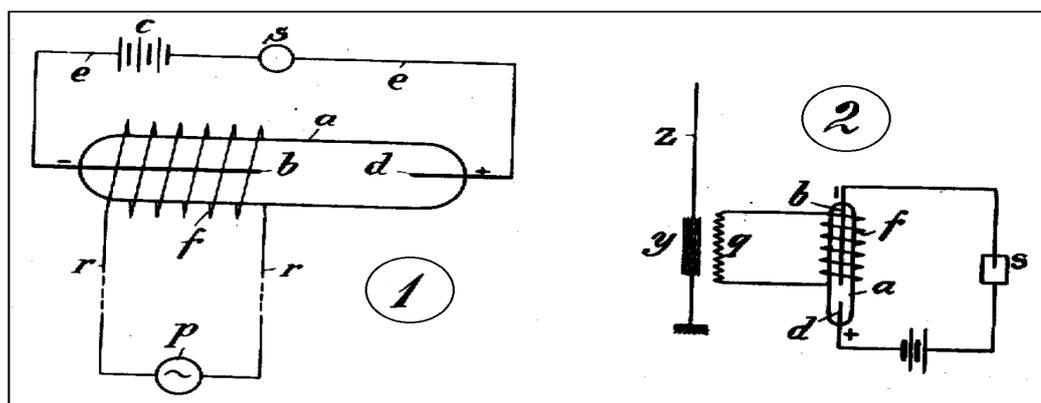
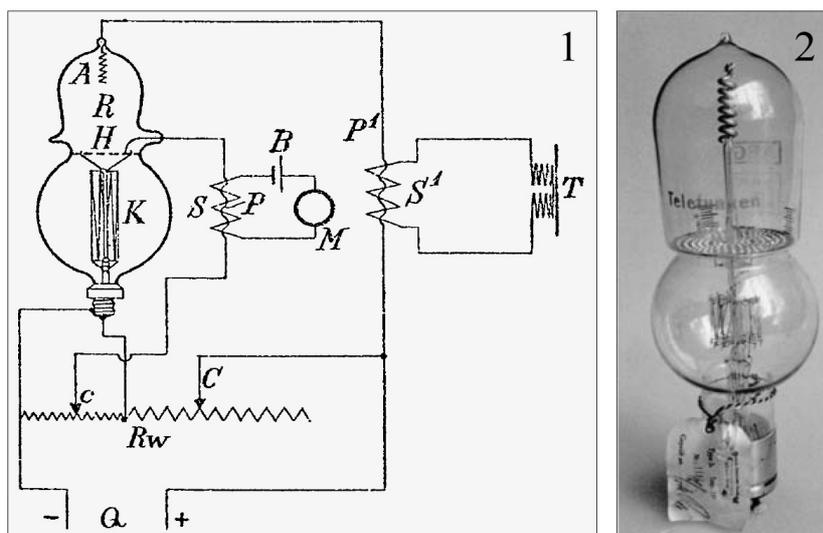


Figura 1: a forma mais simples, proposta para repetidor telefônico. Circuito primário: **f** – bobina concêntrica; **p** – fonte do sinal de voz (que deve estar a grande distância da bobina); **r** – condutores. Circuito secundário: **a** - o tubo; **b** - catodo; **c** - fonte de alimentação; **d** - anodo; **e** – condutores; **s** - dispositivo receptor. **Figura 2:** aplicação como receptor de radiotelegrafia: **z** – antena; **y/q** – transformador de antena; **a** – tubo; **b** – catodo; **d** - anodo; **f** - bobina concêntrica; **s** - dispositivo receptor (detector) e bateria (GERDIEN, 1911).

Um outro passo tecnológico foi o desenvolvimento da válvula amplificadora, cujo princípio de funcionamento baseia-se na propriedade de que um sinal de entrada, de pequeno valor de amplitude, é capaz de controlar a corrente que flui entre dois eletrodos: no caso, do catodo em direção ao anodo ou placa. Na válvula termoiônica, quando foi descoberto que era possível controlar o fluxo de elétrons pela implantação de um terceiro eletrodo (a grade) posicionada entre o catodo aquecido e a placa, foram experimentados controles do fluxo de elétrons usando campos elétricos e magnéticos. Posteriormente, esses dois tipos de controle definiram famílias de válvulas, notadamente aquelas desenvolvidas para altas frequências como as magnetrons. Após uma fase inicial de experimentos, para fins de produção, foi realizado o levantamento das curvas de resposta relacionando os parâmetros envolvendo os valores de tensão de polarização dos eletrodos, as correntes de placa, a temperatura e, além desses, valores apropriados de vácuo, materiais a serem usados e a geometria interna dos eletrodos. Foi esse o trabalho de engenharia que caracterizou a indústria de válvulas, e que foi levado a cabo principalmente em laboratórios industriais.

Foi pela necessidade de amplificar os sinais de áudio que, paralelamente ao desenvolvimento da válvula de Fleming, surgiu o outro invento chave, também na cena europeia: o “relé de raios catódicos”, um amplificador de sinais telefônicos, patenteado por Robert von Lieben. Apesar de Lieben ter frequentado a Universidade de Viena, acabou não se formando, mas, mesmo assim, teve a oportunidade de estudar físico-química durante um semestre com Walther Nernst na Universidade de Göttingen. Após ter adquirido uma fábrica de telefones, além de outras pesquisas que fazia, ficou interessado no problema da amplificação de sinais telefônicos. Em 1906, Lieben construiu o protótipo de um triodo amplificador. Posteriormente, Lieben e seus associados Richard Leiser, Eugen Reisz e Siegmund Strauss – contratados para resolver problemas mecânicos e químicos do projeto –, identificaram os pontos em que o projeto devia ser aperfeiçoado para tornar-se um produto comercialmente viável. Após testarem diferentes arranjos dos eletrodos, chegaram a um triodo formado por um bulbo em que uma grade de metal, conectada ao sinal de entrada, foi colocada entre o catodo e o anodo; e foi empregado como catodo uma tira de platina coberta com uma fina camada de cal – como já vimos, uma técnica descoberta por Wehnelt para aumentar a emissão de elétrons. Também injetaram na válvula uma pequena quantidade de vapor de mercúrio, pretendendo com isso contornar a necessidade de alto vácuo, e acabaram por substituir o controle magnético pelo controle eletrostático do feixe de elétrons. A válvula tinha uma altura total de 315 mm (BLUMTRITT, 2004; FLEMING, 1919; NEBEKER, 2009; PICHLER, 2002; SARKAR, 2006).

Figura 2.8: Triodo de Lieben, Reisz e Strauss (relé LRS)



Fontes: 1 - Lieben, Reisz e Strauss (1912, fig. 2). 2 – Sarkar (2006, p. 336, fig. 11.10.b).

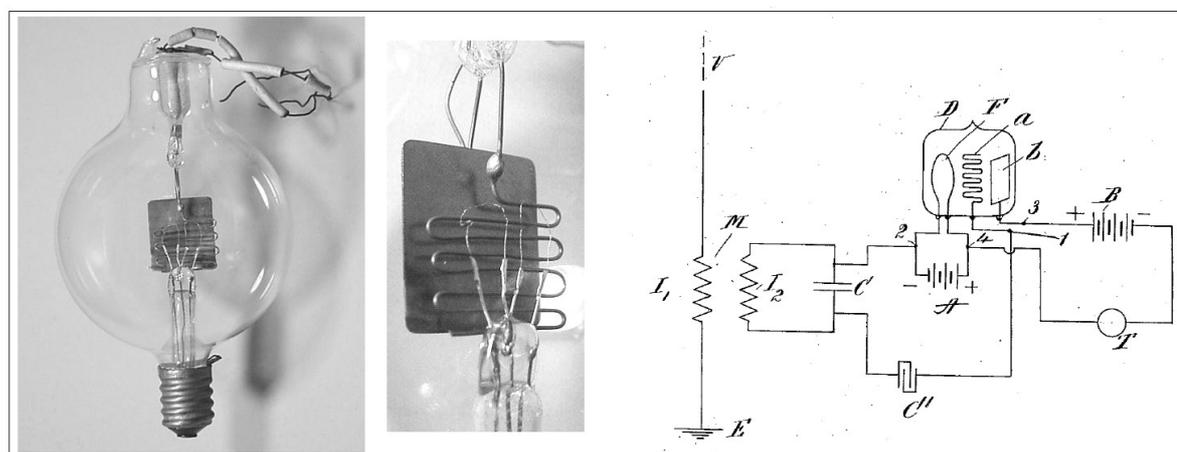
Lieben, Reisz e Strauss patentaram em 1910 o “relé LRS” e, em 1911, realizaram uma demonstração em Berlim. Em 1912, as empresas Siemens & Halske AG, AEG (*Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft* - Companhia Geral de Eletricidade), Telefunken (*Gesellschaft für drahtlose Telegraphie GmbH*) e TeKaDe (pertencente a Felten & Guillaume Carlswerk AG) formaram uma associação, o *Lieben-Consortium*, para exploração das patentes da válvula. Na AEG, Eugen Reisz e Alexander Meissner criaram circuitos adequados para a aplicação prática do triodo LRS em repetidores bidirecionais para telefonia. Em 1913, Meissner patenteou um transmissor de radiotelefonia e, durante a 1ª Guerra Mundial, a Telefunken e a TeKaDe fabricaram equipamentos para comunicação sem fio usando o LRS, como os amplificadores de alta frequência e osciladores encontrados no navio *Vaterland*, capturado pelos EUA durante a guerra. O triodo LRS também serviu durante a guerra em repetidores telefônicos de longa distância e como amplificador para a interceptação, através do solo, de comunicações telegráficas inimigas. Embora a Telefunken tenha começado em 1914 a pesquisar um triodo de alto vácuo, o triodo LRS da TeKaDe continuou sendo usado até 1920 (PICHLER, 2002).

A outra importante invenção do período, que se caracterizou por ter sido um marco na tecnologia das válvulas, foi feita por Lee de Forest nos Estados Unidos. A exemplo de Lieben, Forest adicionou um eletrodo entre o filamento e a placa do diodo de Fleming, criando o triodo patenteado com o nome de “audion”.

Forest obteve o PhD em 1899 com a tese *Reflection of hertzian waves from the ends of parallel wires*, a primeira sobre o assunto nos Estados Unidos (RABOY, 2016). Num artigo

publicado na revista *Radio News*, Forest (1930) conta que teve a ideia de criar, a princípio, um detector de ondas “hertzianas” em 1904, quando, em seu laboratório, notou que o brilho da chama da camisa de um bico de gás diminuía, reagindo às centelhas da bobina de indução de um aparelho de radiotelegrafia próximo. Construiu um detector com um par de eletrodos situados acima da chama de um bico de Bunsen, que funcionou de modo adequado. Mas, na época, a meta de Forest era desenvolver um sistema de comunicação sem fio marítima, e não havia gás nos navios; decidiu, então, usar um bulbo de vidro preenchido com gás e com um filamento aquecido como fonte de calor, operado por bateria, e patenteou, em 1906, um diodo detector de oscilação (de RF) para radiotelegrafia.

Figura 2.9: Audion de Forest



Esquerda: o audion. **Centro:** detalhe da grade (GUARNIERI, 2012). **Direita:** esquema do audion como detector de ondas de rádio (FOREST, 1908).

Em 1902, Forest criou a *De Forest Wireless Telegraph Company*, para desenvolver seu projeto na área da radiotelegrafia, e nela fabricou suas primeiras válvulas (FAGEN, 1975). Quando começaram a ser produzidos comercialmente, os primeiros audions tinham filamentos de tântalo. Geralmente, era utilizado um filamento de hélice dupla: quando uma hélice queimava, a outra ainda estava disponível, duplicando a vida útil dos audions. Uma desvantagem do dispositivo era que a tensão da placa tinha de ser ajustada para um valor crítico: se aumentasse além de um determinado ponto, a válvula subitamente emitiria um brilho arroxado, e os sinais ficariam distorcidos. Forest deu entrada em duas patentes do audion: a primeira, em 1906, vislumbrou um dispositivo amplificador para baixas correntes de linha como as de telefonia, e a segunda, em 1907, um detector de RF para radiotelegrafia (FOREST, 1906, 1907, 1908, 1930). Os audions originais tiveram muito pouca aceitação, pois

eram caros e mostraram-se pouco confiáveis. Com esses e outros problemas (como disputas de patentes), a empresa faliu em 1906, após um grupo de ex-sócios fundar a *United Wireless*. Em 1907, Forest criou a *Radio Telephone Company*, para explorar as patentes de suas válvulas, mas faliu novamente em 1909. Esse período foi importante porque o laboratório da *Radio Telephone Company* reuniu engenheiros que se familiarizaram com o audion, entre eles Fritz Lowenstein que, após a falência de Forest, indo trabalhar no *Hammond Radio Research Laboratory*, montou um laboratório próprio onde desenvolveu seu *telephone relay*, um amplificador, cuja patente registrou em 1911 (FAGEN, 1975; HONG, 2001).

Para confirmar o entrelaçamento de situações e histórias que envolveram tecnologias de transmissão até resultar na válvula, vejamos que, em 1909, foi formada a *Poulsen Wireless Telephone and Telegraph Company*, com o objetivo de produzir sistemas de radiotelegrafia usando transmissores de arco de Poulsen nos Estados Unidos. A empresa se transformou na *Federal Telegraph Company*, também conhecida como Federal, que posteriormente foi adquirida pela IT&T – *International Telephone & Telegraph*. Após sua segunda falência, Forest foi chamado em 1911, graças à sua experiência, para ser chefe nos *Federal Palo Alto Laboratories* com a tarefa de desenvolver um detector satisfatório para ser usado em receptores de sinais gerados em transmissores a arco (MANN, 1946).

Figura 2.10: Amplificador construído por Forest na Federal



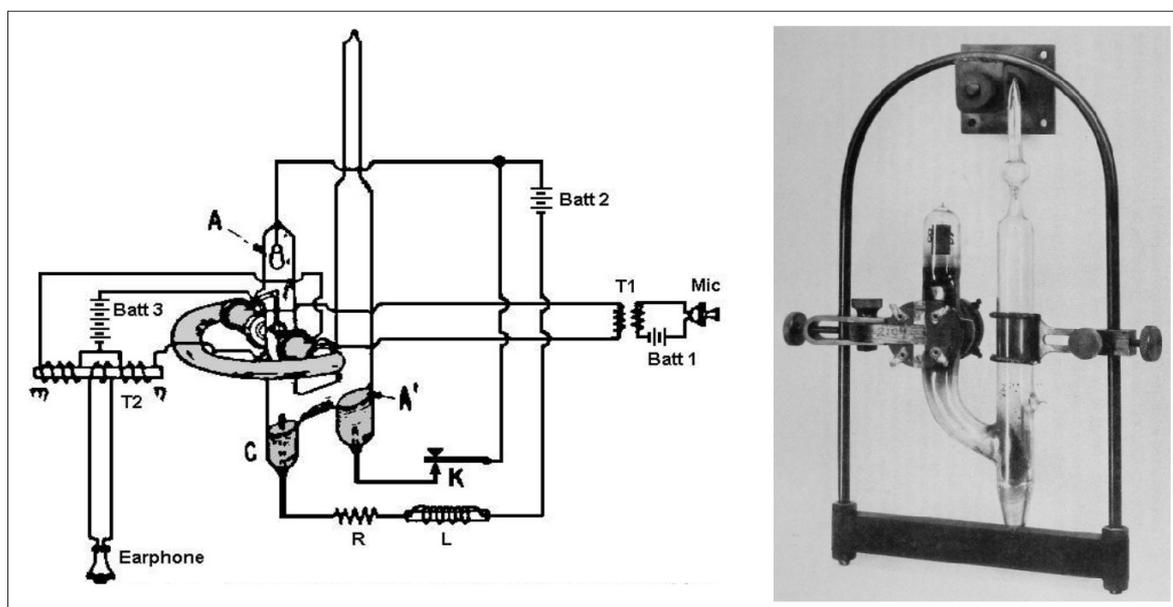
Fonte: Mann (1946).

Com seus assistentes Charles V. Logwood, radioamador, e Herbert Van Etten, engenheiro telefônico, Forest construiu um amplificador com três audions em cascata, colocando todos os demais componentes necessários, incluindo a bateria de 60 V para a polarização das placas, em um gabinete de mogno; com isso, fez uma demonstração para a Marinha de Guerra estadunidense, em que, com os métodos primitivos de medição de então, o

amplificador proporcionava na saída um sinal 120 vezes maior em relação à entrada. Por essa mesma época, Forest descobriu também que o audion poderia funcionar como oscilador de ondas senoidais (MANN, 1946).

Dentro do projeto de aumentar a extensão dos enlaces telefônicos, em 1909, John Carty, engenheiro chefe da AT&T, estava comprometido com o lançamento do serviço telefônico transcontinental de modo a coincidir com a abertura do Canal do Panamá, que estava em construção. Nessa época, ainda não havia um outro dispositivo capaz de proporcionar amplificação que fosse superior em desempenho ao amplificador eletromecânico de Shreeve (HOCHHEISER, 2014). Para cumprir esse objetivo, Frank Jewett (então presidente da AT&T) consultou seu amigo Robert Millikan (já famoso pelo seu experimento da medida da carga do elétron em 1909), pedindo sua opinião sobre o assunto do repetidor; Millikan assinalou que era necessária uma nova abordagem, com pesquisadores que estivessem familiarizados com os avanços da Física; com esse intuito, indicou seu aluno, Harold De Forest Arnold (sem parentesco com Lee de Forest) que conhecia desde 1907 (HODDESON, 1981).

Figura 2.11: Amplificador de Arnold



Esquerda: circuito do amplificador desenvolvido por Arnold. **Direita:** aspecto da válvula.
Fonte: Fagen (1975; p. 259).

Arnold, formado em Física em 1911 pela Universidade de Chicago, foi contratado para trabalhar no departamento de engenharia da *Western Electric Company*, braço de produção dos equipamentos da AT&T, e, nesse mesmo ano, Frank Jewett, Carty e Arnold resolveram

experimentar válvulas. Para isso, Arnold desenvolveu uma válvula na linha de trabalho de Cooper-Hewitt, através do controle do fluxo de elétrons em uma ampola preenchida com vapor de mercúrio; porém, o dispositivo se mostrou insatisfatório para ser usado, tanto para telefonia como para rádio, devido à distorção do sinal de saída e à necessidade de procedimentos de configuração e manutenção de frequência de trabalho (REICH, 1985).

Em janeiro de 1912, o engenheiro Fritz Lowenstein demonstrou seu amplificador para Frank Jewett e Otto Blackwell (também da AT&T), mas nada resultou do encontro. Uma empresa que se interessou pelo dispositivo foi a *General Electric*, que obteve um exemplar e, a partir dele, desenvolveu o próprio dispositivo (AITKEN, 1985). Por fim, as patentes de Lowenstein foram adquiridas pelo *Bell System* (FAGEN, 1975).

John Stone, como foi visto na seção sobre telefonia, tinha pesquisado a técnica de carregamento de cabos telefônicos quando trabalhou na *Bell Telephone Company*. Em 1902, abriu a empresa de radiotelegrafia Stone Company. Em 1911, trabalhando como consultor da AT&T em Nova York, providenciou uma demonstração do amplificador de Forest para os engenheiros da AT&T, que ocorreu nos dias 30 e 31 de outubro de 1912. Na apresentação, Forest não soube explicar detalhadamente o funcionamento do audion, o sinal de saída apresentava distorção, o desempenho era errático e o bulbo do audion apresentava ionização devido a um baixo valor de vácuo, mas, apesar de tudo, o potencial do dispositivo foi percebido prontamente por Arnold, Frank Jewett e Edwin Colpitts. O passo seguinte foi estabelecer um grupo de trabalho formado por Oliver Buckley, Hendrik van der Bijl, William Wilson, Alexander M. Nicolson e com destaque para o papel de Harold Arnold, para identificar as causas dos problemas e aperfeiçoar o dispositivo (BRITAIN, 2009; REICH, 1985). As modificações recomendadas para o aperfeiçoamento do audion foram três: 1) diminuir a incandescência causada pela ionização do gás residual no bulbo, através do emprego de uma bomba de alto vácuo; 2) aumentar o poder de emissão do filamento a temperaturas maiores, prolongando a vida útil do filamento, o que foi feito através da aplicação de óxido de Wehnelt; 3) alterar a geometria da disposição dos eletrodos, possibilitando a criação de campos eletrostáticos com maiores valores de tensão de placa (ATHERTON, 1984; FAGEN, 1975).

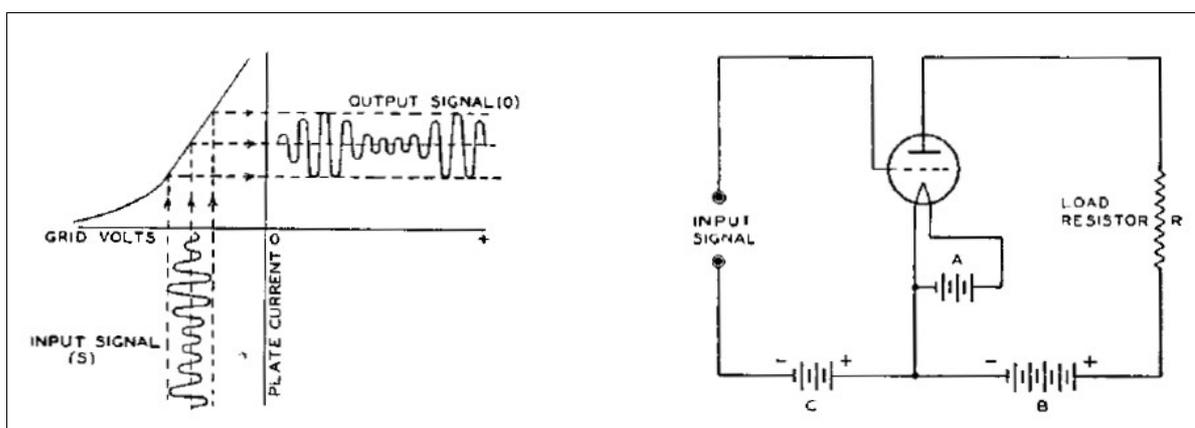
O físico Hendrik van der Bijl (1920) teve grande importância para o estabelecimento das bases teóricas para o projeto de válvulas. Entre 1913 e 1914, fez o levantamento dos parâmetros elétricos do amplificador, elaborando a teoria do seu funcionamento. Escreveu vários artigos com os resultados do trabalho, que posteriormente foram reunidos em um livro destinado a projetistas: *The thermoionic vacuum tube and its applications*. Comentando sobre

os motivos do breve tempo que o audion levou para ser aperfeiçoado, fez a seguinte observação:

Os mais importantes desenvolvimentos da válvula termoiônica a vácuo foram realizados por homens familiarizados com essa teoria [do elétron], e realmente o conhecimento que tinham dos seus princípios fundamentais contribuiu em larga medida para a rapidez com que a válvula termoiônica foi desenvolvida, desde o estágio quase de um brinquedo científico, ao de um dispositivo comercial muito importante. (BIJL, 1920, p. xiii; tradução nossa)

A AT&T comprou os direitos do audion para ser usado nos repetidores telefônicos, deixando de fora o direito de uso em outras aplicações. Em meados de 1913, estavam sendo feitos testes com repetidores usando as válvulas aperfeiçoadas em linhas comerciais e, em 1914, foi completada a linha transcontinental entre Nova York e São Francisco, sendo aberta ao público em 1915 (AITKEN, 1985; FAGEN, 1975).

Figura 2.12: Triodo como amplificador



Esquerda: Curva de resposta típica de corrente de placa x tensão de grade do triodo; **Direita:** Triodo amplificador com as baterias de polarização: A – filamento, B – placa; C – grade.

Fonte: RCA (1934; p. 10, fig. 4, 5).

Paralelamente ao desenvolvimento dos materiais e técnicas de construção das válvulas, em um período relativamente curto, engenheiros, em lugares diferentes, estavam experimentando as várias possibilidades de funcionamento das válvulas. Nesse período foram criados circuitos que configuraram o futuro das técnicas de comunicações eletrônicas das próximas décadas, viabilizando diferentes sistemas característicos do século XX, como o rádio, a TV e o radar.

Para que isso ocorresse, foram aproveitadas as características de corrente e voltagem dos triodos de modo que, dependendo dos valores de polarização aplicados aos seus eletrodos, seria possível fazer com que ele operasse na região linear como amplificador, bem como na

região não-linear, empregada especialmente nos sistemas de rádio, bem como nas aplicações de controle de potência; essa característica técnica pode ser considerada um dos motivos da versatilidade das aplicações das válvulas.

Dentre os circuitos mais significativos criados no período, o oscilador valvulado teve especial importância pela propriedade de gerar ondas contínuas, e, a partir daí, poder ser usado nos transmissores (o que era feito somente através de geradores com tecnologias anteriores) e também nos receptores. Isso foi possível graças à realimentação positiva, em que uma determinada quantidade do sinal de saída de placa retornava à grade de entrada, permitindo a geração de determinadas frequência e amplitude constantes. Em termos comerciais, a técnica de realimentação positiva, usada nos osciladores, também foi utilizada na construção de circuitos que proporcionavam maior ganho para os sinais de antena e foi empregada nos receptores regenerativos e super-regenerativos criados por Edwin Armstrong.

Quadro 2.1: Lista dos descobridores da oscilação segundo país e ano

| <i>Inventor</i> | <i>País</i> | <i>Ano</i> |
|--------------------|-------------|------------|
| Lee de Forest | EUA | 1911 |
| Edwin Armstrong | EUA | 1912 |
| Fritz Lowestein | EUA | 1912 |
| Irving Langmuir | EUA | 1913 |
| Henry Round | Inglaterra | 1913 |
| Alexander Meissner | Alemanha | 1913 |

Fonte: Hong (2001).

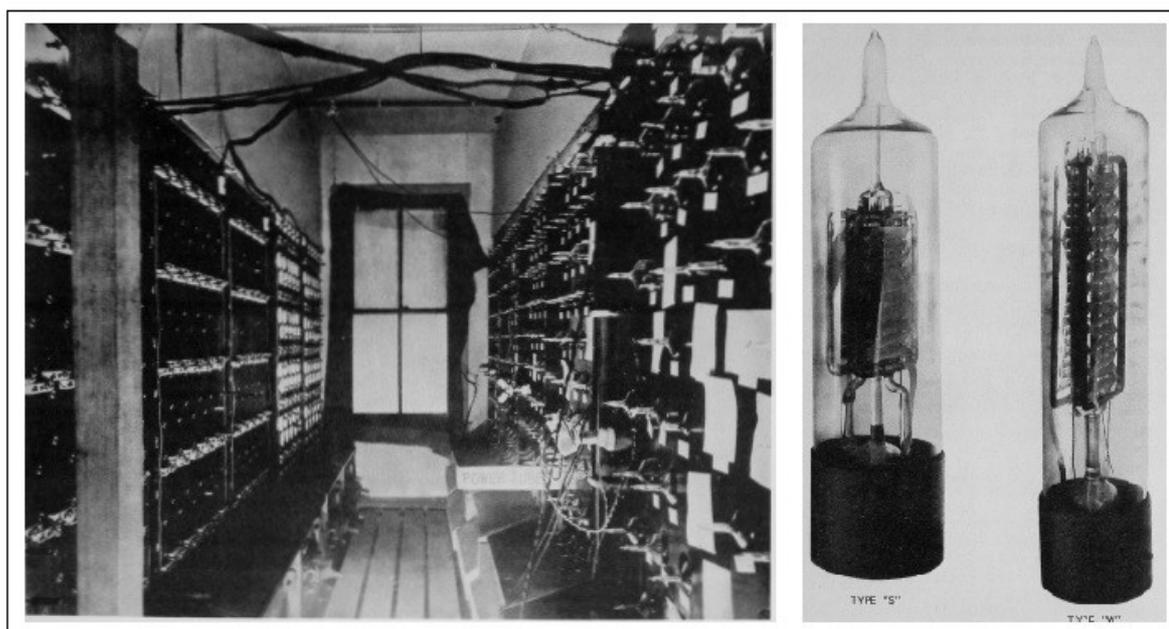
Hong (2001) destaca a importância da descoberta da oscilação, em um período relativamente curto, por alguns pesquisadores, fato cujas consequências para o futuro da história do rádio foram de fundamental importância. Em relação à Alemanha, Blumtritt (2004) observa que o estímulo para a criação de circuitos osciladores por Meissner estava dentro de um projeto de obtenção de hegemonia de poder mundial. Quanto aos Estados Unidos, Frank Jewett, como líder da equipe da AT&T, estimulou a formação de um enlace radiotelefônico comercial entre esse país e a Inglaterra, operando em ondas longas e controlado pela AT&T, com o objetivo de interligar as redes telefônicas da Europa e da América do Norte. Acrescente-se a isso que nos Bell Labs, em 1912, Edwin Colpitts concebeu o amplificador em montagem *push-pull*, que foi usado amplamente nas décadas seguintes em amplificadores de áudio e amplificadores de RF. Em fevereiro de 1914, Colpitts inventou um circuito para gerar

oscilações e modular sinais de alta frequência e, um mês depois, Hartley criou um oscilador valvulado (FAGEN, 1975).

Resumindo, com a adição da grade, o triodo tornou-se capaz de realizar a detecção (demodulação) dos sinais de RF, amplificar os sinais de AF, gerar ondas senoidais e também servir de modulador nos transmissores: todas as funções necessárias para os sistemas de comunicações, servindo de motivação para os seus posteriores aperfeiçoamentos (AITKEN, 1985; GARNER, 1963a).

Com essa situação técnica estabelecida, somada ao sucesso do enlace de telefonia terrestre usando repetidores valvulados, em 1915, foi testado pela AT&T um enlace de radiotelefonia intercontinental, transmitindo voz, em que o estágio final era composto por um banco que podia variar de 300 a 550 triodos montados em paralelo; as válvulas haviam sido especialmente projetadas por Arnold, com potências maiores do que as daquelas usadas nos enlaces telefônicos terrestres, na ordem de 25 a 50 W, proporcionando na antena uma potência de 2 a 3 kW, operando em 50 kHz. O transmissor foi montado no laboratório da Marinha em Arlington (perto de Washington) e os sinais de voz foram ouvidos no Panamá, no Havaí e na França (na Torre Eiffel), com a cooperação do engenheiro militar francês Gustave Ferrié (AITKEN, 1985; FAGEN, 1975; FOREST, 1930).

Figura 2.13: Equipamento da transmissão de radiotelefonia intercontinental (EUA, 1915)



Esquerda: parte do banco de 550 triodos (à direita da imagem) usados na transmissão de 1915.
Direita: válvulas desenvolvidas por Arnold. (FAGEN, 1975).

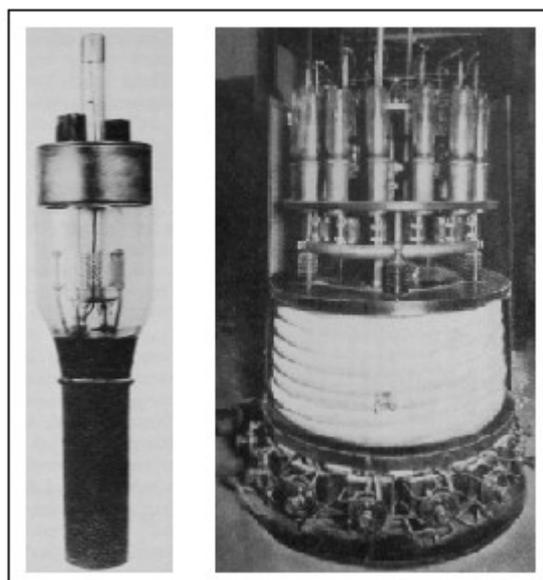
Devido às consequências tecnológicas que resultaram desse sistema, serão descritas as suas características. Três foram as principais dificuldades para a fabricação dessas válvulas: a primeira foi fazer um selo adequado ao vácuo para a junção entre o vidro e o metal; a segunda foi a construção adequada através do vidro para que circulasse o alto valor de corrente do filamento; e a terceira dizia respeito à produção do vácuo necessário para o funcionamento adequado da válvula em tão alta potência (WILSON, 1922).

Quadro 2.2: Parâmetros das válvulas de potência TO-220

| <i>Parâmetros</i> | <i>Valores</i> |
|------------------------|----------------|
| Tensão de placa | 1.000 V |
| Corrente de placa | 1,35 A |
| Potência máxima/média | 10 kW/5kW |
| Tempo para fazer vácuo | 12 h |

Fonte dos dados: Fagen (1975)

Figura 2.14: A válvula TO-220



Esquerda: válvula TO-220. **Direita:** montagem em carrossel com a tubulação para refrigeração a água abaixo. (FAGEN, 1975, p. 398, 404).

A técnica de selagem do vidro com o metal foi de extrema importância, pois tornou possível fabricar válvulas com valores de potência bem elevadas, na ordem de centenas de kW. Isso fez com que os transmissores de centelha, arco e eletromecânico fossem sendo substituídos, e, sobretudo, viabilizou a construção de transmissores de potência para a indústria de radiodifusão que nascia por essa época, permitindo um maior alcance das transmissões da futura indústria do rádio.

2.2 DESENVOLVIMENTO E DIVERSIFICAÇÃO DAS VÁLVULAS

A Primeira Guerra Mundial criou uma grande demanda por válvulas confiáveis; os métodos de processamento estavam melhorando rapidamente, em parte como resultado do trabalho do grupo de Langmuir na *General Electric*. Quando os EUA entraram na guerra, em 1917, os engenheiros das empresas redesenharam as válvulas para permitir a produção em grande escala usando as máquinas para fabricação de lâmpadas modificadas. A produção anual da indústria de válvulas dos EUA, que era de 400 em 1909, passou para 1.716 em 1913, 6.000 em 1915 e 30.000 em 1918; nesse mesmo ano, Inglaterra, França e Alemanha produziram no conjunto mais de 300.000 válvulas. Em 1920, os EUA produziam cerca de 2 milhões de válvulas por ano apenas para suprir a crescente demanda por receptores de rádio (REDHEAD, 2005).

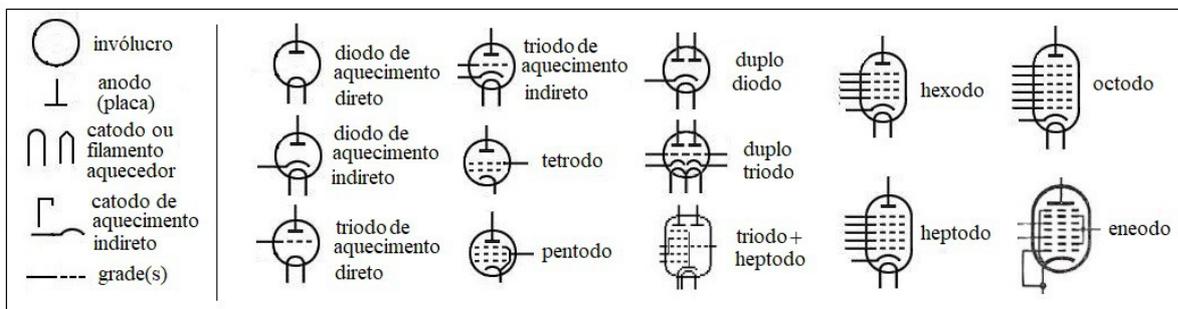
As técnicas de construção de válvulas sofreram muitas mudanças à medida que elas foram se diversificando. Originalmente, as válvulas eram montadas em invólucros de vidro quase idênticos aos usados nas lâmpadas incandescentes. Mais tarde, as bases foram aperfeiçoadas com a introdução dos pinos que permitiam o encaixe das válvulas nos soquetes (em vez de serem aparafusadas, como as lâmpadas). Os invólucros de metal tornaram-se populares porque tinham as vantagens da blindagem interna e do menor risco de se quebrar do que os tipos de vidro. Formas especiais foram projetadas para válvulas de alta frequência, para reduzir o comprimento dos eletrodos, chegando às válvulas miniatura (GARNER, 1963a). Com as dissipações de placas na faixa de quilowatts para alguns tipos de válvulas, foi necessário fornecer um meio de remover o calor gerado, para evitar que a válvula derretesse. As válvulas transmissoras de menor potência eram resfriadas a ar por convecção; as de média potência continham aletas radiantes, e as de alta potência eram equipadas com jaquetas para refrigeração a água (GARNER, 1963b).

Do ponto de vista da dinâmica das invenções, a disputa pelas patentes se dava em ritmo crescente, mas agora em outro quadro. O papel do inventor independente ou acadêmico diminuiu, dando lugar aos programas de pesquisa dos laboratórios industriais das grandes corporações como a AT&T e a GE, nos Estados Unidos, e a Siemens e a Telefunken, na Alemanha. Agora, o inventor pertencia aos quadros da empresa, que iria deter os direitos de fabricação e comercialização dos novos produtos (NOBLE, 1979). Embora os Estados Unidos e a Alemanha tenham dominado o cenário internacional no campo das válvulas, outros países, como Inglaterra, Itália, França, Holanda e Japão, tiveram participações importantes relacionadas com seus mercados internos concatenados com projetos coloniais.

2.2.1 Válvulas para aplicações em baixas e médias frequências

Durante todo o período de uso massivo das válvulas, as mais difundidas foram as de baixa a média potência, projetadas principalmente para o uso em receptores de rádio e televisão. Esse grupo abrange todos os tipos básicos de diodos, triodos, tetrodos, pentodos, válvulas de potência e multifuncionais (com uma estrutura que combinava o funcionamento de mais de uma válvula). Nos primeiros tempos do rádio, basicamente as mesmas válvulas eram usadas para transmissão e recepção, tendência que permaneceu até a década de 1960. Embora os dois tipos fossem considerados classes distintas, existia uma certa superposição entre as válvulas transmissoras e receptoras de maior potência, no que se referia à estrutura e às características elétricas. Também existiam semelhanças entre válvulas transmissoras e receptoras no que diz respeito aos tipos básicos citados, que apareciam nos dois grupos; e ambos usavam tanto aquecimento direto quanto indireto do catodo. As diferenças apareciam nos detalhes: as válvulas de transmissão, em geral, eram feitas com materiais mais resistentes e, por isso, eram maiores, mais pesadas e mais caras do que as receptoras correspondentes (GARNER, 1963b).

Figura 2.15: Símbolos de algumas válvulas básicas



O *triodo* teve um rápido desenvolvimento na Europa a partir do início da guerra de 1914. Na Inglaterra, já existiam os modelos desenvolvidos por Henry J. Round, engenheiro da Marconi, empregados em alguns aparelhos dessa empresa; o *British Post Office* usou os triodos para repetidores de telefonia, e o exército, durante a guerra, em equipamentos de rádio militar. Mas o triodo europeu de maior sucesso foi o chamado “francês” ou triodo TM – *Télégraphie Militaire* (STOKES, 1997).

A válvula TM foi criada pela equipe de pesquisadores e técnicos reunida pelo coronel Gustave Ferrié, então diretor da *Télégraphie Militaire*, criador das principais estações

telegráficas militares da França, e que estava interessado na aplicação das invenções de Forest e Fessenden para o aperfeiçoamento do sistema de comunicações militares francês. Na equipe estavam o capitão François Péri, ex-chefe do serviço de rádio na Indochina, inventor e ótimo artesão; o físico Henri Abraham, projetista das válvulas; Jacques Biguet, inventor e diretor da fábrica de vidros para lâmpadas Grammont; e o engenheiro Paul Pichon, que entregou a Ferrié os audions com que foram feitas as pesquisas iniciais. Em 1914, Abraham e Péri criaram uma válvula inspirada na pliotron (que será vista adiante); ainda nesse ano, Abraham fez um triodo que começou a ser fabricado pela Grammont em 1915. Enquanto isso, Péri e Biguet criaram outro modelo, cuja patente registraram em outubro de 1915, e que começou a ser fabricado pela Grammont em novembro de 1915. Para evitar descontinuidades na produção, Ferrié contratou também a *Compagnie Générale d'Électricité* (CGE), que começou a fabricar a TM em abril de 1916. A TM tornou-se rapidamente a válvula-padrão entre os exércitos aliados da Primeira Guerra, por sua robustez e pela constância de suas características elétricas. Em torno de 1918 e 1919, a produção das duas fábricas juntas chegava a cerca de 1.100.000 válvulas TM por ano. Por volta de 1923-1924, com o aumento da demanda causado pelo início da radiodifusão, esse total chegou a 1.800.000 (CHAMPEIX, 1980). A produção de uma versão inglesa, chamada “R”, começou em 1916, em várias fábricas de lâmpadas (GEC-Osram, B.T-H Edison, Met-Vick, Mullard), e dela foram desenvolvidos vários modelos. Após a guerra, as patentes da TM foram compradas pela Marconi, que as usou como base para a maioria de seus projetos de válvulas (STOKES, 1997).

Os Estados Unidos entraram na guerra em 1917, e este fato provocou uma grande expansão na produção de válvulas no país. Antes desse momento, o rádio estava sendo desenvolvido para fins militares, mas a demanda de válvulas era suficientemente pequena para ser satisfeita por duas empresas: a De Forest e a *Western Electric*. Com o início da guerra, o governo garantiu a liberdade de direitos para qualquer empresa que quisesse produzir válvulas para fins militares. Nesse momento, a *General Electric* e a *Westinghouse* entraram no ramo das válvulas, com uma capacidade de produção que permitiu à GE atender ao primeiro pedido do *Signal Corps*, de 80.000 válvulas transmissoras, passando, em seis meses, de uma produção de 500 para 6.000 unidades por semana. Essas válvulas foram desenvolvidas pela própria GE, pois o modelo de Forest não se adaptava às máquinas de fabricação de lâmpadas (STOKES, 1997).

A Primeira Guerra também criou uma demanda por válvulas de pequenas dimensões para melhorar o desempenho das comunicações em alta frequência; esse tipo de válvula foi aperfeiçoado nas décadas seguintes e usado, tanto em aplicações militares, quanto em

comerciais. As miniválvulas foram lançadas na Inglaterra pela Marconi: os tipos Q e V24, de Henry J. Round, usadas respectivamente como detector e amplificador de RF. Em 1917, a *Western*, nos Estados Unidos, assumiu a tarefa de criar e produzir válvulas e aparelhos de comunicação para as forças armadas dos Estados Unidos. Um dos projetos era uma válvula com a menor exigência de energia possível, para ser usada em equipamentos a bateria, e Hendrik van der Bijl desenvolveu o triodo tipo N, que foi a primeira válvula realmente miniatura. Com o fim da guerra, Bijl adaptou o projeto para um modelo simplificado que patenteou em 1919; a válvula 215A (apelidada *peanut* por causa do seu feitio de vagem de amendoim) foi fabricada a partir do início dos anos 1920 pela *Western*. A *peanut* media 6,4 cm de comprimento total e 1,6 cm de diâmetro; tinha o catodo com cobertura de óxido no centro, circundado pela grade constituída por um fio em espiral, e, em torno desta, o anodo cilíndrico; consumia um décimo da energia gasta pelas válvulas comuns, podendo ser operada por uma única pilha: esta característica fez com que a *peanut* fosse muito apreciada pelo setor de produção de rádios domésticos, que na época eram geralmente a bateria (STOKES, 1997; VERMEULEN, 1998). Com a criação dessas válvulas, constata-se a preocupação precoce com a miniaturização, que terá implicações para a construção de futuros equipamentos, notadamente os de consumo.

Figura 2.16: A válvula *welsh peanut*

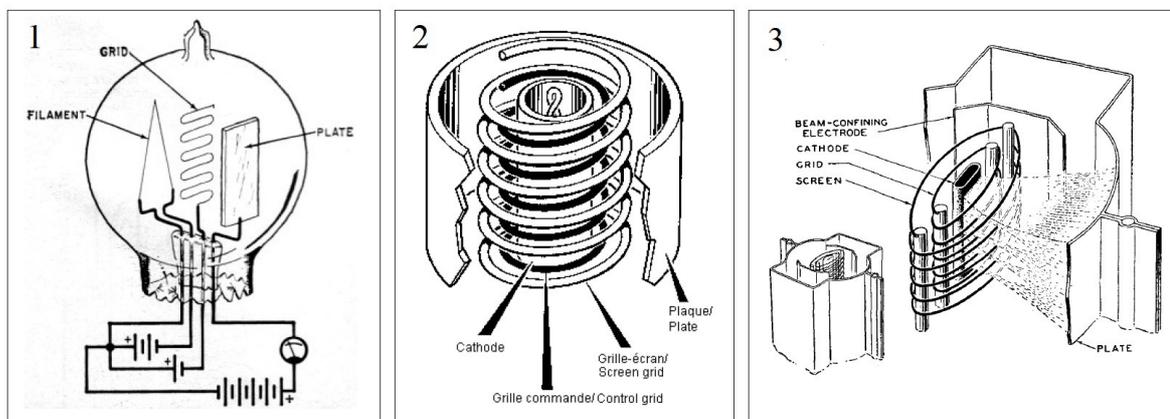


Válvula *peanut* WT501 (triodo sem grade): criada em 1923, foi uma tentativa de contornar a patente de Forest, pondo a grade fora do envoltório (um fio que era enrolado na parte estreita do bulbo). Media 62 mm x 19 mm; a voltagem do filamento era de 4 a 6 V e a da placa, de 16 a 22,5V; o consumo era de até meio ampère (WELSH, 2019).

Logo após ter sido inventado, o diodo foi substituído pelo triodo, que foi o primeiro tipo de válvula a entrar em produção industrial. Entretanto, o triodo apresentava deficiências, como a distorção de sinais em frequências mais altas. A primeira tentativa de solução foi forçar o triodo a operar como um diodo, mas isso não era satisfatório. Enquanto a indústria

lidava com essa questão, outro problema surgiu: os receptores de rádio, que antes funcionavam com bateria, passaram a ser alimentados pela rede elétrica: em 1928, apenas 11% dos rádios produzidos eram operados a bateria, e esses eram principalmente portáteis. Mas logo foi descoberto que, se o diodo fosse operado em corrente alternada em vez da contínua das baterias, podia ser ouvido um zumbido proveniente da rede. Para resolver o problema, foi utilizado um invento patenteado pela *Western Electric* em 1915: o catodo aquecido indiretamente. Com ele, foi desenvolvido, em 1926, o **diodo detector de aquecimento indireto**, com três elementos: o catodo (um cilindro revestido de óxido), o anodo (placa) e um filamento cuja função era aquecer o catodo. Esse tipo de catodo tinha duas vantagens: primeiro, a energia necessária para aquecê-lo foi reduzida à metade; segundo, o filamento podia ser aquecido por corrente alternada, de modo que os aparelhos de rádio podiam operar diretamente a partir da rede elétrica. Essa inovação teve um grande impacto nas vendas de aparelhos de rádio e, portanto, na produção de válvulas receptoras (GARNER, 1963a; REDHEAD, 2005; STOKES, 1997; WYATT, 2019).

Figura 2.17: Vistas de triodo e tetrodos



Legenda: 1 – triodo (GARNER, 1963a). 2 – tetrodo (TETRODES, 2019). 3 – tetrodo de feixe dirigido (RCA, 1947).

Outro desenvolvimento surgido na década de 1920 foi o **tetrodo**, criado para corrigir deficiências do triodo. Após a 1ª Guerra, o exército alemão procurava por uma válvula que pudesse operar com baixa voltagem de placa para ser usada em equipamentos portáteis de campo, com baterias menores e, portanto, menos volumosos. Isso levou à pesquisa feita por Walter Schottky quando trabalhava na Siemens & Halske. Após uma tentativa de neutralizar o efeito da capacitância com a adição de um circuito exterior ao triodo, o passo seguinte foi alterar a estrutura da válvula. Schottky patenteou uma primeira versão em 1915,

posicionando a nova grade entre o filamento e o catodo, com o objetivo de diminuir os efeitos da *carga espacial* (*space charge*), fenômeno descoberto por Langmuir, que impedia que um maior número de elétrons chegassem à placa, pois eram repelidos pela nuvem eletrônica (de carga negativa) formada próximo ao catodo, diminuindo assim a capacidade de amplificação. Na segunda versão, de 1917, foi adicionada outra grade que atuava como uma blindagem entre a grade de controle e a placa, com isso reduzindo a capacitância entre a grade e a placa. Em 1923, a Philips foi a primeira empresa a fabricar os tetrodos. Durante a década de 1930, foram desenvolvidos diversos tetrodos com características elétricas e focos de operação diferentes, como os lançados em 1931, adaptados para discriminar os sinais de estações de radiodifusão operando em frequências muito próximas, o que era um problema crescente nas grandes cidades (GARNER, 1963a; STOKES, 1997; TYNE, 1977).

A grade de blindagem do tetrodo requeria, para operar, uma quantidade razoável de tensão que, no entanto, não contribuía para a amplificação do sinal. Isso levou ao desenvolvimento do tetrodo de feixe dirigido, patenteado em 1932, na Inglaterra, por Cabot Bull e Sidney Rodda, da EMI, como um amplificador com a capacidade de reduzir os efeitos de emissões indesejadas. Conforme podemos ver na Figura 2.17 (desenho 3), eletrodos de focalização foram adicionados para modelar os feixes resultantes e confinar o fluxo de elétrons entre os fios da grade. A válvula resultante tinha correntes de grade muito menores que os tetrodos anteriores, mas podia manipular energia comparável, sendo portanto, mais eficiente. As válvulas de feixe dirigido foram amplamente utilizadas em RF e AF (GARNER, 1963a; STOKES, 1997).

A operação do tetrodo revelou um efeito inesperado. Para que o controle fosse eficaz, a grade de blindagem recebia uma carga positiva que acelerava os elétrons, fazendo com que eles atingissem a placa com intensidade suficiente para deslocar outros elétrons. Desta forma, a placa se tornava um emissor secundário de elétrons. Com a combinação adequada de tensões da placa e da grade de blindagem, a placa emitiria mais elétrons do que os recebidos, e estes retornariam à grade de blindagem, reduzindo a corrente da placa. O resultado era a instabilidade e a tendência a oscilar quando o tetrodo era usado como amplificador. O problema foi resolvido nos Países Baixos, entre 1926 e 1928, na Philips, por Bernardus Tellegen (engenheiro) e Gilles Holst (físico), que criaram o *pentodo*. Para reduzir ou eliminar a emissão secundária da placa, foi adicionada, entre a grade de blindagem e a placa, uma terceira grade conectada ao catodo. Essa nova grade, a supressora, servia para repelir os elétrons secundários de volta para a placa sem afetar significativamente o fluxo normal de catodo para a placa (DUMMER, 1983; GARNER, 1963a).

Assim completava-se um ciclo de aperfeiçoamentos do conjunto de válvulas amplificadoras que se constituiriam como padrão nos equipamentos eletrônicos a serem construídos nas décadas seguintes.

Figura 2.18: Válvulas múltiplas



Esquerda: válvula de Ardennes num receptor (RADIO, 2019). **Direita:** duplo triodo 6NS7 (6SN7, 2019; RADIOMUSEUM, 2019, 6SN7).

Trilhando por um caminho de evolução paralela aos amplificadores mencionados, a preocupação com a compactação foi outro tópico de atenção dos projetistas, visando diminuir o número de dispositivos dos equipamentos. Durante os estudos do comportamento das válvulas, foi verificado que um único catodo poderia ser usado para mais de uma função, se outros eletrodos fossem adicionados fora da faixa de controle normal dos elementos da grade. Essa descoberta levou à criação de válvulas polivalentes em duas configurações diferentes. A primeira foi a **válvula múltipla**, cujo pioneiro foi o alemão Manfred von Ardenne que, em 1923, patrocinado pela *Loewe Radio Company*, criou uma válvula que combinava três triodos num único invólucro, integrando as funções de receptor e amplificador para telegrafia sem fio; em 1926, a Loewe lançou um rádio popular construído com essa válvula. O diodo duplo, ou seja, com dois anodos e/ou catodos, foi lançado nos Estados Unidos, em 1931, pela Grisby-Grunow, e na Inglaterra, em 1933, pela Mullard, subsidiária da Philips. Outros tipos de válvulas foram criadas em sequência, como o diodo-triodo, lançado em 1933; o triodo-hexodo, em 1934; o triodo-heptodo, em 1936; e o duplo triodo, em 1945. Em meados da década de 1930, vários fabricantes estavam produzindo regularmente válvulas com

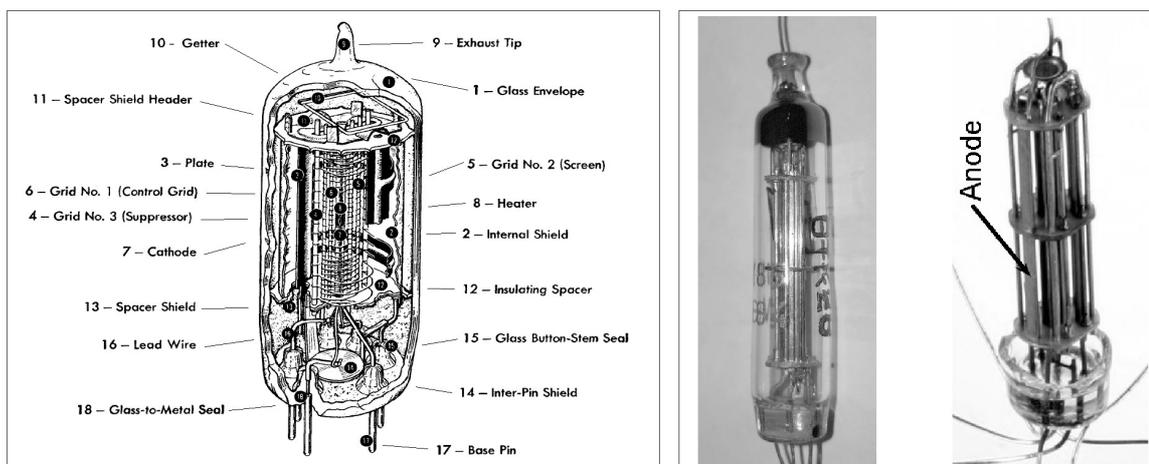
combinações de diodos simples ou duplos com triodos, tetrodos e pentodos. A importância desse processo foi que alguns tipos de válvulas de estrutura múltipla foram usadas também na primeira geração de computadores, como o ENIAC, lançado em 1946. Apesar de os principais desenvolvimentos de válvulas múltiplas terem ocorrido por volta da década de 1930, o conceito permaneceu presente com a necessidade de compactação dos aparelhos de consumo pois, em 1961, a *General Electric*, visando competir com os transístores, lançou a compactron, produzida em diversos modelos, com diferentes combinações de até quatro válvulas dentro de um único envoltório, de modo a cobrir todas as funções de um aparelho de rádio, televisão ou equipamento de áudio de alta-fidelidade (*high fidelity – hi-fi*) com um pequeno número de válvulas (GARNER, 1963a; RADIOMUSEUM, 2019; RCA, 1934; STOKES, 1997; WYATT, 2019).

As outras válvulas multifuncionais foram as chamadas *multigridd*, formadas por diferentes combinações de diodos, triodos, tetrodos e pentodos dentro do mesmo invólucro, mas com um único par catodo-anodo. À medida que os circuitos de receptores de rádio se tornaram cada vez mais complexos, as válvulas multifuncionais tornaram-se cada vez mais populares, pois permitiam fazer receptores compactos sem comprometer a sofisticação do circuito (GARNER, 1963a). O conceito derivou do primeiro modelo de rádio, criado em 1918 por Edwin Armstrong, que continha apenas triodos em um receptor super-heteródino: um deles operava como oscilador e o outro, como misturador. Em 1933, a Ferranti, na Inglaterra, e a RCA, nos Estados Unidos, lançaram o heptodo. O hexodo foi desenvolvido em 1934 pela Osram, na Alemanha, como um misturador projetado para ser usado com um triodo oscilador separado. Em 1938, a Mullard criou o octodo (triodo-pentodo) pela adição de uma grade extra ao heptodo, para melhorar a separação entre antena e oscilador e reduzir o consumo de energia dos rádios de pilha que começavam a ser desenvolvidos (GARNER, 1963a; STOKES, 1997). Em 1949, o laboratório de válvulas da Philips desenvolveu o eneodo (tetrodo-pentodo) para detecção de sinal de FM em receptores de rádio e televisão (HOOIJMANS, 2019).

O processo de criação de válvulas múltiplas, cada vez mais complexas e com maior variedade de funções em um espaço cada vez menor, apontou para o que ocorreria décadas mais tarde com as crescentes escalas de integração dos circuitos integrados.

Depois de algum tempo sem receber atenção após a criação da *peanut*, as *válvulas miniatura* voltaram a ser produzidas na década de 1930. A pesquisa estava sendo feita por grupos diferentes e, podem ser identificadas duas cenas principais: uma estadunidense, nos laboratórios da RCA e Bell Labs, e outra inglesa, no laboratório da GEC (*General Electric Corporation*).

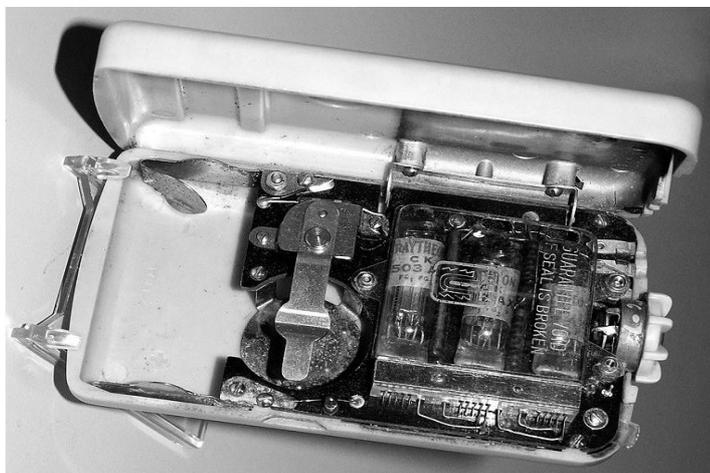
Figura 2.19: Válvulas miniatura e subminiatura



Esquerda: válvula miniatura (RCA, 1950, p. 64). **Direita:** válvulas subminiatura russas (*rod tubes*) com anodo e grade feitos com bastões de metal em torno do catodo (RADIOMUSEUM, 2019, ljl8b, Russian subminiature tubes).

Entre 1935 e 1940, as empresas Marconi, Hivac e Raytheon, na Inglaterra, além da Hytron e da RCA, nos Estados Unidos, desenvolveram válvulas miniatura, entre as quais devem ser destacadas algumas da Hivac e as válvulas *Bantam* da Hytron, destinadas ao uso em aparelhos de surdez. A Alemanha também produziu válvulas miniatura usadas na Segunda Guerra, seguindo o caminho geral da miniaturização no período: melhorar o desempenho nas faixas de VHF e UHF. Logo após a guerra, empresas como RCA, Raytheon e Sylvania continuaram produzindo uma variedade de válvulas miniatura para os receptores de rádio domésticos. Na Europa, foi retomado o desenvolvimento das válvulas subminiatura para aparelhos auditivos, lançadas na Inglaterra entre 1953 e 1957 (STOKES, 1997).

Figura 2.20: Aparelho auditivo com válvulas miniatura, cerca de 1947

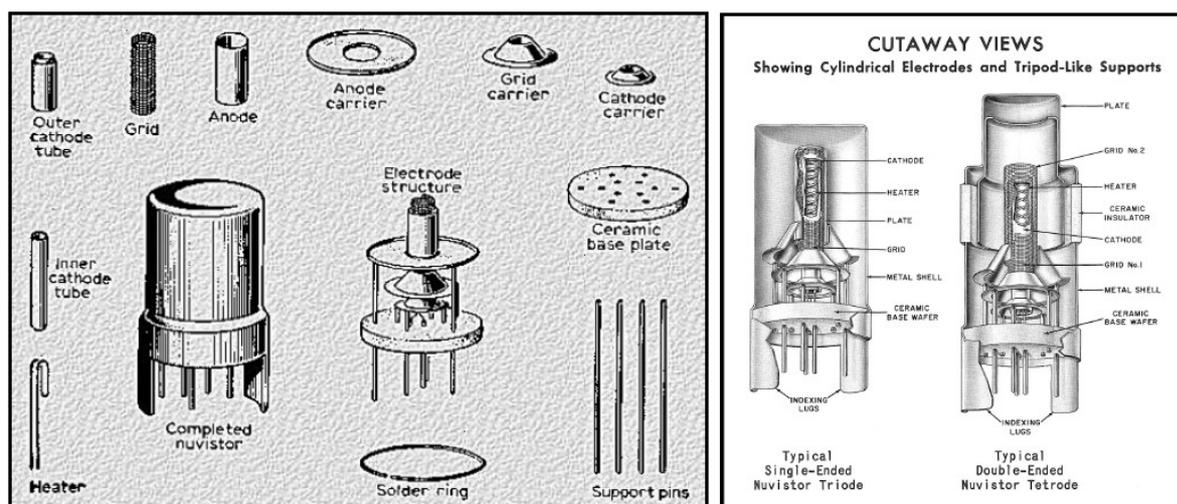


Fonte: HAUPT (2014).

Na União Soviética, nas décadas de 1950 e 1960, foram produzidas diversas *válvulas subminiatura* pela empresa Svetlana. Embora fossem reconhecíveis como pentodos, sua estrutura era bem diferente das válvulas europeias ocidentais e estadunidenses. O catodo era um filamento comum, mas algumas válvulas tinham um catodo duplo; os outros elementos eram bastões metálicos. Dois deles, opostos ao catodo, formavam o anodo. Entre o catodo e o anodo, vários tubos eram dispostos de modo a funcionar como as grades nas válvulas comuns. As válvulas eram empregadas em circuitos misturadores e osciladores, e aparentemente foram usadas apenas em aparelhos de comunicação militares (SOUSA, 2019; SVETLANA, 2019).

Diante da entrada dos transistores no mercado, os últimos projetos de válvulas receptoras foram feitos pela RCA que, em 1960, lançou dois tipos de válvulas miniatura: a nuvistor e uma válvula de deflexão de feixe.

Figura 2.21: Nuvistor



Esquerda: elementos constituintes. **Direita:** vista interna. (Niewiadomski, 2019).

As *nuvistores* eram triodos, tetrodos etc., com invólucro de metal, usados como amplificadores, misturadores ou osciladores em VHF e UHF. Eram muito menores do que as válvulas miniatura anteriores, e do tamanho aproximado dos primeiros transistores. Sua montagem era totalmente diferente das outras válvulas: os eletrodos de metal eram montados formando um “sanduíche” com isoladores de cerâmica. As nuvistores foram usadas em receptores VHF e UHF, em equipamentos de radar e aplicações semelhantes, embora alguns tipos tenham sido projetados para receptores de TV e rádios FM (GARNER, 1963a; STOKES, 1997).

Em 1946, Robert Adler, engenheiro da *Zenith* (em Chicago), criou uma válvula

moduladora de fase baseada num novo conceito: o deslocamento de fase (12 a 16 vezes maior que nos moduladores convencionais) era feito por deflexão eletromagnética, produzida por uma bobina posta em torno do invólucro. Além dos eletrodos e das grades usuais de um pentodo (exceto pelo fato de ter dois anodos), a válvula possuía dois eletrodos defletores usados para focalizar e direcionar o feixe de elétrons: essa estrutura deu nome ao tipo - *válvula de deflexão de feixe (beam deflection tube)* -, e, em 1947, a válvula foi registrada como phasitron pela *General Electric*. A phasitron foi usada como modulador, demodulador e conversor, com diversas aplicações como: modulador de fase em transmissores de FM, demodulador em receptores de TV a cores, e gerador de caracteres para vídeo em modo texto nos primeiros monitores de computador (ADLER, 1947; KNIGHT, 1960).

2.2.2 Válvulas para aplicações em altas frequências

No seu início, os sistemas de rádio operavam na parte inferior do espectro eletromagnético, em grande parte em função da limitação dos transmissores que usavam as antigas tecnologias. Posteriormente, os transmissores valvulados, por um lado, e o aumento da demanda de serviços, por outro, fizeram com que faixas mais altas do espectro fossem sendo ocupadas de forma paulatina. Na década de 1920 foram inaugurados os serviços de ondas curtas, cuja propagação se dava via ionosfera, usando a faixa de HF (3 a 30 MHz). Alguns experimentos foram feitos por vários pesquisadores para a criação de válvulas que operassem em altas frequências. Mas a motivação para a utilização das faixas de VHF (30 a 300 MHz) e UHF (300 a 3.000 GHz) esteve ligada em grande parte às necessidades da radiotelefonia, para acomodar múltiplas conversações simultâneas, e do surgimento dos sistemas de TV que, para tornar-se comercial, exigia uma faixa de dezenas de MHz, capaz de acomodar vários canais para transmitir áudio e vídeo de alta definição. Além dessas, a tecnologia das válvulas sofreu outro tipo de influência: o cenário político da década de 1930 era de tensão e, por conta disso, foram sendo desenvolvidos sistemas de radar e radiolocalização, a princípio, na faixa de VHF; posteriormente, grupos de pesquisadores em diferentes países, sem comunicação entre si, desenvolveram válvulas para operarem com alta potência na região de micro-ondas, de poucos giga-hertz, para serem usadas em sistemas de radar de alta definição. A necessidade de operar em altas frequências mostrou ser um problema cuja resolução levou à criação das *válvulas de alta frequência* (SARKAR, 2006; PRICE, 2017).

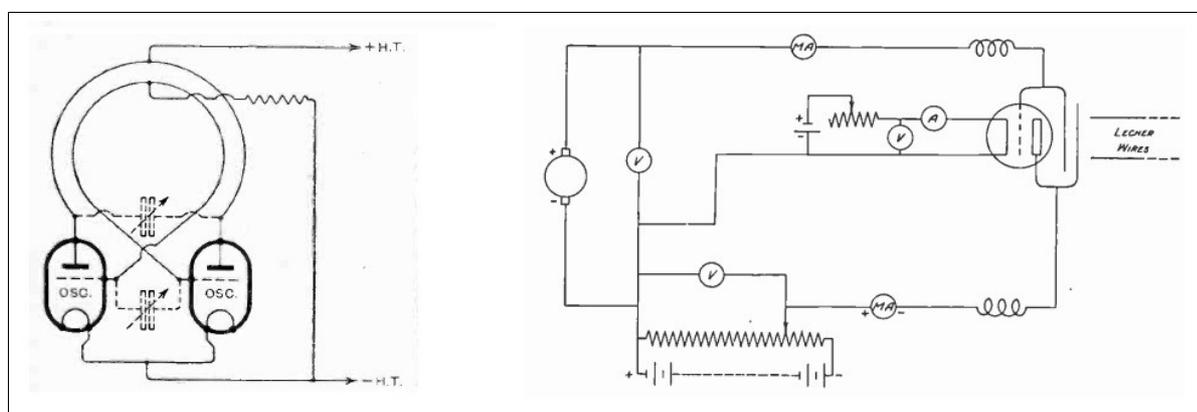
Começamos com a investigação para a construção de circuitos experimentais de

osciladores capazes de gerar altas frequências usando as válvulas convencionais, muito acima daquelas que os sistemas de rádio comercial estavam utilizando. A limitação desses experimentos era que geravam potências de saída baixas.

Os físicos alemães Henrich Barkhausen e Karl Kurtz obtiveram ondas de 30 cm (1 GHz) aplicando alta voltagem na grade de um triodo (BLANCHARD; GALATI; GENDEREN, 2013). Em 1920, na Universidade de Dresden (Alemanha), Barkhausen e Kurtz observaram um fenômeno que ficou conhecido como efeito B-K, que consistia na ocorrência de oscilações irregulares na corrente de anodo, o que Barkhausen interpretou como oscilações autoexcitadas dentro da própria válvula e não em um circuito ressonante externo. Usando um triodo, o anodo foi colocado em um potencial negativo elevado em relação à grade; havia o efeito do tempo de trânsito em que os elétrons ficavam “dançando” próximo à grade. O dispositivo de Barkhausen foi utilizado em osciladores locais de alta frequência e instrumentos de medida; foi a primeira válvula a fazer uso da modulação da velocidade dos elétrons ou tempo de trânsito dos elétrons dentro do invólucro (SARKAR, 2006). Um oscilador de Barkhausen-Kurz foi utilizado no primeiro enlace experimental de radiotelegrafia bidirecional de micro-ondas entre a França e a Inglaterra, através do Canal da Mancha, em 1931 (FREE, 1931). O circuito oscilador Barkhausen-Kurz pode ser visto na figura 2.22.

O coronel Gustave Ferrié (que já vimos ao falar dos triodos TM) e o capitão René Mesny foram pioneiros na utilização de válvulas nos sistemas de rádio da França na Primeira Guerra; Mesny, em 1923, usou dois triodos comuns, em montagem simétrica. Esse tipo de circuito foi usado com sucesso com ondas de frequência abaixo de 100 MHz (3 metros), usando válvulas comuns (WHITEHEAD, 1933).

Figura 2.22: Osciladores de alta frequência

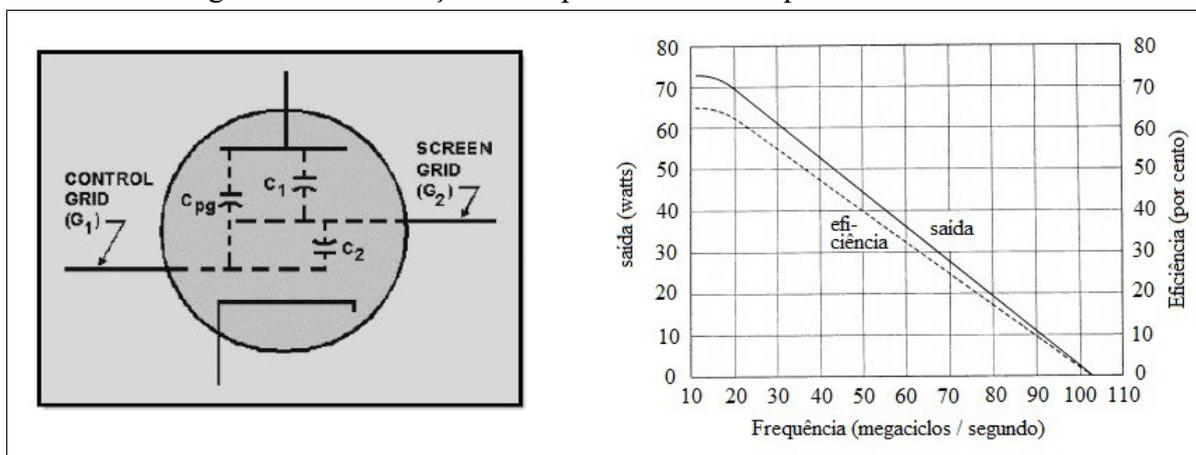


Esquerda: circuito de Mesny (WHITEHEAD, 1933, p. 305, fig 5). **Direita:** polarização da válvula usada em um oscilador Barkhausen-Kurz (DYTRT, 1935, p. 242).

Kelly e Samuel (1935), quando trabalhavam no projeto de novos tipos de válvulas nos Bell Labs, no começo da década de 1930, verificaram que havia um limite em torno de 20 a 30 MHz de frequência de operação dos tetrodos e pentodos de RF, que servia bem aos serviços de rádio; mas acima dele, o ganho caía de forma drástica. Isso se devia a alguns motivos:

- a) o tempo de oscilação era maior que o tempo de trânsito dos elétrons entre o catodo e o anodo, e o tempo de oscilação estava na ordem de menos de um microssegundo para as válvulas de potência da época;
- b) as capacitâncias intereletródicas;
- c) as indutâncias formadas pelos próprios fios que ligavam os eletrodos aos terminais;

Figura 2.23: Limitação da resposta em alta frequência dos triodos



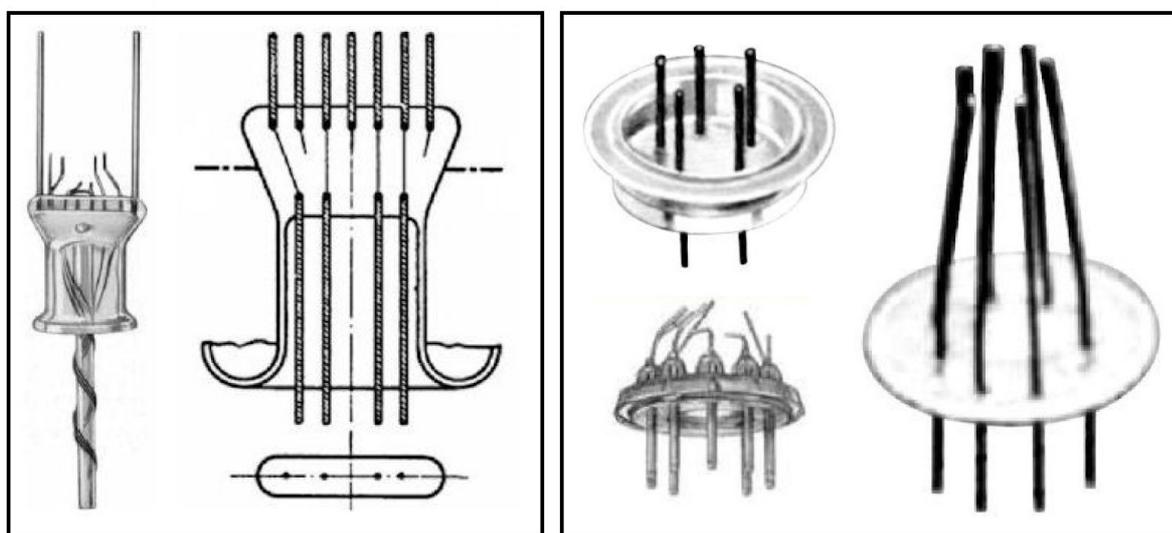
Esquerda: capacitâncias intereletródicas de um triodo (NAVY, 2012, Module 6, p. 1-68). **Direita:** potência de saída x eficiência de anodo com função da frequência para um triodo 242A da *Western Electric* (KELLY; SAMUEL, 1935).

Para contornar a limitação do funcionamento nas altas frequências, era necessário modificar o projeto de construção da válvula para atender aos requisitos por vezes contraditórios, como a necessidade de obter baixas capacitâncias intereletródicas, a diminuição das dimensões para reduzir o tempo de trânsito dos elétrons, alto fator de amplificação e baixa resistência de placa. A partir desse esforço, acabaram sendo criados alguns novos tipos de válvulas, sendo a maioria triodos e pentodos, com encapsulamentos inusitados para a época (ASE, 2019, Vacuum tube list, T05).

Na técnica inicial de fabricação das válvulas, herdada da produção das lâmpadas, a haste era montada radialmente, formando o *pinch stem* (haste comprimida): os condutores eram inseridos na haste de vidro e posicionados paralelamente por uma guia; então, a haste era aquecida e pressionada para fundir o conjunto em uma peça única de vidro, para então os

condutores serem soldados nos pinos do soquete. Essa construção tinha duas desvantagens: primeiro, cada condutor apresentava autoindutância dependente do seu comprimento; segundo, como os condutores ficavam paralelos e muito próximos dentro da haste, havia uma capacitância entre os eletrodos. Além disso, a capacitância na haste dependia da constante dielétrica do vidro, que varia com a temperatura. Somados, esses fenômenos limitavam a possibilidade de operação da válvula (DÖRENBERG, 2019). Uma primeira modificação de projeto para contornar esses problemas consistiu em alterar a geometria interna das válvulas, diminuindo a distância entre os eletrodos.

Figura 2.24: Tipos de bases de válvulas



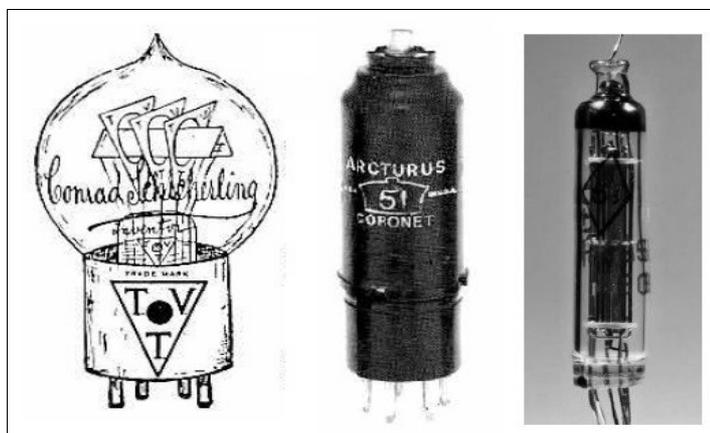
Esquerda: *pinch stem*. **Direita:** *button stem* (DÖRENBERG, 2019).

Uma das alterações implantadas foi a modificação das bases sobre as quais o corpo de vidro das válvulas até então era montado, criando válvulas sem soquetes, somente com os invólucros de vidro: *glass based valve* ou “*all glass*” (DÖRENBERG, 2019).

Outra modificação foi a forma do invólucro. As válvulas com encapsulamento tipo *button* foram empregadas como receptoras de equipamentos comerciais mas, diante da necessidade dos sistemas de radar que começavam a surgir, a partir da década de 1930, foram criadas válvulas especiais, com geometrias bem diferentes das convencionais, para trabalhar na região de UHF, que procuravam superar as limitações citadas acima. O projeto dessas válvulas foi objeto de cuidadosos estudos por alguns laboratórios de pesquisa de fabricantes tradicionais de válvulas, como a GE e a RCA. O resultado foi a criação de invólucros inusitados, cujos nomes em inglês lembravam o seu formato, como *acorn* (o fruto do carvalho, cujo formato ela lembrava), *doorknob* (maçaneta, por seu formato e tamanho),

lighthouse (farol), *can oil* (lata de óleo), *pencil* (lápiz) etc.

Figura 2.25: Tipos de encapsulamento



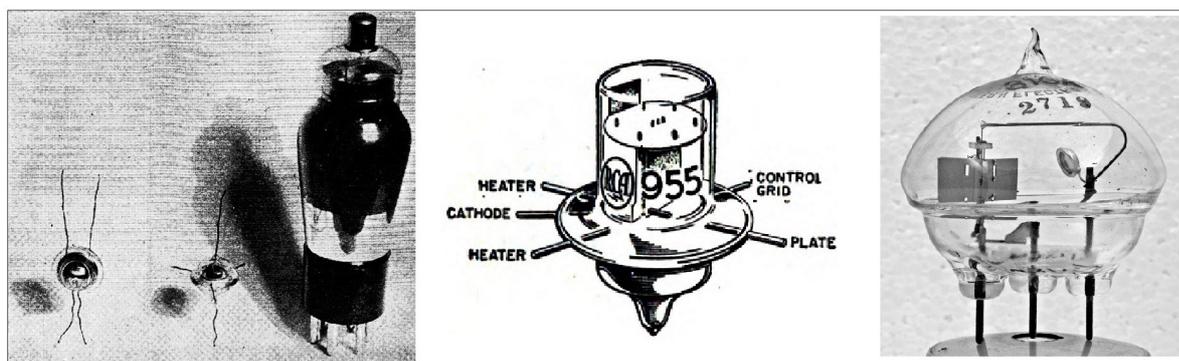
Esquerda: bulbo de vidro e soquete de metal (STOKES, 1997, p. 30). **Centro:** proteção de metal montada sobre invólucro de vidro (STOKES, 1997, p. 100). **Direita:** invólucro *all glass* (RADIOMUSEUM, 2019, 1j29b).

Em 1933, Browder J. Thompson e G. M. Rose, do laboratório de pesquisas da RCA, criaram a válvula *acorn*: uma família de válvulas miniatura, projetada para trabalhar em VHF e UHF até 600 MHz (WYATT, 2019). O projeto era inovador, com um invólucro de vidro sem soquete e com montagem axial dos eletrodos, sendo necessária uma base especial para o encaixe sob pressão dos eletrodos, e com dimensões quase dez vezes menores em relação às válvulas convencionais. Internamente, a montagem fazia uso de eletrodos planos paralelos. Nessa série, foram criados diodos, triodos e pentodos que podiam trabalhar como amplificadores, osciladores ou detectores. As *acorn* tiveram vida curta: foram usadas em receptores portáteis, transmissores e transceptores, facilitando a construção de equipamentos civis e militares na faixa de VHF/UHF entre o final da década de 1930 e o começo da década de 1940. O curioso é que, em um tempo de conflitos internacionais, essa válvula foi fabricada também em outros países: no Japão, foi feita pela Hitachi e usada nos receptores de radar japoneses; foi fabricada pela Philips, nos Países Baixos, e pela Valvo (subsidiária da Philips) na Alemanha, e usada em radares alemães fabricados pela empresa GEMA; também foi feita na Inglaterra, mesmo lá existindo outras válvulas com bom desempenho nessa faixa de frequência; a *acorn* foi usada também no estágio receptor do radar Zenith, desenvolvido na URSS na década de 1930 (SIBLEY, 2000; YANOVSKY, 2016).

Um tipo especial de válvula tipo *giant acorn*, denominada *doorknob*, foi criada numa linha paralela de pesquisa, nos Bell Labs, por Arthur Samuel, que estava desenvolvendo triodos e pentodos de alta frequência, na ordem de 600 MHz, com altos valores de potência.

Essas válvulas foram fabricadas pela *Western Electric* e empregadas nos radares e nos equipamentos de controle de tiro que estavam sendo construídos para a Marinha de Guerra estadunidense (BROWN, 1999).

Figura 2.26: Válvulas *acorn* e *doorknob*



Esquerda: duas válvulas *acorn* e uma válvula convencional (THOMPSON; ROSE, 1933). **Centro:** válvula *acorn* com envoltório de vidro (NAVY, 2012, Module 6, p. 2-15). **Direita:** válvula *doorknob* da *Western Electric*, tipo 316A (WYATT, 2019).

Uma outra abordagem de construção, adotada para diminuir as capacitâncias interletródicas e indutâncias dos eletrodos que limitavam a máxima frequência de operação, foi a criação de famílias de válvulas com *eletrodos planares*, a partir da década de 1940. Essas válvulas eram capazes de operar na faixa UHF e foram empregadas principalmente em sistemas de radar. A exemplo dos tipos *acorn* e *doorknob*, estavam limitadas a gerar no máximo poucas centenas de watts de potência de RF.

Quadro 2.3: Famílias de válvulas de eletrodos planares

| Tipo | Aplicação | Frequência | Fabricante |
|-------------------|---|----------------|----------------|
| <i>Micropup</i> | Primeiros radares | >1 GHz | GEC |
| <i>Rocket</i> | Radares de VHF | 600 MHz, 3 GHz | STC Ilminster* |
| <i>Lighthouse</i> | Radar e dentro de cavidades ressonantes | 1,3 GHz | GE |
| <i>Oil can</i> | <i>Transponders</i> de controle de navegação aérea; transmissores de TV | 3 GHz | GE |
| <i>Pencil</i> | Amplificadores e osciladores | 3 GHz | RCA |

* Provável projetista.

Fonte: ASE (2019, Vacuum tube list, T05).

Figura 2.27: Algumas válvulas de alta frequência



Da esquerda para a direita: *Cermet*, *micropup*, *rocket*, *lighthouse* e *pencil* (ASE, 2019, Vacuum tube list, T05).

Diferente das válvulas planares, mas dentro da filosofia de criação de válvulas miniaturas de micro-ondas, a GE criou, em meados da década de 1950, a válvula *cermet* (cerâmica-metal), capaz de operar até 7,5 GHz, empregada como amplificador de baixo ruído e amplificador de saída. A cermet foi usada em um amplificador (classe B) na espaçonave Pioneer III, lançada em dezembro de 1958 (ASE, 2019).

Brittain (1985) considerou que esses tipos de válvulas de alta frequência foram tentativas heroicas mas inúteis, antes que a magnetron de cavidade ressonante fosse criada, para resolver o problema de gerar micro-ondas com alta potência, necessárias para os sistemas de radar de alta resolução.

Abordemos agora um grupo especial das *válvulas para UHF e micro-ondas* cujo princípio de funcionamento é diverso das válvulas anteriores. A importância de sua abordagem envolve a pesquisa científica realizada para o entendimento do princípio de funcionamento, que em vários casos começou cedo, na década de 1920, e foi realizada frequentemente de forma complementar por diferentes pesquisadores. Do ponto de vista das aplicações, originalmente serviram para atender as necessidades da 2ª Guerra, com destaque para a magnetron e a klystron, usadas nos sistemas de radar. Outra importante válvula criada nesse período, e que foi posteriormente usada em satélites de comunicações, foi a *TWT*. Além dessas, houve a gyrotron, criada posteriormente e aplicada em armas eletromagnéticas.

Essas válvulas diferenciadas dividem-se em três tipos de acordo com o modo de interação entre a estrutura de micro-ondas e o feixe de elétrons. As válvulas de feixe linear, ou *slow-wave*, são a klystron e a válvula de onda progressiva (*traveling wave tube*, TWT); a gyrotron e o *free electron laser* (FEL, um tipo de TWT) são denominadas *fast-wave*. Nesses dois tipos, o feixe de elétrons, depois de ceder parte de sua energia cinética à estrutura de

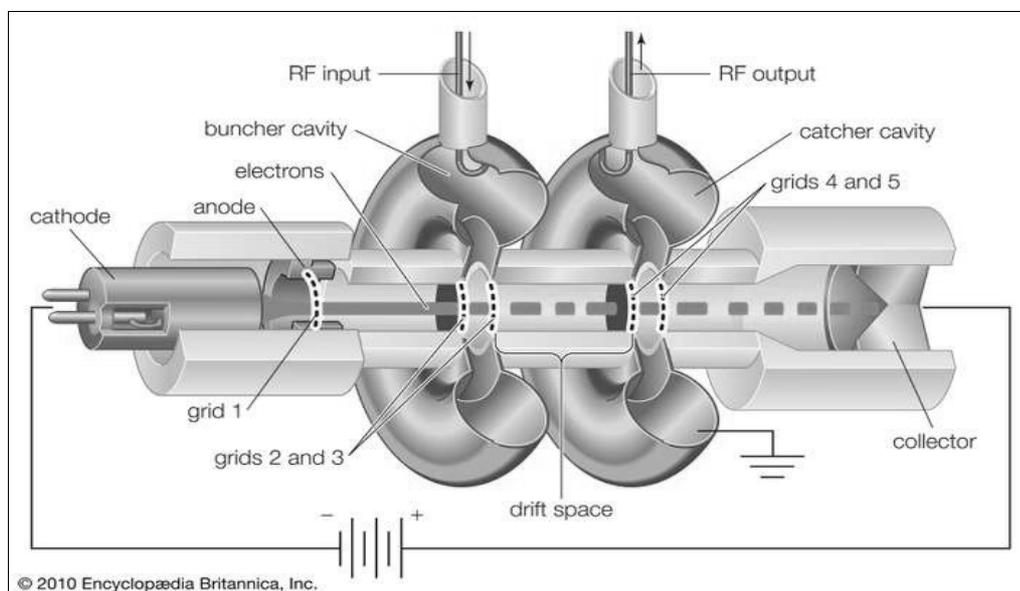
micro-ondas, é descarregado num coletor. Num terceiro grupo, o das magnetrons (válvulas de campo cruzado), uma nuvem de elétrons saída do catodo cede energia potencial aos campos de micro-ondas e cai no anodo, que também é uma estrutura de micro-ondas (CARYOTAKIS, 1998).

Ainda que fora da ordem cronológica de descoberta, comecemos com a klystron e a magnetron pela importância histórica que tiveram numa segunda geração de sistemas de radar que precisavam operar na faixa de micro-ondas para obter melhor resolução dos alvos e alta potência para a detecção mais longínqua dos mesmos.

As *klystrons* são válvulas amplificadoras e osciladoras de alta frequência, operando na faixa de micro-ondas. Klystrons de baixa potência ainda são usadas como osciladoras em enlaces de comunicação por micro-ondas, e as de alta potência, como válvulas de saída em transmissores de TV UHF, comunicação por satélite, transmissores de radar e como excitadores para aceleradores de partículas. O princípio de funcionamento da klystron é a modulação de velocidade, cujo conceito foi divulgado pelo físico alemão Oskar Heil e sua esposa, a física russa Agnessa Arsenyeva Heil, em 1935, quando trabalhavam no Laboratório Cavendish (em Cambridge). Os dois continuaram trabalhando sobre a modulação de velocidade no Instituto de Físico-Química de Leningrado, e Oskar, voltando depois sozinho da URSS, seguiu a mesma linha de pesquisas na Inglaterra e na Alemanha, onde conseguiu terminar o desenvolvimento do oscilador de micro-ondas logo antes do início da Segunda Guerra. Na mesma época, os irmãos Sigurd e Russell Varian trabalhavam na Universidade de Stanford com o físico W. W. Hansen, criador da *rumbatron*: uma válvula de cavidade ressonante que não dependia de indutores nem de capacitores para armazenar energia, gerando alta voltagem em altas frequências, com poucas perdas. A partir de uma ideia de Sigurd Varian (que era piloto de avião) de que transmissores de alta frequência poderiam ser usados nos aviões, Hansen e os Varians começaram a testar várias ideias. Russel Varian (que era físico), possivelmente após ler o artigo de Heil publicado na Alemanha, adaptou a rumbatron para fazer uma válvula osciladora com duas cavidades, que recebeu o nome de klystron e foi patenteada em 1939. A universidade vendeu a patente à empresa Sperry, que por sua vez contratou um grupo de Stanford para aperfeiçoar o dispositivo. Em 1941, uma parceria entre Inglaterra e Estados Unidos acelerou a produção de magnetrons e klystrons que, juntas, foram usadas em radares aerotransportados. As klystrons continuaram a ser aperfeiçoadas após a guerra, e chegaram a potências na faixa de 20 a 30 MW, com pulsos de um microssegundo. Foram projetadas klystrons transmissoras de potência para radar, televisão UHF e comunicações espaciais, que sobrepuseram as magnetrons, por serem amplificadoras e

muito mais potentes (CARYOTAKIS, 1998; DUMMER, 1998; SPANGENBERG, 1948).

Figura 2.28: A klystron



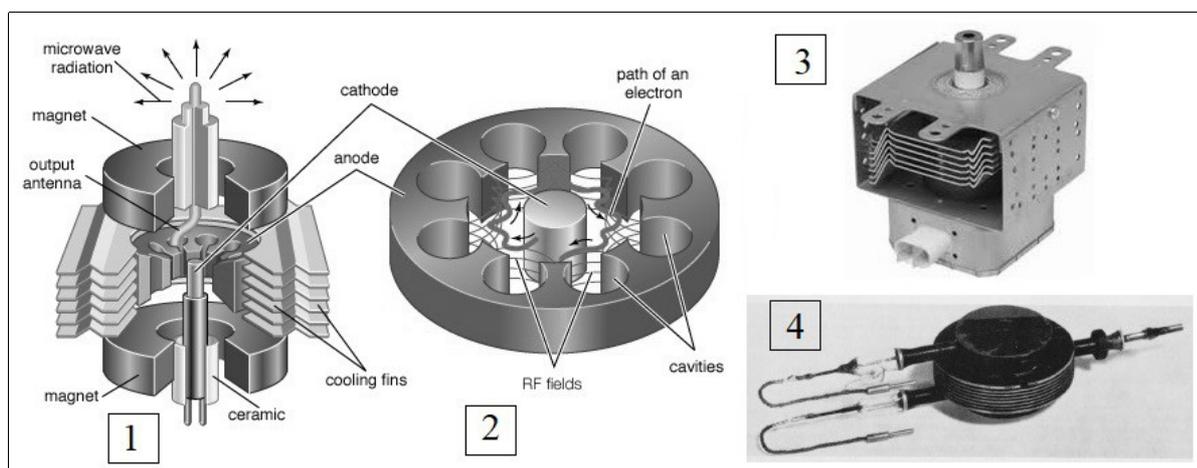
Fonte: Encyclopaedia Britannica (COMMON, 2019).

Na década de 1960, uma antiga ideia surgida na Inglaterra (na década de 1930) de criar uma arma de energia dirigida (o “raio da morte”) foi retomada nos Estados Unidos através do projeto secreto 140 do Exército, que não criou uma arma letal, mas deu origem a dispositivos como a klystron multifeixe (*multibeam klystron*, MBK) e a *ubitron*, a versão original do *free electron laser* (FEL, um tipo de TWT). Outra aplicação da klystron surgida nessa época foi seu uso nos aceleradores e colisores de partículas. Klystrons para aplicações científicas, TV UHF, dispositivos aerotransportados e aplicações militares, operando entre 470 MHz e 860 MHz e com potência entre 15 kW e mais de 60 kW, continuavam sendo produzidas em 2019 (CARYOTAKIS, 1998; RICHARDSON, 2019).

As *magnetrons* são válvulas osciladoras de alta potência, geradoras de micro-ondas, cuja operação é controlada por um campo magnético. O desenvolvimento das magnetrons começou, no contexto da disputa entre as grandes empresas pelo mercado da radiotelegrafia, com a criação das primeiras válvulas magneticamente controladas. A primeira foi a já descrita válvula amplificadora de Gerdien, criada em 1910. A segunda foi desenvolvida em 1916 por Albert Hull, no laboratório de pesquisa da *General Electric*: sua tarefa era achar uma forma de contornar a patente do triodo de Forest, o que Hull conseguiu trocando o controle do fluxo de elétrons através do campo elétrico pelo magnético (BRITTAIN, 1985). O dispositivo, que pouco tempo depois começou a ser chamado de magnetron na GE, era um triodo, com o

anodo formado por fios dispostos em torno do catodo, e cujo invólucro era circundado por uma bobina geradora de campo magnético (HULL, 1921). Com o intuito de construir dispositivos que gerassem uma quantidade potência de saída razoável, alguns pesquisadores desenvolveram magnetrons de constituição semelhante. Já que não era possível utilizar componentes externos convencionais (indutores e capacitores), em seu lugar foram usadas cavidades ressonantes (espaços vazios e fechados) que tinham a vantagem de terem o comportamento de circuitos sintonizados e, funcionando em conjunto, eram capazes de gerar grande quantidade de potência. O caminho para chegar ao emprego de cavidades e o entendimento mais refinado do seu funcionamento, foi alcançado de forma exploratória e em passos incrementais.

Figura 2.29: A magnetron



Legenda: **1 e 2** - estrutura interna (COMMON, 2019). **3** - magnetron de forno de micro-ondas (MAGNETRON, 2019). **4** - magnetron inglesa de 1940 (BRITAIN, 1985, p. 61).

Em 1927, no Japão, Kinjiro Okabe criou uma magnetron osciladora de anodo dividido, geradora de UHF: era um diodo, com dois anodos dispostos em torno do catodo como segmentos de um cilindro, e a bobina em torno do invólucro (OKABE, 1932). A magnetron de anodo dividido foi aperfeiçoada, entre 1930 e 1934, por Maurice Ponte, da empresa francesa SFR-CSF; Klaas Posthumus, da neerlandesa Philips, construiu uma magnetron com anodo de quatro segmentos, que gerava ondas de 48 cm com potência de 40 W; e E. C. S. Megaw, da inglesa GEC – *General Electric Company* (sem relação com a GE estadunidense), patenteou vários anodos multissegmentados. Entre 1934 e 1938, Henri Gutton, da francesa SFR-CSF, testou anodos com seis a dezesseis segmentos; a válvula que entrou em produção (M-16) tinha anodo de oito segmentos; gerava ondas de 16 cm com potência de 10 W, com uma eficiência de 15% com 765 V no anodo e 430 gauss no campo magnético. Nos Estados

Unidos, a partir de 1933, os laboratórios de pesquisa do Exército e da Marinha montaram sistemas experimentais de radar usando magnetrons da Westinghouse e da RCA, que geravam ondas de 9 cm com potência de 2,5 W. Na mesma época, a GE divulgou duas novas magnetrons: uma gerando ondas de 75 MHz com potência de 2,5 kW, e outra gerando ondas de 400 MHz com potência de 10 W (BLANCHARD; GALATI; GENDEREN, 2013; BRITAIN, 1985; SKOLNIK, 1962).

O desenvolvimento das magnetrons de anodo dividido levou à formulação da teoria do campo rotativo, que teve grande importância na criação da magnetron de cavidade, que foi objeto de várias patentes nos anos 1930. Arthur Samuel, dos laboratórios Bell, patenteou em 1934 modelos com duas e quatro cavidades. Hans Hollmann, da Telefunken, patenteou em 1935 uma magnetron de quatro cavidades. Em 1936 e 1937, N. F. Alekseev e D. D. Malairov, da Universidade de Leningrado, testaram magnetrons de uma, duas e quatro cavidades, obtendo com a última ondas de 9 cm com potência de 300 W. O trabalho de Alekseev e Malairov, publicado em 1936, foi aproveitado em 1938 por Wilhelm Engberg, da Telefunken. No Japão, Yoji Ito e Shigeru Nakajima produziram, em 1938, uma magnetron de oito cavidades que gerava ondas de 6 cm com potência de 30 W, ou de 1,5 cm com 1 W; e, em 1939, uma magnetron de 24 cavidades que gerava ondas de 10 cm com potência de 500 W. A magnetron mais bem-sucedida foi criada na Inglaterra. No início de 1940, John Randall e Harry Boot, da Universidade de Birmingham (Inglaterra), receberam a tarefa de criar uma fonte de micro-ondas de 10 cm com potência de 1 kW, para atender à necessidade urgente de fazer um radar contra os ataques aéreos alemães. Randall e Boot fizeram um protótipo de seis cavidades que gerou ondas de 9,9 cm com potência de 400 W; Megaw, da GEC, aperfeiçoou o projeto, chegando a uma magnetron de oito cavidades que gerava ondas de 10 cm com potência de 10 kW. Um protótipo foi levado para os Estados Unidos por Henry Tizard, juntamente com uma delegação (a Missão Tizard) que tinha o objetivo de obter assistência e recursos industriais para alguns projetos científicos desenvolvidos na Inglaterra. A magnetron foi reproduzida nos Bell Labs e colocada em produção ainda em 1940, e tornou-se o componente central de dezenas de tipos de radares, com frequências entre 1 e 25 GHz (30 a 1,2 cm), que foram desenvolvidos entre 1941 e 1944, e usados pelos exércitos aliados durante a Segunda Guerra (ALEKSEEV; MALAIROV, 1944; BLANCHARD; GALATI; GENDEREN, 2013; BRITAIN, 1985; HOLLMANN, 1938; SAMUEL, 1936).

Após o fim da guerra, as pesquisas sobre a magnetron dirigiram-se para buscar usos diferentes do radar. Em 1949, a empresa Raytheon (EUA) desenvolveu uma magnetron de onda contínua (diferente das anteriores, que eram de onda pulsada). No mesmo ano, a

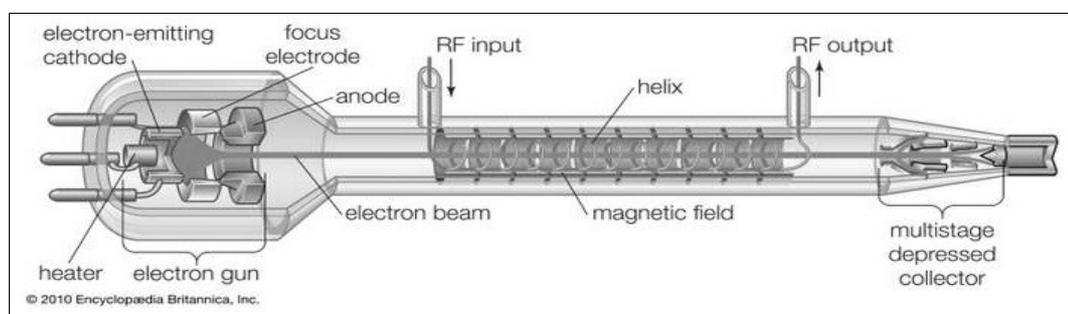
Raytheon começou a vender fornos de micro-ondas para uso comercial e doméstico. Nas décadas de 1950 e 1960, outras indústrias entraram no ramo, destacando-se as japonesas *New Japan Radio Company*, Toshiba, Matsuhita e Hitachi, que passaram a atender à totalidade da demanda mundial por magnetrons para fornos até a entrada de empresas coreanas no mercado em expansão, na década de 1980. As magnetrons de onda contínua também são utilizadas em aplicações industriais como aquecimento, processamento de plasma (na produção de semicondutores), emissão de luz na faixa de micro-ondas e processos de secagem. Quase todas as magnetrons industriais produzidas em 2019 têm uma potência de saída entre 1,45 e 10 kW, e geram ondas com frequência entre 2.420 e 2.480 MHz (HITACHI, 2019; RICHARDSON, 2019; TOSHIBA, 2019).

Uma adaptação da magnetron surgida no pós-guerra foi a válvula *crossed-field amplifier*, CFA (amplificador de campo cruzado) desenvolvida por William Brown, engenheiro da Raytheon, e lançada em meados da década de 1950 com o nome de *amplitron* (outros fabricantes usaram nomes como platinotron e stabilotron). Na verdade, a CFA é uma combinação de magnetron (pois usa a interação eletrônica entre campos elétrico e magnético da magnetron) e TWT (pois a interação é feita com onda progressiva, como na TWT, e não com onda estacionária, como na magnetron). O nome da CFA vem do fato de que seus campos elétrico e magnético são perpendiculares, como na magnetron; a diferença entre elas é que a magnetron é osciladora, e a CFA é amplificadora. É uma válvula especializada, usada como amplificadora de micro-ondas em transmissores de potência muito alta. Ao ser lançada, a CFA tinha ganho e largura de banda menores que os de outras válvulas amplificadoras de micro-ondas, como TWT e klystrons, mas era mais eficiente e tinha uma potência de saída muito maior. Os modelos produzidos em 2019 geram frequências entre 1 GHz e 10 GHz, com níveis de potência entre 90 kW e 900 kW. As CFAs são usadas em estações terrenas para difusão de televisão por satélite, redes de telecomunicações espaciais, sistemas de radar, telemetria espacial e aceleradores lineares. Por suas características, são particularmente adequadas para aplicações em que o transmissor deve ser aerotransportável: a CFA foi usada no transmissor do módulo lunar Apollo (BROWN, 1960; CPII, 2019; NASA, 1971).

A *TWT* é um tipo de válvula que teve sua trajetória científica iniciada em 1922, com a criação, pelos inventores ingleses E. W. Gill e J. H. Morrel, do oscilador de resistência negativa, uma variante do dispositivo (DUMMER, 1998; SARKAR, 2006). Em 1931, Andrei Haeff, trabalhando na Caltech (EUA), criou um protótipo da TWT que amplificava sinais de radiofrequência na faixa de micro-ondas: foi uma proposta de aperfeiçoamento do triodo clássico, que exigia grande potência na grade de controle para altas frequências. A TWT pode

ser considerada um tipo de magnetron primitiva, pois a operação depende da interação entre os elétrons em movimento e um campo magnético. O projeto foi aperfeiçoado em 1936 por Nils Lindenblad (da RCA) e, em 1942, por Rudolf Kompfner (austríaco radicado nos EUA, que trabalhava nos Bell Labs). A TWT continuava sendo produzida em 2019, sendo usada como amplificadora de potência e osciladora em sistemas de radar, satélites de comunicações (nos *transponders*, para amplificação e conversão da faixa de frequências dos sinais de entrada para o enlace de descida) e transmissores de espaçonaves; é empregada também em sistemas eletrônicos militares de rádio de alta frequência (DUMMER, 1998; GARNER, 1963c; RICHARDSON, 2019).

Figura 2.30: A válvula TWT



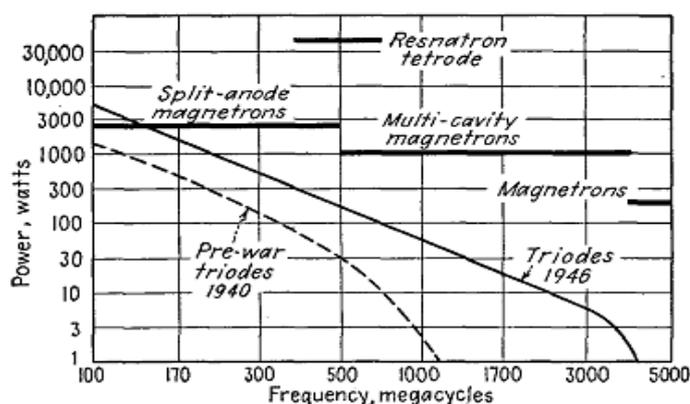
Fonte: Encyclopædia Britannica (TRAVELING, 2019).

Um tipo de TWT, a válvula *backward wave oscillator*, **BWO** (oscilador de onda reversa), foi lançado no início da década de 1950. Operava segundo os princípios de funcionamento das TWTs convencionais, exceto que a onda de deslocamento se movia na direção oposta à do fluxo de elétrons (daí seu nome). Em certo sentido, o tubo fornecia seu próprio sinal de entrada. Às vezes, um campo magnético transversal era usado para dobrar a corrente de elétrons em um caminho circular, o que permitia reduzir o tamanho da válvula. Era um oscilador com uma grande faixa de sintonia, usado para gerar micro-ondas na faixa de tera-hertz; foi usada para pesquisa e em aplicações civis e militares, principalmente para produzir interferência em radar, em sistemas de detecção de defesa aérea (GARNER, 1963c).

A *resnatron* foi uma válvula criada no mesmo espírito das válvulas de micro-ondas abordadas anteriormente, porém com princípio de funcionamento convencional. Em 1938, W. W. Salisbury, D. H. Sloan e L. C. Marshal, da Universidade da Califórnia, criaram um tetrodo oscilador de alta potência em UHF, projetado para causar interferência em radares alemães na Segunda Guerra. O projeto foi usado por Frederick Terman, que dirigia o programa de contramedidas de radar do laboratório de pesquisas de rádio de Harvard, e fez a válvula osciladora resnatron, usada nos aparelhos de detecção dos aviões alemães que voavam à noite

sobre o canal da Mancha. Logo após a guerra, a resnatron ficou sendo usada em estudos de propagação. Em 1947, com a necessidade de alocar canais de UHF para televisão, a resnatron foi adaptada para se tornar amplificadora. Em 1951, a Westinghouse lançou a resnatron amplificadora para ser usada em transmissores de TV UHF (SKOLNIK, 1962; SPANGENBERG, 1948).

Gráfico 2.1: Potência de saída em função da frequência de operação



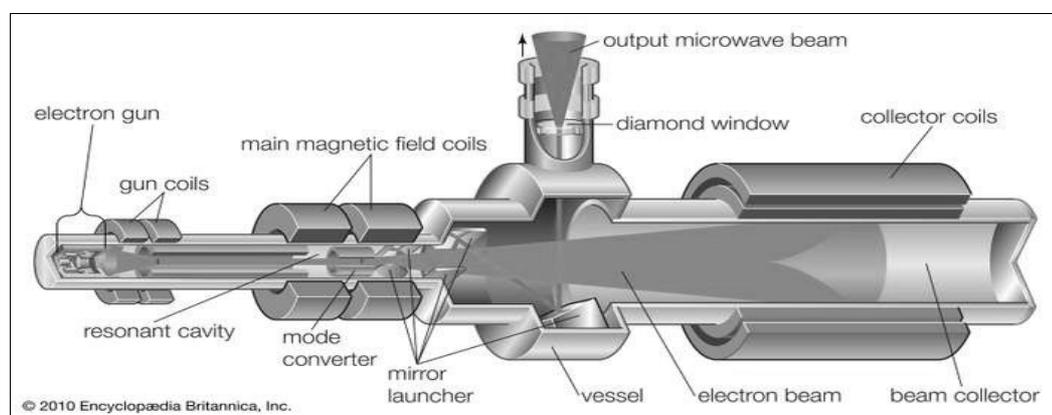
Fonte: Spangenberg (1948, p. 509).

Assim, ao final da 2ª Guerra, havia uma variedade de válvulas operando em altas frequências e com uma ampla faixa de potências, até dezenas de quilowatts, que foram aproveitadas para serem usadas em aplicações comerciais, científicas e industriais nas décadas seguintes. Paralelamente ao processo de criação de válvulas descritos, foram desenvolvidas as linhas de transmissão especiais, como as guias de onda, antenas e demais dispositivos.

Diferentemente de válvulas de micro-ondas, que foram aproveitadas para outras aplicações, válvulas especiais foram criadas, utilizando os conhecimentos adquiridos, com finalidades industriais e bélicas. A *Rand Corporation* publicou o relatório de um estudo, encomendado pela *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA), sobre o desenvolvimento soviético da válvula **gyrotron** (KASSEL, 1986). O programa soviético de pesquisa e desenvolvimento de dispositivos de emissão de micro-ondas de alta energia e onda contínua começou no início da década de 1960, com as pesquisas do físico Andrei Gaponov e sua equipe, que em 1964 criaram a gyrotron, que foi progressivamente aperfeiçoada: uma válvula amplificadora de RF constituída por uma klystron multicavidade, com um gerador de ondas capaz de produzir feixes intensos (uma magnetron), associada a um magneto de material supercondutor que faz os elétrons girarem numa frequência específica, gerando uma radiação amplificada ao nível de THz. Desta forma, a gyrotron é capaz de operar em uma

faixa do espectro eletromagnético, entre o infravermelho e as ondas de rádio, que não era gerada por outros dispositivos. A gyrotron começou a ser produzida na URSS na década de 1970; na década seguinte, já era feita no Japão, nos Estados Unidos e em alguns países europeus. Continuava sendo fabricada em 2019, sendo destinada a aplicações industriais de aquecimento (fusão nuclear, produção de cerâmicas etc.) e aplicações militares, como o “raio de calor” do *Active Denial System* (ADS), usado pelos Estados Unidos no Afeganistão (BRIDGE12, 2019; NUSINOVICH, 2012; US, 2019).

Figura 2.31: A gyrotron



Fonte: Encyclopædia Britannica (GYROTRON, 2019).

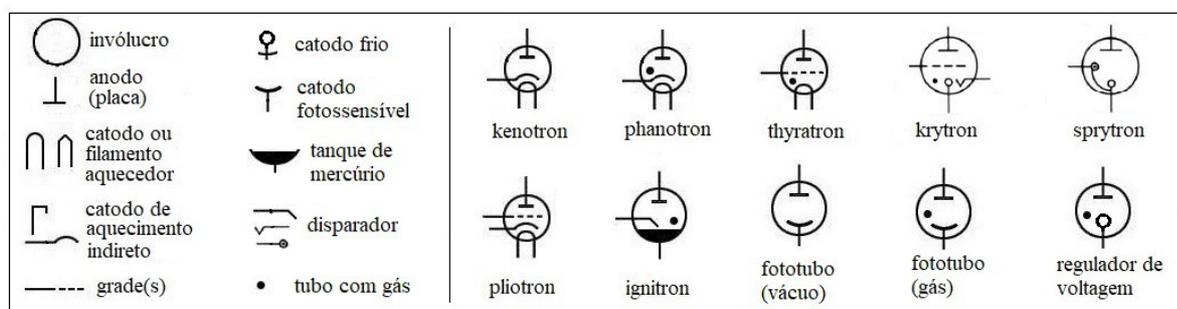
2.2.3 Outras válvulas para aplicações industriais, militares e científicas

No começo do século XX, juntamente com as válvulas usadas em comunicações, as de aplicações industriais ajudaram a otimizar os sistemas de geração e distribuição de energia elétrica em nível mundial e algumas operações na indústria, sendo alguns tipos delas, inclusive, projetadas especialmente para este fim (WHITE, 1962). Esses tipos de válvulas, tão importantes quanto as válvulas para comunicações, compõem o quadro da tecnologia das válvulas e da modernização proporcionada pelas técnicas eletrônicas.

O termo “industrial” é usualmente aplicado para designar todas as válvulas e suas aplicações diferentes das do campo das comunicações. Por este motivo, existe um grande entrelaçamento entre dispositivos e usos industriais propriamente ditos, militares e científicos. O desenvolvimento das válvulas industriais começou juntamente com o das válvulas para telecomunicações. Ao contrário das utilizadas em aplicações comerciais, que foram substituídas por dispositivos semicondutores a partir da década de 1960, as válvulas

industriais continuam em uso até o século XXI, como pode ser visto em catálogos de fabricantes e vendedores desses dispositivos (HITACHI, 2019; RICHARDSON, 2019; TOSHIBA, 2019).

Figura 2.32: Símbolos de algumas válvulas industriais



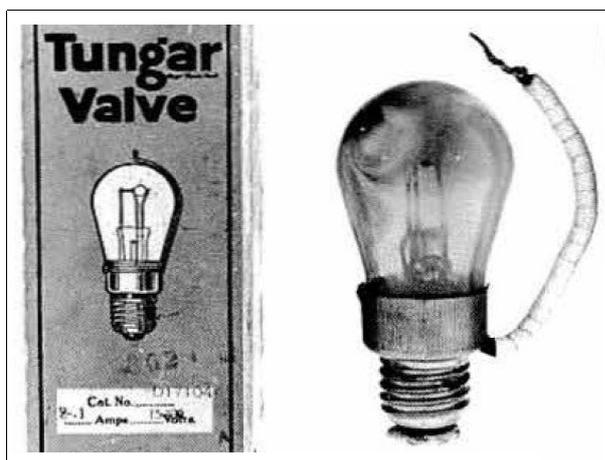
Excetuando-se alguns tipos especiais, as válvulas industriais correspondem, em muitos aspectos, às válvulas equivalentes usadas em telecomunicações. O que as caracteriza é o fato de serem mais robustas e projetadas para operação contínua sob condições ambientais rigorosas como temperaturas extremas, choques e vibrações; e os filamentos devem ter uma vida útil longa, para evitar os prejuízos causados pela parada dos equipamentos para substituição de componentes. As válvulas receptoras de baixa potência foram usadas em controle industrial, circuitos de alarme, contadores, dispositivos de proteção e equipamentos similares, enquanto as transmissoras eram encontradas em fontes de alimentação de alta tensão e alta corrente, soldadores e aquecedores dielétricos e de indução. Válvulas a gás foram amplamente utilizadas na indústria: as de catodo frio e thyatrons foram empregadas no controle de motores, eletroímãs e solenoides, enquanto as retificadoras a vapor de mercúrio foram utilizadas em aplicações pesadas como fontes de corrente contínua para galvanoplastia, eletrólise e aplicações similares (GARNER, 1963b).

O laboratório de pesquisas da *General Electric* foi fundamental na fase inicial de desenvolvimento das válvulas industriais. Até o final da Primeira Guerra, com a necessidade urgente de desenvolver equipamentos de comunicações, pouca atenção foi dada a outras aplicações para as válvulas. Nesse período, havia poucas válvulas industriais: basicamente alguns diodos (tungar, kenotron) e triodos (pliotron, dynatron) com funções retificadoras, amplificadoras e osciladoras (RADIOMUSEUM, 2019; TYNE, 1994; WHITE, 1962).

O diodo retificador **tungar** (tungstênio-argônio) derivou do trabalho de Irving Langmuir, da GE, que, a partir de 1912, dedicou-se ao desenvolvimento de lâmpadas

incandescentes com filamento de tungstênio em bulbo com vapor de mercúrio. Essas lâmpadas operavam com corrente contínua em baixa voltagem e atingiam temperaturas muito altas; por isso, às vezes o filamento se queimava e rompia, formando um arco. Em 1913, G. S. Meikle, assistente de Langmuir, obteve correntes de 30 ampères e conseguiu obter o arco usando corrente alternada; então, adaptou a lâmpada e projetou uma válvula com filamento aquecido, anodo e atmosfera de vapor de mercúrio. Em 1914, a substituição do mercúrio por argônio melhorou o desempenho da válvula que, após uma pesquisa de mercado, foi lançada em 1916 como retificadora para carregadores de baterias de automóveis e rádios. A tungar entrou em produção em 1917 e foi bastante usada, especialmente na década de 1920, com a difusão dos receptores de rádio a bateria (TYNE, 1994; WHITE, 1962).

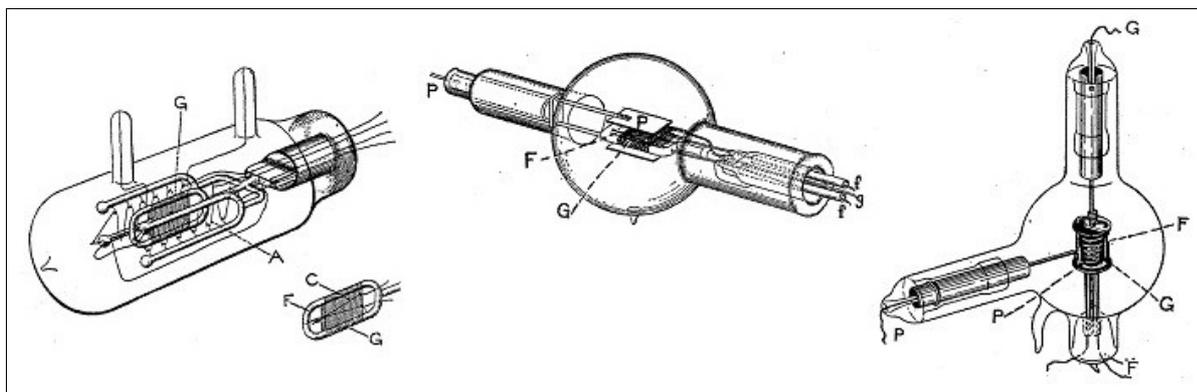
Figura 2.33: A tungar



Fonte: Stokes (1997, p. 112).

A outra válvula retificadora de uso industrial desenvolvida na mesma época foi a *kenotron*, um diodo de alto vácuo, criado em 1914 para atender à necessidade de operar em alta voltagem CC e baixa corrente, situação em que o gás residual das válvulas existentes era ionizado. A kenotron foi desenvolvida na GE por Saul Dushman, membro da equipe de Langmuir, que fez kenotrons operacionais em 180 kV, com uma corrente de 250 mA. Seu campo de aplicações incluía equipamentos de teste, como os usados no teste de isolamento de cabos submarinos; purificadores de ar, para ambientes com fumaça e partículas, operando por precipitação eletrostática; fontes de energia para tubos de raios X, transmissores de rádio de alta potência e reguladores de voltagem para equipamentos de rádio de aviões militares durante a Primeira Guerra (GE, 1944; TYNE, 1994; WHITE, 1962).

Figura 2.34: Pliotron e dynatron



Esquerda: Pliotron para recepção. **Centro:** Pliotron para transmissão. **Direita:** Dynatron (LEGETT, 1921)

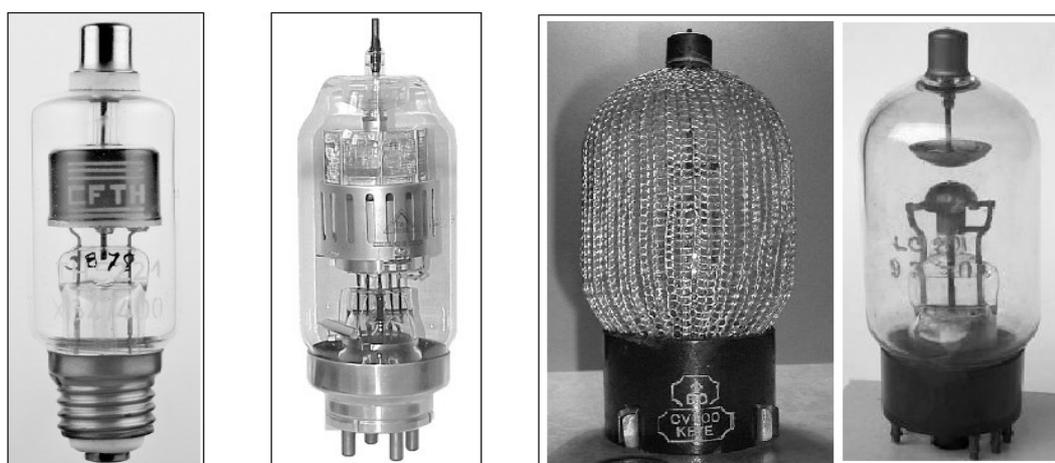
O triodo amplificador *pliotron* originou-se da percepção, por parte da GE, da existência de um mercado para dispositivos de alta frequência, e das informações recebidas em 1912 por Ernst Alexanderson (da equipe de Langmuir, responsável pela criação de geradores eletromecânicos para a transmissão de rádio) sobre o trabalho com o audion no laboratório de John Hammond (pesquisador amador que comprava produtos da GE). Em 1913, Alexanderson recebeu a tarefa de desenvolver o uso do audion como amplificador, possibilidade que fora levantada por Hammond, enquanto Langmuir trabalhava na solução do problema da obtenção de alto vácuo nas válvulas e William White estudava o audion que a equipe havia conseguido. Após esboços e aperfeiçoamentos, Alexanderson chegou a uma válvula amplificadora de alta frequência satisfatória em maio de 1913, e a pliotron começou a ser produzida como geradora de ondas de alta frequência para radiodifusão. Durante a Primeira Guerra, foi fabricada em diferentes modelos para as Forças Armadas: o tipo C, amplificador e oscilador para recepção heteródina; o tipo T, oscilador de baixa potência para pequenos aparelhos de telefonia e radiotelegrafia (usados em aviões e submarinos); e os tipos P e U, osciladores de alta frequência usados em transmissores de hidroaviões. Mais tarde, o químico Willis R. Whitney (cofundador do laboratório da GE) descobriu a propriedade das radiações de alta frequência de produzirem calor, e a pliotron foi usada em diatermia (terapia com infravermelho) e em processos industriais de aquecimento (BRITAIN, 2007; GE, 1944; TYNE, 1994; WHITE, 1962).

Em 1914, Albert W. Hull, também na GE, desenvolveu um triodo oscilador que chamou de *dynatron*, que exibia resistência negativa obtida através do aumento da voltagem positiva da grade em relação à do anodo. Hull continuou a aperfeiçoar o invento e, em 1917, divulgou a criação do pliodynatron, provavelmente o primeiro tetrodo descrito num artigo. A

dynatron foi usada em geradores de sinal de receptores de rádio super-heteródinos e equipamentos científicos (BRITAIN, 1985, 2007; TYNE, 1994).

Com o fim da Primeira Guerra, os laboratórios industriais voltaram a atenção para novos tipos de aplicações, como as de controle industrial. Em 1928 e 1929, a GE lançou duas válvulas derivadas das pesquisas de Langmuir sobre as válvulas termoiônicas a gás: a phanotron e a thyatron. A *phanotron* era um diodo retificador de propósito geral, direcionado para aplicações com necessidade de correntes de até 30 A. Foi amplamente usada para fornecer corrente contínua a fixadores magnéticos para peças a serem usinadas; também foi utilizada para fornecer corrente contínua a válvulas de algumas aplicações de controle, a carregadores automáticos de baterias de grande porte, e a separadores magnéticos usados para remover partículas metálicas de materiais não-magnéticos a serem processados industrialmente (GE, 1944).

Figura 2.35: Phanotron, thyatron e trigatron



Esquerda: phanotron (TH5221, 2019). **Centro:** thyatron (THYRATRON, 2019). **Direita:** trigatron com e sem malha protetora (TRIGATRON, 2019; RADIOMUSEUM, 2019, LG201).

A *thyatron*, um triodo, foi usada inicialmente como retificadora da corrente de alta voltagem para o anodo dos transmissores. Entre 1929 e 1933, a GE desenvolveu uma linha de thyatrons que incluía triodos e tetrodos, com vapor de mercúrio e gás inerte, e com a corrente variando de uma fração de ampère até 12,5 ampères. O comportamento característico de comutação das thyatrons, associado à sua sensibilidade a pequenas tensões aplicadas ao circuito e à rapidez de resposta, tornaram-na adequada para ser empregada como comutadora. Sua primeira aplicação comercial foi em 1929, no controle da iluminação de um grande teatro em Chicago. A partir de 1930, várias empresas entraram na competição do mercado da

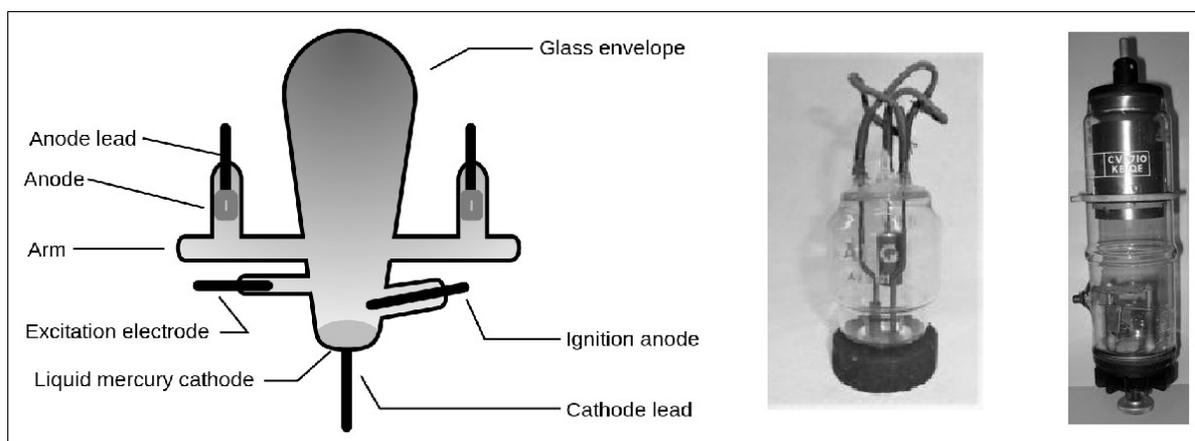
thyatron, que começou a ser empregada no controle de solda industrial, sinalização ferroviária, circuitos telegráficos, aparelhos de raios X e motores de movimentação de canhões em navios. A partir da década de 1960, as thyatrons começaram a ser substituídas pelos tiristores (*thyatron transistores*) na maioria das aplicações de baixa e média potência, mas continuaram sendo fabricados para nichos especiais. Ainda em 2019, thyatrons a gás eram usadas em aquecimento industrial, controle de motores e solda, e thyatrons de alta potência eram feitas para comutação em aplicações médicas, industriais e em radares (DUMMER, 1983; GARNER, 1963a; RICHARDSON, 2019; WHITE, 1962).

O início da Segunda Guerra Mundial trouxe a necessidade de criar e aperfeiçoar dispositivos para fins militares, como comutadores para comunicações e disparadores para armas. A tentativa de aumentar a faixa de alcance do radar pela transmissão de pulsos mais potentes criou um problema de comutação: em potências de até 500 kW, a thyatron era um comutador confiável, além de ser compacta e barata; mas não era confiável e ficava muito cara para ser usada em aplicações em que fossem necessárias potências na ordem de megawatts. Então, o uso de disparadores de centelha nos moduladores de alta potência dos radares começou a ser estudado. Nos Estados Unidos, as pesquisas foram realizadas no *Radiation Laboratory* do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) e em outros laboratórios industriais: em 1942, a RCA desenvolveu um disparador que exigia um diodo para controle, e W. M. Goodall, dos Bell Labs, anunciou a criação de um triodo disparador para um circuito gerador de pulsos na faixa de megawatts. Na Inglaterra, J. D. Craggs e J. M. Meek, em 1946, apresentaram a válvula *trigatron*, um triodo disparador controlado pela incidência de um pulso de disparo aplicado continuamente, que foi usado em radares de aviões (GILLOGLY, 1950).

O *retificador de arco de mercúrio* de alta potência teve grande aplicação industrial. A criação de retificadores de alta voltagem tornou-se uma necessidade no fim do século XIX, quando grandes estações geradoras de corrente alternada, que alimentavam as ferrovias extensas para trens pesados e rápidos, começaram a substituir as pequenas estações locais geradoras de CC para os veículos leves das pequenas linhas urbanas. Primeiro foram usados cicloconvertidores rotativos (eletromecânicos); após a criação do retificador de arco de mercúrio por Cooper Hewitt, a GE e a Westinghouse começaram a produzir retificadores de arco para subestações conversoras de energia elétrica. Empresas europeias também entraram no ramo, mas os Estados Unidos dominaram esse mercado. Em 1928, Irving Langmuir e David Prince criaram um retificador com tanque de mercúrio de aço, tornando viável o dispositivo com grade de controle criado por Cooper Hewitt; assim, em 1930, a válvula de

arco de mercúrio era o melhor método para retificar e servir de inversor de corrente contínua em corrente alternada em linhas de transmissão e circuitos industriais. Na década de 1930, o metrô de Nova York usava alimentação de corrente contínua com retificadores de arco de mercúrio de 3 MW e, em 1932, a AEG, na Alemanha, estava fabricando retificadores de arco de mercúrio com encapsulamento de vidro, com potência de 750 kW trabalhando em 3 kV (DUFFY, 2003; GUARNIERI, 2018).

Figura 2.36: Retificadora de arco de mercúrio, ignitron e excitron



Esquerda: retificadora de arco de mercúrio (MERCURY, 2019). **Centro:** ignitron (RADIOMUSEUM, 2019, AJ5101). **Direita:** excitron (RADIOMUSEUM, 2019, AR64).

Na década de 1930, o dispositivo foi repetidamente aperfeiçoado. Em 1932, o engenheiro Joseph Slepian, da Westinghouse, deu entrada na patente da válvula retificadora de arco elétrico que chamou de *ignitron* ou *veatron*. Era formada por dois eletrodos principais fixos (um catodo de tanque de mercúrio e um anodo de ferro) e um eletrodo auxiliar, o ignitor, cuja ponta mergulhava no mercúrio, e que provocava a formação intermitente de um arco entre catodo e anodo, dependendo da polaridade da corrente aplicada. Rapidamente posta em produção, a ignitron foi amplamente utilizada como retificadora em situações em que eram necessários valores elevados de CC para alimentação de motores usados na indústria siderúrgica e em ferrovias; como inversores de alta frequência para aquecimento indutivo e dielétrico industrial; para comutação de alta corrente e em outros serviços pesados. As ignitrons de baixa frequência foram usadas em galvanoplastia e controle de solda. Em 2019, as ignitrons continuavam sendo produzidas para essas mesmas áreas de aplicação (GARNER, 1963b; RICHARDSON, 2019; SLEPIAN, 1937; WHITE, 1962).

Outro tipo bem conhecido de válvula de arco de mercúrio foi a *excitron* (marca da Allis-Chalmers): era um retificador de anodo único em que uma bobina de ignição era

energizada, de modo que o catodo ficava apto para liberar elétrons quando o anodo disparasse. Foi usada como fonte de corrente contínua para diversas operações industriais, como solda e mineração (ALLIS-CHALMERS, 1948; DUFFY, 2003).

Entre as *válvulas de catodo frio* importantes para uso industrial, podem ser citadas as reguladoras de voltagem e as comutadoras. As válvulas reguladoras de voltagem eram diodos de catodo frio com gás. Em 1943, já faziam parte do catálogo da Sylvania e, na década de 1950, passaram a ser produzidas pela Raytheon, que utilizou o modelo inventado por Herbert Friedman em 1954: uma válvula miniatura utilizando a descarga de corona (FRIEDMAN, 1957; RAYTHEON, 1956; SYLVANIA, 1943)

No final da década de 1940, a empresa EG&G desenvolveu e começou a produzir a válvula *krytron*: um triodo subminiatura de catodo frio, com atmosfera de gás que é ionizado por um eletrodo ignitor, produzindo uma descarga de arco. Apresenta a propriedade de operar com CA, conduzindo altos picos de corrente, e seu tempo de resposta varia entre 100 e algumas centenas de microssegundos. Foi empregada em dispositivos centelhadores para motores de ignição, explosivos industriais, mísseis e outras armas; moduladores de sinais de radar, geradores de pulso na ordem de nanossegundos e disparadores para lâmpadas de *flash*, válvulas de vapor de mercúrio e aparelhos científicos. A EG&G também criou a *sprytron*, que é uma versão com vácuo da krytron: o mais interessante, que mostra a atualidade da tecnologia das válvulas, é que a sprytron é usada especialmente como detonadora de armas nucleares e em outros processos que envolvem reações nucleares, pois, sendo a vácuo, não pode ser acionada acidentalmente por ionização do gás do interior, que é um risco da krytron (RICHARDSON, 2019).

Figura 2.37: A krytron



Fonte: Krytron (2019).

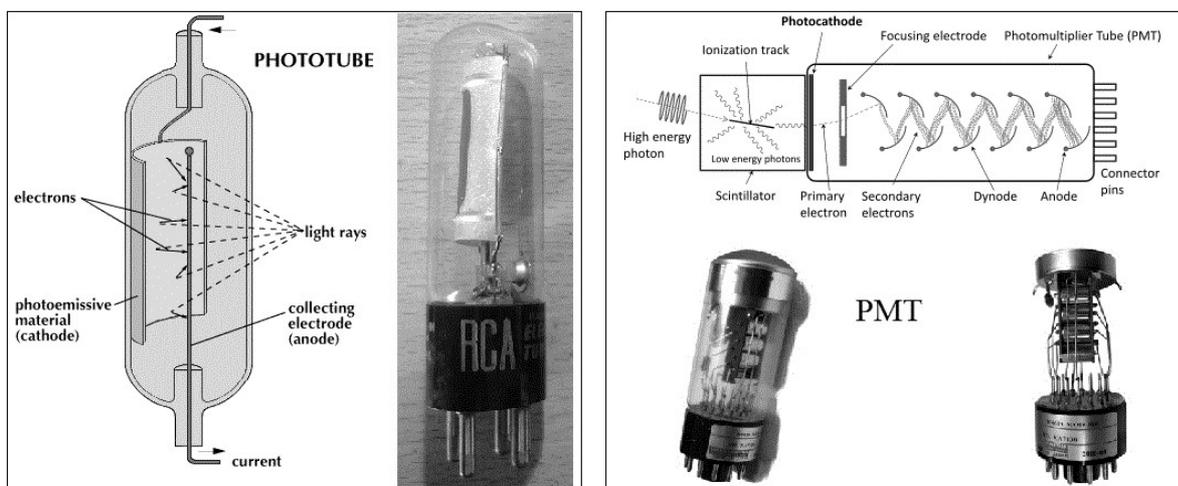
É importante salientar que, mesmo que algumas válvulas de potência tenham deixado de ser fabricadas, ainda no começo do século XXI, as válvulas de catodo frio continuam sendo produzidas para aplicações em regulação de voltagem e comutação.

Até aqui, examinamos o processo de desenvolvimento das válvulas que, em seu princípio de funcionamento ou em suas aplicações, situam-se nas regiões do espectro eletromagnético ocupadas por uma faixa de frequências que se estende até alguns giga-hertz. Porém, existem alguns tipos de válvulas que foram desenvolvidas para operar nas regiões da luz (visível e infravermelho) e também das radiações ionizantes: os fototubos, que foram aplicações industriais e de controle, e dois tipos de válvulas que contribuíram notadamente na pesquisa de fenômenos físicos, que são as fotomultiplicadoras e o tubo Geiger-Müller. Outra válvula aprimorada com as técnicas industriais do século XX foi a válvula de raios X, empregada em outras aplicações além das médicas da época de Röntgen.

Os *fototubos* são diodos de catodo frio cujo princípio de funcionamento é baseado no efeito fotoelétrico. Embora “células fotoelétricas” fossem construídas experimentalmente desde os estudos sobre a luz de Edmond Becquerel (1867), os fototubos só começaram a ser produzidos comercialmente nos Estados Unidos em 1928, pela RCA, que, por acordo firmado em 1930, ficou com o mercado de televisão e cinema, deixando para a GE e a Westinghouse as aplicações industriais. Em linhas gerais, o fototubo tem como catodo uma placa metálica côncava, revestida com material fotossensível, e o anodo recebe uma tensão positiva. Assim, quando a luz incide sobre o catodo, este libera elétrons que são atraídos pelo anodo. As principais diferenças entre vários modelos de fototubos estão em suas respostas espectrais. Os fototubos foram amplamente utilizados em aplicações industriais e comerciais: alarmes detectores de presença, abertura automática de portas, contadores, sistemas de controle de qualidade e classificação de produtos (por espessura e outras características), equipamentos de segurança para máquinas industriais, detecção de orifícios para montagem de peças e outras tarefas que possam produzir interrupção de um feixe luminoso (GARNER, 1963b; GE, 1944; SPANGENBERG, 1948; WHITE, 1962).

Um aperfeiçoamento do fototubo foi a *válvula fotomultiplicadora*, em que, entre o catodo fotossensível e o anodo, existe uma série de eletrodos intermediários, os dinodos, dispostos de modo a receber os elétrons projetados do eletrodo anterior, cuja quantidade vai aumentando por conta da emissão secundária. A fotomultiplicadora é usada em aplicações que exijam a detecção de níveis muito baixos e variações sutis de luminosidade, como em contadores de cintilação e reguladores de intensidade da luz (GARNER, 1963b; SPANGENBERG, 1948).

Figura 2.38: Fototubo e válvula fotomultiplicadora



Esquerda: fototubo – esquema (PHOTOEMISSIVE, 2019) e fotografia (PHOTOTUBES, 2019).

Direita: válvula fotomultiplicadora – esquema (PHOTOMULTIPLIER, 2019) e fotografias com e sem invólucro (PMT, 2019).

Desenvolvida na União Soviética por Leonid Kubetsky em 1933, a válvula fotomultiplicadora era um dispositivo multiestágio composto de fotocátodos circulares, proporcionando ganho na ordem de 100 a 1000 vezes. Ao longo da década de 1930, esse dispositivo era conhecido como “tubo Kubetsky” (Lubsandorzhev, 2006). Em 1935, de forma independente, foi criada na RCA uma fotomultiplicadora de um único estágio e, em 1936, também na RCA, Zworykin, Morton e Malter relataram o desenvolvimento de uma fotomultiplicadora multiestágio; a primeira fotomultiplicadora comercial era composta por nove eletrodos. A exemplo dos fototubos, a fotomultiplicadora foi cogitada para ser usada para a captação do sinal de áudio de filmes; foi produzida em grandes quantidades durante a Segunda Guerra, empregada como geradora de ruído nos equipamentos de interferência de radares inimigos; mas suas principais aplicações foram científicas, em astronomia e espectroscopia (WRIGHT, 2017).

O conceito da contagem de raios vem do espintariscópio criado por Crookes em 1903: um simples tubo que, numa extremidade, tinha uma tela de sulfeto de zinco diante da qual era posto um grão de sal de rádio e, do outro, uma lente. Como cada ponto na tela correspondia a uma partícula individual, a observação direta das cintilações pela lente permitia contar as emissões. O trabalho era cansativo, e motivou Rutherford e Hans Geiger, seu assistente na Universidade de Manchester, para aperfeiçoar um instrumento de contagem de radiação (FRAME, 2019). Em 1908, Hans Geiger apresentou um detector de partículas alfa, talvez derivado do espintariscópio. Em 1914, conseguiu contar partículas beta, e, em 1924, usou seu

detector para pesquisar raios X e gama. A partir de 1925, como professor na Universidade de Kiel, junto com Walther Müller, aperfeiçoou o contador, de modo a detectar partículas alfa, beta e fótons ionizantes. O *tubo Geiger-Müller* é formado por dois eletrodos coletores: o anodo, geralmente um fio de tungstênio, e o catodo, que geralmente é o cilindro de aço que forma a parede externa, na qual se abre uma janela vedada por uma placa fina de mica, por onde a radiação penetra na válvula. A válvula é preenchida com gás neon, hélio, argônio ou criptônio, acompanhado por um gás resfriador (cloreto, brometo ou isobutano). Partículas alfa e beta ionizam o gás diretamente; raios X e gama ionizam indiretamente, interagindo com o catodo que libera elétrons e ioniza o gás (GEIGER, 1999). O contador começou a ser produzido em 1928 e é usado em dosimetria de radiação, proteção radiológica, física experimental e indústria nuclear, funcionando do seguinte modo: cada vez que uma partícula ou radiação entra no tubo, o gás é ionizado momentaneamente, permitindo que a condução ocorra e liberando um pulso de corrente (GARNER, 1963c; SHAMPO; KYLE; STEENSMA, 2011).

No campo das radiações ionizantes, além do tubo Geiger-Müller, destaca-se o *tubo de Coolidge*. Por volta de 1910, William D. Coolidge trabalhava na GE, junto com Langmuir, no desenvolvimento de uma válvula geradora de raios X, cujas bases tinham sido estabelecidas nas pesquisas de Hertz, Lenard e Röntgen entre 1888 e 1895 (SELIGER, 1995; TYNE, 1994). Em 1913 e 1915, Coolidge apresentou os pedidos de patente de válvulas de vácuo destinadas à produção de raios-X, descrevendo as diferenças entre sua invenção e o tubo de Röntgen usado até ali. A válvula (nas duas versões) era um diodo, com eletrodos de tungstênio, em que a produção de raios X era obtida pela grande emissão de elétrons e sua aceleração rumo ao anodo, onde mudavam de direção, o que provocava a emissão de raios X (COOLIDGE, 1916, 1917; LANGMUIR, 1917). Apesar de suas vantagens, a válvula de Coolidge substituiu lentamente o tubo de Röntgen, que continuou em uso até a década de 1960 (FRAME, 1999). O gerador de raios X é usado em aplicações médicas (radiografia), de saúde pública (esterilização de materiais e alimentos), científicas (instrumentos de pesquisa) e industriais (controle de solda) (CARVALHO; OLIVEIRA, 2017).

2.2.4 Válvulas para aplicações em imagem

Veremos nesta seção, em primeiro lugar, os tubos de raios catódicos que originaram os componentes principais dos sistemas de televisão, além das telas de radar, osciloscópios e

monitores de vídeo dos primeiros computadores. Os pioneiros que se destacaram nesse campo foram Max Dieckmann e Gustav Glage, na Alemanha, e Boris Rosing, na Rússia.

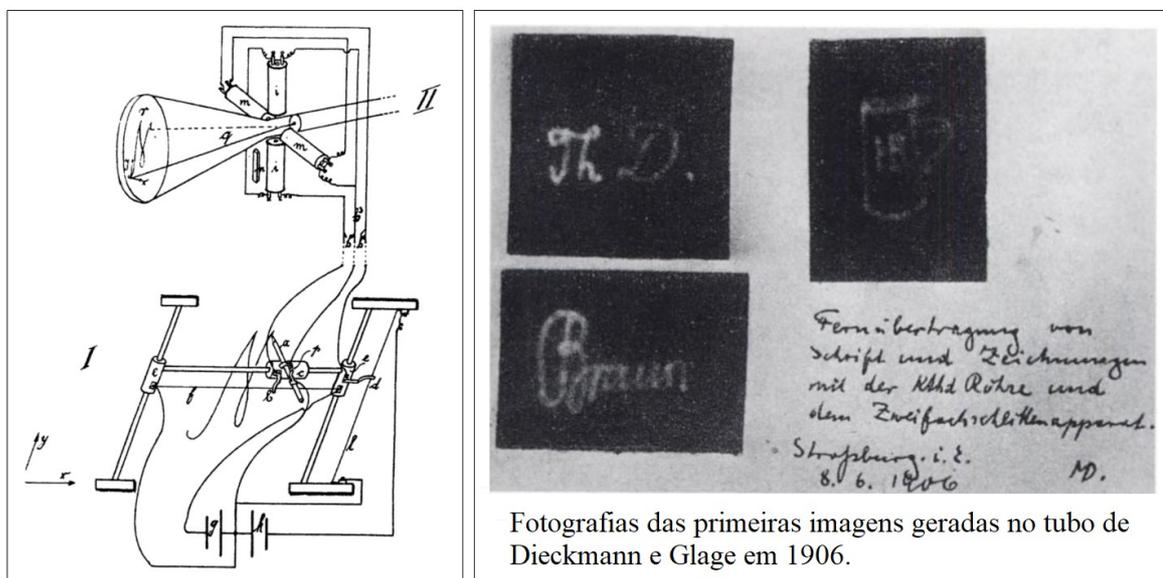
O princípio de funcionamento dos sistemas de televisão, a manipulação eletrônica de imagens, inclui dois processos: a conversão de raios luminosos, originários de um objeto material, em sinais eletrônicos, e vice-versa. O uso de válvulas de imagens (ou tubos, como são frequentemente chamadas nessa área) para realizar essas tarefas baseou-se nos fenômenos da fluorescência e da descarga elétrica em gás ou vácuo. A maioria dos dispositivos de manipulação de imagens derivou do tubo de raios catódicos (TRC), examinado na seção sobre a descarga elétrica nos gases do Capítulo 1, que combinava a descarga de raios catódicos com a formação de imagens numa tela fluorescente. As primeiras experiências com o TRC foram realizadas por Ferdinand Braun, em 1897 (BRAUN, 1897; SHIERS, 1974), e Jonathan Zenneck, que, em 1899, fez com que a imagem fosse exibida na parte frontal do próprio tubo (GUARNIERI, 2018; MARTON; MARTON, 1980).

Em 1906, Max Dieckmann e seu colega Gustav Glage, que trabalhavam com Ferdinand Braun na Universidade de Estrasburgo, utilizaram o tubo de raios catódicos criado por Braun para construir um ancestral do tubo de imagem da televisão. Em 1906, ambos patentearam um “método para transmissão de desenhos de letras e linhas por meio de tubos catódicos”, que combinava o sistema já conhecido na época de teleautografia com o tubo de Braun para exibir as imagens (BURNS, 1998; DIECKMANN, 2019). Sua descrição é útil para avaliar a evolução dos sistemas eletrônicos de geração e captação de imagens.

A figura 2.39 mostra o desenho esquemático do dispositivo, incluído no pedido de patente. O aparelho consistia em um gerador de imagens [I] e um receptor [II]. O gerador de imagem era formado por um estilete de desenho [a] preso a uma barra deslizante [c], cuja guia horizontal tinha em cada extremidade uma barra deslizante [e] que corria verticalmente nos suportes laterais do conjunto. Assim, os movimentos da ponta de escrita eram mecanicamente traduzidos em um par de coordenadas convertidas em mudanças de resistência nos condutores [f] e [l], provocando mudanças correspondentes nas correntes que passavam pelos condutores. No receptor, essas correntes excitavam dois conjuntos perpendiculares de bobinas de deflexão [i] e [m], que geravam dois campos magnéticos junto ao tubo de Braun. O campo resultante defletia o feixe de elétrons e movia o ponto luminoso na tela fluorescente, conforme a ponta de escrita se movimentava. Num aperfeiçoamento posterior do sistema, Dieckmann e Glage utilizaram o disco de Nipkow (um disco perfurado giratório) para fazer a varredura de uma imagem e, através do contato entre escovas de metal (que forneciam os pontos do disco) e um gabarito de metal, eram gerados os picos de corrente traduzidos na imagem do tubo (BURNS,

1998; DIECKMANN, 2019; SHIERS, 1997; TYNE, 1994).

Figura 2.39: Projetor de imagens de Dieckmann e Glage



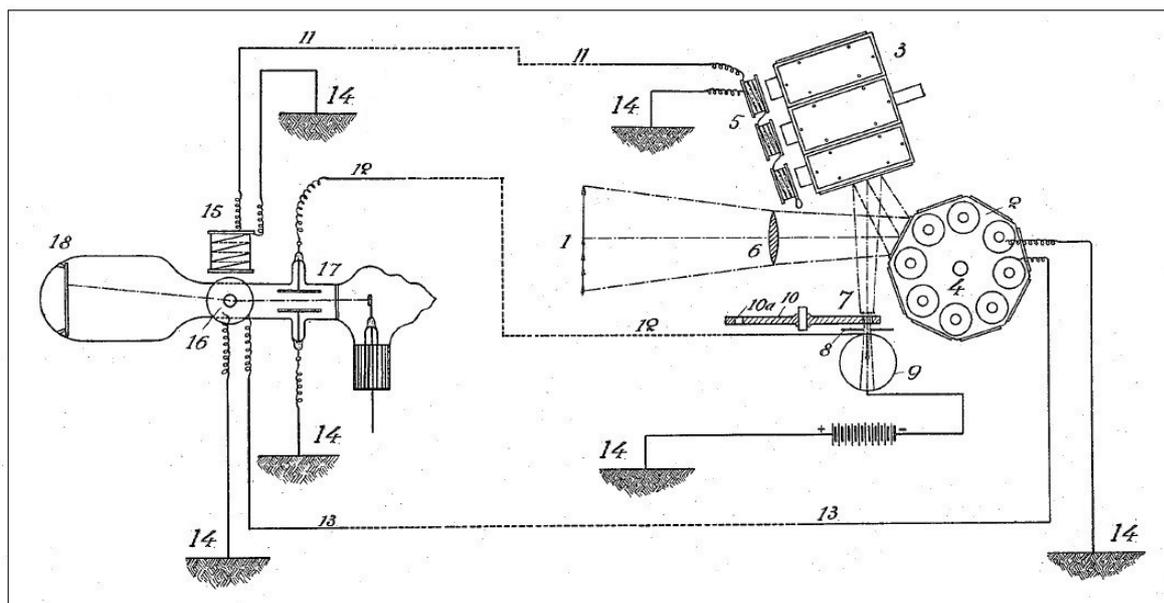
Fonte: Burns (1998, p. 119); Dieckmann e Glage (1907).

Por ironia, Braun discordou do uso do tubo para o que considerava uma fantasia não-científica sem futuro. Entretanto, embora o aparelho de Dieckmann e Glage não fosse um verdadeiro sistema de televisão - pois a transmissão foi feita por um condutor e não foi captada uma imagem de um objeto físico, real -, o aparelho mostrou o potencial do tubo de Braun para a geração e projeção de imagens.

Esse potencial foi explorado pelo físico russo Boris Rosing que, em 1907, patenteou um “método novo e aperfeiçoado de transmissão elétrica a distância de imagens reais” que denominou “telescopia elétrica”. Na patente registrada nos Estados Unidos (em 1911), Rosing descreve as inovações do seu invento que deviam resolver os problemas apresentados pelos sistemas existentes: uma foi o uso de uma célula fotoelétrica para traduzir os pontos de luz e sombra em sinais elétricos; outra foi o aperfeiçoamento dos circuitos de transmissão, para evitar a atenuação do sinal, que resultava em imagens distorcidas. Na estação transmissora, o sistema ótico era formado por uma lente que concentrava a imagem do objeto real e a enviava para um par de espelhos poliédricos, montados em tambores rotativos e dispostos perpendicularmente um em relação ao outro. A imagem era projetada sobre um disco perfurado que, ao girar, deixava os raios de luz passarem como sinais elementares. Esses sinais atingiam a célula fotoelétrica, que os transformava em sinais elétricos proporcionais à

intensidade de iluminação de cada ponto da imagem. Esses sinais eram enviados à estação receptora, formada pelo tubo de raios catódicos e os elementos do circuito que produziam as descargas de feixes catódicos geradoras dos pontos luminosos na tela do tubo de raios catódicos (ROSING, 1915).

Figura 2.40: Sistema de transmissão e recepção de imagens de Rosing



Legenda: 1 – objeto real; 2 e 3 – tambores com os espelhos; 4 e 5 – geradores de corrente; 6 – lente; 7 – imagem do objeto; 8 – tela; 9 – dispositivo fotoelétrico; 10 – disco rotativo; 10a – orifícios no disco; 11, 12, 13 – condutores; 14 – terra; 15 e 16 – bobinas de deflexão; 17 – controle de intensidade do feixe; 18 – tela fluorescente do tubo de raios catódicos.

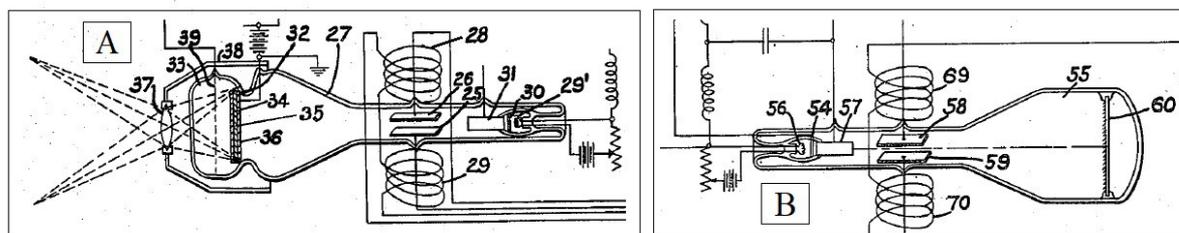
Fonte: adaptada de Rosing (1915, fig. 5 e 19).

Segundo seu ex-aluno Vladimir Zworykin (que emigrou para os Estados Unidos e trabalhou na RCA), Rosing não conhecia o trabalho de Dieckmann e Glage, mas sim os do russo P. I. Bakmetyev, que publicou em 1885 um artigo sobre um sistema de visão a distância (usando uma célula de selênio, para escanear espiralmente a imagem, e uma fonte de luz para reconstituir a imagem também por escaneamento espiral), e de M. Volfke e A. A. Polumordvinov, também russos, que patentearam métodos de transmissão elétrica de imagens em 1898 e 1899, respectivamente. Rosing considerava que a falha desses sistemas anteriores era a lentidão dos aparelhos de recepção eletromecânicos; mas não abandonou totalmente a tecnologia eletromecânica, usada no sistema transmissor. Além disso, não conseguiu resolver de modo satisfatório o problema da intensidade do sinal, por não existirem na época os recursos de amplificação necessários. Apesar dessas deficiências, o projeto de Rosing foi pioneiro no sentido de propor um sistema completo de transmissão de imagens por meios

eletrônicos. O mesmo foi feito pelo engenheiro escocês Alan Campbell-Swinton, que em 1911 apresentou, numa palestra na *Roentgen Society*, a ideia de um método eletrônico para fazer um sistema de televisão, utilizando o TRC na geração do sinal de vídeo e na projeção da imagem; mas nunca tentou desenvolver o projeto (BURNS, 1998; MARSHALL, 2011).

Excetuando-se os projetos pioneiros de Dieckmann, Rosing e Swinton, durante as duas primeiras décadas do século XX, pesquisadores em diversos países (Alemanha, Inglaterra, França, Estados Unidos, Suécia, Noruega e Dinamarca) buscaram basicamente desenvolver sistemas experimentais de televisão usando apenas elementos eletromecânicos. Essa limitação técnica não impediu, entretanto, que, em 1902, o alemão O. von Bronk criasse um precursor da televisão a cores, usando como transdutor optoeletrico um conjunto de três células de selênio, como transdutor eletro-ótico um conjunto de tubos de Geissler, e, associados a cada transdutor, filtros vermelho, verde e azul (BURNS, 1998).

Figura 2.41: Os TRCs do sistema de televisão de Zworykin



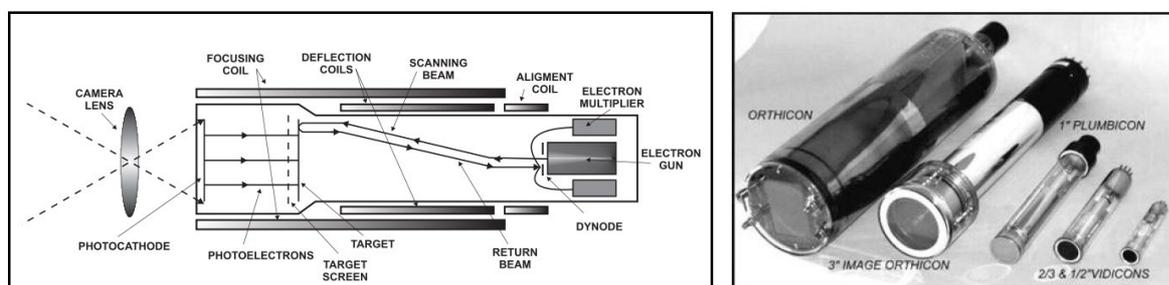
Legenda: **A:** TRC do sistema de transmissão da imagem (iconoscópio). **B:** TRC do sistema receptor (cinescópio). Adaptado de Zworykin (1938, fig. 1, fig. 2).

Os primeiros sistemas eletrônicos práticos de televisão surgiram na década de 1920. Em 1923, Vladimir Zworykin (então trabalhando na Westinghouse) deu entrada na patente (concedida em 1938) de um sistema de televisão em que tanto o transmissor quanto o receptor eram feitos com tubos de raios catódicos. O transmissor era uma versão prática do projeto de Swinton e foi o primeiro tubo para câmeras de vídeo feito pela RCA (BURNS, 2004; HOWETT, 2006; TYNE, 1994). O transdutor era um mosaico de partículas de prata fotoemissiva depositadas numa placa de mica e isoladas umas das outras e da placa, mas acopladas capacitivamente à base metálica da placa. A imagem a ser vista era focalizada por lentes no mosaico e escaneada por um feixe de elétrons que provocava a conversão dos padrões de luz no mosaico em cargas elétricas proporcionais à intensidade da luz em cada ponto da imagem; os sinais elétricos resultantes eram então enviados a um eletrodo coletor (GARNER, 1963c; SPANGENBERG, 1948). O receptor era um TRC construído, segundo a descrição na patente, como um “oscilógrafo de raios catódicos” comum, com um canhão de elétrons e uma tela fluorescente (ZWORYKIN, 1938). A RCA registrou o nome *kinescope*

(cinescópio) para o TRC receptor em 1932, e *iconoscope* (iconoscópio) para o transmissor em 1935 (FOLSOM, 1950).

No desenvolvimento do elemento transmissor do sistema de televisão, apesar de ter havido tentativas de aplicar concepções diferentes, a linha dominante e bem-sucedida foi a dos tubos para câmeras de vídeo derivados do *iconoscópio*. Em torno de 1932, J. D. McGee e W. Tedham, da EMI (Inglaterra), criaram o tubo Emitron: uma versão do iconoscópio que substituiu o dispositivo da RCA no mercado europeu. Em 1939, a RCA lançou o Orthicon; em 1945, o Orthicon de imagem, pequeno e barato, que permitiu popularizar as câmeras de vídeo; e em 1950, o Vidicon, com elemento fotossensível de selênio – o primeiro a usar o efeito fotocondutivo. Em 1957, a Philips lançou o Plumbicon, um aperfeiçoamento do Vidicon usando óxido de chumbo; este tubo foi a base para a criação da câmera a cores, realizada pela Sony em 1968. A partir de 1970, grandes empresas do ramo da eletrônica, principalmente as japonesas (Sony, Toshiba, Hitachi e Matsuhita), lançaram suas versões do Vidicon a cores, usadas até o TRC ser substituído por outros dispositivos (BURNS, 2004; DUMMER, 1983; HOWETT, 2006; SPANGENBERG, 1948).

Figura 2.42: Tubos de imagem para câmeras de vídeo

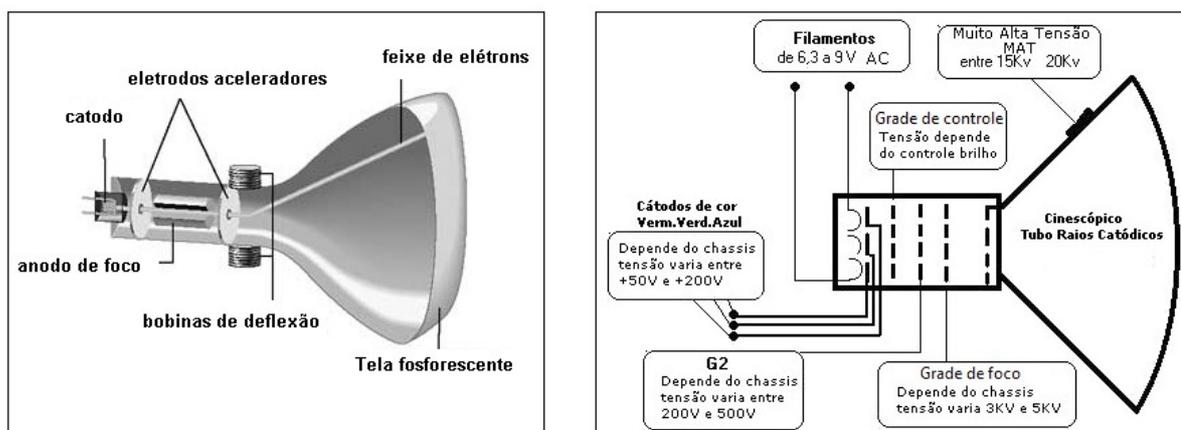


Esquerda: estrutura do tubo Orthicon (VIDEO, 2019). **Direita:** Vista de alguns tubos de imagem para câmeras de vídeo (ORTHICON, 2019).

O **cinescópio** evoluiu em dois aspectos principais: a resolução da imagem exibida e as dimensões da tela. Em 1939, nos Estados Unidos, a RCA e outras empresas, como a Westinghouse, comercializavam televisores com telas de 5 a 12 polegadas, e sintonia para cinco canais. Alguns aparelhos podiam ser conectados a um receptor de rádio para receber o som do programa. Em alguns modelos, a imagem que aparecia no tubo era projetada num espelho situado na face interna da tampa do aparelho, para que pudesse ser vista a distância (KEVIN, 2019).

Os primeiros cinescópios possuíam apenas um cátodo e geravam uma imagem em preto e branco. Mais tarde, foi criado o cinescópio para a televisão a cores, com três cátodos, cada um emitindo uma cor: vermelho, verde e azul.

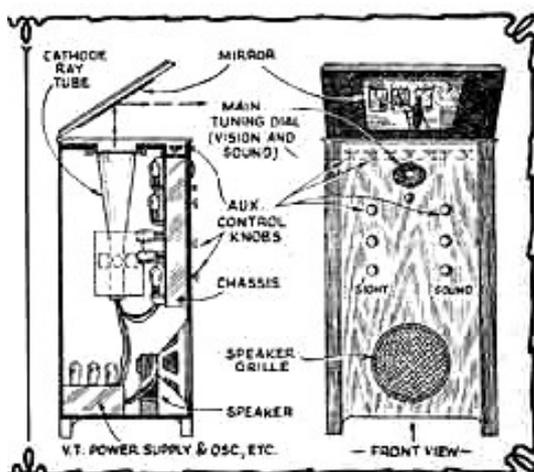
Figura 2.43: Cinescópios



Esquerda: cinescópio monocromático - TV em preto e branco (CINESCÓPIO, 2019). **Direita:** cinescópio tricromático - TV a cores (TELEVISÃO, 2019).

Os mostradores relacionados com os TRCs foram construídos de dois tipos: de visão direta, produzindo a imagem na superfície do próprio dispositivo em que está sendo vista; e de projeção, que formam a imagem numa superfície auxiliar. Os mostradores de projeção estão entre as mais antigas tecnologias eletrônicas de exibição de informação: vários dos antigos receptores de vídeo recorriam à projeção para aumentar o tamanho da imagem produzida pelos pequenos TRCs usados para gerar a imagem, ou permitir sua visualização nos aparelhos em que o TRC era montado verticalmente (BRENNESHOLTZ; STUPP, 2008).

Figura 2.44: Receptor de TV com mostrador de projeção



Receptor RR-359 da RCA (1936):

A imagem do TRC circular de 9 polegadas (23 cm) de diâmetro era refletida em um espelho colocado na face interna da tampa do aparelho, que ficava levantada a 45 graus.

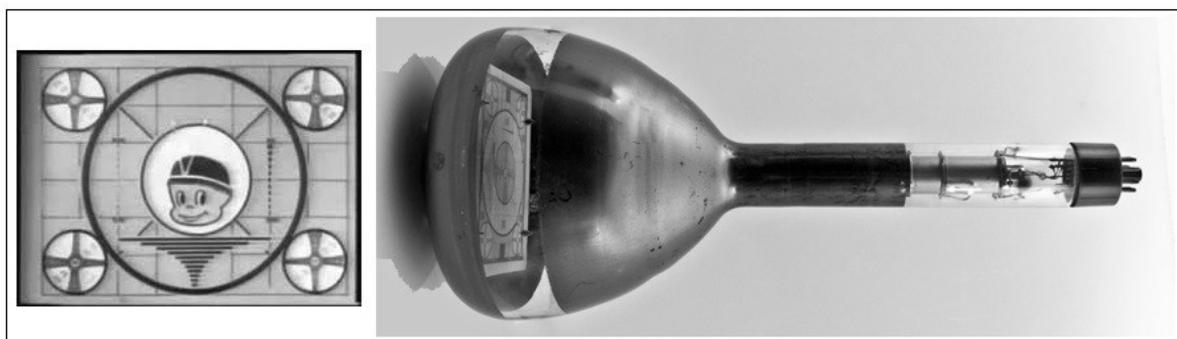
Uma máscara vazada posta sobre o tubo escondia a maior parte das curvas da sua face frontal, criando uma imagem retangular com um pouco menos de 9 polegadas de diagonal.

O espelho não ampliava a imagem.

Fonte: RCA (2019).

Um tipo especial de TRC gerador de imagens foi o *monoscópio*, em que o mosaico era substituído por uma placa de alumínio com uma imagem fixa impressa sobre a cobertura de óxido. Era usado como padrão de teste de TV, e gerava apenas um sinal de vídeo repetitivo. O monoscópio caiu em desuso com o surgimento da televisão a cores, porque só era capaz de gerar uma imagem em preto e branco (GARNER, 1963c; SPANGENBERG, 1948).

Figura 2.45: O monoscópio



Esquerda: padrão da TV Tupi de São Paulo, 1950-1972 (<https://pt.wikipedia.org/wiki/Rede_Tupi >).
Direita: o monoscópio com a matriz da imagem (MONOSCOPE, 2019).

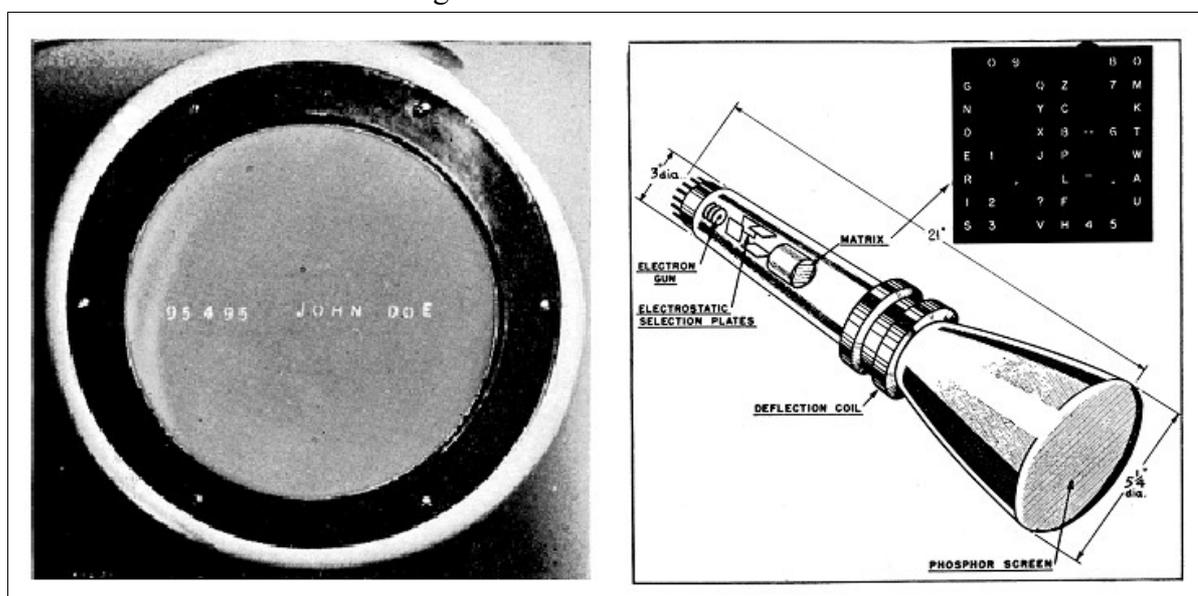
Além dos sistemas de TV, os TRCs foram empregados na visualização de informações, mostrando uma versatilidade que foi explorada pelos projetistas de equipamentos. Foi o caso dos mostradores (*displays*) eletrônicos que convertem um sinal eletrônico representando uma informação de vídeo, imagem fixa e/ou texto, em imagens visíveis.

O mostrador eletrônico mais antigo foi usado nos osciloscópios analógicos, cuja história começou com o TRC. Com a introdução de uma segunda bobina defletora por Zenneck, o tubo tornou-se capaz de deslocar o feixe eletrônico nos sentidos horizontal e vertical, fazendo-o “varrer” a tela, e assim se tornou possível a análise de sinais de eventos, abrindo um campo para a instrumentação. Na década de 1920, os TRCs começavam a ser usados para a realização de medidas em eletrônica. Em 1931, a *General Radio Company* criou o *Electron Oscillograph*, formado por um TRC e uma fonte de alimentação; em 1934, a empresa introduz o primeiro osciloscópio comercial. Em 1938, foi lançado o osciloscópio de duplo feixe pela empresa A. C. Cossor, na Inglaterra. A partir da década de 1930, o dispositivo, fabricado por várias empresas, foi sendo aperfeiçoado para atender às necessidades no campo da instrumentação eletrônica, como o aprimoramento dos circuitos de sincronismo para a melhor visualização dos sinais a serem observados, mas sempre manteve o mostrador de TRC com fósforo emitindo luz verde (OSCOPEs, 2019). Na década de 1940, surgiram os osciloscópios de memória, com tubos especialmente construídos, capazes de armazenar cargas elétricas na tela. Com isso, era possível armazenar a imagem (congelar), mesmo após a ocorrência do evento, para posterior análise. Outras aplicações do TRC como mostrador foram as telas do eletrocardiógrafo, inventado em 1931 pelo belga Pierre Rijlant, e do radar, criado em 1940 por A. H. Rosenthal, da *Rand Corporation* (DUMMER, 1983).

Outra aplicação do TRC foi o tubo de armazenagem (*shaped beam tube* ou *storage tube*), projetado para ser um gerador de caracteres para exibição e armazenamento de textos e

imagens, visando manter uma imagem por longo tempo. O primeiro tubo de armazenagem, o *Charactron*, foi desenvolvido na *Consolidated Vultee Aircraft Corporation* (Convair) por J. T. McNaney, que patenteou o projeto inicial em 1940. No Charactron, o feixe de elétrons era defletido para ser posicionado de modo a passar por um dos caracteres de uma matriz que consistia numa placa metálica vazada com letras, números e outros sinais. Esse tubo foi usado até a década de 1980 como tela dos terminais de computadores, como o Tektronix e o Datagraphix, e foi produzido por várias empresas com nomes diferentes (ELECTRONTYPE, 1949). Um tubo de 480 mm de diâmetro (19 pol.) foi usado como console do sistema de controle e comando AN/FSQ-7 do ambiente SAGE (*Semi Automatic Ground Environment*) para processamento das informações dos radares durante a Guerra Fria.

Figura 2.46: O tubo Charactron



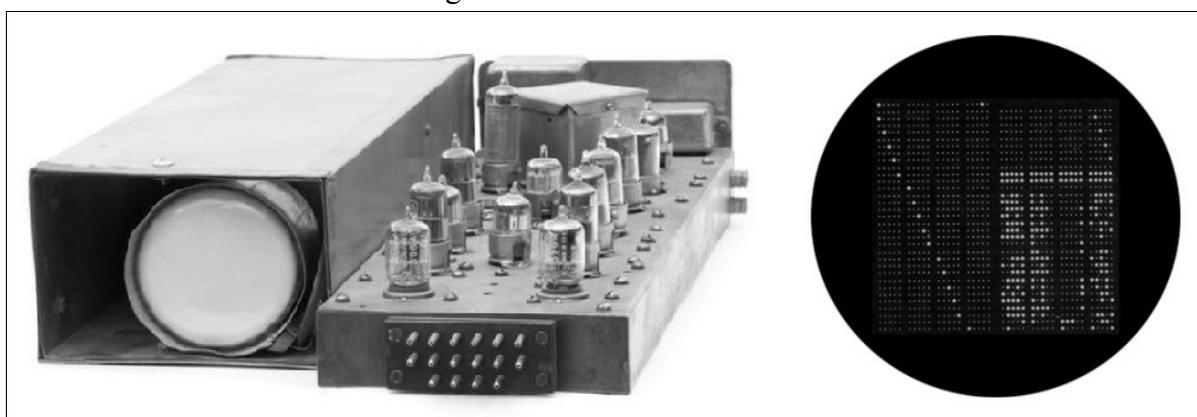
Esquerda: apresentação de informação na tela de um tubo charactron. **Direita:** disposição do tubo com a matriz vazada de caracteres (MCNANEY; JACKSON, 1954).

Outro importante emprego dos TRCs como armazenamento de dados, em computadores, foi a criação do Tubo Williams-Kilburn, mais conhecido como *Tubo Williams*. A ideia ocorreu a Frederic Williams quando viu um osciloscópio de armazenamento de sinais quando fazia uma visita ao MIT, em 1946. Retornando à Inglaterra, Williams, em parceria com Tom Kilburn e Geoff Tootill, desenvolveu o tubo na Universidade de Manchester. Williams e Kilburn patentaram em 1946 um dispositivo modificado, capaz de armazenar estados lógicos (0s e 1s) resultantes das operações de um computador.

O princípio de funcionamento se baseou na propriedade de uma carga eletrostática surgir em uma pequena região, na face interna do TRC, quando o feixe de elétrons incide nela

e permanece por um curto período de tempo, antes de desvanecer. Eram formados pequenos traços distribuídos horizontalmente na tela, que, através de um molde vazado, eram visualizados como pontos. O tipo de carga representado, 0 ou 1 de qualquer região, podia ser sentido por uma grade de metal na parte externa, junto da tela. Como as cargas dissipavam rapidamente, eram preservadas indefinidamente através de um processo de reposição (refrescamento) por meio de circuitos eletrônicos associados. O dispositivo podia armazenar de 512 a 2048 bits, e a capacidade de armazenar tal quantidade de bits provou que os programas podiam ser armazenados dentro do computador.

Figura 2.47: O tubo Williams



Esquerda: tubo Williams com os circuitos associados. **Direita:** aspecto visual com a máscara.
 Fontes: Esq.: Computer History Museum <<https://www.computerhistory.org/revolution/memory-storage/8/308>> .Dir.: <<https://ub.fnwi.uva.nl/computermuseum/williamstube.html>> .

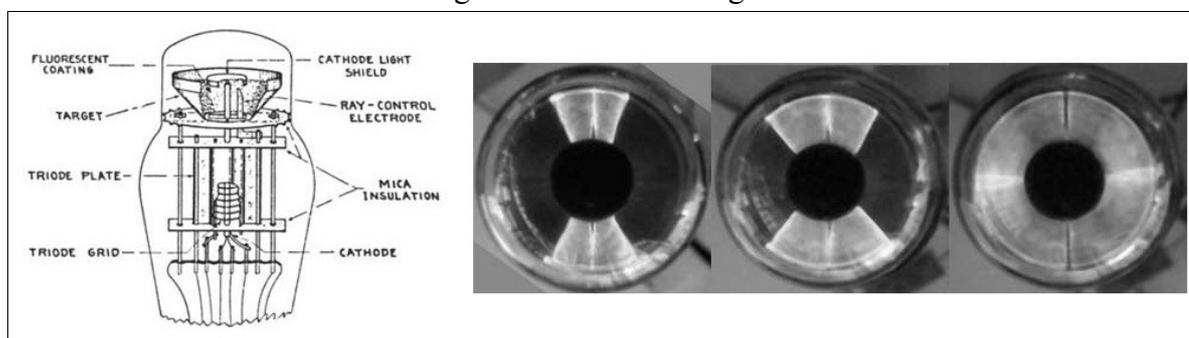
Antes da chegada das memórias de núcleo de ferrite, em 1953, os tubos Williams eram um tipo de memória de acesso aleatório bastante usado nos computadores, apesar de serem pouco confiáveis. Em termos históricos, a memória de acesso aleatório estática (SRAM – *Static Random Access Memory*) usando transistores bipolares surgiu em 1963, e as RAMs dinâmicas (DRAM), usando semicondutores, surgiram em 1970; a técnica de refrescamento usada no tubo Williams foi adotada nas DRAMs. Com o surgimento das RAMs, as memórias de núcleo foram superadas. Na Inglaterra, o tubo Williams foi usado nos computadores Manchester Baby e Manchester Mark 1, computador comercial da Ferranti; nos Estados Unidos, foi usado nos computadores IBM 701 e 702 (comerciais), IAS, Univac, Whirlwind 1 (por volta de 1950) e no MANIAC (*Mathematical Analyzer Numerical Integrator And Computer*), que fez os cálculos da bomba atômica de hidrogênio no começo da década de 1950, e usava 40 desses tubos para armazenar 1024 números de 40 bits; também foi usado no soviético Strela 1, e no TAC japonês (KNOLL; KAZAN, 1952; CHM, 2019).

Algumas válvulas mostradoras (*displays*) diferentes das vistas até agora, foram

projetadas para indicar determinado estado de operação do equipamento. Foram usadas não somente em receptores de rádio, mas também em aparelhos de instrumentação e em equipamentos digitais como os computadores; começaram a ser empregadas em várias aplicações a partir do final da década de 1940.

Uma válvula popular foi a *olho mágico* (ou olho de gato), muito usada como indicador de sintonia em receptores de rádio. Foi inventada em 1932 por Allen B. DuMont, da RCA. Era uma espécie de combinação de válvula termoiônica com TRC: consistia num triodo amplificador miniatura, com um catodo cilíndrico no centro, uma grade com a forma de fio paralela ao catodo, e um anodo de forma cônica, circundando o conjunto catodo-grade, e coberto, no lado voltado para a extremidade do invólucro, com um material fluorescente como o silicato de zinco, que produz brilho verde. Quando a grade ficava suficientemente positiva em relação ao catodo, o anodo aparecia como um círculo iluminado; se a grade ficasse negativa, repelia os elétrons da proximidade imediata, provocando a formação de um setor escuro no anodo. Quanto mais negativa a grade ficasse, maior seria a seção escura (SPANGENBERG, 1948; STOKES, 1997; WYATT, 2019).

Figura 2.48: O olho mágico

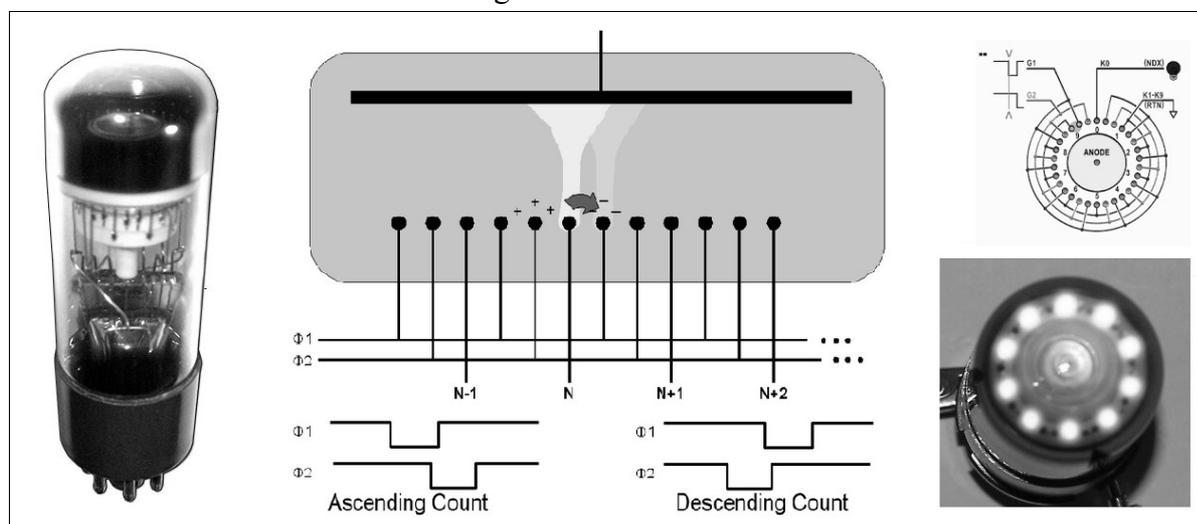


Esquerda: esquema (RCA, 1947, p. 38). **Direita:** funcionamento (RADIOMUSEUM, 2019, 6X6).

A válvula *contadora decimal de passo* (*stepping tube*) foi desenvolvida em 1949 no laboratório de eletrônica da Ericsson, entrando em produção em 1950, e sendo usada em computadores, calculadoras e produtos similares durante as décadas de 1950 e 1960. Era uma válvula de descarga em gás neon, composta por um anodo central, rodeado por catodos principais, entre os quais estavam localizados os eletrodos de controle ligados em paralelo. Cada vez que um pulso era aplicado a um eletrodo de controle, a descarga luminosa se movia para o eletrodo adjacente, completando assim um passo; colocando dez eletrodos em cada válvula e cascadeando as válvulas, formava-se um contador. Válvulas podiam ser associadas em cascata para formar contadores com módulos de contagem para centenas, milhares etc. Uma válvula desse tipo, chamada *Dekatron*, foi produzida amplamente pela Ericsson na

Inglaterra e a Remington Rand nos Estados Unidos (TWEEDIE, 2019; DUMMER, 1983).

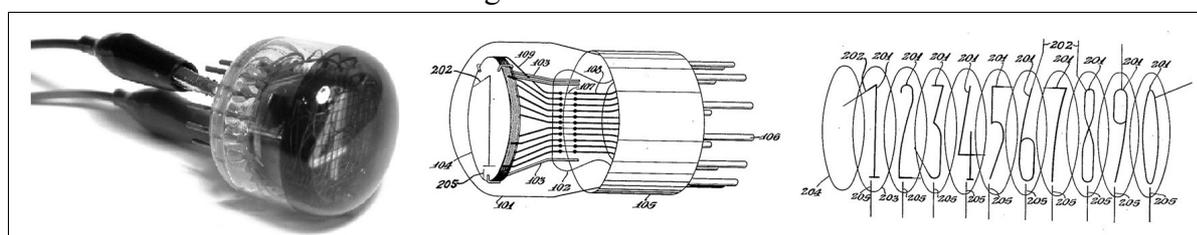
Figura 2.49: Dekatron



Esquerda: vista externa. **Centro:** disposição interna dos eletrodos. **Direita:** funcionamento.
Fonte: DEKATRON (2019).

Outra válvula contadora, o *tubo nixie*, foi usada em mostradores numéricos de voltímetros, multímetros, contadores de frequência, calculadoras de mesa, relógios etc. Foi criada nos Estados Unidos pela empresa Haydu e comercializada pela Burroughs (que adquiriu a Haydu) a partir de 1955. Era um tubo de descarga em gás (neon ou outro) com um conjunto de catodos, cada um modelado na forma de um algarismo de 0 a 9; a imagem do número era exibida quando ocorria a descarga, e dependia do cátodo que havia sido ativado (WYATT, 2019; GARNER, 1963c). Os tubos nixie foram substituídos nos equipamentos pelos *displays* de leds, notadamente pelos de sete segmentos.

Figura 2.50: Tubo nixie



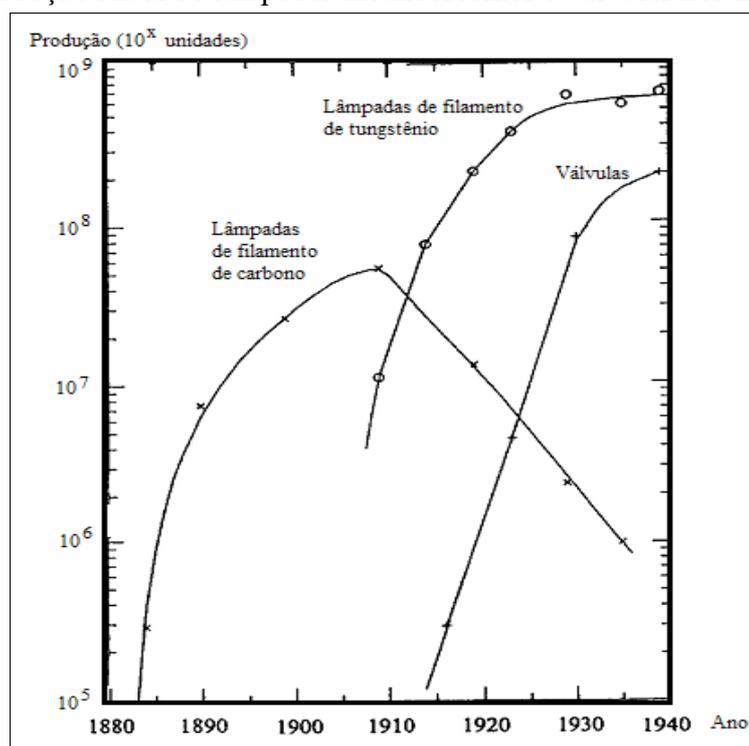
Esquerda: vista externa. **Centro:** estrutura interna. **Direita:** catodos (BOOS, 2019).

2.3 PRODUÇÃO E MANUTENÇÃO

2.3.1 A produção das válvulas

Após as primeiras invenções, a indústria de válvulas começou a se desenvolver lentamente a partir de 1905, usando a tecnologia já existente, desenvolvida para a fabricação de lâmpadas incandescentes. Na época, a produção anual de lâmpadas de filamento de carbono nos EUA já era de cerca de 50 milhões, de modo que a tecnologia de fabricação em grande escala estava bem estabelecida. Grande parte da tecnologia da lâmpada podia ser imediatamente transferida para a produção de válvulas, com apenas pequenas complicações decorrentes das estruturas de eletrodos das válvulas, que exigiam mais alto vácuo.

Gráfico 2.2: Produção anual de lâmpadas incandescentes e válvulas nos EUA (1880-1940)

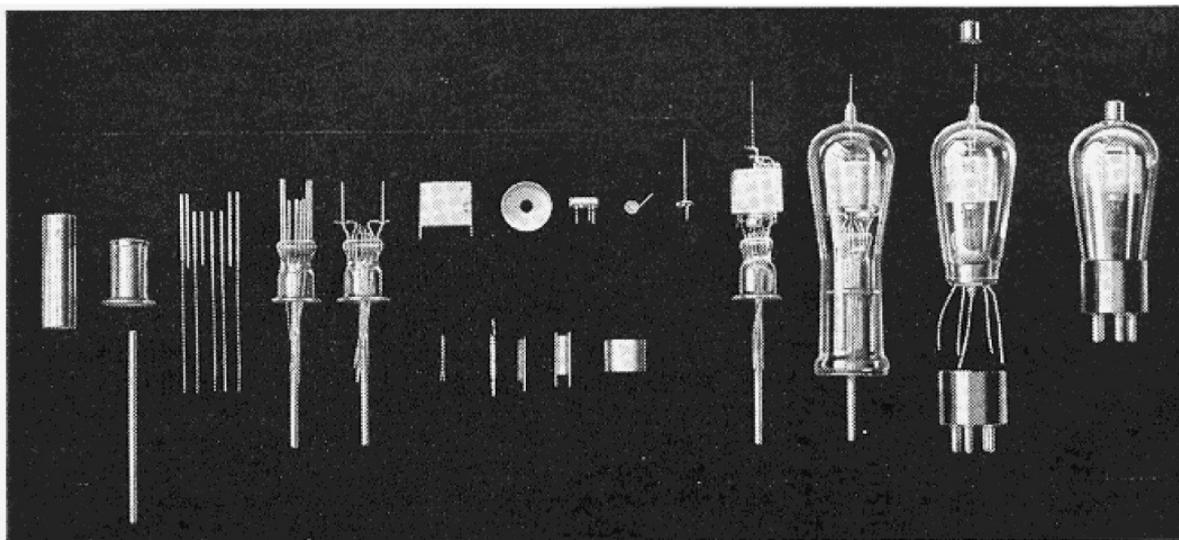


Fonte: adaptado de Redhead (2005).

O outro fator que contribuiu para a expansão da indústria de válvulas foi a invenção do tungstênio dúctil por Coolidge, em 1911, que permitiu a produção de filamentos mais baratos, que substituíram rapidamente os filamentos de carbono. Nos anos seguintes, foram criados os filamentos de tungstênio toriado, que operavam em temperaturas mais baixas. Este ponto de amadurecimento da tecnologia marcou o fim do período inicial de formação e o início da fase de aperfeiçoamento e diversificação das válvulas, que se caracterizou pela rápida expansão do

seu uso. (REDHEAD, 2005). O Gráfico 2.2 mostra, além da dinâmica da substituição dos filamentos de carbono pelos de tungstênio nas lâmpadas, a curva de crescimento da produção de válvulas nos Estados Unidos até 1940.

Figura 2.51: Partes constituintes de uma válvula de recepção antiga

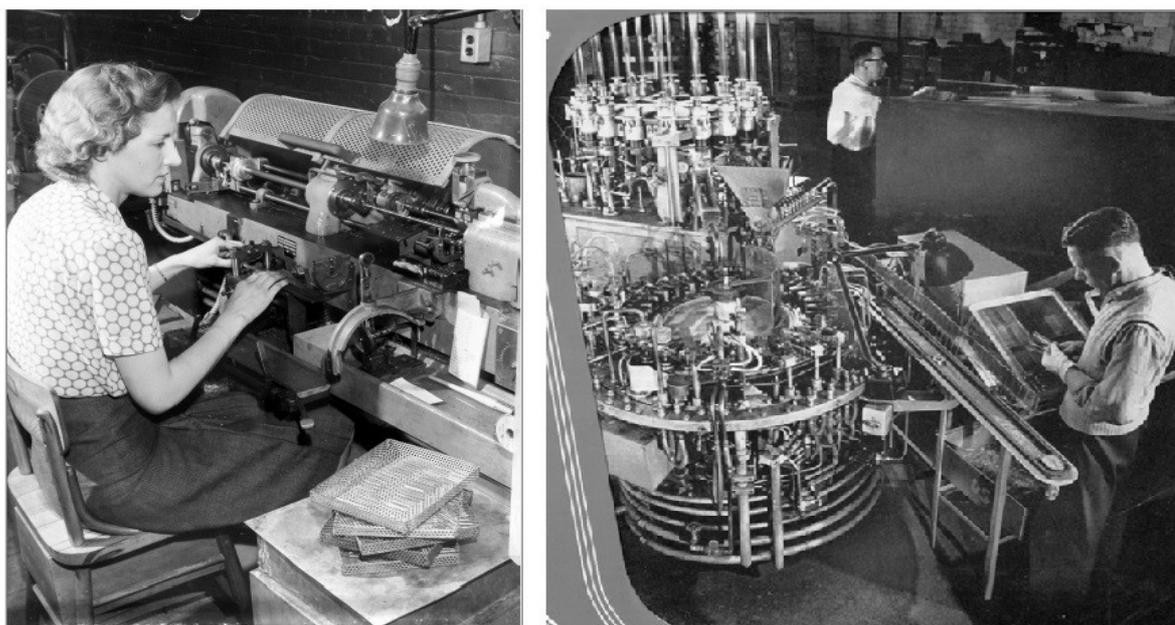


Fonte: RCA (1933)

Até o início das transmissões de radiodifusão, as válvulas eram feitas por meio de equipamentos de laboratório. O volume relativamente pequeno de produção podia ser atendido por sopradores de vidro, usando um mínimo de máquinas. O maquinário existente para fabricação de lâmpadas foi considerado adequado, principalmente porque as tolerâncias para válvulas ainda eram bastante amplas. Os preços das válvulas eram tais, que elas podiam ser danificadas sem muita consideração pelo custo. Mas com o início da radiodifusão comercial e a repentina demanda pelo público em geral, a produção de válvulas se tornou realmente uma indústria. Não era mais uma questão de fornecer milhares, mas milhões de válvulas para operar os aparelhos em milhões de residências. Durante os primeiros anos da radiodifusão, houve uma grande escassez de válvulas, mas, aos poucos, a indústria se adaptou à demanda. Na manufatura, os trabalhadores precisavam ter habilidades e conhecimentos especializados, e um único técnico realizava quase todo o processo de produção do objeto. Conforme se tornou necessário produzir mais válvulas, máquinas começaram a ser criadas para realizar etapas da produção, e o operário precisava apenas controlar o funcionamento dessas máquinas, sem ter conhecimentos técnicos sobre os procedimentos que elas realizavam. Assim, a produção das válvulas foi sendo estruturada pelo modelo fordista de linha de montagem dividida em operações simples. O vidreiro foi substituído pela máquina automática. Trabalhadoras também entraram na indústria, montando e soldando as peças de

metal na haste de vidro, carregando e descarregando as máquinas automáticas, fazendo teste e embalagem. A maior precisão das máquinas permitiu melhorar a qualidade do produto (FOREST, 1930). A possibilidade de utilização de mão de obra feminina não especializada foi muito conveniente porque havia falta de mão de obra masculina, particularmente a especializada, que, além de rara, era cara. Além disso, as mulheres eram consideradas mais habilidosas para fazer o trabalho minucioso de manipulação das partes das válvulas.

Figura 2.52: Produção de componentes



Esquerda: trabalhadora opera torno para enrolamento dos fios da grade no suporte (CMC, 2019). **Direita:** trabalhador controla máquina de produção de bulbos de vidro (AUTOMATIC, 1964).

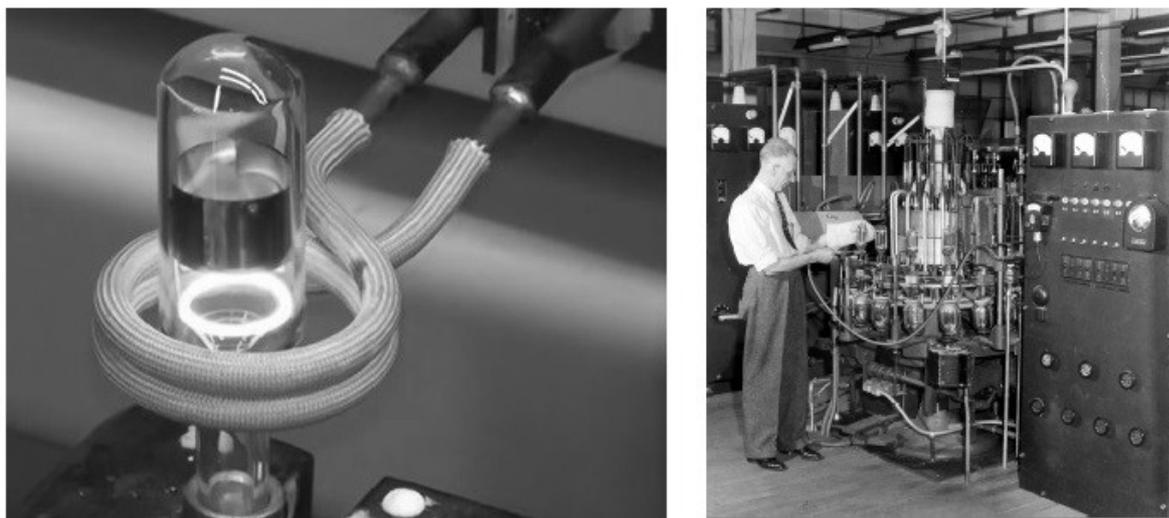
Figura 2.53: Etapas da montagem (Marconi RVC, Toronto, 1944)



Esquerda: trabalhadora soldando os componentes (armazenados abaixo, à direita) para montar uma válvula. **Direita:** trabalhadoras em uma linha de de montagem típica de válvulas (CMC, 2019).

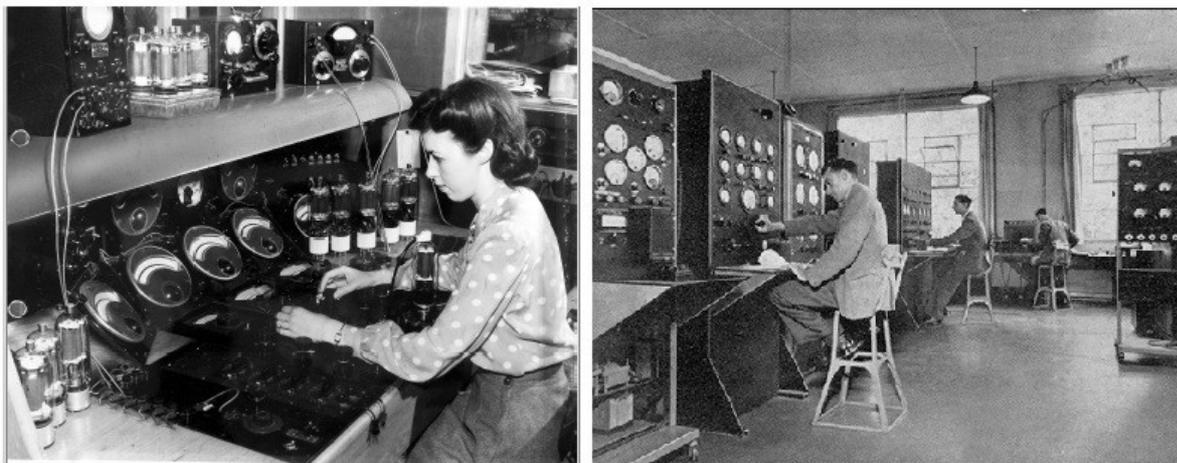
Devido à necessidade de produção de grande número de válvulas para o atendimento da demanda, as empresas que dominavam a tecnologia construíram fábricas nos seus próprios países e em outros. A produção, com o uso intensivo de mão de obra, masculina e feminina, era feita geralmente em grandes unidades industriais que abrigavam os setores de projeto e linhas de produção para as várias fases de montagem e teste para diferentes tipos de válvulas, quando era o caso (AUTOMATIC, 1964; CMC, 2019; MULLARD, 1953).

Figura 2.54: Produção do vácuo



Esquerda: aquecimento do *getter* por indução (RDO, 2019). **Direita:** técnico próximo a uma máquina de produzir vácuo em válvulas de potência (CMC, 2019).

Figura 2.55: Etapa de testes



Esquerda: trabalhadora fazendo testes elétricos em válvulas de potência (CMC, 2019). **Direita:** técnicos no laboratório de aplicações e medidas de válvulas da Mullard (AUTOMATIC, 1964)

As tarefas da produção envolviam a seleção e o tratamento dos vários materiais utilizados nas partes constituintes das válvulas, como, por exemplo, os fios que tinham de ser enrolados de maneira cuidadosa para formar as grades. Antes de serem montadas, havia a

seleção e verificação das tolerâncias de terminais, separadores de mica, peças metálicas para a placa, soquetes, tubos de vidro; controle de qualidade através da inspeção visual e teste elétrico individual de cada válvula. A montagem do corpo era feita com encaixe das peças e com soldadores elétricos para unir os componentes da válvula aos pinos do soquete. Depois de montado, o conjunto era adicionado ao bulbo de vidro. O próximo passo era fazer vácuo no bulbo; nesse processo, uma pequena placa, *getter*, era aquecida (processo patenteado pela RCA em 1938), para eliminação de impurezas e aprimorar o vácuo, que posteriormente foi feito por indução de radiofrequência no corpo da válvula. Com o mesmo objetivo de atender à demanda, como citado anteriormente, foram feitos projetos de máquinas para a automatização de determinados processos que poderiam ser produzidos simultaneamente de várias partes, como a fabricação dos tubos de vidro (AUTOMATIC, 1964; CMC, 2019; MULLARD, 1953; WESTERN, 2019).

2.3.2 Os novos técnicos

A tecnologia eletrônica combinou o controle do fluxo de elétrons proporcionado pelas válvulas com as funções dos componentes passivos (resistores, capacitores e indutores) vindos da tecnologia elétrica. Este quadro fez surgir novos profissionais (nesse caso, majoritariamente masculinos) com conhecimentos de eletrônica, trabalhando dentro e fora das fábricas em projeto, produção e manutenção de sistemas e/ou equipamentos valvulados.

Figura 2.56: Técnico de manutenção examinando uma TV (1950)



Na prateleira, da esquerda para a direita: gerador de varredura, multímetro, gerador de RF.

Na bancada: à esquerda, osciloscópio; à direita, mala de ferramentas.

Fonte: Sylvania (1950, n. 8, p. M-32).

Uma consequência necessária foi o desenvolvimento de instrumentos para o teste de componentes e circuitos, como o multímetro para as medidas das variáveis elétricas dos circuitos (corrente, tensão e resistência), que foi uma evolução natural dos galvanômetros inventados no século XIX; o osciloscópio que, como já vimos, foi uma aplicação do TRC; geradores de sinais; e o testador de válvulas, criado para avaliar o estado das válvulas verificando alguns parâmetros como a capacidade de emissão do catodo e a existência de curtos-circuitos entre eletrodos, entre outros.

Figura 2.57: Testador de válvulas Sylvania (final dos anos 1950)



Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tube_tester>

Outra consequência foi a estruturação de cursos de treinamento e a publicação de livros e periódicos dirigidos a esses novos técnicos, abrangendo informações sobre teoria da eletricidade, sobre os instrumentos de trabalho, os componentes, circuitos e aparelhos.

2.4 A CHEGADA DO TRANSÍSTOR

Entre 1920 e 1950, a tecnologia de válvulas esteve na vanguarda da eletrônica e foi uma das principais indústrias de alta tecnologia do período. A válvula foi um elemento chave nos equipamentos militares das duas guerras mundiais; na Segunda Guerra, em especial, foi presença importante nos sistemas de comunicações, no radar e nos sistemas automáticos de

artilharia antiaérea que integravam radar, computador e canhão antiáereo; e ainda nos fusíveis de proximidade, minirradars montados dentro dos projéteis dos canhões antiaéreos, que aumentaram substancialmente a eficiência da artilharia antiaérea (SKOLNIK, 1962).

Vimos anteriormente que as válvulas foram hegemônicas nos equipamentos e sistemas que empregaram sinais analógicos, como os rádios e amplificadores de áudio, e, posteriormente, também foram bem-sucedidas nos computadores digitais a partir da Segunda Guerra. No entanto, apesar de terem sido projetadas válvulas miniatura, com baixos valores de alimentação e pequenas dimensões para aplicações especiais, para boa parte das aplicações, as válvulas apresentavam inconvenientes que faziam parte do seu próprio projeto: eram volumosas, frágeis, requeriam corrente apreciável para os filamentos e dissipavam boa quantidade de calor. Diante dessas limitações – ou “gargalos”, como consideraram Mowery e Rosenberg (2005) –, a criação do transistor foi um projeto perseguido para criar um componente que viesse substituir a válvula, levado a cabo por alguns grupos de pesquisadores em poucos lugares, dentro de uma linha de pesquisas que consistiu em investigar o comportamento da estrutura dos materiais semicondutores, diante dos conhecimentos da ciência dos materiais e da mecânica quântica, em que foi proposta a teoria da estrutura de bandas de energia dos semicondutores.

Tentativas de criar dispositivos feitos de materiais semicondutores que, como as válvulas, tivessem a mesma capacidade de controlar o fluxo de corrente entre os eletrodos, foram implementadas desde o início da década de 1920. Entre 1922 e 1923, o engenheiro russo Oleg Losev construiu um amplificador usando diodo de contato de ponta de zinco para obter amplificação de sinais até 5 MHz. Também foram patenteados projetos de transistores de efeito de campo, TEC (FET – *Field Effect Transistor*), em 1930 e 1933, por Julius Lilienfeld nos Estados Unidos, e em 1935, por Oskar Heil, quando trabalhava na Universidade de Cambridge, (como vimos ao falar da klystron). Em 1938, Rudolf Hilsch e Robert W. Pohl, quando trabalhavam na Universidade de Göttingen, na Alemanha, publicaram a descrição de um dispositivo usando cristais de brometo de potássio com três eletrodos, cujo comportamento seria o de um amplificador (ATHERTON, 1984; MALOBERTI; DAVIES, 2016;). Mas esses dispositivos não tiveram consequências comerciais.

O projeto mais bem-sucedido foi o organizado nos Bell Labs, que culminou com a criação do transistor de contato de ponta de germânio, em dezembro de 1947, por Walter Brattain e John Bardeen (HODDESON, 1981). Os Estados Unidos não eram os únicos a perseguir a construção de semicondutores pois, em 1948, os físicos alemães Herbert Mataré e Heinrich Welker, com experiência em radar, desenvolveram um dispositivo amplificador de

contato de ponta de germânio similar ao da equipe dos Bell Labs, que foi denominado *transistron*, o transistor “francês”. Mataré e Welker estavam trabalhando em experimentos em uma pequena empresa, a *Compagnie des Freins et Signaux*, subsidiária da Westinghouse, em Paris, por conta de um contrato com o ministério responsável pelas telecomunicações; o objetivo era suprir o país com repetidores de estado sólido para a substituição de válvulas (DORMAEL, 2019).

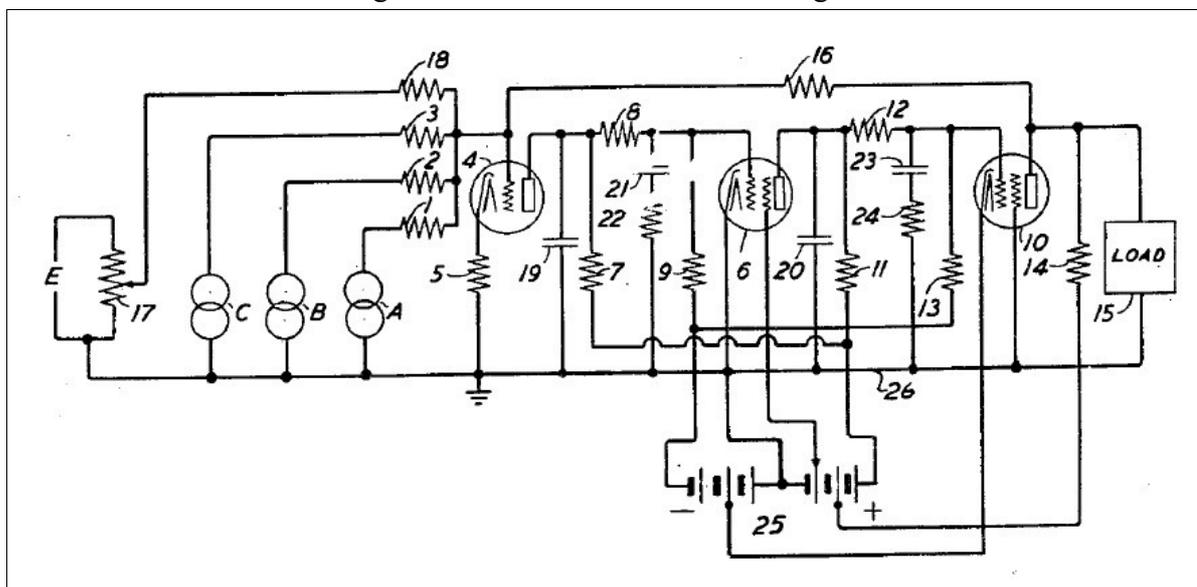
Em janeiro de 1948, William Schokley solicitou a patente de um transistor de junção bipolar, que ele idealizou, baseado na junção PN criada por Russell Ohl em 1940. Somente em 1951, os Bell Labs desenvolveram processos de produção que permitiram que esse transistor fosse fabricado em quantidade. O outro marco desse período foi a criação do primeiro transistor de efeito de campo (TEC) comercial, produzido na França em 1958 por Stanislaus Teszner, cientista polonês empregado pela *Compagnie Française Thomson Houston*, uma empresa da *General Electric*. Chamado de *technitron*, este dispositivo era feito de germânio e não vingou comercialmente. Só em 1962, Stevan Hofstein e Frederic Heiman trabalhando na RCA desenvolveram um TEC de silício que se tornou a base de fabricação dos circuitos integrados. No mesmo ano, a Fairchild Corporation anunciou a invenção do transistor de efeito de campo de óxido de metal-silício (MOSFET). Paralelamente ao desenvolvimento dos TECs, o conceito de circuito integrado (CI) foi criado em 1958 por Jack Kilby, quando trabalhava na Texas Instruments, e no mesmo ano Kilby fabricou o primeiro circuito integrado de germânio, um oscilador de deslocamento de fase. O próximo passo foi dado por Robert Noyce, da Fairchild Corporation, que, seis meses após o sucesso de Kilby, produziu o primeiro circuito integrado de silício, tornando o conceito viável comercialmente. Em março de 1961, a Fairchild produziu a primeira linha de circuitos integrados para o mercado com uma técnica de fabricação em que foi possível o uso de transistores, diodos, resistores e capacitores, reunidos em uma única pastilha (*chip*) de silício (MORRIS, 2008).

Além disso, o domínio da teoria e das técnicas de fabricação dos semicondutores possibilitou o desenvolvimento dos circuitos integrados na década de 1960, o que podemos considerar que abriu o caminho, tanto para a miniaturização extrema, como para o aumento da complexidade de aplicações analógicas e digitais das décadas seguintes. Para avaliar o impacto disso, podemos tomar como exemplo a primeira geração de computadores eletrônicos. Dependendo da complexidade dos mesmos, tiveram que ser usados até alguns milhares de válvulas nos seus módulos; a adoção dos transistores, a partir da década de 1960, fez com que diminuíssem substancialmente de volume. Com a entrada dos transistores em cena, projetos de engenharia, com razoável número de componentes, ainda que

implementados a princípio com válvulas, puderam ser produzidos em massa usando semicondutores, como por exemplo o sistema de envio de voz usando técnicas digitais, empregando a modulação por código de pulso (PCM – *Pulse Code Modulation*) idealizado em 1938 por Alec Reeves, quando trabalhava no laboratório da IT&T em Paris. Outro exemplo foi o amplificador operacional, dispositivo chave para a eletrônica analógica: em 1941, Karl Swartzel, quando trabalhava nos Bell Labs, deu entrada na patente de um amplificador somador valvulado com realimentação, cujo circuito é mostrado na figura 2.58 (SWARTZEL, 1946).

Além dos circuitos integrados, derivados dos conhecimentos das técnicas de produção de semicondutores, a partir da década de 1960, começaram a ser criados componentes que formaram um novo ramo tecnológico, a optoeletrônica, baseada em dispositivos emissores e detectores de luz. Ainda nessa década, como já foi comentado, começaram a surgir os tiristores projetados para trabalhar com alta potência. Todo esse quadro influenciou o destino das válvulas.

Figura 2.58: Circuito somador analógico



Fonte: Swartzel (1946).

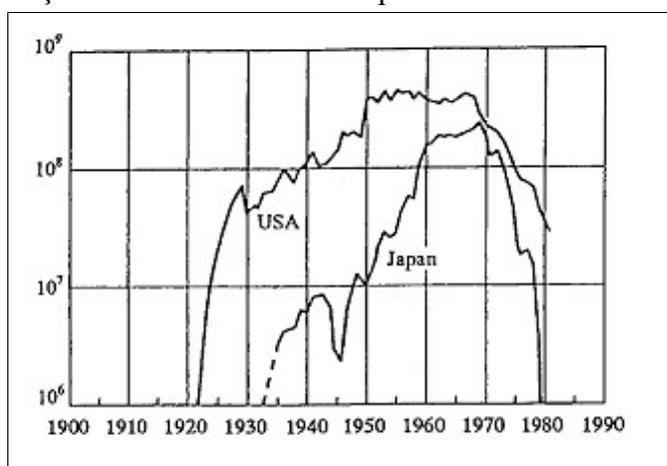
A chegada dos transístores e circuitos integrados, nas décadas de 1960 e 1970, influenciou a trajetória de profissionais técnicos (dos quais falamos na seção 2.3) ou que estavam envolvidos em atividades associadas com vendas e outras. Um dos fatores ligados a isso foi o fato de os profissionais da área não perceberem a extensão total da mudança que os semicondutores trariam. Isso pode ser percebido na declaração de Louis E. Garner Jr., então presidente e diretor de pesquisas de uma empresa de consultoria técnica em eletrônica nos

Estados Unidos, que avaliou a tendência de evolução tecnológica, mas não as consequências do surgimento dos transístores, pois declarou o seguinte:

Como a “árvore genealógica” da válvula se ramificará no futuro? Mesmo um palpite educado provavelmente está errado. Apenas duas coisas são certas: haverá muitos tipos novos de válvulas introduzidos nos próximos anos, e a “árvore” continuará crescendo! (GARNER, 1963c; tradução nossa)

Outro fator de impacto sobre os trabalhadores foi o fato de que muitos deles não conseguiram ou decidiram não acompanhar a mudança, por avaliarem que o período de aprendizagem da nova tecnologia seria longo e penoso demais. Neste sentido, tive, ao longo da minha vida profissional, o testemunho pessoal de vários técnicos. Entretanto, o mercado de trabalho não se fechou bruscamente para eles. Nas décadas de 1950 a 1970, observou-se a convivência entre os transístores e as válvulas. Se, em um primeiro momento, a indústria de transístores se posicionou tendo como referência as válvulas, posteriormente ocorreu o contrário: a indústria de válvulas se posicionou com a criação de alguns projetos para fazer frente à disseminação dos transístores no começo da década de 1960, como a compactron, com várias válvulas em um invólucro, e a válvula miniatura nuvistor. O modo como se deu a transição pode ser percebido nos conteúdos mistos dos livros-texto de Eletrônica, voltados para os cursos técnicos e de engenharia, a partir da década de 1960. Os equipamentos comerciais, militares e científicos com válvulas ainda dominavam a cena, mas a era dos semicondutores estava começando; por isso, era necessário, não só descrever o funcionamento de circuitos valvulados, mas também, de forma crescente, os seus equivalentes transistorizados (REICH, 1961).

Gráfico 2.3: Produção anual de válvulas receptoras nos EUA e no Japão (1900-1990)



Fonte: Redhead (2005)

No seu auge, a indústria de válvulas produzia centenas de milhões de unidades por ano

em todo o mundo. Ainda na década de 1960, encaminhando-se para o fim a hegemonia das válvulas nos equipamentos eletrônicos, eram produzidas válvulas com uma imensa gama de potências, faixas de frequência de funcionamento, variados tipos de aplicações, tipos de invólucros, e preços. De acordo com um artigo da época (ELECTRONICS, 1962), somente a RCA fabricava 1.300 diferentes tipos de válvulas, em quatro fábricas nos Estados Unidos, com preços variando de 50 *cents* a 50.000 dólares (418.729 dólares em 2019). Podemos considerar que custo e confiabilidade ditaram o ritmo da transição entre os aparelhos valvulados e os transistorizados. Na minha experiência profissional, encontrei televisores híbridos em que os circuitos de processamento de sinais usavam transistores e os amplificadores de saída dos estágios de deflexão horizontal e vertical usavam válvulas, uma opção dos projetistas da época pelo emprego dispositivos confiáveis para a função.

A produção em massa de válvulas entrou em colapso na década de 1970, com a introdução comercial dos transistores. Apenas alguns pequenos fabricantes continuaram a produzir válvulas receptoras, principalmente na Europa Oriental e no Japão (REDHEAD, 2005). Entretanto, como vimos ao longo deste capítulo, alguns tipos de válvulas tiveram uma vida mais longa, mesmo depois da sua substituição pelos transistores e CIs nas aplicações mais visíveis.

Quadro 2.4: Válvulas (recepção) x transistores bipolares (baixa e média potência)

| <i>Parâmetros</i> | <i>Válvulas</i> | <i>Transistores</i> |
|-------------------------------------|---|---------------------|
| Tensão de polarização dos eletrodos | Alta | Baixa |
| Corrente | Baixa | Alta |
| Tensão de filamento | Até dezenas de Volts | - |
| Impedância ($Z = E/I$) | Alta | Baixa |
| Temperatura de funcionamento | Alta | Baixa |
| Início de funcionamento | Intervalo de 1 minuto ou mais | Imediato |
| Volume e peso | Grandes* | Pequenos |
| Rigidez mecânica | Baixa** | Alta |
| Tempo de vida | Limitado pela capacidade de emissão do catodo | Alto |

* Exceto para as válvulas miniaturas e subminiaturas.

** Exceto para as válvulas com invólucro metálico de proteção.

Para se entender a convivência entre os dois dispositivos, que se associa com os dados do Quadro 2.4, podemos recorrer à opinião de Moe (1959), que considerava que, para a escolha de componentes para aplicações industriais e militares, os projetistas deveriam

observar os seguintes parâmetros:

- 1) eficiência de amplificação (transcondutância – relação entre a corrente de placa e tensão de grade);
- 2) limite de frequência superior;
- 3) figura de ruído;
- 4) requisitos de alta voltagem de placa;
- 5) requisitos de potência de saída;
- 6) espalhamento das características e tolerâncias elétricas;
- 7) volume e peso;
- 8) confiabilidade;
- 9) capacidade de operar em altas temperaturas;
- 10) capacidade de suportar radiação nuclear.

Dentre estes fatores, a temperatura e a confiabilidade contavam a favor das válvulas, pois os dispositivos semicondutores têm o seu funcionamento afetado pelo calor.

Para o entendimento da capacidade de suportar radiações, deve-se levar em consideração o contexto histórico do período, que foi a Guerra Fria. Foi um período em que se desenvolveu a indústria nuclear, primariamente para a geração de energia elétrica, e também para a produção de materiais físséis para fins militares. Diante dessa situação, havia na época a pertinência da comparação entre o desempenho dos dois dispositivos no que dizia respeito à capacidade de suportar a radiação ionizante e também os pulsos eletromagnéticos de alta amplitude causados pela detonação dos artefatos nucleares (BROAD, 1981, MOE, 1963).

Como veremos no Capítulo 3, essas considerações determinaram a continuação do uso de válvulas em determinados nichos até o tempo em que este estudo foi realizado.

3 CONSEQUÊNCIAS

Retornando ao projeto do estudo, este capítulo discute como se deu a participação das válvulas na formação da infraestrutura tecnológica que ajudou a configurar a modernidade. Conforme foi definida na Introdução, a modernidade é aqui entendida como o modelo de sociedade que se difundiu dos países capitalistas centrais para os periféricos, a partir do início do século XX: um modelo centrado na constante inovação tecnológica e caracterizado pela difusão de informações. Começaremos então lançando um olhar sobre o contexto em que se deu esse processo.

No final do século XIX, começou a se configurar um quadro geopolítico diferente daquele dominado pelas potências tradicionais, como a França e a Inglaterra, com a ascensão de novos atores na cena mundial, como Estados Unidos, Alemanha e Japão. Projetos expansionistas dessas potências, combinados com interesses e necessidades de outros países, tiveram como ingredientes a capacidade industrial, a procura de mercados para escoamento de seus produtos, e a busca por matérias primas, aliada a disputas territoriais, que resultaram em tensões interimperialistas que propiciaram as duas guerras mundiais (HOBSBAWM, 1995, 2012). Após o término da Primeira Guerra Mundial, havia a percepção de que um segundo conflito de grandes proporções poderia estourar, envolvendo os mesmos atores que participaram da guerra anterior; isso foi expresso por ocasião da conclusão da Conferência de Paris em 1919, pelo general francês Ferdinand Foch, comandante em chefe das forças aliadas na frente ocidental: “um armistício de 20 anos”. Com o final do conflito, houve o esfacelamento dos impérios otomano, russo e alemão, e o redesenho da Europa, com o surgimento de novos países como a Tchecoslováquia e a União Soviética (KERSHAW, 2016).

Para agravar a situação, na década de 1930 ocorreu uma depressão econômica, manifestação de uma crise estrutural do capitalismo, de graves proporções sociais, marcada pela violência política. Em função da depressão, começam a ser adotadas políticas keynesianas por vários governos para evitar a volatilidade dos capitais (rentismo) e estimular a produção para evitar os efeitos cíclicos adversos da economia; um modelo, a princípio bem sucedido, que vigorou por três décadas após a Segunda Guerra e proporcionou grande crescimento econômico, até que ocorresse uma crise de acumulação (rentabilidade) do capital em geral, na década de 1970. Todas essas tensões políticas e econômicas, acumuladas nas décadas de 1920 e 1930, levaram à irrupção da Segunda Guerra Mundial, e a Europa, fragilizada econômica e politicamente, foi novamente um dos teatros de operações bélicas terrestres que ocorreram em boa parte do seu território; as operações terrestres se espalharam

para a Ásia, África e Oriente Médio, e também para os oceanos Atlântico e o Pacífico (FRIEDEN, 2008; HARVEY, 2008).

Ao final da Segunda Guerra, um novo redesenho geopolítico ocorreu, com o surgimento de dois blocos liderados pelos principais vencedores da guerra: os Estados Unidos e a União Soviética. Por conta disso, configurou-se a Guerra Fria, que pelas três décadas seguintes marcou um renovado período de tensões internacionais, em que ocorreram movimentos de descolonização na África, Ásia e América Latina, revoluções, guerras, como as da Coreia (1950-1953) e do Vietnã (1954-1975), além de golpes de estado em vários países de diferentes regiões do mundo (HOBSBAWM, 1995). Nesse cenário geopolítico, foram desenvolvidas e aprimoradas as tecnologias de comunicação, computação, astronáutica e energia nuclear, graças à participação do Estado em projetos estratégicos de engenharia, integrando interesses da Academia e da indústria (MAZZUCATO, 2014).

Do ponto de vista tecnológico, este foi o período formativo da chamada Era Eletrônica (NEBEKER, 2009). Suas raízes se firmaram no final do século XIX, com a criação dos recursos necessários para o uso da eletricidade como fonte de energia, transformando a tecnologia mecânica em eletromecânica. No início do século XX, a invenção da válvula – um dispositivo que permitia controlar a corrente elétrica sem movimento mecânico – levou à substituição da tecnologia eletromecânica pela eletrônica. Para Nebeker, estas foram as duas primeiras etapas da exploração da eletricidade, seguidas, em meados do século XX, pela do computador. Assim como aconteceu antes com a eletricidade e mais tarde com o computador, a eletrônica invadiu rapidamente diversas áreas da engenharia, criando um contexto tecnológico diferente do anterior, e constituindo, naquele momento, um dos principais mecanismos de mudança econômica e social (MCMAHON, 2002; NEBEKER, 2009).

Do ponto de vista da organização da produção, a história das aplicações da válvula demonstra a importância da experiência cumulativa no desenvolvimento das tecnologias. Tomando como exemplo o campo das comunicações, Chandler (2005) destaca que a experiência adquirida coletivamente com a produção e comercialização de equipamentos elétricos e telefônicos, no final do século XIX, constituiu a base para a formação do setor de rádio na década de 1920; e a experiência acumulada neste setor, por sua vez, formou o alicerce para o desenvolvimento do setor de televisão nas décadas de 1940 e 1950.

Como vimos no Capítulo 2, a criação das válvulas foi resultado das pesquisas que, no início do século XX, tentavam resolver problemas técnicos das comunicações de longa distância, e, durante todo o período de uso massivo das válvulas, as mais difundidas foram as de baixa e média potência, utilizadas em aplicações de consumo no campo das comunicações:

basicamente, os aparelhos de rádio e televisão (GARNER, 1963b; REDHEAD, 1998). No presente capítulo, as aplicações das válvulas foram divididas em três grupos: em consumo (que incluem os dispositivos de comunicações), em informações (radar e computador) e outras (que reúnem as industriais, militares e de instrumentação).

Quadro 3.1: Panorama das aplicações das válvulas

| <i>Tipo</i> | <i>Principais aplicações</i> |
|--|--|
| Amplificadoras, osciladoras, retificadoras na faixa de rádio | Transmissão e recepção: radiocomunicações militares e comerciais ponto a ponto, radiodifusão. |
| Válvulas multifuncionais e multigrades | Aparelhos de rádio, televisão, toca-discos e computadores. |
| Válvulas miniatura e subminiatura | Rádios militares e comerciais, aparelhos de surdez, minirradars em projéteis antiaéreos, receptores de TV, tratamento de vídeo e áudio. |
| Válvulas contadoras e indicadoras | Computadores, calculadoras, equipamentos de medida. |
| Tubos de raios catódicos (TRCs) | Câmera de vídeo, <i>display</i> (radar, osciloscópio, TV, computador), tubos de armazenagem (telas em painéis de aeronaves e computadores). |
| Fototubos e fotomultiplicadores | Detectores de radiações, controle industrial de máquinas e processos, circuitos de alarme, contadores, dispositivos de proteção. |
| Válvulas de micro-ondas | Amplificadoras: radar, satélites de comunicações, rádio militar, TV UHF. Osciladoras: aquecimento industrial (fusão nuclear, produção de cerâmicas etc.) e doméstico (forno de micro-ondas), aplicações militares (radar, arma de calor). |
| Válvulas de potência | Controle de potência, retificação e regulação de altas tensões e correntes, solda, aquecimento; disparadores (instrumentação, mísseis, explosivos industriais etc.). |

3.1 APLICAÇÕES DE CONSUMO: COMUNICAÇÕES

Esta seção discute as aplicações na área das comunicações (radiodifusão e televisão) que tiveram grande importância para a configuração social do século XX, do ponto de vista dos padrões de produção, comércio e consumo, e também os satélites de comunicações.

3.1.1 O rádio

Nessa seção será abordada a criação dos sistemas de comunicação por ondas eletromagnéticas na faixa de radiofrequência, que incluem a radiocomunicação ponto a ponto e a radiodifusão. Como vimos na seção “Panorama das telecomunicações” do Capítulo 1, a tecnologia inicial de radiocomunicação foi o telégrafo sem fio, cujas primeiras versões comerciais foram criadas no final do século XIX por Marconi, na Inglaterra, e Braun e Slaby, na Alemanha, e produzidas respectivamente pela *Marconi Wireless Company*, a *Siemens & Halske* e a *Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft*, AEG (CHANDLER, 2005; HEADRICK, 1991; WOOD, 2008).

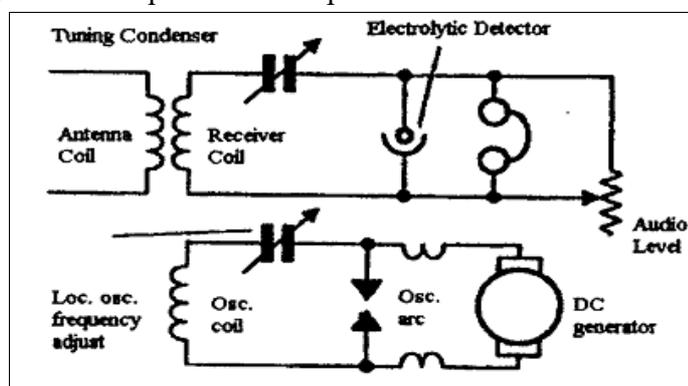
O terreno propício para o surgimento da radiodifusão se desenvolveu a partir do radioamadorismo. Entre 1898 e 1902, revistas técnicas populares, na Inglaterra e nos Estados Unidos, publicaram artigos ensinando a construir um conjunto simples de transmissor e receptor de radiocomunicação; a repercussão dos artigos indica que, a partir deles, começou a se organizar o radioamadorismo. Os transmissores usados eram de centelha e a recepção era feita por coesores, depois substituídos por receptores de galena, disponíveis desde 1905. Com o avanço tecnológico, o alcance das estações, que inicialmente era de alguns metros, podia chegar a centenas de quilômetros em 1912. Foi um período em que ocorreu a formação de sociedades de radioamadorismo em vários países, mesmo antes do estabelecimento da radiodifusão: na Inglaterra, em 1913, foi fundada uma federação de radioclubes, depois chamada *Radio Society*; nos Estados Unidos, o *Radio Club of America* foi criado em 1909 e, em 1914, foi fundada a *American Radio Relay League*, com o propósito de organizar uma rede de estações repetidoras para tornar mais confiáveis as transmissões de longa distância (BLIN, 1997; MAXWELL, 2019; MORENO QUINTANA, 199-).

Enquanto isso, entre 1906 e 1914, as potências europeias procuravam resolver os problemas da instalação de sistemas de radiocomunicação de longa distância, que permitiriam fazer contato com suas colônias (HEADRICK, 1991). Um invento fundamental para as comunicações do século XX foi o receptor super-heteródino. Para sua criação, dois tipos de circuitos implementados com válvulas se mostraram chaves: o oscilador e o modulador.

No caso do oscilador, sua discussão remonta à influência do fenômeno da resistência negativa para a geração de ondas senoidais autossustentáveis dos transmissores de arco, vistos na seção sobre radiotelegrafia e radiotelefonía do Capítulo 2. Visando aperfeiçoar a recepção para fins de radiotelefonía, Reginald Fessenden aproveitou o fenômeno, conhecido pelos músicos, de que dois tons musicais gerados próximos produzem um terceiro, e, em 1905,

empregou esse princípio usando osciladores elétricos. Criou a técnica que denominou heteródina (*heterodyne*) que consiste na geração de uma frequência em um oscilador local no receptor, com valor próximo ao da frequência presente na antena; através da interação entre as duas, o sinal de antena é convertido para uma frequência cujo valor é a diferença entre elas, com as mesmas características de amplitude do sinal original da antena, sendo posteriormente o áudio recuperado no detector. Em 1913, receptores desse tipo chegaram a ser instalados em navios da Marinha de Guerra estadunidense; para isso, Fessenden usou o seu detector eletrolítico e um gerador de arco como oscilador local, o que tornava a recepção ruidosa (SARKAR, 2006).

Figura 3.1: Esquema do receptor heteródino de Fessenden



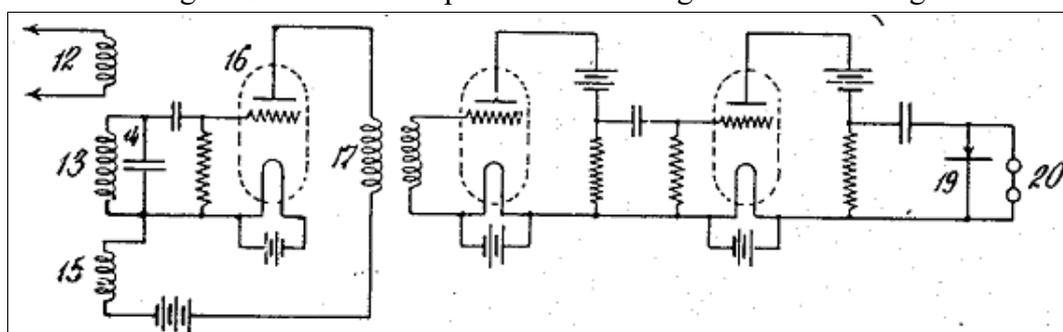
Fonte: Sarkar (2006; p. 372).

Anos mais tarde, aproveitando a ideia de Fessenden, três pesquisadores, de forma independente e por motivos diferentes, propuseram a criação de um receptor, usando a técnica da heterodinagem por meios eletrônicos, para a recepção do sinal inteligente de telegrafia ou áudio: Lévy, Armstrong e Schottky.

Na França, Lucien Lévy, oficial da *Télégraphie Militaire*, fazia parte da equipe do coronel Gustave Ferrié e estava trabalhando em um transmissor na Torre Eiffel. Criou um receptor super-heteródino, com patentes requeridas em 1917 e 1918, a partir de uma técnica criada por Paul Läut, seu colega; o seu objetivo era construir um receptor capaz de captar de forma segura as mensagens das comunicações militares. Walter Schottky, na Siemens, também idealizou um receptor usando o princípio da heterodinagem com o mesmo objetivo de Lévy, requerendo uma patente na Alemanha em junho de 1918. Edwin Armstrong teve a ideia de criar um novo tipo de receptor quando era oficial de comunicações do exército dos Estados Unidos na França, na Primeira Guerra, e visitou a sede da *British Marconi Company*, em Londres, onde o capitão Henry J. Round mostrou-lhe um radiogoniômetro cujo princípio de funcionamento se baseava em captar sinais na faixa de 300 a 5000 kHz. Round usou uma

válvula (V 24) que ele mesmo projetou, com baixa capacitância entre o eletrodos, e associou nove delas em cascata, obtendo um ganho de 2000 vezes; esse instrumento foi usado pela Marinha de Guerra inglesa para detectar comunicações entre navios e submarinos alemães. Após a guerra, já nos Estados Unidos, Armstrong se dedicou a desenvolver um modo de implementar um receptor sensível; em 1918, construiu um receptor super-heteródino de oito válvulas para ser usado para a reprodução de áudio, vendendo a patente para a Westinghouse. Através de licenciamento cruzado, o dispositivo foi usado pela RCA e, a partir daí, pela indústria de rádio em geral. A AT&T comprou a patente de Lévy e posteriormente, após uma disputa, judicial, Armstrong perdeu a prioridade (DOUGLAS, 2004; SCHOTTKY, 1926; LESSING, 1969).

Figura 3.2: Circuito super-heteródino original de Armstrong



Legenda: 12-13 – transformador de antena; 14-15 – realimentação do oscilador local; 16 – misturador (amplificador de RF/oscilador local); 17 – enrolamento primário do transformador de frequência intermediária (FI); 19 – diodo detector de áudio; 20 – saída para fone ou amplificador de AF (ARMSTRONG, 1920).

As vantagens dos receptores super-heteródinos residem na sensibilidade para a captação de sinais de baixa amplitude e discriminar estações com frequências próximas e, além disso, serem capazes de sintonizar as várias estações com um único controle de sintonia; essas características contribuíram para a disseminação da radiodifusão a partir da década de 1920 e alavancaram a indústria de receptores e, conseqüentemente, de válvulas, em um primeiro momento, nos Estados Unidos e na Europa ocidental. A RCA produziu o primeiro receptor super-heteródino em 1924. Os receptores super-heteródinos tornaram-se padrão para vários tipos de aplicações criadas nas décadas seguintes, como as TVs e os radares, e ainda são usados (SARKAR, 2006).

Além do receptor super-heteródino, Armstrong, que era radioamador em Nova York, contribuiu com outros inventos significativos: em 1913, inventou o receptor regenerativo, que empregava a técnica de realimentação, usando um audion adaptado, muito mais sensível que o receptor de galena; apresentado à *American Marcony Company* em 1913, o dispositivo

tornou-se outro tipo de receptor usado por várias décadas. Em 1922, criou o receptor super-regenerativo, sem grande aplicação; e na década de 1930, criou um sistema de radiodifusão usando frequência modulada, que será visto mais adiante (MORENO QUINTANA, 199-).

A partir de 1914, os países envolvidos na Primeira Guerra suspenderam as atividades dos radioamadores para evitar interferência nas comunicações militares. Durante a guerra, a atenção de governos e empresas ficou voltada para a produção de componentes e dispositivos para radiocomunicação militar; mas após o fim da guerra, as empresas passaram a buscar novos usos para a base teórica e técnica construída. Nesse aspecto, foi fundamental o papel de Frank Conrad, engenheiro da Westinghouse (em Pittsburgh, na Pensilvânia) e radioamador, cuja iniciativa marcou o surgimento da radiodifusão em oposição à radiotelefonia (BLIN, 1997; BURNS, 2004; McNEIL, 1990). Em 1919, Conrad começou a transmitir música, e o aumento nas vendas locais de gravações e receptores de galena mostrou o grande número de radioamadores que acompanhavam as transmissões. Em 1920, a Westinghouse, vendo o potencial da difusão, deu a Conrad a tarefa de montar uma pequena estação transmissora, feita com dois osciladores de 50 W e quatro moduladores, que foi o início da estação de radiodifusão KDKA. O sucesso da radiodifusão forneceu uma saída para o setor de rádio da Westinghouse, criado durante a guerra, e proporcionou ganhos adicionais à empresa, pelo serviço de propaganda oferecido para anunciantes locais (BURNS, 2004).

A iniciativa da Westinghouse desencadeou a expansão da radiodifusão e a formação de estações que transmitiam notícias, comentários, previsão do tempo, informes do mercado de ações, palestras e música. As empresas de eletrônica começaram a lançar a radiodifusão de entretenimento com a finalidade de divulgar seus produtos e estimular a compra de aparelhos de rádio. Nos Estados Unidos, enquanto em 1921 havia apenas duas estações oficialmente no ar, em 1925 havia mais de 500. Com o crescimento do número de emissoras, também houve um rápido aumento do número de empresas fabricantes de receptores de rádio: entre 1923 e 1926, foram criadas 648 empresas; entretanto, em 1934, com o impacto da Grande Depressão, apenas 18 delas ainda existiam (CHANDLER, 2005; DUMMER, 1983; McNEIL, 1990; WOOD, 2008).

Nos Estados Unidos, a radiodifusão foi dominada pelas grandes empresas do ramo da eletrônica – *General Electric* (GE), *American Telephone and Telegraph* (AT&T) e *Westinghouse* –, além da *United Fruit*, que investiu na comunicação por rádio para conectar seus barcos às plantações de frutas na América Central. Tendo em vista a importância estratégica das comunicações no tempo da guerra, as Forças Armadas queriam que as pesquisas e a produção do setor fossem controladas por empresas nacionais: assim, em 1919,

Owen Young (vice-presidente da GE), junto com oficiais da Marinha, adquiriu a *Marconi Wireless Company of America* e formou a *Radio Corporation of America (RCA)* como subsidiária da GE. O outro problema a resolver era a quantidade de disputas na justiça pelas patentes das empresas. A solução proposta por Young em 1921 foi que a RCA (dona das patentes da GE e da Marinha) obteria as patentes das empresas concorrentes, em troca de ações da RCA e representação em seu conselho. Pelo acordo, a AT&T ficou com os sistemas de radiotelefonia e a produção de equipamentos de transmissão, comprando outros equipamentos da GE e da Westinghouse, que se concentrariam nos receptores de rádio; a unidade Marconi da RCA continuou trabalhando nos geradores de centelha. Estabelecendo acordos de patente com empresas estrangeiras, como Marconi, Philips e Telefunken, o grupo representado pela RCA controlou a radiodifusão nos Estados Unidos (CHANDLER, 2005).

Na Europa, a radiodifusão cresceu num ritmo mais lento. Nos Países Baixos, a *Radio Industrie* transmitia regularmente para os navios no mar do Norte. Na Alemanha, emissoras de empresas privadas transmitiam principalmente notícias sobre economia, e, em 1923, foi criada uma emissora estatal de radiodifusão de entretenimento. Na Inglaterra, a *Wireless Telegraph Company*, da Marconi, começou a transmitir em 1920, mas foi logo fechada sob a alegação de que interferia em transmissões militares. Em 1922, a Marconi formou um consórcio com 23 indústrias para fundar a *British Broadcasting Company (BBC)*, e cada empresa abriu uma estação na área de sua fábrica; embora a emissora não transmitisse comerciais, cada empresa recebia uma taxa sobre as vendas de aparelhos. Apesar das deficiências iniciais e da expansão lenta, por causa do custo dos receptores ingleses, a emissora progrediu e o potencial da radiodifusão ficou evidente; assim, quando sua licença expirou, em 1926, a BBC foi reaberta sob administração do governo inglês (McNEIL, 1990; WOOD, 2008).

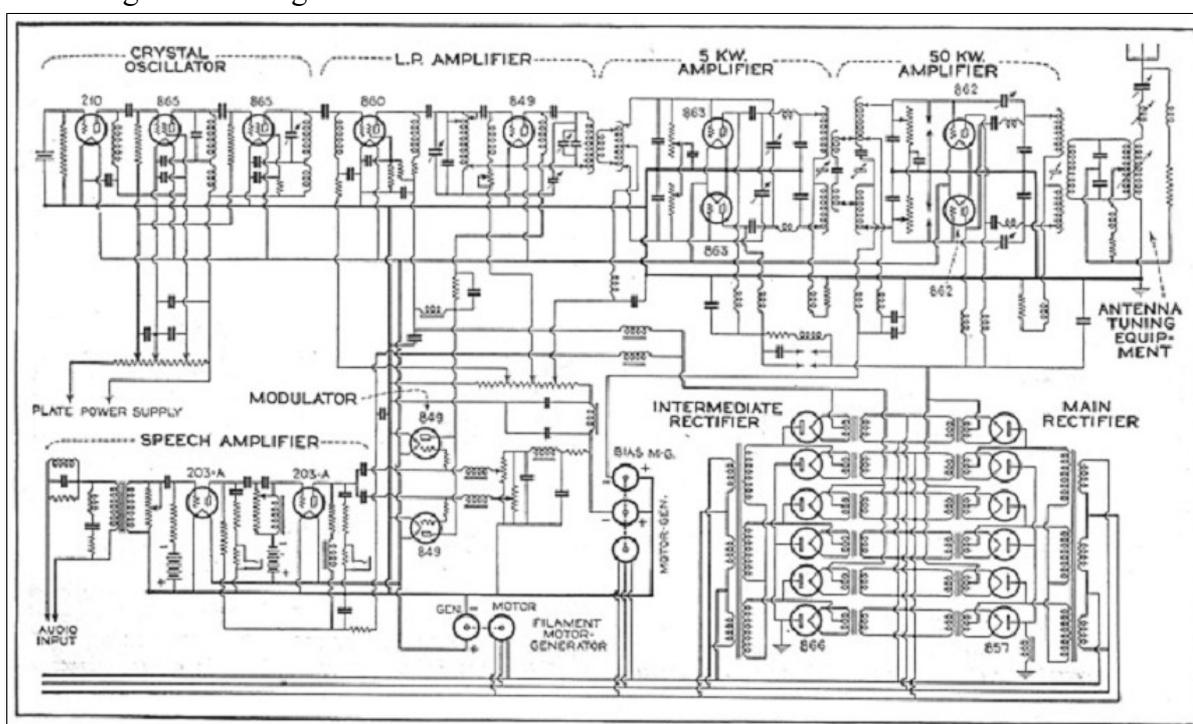
Um aspecto técnico importante em relação aos serviços de radiocomunicação foi a atribuição de faixas de frequência aos diferentes serviços. No início, as poucas estações transmissoras usavam equipamentos de baixa potência. Entretanto, o aumento do número de emissoras e o aperfeiçoamento dos equipamentos criaram um problema. As estações utilizavam cada vez maior potência, para atingir públicos cada vez maiores; com isso, umas interferiam nas transmissões das outras. Além disso, órgãos governamentais utilizavam, para seus serviços de radiocomunicações, determinadas frequências que não deveriam ser invadidas por outros usuários. Para resolver o problema, foi feita, no final da década de 1920, a regulamentação do uso das faixas de frequência pelos diferentes serviços (McNEIL, 1990). O Quadro 3.2 mostra as faixas do espectro alcançadas na época ou pouco tempo depois, usadas para transmissão de voz, e os serviços de radiodifusão alocados a cada uma.

Quadro 3.2: Faixas de frequência utilizadas em radiotelefonia e radiodifusão

| Faixa | Frequência | Comprim. onda | Usos |
|-------------------------------------|---------------|---------------|-----------------------|
| LF (<i>low frequency</i>) | 30-300 kHz | 10–1 km | rádio AM ondas longas |
| MF (<i>medium frequency</i>) | 300-3.000 kHz | 1.000–100 m | rádio AM ondas médias |
| HF (<i>high frequency</i>) | 3-30 MHz | 100–10 m | rádio AM ondas curtas |
| VHF (<i>very high frequency</i>) | 30-300 MHz | 10–1 m | rádio FM, TV |
| UHF (<i>ultra high frequency</i>) | 300-3.000 MHz | 1–0,1 m | TV |

Fontes: Balan (2019); ITU (2016).

Figura 3.3: Diagrama elétrico de um transmissor de radiodifusão AM de 50 kW



Fonte: Baker (1932).

Enquanto a radiotelefonia operou através de ondas longas e médias, o serviço não foi um concorrente de peso para o sistema de comunicação por cabos, devido ao custo elevado de implantação, à necessidade de dominar alta tecnologia e à sua falta de sigilo. Um fato que veio alterar esse quadro foi o estabelecimento, a partir de 1924, de sistemas de comunicação utilizando ondas curtas: como seu custo de implantação era muito menor que o dos sistemas de ondas longas, e o seu alcance era de milhares de quilômetros, a onda curta tornou possível o estabelecimento, por vários países, de comunicações intra e intercontinentais e radiodifusão via rádio, o que teve consequências nas relações internacionais (HEADRICK, 1991).

Ao longo das décadas de 1920 e 1930, foram sendo criados serviços de radiodifusão nos vários países europeus e em países, independentes ou não, na África, na Ásia e na

Oceania. Grande parte dessa expansão atendeu aos interesses das grandes potências em divulgar notícias, programas culturais e propaganda política no exterior, lembrando que, desde o século XIX, essas potências se apoiavam nas telecomunicações para controlar suas colônias. Enquanto os países com maior poder econômico e infraestrutura industrial desenvolviam seus próprios sistemas, os países economicamente dependentes tornaram-se subordinados às grandes potências também no que diz respeito às comunicações. Na América Latina, o consórcio AEEG (America-England-France-Germany), formado em 1921 pelas empresas RCA, Transradio, CSF e Marconi, criou uma empresa de rádio em cada país, subordinada ao consórcio (BLIN, 1997; HEADRICK, 1991). Outra estratégia foi transmitir, a partir de emissoras próprias, programas destinados a outros países. Em 1927, a Alemanha e a União Soviética inauguraram seus serviços de ondas curtas, transmitindo programas em várias línguas. Em 1932, na Inglaterra, a BBC começou a transmitir programas em ondas curtas em inglês, destinados aos seus funcionários coloniais. Em 1934, a Itália lançou a rádio Bari, em árabe; seguindo seu exemplo, a BBC, em 1937, estava com um esquema de transmissão em árabe para o Oriente Médio e em espanhol e português para a América do Sul (WOOD, 2008).

Essas estratégias aumentaram a demanda por receptores de rádio. O Quadro 3.3 mostra um panorama dos receptores de rádio em uso em alguns países, conforme dados da UNESCO para 1936 e 1937.

Quadro 3.3: Número de receptores de rádio por 1.000 habitantes em alguns países (1936-37)

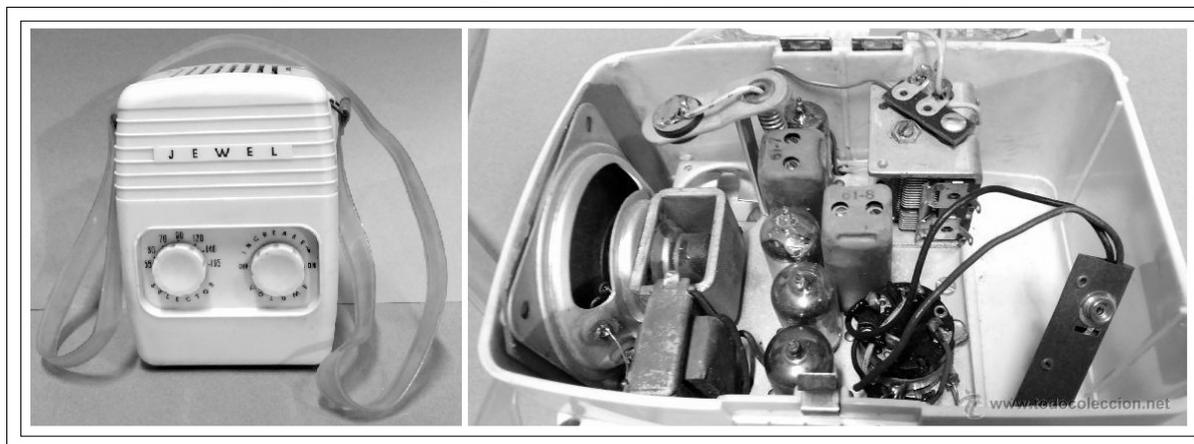
| País | Receptores /1000 | País | Receptores /1000 |
|----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| Estados Unidos | 189 | França | 76 |
| Reino Unido | 169 | Tchecoslováquia | 63 |
| Nova Zelândia | 146 | Hungria | 40 |
| Austrália | 131 | URSS | 22 |
| Canadá | 122 | Polônia | 20 |
| Alemanha | 122 | Itália | 15 |
| Países Baixos | 118 | Romênia | 8 |
| Quênia | 77 | Argélia | 7 |

Fonte dos dados: Blin (1997).

As válvulas miniatura, cuja produção teve grande impulso na década de 1930, permitiram a criação de rádios de pequenas dimensões. A Figura 3.4 mostra um rádio portátil de ondas médias, vendido nos Estados Unidos na década de 1940. Segundo o site em que foi achada a imagem, ele media 17 cm x 12 cm; tinha quatro válvulas e usava duas baterias, uma

de 1,5 V e outra de 67,5 V. Pode-se supor que, mesmo sem a chegada dos transístores na década de 1950, os rádios miniatura valvulados poderiam ter exercido influência semelhante aos rádios transistorizados quanto à mobilidade.

Figura 3.4: Rádio portátil Jewel (EUA, década de 1940)



Fonte: Sítio de vendas <<https://en.todocoleccion.net/valve-radios/pequeno-radio-portatil-valvulas-jewel-made-in-usa-anos-40-coleccionista-ver-descripcion~x50606600> >

Em 1933, Edwin Armstrong, nos EUA, patenteou seu sistema de rádio FM (frequência modulada) e, em 1938, a *General Electric* instalou a primeira estação de transmissão FM. Como vimos no Capítulo 2, o desenvolvimento da modulação de frequência se deu estreitamente associado à criação das válvulas multifuncionais. Com um nível de ruído muito menor e usando uma faixa de frequências muito maior, a FM tornou-se o método preferido para transmissões de alta qualidade; por outro lado, como os canais atribuídos à FM estavam na faixa de frequência de VHF, a recepção do sinal era limitada à linha de visada, impedindo a recepção de emissoras distantes, possível com os rádios AM. Em 1944, a Comissão Federal de Comunicações dos Estados Unidos mudou a transmissão de rádio FM para UHF, cedendo à televisão em cores as bandas originalmente atribuídas ao rádio FM. As estações FM geralmente se juntavam às estações AM locais e os produtores equipavam seus produtos para receber os canais FM e AM locais (CHANDLER, 2005; McNEIL, 1990). Durante a guerra, foram criados receptores de comunicação de alta sensibilidade para uso militar, e os desenvolvimentos do pós-guerra se beneficiaram da pesquisa realizada, nesse período, sobre componentes e receptores FM de alta qualidade e amplificadores de alta fidelidade (DUMMER, 1983).

Apesar da existência do sistema de transmissão de FM, a transmissão em ondas curtas ainda foi intensivamente usada durante a Segunda Guerra: a BBC expandiu seu serviço, chegando a transmitir em mais de 40 idiomas; a CBS transmitia para os Estados Unidos a

partir de sua representação em Londres; e a partir de 1942, quando os Estados Unidos entraram na guerra, foi formada uma grande rede de emissoras, a Voz da América, administrada pelo governo. Durante a Guerra Fria, na década de 1960, foram instaladas estações em alguns países que, para evitar as tentativas de interferência por parte de governos estrangeiros, e com o intuito de obter maior alcance nas transmissões, usavam transmissores com circuitos e válvulas especialmente projetados; os valores de potência de saída chegavam até a 500 kW e, em alguns casos, com o arranjo apropriado de um conjunto de transmissores, podiam gerar 1000 kW de potência de portadora. Apesar dos serviços de ondas curtas terem sido cada vez menos usados à medida que o século XX terminava, no começo da década de 1990, os serviços de ondas médias e longas estavam sendo usados para transmissões internacionais: 22 estações de ondas longas e médias tinham transmissores com potências de saída de 2000 kW, oito delas na Europa e outras 14 com programação em árabe em países do Norte da África e Oriente Médio (WOOD, 2008).

3.1.2 A televisão

Uma das linhas de pesquisa das indústrias de equipamentos eletrônicos após a Primeira Guerra foi o desenvolvimento da televisão eletrônica, que já era objeto de interesse há algum tempo. Experimentos realizados pouco depois da introdução das válvulas, tinham levado à construção de sistemas totalmente eletrônicos de TV, cujos princípios já haviam sido delineados por pesquisadores como Rosing, que já vimos. Nos países que já contavam com bases tecnológicas sólidas, o trabalho avançou durante a década de 1920, até chegar ao ponto dos sistemas experimentais estarem maduros em termos tecnológicos, atingindo a produção comercial na década de 1930. Em termos técnicos, foram usados receptores superheteródinos, com faixas de frequências bem maiores do que as utilizadas no rádio, com circuitos separados para o tratamento dos sinais de áudio e vídeo, além dos circuitos de varredura horizontal e vertical do feixe, necessários para a formação da imagem da principal válvula: o tubo de imagem. Como foi visto na seção sobre válvulas para aplicações em imagem, no Capítulo 2, nos primeiros tempos foram usados tubos monocromáticos (preto e branco) e, com a evolução para os sistemas de TV a cores, houve a necessidade do emprego de tubos tricromáticos.

Nos Estados Unidos, o desenvolvimento se concentrou nos laboratórios de pesquisa da AT&T, da GE e da Westinghouse – RCA a partir de 1930 (BURNS, 1998; CHANDLER,

2005). Os primeiros testes da GE e da AT&T foram realizados respectivamente em 1926 e 1927. Os testes da GE foram feitos a partir da WGY, estação de radiodifusão pertencente a essa empresa, que foi a pioneira na transmissão de TV nos Estados Unidos, com uma programação experimental transmitida regularmente em 1928, e captada até em Los Angeles. Na AT&T foi criado um sistema de envio de imagens por telefone, pelo qual foi realizada a primeira transmissão de TV usando a própria rede de linhas telefônicas por cabo e rádio; os testes iniciais da GE com transmissões semelhantes de longa distância deram mau resultado, mas a empresa continuou trabalhando no aperfeiçoamento, e demonstrou seu primeiro modelo bem-sucedido em 1928. Esses receptores iniciais eram todos de baixa resolução (24 a 48 linhas horizontais) e geravam 16 imagens por segundo, em preto e branco. Entretanto, em 1929, a AT&T (através dos Laboratórios Bell) fez uma transmissão experimental em cores, usando três canais separados para transmitir as cores primárias: vermelho, verde e azul. Na RCA, Zworykin trabalhou no seu sistema de TV baseado no iconoscópio para reprodução de imagens em preto e branco (BURNS, 1998; McNEIL, 1990).

Em 1927, nos Estados Unidos, a *Federal Radio Comission* autorizou a radiodifusão comercial na faixa de 500 a 1.500 kHz e, prevendo o crescimento da televisão, reservou a faixa de 1.500 a 2.000 kHz para futuros desenvolvimentos de radiodifusão de som e imagem (REGULATIONS, 1927). O método mais usado nesses primeiros sistemas empregava varredura mecânica, em que um disco de Nipkow era associado à captação dos pontos de luz por uma fotocélula, e os receptores só exibiam imagem: o som era transmitido de forma sincronizada para um receptor de rádio.

O padrão de concentração das empresas visto em outras áreas industriais também aconteceu no ramo de TV. A década de 1920 viu o nascimento das três grandes empresas de radiodifusão que dominaram o rádio e a televisão nos Estados Unidos por cerca de 40 anos: a ABC (*American Broadcasting Company*), antiga WJZ, criada pela Westinghouse em 1921; a NBC (*National Broadcasting Company*), criada pela RCA em 1926; e a CBS (*Columbia Broadcasting System*), de 1927, ligada à *Columbia Phonograph* (BELLAYER, 2011).

A década de 1930 foi o período em que a TV tornou-se um produto comercial. As primeiras transmissões foram feitas em 1930, pela NBC nos Estados Unidos e por Baird na Inglaterra. Na Alemanha, as principais empresas envolvidas com o desenvolvimento da TV foram a Fernseh e a Telefunken; na Inglaterra, além da Baird, foi criada, em 1931, a Marconi-EMI, cujo sistema – resolução de 405 linhas e geração de 50 quadros por segundo, usando a válvula emitron – tornou-se o padrão da TV inglesa, usado até 1985 (BURNS, 1998; McNEIL, 1990). Em 1932, o sistema experimental de Baird foi substituído pelo serviço

público de TV da própria BBC. Em 1935, uma estação em Berlim começou a transmitir em baixa definição e, em 1936, a BBC testou a transmissão de TV em alta definição. Desde meados da década de 1930 até o final da Segunda Guerra, empresas como RCA, Telefunken e Baird investiram pesadamente no desenvolvimento de equipamentos não-mecânicos para TV: a televisão de alta definição da época estava estreitamente associada ao uso de válvulas (BURNS, 1998; McNEIL, 1990). Entre 1935 e 1936, a RCA projetou e produziu o modelo de teste RR-359, com 33 válvulas, mostrado na Figura 2.44 (na seção sobre válvulas para aplicações em imagens). Mediante um acordo válido de 1935 a 1940, a RCA cedeu o RR-359 para ser testado e duplicado na URSS, onde o aparelho forneceu a base para o desenvolvimento da TV (RADIOMUSEUM, 2019, RR-359).

ABC, NBC e CBS eram empresas inicialmente dedicadas à transmissão de rádio mas, no início da década de 1930, começaram a instalar os equipamentos necessários para o início dos serviços regulares de transmissão de TV, inaugurados em 1939 na Feira Mundial de Nova York, em que a RCA lançou seu primeiro aparelho de TV doméstico (o RR-359 aperfeiçoado); mas a procura não foi a esperada, pois os aparelhos eram caros e o futuro do serviço era incerto (CHANDLER, 2005; McNEIL, 1990).

Um exemplo de que o domínio da tecnologia dos tubos de imagem implicou em poder, pode ser atestado pelo fato de que, em 1937, as administrações nacionais interessadas em implantar sistemas de transmissão de televisão de alta definição, dependiam do licenciamento da RCA e EMI para usar equipamentos de estúdio baseados no iconoscópio ou no emitron. Antes da Segunda Guerra, a influência dessas empresas era grande na Alemanha, na França, na URSS e no Japão (BURNS, 1998).

Durante a Segunda Guerra Mundial, a grande demanda por componentes e aparelhos eletrônicos provocou a expansão da capacidade de produção e da base de conhecimentos das grandes indústrias do ramo – como *Western Electric*, GE, Westinghouse e RCA –, que fecharam contratos para desenvolver e fabricar dispositivos relacionados com radar, sonar, sistemas de navegação e aviões sem piloto guiados pela televisão, além de dispositivos eletrônicos para direcionar armas antiaéreas, fusíveis de proximidade e outras válvulas especializadas para fins militares. Após o final da guerra, as empresas voltaram a trabalhar nos projetos de televisão, mas a Telefunken, uma das líderes do período inicial, perdeu suas bases com a derrota da Alemanha, deixando a RCA sozinha na liderança. A RCA, que dominava o mercado nos Estados Unidos, expandiu sua rede de transmissão e abriu sua tecnologia, tornando-a o padrão do mercado. Com isso, o licenciamento de fabricantes aumentou e as vendas de receptores também, o que fortaleceu a posição da RCA, cuja receita,

até o fim da década de 1960, vinha principalmente de produtos relacionados à televisão, embora com mudanças ao longo do tempo: inicialmente, o maior peso era da venda de válvulas e outros componentes; mais tarde, quando o crescimento da parte industrial ficou mais lento, a maior receita ficou com a transmissão de TV pela NBC (CHANDLER, 2005).

Nos Estados Unidos, quando a Segunda Guerra se aproximava do fim, os serviços de televisão voltaram ser considerados para serem usados pelas empresas CBS, NBC e RCA. Portanto, interesses poderosos estavam em jogo para a interligação das redes a fim de obter cobertura de TV com abrangência nacional. Pelo lado da tecnologia, os Estados Unidos possuíam uma extensa rede de cobertura nacional de telefonia multicanal (com multiplexação por divisão de frequência); era implementada com cabos coaxiais e repetidores terrestres que não eram tecnicamente adequados para a transmissão dos sinais de TV, que necessitava uma banda passante considerável. No começo dos anos 1950, ficou claro, para os especialistas em alguns países industrializados, que, para evitar o uso de cabos, o futuro da telefonia multicanal e da televisão de abrangência geográfica mais ampla dependia do uso da retransmissão na região de micro-ondas, com suficiente faixa de frequências disponíveis (BRAY, 2009).

Figura 3.5: Torre usada pelo sistema de retransmissão de micro-ondas (EUA)



Fonte: o'Neill (1985, p. 303).

Em 1946, os Bell Labs conceberam um sistema de retransmissão de micro-ondas experimental aproveitando a tecnologia desenvolvida na Segunda Guerra, a princípio usando a klytron, que se mostrou problemática. J. B. Morton sugeriu a adoção de um triodo modificado de micro-ondas (416A), já que as TWTs ainda não eram comerciais. Em setembro de 1950, a rota Chicago-Nova York foi aberta e, em 1951, a rota para tráfego bidirecional

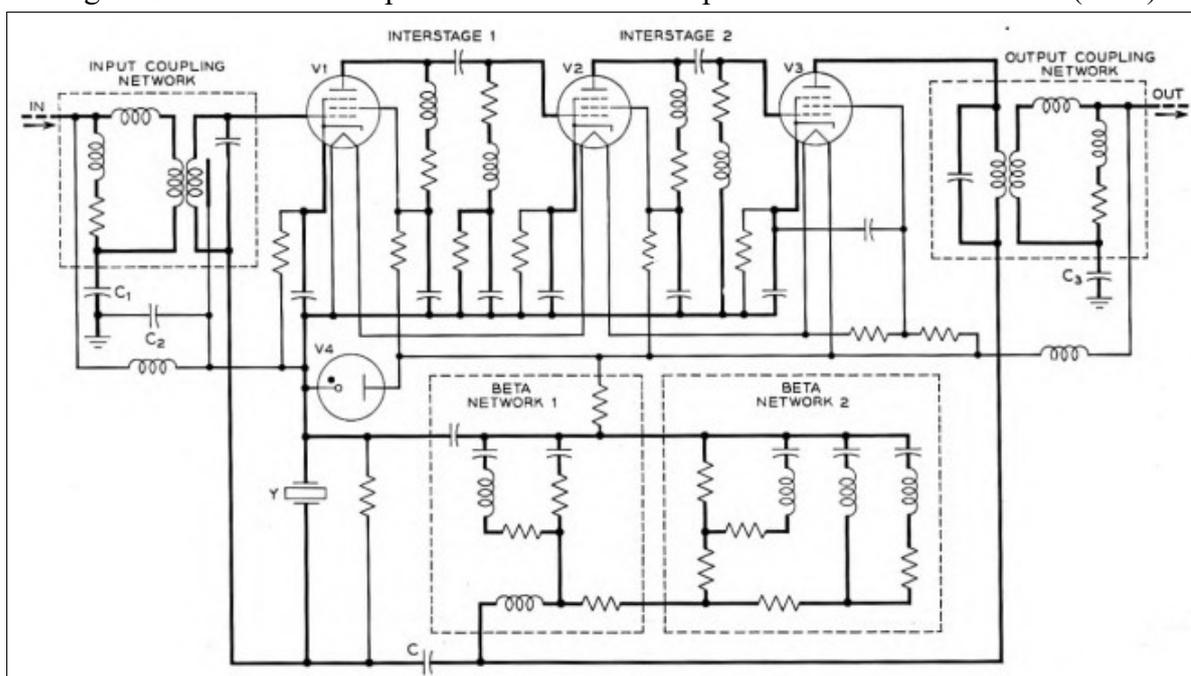
construída pela AT&T: a rede de comunicação transcontinental estava completada com o sistema TD-2, com um custo de 40 milhões de dólares, composta de 107 estações repetidoras com torres que podiam alcançar até 100 m de altura. Devido aos feixes direcionais, o espaçamento entre estações adjacentes variava de 40 a 48 km; internamente, nas baías, ficava toda a eletrônica necessária, tendo como elemento ativo triodos amplificadores operando nas bandas de 4 e 6 GHz simultaneamente, com diferentes polarizações; no topo das torres, ficavam as antenas refletoras tipo corneta, cujos sinais eram enviados ou recebidos por guias de onda. Versões posteriores do sistema operaram com TWTs (O'NEIL, 1985; ATT, 2019). O sistema funcionou por quase três décadas, mas essas estruturas foram abandonadas após a adoção dos sistemas de fibras óticas.

A Inglaterra, acompanhando os desenvolvimentos nos Estados Unidos na área, optou pela TWT já aperfeiçoada, que podia operar até 20 GHz. Sob contrato do *British Post Office*, em 1952, foi inaugurado o primeiro sistema de retransmissão dos sinais de TV usando TWT, operando em 4 GHz. Redes de retransmissão de micro-ondas de países como Japão, França e Alemanha, seguiram o mesmo caminho, optando pela TWT (BRAY, 2009).

Devido à depressão da década de 1930, seguida da Segunda Guerra, somente na década de 1950 foram implantados os cabos submarinos telefônicos. Em 1950 foram lançados dois cabos telefônicos com estrutura coaxial entre os Estados Unidos (Key West, na Flórida) e Cuba (Havana), de 222 km cada, usando três repetidores valvulados em cada cabo para operar 24 canais telefônicos. Essa ligação serviu de teste para um projeto mais ambicioso, o de um cabo transatlântico. Em 1956 foi inaugurado o sistema TAT-1, ligando a América do Norte à Europa: era composto por dois ramos, um para Nova York, outro para Quebec; a porção submarina transoceânica ia da Terra Nova (Clareville) até a Escócia (Oban), com uma extensão de 4149 km. O projeto foi elaborado e executado em grande parte pela AT&T, com a participação do *British Post Office*; foram usados dois cabos para o tráfego unidirecional, para operar 36 canais telefônicos, e, para proporcionar um ganho adequado (65 dB), foram usados 51 repetidores em cada cabo. A energia elétrica era gerada nas estações terrestres e enviada pelo próprio cabo para alimentar os repetidores, que eram associados em série. Apesar da existência dos transístores, optou-se pelo uso de pentodos que foram especialmente projetados tanto pelos Bell Labs como pelo laboratório de pesquisa do *British Post Office*: o objetivo era manter um ganho adequado com tensões de polarização dos eletrodos relativamente baixas, o que favorecia uma maior vida útil: o sistema foi projetado para um tempo de vida de 20 anos ou mais, típico de cabos submarinos (GLEICHMANN, 1957; KELLY, 1957; MCNALLY, 1957). Mais tarde, outros sistemas, com número de canais telefônicos cada vez maior, foram

desenvolvidos, competindo com os satélites. Na década de 1960, os repetidores começaram a utilizar transistores. Durante a crise dos mísseis em Cuba em 1962, as consultas antecipadas entre os Estados Unidos e União Soviética foram feitas utilizando uma rede de cabos formada pelos sistemas ICECAN e SCOTICE (BRAY, 1997; CHESNOY, 2002).

Figura 3.6: Circuito do repetidor unidirecional do primeiro cabo transatlântico (1956)



Fonte: Gleichmann (1957 p. 70).

Enquanto esses eventos ocorriam no campo da telefonia por cabo, o foco das atenções na área da televisão era a transmissão a cores. No início da década de 1950, com a produção de TV em preto e branco bem estabelecida, as empresas tinham se voltado para a TV a cores. A RCA e a CBS foram as principais concorrentes naquele momento, disputando nos campos do padrão do sistema de cores (a RCA já possuía o seu) e da compatibilidade com o sistema eletrônico já criado para a TV em preto e branco. Nos Estados Unidos, a *Federal Communications Commission* (FCC), através do *National Television System Committee* (NTSC), adotou o padrão da RCA, que então investiu no desenvolvimento de um tubo de imagem a cores compatível com os aparelhos antigos, enquanto as outras empresas continuavam fazendo TVs em preto e branco. Com isso, no início da década de 1960, a RCA dominou novamente o mercado da televisão no país, através da venda de componentes e do licenciamento de fabricantes (CHANDLER, 2005). Após a adoção do padrão NTSC nos Estados Unidos, outros padrões surgiram. Em 1956, o sistema SECAM (*Sequentiel Couleur à Memoire*) foi desenvolvido na França, e, em 1962, o padrão PAL (*Phase Alternating Line*) apareceu na Alemanha (McNEIL, 1990). No final dos anos 1960 e início dos anos 1970, as

empresas japonesas Matsushita (Panasonic) e Sony, e a neerlandesa Philips, entraram no mercado internacional. Mais tarde, com a saída da RCA e da Philips de suas posições de liderança, o mercado de produtos eletrônicos passou a ser dominado pelas empresas japonesas (CHANDLER, 2005).

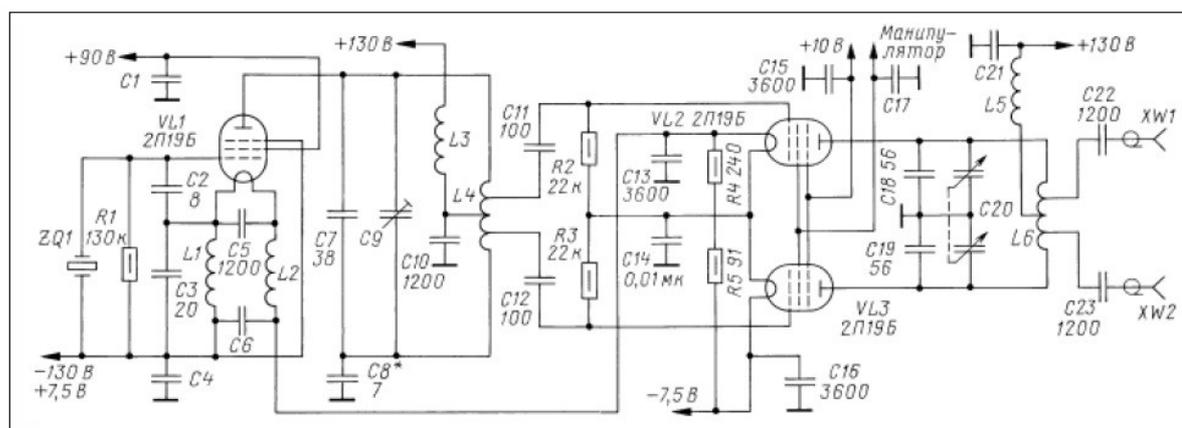
Os sistemas de TV a cores criados pelos vários países eram incompatíveis; por isso, foi impossível a formação de um sistema mundial de televisão até ser criada a televisão digital. Outra limitação era o alcance das transmissões, que só começou a ser resolvida a partir do início da década de 1960, com o desenvolvimento das transmissões transoceânicas usando satélites de comunicações (McNEIL, 1990).

3.1.3 Os satélites de comunicações

Embora pesquisas meteorológicas já fossem realizadas com balões desde o século XIX, a ideia de usar satélites artificiais para troca de dados com estações terrestres começou a se concretizar em 1951, quando a proposta da realização de um ano especial de pesquisa geofísica foi levada ao *International Council of Scientific Unions* (ICSU). No ano seguinte, o ICSU criou uma comissão para planejar o Ano Geofísico Internacional, com apoio da UNESCO, e, entre as propostas, estava o lançamento de satélites artificiais para observações em grande altitude. Os Estados Unidos e a União Soviética, com um sólido corpo de conhecimentos e uma estrutura já montada para produção e lançamento de mísseis e foguetes para fins militares, anunciaram planos para lançar satélites de pesquisa científica (MAN, 1957; WENDT, 1957).

Com o projeto aprovado em 1955, o governo soviético, em 1956, autorizou o desenvolvimento do satélite científico, cuja primeira versão – o Sputnik-1 – foi lançada em outubro de 1957. O satélite tinha a forma de uma esfera com 58 cm de diâmetro, com um peso total (com todos os aparelhos montados) de 83,6 kg. Levava externamente duas antenas, cada uma com duas hastes, e, internamente, dois transmissores D-200 de 1 W, que emitiam, a cada 0,2 e 0,6 segundos, sinais nos comprimentos de onda de 7 e 15 metros (40 e 20 MHz) levando informações de pressão e temperatura, captadas em terra por receptores. A Figura 3.7 mostra o esquema do transmissor principal, de 20 MHz; o do outro transmissor só diferia nas características dos elementos determinantes da frequência e no esquema de correspondência do estágio de saída com a antena. O circuito foi montado com três válvulas subminiatura russas 2P19B [2П19Б] (STEPANOV, 2013; ZAK, 2017).

Figura 3.7: Esquema dos transmissores do Sputnik-1



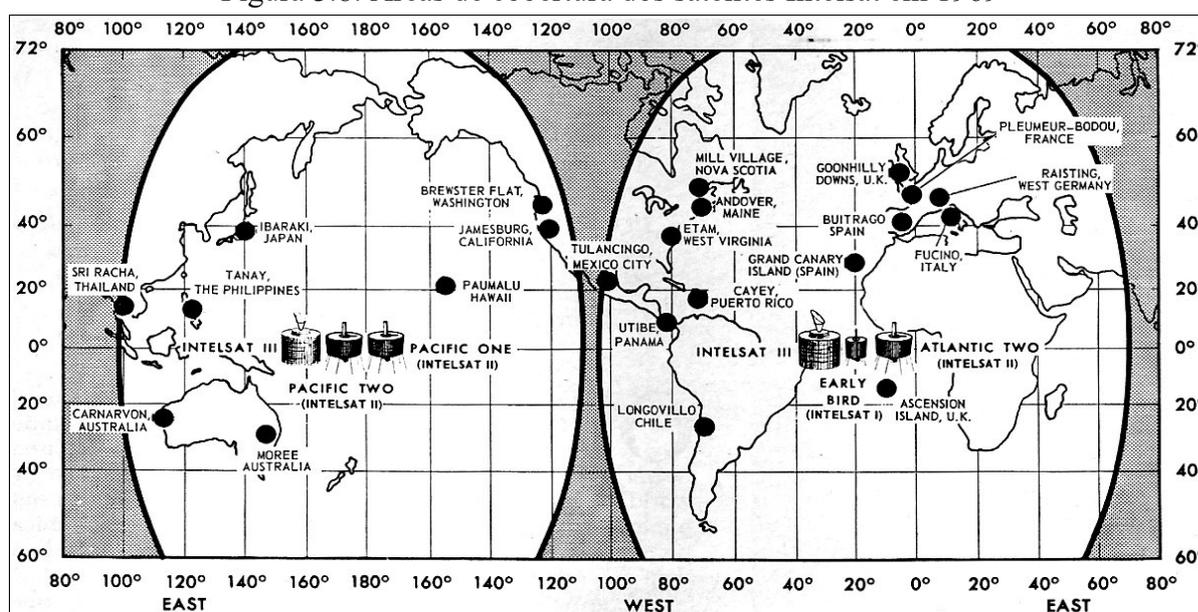
Fonte: Stepanov (2013).

Na época, dentro do contexto da Guerra Fria, além do lançamento do Sputnik e da cadela Laika (no Sputnik 2, também em 1957), um evento de grande impacto para a imagem das grandes potências foi o voo do cosmonauta Yuri Gagarin na nave Vostok, em abril de 1961. Foi uma sucessão de eventos que levou à corrida espacial, marcada, em termos políticos, com o discurso do presidente dos Estados Unidos, John Kennedy, urgindo para que o país fizesse um pouso na Lua naquela mesma década, o que ocorreu com a nave Apollo 11 em 1969. A disputa pela nova fronteira do espaço levou ao estabelecimento de programas com aplicações específicas, com o lançamento de espaçonaves tripuladas, não tripuladas, estações espaciais e satélites. Alguns desses engenhos utilizavam válvulas miniaturas em alguns módulos, como os de comunicação; as espaçonaves Ranger, destinadas a tirar fotos da Lua, embora montadas basicamente com dispositivos de estado sólido, ainda utilizavam triodos como amplificadores de potência, além de tubos vidicon nas câmeras de televisão (NICKS, 1985; RANGER, 2019; RCA, 1961).

Além dos satélites de pesquisas e militares (de espionagem), uma das principais aplicações dessa nova tecnologia foi a construção dos satélites de comunicações, que começou a causar impacto nas comunicações mundiais no final da década de 1960, quando as tecnologias mais comuns de comunicação de longa distância ainda eram os rádios de ondas curtas e os cabos submarinos telefônicos. Nos Estados Unidos, o primeiro satélite de comunicações experimental – o Score, da ARPA – foi lançado em 1958: era um balão de plástico que refletia as micro-ondas. Em 1960, a NASA lançou o Echo-1, também um balão refletor de micro-ondas (NASA, 2019). Em 1962, a AT&T lançou o satélite de comunicações particular Telstar-1, cujo funcionamento se apoiava num amplificador de micro-ondas de 3,5 W formado por uma válvula TWT operando em 4 GHz (ARMSTRONG, 2015; GICCA,

1969). No mesmo ano, um grupo de empresas – liderado pela AT&T, dona do satélite – criou, nos Estados Unidos, a *Communications Satellite Corporation* (Comsat), com o objetivo de desenvolver um sistema comercial de comunicações por satélite de alcance mundial (McNEIL, 1990; STOCKHOLDERS, 1964).

Figura 3.8: Áreas de cobertura dos satélites Intelsat em 1969



Fonte: Gicca (1969).

Em 1964, foi criada a Intelsat, um consórcio formado por vários países para gerenciar o sistema internacional de satélites de comunicação; a maior participação era dos Estados Unidos, através da Comsat. Em 1965, a Comsat lançou o Intelsat-1 (*Early Bird*), com válvulas de potência miniatura operando em micro-ondas; o primeiro satélite de comunicações comercial ficou em órbita estacionária, em serviço sobre o Atlântico. Em 1966 e 1967, foram lançados os satélites Intelsat-2 A, B, C e D, em serviço sobre o Atlântico e o Pacífico; e em 1968 e 1969, os satélites Intelsat-3 A, B e C, também sobre o Atlântico e o Pacífico, constituindo o primeiro sistema global de satélites de comunicações (GICCA, 1969; WHITAKER, 2012).

As TWTs continuam sendo usadas em satélites, radares e equipamentos militares. As válvulas produzidas perto de 2015 podiam fornecer até 180 W em frequências de até 22 GHz, com eficiência próxima de 70% e vida útil superior a 15 anos; além disso, eram mais resistentes a radiações e condições ambientais extremas do que os dispositivos de estado sólido (ARMSTRONG, 2015).

3.2 APLICAÇÕES EM INFORMAÇÕES

As aplicações eletrônicas de captura e processamento de informações compreendem o radar e o computador.

3.2.1 O radar

O radar (*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging) foi uma tecnologia desenvolvida com o único objetivo da aplicação militar (SKOLNIK, 1962). Em termos técnicos, ele foi a síntese da ciência com a tecnologia, pois incorporou avanços da tecnologia de antenas, das pesquisas sobre o comportamento da propagação das ondas de rádio, do desenvolvimento dos transmissores e receptores, do processamento do sinal e da visualização da informação.

Sendo seu princípio de funcionamento baseado na propriedade de reflexão das ondas eletromagnéticas descobertas por Hertz, sua história remonta ao começo do século XX, quando Christian Hülsmeyer, em 1904, na Alemanha, inventou um equipamento que denominou *Telemobiloskop*, criado para evitar colisões dos navios – o que era uma preocupação das empresas marítimas; com isso, pretendia aumentar a segurança dos navios em condições de chuva e neblina, de dia ou de noite. Hülsmeyer usou a tecnologia da época: uma bobina de indução; um transmissor de centelhas de Righi em que pulsos eram direcionados por um refletor parabólico; na recepção, um conjunto de fios verticais unidos nas pontas, em forma de guarda-chuva, formatando a antena e, no centro, um coesor de Branly. Apesar da novidade, o equipamento não despertou interesse comercial (BLANCHARD, 2019; HÜLSMEYER, 1906; ROHLING, 2014).

Antes do surgimento do radar, durante a década de 1920, três áreas estavam desenvolvendo técnicas de medição da distância usando ondas de rádio, sem o objetivo de detecção de alvos, mas que acabaram contribuindo para a evolução do radar: a pesquisa geodésica, a radioaltimetria e a sondagem ionosférica. A sondagem ionosférica foi um programa de pesquisa levado a cabo por equipes nos Estados Unidos e na Inglaterra; foi realizado para confirmar a existência de uma camada ionizada na alta atmosfera, proposta de maneira independente por Oliver Heaviside e Arthur Kennelly em 1902, para explicar o modo como se deu a propagação da transmissão transatlântica de Marconi no ano anterior. Na Inglaterra, entre dezembro de 1924 e fevereiro de 1925, Edward Apleton e M. Barnett, com um transmissor da BBC, usaram a técnica de medir a interferência de dois sinais de mesma

frequência no receptor, um enviado diretamente e outro refletido pela camada. Em 1925, nos Estados Unidos, Gregory Breit e Merle Tuve (respectivamente físico e geofísico) usaram a técnica de pulsos enviados à camada: as intensidades dos sinais refletidos eram captadas por três antenas lado a lado, de diferentes alturas (1,83 m, 9,14 m e 15,2 m), e medidas por receptores para avaliar o ângulo do sinal refletido de maior intensidade. Em ambas as técnicas, os testes foram realizados com a faixa de ondas curtas que já estava sendo utilizada por radioamadores. A existência da camada foi confirmada: a princípio, foi denominada camada Kennelly-Heaviside e, posteriormente, ionosfera (SWORDS, 2008).

No caso da detecção de objetos, o emprego da reflexão de sinais de rádio começou a receber atenção depois da Primeira Guerra, quando foi notado que a passagem de aviões afetava os sinais da radiotransmissão de alta frequência. Durante as décadas de 1920 e 1930, diversos pesquisadores, principalmente nos Estados Unidos, na Alemanha e na França, começaram a testar o uso do eco das ondas de rádio para detectar aeronaves e embarcações. A radioaltimetria foi usada desde 1936 para medição de altitude na aviação civil, operando como o radar, mas tendo o solo como alvo (DUMMER, 1983; SKOLNIK, 1962).

Na segunda metade da década de 1930, a alta probabilidade de haver guerra agiu como estimulante para o desenvolvimento do radar para aplicações militares. Em alguns países, cuja possibilidade de se envolver no conflito que se configurava era grande, ocorreram linhas de pesquisas semelhantes e independentes; foi o caso dos Estados Unidos, Inglaterra, França, União Soviética, Itália, Holanda e Japão. O objetivo dessas pesquisas era, em linhas gerais, a criação de circuitos, técnicas de modulação e válvulas especiais para os seus respectivos sistemas de radar (SWORDS, 2008). Mesmo havendo outras contribuições importantes, como aquelas realizadas na França, serão focalizados aqui detalhes de projeto apenas nos três países que desenvolveram extensos programas de radar: Inglaterra, Estados Unidos e Alemanha.

A Marinha dos Estados Unidos testou seu primeiro radar em 1936 e, em 1938, tinha um radar antiaéreo operante: o SRC-268, que foi o equipamento padrão de monitoramento de aeronaves até 1944, quando foi substituído por um radar de micro-ondas. Na Inglaterra, o desenvolvimento foi um pouco mais lento: primeiro foi criada a *Chain Home*, uma rede de estações de radar nos litorais leste e sul, que estava funcionando em 1938, operando entre 20 e 52 MHz, capaz de cobrir 193 km, e com torres de 91,5 m de altura. Mas, após as conversações que precederam o início da Segunda Guerra, o governo percebeu que essa rede seria insuficiente contra ataques aéreos em baixa altitude, e desenvolveu, em 1939, um radar aerotransportado para detectar aeronaves inimigas (DUMMER, 1983; SKOLNIK, 1962).

Os primeiros radares eram biestáticos, testados nos vários países mencionados há

pouco, com antenas transmissora e receptora separadas por uma determinada distância. A evolução do sistema seguiu de modo tal, que os radares passaram a utilizar duas antenas (ou grupos de antenas) em um mesmo conjunto e, posteriormente, uma única antena. Para isso foi necessário o desenvolvimento de dispositivos para o chaveamento rápido, a fim de evitar que o sinal transmitido causasse sobrecarga no receptor; por causa disso foram desenvolvidos dispositivos duplexadores – TR (*transmit-receive*) e ATR (*anti-transmit-receive*) –, inicialmente disparadores de arco, e depois válvulas de descarga em gás. O duplexador foi desenvolvido no *United States Naval Research Laboratory*, e incorporado a um radar de 200 MHz em 1936 (BAXTER, 1968; SWORDS, 2008).

O outro fator distintivo da tecnologia do radar foi o desenvolvimento dos métodos de visualização do eco. Para isso, foi usado o tubo de raios catódicos, usando as deflexões horizontal e vertical do feixe, com métodos diferentes de visualização do sinal. No tipo “A”, o sinal formava um traçado contínuo na tela que indicava as variações de altitude do alvo, sem indicar sua localização. O mais usado (PPI, *Plan Position Indicator*), foi desenvolvido na Inglaterra por Edward Bowen. No método PPI, ocorre a modulação por intensidade de eco, com uma varredura contínua do feixe por 360°, indicando cada alvo como um ponto luminoso na tela escura. Dependendo do fósforo utilizado, o tempo de persistência da imagem na tela ia de curto a muito longo. Nos Estados Unidos, as principais empresas que produziram essas válvulas no período da guerra foram RCA, Varian, Raytheon e Sperry (SKOLNIK, 1962).

A princípio, os sistemas de radar alemães e ingleses operavam em VHF (ondas métricas), mas foi percebido que, para obter maior resolução do alvo (frequentemente alvos múltiplos), era necessário que os sistemas operassem com menores comprimentos de onda, com frequências na faixa de micro-ondas. O alcance podia ser estendido pelo aumento da potência do transmissor, da concentração do feixe através de um refletor parabólico e do aumento da sensibilidade do receptor. A consideração sobre os requisitos de potência ocasionou a transição dos radares de ondas contínuas (CW) para os radares pulsados (SWORDS, 2008).

Na Alemanha, um dos principais centros de produção industrial de produtos eletrônicos da Europa, o desenvolvimento dos sistemas de radar em VHF seguiu caminhos semelhantes aos da Inglaterra e dos Estados Unidos. Conceitos e componentes, como válvulas, foram desenvolvidos por empresas como, notadamente, a GEMA (*Gesellschaft für elektroakustische und mechanische Apparate*), especializada em radares e sonares; no final da década de 1930, a Telefunken entrou no ramo de radar. Essas empresas desenvolveram radares mediante contratos com a marinha de guerra e/ou a força aérea (ramo do exército).

Empresas como AEG, Lorenz e Siemens foram subcontratadas para fornecer partes específicas dos sistemas. Não por acaso, as primeiras experiências remontam a 1933, quando foi determinado à divisão de pesquisas de sinais da marinha de guerra o desenvolvimento de um dispositivo de radiodeteção. Seu chefe, Rudolf Kühnold, desenvolveu um protótipo para trabalhar na frequência 2220 MHz (13,7 cm) usando um oscilador Brakhausen-Kurz, cuja potência gerada era somente 100 mW. Para aumentar a potência, foi adquirida na fábrica da Philips, nos Países Baixos, uma magnetron que, na saída, fornecia uma potência de 80 W. Desenvolvimentos posteriores foram feitos na GEMA e os primeiros testes começaram em 1933, com a colaboração de dois especialistas em eletrônica eletroacústica: os engenheiros Paul-Günther Erbslöh e Hans-Karl von Willisen. A GEMA entregou um primeiro protótipo, chamado DeTe, em 1937 (BLANCHARD, 2019). Outros tipos de radar importantes foram desenvolvidos, como *Seetakt*, *Freya* e *Mammut* da GEMA e *Wurzburg* da Telefunken. Os projetistas de radares alemães, para evitar a instabilidade das magnetrons de baixa potência, optaram por usar a klystron e triodos de potência. Porém, com o desenvolvimento das magnetrons de cavidade, os aliados tiveram uma grande vantagem que se mostrou crucial. Em 1943, os alemães souberam que os ingleses estavam usando as magnetrons de cavidade pela queda, em Rotterdam, de um avião militar cuja a válvula foi recuperada porque o explosivo de destruição do módulo do radar não foi ativado (BLANCHARD, 2019; KROGE, 2000; PRICE, 2017; SWORDS, 2008).

Durante o período da guerra, foram criadas as principais válvulas utilizadas nos circuitos do radar. Como foi comentado no Capítulo 2, no começo da década de 1940, as duas válvulas disponíveis para gerar potência acima de 300 MHz eram a klystron e a resnatron, esta podendo gerar 1 kW em 666,7 MHz (45 cm). Após a criação da magnetron de cavidade, era possível gerar pulsos com potência de 10 kW em 3 GHz. O dispositivo básico do transmissor era uma válvula osciladora de baixa potência associada a uma amplificadora como a klystron, sendo ambas posteriormente substituídas pela magnetron. Os receptores eram do tipo super-heteródino e usavam válvulas convencionais. É interessante notar que, além das válvulas, foram utilizados diodos de cristal como detectores de sinais de micro-ondas e também no estágio misturador do receptor (BAXTER, 1968; SWORDS, 2008).

A magnetron foi de grande importância, direta e indiretamente, para desenvolvimentos tecnológicos posteriores. Em setembro de 1940, durante a Batalha da Inglaterra, foi enviada ao Canadá e Estados Unidos uma delegação britânica, a *British Technical and Scientific Mission*, liderada por Henry Tizard, encarregada de levar alguns produtos desenvolvidos na Inglaterra, entre os quais estava a magnetron de cavidade ressonante. Um dos objetivos da

missão era a troca de informações científicas com os aliados, mas o objetivo maior era aproveitar a capacidade industrial dos Estados Unidos. A missão entrou em contato com o NDRC (*National Defense Research Committee*) que, por sua vez, contactou os Bell Labs para fabricar 30 cópias da magnetron para experimentação. Para expandir a pesquisa da magnetron e iniciar sua produção, o NDRC financiou a criação do *Radiation Laboratory* (Rad Lab) sob governança do MIT, que acabou produzindo 150 sistemas diferentes de radar durante a guerra. Com isso, os ingleses tiveram acesso às pesquisas que estavam sendo realizadas nos Estados Unidos (pelos Bell Labs), que culminaram com a criação dos transístores (BAXTER, 1968).

O radar foi um dos equipamentos fundamentais para a condução das operações bélicas da Segunda Guerra Mundial, sendo empregado de forma intensiva, tanto pelos Aliados, como pelas forças do Eixo. Os radares de terra eram usados principalmente para detectar aviões inimigos; os embarcados em navios eram usados para detectar aeronaves e embarcações, e como auxiliares de navegação para localizar litorais e boias de sinalização. Os aeroembarcados detectavam aviões, embarcações e veículos terrestres, além de ajudarem a evitar tempestades e de serem usados como auxiliares de navegação, inclusive localizando cidades num mapa (DUMMER, 1983; SKOLNIK, 1962). Após a guerra, o radar continuou a ser desenvolvido e recebeu novas aplicações. No campo militar, foram criados ou aperfeiçoados sistemas de rastreamento de armas, controle de disparo de mísseis guiados por radar e disparados de submarinos. No campo das aplicações em transportes civis, sistemas de radar foram aplicados à vigilância de portos e ao controle do tráfego em aeroportos, além dos dispositivos embarcados de auxílio à navegação. Também foram desenvolvidos o radar meteorológico, os sistemas de vigilância e o uso em radioastronomia (DUMMER, 1983).

3.2.2 O computador

Outra criação típica do século XX, que contribuiu de forma decisiva para a conformação da modernidade, foi o computador digital para funções específicas e de propósito geral. Entre os sistemas que são abordados nesse estudo, o computador, notadamente o digital, foi o tipo de equipamento em que a transição de um modelo de construção eletromecânica para eletrônica foi crucial. No processo de evolução a partir dos primeiros computadores, as válvulas permitiram não somente o aumento de complexidade, mas também o de escala dos mesmos.

O conceito que deu origem ao computador foi o das máquinas tabuladoras e

calculadoras, cujos modelos mecânicos modernos foram construídos no século XIX, passando aos eletromecânicos no início do século XX. Sucessora da *máquina diferencial*, basicamente uma calculadora, a *máquina analítica* de Charles Babbage, concebida em 1834, continha todos os elementos essenciais de um computador digital de propósito geral: sistemas de entrada e saída de dados com cartões perfurados, unidade de processamento (que Babbage denominou moinho – *mill*) e dispositivo de armazenamento (que denominou armazém – *store*); apesar de não ter sido construída, foi uma máquina de propósito geral que serviu de base para as arquiteturas dos computadores digitais do século XX. Além de máquinas de computação com princípios digitais, surgiram também, no século XIX, os computadores analógicos voltados para a predição de fenômenos, como o construído por William Thomson (Lorde Kelvin) em 1872, puramente mecânico, usando engrenagens, polias, hastes e fios, que tinha o objetivo de fazer a previsão do comportamento de marés nos portos, evitando cálculos manuais cansativos (ATHERTON, 1984).

A tecnologia eletromecânica empregou elementos de equipamentos de computação existentes, como calculadoras de mesa, máquinas e tabuladores de cartão perfurado (criado por Herman Hollerith em 1894). Originalmente, estas máquinas foram usadas para acelerar o processamento do dados do censo populacional nos Estados Unidos em 1890. Em 1911, a *Tabulating Machine Company*, fundada por Hollerith, fundiu-se com três outras para formar a *Computing-Tabulating-Recording Company*, que mais tarde trocou o nome para *International Business Machines Corporation* (IBM). A nova empresa continuou produzindo o sistema Hollerith para fins comerciais (PUGH, 1995).

No século XX, novos tipos de necessidades, como os problemas das redes de energia elétrica, serviram de incentivo para a criação de computadores analógicos eletromecânicos de uso específico na década de 1930. Uma máquina eletromecânica de múltiplas aplicações foi o *analisador diferencial*, construído por Vannevar Bush no MIT, em 1930, que foi replicado em vários países, inclusive na Inglaterra, onde, em 1935, Douglas Hartree, trabalhando na Metropolitan-Vickers, usou o analisador de Bush para pesquisas com simulação do funcionamento de válvulas termoiônicas (ATHERTON, 1984). Ainda nos anos 1930, Howard Aiken, da Universidade de Harvard, aproveitou as ideias da máquina analítica de Babbage e concebeu um computador usando chaves, eixos rotativos, embreagens e relés, que foi construído pela IBM e denominado *automatic sequence controlled calculator* ou *Harvard Mark I*. Posteriormente, foram feitas mais três versões, sendo o Mark III e o Mark IV híbridos (com válvulas e diodos semicondutores). Na Alemanha, Konrad Zuse, a partir de 1939, também construiu computadores usando relés (ROJAS; HASHAGEN, 2000).

Figura 3.9: Panorama do desenvolvimento dos computadores (1936-1965)

| URSS | | Estados Unidos | | | | Inglaterra | |
|------|--|----------------|--|--|--|------------|---|
| 1936 | | | | | Tabuladora eletromecânica com cartão perfurado | | Máquina de Turing (conceito da máquina computadora universal) |
| 1937 | | | | | | | |
| 1938 | | | | | | | |
| 1939 | | | | | | | |
| 1940 | | | | | | | |
| 1941 | | | | | | | |
| 1942 | | | | | | | |
| 1943 | | | | | | | |
| 1944 | | | | | | | |
| 1945 | | | | | | | |
| 1946 | | | | | | | |
| 1947 | | | | | | | |
| 1948 | | | | | | | |
| 1949 | | | | | | | |
| 1950 | | | | | | | |
| 1951 | | | | | | | |
| 1952 | | | | | | | |
| 1953 | | | | | | | |
| 1954 | | | | | | | |
| 1955 | | | | | | | |
| 1956 | | | | | | | |
| 1957 | | | | | | | |
| 1958 | | | | | | | |
| 1959 | | | | | | | |
| 1960 | | | | | | | |
| 1961 | | | | | | | |
| 1962 | | | | | | | |
| 1963 | | | | | | | |
| 1964 | | | | | | | |
| 1965 | | | | | | | |

Tecnologia: m - mecânica; r - relés; v - válvulas; d - diodos semicondutores; t - transistores.

Fontes: Dummer (1983), Rojas e Hashagen (2000), Deane (2003), Ceruzzi (2003, 2012), CHM (2019), Russian (2019), Weik (1961).

A exemplo do radar, os computadores analógicos e digitais eletrônicos foram desenvolvidos pouco antes e durante a Segunda Guerra Mundial, e empregados em aplicações militares para tarefas de controle e processamento, como a decifração de códigos militares e os cálculos para a confecção das primeiras bombas atômicas, como as lançadas em Hiroshima

e Nagasaki (COLUMBIA, 2019). Serão abordados aqui somente os computadores digitais, pela maior relevância da sua contribuição para o tema estudado. Os países que dominaram o desenvolvimento dos computadores foram os Estados Unidos, a Inglaterra e a União Soviética. Nos três, os primeiros projetos que iam além dos dispositivos eletromecânicos baseados em relés, foram desenvolvidos na década de 1940, utilizando válvulas em seus módulos. É certo que outros países construíram computadores eletrônicos valvulados: no fim da década de 1940, a Austrália; na década de 1950, Países Baixos, Suécia, Canadá, Índia, Japão, Israel, Dinamarca e Alemanha; e na década de 1960, Polônia e Iugoslávia. Mas esses países se limitaram a construir exemplares únicos ou com um pequeno número de cópias, sem atingir o estágio da produção comercial alcançada pelos três países líderes.

O Quadro 3.4 dá alguns detalhes dos principais computadores valvulados criados nas décadas de 1930 e 1940; os anos indicados são aqueles em que os computadores entraram em operação (mesmo que fosse de modo experimental), não os do início dos projetos (informados, quando necessário, na Figura 3.9).

Quadro 3.4: Características dos principais computadores valvulados criados até 1950

| Ano | Nome | País | Instituição | Válvulas | Outros* |
|------|---------------|------|---------------------------|----------|------------------|
| 1942 | ABC | EUA | Universidade de Iowa | 600 | - |
| 1943 | H. Robinson | UK | Governo inglês | 24 | - |
| 1943 | Colossus 1 | UK | Governo inglês | 1.600 | - |
| 1944 | Colossus 2 | UK | Governo inglês | 2.400 | - |
| 1946 | ENIAC | EUA | Un. Pensilvânia/ Exército | 18.000 | - |
| 1948 | SSEC | EUA | IBM | 13.000 | 23.000 r |
| 1948 | Manch. Baby | UK | Univ. Manchester | 550 | tubos Williams |
| 1949 | Manch. Mark 1 | UK | Univ. Manchester | 4.050 | tubos Williams |
| 1949 | EDSAC | UK | Univ. Cambridge | 4.500 | - |
| 1949 | EDVAC | EUA | Un. Pensilvânia/ Exército | 3.600 | 10.000 d |
| 1949 | MADDIDA | EUA | Northrop Aircraft Corp. | 150 | 1.200 d |
| 1950 | Harv. Mark 3 | EUA | Univ. Harvard/ Marinha | 5.000 | 1.300 d, 1.300 r |
| 1950 | SEAC | EUA | Nat. Bureau of Standards | 1.300 | 15.800 d, 10 r |
| 1950 | SWAC | EUA | Nat. Bureau of Standards | 2.300 | 3000 d |
| 1950 | MESM | URSS | Academia de Ciências | 6.000 | - |

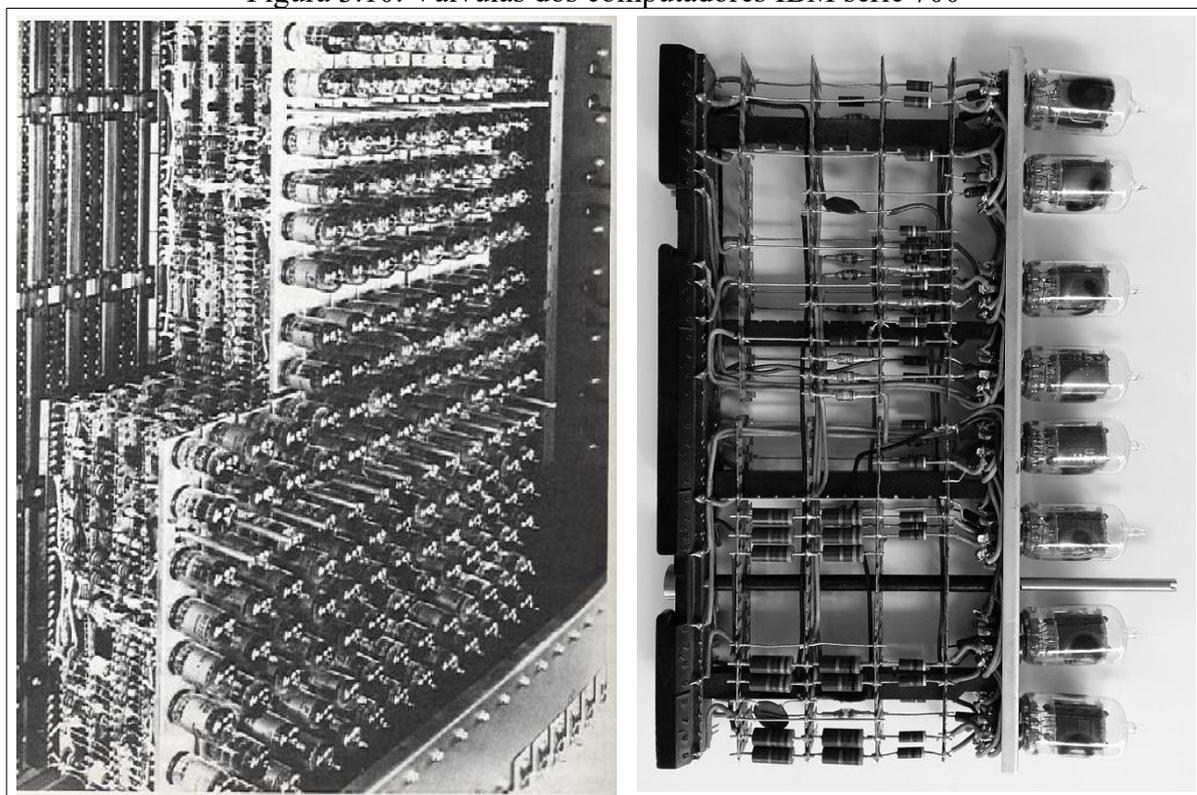
* Relés (r), transistores (t) e/ou diodos semicondutores (d).

Fontes: Dummer (1983), Rojas e Hashagen (2000), Deane (2003), Ceruzzi (2003, 2012), CHM (2019), Russian (2019), US Navy (1953), Weik (1961).

As válvulas que dominaram a cena na eletrônica analógica, desde a sua introdução,

mostraram-se igualmente eficientes em computadores digitais para trabalhar nos módulos de contagem, processamento e armazenamento dos computadores digitais. Já vimos que foram desenvolvidas válvulas especiais para servir de memória e periféricos de saída, como os TRCs para a visualização de resultados. Em termos de *hardware*, a opção pelo uso de válvulas foi devida ao fato de que elas têm um tempo de comutação muito menor do que os relés. Dependendo da complexidade do projeto, era necessário o emprego de milhares delas; por serem volumosas, consumirem maior quantidade de energia elétrica e esquentarem, necessitavam de ambiente com ventilação, além de técnicas de montagem em *racks* para a acomodação dos vários módulos de válvulas. Três tipos de válvulas empregados nessas primeiras versões foram triodos, pentodos e thyratrons (ROJAS; HASHAGEN, 2000).

Figura 3.10: Válvulas dos computadores IBM série 700



Esquerda: painel eletrônico (VACUUM, 2019). **Direita:** módulo lógico (IBM, 2019).

Esses computadores de grande porte (*mainframes*), em sua maioria, requeriam instalações enormes e muito caras. De cada modelo foram construídas pouquíssimas unidades (ou apenas uma), instaladas em órgãos do governo ou universidades. O ABC, de caráter experimental, projetado por John Atanasoff e Clifford Berry, foi o primeiro computador a utilizar válvulas eletrônicas (ROJAS; HASHAGEN, 2000).

A Inglaterra tinha uma tradição de decifração de códigos que remontava à Primeira Guerra com a *sala 40*, que decifrou o telegrama enviado pelo diplomata alemão Arthur

Zimmermann ao seu embaixador no México, propondo condições especiais para a aliança deste país com a Alemanha, o que precipitou a entrada dos Estados Unidos na guerra. Premida pelos ataques alemães na Segunda Guerra, além de ter desenvolvido um sistema eficiente de radar, a Inglaterra também foi pioneira na construção de computadores valvulados. Em Bletchey Park, local destinado para a tarefa de criptoanálise das mensagens militares alemãs, após o teste com o pequeno Heath Robinson, foi criada a máquina Super Robinson, que usava 100 válvulas para a tarefa e que, por sua vez, serviu de protótipo para o Colossus, um computador valvulado de propósito específico, utilizado pelo governo inglês para quebrar os códigos da máquina Enigma alemã. A concepção foi do matemático M. H. Newman e o projeto e execução do *hardware* foram realizados por Thomas Flowers, engenheiro com experiência em sistemas que usavam eletrônica digital. Com a ajuda de sua equipe, Flowers construiu uma série de dez computadores; a primeira versão, Mark I, de 1943, usava 1000 triodos e 500 thyatrons, e a versão Mark II, de 1944, usava 2500 válvulas. Por alegadas questões de segurança, as máquinas foram destruídas, por ordem de Churchill, com exceção de duas. Flowers lamentou que, com o segredo imposto em torno do Colossus, a Inglaterra teria perdido a oportunidade de liderar o mercado de computadores que surgiu no pós-guerra (GANNON, 2006; COPELAND, 2006).

Nos Estados Unidos, foram desenvolvidos computadores de propósito geral. O primeiro deles, o ENIAC (*Electronic Numerical Integrator and Computer*), ficou pronto em 1945; usava lógica decimal, enquanto que o EDVAC (*Electronic Discrete Variable Automatic Computer*) trabalhava com lógica binária e programa armazenado. Ambos foram construídos pela Escola de Engenharia Elétrica da Universidade da Pensilvânia para o laboratório de balística do Exército; o artigo *First draft of a report on the EDVAC*, escrito em 1945 por John von Neumann, é a referência básica da arquitetura von Neumann de computadores. Um exemplo de implementação de projetos com diferentes tecnologias de construção foi o MADDIDA (*MAGnetic DRum DIGital Differential Analyzer*), um computador valvulado criado em 1949 para dirigir mísseis baseado no analisador diferencial, o computador analógico eletromecânico, desenvolvido por Vannevar Bush, de que já falamos.

Neste período, foram criados nos Estados Unidos vários computadores de altíssimo desempenho para atender a demandas das Forças Armadas. Após a detonação da primeira bomba atômica soviética, foi criado o sistema de defesa SAGE (*Semi-Automatic Ground Environment*) da Aeronáutica, com a função de ser um sistema de controle e comando para a interceptação de aeronaves inimigas e controle de disparo de mísseis na Guerra Fria. Foi concebido no começo da década de 1950, começou a funcionar em 1958, estava plenamente

operacional em 1963 e atuou até 1983. O sistema era composto de: a) uma rede de radares (100, quando o sistema foi completado); b) 24 centros de direção, cada um com um computador cuja tarefa era receber as informações dos radares, de modo a formar um quadro da situação e, se fosse o caso, guiar os mísseis terra-ar para a destruição dos aviões inimigos; c) três centros de combate. A princípio, foi usado no SAGE o computador Whirlwind, um simulador de voo usado para treinamento da tripulação de aviões, desenvolvido no final da década de 1940, e que usava pentodos (7AK7, fabricado pela Sylvania); no início, trabalhava com tubos Williams como memória, mas, devido à sua falta de confiabilidade, estes foram substituídos, no começo da década de 1950, por memórias de núcleo de ferrite, o que diminuiu o volume e melhorou o desempenho (GROMETSTEIN, 2011).

Quadro 3.5: Características dos principais computadores valvulados criados após 1950

| Ano | Nome | País | Instituição | Válvulas | Outros* |
|------|-----------------|------|-------------------------|----------|----------------------|
| 1951 | Whirlwind 1 | EUA | MIT/ Forças Armadas | 6.800 | 22.000 d, 1.800 r |
| 1951 | UNIVAC 1 | EUA | EMCC/ Remington Rand | 5.600 | 300 r, 18.000 d |
| 1951 | Ferranti Mark 1 | UK | Ferranti | 4.050 | tubo Williams |
| 1951 | LEO-1 | UK | J. Lyons & Co. | 6.000 | 1.500 d, 120 r |
| 1952 | UNIVAC 1101 | EUA | ERA/ Remington Rand | 2.700 | - |
| 1952 | IBM 701 | EUA | IBM | 4.000 | 15.000 d |
| 1952 | IAS machine | EUA | Univ. Princeton | 2.300 | tubo Williams |
| 1952 | MANIAC 1 | EUA | Los Alamos Scient. Lab. | 2.500 | 800 d, tubo Will. |
| 1953 | Strela (flecha) | URSS | Academia de Ciências | 6.200 | 60.000 d, tubo Will. |
| 1955 | AN/FSQ-7 | EUA | IBM - SAGE | 49.000 | 170.000 d, 703 t |
| 1955 | DEUCE | UK | National Physical Lab. | 1.450 | mem. mercúrio |
| 1956 | Burroughs 205 | EUA | CEC/ Burroughs | 1.525 | - |
| 1956 | BIZMAC | EUA | RCA/ Exército | 30.000 | 70.000 d, 200 t |
| 1956 | Bendix G-15 | EUA | Bendix | 450 | 300 d |

* Relés (r), transistores (t) e/ou diodos semicondutores (d).

Fontes: Dummer (1983), Rojas e Hashagen (2000), Deane (2003), Ceruzzi (2003, 2012), CHM (2019), Russian (2019), US Navy (1953), Weik (1961).

O AN/FSQ, uma evolução do Whirlwind, foi um computador projetado especialmente pela IBM para o SAGE; foram produzidos 24 AN/FSQ-7 (versão de direção) e 3 AN/FSQ-8 (versão de combate). Cada computador pesava 250 t, consumia 3 MW de potência, empregava 49.000 válvulas e tinha um sistema de monitoração das válvulas para a verificação do estado delas, de modo a poder substituí-las antes de apresentarem defeitos. Somando-se a isso, cada computador era dual, isto é, na verdade eram dois computadores trabalhando em

paralelo, um ativo e outro de reserva para o caso de falha do primeiro. O console com PPI (*Plan Position Indicator*) foi desenvolvido a partir da válvula charactron (vista na seção sobre válvulas para aplicações em imagens do Capítulo 2), em que o operador tinha um teclado para a entrada de dados e uma pistola sensível à luz que era encostada na tela e usada para reconhecer a informação de posição do alvo e proceder à entrada do dado no computador; nas estações de trabalho, para a leitura de texto no monitor, foi usada a válvula typotron, semelhante à charactron, geradora de caracteres e memória associada, criada pela Hughes e anunciada em 1956 (MIT, 2019; JACOBS, 1986).

Figura 3.11: Primeiras telas de computador



Esquerda: o Whirlwind (FEDORKOW, 2019). **Direita:** operador usa pistola detectora de luz na tela do AN/FSQ-7 (SAGE, 2019, photo gallery, 06).

Para promover a comunicação automática e rápida entre os radares e os centros de controle, a equipe de engenharia de sistemas do MIT desenvolveu um transmissor de dados (*digital data transmitter*, DDT, que convertia o sinal analógico em digital) e um receptor (*digital data receiver*, DDR, que fazia a conversão inversa), cuja combinação foi mais tarde chamada *modem*. No contexto do SAGE, os dois formaram o *Coordinate Data Processing Set*, cujo nome em código era AN/FST-2 (KLINE, 2019). Os sinais detectados pelo radar podiam assim ser enviados para o centro SAGE mais próximo através das linhas telefônicas, que eram alugadas à AT&T. O elevado número de válvulas do sistema não estava concentrado somente nos computadores, mas era distribuído também nos radares e modems associados: só o FST-2 tinha 3.300 válvulas (JACOBS, 1986). Na década de 1950, o AN/FSQ era o maior computador até então construído; foi o primeiro computador digital usado em tempo real e o pioneiro na criação de uma rede de computadores.

Quando o SAGE estava quase pronto, a AT&T decidiu fazer uma versão comercial do conjunto DDT/DDR, atendendo a uma demanda emergente de transmissão de dados entre

computadores de organizações. Os Bell Labs desenvolveram um equipamento chamado Dataphone, que usava a rede telefônica da AT&T para se comunicar com outro dispositivo igual. Lançado em 1958, o Dataphone contava com dois aparelhos: o *Recorded Carrier Subset*, que transmitia dados armazenados em fita magnética, e o *Digital Subset*, que enviava dados em tempo real. Entretanto, o transmissor não tinha um modem próprio, mas usava um modem FM do serviço de teletipo da AT&T. O serviço foi implantado experimentalmente nas áreas da Bell em Illinois, Michigan e Nova York; mas não deu bom resultado. Por isso, a Bell voltou-se para o desenvolvimento dos pequenos *data sets*, totalmente transistorizados, lançados em 1961 (ASPRAY, 2019).

Figura 3.12: O Dataphone



Fonte: Dataphone (1958).

O MANIAC fez parte da grande família de clones do IAS instalados em órgãos do governo e universidades; construído em Los Alamos, o MANIAC foi usado para cálculos de processos termonucleares no programa de criação da bomba atômica. Os outros computadores dos Estados Unidos referidos no Quadro 3.5 foram de uso comercial. Os dois modelos UNIVAC, origens da extensa família de computadores com esse nome, foram projetados por firmas diferentes, adquiridas pela Remington Rand que, através de fusões sucessivas, tornou-se a Unisys. O computador criado pela divisão de aviação da Bendix encontrou um nicho específico na engenharia civil; foi produzido por quase dez anos, num total de mais de 400 unidades entregues nos Estados Unidos, Canadá e Austrália. O IBM 701 foi o primeiro computador comercial da IBM; a empresa foi pioneira na produção em massa e, até o início da década de 1960, chegou a entregar 2.000 sistemas de um único modelo (WEIK, 1961).

Na Inglaterra, a indústria de computadores foi liderada pela Ferranti, criada no fim do século XIX, que comercializou os computadores projetados pelas grandes universidades inglesas: o Ferranti 1 e o Mercury foram adaptações dos modelos Manchester Mark 1 e 2; e o Atlas, já sem válvulas, derivou do EDSAC de Cambridge. A J. Lyons & Co., que produziu e vendeu a linha de computadores LEO, era originalmente um grande conglomerado das áreas de alimentos e hotelaria, que expandiu os negócios para o ramo da computação; o LEO, baseado no EDSAC, foi o primeiro computador destinado a empresas comerciais. O DEUCE, comercializado pela *English Electric*, tem o valor histórico de ser a versão comercial do Pilot ACE, que por sua vez foi uma versão reduzida do *Automatic Computing Engine* (ACE), criado em 1945 por Alan Turing no *National Physical Laboratory* (SOKOLOWSKI, 2019).

Na União Soviética, entre 1948 e 1953, foi estabelecida uma indústria com linhas de computadores de grande porte: MESM, BESM e Strela. O MESM (*Malaya Elektronnaya Schetnaya Mashina* – pequena máquina calculadora eletrônica), desenvolvido pela Academia de Ciências, foi um dos primeiros computadores da Europa: ficou pronto em 1949 e entrou em operação em 1951. O Strela (flecha) foi o segundo computador criado na URSS. Desenvolvido pelo Ministério de Construção de Máquinas e Instrumentos, foi o primeiro *mainframe* produzido em série, sendo instalado em várias instituições de pesquisa no país. Foi enviado em 1957 para o sítio secreto de pesquisa nuclear, Arzamas 16 (Sarov, perto de Nijni-Novgorod), para os cálculos da condução de calor da bomba de hidrogênio, e também foi usado nos cálculos do planejamento do voo do Sputnik-1. O computador BESM (*Bistrodestvuyushaya Elektronnaya Schetnaya Mashina* – máquina de calcular eletrônica rápida), sucessor do MESM, teve uma versão aperfeiçoada, o BESM 2, de 1956, e se tornou o computador mais rápido da Europa; foi construído com 4.000 válvulas, e com tubos Williams como memória (KORNILENKO, 2007; GEROVITCH, 2015; METROPOLIS; HOWLETT, ROTA, 1980; FITZPATRICK; KAZAKOVA; BERKOVICH, 2006).

Após essa fase inicial, desenvolveu-se a indústria de computadores servindo para aplicações comerciais, científicas e industriais. As válvulas foram o cerne da constituição do *hardware* da primeira geração de computadores, desde a década de 1940 até a entrada dos transistores e dos circuitos integrados na década de 1960. A miniaturização dos computadores foi implementada em passos: os minicomputadores, criados na década de 1960, foram superados pelos microcomputadores a partir da década de 1980.

3.3 OUTRAS APLICAÇÕES

No Capítulo 2, ao falar sobre os diferentes tipos de válvulas, suas aplicações gerais já foram comentadas. Por isso, esta seção fará apenas um rápido resumo dos campos que ainda não foram abordados em relação às consequências do surgimento das válvulas. O primeiro grupo é o das aplicações industriais. Como vimos ao longo do estudo, os dispositivos de controle e de realização de tarefas promoveram uma grande mudança na organização dos processos de produção. Para isso contribuíram, tanto as válvulas de uso geral, incluídas nos diversos circuitos elétricos, quanto válvulas especializadas, como as fotocélulas usadas em sensores, as geradoras de micro-ondas usadas em processos de aquecimento, as comutadoras, as geradoras de raios-X para examinar materiais e muitas mais. Válvulas detectoras de radiações em diferentes comprimentos de onda, comutadoras e outras, serviram à criação de sistemas de segurança e aplicações militares como detonadores, orientadores balísticos e outras. Na medicina, as válvulas geradoras de radiação permitiram a criação de aparelhos de radiografia e de radioterapia; os tubos de raios catódicos foram a base dos eletrocardiógrafos e eletroencefalógrafos; e as válvulas subminiatura foram criadas para os aparelhos auditivos. Na instrumentação científica, válvulas foram (e são) usadas, por exemplo, na pesquisa nuclear, como detectores de partículas (fotomultiplicadores, contadores de cintilação) e em equipamentos de registro de eventos.

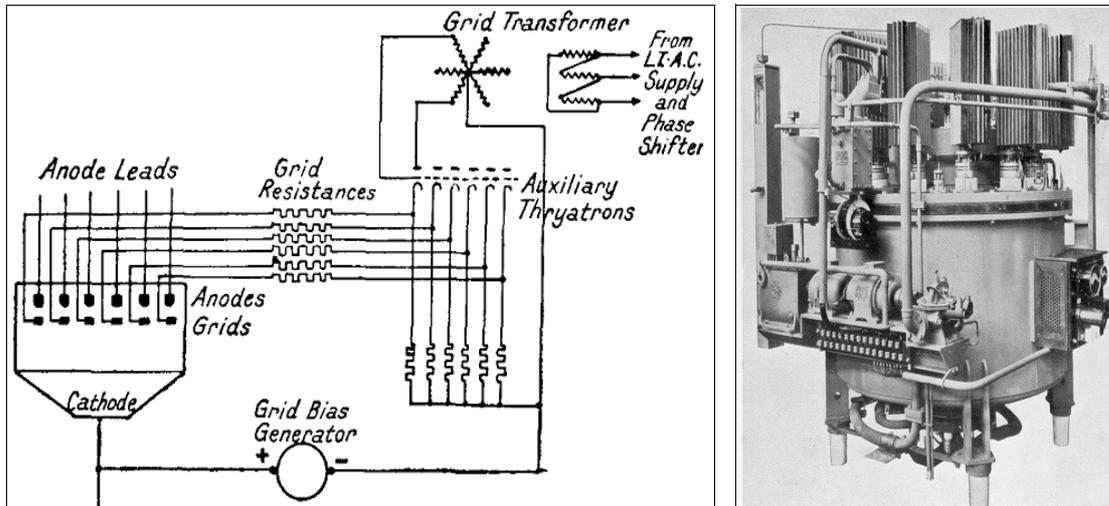
3.3.1 Aplicações industriais

Devido ao fato de que muitas das válvulas de potência, pelas próprias características, são caras e fabricadas em quantidades relativamente pequenas, elas são conhecidas apenas pelos profissionais da área; mas por suas aplicações, elas são tão importantes quanto as vistas anteriormente, pelo impacto que causaram, para a conformação da modernidade. Dois ramos distintos e interligados de aplicação das válvulas foram a energia elétrica e os métodos empregados de produção industrial, como foi apontado no Capítulo 2.

No caso da energia elétrica, as válvulas de potência fizeram a transição do padrão eletromecânico para o eletrônico no que diz respeito à retificação de corrente alternada: as válvulas retificadoras de arco substituíram os conversores eletromecânicos nas subestações de distribuição de energia elétrica para a alimentação de bondes e trens (DUFFY, 2003). Essa situação começou a se alterar a partir da década de 1960, com o desenvolvimento de

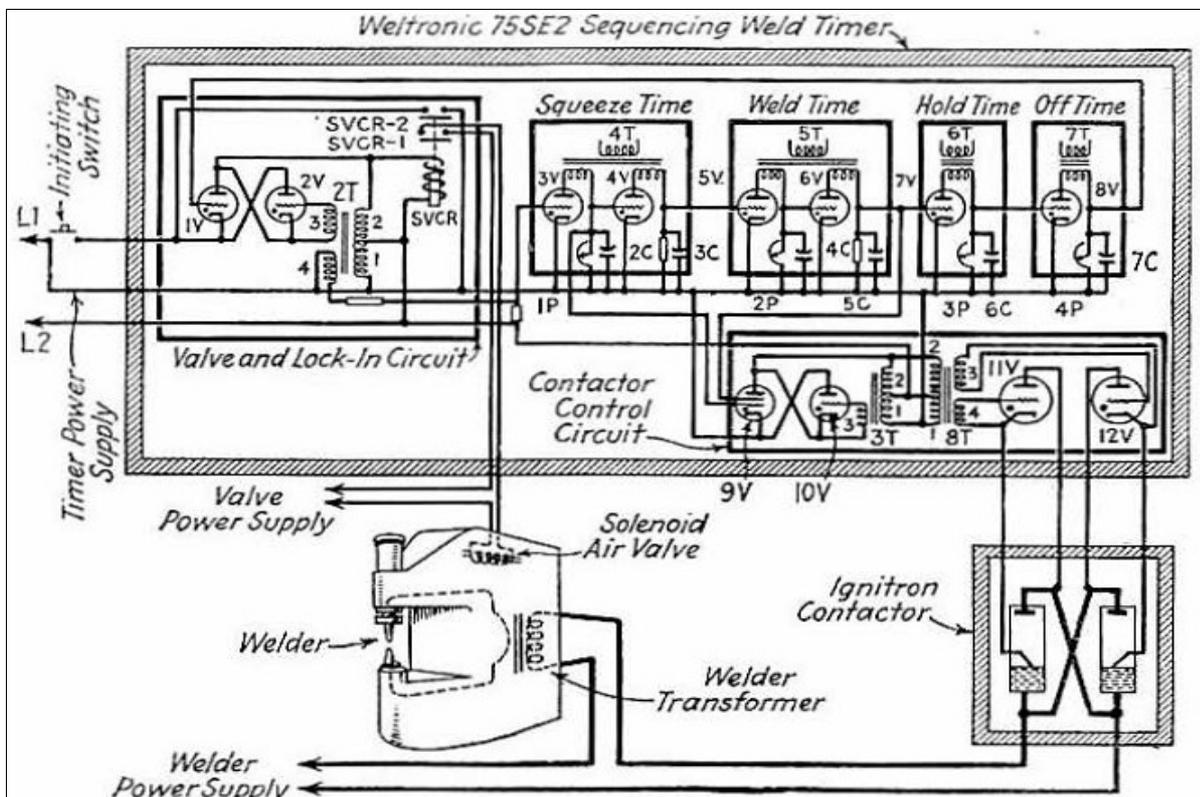
dispositivos semicondutores, os tiristores (thyatron+transistores); mas as válvulas de potência não saíram de cena: as retificadoras de arco foram encontradas, em 2010, em aplicações de alimentação para rede ferroviária (GUARNIERI, 2018).

Figura 3.13: Geração de CC com válvulas retificadoras de arco de mercúrio



Esquerda: diagrama elétrico de ligação de um retificador de arco com 6 anodos e thyatrons auxiliares. **Direita:** retificador de arco com tanque de aço (ORCHARD, 1936, frontispice, p. 181).

Figura 3.14: Circuito de ativação e controle de uma máquina de solda

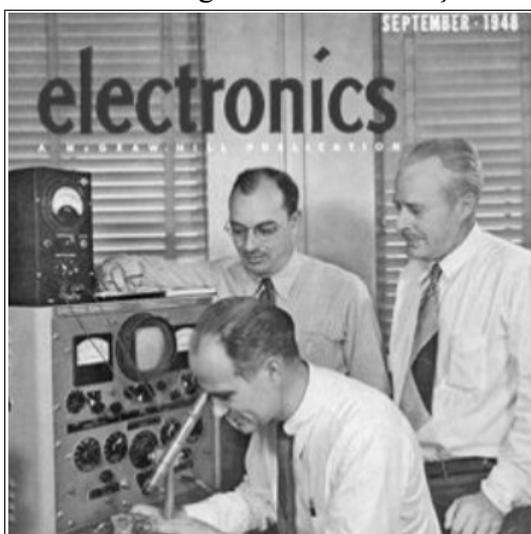


Fonte: Wellman (1957; p. 312).

3.3.2 Aplicações científicas e de instrumentação

No campo da instrumentação eletrônica, *osciloscópios* analógicos, *voltímetros* eletrônicos valvulados e *fontes de alimentação* (de alta e baixa tensão) tornaram-se padrão dos laboratórios de instituições de ensino, de pesquisa/desenvolvimento e de manutenção de equipamentos em meados do século XX, o que pode ser constatado na literatura técnica da época (RIDER, 1951; SCROGGIE, 1954; WELLMAN, 1957). Na área científica, diversos novos ramos de pesquisas que adquiriam imensa atenção no século XX, como a física nuclear e a física dos semicondutores, puderam ser desenvolvidos graças à utilização de instrumentos valvulados.

Figura 3.15: A invenção do transistor e a instrumentação valvulada



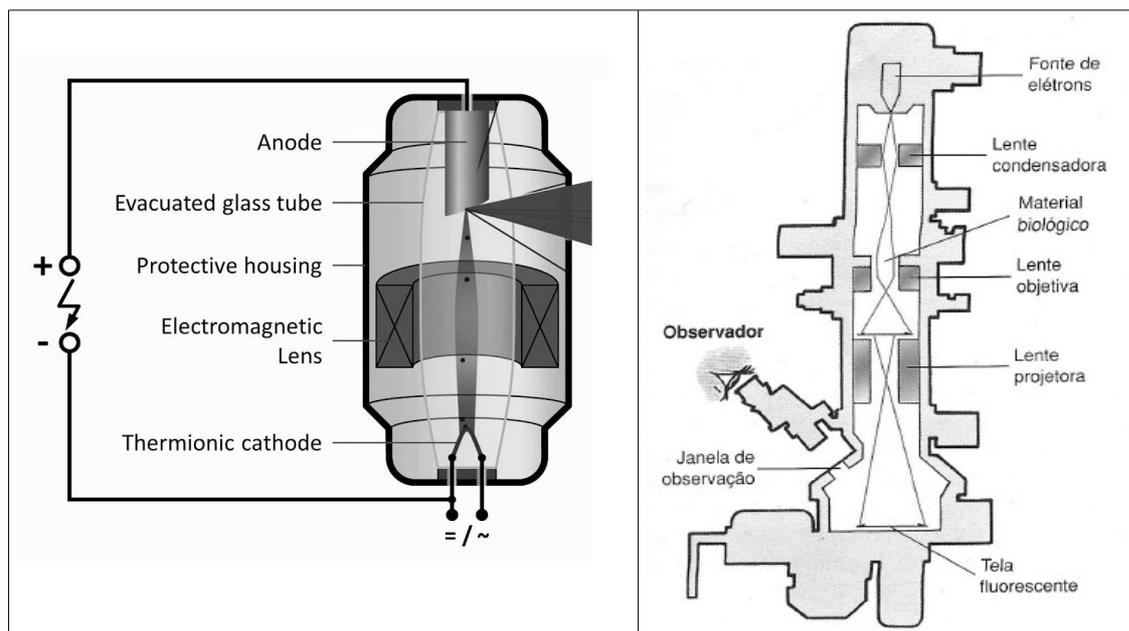
Demonstração do funcionamento do transistor nos Bell Labs: os inventores do transistor de contato de ponta, Bardeen (esquerda) e Brattain em pé; Schokley, o inventor do transistor de junção, sentado. Ao fundo, um osciloscópio e, em cima dele, um medidor (provavelmente um amperímetro).

Fonte: <<http://blog.philipharris.co.uk/news/1947-invention-transistor>>

Veremos a seguir três instrumentos cujo princípio de funcionamento tem parentesco com vários tipos de válvulas que viemos estudando, e que merecem destaque por suas áreas de utilização. O primeiro é o *gerador de raios X*. Além do uso inicial em medicina (radiografia e radioterapia), os raios X são a ferramenta básica dos testes não invasivos: investigação da integridade de estruturas industriais, controle de qualidade de produtos, exame de materiais, inspeção de embalagens em sistemas de segurança, geração de imagens tridimensionais por meio de tomografia são exemplos de seus usos (NON, 2019).

O segundo instrumento é o *microscópio eletrônico*, inventado em 1931 por Ernst Ruska e produzido comercialmente em 1939 pela Siemens. Seu elemento central é um TRC e o aparelho produz imagens com um grau de ampliação muito maior que o do microscópio ótico, o que promoveu um grande avanço nas pesquisas biológicas (BREVE, 2019).

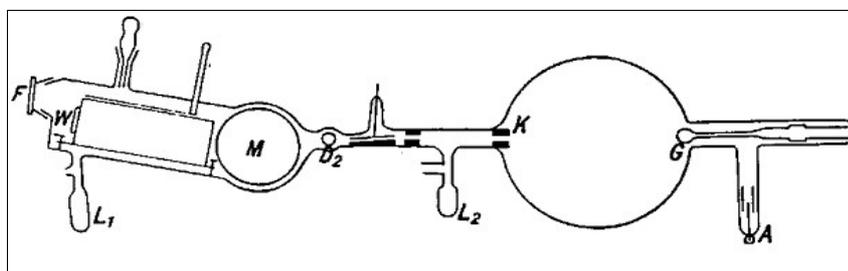
Figura 3.16: Diagramas do aparelho de raios X e do microscópio eletrônico



Esquerda: gerador de raios X (NON, 2019). **Direita:** microscópio eletrônico (VISÃO, 2019).

Um terceiro instrumento, o *espectrômetro de massa*, merece a menção pelo princípio de funcionamento e também para a discussão a ser feita a seguir sobre a pesquisa nuclear. Segue uma linha de pesquisa que remonta a Eugen Goldstein quando descobriu os raios canais em 1886. Seu princípio de funcionamento baseia-se na geração de feixes de íons que sofrem deslocamentos da trajetória quando submetidos à ação de campos elétricos e magnéticos, método descoberto por Willhelm Wien, em 1905. O espectrômetro foi inventado por Francis Aston em 1919, na Universidade de Cambridge, para a separação dos isótopos, alavancando as pesquisas químicas (WIEN, 1999).

Figura 3.17: Diagrama do espectrômetro de massa de Aston



Legenda: A – anodo ; K – catodo; G – desvio de feixe de raios catódicos; D2 – fendas paralelas (campo elétrico); M – campo magnético; W – tela; F – janela de observação; L1, L2 – armadilha para o ar líquido (WIEN, 1999).

3.3.3 Aspectos da paz e da guerra

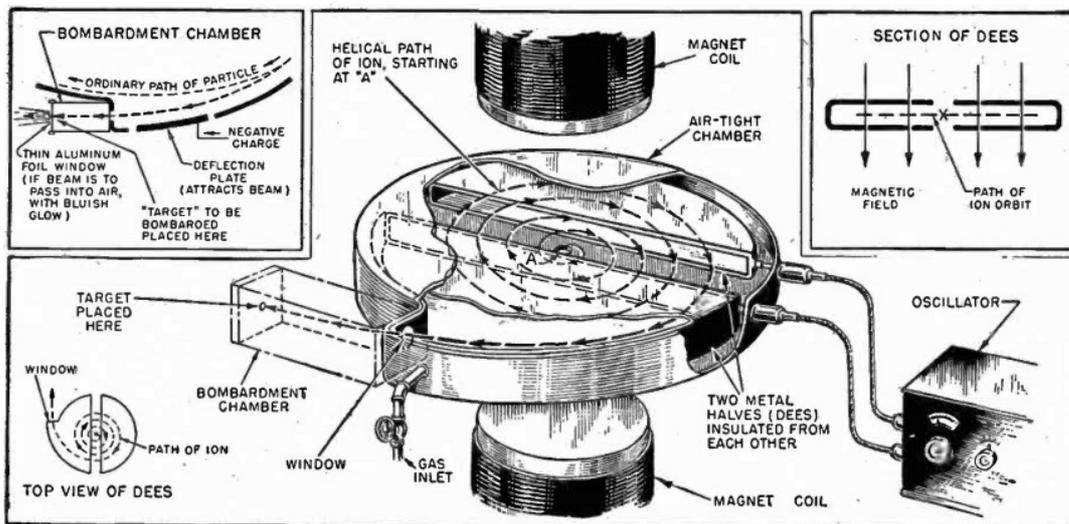
O processo que levou à construção de bombas nucleares enquadra-se historicamente em um projeto de pesquisa, com fins eminentemente científicos, sobre a natureza da radioatividade, que remonta ao século XIX. Sua descoberta foi feita por Henri Becquerel em 1896, que usou minerais fluorescentes para estudar os raios X, descobertos por Röntgen um ano antes; e o estudo continuou com Marie e Pierre Currie. Ainda dentro desse quadro, Ernest Rutherford, na Universidade de Cambridge, em 1911, usou partículas alfa para bombardear átomos e, em 1919, bombardeou o próprio núcleo; Rutherford concluiu que, para romper a barreira do núcleo atômico, era necessário usar partículas com energias bem maiores do que aquelas das partículas alfa e beta, fontes radioativas naturais; em vista disso, em 1927, instou aos físicos que se construíssem dispositivos capazes de gerar grande quantidade de energia para acelerar as partículas. Os físicos atenderam a essa chamada e, nas primeiras experiências, foram criados aceleradores lineares: em 1930, na Universidade de Cambridge, John Cockcroft e E. Walton usaram um transformador de alta voltagem seguido de um multiplicador de tensão que gerava 800 kV; em 1931, Robert van de Graaff construiu um gerador eletrostático de 1,5 MV (COLD, 2019).

Ernest Lawrence, da Universidade de Berkeley, havia passado temporadas, em 1929 e 1930, no laboratório de pesquisas da GE, tendo contato com Albert Hull, especialista em válvulas de raios X, como já vimos. Abordando o problema da aceleração, Lawrence achou melhor usar campos magnéticos para espiralar as partículas carregadas no plano horizontal, de modo que elas fossem adquirindo energia paulatinamente, até serem encaminhadas a um alvo: este é o conceito do ciclotron. Os ciclotrons são compostos por uma câmara circular, onde é feito alto vácuo, composta por duas peças próximas semicirculares (em forma de 'D' – *dee*, em inglês) em que são aplicados campos elétricos variando a polaridade numa alta frequência, na faixa de poucas dezenas de mega-hertz. Para o controle do disparo e da geração de RF, foram empregadas válvulas. Em 1931, Lawrence, com a ajuda de seu aluno, Stanley Livingston, construiu o protótipo de um ciclotron de 11,43 cm de diâmetro, capaz de acelerar íons de hidrogênio com 80.000 elétron-volts; ainda em Berkeley, um ciclotron de 94 cm foi construído e, em 1940, irradiando o urânio, foram descobertos novos elementos: o netúnio e o plutônio (COLD, 2019).

Em 1942, Lawrence desenvolveu o calutron, modificando o ciclotron de 94 cm e transformando-o em espectrógrafo de massa destinado à separação eletromagnética dos isótopos U 235 e U 238 para serem empregados na bomba atômica, por conta do Projeto

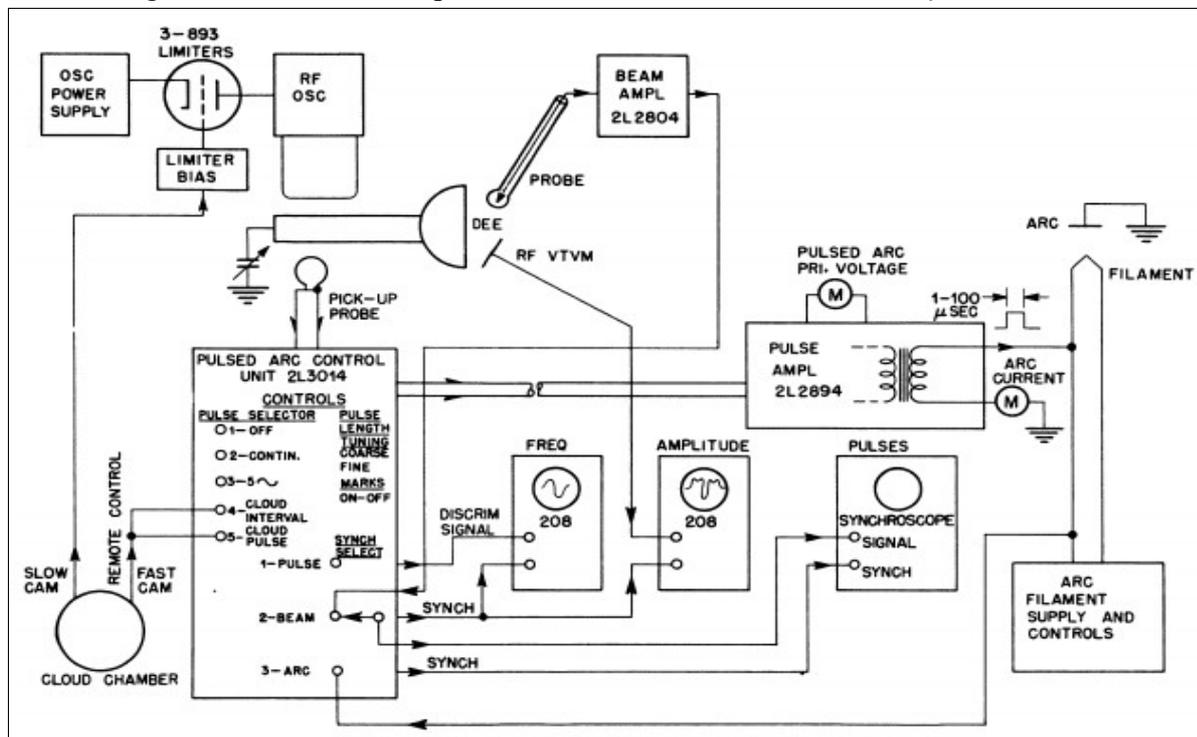
Manhattan. Versões posteriores de ciclotrons foram construídas, com diâmetros e valores de energias maiores, levando à criação de outros tipos de aceleradores como o sincrociclotron e o síncrotron (YERGEY; YERGEY, 1997).

Figura 3.18: Diagrama de um ciclotron



O acelerador de partículas ciclotron com o oscilador de RF à direita, abaixo (PIONEER 1947, p 23).

Figura 3.19: Circuito disparador de um ciclotron e instrumentação associada



O desenho refere-se a um ciclotron cujo diâmetro da câmara era de 4,7 m (184 pol); do lado direito do bloco de controle está representada a instrumentação (MACK, 1948).

Os aceleradores lineares continuaram sendo utilizados para a pesquisa nas décadas subsequentes. Em 1947, o físico brasileiro Cesar Lattes e Cecil Powell, na Universidade de Bristol, usando um novo tipo de emulsão nuclear para filme e um acelerador de Cockcroft-Walton, descobriram novas partículas nucleares, o meson-pi (pion) que, por sua vez, se desintegra em uma outra partícula, o muon. A pesquisa nuclear continuou usando aceleradores lineares nas décadas seguintes, em grandes projetos científicos, cujos altos investimentos em equipamentos, recursos humanos e gerenciamento caracterizaram a *Big Science* no século XX. Como exemplo, podemos citar o *Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)*, estabelecido em 1962, com 3,2 km de comprimento, em que a RCA construiu uma klystron que pesava 68 kg e gerava picos de potência de 24 MV, capaz de acelerar elétrons a aproximadamente a velocidade da luz; outra válvula de potência foi fabricada pela RCA para o acelerador da Universidade de Harvard a um custo de US\$ 11.600.000, equivalentes a US\$ 97.000.000 em 2019. (BASSALO, 1990; ELECTRONICS, 1962).

Um exemplo de como a política influenciou o curso da ciência e da técnica no século XX, é a pesquisa da energia atômica levada a cabo com êxito pelos Estados Unidos e a União Soviética, que foram os primeiros a desenvolver programas para fins militares bem-sucedidos. Em 1945, os Estados Unidos fizeram o primeiro teste com um artefato nuclear e, no mesmo ano, lançaram bombas sobre Hiroshima e Nagasaki. Em 1949, a União Soviética testou o seu primeiro artefato nuclear. Daí por diante, Estados Unidos, e União Soviética, os dois principais atores em termos de armas nucleares, trabalharam para aumentar a potência dos artefatos: em novembro de 1952, os Estados Unidos detonaram sua primeira bomba de hidrogênio de 10,4 megatons no atol de Enewetak, nas Ilhas Marshall, no Oceano Pacífico; em agosto de 1953, a União Soviética testou sua primeira bomba de fusão de 400 quilotons em uma torre, na Sibéria. Enquanto isso, a Inglaterra detonou a sua primeira bomba atômica de 25 quilotons em 1952, e, nas décadas subsequentes, outros países como China, Índia, Paquistão e Israel se juntaram ao “Clube Nuclear” (COLD, 2019; TAYLOR, 2019).

No campo dos testes nucleares dos Estados Unidos, a partir de 1958, dentro do projeto Hardtack, foi feita uma série de detonações no Oceano Pacífico e, dentro do projeto Argus, outra série foi realizada no Atlântico Sul; detonações adicionais foram feitas em 1962 dentro do projeto Fishbowl. Os soviéticos também fizeram detonações em alta altitude dentro do projeto “K” entre 1961 e 1962 (ZAK, 2007).

Ainda no contexto da Guerra Fria, no final da década de 1950, com a escalada das rivalidades, foram realizados testes nucleares na alta atmosfera por americanos e soviéticos, e em ambos casos foi constatado que as detonações eram responsáveis por gerar pulsos

eletromagnéticos (*electromagnetic pulse* – EMP), com valores de intensidade de campo elétrico na ordem de dezenas de milhares de V/m; isso ocorria em uma extensa área, longe do lugar de detonação, podendo afetar as comunicações via ionosfera e a resposta dos pulsos de radar, além da possibilidade de afetar adversamente as redes de distribuição de energia elétrica. Foi percebido que isso poderia causar problemas nas comunicações militares em equipamentos com transistores, que então começavam a se disseminar. Para confirmar essa situação, em 8 de julho de 1962, os militares estadunidenses explodiram a Starfish Prime, um artefato de 1,4 megatons, 400 km acima das ilhas Johnston no Pacífico e, minutos depois, foi observado no Havaí, quase 1.300 km distante, que as lâmpadas de iluminação pública de 300 ruas queimaram e os disjuntores de proteção dos circuitos elétricos desarmaram; foi descoberto que essas ocorrências foram causadas por um campo elétrico com intensidade de 50.000 V/m causado pela detonação (BROAD, 1981; GLASSTONE; DOLAN, 1977).

A percepção generalizada da vulnerabilidade dos componentes eletrônicos empregados em equipamentos militares nesse período, foi exemplificada de forma emblemática no caso em que, em 1976, um MIG-25 da força aérea soviética, um dos melhores caças de sua categoria na época, foi levado por um desertor para o Japão. Uma inspeção realizada por especialistas encontrou equipamentos eletrônicos avançados usando microválvulas ao invés de semicondutores. A princípio, pensou-se que esse emprego era devido à lentidão de disseminação dos semicondutores na economia soviética, porém, anos depois, uma publicação do Pentágono sugeriu que o emprego de válvulas tinha a finalidade de evitar os efeitos dos pulsos eletromagnéticos nos equipamentos eletrônicos militares (BROAD, 1981).

Como já foi visto na discussão sobre a comparação entre válvulas e transistores nessa época, a “normalidade” dessa situação foi expressa em publicações técnicas estadunidenses ao longo do tempo, como em um manual para aplicações industriais e militares da família nuvistor da RCA (1963), que descrevia os dados de testes de doses de radiação de neutrons recebida por essas válvulas em ambientes de ocorrência de pulsos eletromagnéticos, e também testes de radiação continuada, pode-se supor, para aplicações em instrumentação de reatores nucleares. Na década de 1970, documento elaborado por Glasstone e Dolan (1977) tecia considerações sobre como os dispositivos eletrônicos são afetados pelas armas nucleares. Mesmo no cenário pós Guerra Fria, pode-se especular sobre a importância que esses dispositivos continuaram tendo para fins militares, ao ver um manual elaborado pelo Departamento de Defesa, dedicado à explicação dos procedimentos de teste de válvulas, e um curso sobre válvulas da Marinha dos EUA, de 2012 (NAVY, 2012; TEST, 2001).

3.4 CENTROS DE PODER

Como foi dito na descrição da metodologia do trabalho (na Introdução), o recorte espacial deste estudo, determinado pela localização das maiores concentrações de esforços de desenvolvimento e produção de válvulas, incluiu os Estados Unidos e um pequeno grupo de países europeus, embora não ignorando esforços menores realizados em outros lugares. O Quadro 3.6 resume os achados do levantamento inicial cujos dados formaram as séries históricas que orientaram o estudo. As fontes de dados estão informadas na Metodologia.

Quadro 3.6: Descobertas, invenções e inovações ligadas às válvulas (séc. XVII-XX)

| <i>Estados</i> | <i>Precursores</i> | <i>Válvulas</i> | <i>Aplicações***</i> |
|----------------|--------------------|-----------------|----------------------|
| Reino Unido* | 28 | 12 | 11 |
| Alemanha | 26 | 12 | 3 |
| Estados Unidos | 16 | 46 | 25 |
| França | 15 | 1 | 1 |
| Itália | 4 | 0 | 1 |
| URSS | 0 | 2 | 3 |
| Japão | 0 | 2 | 1 |
| Outros** | 9 | 4 | 2 |

* Inclui Inglaterra, Escócia, Gales e Irlanda.

** Inclui Países Baixos, Suécia, Dinamarca, Suíça, Bélgica e Áustria, com eventos isolados.

*** Inclui aplicações em comunicações, em informação, industriais, científicas e militares; o número indica os principais eventos pioneiros nesses setores ocorridos no país.

O panorama geral mostrado nesse quadro não se alterou com a realização da pesquisa detalhada para construir o quadro histórico do precursores, das válvulas e de suas aplicações. Seu aspecto mais importante é a constância com que um pequeno grupo de países se manteve na liderança das pesquisas e dos desenvolvimentos durante todo o período estudado. Não por acaso, certamente, os Estados Unidos e os países europeus ocidentais foram protagonistas do processo de desenvolvimento do capitalismo industrial monopolista e dos grandes conflitos internacionais do século XX. Também não é por acaso que os países listados integraram, a partir da década de 1970, o grupo dos países mais ricos do mundo, que no momento desta pesquisa é o G7 (G7, 2019). A presença do Japão marca a tendência, visível desde a década de 1970, de ascensão de alguns países asiáticos a uma posição de destaque na indústria de produtos eletrônicos.

CONCLUSÃO

Retorno agora à proposição inicial deste estudo: a válvula foi um importante dispositivo facilitador da configuração da modernidade no século XX, e teve um papel central na constituição da infraestrutura tecnológica eletrônica. A etapa final do trabalho é, então, verificar se os achados da pesquisa confirmaram ou não os argumentos e a conclusão extraídos dessa proposição.

O primeiro argumento dizia que a válvula foi o dispositivo para o qual confluíram conhecimentos preexistentes, formadores da ciência e da técnica da Eletrônica. De acordo com o segundo argumento, as válvulas viabilizaram e/ou dinamizaram diferentes sistemas técnicos criados ou transformados a partir do desenvolvimento da Eletrônica. A conclusão era que, dadas as transformações de diversas ordens decorrentes da utilização das válvulas, esse dispositivo ajudou a definir, não somente a modernização tecnológica, mas a própria modernidade do século XX.

Os conhecimentos formadores da Eletrônica confluíram para a válvula

Qual foi a relação entre a válvula e o processo de formação do corpo de conhecimentos teóricos e práticos da eletrônica? Sendo a válvula eletrônica um dispositivo de controle do fluxo de elétrons, seria impossível chegar à sua criação sem os conhecimentos sobre a eletricidade e o eletromagnetismo, construídos principalmente ao longo dos séculos XVII a XIX principalmente em alguns países da Europa Ocidental e nos Estados Unidos. Para que esses conhecimentos abandonassem o campo das especulações e se tornassem passíveis de aplicações práticas, foi preciso o esforço dos primeiros pesquisadores experimentais, que criaram instrumentos para produzir eletricidade, descobriram as propriedades elétricas e magnéticas de diferentes materiais e investigaram a natureza da eletricidade e do magnetismo. Assim foi preparado o terreno para o estudo das correntes elétricas e dos campos magnéticos, que culminou com a elaboração da teoria do eletromagnetismo, indispensável para a compreensão e utilização dos fenômenos envolvidos no funcionamento das válvulas.

Tanto as pesquisas teóricas quanto o planejamento de aplicações da eletricidade exigiram o domínio de conhecimentos sobre materiais e fenômenos físicos para construir instrumentos e componentes, além de produzir os efeitos desejados. Por isso, o trabalho com a eletricidade decorreu entrelaçado principalmente com as pesquisas sobre calor, luz, pressão,

radiações e suas relações com fenômenos elétricos e magnéticos; vidros, metais e outros materiais foram objetos de pesquisa tendo em vista seu uso nas aplicações da eletricidade. Os estudos com o calor levaram ao desenvolvimento de lâmpadas incandescentes e válvulas termoiônicas. Experimentos com descargas elétricas levaram à descoberta e/ou investigação da eletroluminescência, da fluorescência, dos raios catódicos e do arco elétrico, todos aplicados na criação de diferentes tipos de lâmpadas e válvulas. A descoberta de que os fenômenos elétricos, não só ocorriam, mas eram mais eficientes em atmosferas de baixa pressão, levou ao esforço de aperfeiçoamento progressivo das máquinas produtoras de vácuo, que foram indispensáveis para o desenvolvimento das válvulas eletrônicas como dispositivos práticos e sua produção industrial em massa. A descoberta das ondas de rádio levou à criação de técnicas de comunicação baseada nessas radiações, sem o uso de cabos condutores de eletricidade.

Esses estudos não foram feitos por pura curiosidade intelectual. Muitas vezes, eles foram motivados por uma necessidade mais ou menos urgente, como buscar novas fontes de energia ou melhorar serviços urbanos, transportes e comunicações. De modo geral, o panorama traçado indica que foram mais bem-sucedidos os caminhos de pesquisa que, por responderem a interesses de grupos no poder num determinado contexto, receberam apoio e recursos para serem seguidos e aplicados em inovações tecnológicas. Assim, antes mesmo da resolução de algumas questões teóricas pendentes, as pesquisas em eletricidade levaram à criação de máquinas e dispositivos aplicados no desenvolvimento da tecnologia elétrica, responsável por avanços fundamentais no século XIX, como a mudança de matriz energética nos sistemas de iluminação, nas comunicações, na tração e na indústria; assim se formou uma base tecnológica que foi o campo de aplicação das válvulas em substituição a dispositivos eletromecânicos.

O estabelecimento de sistemas de iluminação elétrica dependeu do desenvolvimento de luminárias capazes de competir, em qualidade e preço, com o óleo e o gás. No século XIX, foram criadas lâmpadas de arco elétrico e incandescentes. Enquanto o uso das primeiras permitiu resolver os problemas básicos da implantação de um sistema de distribuição elétrica, as últimas, por sua estrutura e princípio de funcionamento, foram as precursoras imediatas das válvulas termoiônicas, que aproveitaram inclusive o modelo e as instalações de produção industrial já criados para as lâmpadas.

Foi de importância fundamental, para a implantação dos sistemas baseados em eletricidade, o desenvolvimento de formas de gerar energia de modo adequado para garantir a eficiência e a confiabilidade dos sistemas. As primeiras máquinas de geração de centelhas

elétricas evoluíram para as pilhas ou células eletroquímicas, que forneciam eletricidade contínua, e em seguida para os dínamos e geradores, produzindo corrente contínua e alternada respectivamente, e que, cada vez mais potentes, permitiram a instalação de centrais elétricas capazes de abastecer grandes áreas (e de serem controladas por uma única grande empresa), substituindo o modelo inicial de instalação de pequenos geradores locais isolados. A maior disponibilidade de eletricidade permitiu a expansão do uso de aparelhos elétricos. Isso pressionou, por um lado, a indústria, no sentido de aumentar sua produção, e, por outro lado, a pesquisa e desenvolvimento de aplicações novas ou aperfeiçoadas.

Os sistemas de comunicação a distância foram os principais fatores de pressão sobre as pesquisas direcionadas para a inovação tecnológica, porque eram (e são) essencialmente instrumentos de poder econômico e político. Limitando a discussão à Europa moderna, desde o final do século XVIII, quando começaram a ser formadas redes de telegrafia visual, e chegando ao final do século XIX, com a telegrafia elétrica transcontinental utilizando cabos submarinos e a telefonia terrestre, os sistemas serviram à comunicação em tempos de guerra, à integração territorial de Estados, ao controle de colônias e à relação entre mercados, atendendo a interesses de governos e empresas. Os problemas técnicos que precisaram ser resolvidos – a necessidade de aumentar o alcance das comunicações, a velocidade e o volume de transmissões simultâneas, mantendo a qualidade da transmissão –, levaram à busca de alternativas para os dispositivos eletromecânicos, o que deu grande estímulo para a pesquisa e o desenvolvimento das válvulas.

Esse conjunto de fatores, cujas trajetórias correram muitas vezes entrelaçadas, resultou, entre o final do século XIX e os primeiros anos do século XX, na criação dos primeiros protótipos ou modelos de válvulas. É importante notar que, embora as pesquisas e invenções não tenham ocorrido ao acaso, a ideia das válvulas em si não estava colocada desde o início: ela se formou como resultado de uma sequência de achados que mostraram oportunidades de desenvolvimento, combinados com a procura de soluções para problemas e limitações das técnicas em uso em diferentes momentos.

Assim, o estudo mostrou que as válvulas foram realmente a confluência dos conhecimentos de distintos ramos de saber desenvolvidos no século XIX; do ponto de vista da cultura científica, vimos que precursores estiveram envolvidos em disputas quanto às concepções da própria estrutura da matéria e também foram responsáveis pela evolução do domínio das técnicas e do domínio do uso de materiais. Em todos os casos, foi constatada a construção coletiva dos conhecimentos teóricos e práticos.

As válvulas viabilizaram e/ou dinamizaram sistemas técnicos eletrônicos

Qual foi a relação entre as válvulas e os processos de desenvolvimento das tecnologias baseadas em eletrônica ao longo do século XX? Considerando que, como foi definido na Introdução, a Eletrônica é um ramo da ciência e da tecnologia cujo foco é a emissão, o fluxo e o controle de elétrons, a válvula (e mais especificamente o triodo) pode ser considerada o marco histórico do surgimento da tecnologia eletrônica, pois seu princípio de funcionamento baseia-se no controle do fluxo de elétrons. Embora as válvulas anteriores a ele realizassem algumas das tarefas típicas dos sistemas eletrônicos, o triodo foi o primeiro dispositivo capaz de realizar detecção, amplificação, retificação e oscilação de sinais: todas as funções necessárias aos sistemas de comunicações e que puderam ser aplicadas em um amplo leque de novos ramos tecnológicos, incluindo radiocomunicação bidirecional, radiodifusão, tratamento de imagens, captura e processamento de dados (radares e computadores) e instrumentação técnica e científica. Uma grande vantagem das válvulas sobre os dispositivos eletromecânicos usados anteriormente é o fato de que elas não tinham partes móveis sujeitas a desgastes e com um tempo de operação maior que o exigido pelo fluxo de eletricidade. As válvulas foram o carro-chefe da Eletrônica, contribuindo decisivamente para que a mesma se estabelecesse como ramo tecnológico. Pelas suas características elétricas, puderam ser usadas para implementar os mais variados tipos de circuitos e equipamentos com diferentes finalidades.

O estudo mostrou que o trabalho de pesquisa e desenvolvimento das válvulas foi um esforço sistemático, concentrado principalmente nos Estados Unidos e alguns países da Europa, que, no início do século XX, precisavam resolver problemas de comunicação intra e internacionais relacionados principalmente com necessidades de integração territorial, conexão entre mercados, controle colonial, relações internacionais e atividades bélicas. Por isso, os primeiros inventos foram aplicados a sistemas de radiotelegrafia e radiotelefonía, e envolveram governos e grandes empresas como clientes e controladores dos sistemas. Além de impulsionarem o desenvolvimento do novo ramo industrial de produção de componentes eletrônicos, as válvulas foram estudadas e desenvolvidas principalmente nos novos laboratórios industriais das grandes empresas, onde profissionais altamente preparados elaboraram a teoria do funcionamento e o projeto de diferentes válvulas, de acordo com as finalidades desejadas - que iam desde a necessidade de desenvolver um determinado aparelho, até a intenção de contornar patentes de empresas concorrentes. Assim, o estudo confirmou a ideia de que o desenvolvimento dos conhecimentos tecnológicos foi sendo construído coletivamente, ao longo do tempo, por indivíduos e/ou grupos de pesquisadores que

partilhavam a mesma cultura técnica e científica, e as descobertas e inventos aconteceram frequentemente de forma simultânea em diferentes países.

As técnicas de construção de válvulas sofreram muitas mudanças à medida que elas foram se diversificando. De acordo com as necessidades, foram usados invólucros de vidro ou metal de feitios variados; a arquitetura interna foi modificada para permitir a acomodação das partes constituintes de diodos, triodos, tetrodos, pentodos, válvulas multieletrodos (*multigrid*) e múltiplas; foram criadas válvulas em tamanhos variados, como as miniaturas e subminiaturas, usadas em aplicações domésticas (como TVs, rádios e aparelhos auditivos) e militares, inclusive como uma tentativa, nos anos 1960, de competir com os transístores.

As válvulas evoluíram acompanhando as necessidades de determinados equipamentos e/ou sistemas técnicos, e possibilitaram o aperfeiçoamento dos sistemas em que foram empregadas. No campo das comunicações, graças à criação de válvulas operando em frequências cada vez mais altas, os sistemas evoluíram progressivamente das faixas de LF, MF e HF para VHF, UHF e micro-ondas, atendendo a serviços de radiocomunicação, radiodifusão, TV e radar, e chegando a ser usadas em satélites de comunicações. Válvulas de diferentes níveis de potência foram usadas, tanto em comunicações, quanto em aplicações industriais: as receptoras de baixa potência foram empregadas também em sistemas de controle industrial e proteção; as transmissoras, de mais alta potência, eram empregadas em fontes de alimentação, soldadores e aquecedores.

Válvulas a gás, de catodo frio ou não, também foram (e algumas continuam sendo) utilizadas na indústria, em segurança e em aplicações militares e científicas como comutadores, detonadores, reguladores de voltagem, detectores de presença e sistemas de controle de produtos, além dos contadores e geradores de raios X de aplicações industriais e científicas. Tubos de raios catódicos foram usados para criar os primeiros sistemas eletrônicos de captura e exibição de imagens, utilizados na televisão, em instrumentos científicos e técnicos e em aparelhos de processamento e armazenamento de dados, constituindo as primeiras telas de radares e computadores.

A partir da década de 1960 as válvulas começaram a ser substituídas pelos transístores. Entretanto, essa substituição não foi brusca, nem significou uma luta entre os dois tipos de dispositivos (se bem que houve tentativas da indústria de válvulas de continuar dominando o campo das aplicações eletrônicas). Os dois dispositivos podem ser vistos mais como complementares do que como rivais em termos de engenharia. O papel tecnológico das válvulas foi tão importante, que os transístores foram criados para substituí-las, procurando exercer todas as suas funções: nisso podemos observar o caráter dialético dessa mudança

tecnológica. As pesquisas que levaram à criação dos transístores começaram intencionalmente, visando desenvolver um substituto para a válvula de natureza diferente dela, a fim de superar os aspectos inconvenientes inerentes ao projeto das válvulas. Como ocorreu com as válvulas, a contribuição dos laboratórios industriais foi decisiva para o desenvolvimento da tecnologia dos transístores, no que se refere à descoberta de fenômenos, ao tratamento de materiais, à criação de técnicas de produção e ao desenvolvimento de equipamentos de testes. Durante as décadas de 1950 a 1970, os dois dispositivos coexistiram, como pode ser visto nos computadores e outros aparelhos híbridos da época; e quando os transístores começaram a superar as válvulas, herdaram as aplicações e os sistemas eletrônicos que elas deixaram plenamente desenvolvidos e operantes, e que os transístores permitiram aperfeiçoar.

A válvula como facilitadora da configuração da modernidade no século XX

Quais foram as repercussões da invenção da válvula na conformação da modernidade no século XX? Dadas as transformações de diversas ordens decorrentes da utilização das válvulas, minha resposta é que a válvula ajudou a definir, não somente a modernização tecnológica, mas a própria modernidade no século XX. Convém lembrar aqui o conceito de modernidade como foi definido na Introdução: para os fins deste estudo, ela é um padrão de produção e consumo específico do capitalismo industrial mecanizado de foco eurocêntrico, que, ao longo do século XX, difundiu-se dos países capitalistas centrais para os periféricos, apresentado como padrão universal e modelo civilizador. O termo é usado aqui para designar especificamente o padrão dominante durante o período abordado neste estudo – do início do século XX (quando foram criadas as primeiras válvulas eletrônicas) até o final da década de 1960 (quando elas começaram a ser substituídas pelos semicondutores) –: um padrão centrado na produção, apoiado na inovação tecnológica e na difusão de cultura e informação.

Ao examinar a trajetória das válvulas, podemos identificar sua participação nesses três aspectos, contribuindo com as áreas de produção, tecnologia e difusão cultural. Uma característica do período estudado, do ponto de vista tecnológico, foi o desenvolvimento de métodos para a exploração da eletricidade, que se tornou a matriz energética dominante. A válvula teve um papel decisivo nesse processo, por formar a base da tecnologia eletrônica e, através dela, contribuir, de forma direta e indireta, para a criação de novos e atualização de tradicionais métodos industriais de produção, tornando possível regular a velocidade e o

volume de fabricação, a massificação e diversificação da produção em geral e, em particular a sofisticação e miniaturização dos produtos eletrônicos, possibilitando assim que fossem estabelecidos os padrões de consumo da modernidade no capitalismo.

Um aspecto que ficou claro, nos diversos campos da história da tecnologia eletrônica baseada em válvulas, é que se repetiu (como o ocorreu em outras áreas) a predominância de alguns poucos países, que por razões históricas possuíam instituições de pesquisa e ensino capazes de produzir conhecimentos, poder econômico para investir nas inovações, e poder político para garantir seus direitos comerciais em relação a possíveis rivais; e, dentro desses países, predominaram umas poucas empresas que tiveram recursos, apoio governamental e capacidade gerencial para dominar os mercados de vários países. história da válvula reproduz a história das relações de produção e trabalho no capitalismo monopolista e fordista. Pequenas manufaturas deram lugar a indústrias com linhas de produção automatizadas, que permitiram trocar os técnicos especializados por trabalhadores e trabalhadoras sem formação especial, o que se refletiu na redução do custo da mão de obra; o pessoal com formação técnica, capaz de administrar os processos de produção e desempenhar tarefas de manutenção, ocupou níveis mais altos na hierarquia. Para chegar a essa estrutura, as empresas organizaram laboratórios de pesquisa e desenvolvimento com um pequeno contingente de pessoal com formação científica suficientemente profunda para ser capaz de pesquisar fenômenos naturais e, sobretudo, aplicá-los para a finalidade de produção industrial. A disputa entre empresas se resolveu por fusões sucessivas que levaram à formação de poucos grandes conglomerados, apoiados implícita ou explicitamente pelos respectivos governos, que dominaram o mercado internacional. Esse modelo do setor industrial foi importante para o modo como se deu a influência da válvula, através da tecnologia eletrônica, nos padrões de consumo e cultura da sociedade em geral, pois as grandes empresas dominaram patentes e influenciaram o modo como os vários campos de aplicações da eletrônica se desenvolveram.

Um campo tecnológico novo, típico do século XX, é o de obtenção e processamento de informações, que inclui o radar e o computador. O radar, criado especificamente para fins militares, encontrou alguns nichos civis, mas é uma tecnologia de pouco impacto direto nos padrões de consumo e cultura da modernidade. O contrário ocorre com o computador, que pode ser entendido como uma das grandes heranças tecnológicas deixadas pelas válvulas. Permitindo a realização de grandes volumes de cálculos em um tempo cada vez mais reduzido; de simulações de eventos e tratamento de informações, os computadores, além de se configurarem como um ramo industrial próprio, possibilitaram a criação e o avanço de outras áreas, como as pesquisas complexas, o controle de transportes e a implementação de

programas espaciais como o lançamento de satélites e os sistemas de defesa militares. Estes últimos, ainda no tempo dos computadores valvulados, foram integrados em rede por meio de conjuntos de transmissores e receptores de dados, os protótipos dos modems para adaptação dos equipamentos às linhas telefônicas, abrindo assim o caminho para o que seriam as futuras redes telemáticas.

No campo das comunicações, a válvula permitiu o desenvolvimento de todas as partes constituintes necessárias para a construção dos sistemas de radiocomunicação e radiodifusão, e a instrumentação eletrônica que foi pervasiva nos vários ramos de pesquisa e desenvolvimento de relevância no século XX. Os serviços de radiocomunicação foram relativamente pouco visíveis, mas de valor estratégico, pois atendiam a necessidades governamentais e militares. Os sistemas de radiodifusão, que se desenvolveram a partir da tecnologia dos primeiros, foram os mais visíveis, pois constituíram a infraestrutura dos meios de comunicação de massa: o rádio e a televisão. As redes de radiodifusão foram dominadas por conglomerados de comunicações, o que facilitou o surgimento de uma indústria de bens culturais. Direta ou indiretamente ligadas aos governos, essas redes também serviram aos interesses das potências do século XX, divulgando notícias, programas culturais e propaganda política no exterior. Receptores de rádio e televisão (especialmente os primeiros) foram transformados em bens acessíveis a uma parte considerável da população de muitos países, e contribuíram fortemente para a difusão dos padrões capitalistas da modernidade apresentados como valores universais.

Mas não foi apenas este o seu papel. Do ponto de vista das empresas, os sistemas de radiodifusão se mostraram instrumentos para a reprodução do modelo de modernidade capitalista industrial, facilitando a acumulação de riqueza através da abertura e expansão de mercados consumidores, em nível internacional, para os produtos dos grandes conglomerados.

Considerações finais

O exemplo da história da válvula, e das aplicações eletrônicas cuja criação ela facilitou, deixou algumas lições que desejo destacar. A primeira é que a história do desenvolvimento de uma tecnologia não pode ser tratada como um simples romance sobre individualidades nem como uma lista de fatos fora de contexto, mas precisa mostrar as motivações por trás das escolhas e decisões individuais, as conexões entre eventos que formaram cadeias de busca intencional de recursos técnicos e de conhecimentos. Numa época

em que o mundo enfrenta tantos problemas sérios associados ao uso de diferentes tecnologias, somente essa reflexão poderá levar a caminhos eficazes e responsáveis de atuação na sociedade, sem apelar para bodes-expiatórios ou escolhas individualistas em termos de opções de adoção de tecnologias a serem desenvolvidas.

Uma segunda lição, ligada à anterior, é que, embora reconhecendo as outras modernidades ocorridas ao longo da história, é preciso compreender que a criação e a influência da tecnologia aqui estudada se deu dentro de um determinado tipo de modernidade, europeia e capitalista. Para uma proposta de uma modernidade alternativa, recuperando o projeto progressista da tecnologia de modo a atender as reais necessidades das sociedades, é necessário o controle social eficaz da produção e principalmente das aplicações da ciência e da técnica como já afirmado e pode ser visto no curso dos capítulos anteriores, as possibilidades de ciência e tecnologia como facilitadores de uma convivência civilizatória adequada às necessidades humanas em equilíbrio com o meio ambiente.

A terceira lição é o entendimento do papel da tecnologia como um dos fatores materiais estruturantes das sociedades, podendo ser empregada para a acumulação do capital, aplicada à coerção individual e coletiva, aplicada para fins bélicos e, contraditoriamente, convivendo com o incentivo ao desenvolvimento científico e tecnológico. O estudo mostrou como a eletrônica, sendo uma tecnologia com uma capacidade tão ampla de gerar inovação, foi controlada pelos setores no poder no contexto do capitalismo, sendo usada como instrumento de dominação, mas também teve outros efeitos e encontrou outras aplicações pela sociedade. Fica claro, assim, que o uso para o mal ou para o bem não é uma característica “natural” de uma tecnologia (ou “da” tecnologia vista como uma categoria geral) em si: o resultado de sua utilização é influenciado pelas relações de força entre as classes sociais da sociedade em torno do uso da tecnologia. A ciência e a tecnologia devem ser entendidas como criações humanas, e como tal devem ser consideradas ao se fazer a análise de sua criação, evolução, substituição e sobretudo, suas aplicações.

Finalmente, a história das válvulas nos mostrou que esses dispositivos não desapareceram repentinamente, substituídos por transístores e semicondutores: ao contrário, durante cerca de 30 anos, esses dispositivos coexistiram na indústria de aparelhos eletrônicos. Ao terminar esse percurso, podemos perceber que o mundo criado pela válvula continua vivo: embora a influência direta da válvula enquanto facilitadora da formação de um padrão social tenha acabado há muito tempo, o modelo tecnológico construído com seu auxílio continuou existindo, agora com os semicondutores substituindo as válvulas, mas sem deixar de ser um modelo eletrônico. Assim, o objetivo deste estudo foi alcançado: demonstrar que a válvula

desempenhou um papel fundamental na construção da modernidade.

Temas para futuras pesquisas

Dentro do espírito do presente trabalho, cabem estudos sobre a dinâmica de apropriação e desenvolvimento dessa tecnologia por centros de pesquisas e, sobretudo, por empresas (de pequeno, médio e grande porte) produtoras de válvulas e de equipamentos valvulados como rádios, amplificadores e televisores preto e branco e demais equipamentos eletrônicos, em países, no que se denominava então de Terceiro Mundo, bem como o impacto da chegada dos semicondutores.

REFERÊNCIAS

- 6SN7. Disponível em <<https://en.wikipedia.org/wiki/6SN7>>. Acesso em 16 set. 2019.
- ADLER, Robert. A new system of frequency modulation. **Proceedings of the IRE** [Institute of Radio Engineers], New York, v. 35, n. 1, p. 25-, jan. 1947.
- AITKEN, Hugh G. J. **Syntony and spark**: the origins of radio. Nova York: John Wiley, 1976.
- AITKEN, Hugh G. J. **The continuous wave**: technology and american radio, 1900–1932. Princeton: University Press, 1985.
- ALEKSEEV, N. F.; MALAIROV, D. D. Generation of high-power oscillations with a magnetron in the centimeter band. **Proceedings of the IRE**, v. 32, n. 3, p. 136-139, mar. 1944.
- ALEXANDERSON, Ernst F. W. Transatlantic radio communication. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineer**, v. 38, n. 2, p. 1269-1285, jul. 1919.
- ALLIS-CHALMERS. Switchgear and control devices. West Allis: Allis-Chalmers, 1948.
- AMIN, Samir. **Eurocentrism**: modernity, religion, and democracy: a critique of eurocentrism and culturalism. New York: Monthly Review, 2009.
- AMPÈRE, A. M. Note de M. Ampère sur une expérience de M. Hippolyte Pixii... **Annales de chimie et de physique**, Paris, t. 51, p. 76-79, 1832.
- ANASTOPOULOS, Charis. **Particle or wave**: the evolution of the concept of matter in modern physics. Princeton: Princeton University Press, 2008.
- ANDERS, André. Tracking down the origin of arc plasma science I: early pulsed and oscillating discharges. **IEEE Transactions on Plasma Science**, New York, v. 31, n. 5, p. 1052-1059, nov. 2003.
- ARMSTRONG, Carter M. The quest for the ultimate vacuum tube. **IEEE Spectrum**, New York, v. 52, n. 12, p. 28-51, dec. 2015.
- ARMSTRONG, Edwin. **Patent US 1.342.885**: method of receiving high-frequency oscillations. Washington: United States Patent Office, june 8, 1920. (filed feb. 8, 1919)
- ARONS, Martin Leo. Em <<https://www.deutsche-biographie.de/>>. Acesso em 8 nov. 2019.
- ARRIGHI, Giovanni. **Adam Smith in Beijing**: lineages of the twenty-first century. London: Verso, 2007.
- ARRUDA, Walter Oleschko. Wilhelm Conrad Röntgen: 100 anos da descoberta dos raios X. **Arquivos de Neuropsiquiatria**, São Paulo, v. 54, n. 3, p. 525-531, 1996.
- ASE (Associazione Storia dell'Elettronica). Em <<http://www.ase-museoedelpro.org/vacuum-tubes/>>. Acesso em 8 dez. 2019.
- ASHWORTH, William B. Scientist of the Day - Heinrich Hertz. **Linda Hall Library** [Un. Missouri], Kansas City, feb. 2017. Disponível em <<https://www.lindahall.org/heinrich-hertz/>>. Acesso em 10 dez. 2019.
- ASSIS, André Koch Torres. **Os fundamentos experimentais e históricos da eletricidade**. Montreal: C. Roy Keys, 2010.
- ATHERTON, W. A. **From compass to computer**: a history of electrical and electronics engineering. London: Palgrave, 1984.

- AUTOMATIC valve envelope machines at Mullard Blackburn. **Mullard Outlook**, v. 13, n. 10, p. 1, mar. 1964.
- AYRTON, Herta. **The electric arc**. New York: D. van Nostrand, [1902]. (coleção de artigos publicados em *The Electrician* em 1895-1896)
- BAIGRIE, Brian Scott. **Electricity and magnetism: a historical perspective**. Westport: Greenwood, 2007.
- BAKER, I. R. The new KFI. **Radio News**, New York, v. 13, n. 8, p. 658-659, 714-717, feb. 1932.
- BALAN, Willians C. **Tecnologia em audiovisual: espectro de frequências**. Disponível em <http://willians.pro.br/frequencia/cap3_espectro.htm>. Acesso em 8 dez. 2019.
- BALL, Sydney H. Luminous gems, mythical and real. **The Scientific Monthly**, Washington, v. 47, n. 6 p. 496-505, dec. 1938.
- BAROM, William Carlos Cipriani. Os principais conceitos da teoria da história de Jörn Rüsen: uma proposta didática de síntese. **Albuquerque: Revista de História**, Aquidauana, v. 9, n. 18, p. 160-192, jul.-dez. 2017.
- BARROS, José d'Assunção. Importância da teoria e metodologia da história. **Blog Escrita da História**, 27 de agosto de 2010. Em <escritasdahistoria.blogspot.com/2010/08/importancia-da-teoria-e-metodologia-da.html>. Acesso em 5 jun. 2019.
- BARROS, José d'Assunção. **O projeto de pesquisa em história: da escolha do tema ao quadro teórico**. 2. ed. Petrópolis: Vozes, 2005.
- BARROS, José d'Assunção. Os campos da história: uma introdução às especialidades da história. **Revista HISTEDBR**, Campinas, n.16, p. 17 -35, dez. 2004.
- BARROS, José D'Assunção. História serial e história quantitativa. **Blog Escrita da História**, 23 de janeiro de 2011. Disponível em <escritasdahistoria.blogspot.com/2011/01/historia-serial-e-historia-quantitativa.html>. Acesso em 5 jun. 2019.
- BARROS, José D'Assunção. Os Annales e a história-problema. **História debates e tendências**, Passo Fundo, v. 12 n. 2, p. 305-325, jul.-dez. 2012.
- BASSALO, José Maria Filardo. César Lattes: um dos descobridores do então méson pi. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 7, n. 2, p. 133-148, ago. 1990.
- BAUMAN, Zygmunt. **A cultura no mundo líquido moderno**. Tradução: Carlos Alberto Medeiros. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2013.
- BAUMAN, Zygmunt. **Vida para consumo: a transformação das pessoas em mercadorias**. Tradução: Carlos Alberto Medeiros. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2008.
- BAXTER, James Phinney. **Scientists against time**. 3. ed. Cambridge-US: MIT, 1968.
- BEAUCHAMP, Kenneth George. **History of telegraphy**. London: Institution of Electrical Engineers, 2001.
- BECQUEREL, Alexandre Edmond. Recherches sur divers effets lumineux qui résultent de l'action de la lumière sur les corps. **Annales de Chimie et de Physique**, Paris, ser. 3, t. 55, p. 5-128, 1859.
- BECQUEREL, Alexandre Edmond. Recherches sur la transmission de l'électricité au travers des gaz a des températures élevées. **Annales de Chimie et de Physique**, Paris, Ser. 3, t. 39, p. 355-402, 1853.

- BECQUEREL, Edmond. **La lumière: ses causes et ses effets**. Paris: Firmin Didot fr., 1867.
- BELL, Daniel. **The coming of post-industrial society: a venture in social forecasting**. New York: Basic Books, 1999.
- BELL, Daniel. Thinking ahead: an information revolution presents new opportunities and new problems for business and society. **Havard Business Review**, Brighton, p. 20-40, mai-jun 1979.
- BELL, J.; GAVIN, M. R.; JAMES, E. G.; WARREN, G. W. Triodes for very short waves-oscillators. **Journal of the Institution of Electrical Engineers**, v. 93, n. 5, p. 833-846, 1946.
- BELLAVER, Richard F. **Characters of the information and communication industry**. 2. ed. Bloomington: AuthorHouse, 2011.
- BELROSE, J. S. Fessenden and Marconi: their differing technologies and transatlantic experiments during the first decade of this century. In: International Conference on 100 Years of Radio, London, 5-7 Sept. 1995. **Proceedings...** London: Institution of Electrical Engineers, 1995. p. 32-43.
- BELROSE, J. S. Fessenden and the Early History of Radio Science. **Radioscientist**, v. 5, n. 3 set. 1994. Em <http://www.ewh.ieee.org/reg/7/millennium/radio/radio_radioscientist.html>. Acesso em 10 dez. 2019.
- BELROSE, J. S. Reginald Fessenden and the birth of wireless telephony. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 44, n. 2, p. 38-47, abr. 2002.
- BENJAMIN, Park. **The age of electricity**. New York: Charles Scribner's sons, 1901.
- BHUYAN, Muhibul Haque. **History of electronics**. 2016. Disponível em <<https://www.researchgate.net/publication/294317463>>. Acesso em 16 set. 2019.
- BIJL, H. J. van der. **The thermoionic vacuum tube and its applications**. 1. ed., 8. impr. New York: McGraw-Hill, 1920.
- BIPM. **Le système international d'unités**. 6. ed. Sèvres: BIPM, 1991.
- BIPM. **Le système international d'unités**. 8. ed. Sèvres: BIPM, 2006.
- BLANCHARD, Yves; GALATI, Gaspare; GENDEREN, Piet van. The cavity magnetron: not just a british invention. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 55, n. 5, p. 244-254, oct. 2013.
- BLANCHARD, Yves. A french pre-WW II attempt at air-warning radar: Pierre David's "electromagnetic barrier". **URSI Radio Science Bulletin**, Ghent, n. 358, p. 18-34, sep. 2016.
- BLANCHARD, Yves. Une histoire du radar en lien avec les mutations du système technique. **Revue de l'Electricité et de l'Electronique**, Paris, a. 2019, n. 3, p.35-45, july 2019.
- BLATCHFORD, Samuel A. (reporter). **United States Courts of Appeals reports...**: v. 11, second circuit, oct. 1891 – oct. 1892. New York: Banks & Brothers, 1894. [edison x fox]
- BLIN, Bernard. Radio: the first half century (1895-1945). **Unesco Courier**, Paris, feb. 1997.
- BLUMTRITT, Oskar. **The Lieben valve: a german "universal amplifier"**. IEEE Conference on the History of Electronics, Bletchley Park, Milton Keynes, UK, June 2004. Disponível em <<http://ethw.org/w/images/e/ef/Blumtritt.pdf>>. Acesso em 8 dez. 2019.
- BONDYOPADHYAY, Probir K. Sir J. C. Bose's diode detector received Marconi's first transatlantic wireless signal of december 1901. **Proceedings of the IEEE**, v. 86, n. 1, p. 259-285, jan. 1998.

- BOOS, Jens. **The nixie tube story**. <<https://spectrum.ieee.org/tech-history/dawn-of-electronics/the-nixie-tube-story-the-neon-display-tech-that-engineers-cant-quit>>. 8 dez. 2019.
- BOSE, Jagadish Chandra. On a self-recovering coherer and the study of the cohering action of different metals. **Proceedings of the IEEE**, v. 86, n. 1, p. 244-247, jan. 1998.
- BOSE, Jagadish Chunder. **Patent US 755.840**: detector for electrical disturbances. Washington: United States Patent Office, mar. 29, 1904. (filed sep. 1901)
- BOUQUET, Alain. **Petite histoire de la physique nucléaire**: 3 - les Curie. Paris: Université Denis Diderot, 2011.
- BOUQUET, Alain. **Pierre et Marie Curie**. Disponível em <<https://cosmologie.wordpress.com/subatomique/radioactivite/pierre-et-marie-curie/>>. Acesso em 8 dez. 2019.
- BOYLE, Robert. **Experiments, notes, &c. about the mechanical origine or production of divers particular qualities**: among which... London: E. Flesher, 1675.
- BRAGA, Newton C. **As válvulas**. o que você precisa sobre esses componentes antigos! Disponível em <<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/valvulados/457-as-valvulas-o-que-voce-precisa-sobre-esses-componentes-antigos-v001>>. Acesso em 16 set. 2019.
- BREMER, Hugh. **US Patent 743.237**: electric arc lamp. Washington: United States Patents Office, nov. 3, 1903. (filed mar. 1900)
- BRENNESHOLTZ, Matthew S.; STUPP, Edward H. **Projection displays**. 2. ed. Chichester: John Wiley & sons, 2008.
- BREVE histórico do microscópio eletrônico. **Plataforma de microscopia eletrônica**, UFF. <<http://www.meib.uff.br/?q=content/breve-historico-do-microscopio-eletronico>>13 dez. 2019.
- BRIDGE12 Technologies. **What is a gyrotron?** <<http://www.bridge12.com/what-is-a-gyrotron/>>. Acesso em 28 ago. 2019. [Bridge12: empresa fabricante de gyrotrons]
- BRIGHT Jr., Arthur A. **The electric-lamp industry**: technological change and economic development from 1800 to 1947. New York: Macmillan, 1949.
- BRITANNICA [Encyclopaedia]. **Western Union Corporation**. Disponível em <<https://www.britannica.com/topic/Western-Union-Corporation>>. Acesso em 10 dez. 2019.
- BRITTAIN, James E. The introduction of the loading coil: George A. Campbell and Michael I. Pupin. **Technology and Culture**, v. 11, n. 1, p. 36-57, jan. 1970.
- BRITTAIN, James E. The magnetron and the beginnings of the microwave age. **Physics Today**, v. 38, n. 7, p. 60-67, july 1985.
- BRITTAIN, James E. Willis R. Whitney. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 12, p. 2472-2476, dec. 2007.
- BROAD, William J. Nuclear pulse (I): awakening to the chaos factor. **Science**, Washington, v. 212, n. 4498, p. 1009-1012, May 1981.
- BROWN, William C. **Patent US 2.933.723**: low level duplexer system. Washington: United States Patent Office, apr. 19, 1960. (filed jan. 1958)
- BRUNDTLAND, Terje. Francis Hauksbee and his air pump. **Notes and Records of the Royal Society**, v. 66, n. 3, p. 253-272, jul. 2012.
- BRUNDTLAND, Terje. From medicine to natural philosophy: Francis Hauksbee's way to the air-pump. **British Journal for the History of Science**, v. 41, n. 2, p. 209-240, june 2008.

- BUCHER, Elmer E. **Vacuum tubes in wireless communication**: a practical textbook for operators and experimenters. - reimpr. - New York: Wireless Press, 1919.
- BUCHWALD, Jed Z.; WARWICK, Andrew (ed.). **Histories of the electron**: the birth of microphysics. Cambridge: MIT Press, 2001.
- BULLETIN des lois de l'Empire Français: partie principale: bulletin des lois n. 1201. Paris: Imprimerie Nationale, 1864.
- BURNS, Russell W. **Communications**: an international history of the formative years. London: Institution of Engineering and Technology, 2004.
- BURNS, Russell W. **Television**: an international history of the formative years. London: Institution of Engineering and Technology, 1998.
- BURTT, E. A. **The metaphysical foundations of modern science**. New York: Doubleday & Company, 1954.
- CALDAS, Pedro Spinola Pereira. Teoria e prática da metodologia da pesquisa histórica. **Revista de Teoria da História**, Goiânia, a. 1, n. 3, p. 8-19, jun. 2010.
- CARLOMAGNO, Márcio C.; ROCHA, Leonardo C. da. Como criar e classificar categorias para fazer análise de conteúdo. **Rev. Eletr. Ciênc. Polít.**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 173-188, 2016.
- CARTY, J. J. The relation of pure science to industrial research. **Science**, New York, v. 44, n. 1137, p. 511-518, oct. 13, 1916.
- CARVALHO, Regina P. de; OLIVEIRA, Silvia M. V. de. **Aplicações da energia nuclear na saúde**. São Paulo: SBPC; Viena: IAEA, 2017.
- CARYOTAKIS, George. The klystron: a microwave source of surprising range and endurance. **Physics of Plasmas**, College Park, v. 5, n. 5, p. 1590-1598, may 1998.
- CERUZZI, Paul E. **A history of modern computing**. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 2003.
- CERUZZI, Paul E. **Computing**: a concise history. Cambridge: MIT Press, 2012.
- CHANDLER Jr., Alfred D. **Inventing the electronic century**: the epic story of the consumer electronics and computer industries. Cambridge: Harvard University Press, 2005.
- CHANDLER Jr., Alfred D. **The visible hand**: the managerial revolution in american business. Cambridge: Harvard University Press, 1977.
- CHARACTRON. In: STROMBERG-CARLSON. **Cathode-ray tubes**. San Diego: General Dynamic Corp., 1957.
- CHARLES Henry Stearn. Em <https://www.gracesguide.co.uk/Charles_Henry_Stearn>. Acesso em 8 nov. 2019.
- CHILDREN, John George. An account of some experiments with a large voltaic battery. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v. 105, part 2, p. 363-374, 1815.
- CHM [Computer History Museum]. **Timeline of computer history**. Disponível em <<https://www.computerhistory.org/timeline/>>. Acesso em 15 dez. 2019.
- CICHON, D. J.; WIESBECK, W. The Heinrich Hertz wireless experiments... In: International Conference on 100 Years of Radio. **Proceedings...** London: IEE, 1995. p. 1-6.
- CINESCÓPIO. Disponível em <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/almanaque/1717-cinescopio.html>>. Acesso em 3 set 2019.
- CMC (Canadian Marconi Company). **Radio Valve Company (RVC)** - tube production. Disponível em <www.jproc.ca/marconi/tube_production.html>. Acesso em 8 dez. 2019.

COLD cathode valves and tubes. In: DUMMER, G. W. A.; ROBERTSON, J. M. (ed.). **British special quality valves and electron tube devices data annual 1964–65**. Oxford: Pergamon, 1964. p. 534-705.

COLD War: a brief history. <<http://www.atomicarchive.com/History/coldwar/index.shtml>>. Acesso em 13 dez. 2019.

COLLINS, Archie Frederick. **Wireless telegraphy: it's history, theory, and practice**. New York: McGraw, 1905.

COLUMBIA University Computer History. Disponível em <<http://www.columbia.edu/cu/computinghistory/index.html>>. Acesso em 15 dez. 2019.

COMMON tubes and their applications. <<https://www.britannica.com/technology/electron-tube/Common-tubes-and-their-applications>>. Acesso em 28 ago. 2019.

CONTE, David le. Warren de la Rue: pioneer astronomical photographer. **The Antiquarian Astronomer**, Oxford, n. 5, p. 14-35, 2011.

COOLIDGE, William D. **Patent US 1.203.495**: vacuum tube. Washington: United States Patent Office, oct. 31, 1916. (filed may 1913)

COOLIDGE, William D. **Patent US 1.211.092**: x-ray tube. Washington: United States Patent Office, jan. 2, 1917. (filed june 1915)

COOPER-HEWITT lamp, The. Disponível em <<http://lamptech.co.uk/Documents/M6A%20Lamp%20Design.htm>>. Acesso em 8 nov. 2019.

COVINGTON, Edward J. A review of the Henry Goebel defense of 1893. **Early Incandescent Lamps**, online [extinto após a morte de Covington], 2003. Disponível em <<https://web.archive.org/web/20170111045416/http://home.frognet.net/~ejcov/hgoebel.html>>.

COVINGTON, Edward J. People. In: HOOKER, J. D. **Museum of Electric Lamp Technology**, 2017. Disponível em <www.lamptech.co.uk/People.htm>. Acesso 8 nov. 2019.

CPII [Communications & Power Industries]. **Crossed-field amplifiers (CFAs)**. Disponível em <<https://www.cpii.com/product.cfm/8/3>>. Acesso em 8 dez. 2019.

CROOKES and Geissler tubes. Disponível em <<http://www.sparkmuseum.com/GLASS.HTM>>. Acesso em 8 nov. 2019.

CROOKES, William. On radiant matter spectroscopy: a new method of spectrum analysis. **Proceedings of the Royal Society A**, London, v. 35, n. 224-225, p. 262-271, dec. 1883.

CROOKES, William. On the illumination of lines of electrical pressure, and the trajetory of molecules. **Philosophical Transactions**, London, Part I, v. 170, p. 135-164, 1879.

CROWTHER, J. A. Röntgen centenary and fifty years of X-rays. **Nature**, London, n. 3934, p. 351-353, march 24, 1945.

D'ALBE, Edmund E. F. **The life of Sir William Crookes**. London: T. Fisher Unwin, 1923.

DATAPHONE service in three Bell System areas. **Bell Laboratories Record**, New York, v. 36, n. 4, p. 148-149, apr. 1958.

DAVY, Humphry. **Elements of chemical philosophy**. London: J. Johnson and Co., 1812.

DEANE, John. **The IAS computer family scrapbook**. Pennent Hills: Australian Computer Museum Society, 2003.

DEKATRON. Em <<https://en.wikipedia.org/wiki/Dekatron>>. Acesso em 8 dez. 2019.

DESAGULIERS, J. T. Some things concerning electricity. **Philosophical Transactions**,

London, v. 41, p. 634-637, 1739.

DESCHANEL, A. P. **Traité élémentaire de physique**. Paris: Hachette, 1869. p. 569.

DIECKMANN story. In: **Deutsches Fernsehmuseum** [Museu alemão da televisão]. Em <<http://www.fernsehmuseum.info/dieckmann-story.html>>. Acesso em 9 dez. 2019.

DIJKSTRA, Henk. **The Cathode Ray Tube site**. Em <<https://www.crtsite.com/page2.html>>. Acesso em 8 nov. 2019.

DÖRENBERG, F. Hellschreiber. **The RV12P4000 vacuum tube**. Disponível em <<https://www.nonstopsystems.com/radio/hellschreiber-tubes.htm>>. Acesso em 8 dez. 2019.

DORMAEL, Armand van. **The “french” transistor**. Foundation for German communication and related technologies. Em <<https://www.cdvandt.org/VanDormael.pdf>>. 15 dez. 2019.

DRAPER, John William. On the production of light by heat. **The London, Edinburgh and Dublin Phil. Magazine and Journal of Science**, s. 3, v. 30, n. 202, p. 345-360, may 1847.

DREDGE, James (ed.). **Electric illumination**: vol. 1. London: Engineering, 1882. (contém, no Apêndice, listas de patentes concedidas no Reino Unido e EUA de 1837 a 1882)

DRUCKER, Peter F. **Technology, management, and society**. New York: Routledge, 1970.

DUFAY, Charles François de Cisternay. A discourse concerning electricity. **Philosophical Transactions**, London, v. 38, 1734.

DUFFY, Michael C. **Electric railways: 1880-1990**. Stevenage: IET, 2003.

DUMMER, G. W. A. (Geoffrey William Arnold). **Electronic inventions & discoveries**. 3. rev. and expand. ed. Oxford: Pergamon, 1983.

DUSHMAN, Saul. **Production and measurement of high vacuum**. Schenectady: General Electric, 1922.

DUSHMAN, Saul. **Scientific foundations of the vacuum**. New York: John Wiley, 1949.

DUSSEL, Enrique. **Filosofia de la producción**. Bogotá: Nova America, 1984.

DUSSEL, Enrique. Transmodernidade e interculturalidade: interpretação a partir da filosofia da libertação. Tradução: Rodrigo de Freitas Espinoza. **Sociedade e Estado**, Brasília, v. 31, n. 1, p. 51-73, jan.-abr. 2016.

DYER, Frank Lewis; MARTIN, Thomas Commerford. **Edison: his life and inventions**. New York: Harper & Brothers, 1910. (2 v.)

DYTRT, L. F. Barkhausen-Kurz oscillator operation with positive plate potentials. **Proceedings of the Institute of Radio Engineers**, v. 23, n. 3, p. 241-243, mar. 1935.

EDGERTON, David. ‘The linear model’ did not exist... In: GRANDIN, Karl; WORMBS, Nina (ed.). **The science-industry nexus**. New York: Watson, 2004.

EDISON, Thomas Alva. **Patent US 214.636**: improvement in electric lights. Washington: United States Patents Office, april 22, 1879. (filed oct. 1878). [filamento platina]

EDISON, Thomas Alva. **Patent US 223.898**: electric lamp. United States Patents Office, jan. 27, 1880a. (filed nov. 1879) [filamento carbono]

EDISON, Thomas Alva. **Patent US 224.329**: electric-lighting apparatus. United States Patents Office, feb. 10, 1880b. (filed feb. 1879) [filamento barra carbono]

EDISON, Thomas Alva. **Patent US 248.425**: apparatus for producing high vacuum. Washington: United States Patents Office, 1881. (filed march 1880)

- EDISON, Thomas Alva. **Patent US 274.290**: system of electrical distribution. Washington: United States Patents Office, mar. 1883. (filed nov. 1882)
- EDISON, Thomas Alva. **Patent US 307.031**: electrical indicator. Washington: United States Patent Office, oct. 21, 1884. (filed nov. 1883)
- EDISON, vs. Swan. In: DECISIONS of the commissioner of patents and of United States courts in patent cases... 1892. Washington: Government Printing Office, 1893. p. 143-145.
- EG&G. **Krytrons**: cold cathode switch tubes. Salem: EG&G, 1973.
- ELECTRONICS' hardy perennial. **Electronic Age**, New York, v. 21, n. 4, p. 29-31, 1962.
- ELECTRONTYPE speeds communication. **Tele-Tech**, New York, March, p. 47, 1949.
- ELLUL, J. **The technological society**. Transl. John Wilkinson. New York: Vintage, 1964.
- EMPTINESS. In: **Encyclopedia of world religions**. Chicago: Britannica, 2006.
- ERB, Ernst. **History of tuning indicators**: meters, graphs, Magic Eye, LED. Disponível em <https://www.radiomuseum.org/forum/history_of_tuning_indicators_meters_graphs_magic_eye_led.html>. Acesso em 8 nov. 2019.
- EXHIBITION. **Computer History Museum**, Mountain View (California-US), 2019. <<https://computerhistory.org/>>. Acesso em 8 nov. 2019.
- FAGEN, M. D. (ed.). **A history of engineering and science in the Bell System**: the early years (1875-1925). New York: Bell Telephone Laboratories, 1975.
- FARADAY, Michael. **Experimental researches in electricity**: reprinted from the Philosophical Transactions of 1831-1838. London: Richard and John Francis, 1839.
- FARMER, M. G. **Patent 213.643**: electric light. Washington: United States Patents Office, mar. 25, 1879. (filed nov. 1878)
- FATET, Jérôme. **Les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière entre 1839 et 1843**: histoire d'une interaction réussie entre science et photographie. Thèse de Doctorat, Histoire et philosophie des sciences. Lyon: Université Claude Bernard, 2005.
- FEDORKOW, Guy. **Gambling on Whirlwind**: how the US Navy spent \$3 million+ and got a computer game. Disponível em <<https://computerhistory.org/blog/gambling-on-whirlwind-how-the-us-navy-spent-3-million-and-got-a-computer-game/>>. Acesso em 15 dez. 2019.
- FITZPATRICK, Anne; KAZAKOVA, Tatiana; BERKOVICH, Simon. MESM and the beginning of the Computer Era in the Soviet Union. **IEEE Annals of the History of Computing**, v. 28, n. 3, p. 4-16, aug. 2006.
- FLAKUS, Franz-Nikolaus. Detecting and measuring ionizing radiation - a short history. **IAEA Buletin**, Vienna, v. 23, n. 4, p. 31-36, dec. 1981.
- FLEMING, John A. A further examination of the Edison effect in glow lamps. **Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, ser. 5, v. 42, p. 52-102, jul.-dec. 1896.
- FLEMING, John Ambrose. Hertzian wave wireless telegraphy. **Popular Science Monthly**, London, v. 64, p. 152-164, jun. 1903.
- FLEMING, John Ambrose. On electric discharge between electrodes at different temperatures in air and in high vacua. **Proceedings of the Royal Society A**, London, v. 47, n. 286-291, p. 118-126, jan. 1890.
- FLEMING, John Ambrose. **Principles of electric wave telegraphy**. New York: Longmans & Green, 1908.

FLEMING, John Ambrose. **The thermionic valve and its developments in radiotelegraphy and telephony**. London: Wireless Press, 1919.

FOLSOM, Frank M. (entrev.). RCA surrenders rights to four trade-marks. **Radio Age**, New York, v. 10, n. 1, p. 21, oct. 1950.

FONTAINE, Hippolyte. **Electric lighting**: a practical treatise. Translated from french by Paget Higgs. London: E. & F.N. Spon, 1878.

FORESMAN, Pearson Scott. **Glass blowing**. <<https://en.wikipedia.org/wiki/Glassblowing>>. Acesso em 8 nov. 2019.

FOREST, Lee de. Evolution of the vacuum tube. **Radio News**, New York, v. 11, n. 11, p. 990-991, 1039-, may 1930.

FOREST, Lee de. **Patent US 824.637**: oscillation-responsive device. Washington: United States Patent Office, jun. 26, 1906. (filed jan. 1906)

FOREST, Lee de. **Patent US 841.387**: device for amplifying feeble electrical currents. Washington: United States Patent Office, jan. 15, 1907. (filed oct. 1906)

FOREST, Lee de. **Patent US 879.532**: space telegraphy. Washington: United States Patent Office, feb 18, 1908. (filed jan. 1907)

FORNARI, Ernani. **O “incrível” padre Landell de Moura**: história triste de um inventor brasileiro. 2. ed. Rio de Janeiro: Biblioteca do Exército, 1984.

FORRESTER, Rochelle. **History of metallurgy**. New York: College Art Association of America, 2019. Em <<https://caa.hcommons.org/deposits/item/hc:27263/>>. 8 nov. 2019.

FOX, Robert; GUAGNINI, Anna. **Laboratories, workshops, and sites**: concepts and practices of research in industrial Europe, 1800-1914. Berkeley: Univ. California, 1999.

FOX, Robert; GUAGNINI, Anna. Sites of innovation in electrical technology, 1880-1914. **Annales Historiques de l'Électricité**, v. 1, n. 2, p. 159-172, juin 2004.

FRAME, Paul W. **Coolidge X-ray tubes**. Oak Ridge Associated Universities, 1999. Em <<https://www.ornl.gov/ptp/collection/xraytubescoolidge/coolidgeinformation.htm> >. Acesso em 3 set. 2019.

FRAME, Paul W. **William Crookes and the turbulent luminous sea**. Disponível em <<https://www.ornl.gov/ptp/articlesstories/spinstory.htm> >. Acesso em 3 set. 2019.

FRANK, Andre Gunder. **ReORIENT**: global economy in the Asian Age. Berkeley: University of California, 1998.

FREE, E. E. Searchlight radio with the new 7-inch waves. **Radio News Magazine**, New York, v. 13, v. 2, p. 107, aug. 1931.

FRIEDEN, Jeffry A. **Capitalismo global**: história econômica e política do século XX. Tradução: Vivian Mannheimer. Rio de Janeiro: Zahar, 2008.

FRIEDMAN, Herbert. **Patent US 2.791.716**: quick-firing corona regulator tube. Washington: United States Patent Office, may 7, 1957. (filed nov. 1954)

G7 termina e não cita Amazônia em declaração final. **Terra: Mundo**, 26 ago. 2019. <<https://www.terra.com.br/noticias/mundo/g7-termina-e-nao-cita-amazonia-em-declaracao-final,8d70499d73d93756186328966ba2376e8zhoj2zq.html>>. Acesso em 3 set. 2019.

GARCÍA, Benito del Castillo. História da luminescência. **Circumscribere** (International Journal for the History of Science), São Paulo, v. 12, p. 76-83, dez. 2012.

- GARNER, Louis E., Jr. The tube family tree: part 1. **Popular Electronics**, Chicago, v. 18, n. 5, p. 45-50, may 1963a.
- GARNER, Louis E., Jr. The tube family tree: part 2. **Popular Electronics**, Chicago, v. 18, n. 6, p. 73-78, june 1963b.
- GARNER, Louis E., Jr. The tube family tree: part 3. **Popular Electronics**, Chicago, v. 19, n. 2, p. 51-56, aug. 1963c.
- GASSIOT, John P. On the stratifications in electrical discharges, as observed in torricellian and other vacua. **Phil.Trans. Royal Society**, London, v. 149, p. 137-160, 1859.
- GAUGAIN, Jean Monthée. Note sur un appareil électrique qui fait fonction de soupape. **Comptes rendus ... Académie des Sciences**, Paris, t. 40, n. 12, p. 641-642, 19 mars 1855.
- GAZZERI; ANTINORI; BARDI, Girolamo de. Description d'un grand appareil voltaïque... **Bibliothèque Universelle des Sciences, Belles-Lettres et Arts**, Genève, t. 16, v. 6, p. 296-309, 1821.
- GE unveils "compactron". **Tecni-talk**, v. 12, n. 3, p. 1, june-july 1960. Disponível em <<http://www.junkbox.com/electronics/CompactronTubesIndex.shtml>>. Acesso em 3 set. 2019.
- GE. **How electronic tubes work**. Schenectady: General Electric, 1944.
- GEIGER-Mueller (GM) detectors. Oak Ridge Associated Universities, 1999. Disponível em <<https://www.orau.org/ptp/collection/GMs/introgms.htm>>. Acesso em 3 set. 2019.
- GERDIEN, Hans. **Patent US 1.004.012**: current relay apparatus. Washington: United States Patent Office, sept. 26, 1911. (filed jan. 1911)
- GEROVITCH, Slava. How the computer got its revenge on the Soviet Union. **Nautilus**, online, n. 23, apr. 2015. Disponível em <<http://nautil.us/issue/23/dominoes>>. 13 dez. 2019.
- GERYK vacuum pump, The. In: PORTER, Albert B. **The Scientific Shop**: circular 320. Chicago, 1905.
- GICCA, Francis A. Communications satellites - success in space. **Electronics World**, Chicago, v. 82, n. 1, p. 23-27, july 1969.
- GILLOGLY, Alvin Ernest. **High power triggered spark gaps**. Monterey: Dudley Knox, 1950. (dissertação de mestrado em engenharia eletrônica na Escola Naval de Anápolis, EUA)
- GLASSTONE, Samuel; DOLAN, Philip J. **The effects of nuclear weapons**. 3. ed. Washington: United States Department of Defense, 1977.
- GLEICHMANN, T. F. et al. Repeater design for the North Atlantic link. **The Bell System Technical Journal**, New York, v. 36, n. 1, p. 69-101, jan. 1957.
- GOERTH, Joachim. Early magnetron development specially in Germany. International Conference on the Origins and Evolution of the Cavity Magnetron, Bournemouth, UK, 2010. <<https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/5557902/proceeding>>. 9 set. 2019.
- GOLDSTEIN, Eugen. Vorläufige Mittheilungen über elektrische Entladungen in verdünnten Gasen [Comunicações preliminares sobre descargas elétricas em gases rarefeitos]. **Monatsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften** [Relatórios Mensais da Academia Real Prussiana de Ciências], Berlin, p. 279-296, 1876.
- GRAETZ, Leo. **Die elektrizität und ihre anwendungen** [A eletricidade e suas aplicações]. Stuttgart: Von J. Engelhorn's Nachf, 1912.
- GRANT, Edward. **The foundations of modern science in the Middle Ages**: their religious,

institutional, and intellectual contexts. Cambridge: Cambridge University, 1996.

GRAY, Stephen. An account of some new electrical experiments. **Philosophical Transactions Royal Society**, London, v. 31, p. 104-107, 1720.

GROMETSTEIN, Alan A. (ed.). **MIT Lincoln Laboratory: technology in support of national security**. Lexington: MIT, 2011.

GROVE, W. R. On the application of voltaic ignition to lighting mines. **Journal of the Franklin Institute**, Philadelphia, ser. 3, v. 12, n. 1, p. 52-54, July 1846.

GUARNIERI, Massimo. An historical survey on light technologies. **IEEE Access**, online, v. 6, p. 25.881-25.897, May 2018. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8356031>> Acesso em 3 set 2019.

GUARNIERI, Massimo. Solidifying power electronics. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, New York, v. 12, n. 1, p. 36-40, Mar. 2018.

GUARNIERI, Massimo. Switching the light: from chemical to electrical. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, New York, v. 9, n. 3, p. 44-47, Sept. 2015.

GUARNIERI, Massimo. The age of vacuum tubes: early devices and the rise of radio communications. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, New York, v. 6, n. 1, p. 41-43, Mar. 2012.

GUEDES, Manuel Vaz. Léon Foucault: um eletrotécnico precursor. In: **Comemoração dos 150 anos do pêndulo de Foucault**. Porto: Dep. Física, Fac. Ciências, Universidade do Porto, 5 dez. 2001. <https://paginas.fe.up.pt/histel/Foucault_electr.pdf>. Acesso em 4 nov. 2019.

GUERICKE, Otto de. **Experimenta nova** (ut vocantur) Magdeburgica de vacuo spatio. Amsterdam: Joannem Janssonium, 1672.

GUERRA, Elaine Linhares de Assis. **Manual de pesquisa qualitativa**. Belo Horizonte: Anima Educação, 2014.

GUTHRIE, Frederick. **Magnetism and electricity**. London: William Collins, 1876.

GYROTRON. Em <<https://www.britannica.com/technology/gyrotron>>. 9 set. 2019.

HABERMAS, Jürgen. **O discurso filosófico da modernidade: doze lições**. Tradução: Luiz S. Repa e Rodnei Nascimento. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

HABLANIAN, Marsbed H. **High-vacuum technology: a practical guide**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1997.

HARVEY, David. **Condição pós-moderna: uma pesquisa sobre as origens da mudança cultural**. Tradução: Adail U. Sobral e Maria S. Gonçalves. São Paulo: Loyola, 1992.

HARVEY, David. **O neoliberalismo: história e implicações**. Tradução: Adail Sobral e Maria S. Gonçalves. São Paulo: Loyola, 2008.

HARVEY, David. **Spaces of capital: towards a critical geography**. Edinburgh Univ., 2001.

HAUKSBEE, Francis. **Physico mechanical experiments on various subjects**. London: R. Brugis, 1709.

HAUPT, Joe. **Rear view** - vintage Telex model 97 vacuum tube hearing aid, circa 1947. Wikimedia commons, 2014. <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rear_View_-_Vintage_Telex_Model_97_Vacuum_Tube_Hearing_Aid,_Circa_1947_\(13960657559\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rear_View_-_Vintage_Telex_Model_97_Vacuum_Tube_Hearing_Aid,_Circa_1947_(13960657559).jpg)>. Acesso em 3 set. 2019.

HEADRICK, Daniel R. **The invisible weapon: telecommunications and international politics**,

1851-1945. New York: Oxford University, 1991.

HEADRICK, Daniel R.; GRISSET, Pascal. Submarine telegraph cables: business and politics, 1838–1939. **Business History Review**, Cambridge, v. 75, n. 3, p. 543-578, 2001.

HEMOUR, Simon; WU, K. Radio-frequency rectifier for electromagnetic energy harvesting: development path and future outlook. **Proceedings of the IEEE**, v. 102, n. 11, p. 1667-1691, nov. 2014.

HENDERSON, W. G.; LUCARELLI, A. L. High vacuum technology and equipment. In: **ELECTRON tube design**. Herrison: RCA, 1962. p. 485-505.

HENNEY, Keith; FAHNESTOCK, James D. **Electron tubes in industry**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1952.

HERSCHEL, William. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the sun. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v. 90, p. 2, p. 284-292, apr. 1800.

HERTZ, Heirich. **Electric waves**. London: McMillan and Co., 1893.

HEWITT, Peter Cooper. In: National Museum of American History. **Lamp inventors 1880-1940: Cooper Hewitt Lamp**. <<https://americanhistory.si.edu/lighting/bios/hewitt.htm>>. Acesso em 8 nov. 2019.

HEWITT, Peter Cooper. **Patent US 1.110.546**: directional-current arrester. Washington: United States Patent Office, sept 15, 1914. (filed feb. 1903; divided, this filed june 1907)

HEWITT, Peter Cooper. **Patent US 1.110.549**: vapor converter. Washington: United States Patent Office, sept. 1914. (filed mar. 1908)

HEWITT, Peter Cooper. **Patent US 682.692**: method of manufacturing electric lamps. Washington: United States Patent Office, sept. 17, 1901. (filed apr. 1900)

HEWITT, Peter Cooper. **Patent US 749.791**: means for reproducing electrical variations. Washington: United States Patent Office, jan. 19, 1904. (filed may 1902)

HEWITT, Peter Cooper. **Patent US 781.000**: apparatus for transforming electrical energy. Washington: United States Patent Office, jan. 31, 1905. (filed apr. 1902)

HEWITT, Peter Cooper. **Patent US 843.533**: induction vapor or gas electric lamp. Washington: United States Patent Office, feb. 5, 1907. (filed apr. 1900)

HIEBERT, Erwin N. Electric discharges in rarefied gases: the dominion of experiment. Faraday. Plücker. Hittorf. In: KOX, A. J., SIEGEL, Daniel M. **No truth except in details: essays in honor of Martin J. Klein**. Dordrecht: Kluwer, 1995. p. 95-134.

HISTORY and development of early lighting. In: STEUART, William M. (superv.). **Central electric light and power stations 1902**. Washington: Government Printing Office, 1905. p. 86-104.

HITACHI. **Hitachi magnetron for industry**. Disponível em <<https://www.hitachi-power-solutions.com/en/products/magnetron/index.html>>. Acesso em 16 set. 2019.

HOBBSAWM, Eric. **A era do capital: 1848-1875**. Tradução: Luciano Costa Neto. São Paulo: Paz e Terra, 2012.

HOBBSAWM, Eric. **Era dos extremos: o breve século XX: 1914-1991**. 2. ed. Tradução: Marcos Santarrita. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

HOCHFELDER, David. **The telegraph in America, 1832-1920**. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2012.

- HOCHHEISER, Sheldon. STARS: Telephone transmission [scanning our past]. **Proceedings of the IEEE**, v. 102, n. 1, p. 104-110, jan. 2014.
- HODDESON, Lillian. The emergence of basic research in the Bell Telephone System, 1875-1915. **Technology and Culture**, v. 22, n. 3, p. 512-544, july 1981.
- HODSON, J. S. (ed.). **Repertory of patent inventions: and other discoveries and improvements...: new series, volume 16**. London: J. S. Hodson, 1841.
- HOLLMANN, Hans Erich. **Patent US 2.123.728: magnetron**. Washington: United States Patent Office, july 12, 1938. (filed nov. 1936; in Germany, nov. 1935)
- HONG, Sungook. **Wireless: from Marconi's black-box to the audion**. Cambridge: MIT, 2001.
- HOOIJMANS, Pieter. **EQ40 and EQ80**. Disponível em <<https://www.maximus-randd.com/eq40-and-eq80.html>>. Acesso em 3 set. 2019.
- HOUSTON, Edwin J.; KENNELLY, A. E. **Electric incandescent lighting**. New York: W. J. Johnston, 1896.
- HOW the cyclotron works. **Radio-Craft**, Springfield, v. 18, n. 9, June 1947. p. 23.
- HOWELL, John W.; SCHROEDER, Henry. **History of the incandescent lamp**. Schenectady: Maqua, 1927.
- HOWETH, Linwood S. **History of communications: electronics in the United States Navy**. Washington: United States Government Printing Office, 1963.
- HOWETT, Dicky. **Television innovations: 50 technological developments: a personal selection**. Tiverton, UK: Kelly, 2006.
- HUGHES, Thomas Parke. **Networks of power**. Baltimore: Johns Hopkins University, 1983.
- HULL, Albert W. **Patent US 1.387.985: electron-discharge device**. Washington: United States Patent Office, aug. 1921. (filed nov. 1916)
- HÜLSMEYER, C. **Patent US 810.150: Wireless transmitting and receiving mechanism for electric waves**. Washington: United States Patent Office, jan. 1906. (filed mar. 1904)
- HUNT, Bruce J. Practice vs. theory: the british electrical debate, 1888-1891. **Isis**, v. 74, n. 3, p. 341-355, sep. 1983.
- HUNT, Bruce. **Pursuing power and light: technology and physics from James Watt to Albert Einstein**. Baltimore: John Hopkins, 2010.
- HUUDERMAN, Anton A. **The worldwide history of telecommunications**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
- IBM 700... <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IBM_700_logic_module.jpg>. Acesso em 13 dez. 2019.
- IEEE. Davy's first carbon arc lamp. **Journal of the AIEE**, New York, v. 43, n. 5, p. 466-466, May 1924.
- IET. **Joseph Swan**. Disponível em <<https://www.theiet.org/publishing/library-archives/the-iet-archives/biographies/joseph-swan/>>. Acesso em 8 nov. 2019.
- ITU. **Radio regulations: articles**. Geneva: International Telecommunication Union, 2016.
- IVES, Herbert E. The alkali metal photoelectric cell. **The Bell System Technical Journal**, New York, v. 5, p. 320-335, 1926.
- JACOBI, A. P. (compil.). **The ballast tube handbook**. Ralston (US): Jacobi, 1988.

- JACOBS, John F. **The SAGE Air Defense System: a personal history**. Bedford: Mitre, 1986.
- JANSKY, Cyril Methodius. **Principles of radiotelegraphy**. New York: McGraw-Hill, 1919.
- JAPIASSU, Hilton. **Filosofia da ciência: uma introdução**. Rio de Janeiro: UAPÊ; SEAF, 2010.
- JAPIASSU, Hilton. **O mito da neutralidade científica**. Rio de Janeiro: Imago, 1975.
- JONES, William K. Use and regulation of the radio spectrum: report on a conference. **Washington University Law Review**, v. 1968, n. 1, p. 71-115, 1968.
- JOUSTEN, Karl (ed.). **Handbook of vacuum technology**. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2016.
- KARTSEV, V. P. Petrov's hypothetical experiment and electrical experiments of the 18th century. In: SHEA, William R. (ed.). **Nature mathematized**. Dordrecht: D. Reidel, 1983. p. 279-289.
- KASSEL, Simon. **Soviet development of gyrotrons: R-3377-ARPA**. Santa Monica-US: Rand, 1986.
- KATZ, Claudio. Determinismo tecnológico y determinismo histórico-social. **Redes**, Buenos Aires, v. 5, n. 11, p. 37-52, jun. 1998.
- KATZ, Claudio. El culturalismo em los estudios de tecnologia. **Causas y Azares**, Buenos Aires, a. IV, n. 6, p. 107-122, 1997.
- KATZ, Claudio. La tecnología como fuerza productiva social: implicaciones de una caracterización. **Quipú**, online, v.12, n 3, p. 371-380, set.-dez. 1999. Disponível em <<http://www.revistaquipu.com/>>. Acesso em 16 set. 2019.
- KELLY, Mervin J.; RADLEY, Gordon. Transatlantic communications: an historical resume. **The Bell System Technical Journal**, New York, v. 36, n. 1, p. 1-5, jan. 1957.
- KELLY, Mervin J.; SAMUEL, A L. Vacuum tubes as high-frequency oscillators. **The Bell System Technical Journal**, New York, v. 14, n. 1, p. 97-134, jan. 1935.
- KENNEDY, Paul M. Imperial cable communications and strategy, 1870-1914. **The English Historical Review**, v. 86, v. 341, p. 728-752, oct. 1971.
- KERSHAW, Ian. **De volta ao inferno: Europa, 1914-1949**. Tradução: Donaldson M. Garschagen e Renata Guerra. Companhia das Letras, 2016.
- KEVIN. **RCA TVs (1939, 1946)**. Disponível em <<http://www.collectorkevin.com/rca.htm>>. Acesso em 3 set. 2019.
- KING, W. James. The development of electrical technology in the 19th century: 1. The electrochemical cell and the electromagnet. **United States National Museum Bulletin**, Washington, n. 228, paper 28, p. 233-271, 1963a.
- KING, W. James. The development of electrical technology in the 19th century: 3. The early arc light and generator. **United States National Museum Bulletin**, Washington, n. 228, paper 30, p. 333-407, 1963b.
- KINNERSLEY, Ebenezer. New experiments in electricity: in a letter from Mr. Ebenezer Kinnersley to Benjamin Franklin. **Philosophical Transactions**, London, v. 53, p. 84-97, dec. 1763.
- KLIN, Ronald R. **Steinmetz: engineer and socialist**. Baltimore: John Hopkins University, 1992.

- KLINE, Ronald R. The modem that still connects us. In: ASPRAY, William (ed.). **Historical studies in computing, information, and society**. Boulder: Springer, 2019. p. 29-35.
- KNIGHT, M. B. A new miniature beam-deflection tube. **RCA Review**, v. 21, n. 2, p. 266-289, June 1960.
- KNOLL, M.; KAZAN, B. **Storage tubes and their basic principles**. New York: John Wiley & Sons, 1952.
- KOCHER, José Mauro. **Telegrafia no século XIX: ciência e técnica no contexto da industrialização**. Dissertação - Mestrado em Ciências. Rio de Janeiro: UFRJ, 2014.
- KOENIG, Rudolph. **Catalogue des appareils d'acoustique**. Paris: Rudolph Koenig, 1889.
- KOHL, Max. **Appareils de physique**: catalogue n. 22. Chemnitz: Hugo Wilisch, 190-.
- KOOLAKIAN, Robert G. **Lewis Howard Latimer: a black inventor**. Washington: Edison Electric Institute, 1993.
- KORNILENKO, V. S. (ed.). **Space: the first step / 4 октября 1957 года: Начало космической эры [4 de outubro de 1957: o começo da era espacial]**. Moscou: Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, 2007.
- KOWALSKI, Wladyslaw. **Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection**. New York: Springer, 2010.
- KRAGH, Helge. The Krarup cable: invention and early development. **Technology and Culture**, v. 35, n.1, p. 129-157, Jan. 1994.
- KRAUS, John D. Kraus. Heinrich Hertz - theorist and experimenter. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 36, n. 5, p. 824-829, May 1988.
- KROGE, Harry von. **GEMA: birthplace of german radar and sonar**. London: Institute of Physics (IoP), 2000.
- KRYTRON. Em <<https://www.wikiwand.com/en/Krytron>>. Acesso em 28 ago. 2019.
- LAMPTECH. **Lamp factories**. Disponível em <<http://www.lamptech.co.uk/Factories.htm>>. Acesso em 8 nov. 2019.
- LANGMUIR, Irving. **Patent US 1.251.388**: method and apparatus for controlling x-ray tubes. Washington: United States Patent Office, Dec. 1917. (filed Oct. 1913; renewed Apr. 1917)
- LARDNER, Dionysius. **Treatise on heat**. London: Longman & Co., 1833.
- LATIMER, Lewis H. **Patent US 252.386**: process of manufacturing carbons. Washington: United States Patents Office, Jan. 17, 1882. (filed Feb. 1881)
- LEE, Bartholomew. Wireless: its evolution from mysterious wonder to weapon of war, 1902 to 1905. **AWA Review**, v. 25, p. 147-184, 2012.
- LEGETT, Bernard. **Wireless telegraphy with special reference to the quenched-spark system**. London: Chapman & Hall, 1921.
- LIEBEN, Robert von; REISZ, Eugen; STRAUSS, Siegmund. **Patent DE 249.142**: relais für umdulierende ströme. Kaiserliches Patentamt, 12 Juli 1912. (apresentada em 20 dez. 1910)
- LILIENFELD, J. E. **Patent US 1.900.018**: device for controlling electric current. Washington: United States Patent Office, March 7, 1933. (filed March 1928)
- LODGE, Oliver. **Signalling through space without wires**. 3. ed. London: The Electrician, 1903.

- LUBSANDORZHIEV, Bayarto K. On the history of photomultiplier tube invention. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A**, v. 567, n. 1, p. 236-238, nov. 2006.
- MACK, Dick. **Functional description of the 184-inch cyclotron pulsed arc system and maintenance instructions**. Oak Ridge: U.S. Atomic Energy Commission, 1948.
- MADEY, Theodore E. Early applications of vacuum, from Aristotle to Langmuir. **Journal of Vacuum Science & Technology A**, College Park, v. 2, n. 2, p. 110-117, apr.-june 1984.
- MAFFIOLI, Cesare S. “La ragione del vacuo”: why and how Galileo measured the resistance of vacuum. **Galileana**, Firenze, a. 8, p. 73-104, 2011.
- MAGILL, Frank N. **The Middle Ages**: dictionary of world biography, volume 2. Oxford: Routledge, 2012.
- MAGNETRON. Em <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Magnetron>>. Acesso em 28 ago. 2019.
- MALOBERTI, Franco; DAVIES, Anthony C. (ed.). **A short history of circuits and systems**. Aalborg: River, 2016.
- MAN-made satellite. **Unesco Courier**, Paris, a. 10, n. 9, p. 30-34, sep. 1957.
- MANN, F. J. Federal Telephone and Radio Corporation, a historical review: 1909–1946. **Electrical Communications**, v. 23, n. 4, p. 377-405, dec. 1946.
- MANUFACTURING the 300B vacuum tube. Em: <<https://www.westernelectric.com/library-technical-300b-manufacturing.html>>. Acesso em 3 set 2019.
- MARSHALL, Paul. **Inventing television**: transnational networks of co-operation and rivalry, 1870-1936. Thesis, Doctor of Philosophy, University of Manchester, 2011.
- MARTI, Othmar K.; WINOGRAD, Harold. **Mercury arc power rectifiers**: theory and practice. New York: McGraw-Hill, 1930.
- MARX, Karl. **Manuscrtos econômico-filosóficos**. Tradução: Jesus Ranieri. 2. reimpr. São Paulo: Boitempo, 2008.
- MARX, Karl. **O capital**: crítica da economia política: livro 1: o processo de produção do capital. Tradução: Rubens Enderle. São Paulo: Boitempo, 2013.
- MARX, Leo; SMITH, Merritt Roe. **Does technology drive history?**: the dilemma of technological determinism. Cambridge: MIT Press, 1994.
- MATTOX, Donald M. A short history: vacuum in the 17th century and onward: the beginning of experimental sciences. **SVC Bulletin**, Albuquerque, p. 40-47, Spring 2017.
- MATTOX, Donald M. **The foundations of vacuum coating technology**. Oxford: Elsevier, 2018.
- MAXIM, Hiram S. **Patent US 230.309**: process of manufacturing carbon conductors. Washington: United States Patents Office, july 1880a. (filed march 1880)
- MAXIM, Hiram S. **Patent US 230.310**: electric lamp. Washington: United States Patents Office, july 1880b. (filed april 1880)
- MAXWELL, Jim. Amateur radio 100 years of discovery. In: ARRL [The National Association for Amateur Radio]. **Ham radio history**. Disponível em <<http://www.arrl.org/ham-radio-history>>. Acesso em 13 dez. 2019.
- MAZZUCATO, Mariana. **O Estado empreendedor**: desmascarando o mito do setor público vs. setor privado. Tradução: Elvira Serapicos. [S. l.:] Portfolio-Penguin, 2014.

- MCDONALD, Donald; HUNT, Leslie B. **A history of platinum and its allied metals**. London: Johnson Matthey, 1982.
- MCLEOD, Herbert. Apparatus for measurement of low pressures of gas. **Proceedings of the Physical Society**, London, v. 1, p. 30-34, 1874.
- MCMAHON, Peter. Early electrical communications technology and structural change in the international political economy. **Prometheus**, v. 20, n. 4, p. 379-390, 2002.
- MCNALLY, J. O. et al. Electron tubes for the transatlantic cable system. **The Bell System Technical Journal**, New York, v. 36, n. 1, p. 163-188, jan. 1957.
- MCNANEY, Joseph T., JACKSON, Donald F. The application of the charactron as Morse code converter. **QST for**, p. 16-19, mar. 1954.
- MCNEIL, Ian (ed.). **An encyclopaedia of the history of technology**. London: Routledge, 1990.
- MERCURY-arc rectifier. Em <https://simple.wikipedia.org/wiki/Mercury-arc_rectifier>. Acesso em 28 ago. 2019.
- METROPOLIS, N.; HOWLETT, J.; ROTA, Gian-Carlo. **A history of computing in the twentieth century**: a collection of essays with introductory essay and indexes. Orlando: Academic Press, 1980.
- MEYER, Herbert W. **A history of electricity and magnetism**. Norwalk: Burndy, 1972.
- MILLS, Allan. The Nernst lamp. **eRittenhouse**, on-line, v. 24, p. 1-6, 2013. Disponível em <<https://www.semanticscholar.org/paper/The-Nernst-Lamp-ELECTRICAL-CONDUCTIVITY-IN-Mills/0908a683f9c97669190f7626ab3b85e1b51acfd1>>. 8 nov. 2019.
- MIT. **Sage**: semi-automatic ground environment air defense system. Disponível em <<https://www.ll.mit.edu/about/history/sage-semi-automatic-ground-environment-air-defense-system>>. Acesso em 15 dez. 2019.
- MOE, Robert E. Tubes or transistors? **Electronic Industries**, Philadelphia, v. 18, n. 4, p. 58-63, April 1959.
- MONOSCOPE. In: **The valve museum**. <<http://www.r-type.org/exhib/aag0021.htm>>. Acesso em 29 ago. 2019.
- MOORE Lamp. In: **National Museum of American History: Lamp Inventors 1880-1940: Moore Lamp**. Disponível em <<https://americanhistory.si.edu/lighting/bios/moore.htm>>. Acesso em 8 nov. 2019.
- MOORE, Daniel McFarlan. **Patent US 565.776**: phosphorescent electrical illumination by metallic coating upon glass. Washington: United States Patent Office, aug. 1896. (filed jan. 1895)
- MORENO QUINTANA, L. M. **La historia y cronología de la radiocomunicación**. Buenos Aires: [Edición del Autor], [199-].
- MORRIS, Peter Robin. **A history of the world semiconductor industry**. London: IET, 2008.
- MOWERY, David C.; ROSENBERG, Nathan. **Trajetórias da inovação**: a mudança tecnológica nos Estados Unidos da América no século XX. Campinas: Unicamp, 2005.
- MULLARD valve testing - factory and service department. **Mullard Outlook**, v. 3, n. 11, p. 3, dec. 1953.
- NASA Space Science Data Coord. **Archive**. Disponível em <<https://nssdca.gsfc.nasa.gov/>>.

Acesso em 13 dez. 2019.

NASA. **Apollo operations handbook**: lunar module, volume 1: subsystems data. New York: Grumman, 1971.

NATURAL Philosophy Lab., Glasgow Univ. <<https://www.theglasgowstory.com/image/?inum=TGSD00152>>. Acesso em 8 nov. 2019.

NAUENBERG, Michael. Solution to the puzzle of Huygens' "anomalous suspension". **Archive for History of Exact Sciences**, v. 69, n. 3, p. 327-341, May 2015.

NAVY, United States. **Navy electricity and electronics training series**. [S. l.:] NRTC, 2012. Disponível em <<https://www.fcctests.com/neets/Neets.htm>>. Acesso em 28 ago. 2019.

NAVY, US. **A survey of automatic digital computers**. Washington: Office of Naval Research, 1953.

NEBEKER, Frederik. **Dawn of the electronic age**: electrical technologies in the shaping of the modern world, 1914 to 1945. Hoboken: Wiley; Piscataway: IEEE Press, 2009.

NEGATIVE resistance: what it is & how it's used. **RF Cafe**, online, 2016. Disponível em <<https://www.rfcafe.com/references/electronics-world/negative-resistance-electronics-world-may-1961.htm>>. Acesso em 10 dez. 2019.

NEON and Argon Lamps. Disponível em <<http://edisontechcenter.org/NeonLamps.html>>. Acesso em 8 nov. 2019.

NICHOLS, Joseph V.; LATIMER, Lewis H. **Patent US 247.097**: electric lamp. Washington: United States Patents Office, sept. 13, 1881. (filed april 1881)

NICKS, Oran W. **Far travelers**: the exploring machines. Washington: NASA, 1985.

NIEWIADOMSKI, Stef. **Nuvisor valves**. Disponível em <www.r-type.org/articles/art-150.htm>. Acesso em 28 ago. 2019.

NOBEL Lectures: **Physics, 1901-1921**. Singapore: World Scientific, 1998.

NOBLE, David F. **America by design**: science, technology, and the rise of corporate capitalism. Oxford: University Press, 1979.

NOLL, A. Michael. **The Bell Labs**. Em <<http://noll.uscannenberg.org/>>. 10 dez. 2019.

NOLL, A. Michael. The industrial research lab: a relic of past? **Nature Materials**, v. 5, p. 337-338, may 2006.

NOLLET, Jean Antoine. Observations sur quelques nouveaux phénomènes d'électricité. In: **Histoire de l'Académie Royale des Sciences**: l'année 1746. Paris: Imprimerie Royale, 1751. p. 1-23.

NOLLET, Jean Antoine. **Recherches sur les causes particulieres des phénomènes électriques**. Paris: Frères Guerin, 1749.

NON-destructive testing: X-ray inspection and industrial computed tomography. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=IcWjZbXiFkM>>. Acesso em 13 dez. 2019.

NORTON, John D. **Origins of quantum theory**. Dep. Hist. .Phil. Sci., Un. Pittsburgh. <https://www.pitt.edu/~jdnorton/teaching/HPS_0410/chapters/quantum_theory_origins/>. Acesso: 15 abr. 2019.

NÚÑEZ, H.; PANIAGUA, A. **Tras las huellas de nuestros orígenes**. Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, 2001. Disponível em <<http://ntic.educacion.es/w3/eos/MaterialesEducativos/mem2001/huellas/origenes/main.htm>>

Acesso em 8 nov. 2019.

NUSINOVICH, Gregory. Gyrotrons for plasma experiments: historical overview. In: International Workshop on ECE and ECRH, 17., May 7-10, 2012, Deurne, The Netherlands. **Proceedings...** <[https://www.differ.nl/ec17/proceedings/presentations/Tuesday/Gyrotrons%20for%20plasma%20experiments%20-%20historical%20overview%20\(EC-17\).pdf](https://www.differ.nl/ec17/proceedings/presentations/Tuesday/Gyrotrons%20for%20plasma%20experiments%20-%20historical%20overview%20(EC-17).pdf)>. Acesso em 28 ago. 2019.

O'CONNOR, J. J.; ROBERTSON, E. F. Christiaan Huygens. **MacTutor**, School of Mathematics and Statistics, University of St Andrews, Scotland, 1997. Disponível em <<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Huygens.html> >. Acesso 15 abr. 2019.

O'CONNOR, J. J.; ROBERTSON, E. F. Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien. **MacTutor**, School of Mathematics and Statistics, University of St Andrews, Scotland, 2009. Disponível em <<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Wien.html>>. Acesso: 15 abr. 2019.

O'NEILL, E. F. (ed.). **A history of engineering and science in the Bell System**: transmission technology (1925-1975). Indianapolis: AT&T Bell Laboratories, 1985.

OBITUARY notices of fellows deceased: Sir William Crookes. **Proceedings of the Royal Society A**, London, v. 96, n. 680, p. i-ix, feb. 1920.

OBITUARY: Eugen Goldstein. **Nature**, v. 127, n. 3196, p. 171, jan. 1931.

OKABE, Kinjiro. **Patent US 1.860.114**: oscillation generator. Washington: United States Patent Office, may 24, 1932. (filed june 1928; in Japan, july 1927)

OKAMURA, Sōgo. **History of electron tubes**. Burke: IOS Press, 1994.

ORCHARD, Frederick Charles. **Mercury arc rectifier practice**. Pittsburgh: Instruments Publishing Company, 1936.

ORTHICON.<http://hakimweb.com/AntiqueXRrayTubes/web10/Radiology_Related_Items/Orthicon_and_Image_Orthicon.htm>. Acesso em 3 set 2019.

OSCOPIES. Em <<http://www.oscopes.info/background/2265-oscilloscope-milestones>>. Acesso 8 dez. 2019.

OWENS, M. J. **Patent US 534.840**: apparatus for blowing glass. Washington: United States Patents Office, feb. 26, 1895. (filed jan. 1894)

PAGE, Charles G. **History of induction**: part I – Induction and induction apparatus. WASHINGTON: Intelligencer, 1867.

PASCHOTTA, Rüdiger. Electroluminescence. In: **RP Photonics Encyclopedia**. Disponível em <<https://www.rp-photonics.com/electroluminescence.html>>. Acesso em 17 out. 2019.

PATTON, Lydia. Hermann vom Helmholtz. **Stanford Encyclopedia of Philosophy**, 2008. Disponível em <<https://plato.stanford.edu/entries/hermann-helmholtz/> >. Acesso 2 jun. 2019.

PERCIVAL, G. Arncliffe. **The electric lamp industry**. London: Isaac Pitman & Sons, 1920.

PERRIN, Jean Baptiste. Nouvelles propriétés des rays cathodiques. **Comptes Rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences**, Paris, v. 121, p. 1130-1134, juil.-déc. 1895.

PHILIPP Lenard. **Deutsche Biographie**, online. Disponível em <<https://www.deutsche-biographie.de/gnd118779397.html#ndbcontent>>. Acesso em 2 jun. 2019.

PHILLIPS, V. J. **Early radio wave detectors**. London: IEE; Stevenage: P. Peregrinus, 1980.

- PHILOSOPHY of nature. Disponível em <https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Philosophy_of_nature>. Acesso 8 dez. 2019.
- PHOTOEMISSIVE cells. Em <<https://kids.britannica.com/students/article/photoelectric-device/276409/286736-toc>>. Acesso em 8 dez. 2019.
- PHOTOMULTIPLIER tube. Em <https://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier_tube>. Acesso em 8 dez. 2019.
- PHOTOTUBES. Disponível em <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phototubes.jpg>>. Acesso em 8 dez. 2019.
- PICHLER, Franz. **On the development of the Lieben vacuum tube** (LRS-Relais). Department of Systems Theory and Information Engineering, University of Linz, 2002. Disponível em <www.cast.uni-linz.ac.at/Publications/Pubs2002>. Acesso em 8 dez. 2019.
- PINTO, Álvaro Vieira. **Ciência e existência**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1969.
- PINTO, Álvaro Vieira. **O conceito de tecnologia**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2005. 2 v.
- PIONEER atom splitter. **Radio-Craft**, Springfield, p. 22-23, 53, june 1947.
- PLÜCKER, Julius. Fortgesetzte beobachtungen über die elektrische entladung durch gasverdünnte räume [Observações contínuas sobre a descarga elétrica em recipientes com gás rarefeito]. **Annalen der Physik und Chemie**, Leipzig, v. 104, n. 1, p. 113-128, jun. 1858a.
- PLÜCKER, Julius. Ueber die einwirkung des magnets auf die elektrischen entladungen in verdünnten gasen. [Sobre a ação dos ímãs nas descargas elétricas em gases rarefeitos]. **Annalen der Physik und Chemie**, Leipzig, v. 103, n. 1, p. 88-106, 151-157, feb. 1858b.
- PMT (Photomultiplier tubes). Disponível em <<https://www.sense-pro.org/lll-sensors/pmt>>. Acesso em 8 dez. 2019.
- POMERANZ, Kenneth. **The great divergence: China, Europe, and the making of the modern world economy**. Princeton: Princeton University, 2000.
- PORTABLE electric miner's lamp, after Dumas and Benoit (1862). Disponível em <<https://www.teylersmuseum.nl/en/collection/instruments/fk-0911-electric-miners-safety-lamp-geissler-tube>>. Acesso em 8 nov. 2019.
- PREECE, W. H. On a peculiar behaviour of glow lamps when raised to high incandescence. **Proceedings of the Royal Society**, London, v. 38, n. 236, p. 219-230, march 1885.
- PRICE, Alfred. **Instruments of darkness: the history of electronic warfare, 1939–1945**. Barnsley: Frontline, 2017. (1. ed. 1967)
- PRINCE, D. C. Mercury arc rectifier phenomena. **Journal of the AIEE**, v. 46, n. 7, p. 667-674, July 1927.
- PRINCIPE, Lawrence M. **Robert Boyle: anglo-irish philosopher and writer**. Disponível em <<https://www.britannica.com/biography/Robert-Boyle>>. 2019. [Principe é professor do Departamento de História da Ciência e Tecnologia da Johns Hopkins University]
- PUGH, Emerson W. **Building IBM: shaping an industry and its technology**. Cambridge-US: MIT Press, 1995.
- PURRINGTON, Robert D. **Physics in nineteenth century**. New Brunswick: Rutgers University, 1987.
- QUIMILAB. **Tabela periódica dos elementos químicos** (dados da IUPAC). Disponível em <<https://www.quimilab.com.br/publicacoes.htm>>. Acesso em 8 nov. 2019.

- RABOY, Marc. **Marconi: the man who networked the world**. Oxford: University Press, 2016.
- RADIO receiver "Loewe OE333". <https://www.liveauctioneers.com/item/10168273_335-radio-receiver-loewe-oe333-c-1927>. Acesso em 3 set 2019.
- RADIOMUSEUM. Disponível em <<https://www.radiomuseum.org/>>. Acesso em 3 set 2019.
- RAJCMAN, Jan A. **Patent US 2494670: electronic discharge device [selectron]**. Washington: United States Patent Office, jan. 1950. (filed apr. 1946)
- RANGER 7. Disponível em <<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1964-041A>>. Acesso em 13 dez. 2019.
- RAYTHEON. **Gas-filled diode CK 1022**. Newton: Raytheon, 1956.
- RCA. **Cunningham radiotron manual**. Harrison: RCA Radiotron Co., 1934.
- RCA. **Nuovistor tubes for industrial and military applications**. Harrison: Radio Corporation of America, [1963].
- RCA. **Receiving tube manual**. Harrison: Radio Corporation of America, 1947.
- RCA. **Receiving tube manual**. Harrison: Radio Corporation of America, 1950.
- RCA. **RR-359 Field Trial Set**. Em <https://www.earlytelevision.org/rca_rr-359.html>. Acesso em 3 set 2019.
- RDO Induction Heating Solutions. **Getter firing**. <<https://rdoinduction.com/getter-firing.html>>. Acesso em 3 set 2019.
- REDHEAD, P. A. [Paul Aveling]. History of vacuum devices. In: TURNER, S. (ed). **Proceedings of CERN accelerator school**. Geneva: CERN, 1999a. p. 281-290.
- REDHEAD, P. A. [Paul Aveling]. The birth of electronics: thermionic emission and vacuum. **Journal of Vacuum Science & Technology A**, v. 16, n. 3, p. 1394-1401, may 1998.
- REDHEAD, P. A. [Paul Aveling]. The ultimate vacuum. **Vacuum**, v. 53, v. 1-2, p. 137-149, may 1999b.
- REDHEAD, P. A. [Paul Aveling]. Vacuum and the electron tube industry. **Journal of Vacuum Science & Technology A**, v. 23, n. 4, p. 1252-1259, jul.-aug. 2005.
- REGULATIONS governing operation of broadcasting stations promulgated by the Federal Radio Commission. **Radio Service Bulletin**, Washington, n. 121, p. 15, apr. 30, 1927.
- REICH, Herbert J. **Functional circuits and oscillators**. Princeton: D. van Nostrand, 1961.
- REICH, Leonard. **The making of american industrial research: science and business at GE and Bell, 1876-1926**. Cambridge: Cambridge University, 1985.
- REIF-ACHERMAN, Simón. Heinrich Geissler: pioneer of electrical science and vacuum technology. **Proceedings of the IEEE**, v. 103, n. 9, p. 1672-1684, Sept. 2015.
- RIBEIRO, Gustavo Lins. **Tecnotopia versus tecnofobia: o mal-estar no século XXI**. Brasília: Departamento de Antropologia - UnB, 1999. (Série Antropologia, n. 248)
- RICHARDSON Electronics. **Products: electron tubes & vacuum devices**. Disponível em <<https://www.relltubes.com/products.html>>. Acesso em 3 set 2019.
- RICHARDSON, O. W. **Nobel lecture**, december 12, 1929. Disponível em <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1928/richardson/lecture/>>. Acesso 8 nov. 2019.
- RICHARDSON, O. W. **The emission of electricity from hot bodies**. London: Longmans, Green and Co., 1916.

- RITTER experiment, The. **Caltech/NASA/IPAC Cool Cosmos**, on line, [2013]. Disponível <http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/classroom_activities/ritter_experiment.htm> Acesso em 10 dez. 2019.
- RIVE, Auguste de la. Sur l'eclairage des mines au moyen de la lampe électrique. **Comptes Rendus... Académie des Sciences**, Paris, t. 21, p. 634-635, set. 1845.
- RIVE, Auguste de la. **Traité d'électricité théorique et appliquée**. Tome deuxième. Genève: Joel Cherbuliez, 1856.
- ROHLING, Hermann. From Huelsmeyer's telemobiloskop to the digital radar. EUMA. European Radar Conference (EURAD), 11, Rome, 5-10 oct. 2014. **Proceedings...** Louvain-la-Neuve: European Microwave Association, 2014. p. 33-36.
- ROJAS, Raúl; HASHAGEN, Ulf (ed.). **The first computers: history and architectures**. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- ROSING, Boris. **Patent US 1.161.734**: art of electric telescoping. Washington: United States Patent Office, apr. 1915. (filed apr. 1911)
- ROUANET, Sergio Paulo. **Mal-estar na modernidade: ensaios**. São Paulo: Companhia das Letras, 1993.
- RUE, Warren de la; MÜLLER, Hugo W. Experimental researches on the electric discharge with the chloride of silver battery: part II: the discharge in exhausted tubes. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, part 1, v. 169, p. 155-241, 1878.
- RUSSIAN Virtual Computer Museum. Em <<http://www.computer-museum.ru/english/>>. Acesso em 15 dez. 2019.
- RUTHERFORD, Ernest. Uranium radiation and the electrical conduction produced by it. **Philosophical Magazine and Journal of Science**, London [Edinburgh and Dublin], ser. 5, v. 47, n. 284, p. 109-163, jan.-june 1899.
- RVC. **Tube production**. <http://www.jproc.ca/marconi/tube_production.html>. 3 set 2019.
- RYDER, John D.; FINK, Donald G. **Engineers & electrons: a century of electrical progress**. New York: IEEE Press, 1984.
- SAGE: the first national air defense network. Disponível em <<https://www.ibm.com/ibm/history/ibm100/us/en/icons/sage/>>. Acesso em 15 dez. 2019.
- SAMUEL, Arthur L. **Patent US 2.063.342**: electron discharge device. Washington: United States Patent Office, dec. 1936. (filed dec. 1934)
- SANTOS, Milton. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. 4. ed. São Paulo: EDUSP, 2006.
- SARKAR, Tapan K. et al. **History of wireless**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- SCHMID, Rudolf. Max Dieckmann: Hochfrequenzforschung in München, Gräfelfing und Oberpfaffenhofen [Pesquisa de alta frequência em Munique, Graefelfing e Oberpfaffenhofen]. **Verein Deutscher Ingenieure** [Assoc. Engenheiros Alemães], München, 12 feb. 2015.
- SCHOTTI, Gasparis [Gaspar Schott]. **Mechanica hidraulico-pneumatica**. Frankfurt am Main: Sumpt. hered. Joannis Godefridi Schönwetteri, 1658.
- SEGRÈ, Emilio. **From falling bodies to radio waves: classical physics and their discoveries**. New York: W H. Freeman, 1984.
- SELIGER, Howard H. Wilhelm Conrad Röntgen and the glimmer of light. **Physics Today**, p.

25-31, nov. 1995.

SERRA, Isabel; VIEGAS, Francisca; MAIA, Elisa. **Electron: a main actor in scientific controversies**. International Conference of the European Society for the History of Science, 3., Austrian Academy of Sciences, Vienna, 2008. Em <http://www.fisica-e-quimica-napolitecnica.org/03ARTIGOS/artigos/11_VIENA_SERRA_2008.pdf>. 3 set 2019.

SETHI, Anand Kumar. **The business of electronics: a concise history**. Nova York: Palgrave Macmillan, 2013.

SHAMPO, Marc A.; KYLE, Robert A.; STEENSMA, David P. Hans Geiger: german physicist and the Geiger counter. **Mayo Clin. Proc.**, online, v. 86, n. 12, p. e54, dec. 2011. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3228631/pdf/mayoclinproc_86_12_022.pdf>. Acesso em 3 set 2019.

SHAPIN, Steven; SCHAFFER, Simon. **Leviathan and the air-pump: Hobbes, Boyle, and the experimental life**. Princeton: University Press, 1985.

SHEA, William R. **Designing experiments & games of chance: the unconventional science of Blaise Pascal**. Canton: Science History Publications, 2003.

SHIERS, George. Ferdinand Braun and the cathode ray tube. **Scientific American**, New York, v. 230, n. 3, p. 92-101, march 1974.

SHIERS, George. The first electron tube. **Scientific American**, New York, v. 220, n. 3, p. 104-112, mar. 1969.

SHIERS, George. The induction coil. **Scientific American**, New York, v. 224, n. 5, p. 80-87, may 1971.

SHIERS, George; SHIERS, May. **Early television: a bibliographic guide to 1940**. New York: Garland, 1997.

SIBLEY, L. **Tube lore: a reference for users and collectors**. Flemington: L. Sibley, 1996.

SILVA, Leonardo de Jesus. Um problema historiográfico: a representação historiadora entre o historicismo e o narrativismo. **Expedições: Teoria da História & Historiografia**, Morrinhos, a. 3, n. 4, p. 101-114, jul. 2012.

SILVA, Luiz Sérgio Duarte da. Rösen e Ankersmit. **Intelligere, Revista de História Intelectual**, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 54-59, 2017.

SILVA, Rogério Chaves da. Resenha: Rösen, Jörn. Reconstrução do passado – Teoria da história II... **História em Reflexão**, Dourados, v. 3, n. 5, p. 1-9, jan.-jun. 2009.

SKOLNIK, Merrill I. **Introduction to radar systems**. New York: McGraw-Hill, 1962.

SLAC (The Stanford Linear Accelerator Center). Disponível em <<https://www.slac.stanford.edu/gen/grad/GradHandbook/slac.html>>. Acesso em 15 dez. 2019.

SLEPIAN, Joseph et al. **Patent US 2.069.283: electric arc device**. Washington: United States Patent Office, feb. 1937. (filed July 1932)

SOKOLOWSKI, John et al (ed.). **Summer of simulation: 50 years of seminal computer simulation research**. Cham (Suíça): Springer Nature, 2019.

SOUSA, Joe. **Russian subminiature tubes**. Disponível em <https://www.radiomuseum.org/forum/russian_subminiature_tubes.html>. Acesso 3 set 2019.

SPANGENBERG, Karl R. **Vacuum tubes**. New York: McGraw-Hill, 1948.

SPARAVIGNA, Amelia Carolina. Physics in Carnacki's investigations: the role of new

- scientific discoveries in literature. **International Journal of Literature and Arts**, v. 1, n. 1, p. 11-15, 2013.
- SPEAKING arc and singing arc. **Fondazione Scienza e Tecnica**, Firenze, 2016. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=cCEU3ShVE2E>>. Acesso em 16 out. 2019.
- SPRENGEL, Herman. Researches on the vacuum. **The Journal of the Chemical Society**, London, new series v. 3, p. 9-21, 1865.
- SPUTNIK, 1957. In: **Milestones in the history of U.S. foreign relations**. Disponível em <<https://history.state.gov/milestones/1953-1960/sputnik>> Acesso em 3 set 2019.
- STANFORD Encyclopedia of Philosophy. Em <<https://plato.stanford.edu/entries/descartes-physics/>>. Acesso em 3 set. 2019.
- STEARN history. Disponível em <<https://www.stearn.co.uk/stearn-history-continually-being-made>>. Acesso em 8 nov. 2019.
- STEINMETZ, C. P. **US Patent 914.891**: electrode for arc lights. Washington: United States Patents Office, mar. 1909. (filed feb. 1902)
- STEPANOV, Boris [Борис СТЕПАНОВ]. Primeiro transmissor de satélite [Передатчик первого ИСЗ]. **Radio - sobre comunicação [РАДИО - О СВЯЗИ]**, n. 4, 2013.
- STOCKHOLDERS back Comsat management. **St. Petersburg Times**, St. Petersburg (Florida-US) p. 5-C, sep. 18, 1964.
- STOKES, John W. **70 years of radio tubes and valves**. 2. ed. Chandler-US: Sonoran, 1997.
- STONE, Ellery W. **Elements of radiotelegraphy**. New York: D. van Nostrand, 1919.
- STONE, George Johnstone. Of the “electron”, or atom of electricity. **Philosophical Magazine**, ser. 5, v. 38, p. 418-420, oct. 1894.
- STONE, George Johnstone. On the physical unit of nature. **Philosophical Magazine and Journal of Science**, London [Edinburgh and Dublin], ser. 5, v. 11, n. 69, p. 381-390, may 1881.
- SUSSKIND, Charles. The origin of the term “electronics”. **IEEE Spectrum**, Piscataway, v. 3, n. 5, p. 72-79, may 1966.
- SVETLANA. **Principais eventos da história do PJSC “Svetlana”** [Главные события истории ПАО «Светлана»]. Disponível em <<http://www.svetlanajsc.ru/ru/about/history>>. Acesso em 3 set. 2019.
- SWAN, Joseph W. **Patent US 233.445**: electric lamp. Washington: United States Patents Office, oct. 1880a. (filed apr. 1880; pat. na Inglaterra em 1879 com o nº 18)
- SWAN, Joseph W. **Patent US 234.345**: electric lamp. Washington: United States Patents Office, nov. 1880b. (filed june 1880)
- SWARTZEL Jr., Karl D. **Patent US 2.401.779**: summing amplifier. Washington: United States Patent Office, july 1946. (filed may 1941)
- SWEDENBORG, Emanuel. **Miscellaneous observations connected with the physical sciences**. Transl. Charles Edward Strut. London: W. Newbery, 1847. (A new construction of air-pump, worked by mercury, p. 64-65; plate VII, pos p. 64.)
- SWORDS, S. S. **Technical history of the beginnings of radar**. London: IET, 2008.
- SYLVANIA. Voltage regulator tubes. **Sylvania News**, Emporium, v. 10, n. 2, p. 1, jan.-feb. 1943.

SYLVANIA News. Volume 17. Emporium: Sylvania, jan.-dec. 1950.

SZEIFERT, Karl-Heinz. **Arthur Wehnelt und sein Zylinder**. Em <<https://www.mta-r.de/blog/wehnelt/>>. Acesso em 3 set 2019 [Sziefert é um médico radiologista alemão atual]

TABELA de equivalências watts/lúmens. Disponível em <https://www.hcm.pt/UserFiles/Image/Noticias/tabela_equivalencias_LED.pdf> Acesso em 8 nov. 2019.

TAYLOR, Theodore B. Proliferation of nuclear weapons. Disponível em <<https://ee.stanford.edu/~hellman/Breakthrough/book/pdfs/taylor.pdf>>. 13 dez. 2019.

TELEVISÃO. Disponível em <<https://www.electronica-pt.com/tv-eletronica>>. 3 set. 2019.

TESLA, Nikola. **Experiments with alternate currents of high potential and high frequency**: a lecture delivered before the Institution of Electrical Engineers, London. New York: W. J. Johnston, 1892.

TESLA, Nikola. **Patent US 613.809**: method of and apparatus for controlling mechanism of moving vessels or vehicles. Washington: United States Patent Office, nov. 1898. (filed July 1898)

TEST method standard: test methods for electron tubes. Washington: United States Department of Defense, 2001.

TETRODES. Disponível em <https://www.bonavolta.ch/hobby/en/audio/t_bas6.htm>. Acesso em 3 set. 2019.

TH5221 XB4/400 Phanotron. Disponível em <<http://lampes-et-tubes.info/re/re283.php?l=e>>. Acesso em 3 set. 2019.

THACKERAY, When tubes beat crystals: early radio detectors. **IEEE Spectrum**, v. 20, n. 3, p. 64-69, mar. 1983.

THOMPSON, B. J.; ROSE, G. M. Vacuum tubes of small dimensions for use at extremely high frequencies. **Proceedings of the Institute of Radio Engineers**, v. 21, n. 12, p. 1707-1721, dec. 1933.

THOMPSON, Silvanus P. The influence machine, from 1788 to 1888. **Journal of the Society of Telegraph-Engineers and Electricians**, v. 17, n. 74, p. 569-628, 1888.

THOMSON, George. An unfortunate experiment: Hertz and the nature of cathode rays. **Notes and Records of the Royal Society of London**, v. 25, n. 2, p. 237-242, dec. 1970.

THOMSON, Joseph John. Cathode-rays. **Philosophical Magazine**, London, ser. 5, v. 44, p. 293-316, 1897.

THOMSON, Joseph John. **Electricity and matter**. New York: Charles Scribner's Sons, 1904.

THROWER, Keith. Technical factors affecting CW radio communication in WW1. In: **Innovating in combat...** Leeds: University of Leeds; Oxford: Museum of the History of Science, 2014.

THYRATRON. Em <<https://www.radartutorial.eu/08.transmitters/Thyratron.en.html>>. Acesso em 3 set 2019.

TIKU, Deepak. DC power transmission: mercury-arc to thyristor HVdc valves. **IEEE Power & Energy Magazine**, mar.-apr. 2014. Em <<https://magazine.ieee-pes.org/marchapril-2014/history-12/>>. Acesso em 8 nov. 2019.

TOSHIBA. **Products**. Disponível em <<http://www.hokuto.co.jp/eng/products/index.htm>>.

Acesso em 16 set. 2019.

TRAVELING-wave tube. Em <<https://www.britannica.com/technology/traveling-wave-tube>>. Acesso em 16 set. 2019.

TRIGATRON. Disponível em <<https://www.wikiwand.com/en/Trigatron>>. 16 set. 2019.

TUFTS, Marshall. **Principles of natural and metaphysical philosophy**. Cambridge: Hilliard & Brown, 1829.

TUNEON. Disponível em <https://www.radiomuseum.org/tubes/tube_tuneon.html>. Acesso em 8 nov. 2019.

TWEEDIE, Andrew Ian (ed.). **Grace's guide to British industrial history: Ericsson Telephones**. Disponível em <https://gracesguide.co.uk/Ericsson_Telephones>. 3 set 2019.

TYNE, Gerald F. J. **Saga of the vacuum tube**. Berkeley: Prompt, 1994.

US Department of Defense. **Non-lethal weapons program** > Resources > Frequently Asked Questions > Active Denial System FAQs. Disponível em <<https://jnlwp.defense.gov/>>. Acesso em 16 set. 2019.

US Electric Lighting Company. **Illustrated catalogue**. New York, 1882.

US. Department of Defense. **Test method standard: test methods for electron tubes. MIL-STD-1311C**. Washington: United States Department of Defense, 2001.

USDA. **Ownership of household amenities among selected countries**. Disponível em <www.ers.usda.gov/media/9393/householdamenities.xls>. Acesso em 3 set 2019.

VACUUM Tubes in the IBM 701. Em <<http://www.columbia.edu/cu/computinghistory/701-tubes.html>>. Acesso em 15 dez. 2019.

VACUUM tubes: for use with amateur radio telephone transmitting equipments. 2. ed. New York: Western Electric Company, 1933.

VALEUR, Bernard; BERBERAN-SANTOS, Mário N. A brief history of fluorescence and phosphorescence before the emergence of quantum theory. **Journal of Chemical Education**, Washington, v. 88, n. 6, p. 731-738, 2011.

VALONE, Thomas. **Harnessing the wheelwork of nature: Tesla's science of energy**. [S.l.]: Adventures Unlimited, 2002.

VALVE technology timeline. In: **The valve museum**. Disponível em <www.r-type.org/static/time01.htm>. Acesso em 29 ago. 2019.

VÁLVULA termiônica. Disponível em <https://pt.wikipedia.org/wiki/Válvula_termiônica>. Acesso em 29 ago. 2019.

VÁLVULAS termiônicas. Disponível em <<http://www.amplificadores.com.br/Texto%20para%20publica%E7%E3o/Teoria%20de%20v%E1lvulas%20eletr%F4nicas.pdf>>. Acesso em 29 ago. 2019.

VEGETABLE parchment - papyrine. **The American Journal of Science and Arts**, New Haven, ser. 2, v. 29, n. 86, p. 278-280, may 1860.

VENDIK, Orest. Significant contribution to the development of wireless communication by professor Alexander Popov. **IEEE Communications Magazine**, v. 48, n. 10, p. 20-26, nov. 2010.

VERMEULEN, Dirk J. The remarkable Dr. Hendrik van der Bijl. **Proceedings of the IEEE**, v. 86, n. 12, p. 2445-2454, dec. 1998.

VIDEO camera tube. Disponível em <https://en.wikipedia.org/wiki/Video_camera_tube>. Acesso em 3 set 2019.

VISÃO além do alcance. Disponível em <<http://ofantasticodafisica.blogspot.com/2012/>>. Acesso em 13 dez. 2019.

VOLTA, Alexander. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. **Philosophical Transactions**, London, part 2, p. 403-431, 1800.

WAARD, Cornelis de. **L'expérience barométrique**: ses antécédents et ses explications: étude historique. Thouars: Imprimerie Nouvelle, 1936.

WAY, John Thomas. Improvements in obtaining light by electricity, and in employing light so obtained for lighthouses and for giving signals: patent n. 1258. In: **Specifications of inventions...**, London, Patent Office, v. 14 (n. 1162-1271), p. 625-636, 1857.

WEAF Radio: the Western Electric station which created the concept of a broadcast network. Em <<http://foxfact.blogspot.com/2015/04/weaf-radio-western-electric-station.html>>. Acesso em 3 set 2019.

WEIK, Martin H. **A third survey of domestic electronic digital computing systems**. Aberdenn: United States Department of Commerce, 1961.

WEISBUCH, Claude. Historical perspective on the physics of artificial lighting. **Comptes Rendus Physique**, Paris, v. 19, n. 3, p. 89-112, mar. 2018.

WEISER, Martin. Geitel, Hans. **Neue Deutsche Biographie**, München, v. 6, p. 164, 1964. [versão online: <<https://www.deutsche-biographie.de/pnd118538284.html#ndbcontent>>, acesso em 10 dez. 2019, trad. feita pelo site]

WEISSLER, G. L.; CARLSON, R. W. **Vacuum physics and technology**. New York: Academic Press, 1979.

WELLMAN, William R. **Elementary industrial electronics**. 2. ed. Princeton: D. van Nostrand, 1957.

WELSH peanut tube WT501 (gridless triode). Em <<http://lampes-et-tubes.info/rt/rt151.php?l=e>>. Acesso em 3 set 2019.

WENDT, Gerald. The why and how of I.G.Y. **Unesco Courier**, Paris, a. 10, n. 9, p. 4, sep. 1957.

WHITAKER, Jerry C. **Power vacuum tubes handbook**. 3. ed. Boca Raton: CRC - Taylor & Francis Group, 2012.

WHITE, W. C. Early history of industrial electronics. **Proceedings of the IRE**, New York, v. 50, n. 5, p. 1129-1135, may 1962.

WHITEHEAD, C. C. 100 metres and below: the evolution of the ultra-short wave. **Wireless World**, Birmingham, v. 32, n. 17[713], p. 304-307, apr. 28, 1933.

WHITTAKER, Edmund Taylor. **A history of the theories of aether and electricity**. Dublin: Longman, Green and Co, 1910.

WIEN, Karl. 100 years of ion beams: Willy Wien's canal rays. **Brazilian Journal of Physics**, Osasco, v. 29, n. 3, p. 401-414, set. 1999.

WILLIAMS, L. Pearce. **Michael Faraday**. Last updated 18 sept. 2019. Disponível em <<https://www.britannica.com/biography/Michael-Faraday>>. Acesso em 24 out. 2019.

WILSON, w. A new type of high power vacuum tube. **Bell System Technical Journal**, New

York, v. 1, n. 1, p. 4-17, July 1922.

WINSECK, Dwayne R.; PIKE, Robert M. **Communication and empire**. Durham: Duke University Press, 2007.

WOOD, James. **History of international broadcasting**. v. 1. Reprint. London: Institution of Engineering and Technology, 2008.

WOODWARD, Henry; EVANS, Mathew. **Woodward & Evans' electric light**: patent CA 3738, 1874. Disponível em <<https://torontoist.com/2013/02/toronto-invents-the-incandescent-light-bulb/>>. Acesso em 8 nov. 2019.

WRIGHT, A. G. **The photomultiplier handbook**. Oxford: University Press, 2017.

WYATT, Allan (org.). **The Valve Museum**: classified index menu. Disponível em <<http://www.r-type.org/inx/main-inx.htm>>. Acesso em 3 set. 2019.

YERGEY, Alfred L.; YERGEY, A. Karl. Preparative scale mass spectrometry: a brief history of the calutron. **Journal of the American Society for Mass Spectrometry**, v. 8, n. 9, p. 943-953, sep. 1997.

ZAK, Anatoly. Design of the first artificial satellite of the Earth. **Russian Space Web: Chronology: The 20th century: 1957, oct. 4: simplest satellite**. Last update 2017. Disponível em <<http://www.russianspaceweb.com/index.html>>. Acesso em 13 dez. 2019. [jornalista russo especializado em história da exploração espacial]

ZAK, Anatoly. The “K” project: soviet nuclear tests in space. **The Nonproliferation Review**, Monterey, v. 13, n. 1, p. 143-150, mar. 2006.

ZENNECK, J. **Wireless telegraphy**. New York: McGraw-Hill, 1915.

ZWORYKIN, Vladimir Kosma. **Patent US 2.141.059**: television system. Washington: United States Patent Office, dec. 1938. (filed dec. 1923)

ZWORYKIN, Vladimir Kosma. **Smithsonian Institution Archives**, Washington, Accession 90-105, Science Service Records, Image No. SIA2010-1667. Black-and-white photograph, 1934. <https://siarchives.si.edu/collections/siris_arc_289412>. Acesso em 3 set. 2019.

APÊNDICE

Lista de pessoas citadas, com alguns dados

ABRAHAM, Henri (Paris, 1868 - Auschwitz, 1943) físico francês.
 ADLER, Robert (1913-2007) físico austríaco-estadunidense.
 AIKEN, Howard Hathaway (1900-1973) - engenheiro estadunidense.
 ALEKSEEV, N. F. (séc. XX) - engenheiro soviético (russo).
 ALEXANDERSON, Ernst F. W. (1878-975) - engenheiro sueco-estadunidense.
 ALPERT, D. (séc. XX) - coinventor, com Bayer, do manômetro de catodo quente.
 AMPÈRE, André-Marie (1775-1836) - matemático e físico francês.
 ANTINORI, V. (séc. XIX) - pesquisador amador em Florença (1821).
 APLETON, Edward Victor (1892-1965) - físico inglês.
 ARCHEREAU, Henri Adolphe (1819-1893) - físico e químico francês.
 ARCO, Georg Graf von (1869-1940) - físico alemão.
 ARDENNE, Manfred von (1907-1997) - físico alemão.
 ARISTÓTELES (384 AEC - 322 AEC) - filósofo grego.
 ARMSTRONG, Edwin (1890-1954) - engenheiro estadunidense.
 ARNOLD, Harold De Forest (1883-1933) - físico estadunidense.
 ARONS, Martin Leo (1860-1919) - físico alemão.
 ASTON, Francis (1877-1945) - físico e químico inglês.
 ATANASOFF, John Vincent (1903-1995) - matemático estadunidense.
 AYRTON, Herta Marks (1854-1923) - engenheira e matemática inglesa.
 AYRTON, William Edward (1847-1908) - físico e engenheiro inglês.
 BABBAGE, Charles (1791-1871) - engenheiro, matemático e inventor inglês.
 BABO, Lambert Heirich von (1818-1899) - químico alemão.
 BAEYER, Otto von (1877-1946) - físico alemão.
 BAIRD, John Logie (1888-1946) - engenheiro escocês.
 BAKMETYEV, P. I. (séc. XIX) - inventor russo.
 BALDWIN, Frank (1879-1949) - físico estadunidense.
 BARDEEN, John (1908-1991) - físico estadunidense.
 BARDI, Girolamo de (séc. XIX) - diretor do Museu de Florença (1821).
 BARKHAUSEN, Heinrich Georg (1881-1956) - físico alemão.
 BARNETT, Miles (1901-1979) - físico e meteorologista neozelandês.
 BAUDOT, Jean Maurice Émile (1845-1903) - engenheiro francês.
 BAYARD, R. T. (séc. XX) coinventor, com Alpert, do manômetro de catodo quente
 BECQUEREL, Alexandre Edmond (1820-1891) - físico francês; v. Antoine Becquerel.
 BECQUEREL, Antoine Henri (1852-1908) - físico francês; filho de Alexandre Becquerel.
 BELL, Alexander Graham (1847-1922) - inventor escocês-estadunidense.
 BENOIT, Camille (séc. XIX) - médico francês.
 BERRY, Clifford Edward (1918-1963) - engenheiro estadunidense.
 BERTI, Gasparo (c. 1600-1643) - físico, matemático e astrônomo italiano.
 BIGUET, Jacques (1880-?) - físico francês.
 BIJL, Hendrik van der (1887-1948) - engenheiro sul-africano.
 BJERKNES, Vilhelm (1862-1951) - físico e meteorologista norueguês.
 BLONDEL, André Eugène (1863-1938) - engenheiro e físico francês.
 BOHR, Niels (1885-1962) - físico dinamarquês.
 BOLTZMANN, Ludwig (1844-1906) - físico austríaco.
 BOOT, Harry (1917-1983) - físico inglês.
 BOSE, Jagadish Chandra (1858-1937) - físico e biólogo indiano.
 BOWEN, Edward George (1911-1991) - físico galês.
 BOYLE, Robert (1627-1691) - químico e físico irlandês.
 BRANLY, Édouard Eugène Désiré (1844-1940) - físico francês.
 BRATTAIN, Walter Houser (1902-1987) - físico estadunidense.

BRAUN, Karl Ferdinand (1850-1918) - físico alemão.
BREIT, Gregory (1899-1981) - físico ucraniano-estadunidense.
BREMER, Hugo (1869-1947) - industrial e inventor alemão.
BROGLIE, Louis Victor Pierre de (182-1987) - físico francês.
BROWN, Sidney George (1873-1948) - engenheiro e empresário inglês.
BROWN, William C. (1916-1999) - engenheiro estadunidense.
BRUSH, Charles Francis (1849-1929) - empreendedor e inventor estadunidense.
BUCKLEY, Oliver Ellsworth (1887-1959) - engenheiro estadunidense.
BUFF, Heinrich (1805-1878) - físico e químico alemão.
BULL, Cabot S. (séc. XX) - engenheiro inglês.
BUNSEN, Robert Wilhelm Eberhard von (1811-1899) - químico alemão.
BUSH, Vannevar (1890-1974) - engenheiro estadunidense.
CALLAN, Nicholas (1799-1864) - cientista natural irlandês.
CAMPBELL, George Ashley (1870-1954) - engenheiro estadunidense.
CAMPBELL-SWINTON, Alan Archibald (1863-1930) - engenheiro escocês.
CAREY, George R. (1851-1906) - pesquisador estadunidense.
CARTY, John Joseph (1861-1932) - engenheiro estadunidense.
CAVALLO, Tiberio (1749-1809) - inventor italo-inglês.
CHANGY, Charles de (1817-?) - engenheiro francês.
CHAPPE, Claude (1763-1805) - físico francês.
CHILDREN, John George (1777-1852) - químico e biólogo inglês.
COCKCROFT, John (1897-1967) - físico inglês.
COLPITTS, Edwin Henry (1872-1949) - engenheiro estadunidense.
CONRAD, Frank (1874-1941) - engenheiro e pioneiro radiodifusor estadunidense.
COOKE, William Fothergill (1806-1879) - inventor escocês.
COOLIDGE, William David (1873-1975) - físico estadunidense.
COOPER HEWITT - v. Hewitt.
COPÉRNICO, Nicolau (1473-1543) - matemático e astrônomo polonês.
COULOMB, Charles Augustin de (1736-1806) - físico francês
CRAGGS, J. D. (séc. XX) - engenheiro inglês.
CRAWFORD, William W. (séc. XX) - engenheiro estadunidense.
CROOKES, William (1832-1919) - químico e físico inglês.
CURIE, Marie Sklodowska (1867-1934) - física polonesa-francesa.
CURIE, Pierre (1859-1906) - físico francês.
DALTON, John (1766-1844) - físico e químico inglês.
DANIELL, John Frederic (1790-1845) - químico e físico inglês
DAVY, Humphry (1778-1829) - químico inglês.
DE FOREST - v. Forest.
DE LA RIVE - v. Rive.
DELEUIL, Louis Joseph (1795-1862) - engenheiro francês.
DEMÓCRITO (c. 460 AEC - 370 AEC) - filósofo grego.
DESAGULIERS, Jean Theophilus (1683-1744) - filósofo franco-inglês.
DESCARTES, René (1596-1650) - matemático e filósofo francês.
DIECKMANN, Max Wilhelm Friedrich (1882-1960) - engenheiro alemão.
DIRAC, Paul (1902-1984) - físico inglês.
DRAPER, John (1811-1882) - físico estadunidense.
DU FAY - v. Fay.
DUBOSCQ, Louis Jules (1817-1886) - fabricante de instrumentos científicos francês.
DUCRETET, Eugène Adrien (1844-1915) - fabricante de instrumentos científicos francês.
DUDDELL, William DuBois (1872-1917) - físico e engenheiro inglês.
DUMAS, Alphonse (séc XIX) - engenheiro francês.
DUMONT, Allen Balcom (1901-1965) - engenheiro estadunidense.
DUNWOODY, Henry Harrison Chase (1842-1933) - engenheiro militar estadunidense.
DUSHMAN, Saul (1883-1954) - físico e químico russo-estadunidense.
EDISON, Thomas Alva (1847-1931) - empresário e inventor estadunidense.

EINSTEIN, Albert (1879-1955) - físico germano-estadunidense.
ELSTER, Julius (1854-1920) - físico alemão.
ELWELL, Cyril Frank (1884-1963) - engenheiro australo-estadunidense.
EMPÉDOCLES (490 AEC - 430 AEC) - filósofo grego.
ENGBERG, Wilhelm (séc. XX) - inventor alemão.
ERBSLÖH, Paul-Günther (1905-2002) - engenheiro alemão.
ETTEN, Herbert (?-1958) - engenheiro estadunidense.
EVANS, Mathew (séc. XIX) - inventor canadense; parceiro de Woodward (v.).
FARADAY, Michael (1791-1867) - físico e químico inglês.
FARMER, Moses Gerrish (1820-1893) - engenheiro estadunidense.
FARNSWORTH, Philo Taylor (1906-1971) - técnico e inventor estadunidense.
FAY, Charles François de Cisternay du (1698-1739) - químico francês.
FERRIÉ, Gustave Auguste (1868-1932) - engenheiro militar francês.
FESSENDEN, Reginald (1866-1932) - técnico canadense-estadunidense.
FITZGERALD, George Francis (1851-1901) - físico irlandês.
FLEMING, John Ambrose (1849-1945) - engenheiro inglês.
FLEUSS, Henry Albert (1851-1933) - engenheiro inglês.
FLOWERS, Thomas Harold (1905-1998) - engenheiro inglês.
FOCH, Ferdinand Jean Marie (1851-1929) - general francês que comandou a *Triplíce Entente*.
FOREST, Lee de (1873-1961) - técnico, inventor e empresário estadunidense.
FOULCAULT, Jean Bernard Léon (1819-1868) - físico e astrônomo francês.
FOURCROY, Antoine François de (1755-1809) - químico francês.
FRIEDMAN, Herbert (1916-2000) - físico estadunidense.
FULLER, Leonard Franklin (1890-1987) - engenheiro estadunidense.
GAEDE, Wolfgang Max Paul (1878-1945) - físico alemão.
GAGARIN, Yuri Alekseievitch (1934-1968) - piloto militar e astronauta russo.
GALE, Leonard Dunnell (1800-1883) - químico estadunidense.
GALILEI, Galileu (1564-1642) - físico, matemático e astrônomo italiano.
GALLETTI, Roberto Clemens (1879-1932) - engenheiro ítalo-francês.
GAPONOV-GREKHOV, Andrei Viktorovich (1926-) - físico russo.
GASSIOT, John Peter (1797-1877) - empresário e cientista amador inglês.
GAUGAIN, Jean Mothée (1810-1880) - engenheiro francês.
GAUSS, Carl Friedrich (1777-1855) - físico, matemático e astrônomo alemão.
GAZZERI, G. (séc. XIX) - professor de química em Florença.
GEIGER, Johannes (Hans) Wilhelm (1882-1945) - físico alemão.
GEISSLER, Heinrich (1814-1879) - fabricante alemão de material científico.
GEITEL, Hans Friedrich (1855-1923) - físico alemão.
GERDIEN, Hans (1877-1951) - físico alemão.
GIBBS, Josiah Willard (1839-1903) - engenheiro estadunidense.
GILBERT, William (1544-1603) - médico inglês.
GILL, E. W. B. (séc. XX) - inventor inglês.
GIMINGHAM, Charles Henry (1853-1890) - mecânico e vidreiro inglês.
GINTL, Julius Wilhelm (1804-1883) - físico austríaco.
GLAGE, Gustav (séc. XX) - engenheiro alemão.
GOLDSTEIN, Eugen (1850-1930) - físico alemão.
GOODALL, William M. (séc. XX) - engenheiro estadunidense.
GRAAFF, Robert Jemison van de (1901-1967) - físico e inventor estadunidense.
GRAMME, Zénobe Théophile (1826-1901) - engenheiro belga.
GRAY, Elisha (1835-1901) - engenheiro estadunidense.
GRAY, Stephen (1666-1736) - físico e astrônomo amador inglês.
GREEN, George (1793-1841) - matemático e físico inglês.
GROVE, William Robert (1811-1896) - pesquisador galês.
GUERICKE, Otto von (1602-1686) - matemático e engenheiro alemão.
GUTHRIE, Frederick (1833-1886) - físico e químico inglês.
GUTTON, Henri (1905-1984) - inventor francês.

HAEFF, Andrei Vasily (1905-1990) - engenheiro russo.
HANSEN, William Webster (1909-1949) - físico estadunidense.
HARRIS, William Snow (1791-1867) - médico e pesquisador inglês.
HARTREE, Douglas Rayner (1897-1958) - físico e matemático inglês.
HAUKSBEE, Francis (1660-1713) - cientista inglês.
HEAVISIDE, Oliver (1850-1925) - engenheiro e matemático inglês.
HEIL, Agnessa Arsenyeva (séc. XX) - física russa.
HEIL, Oskar (1908-1994) - físico alemão.
HEIMAN, Frederic Paul (1939-) - engenheiro estadunidense.
HELMHOLTZ, Hermann Ludwig Ferdinand von (1821-1894) - físico e matemático alemão.
HENLEY, William (séc. XVIII) - inventor inglês.
HENRY, Joseph (1797-1878) - físico estadunidense.
HERSCHEL, William (1738-1822) - astrônomo teuto-inglês.
HERTZ, Heinrich Rudolf (1857-1894) - físico alemão.
HEWITT, Peter Cooper (1861-1921) - engenheiro estadunidense.
HILSCH, Rudolf (1903-1972) - físico alemão.
HITTORF, J. Wilhelm (1824-1914) - físico alemão.
HOFSTEIN, Steven R. (1938-) - engenheiro estadunidense.
HOLLERITH, Herman (1860-1929) - empresário e fabricante de máquinas estadunidense.
HOLLMANN, Hans Erich (1899-1960) físico alemão.
HOLST, Gilles (1886-1968) - físico neerlandês.
HOOKE, Robert (1635-1703) - filósofo natural inglês.
HUGHES, David Edward (1831-1900) - empresário e inventor inglês.
HUGHES, T. V. (séc. XIX) - inventor estadunidense.
HULL, Albert W. (1880 - 1966) - físico estadunidense.
HÜLSMEYER, Christian (1881-1957) - físico e empresário alemão.
HUYGENS, Christiaan (1629-1695) - físico, matemático e astrônomo neerlandês.
IABLOCHKOV, Pavel Nicolaievitch (1847-1894) - engenheiro russo.
ITO, Yoji (1901-1955) - engenheiro japonês.
JACKSON, Henry Bradwardine (1855-1929) - engenheiro militar inglês.
JEWETT, Frank Baldwin (1879-1949) - engenheiro e físico estadunidense.
JOBARD, Marcellin (1792-1861) - litógrafo e inventor belga.
KAUFMANN, Walter (1871-1947) - físico alemão.
KELLY, Mervin Joe (1895-1971) - físico estadunidense.
KELVIN, Lorde - v. Thomson, William.
KENNEDY, John Fitzgerald (1917-1963) - presidente dos Estados Unidos.
KENNELLY, Arthur Edwin (1861-1939) - engenheiro estadunidense.
KEPLER, Johannes (1571-1630) - matemático e astrônomo alemão.
KILBURN, Tom (1921-2001) - engenheiro inglês.
KILBY, Jack St. Clair (1923-2005) - engenheiro estadunidense.
KING, Edward Augustin (?-1863) - empreendedor estadunidense ligado a Starr (v.).
KINNERSLEY, Ebenezer (1711-1778) - cientista e inventor inglês.
KLEIN, Felix Christian (1849-1925) - matemático alemão.
KLEIST, Ewald Georg von (1700-1748) - cientista natural alemão.
KNUDSEN, Martin (1871-1949) - físico dinamarquês.
KOMPFFNER, Rudolf (1909-1977) - físico austríaco-estadunidense.
KONN, S. W. (séc. XIX) - inventor inglês.
KOSLOFF, S. A. (séc. XIX) - inventor russo.
KUBETSKY, Leonid Aleksandrovitch (1906-1959) - físico russo.
KÜHNOLD, Rudolf (1903-1992) - físico alemão.
KURZ, Karl (séc. XX) - físico alemão.
LACASSAGNE, Joseph (c. 1720-1780) - sacerdote católico e químico amador francês.
LAGRANGE, Joseph Louis (1736-1813) - matemático francês.
LAIKA (1954-1957) - cadela russa que viajou no Sputnik 2: primeiro ser vivo a orbitar a Terra.
LANE-FOX-PITT, Saint George (1856-1932) - engenheiro inglês.

LANGMUIR, Irving (1881-1957) - físico e químico estadunidense.
LAPLACE, Pierre Simon de (1749-1827) - matemático, astrônomo e físico francês.
LARMOR, Joseph (1857-1942) - físico e matemático irlandês.
LATIMER, Lewis Howard (1848-1928) - desenhista técnico e inventor estadunidense.
LATTES, César [Cesare Mansueto Giulio] (1924-2005) - físico brasileiro.
LÄUT, Paul (séc. XX) - engenheiro francês.
LAWRENCE, Ernest Orlando (1901-1958) - físico estadunidense.
LEISER, Richard (séc. XX) - engenheiro alemão.
LENARD, Philipp Eduard Anton von (1862-1947) - físico húngaro-alemão.
LEPEL, Egbert von (1881-1941) - engenheiro teuto-estadunidense.
LEUCIPO (séc. V AEC) - filósofo grego.
LÉVY, Lucien (1892-1965) - engenheiro francês.
LIEBEN, Robert von (1878-1913) - físico austríaco.
LILIENFELD, Julius Edgar (1882-1963) - físico austro-húngaro.
LINDENBLAD, Nils E. (c. 1896-1978) - engenheiro sueco-estadunidense.
LINDSAY, James Bowman (1799-1862) - matemático e físico escocês.
LIVINGSTON, Milton Stanley (1905-1986) - físico estadunidense.
LODGE, Oliver Joseph (1851-1940) - físico inglês.
LODYGUINE, Alexandre Nikolayevich (1847-1923) - engenheiro russo.
LOGWOOD, Charles V. (séc. XX) - engenheiro e radioamador estadunidense.
LORENTZ, Hendrik Antoon (1853-1928) físico neerlandês.
LOSEV, Oleg Vladimirovich (1903-1942) - físico russo.
LOWENSTEIN, Fritz (séc. XX) - engenheiro estadunidense.
MAGIOTTI, Raffaello (1597-1656) - matemático, físico e astrônomo italiano.
MALAIROV, D. (séc. XX) engenheiro russo.
MALTER, Louis (séc. XX) - físico estadunidense.
MAN, A. (séc. XIX) - empresário e inventor estadunidense.
MARCONI, Guglielmo Giovanni Maria (1874-1937) - engenheiro italiano.
MARGENTIN, Perh Vilhelm (séc. XVIII) - cientista sueco.
MARSHAL, L. C. (séc. XX) - engenheiro estadunidense.
MATARÉ, Herbert Franz (1912-2011) - físico alemão.
MAXIM, Hiram Stevens (1840-1916) - empresário e inventor estadunidense-inglês.
MAXWELL, James Clerk (1831-1879) - físico e matemático escocês.
MAXWELL, W. (séc. XIX) - inventor estadunidense.
MCCARTY, Francis J. (1888-1906) - inventor estadunidense.
MCGEE, James Dwyer (séc. XX) - engenheiro inglês.
MCLEOD, Herbert (1841-1923) - químico e inventor inglês.
MCNANEY, Joseph T. (séc. XX) - inventor estadunidense.
MEEK, J. M. (séc. XX) - engenheiro inglês.
MEISSNER, Alexander (1883-1958) - engenheiro e físico austríaco.
MESNY, René (1874-1949) - engenheiro militar francês.
MILLIKAN, Robert Andrews (1868-1953) - físico estadunidense.
MOLEYNS [Mullins], Frederick William de (1804-1854) - político e pesquisador amador irlandês.
MOORE, Daniel McFarlan (1869-1933) - engenheiro estadunidense.
MORGAN, John Pierpont (1837-1913) - banqueiro estadunidense.
MORREL, J. H. (séc. XX) - inventor inglês.
MORSE, Samuel Finley Breese (1791-1872) - empreendedor e inventor estadunidense.
MORTON, George Ashmun (1854-1934) - engenheiro estadunidense.
MOURA, Roberto Landell de (1861-1928) - sacerdote católico, cientista e inventor brasileiro.
MUIRHEAD, Alexander (1848-1920) - engenheiro escocês.
MÜLLER, Hugo W.(1833-1915) - químico inglês.
MÜLLER, Walther (1905-1979) - físico alemão.
MULLINS, Frederick William - v. Moleyns.
MUSSCHENBROEK, Pieter van (1692-1761) - matemático neerlandês.
NAKAJIMA, Shigeru (1907-2006) - engenheiro japonês.

NERNST, Walther Hermann (1864-1941) - físico e químico alemão.
NEUMANN, Franz Ernst (1798-1895) - físico, geólogo e matemático alemão.
NEUMANN, John von (1903-1957) - matemático e físico húngaro-estadunidense.
NEWMAN, John Frederick (séc. XIX) - fabricantes inglês de bombas de vácuo.
NEWMAN, Maxwell Herman Alexander (1897-1984) - matemático e criptólogo inglês.
NEWTON, Isaac (1643-1727) - físico, matemático e astrônomo inglês.
NICOLSON, Alexander McLean (1881-1950) - engenheiro estadunidense.
NIPKOW, Paul (1860-1940) - engenheiro alemão.
NOLLET, Floris (1794-1853) - engenheiro, físico e empresário belga; sobrinho-neto de Jean Nollet.
NOLLET, Jean Antoine (1700-1770) - ex-sacerdote católico, filósofo natural francês; v. Floris Nollet.
NOYCE, Robert Norton (1927-1990) - físico estadunidense.
OERSTED, Hans Christian (1777-1851) - físico e químico dinamarquês.
OHL, Russell Shoemaker (1898-1987) - engenheiro estadunidense.
OKABE, Kinjiro (1896-1984) - engenheiro japonês.
ONESTI, Temistocle Calzecchi (1853-1922) - físico italiano.
OWENS, Michael Joseph (1859-1923) - vidreiro e inventor estadunidense.
PAGE, Charles Grafton (1812-1868) - químico e médico estadunidense.
PAPIN, Denis (1647-1712) - físico e inventor francês.
PASCAL, Blaise (1623-1662) - matemático e físico francês; v. Florin Périer.
PEDERSEN, Peder Oluf (1874-1941) - físico e engenheiro dinamarquês.
PENNING, Frans Michel (1894-1953) - físico neerlandês.
PÉRI, François (1870-?) - técnico de rádio militar francês.
PÉRIER, Florin (1605-1672) - advogado francês; cunhado de Blaise Pascal (v.).
PERRIN, Jean Baptiste (1870-1942) químico francês.
PETROV, Vasily Vladimirovich (1761-1834) - físico russo.
PICHON, Paul (séc. XX) - engenheiro francês.
PICKARD, Greenleaf Whittier (1877-1956) - engenheiro estadunidense.
PITÁGORAS (c. 570 AEC - c. 495 AEC) - filósofo e matemático grego.
PIXII, Antoine Hyppolyte (1808-1835) - fabricante francês de instrumentos científicos.
PLANCK, Max Karl Ernst Ludwig (1858-1947) - físico alemão.
PLANTÉ, Raymond Gaston (1834-1889) - físico francês.
PLÜCKER, Julius (1801-1868) - físico e matemático alemão.
POHL, Robert Wichard (1884-1976) - físico alemão.
POINCARÉ, Jules Henri (1854-1912) - matemático e físico francês.
POISSON, Siméon Denis (1781-1840) - matemático e físico francês.
POLUMORDVINOV, A. A. (séc. XIX) - cientista russo.
PONTE, Maurice (1902-1983) - físico francês.
POPOV, Alexander Stepánovich (1859-1906) - físico russo.
POSTHUMUS, Klaas (1902-1990) engenheiro neerlandês.
POULSEN, Valdemar (1869-1942) - engenheiro dinamarquês.
POWELL, Cecil Frank (1903-1969) - físico inglês.
POYNTING, John Henry (1852-1914) - físico inglês.
PREECE, William Henry (1834-1913) - engenheiro galês.
PRIESTLEY, Joseph (1733-1804) - filósofo natural inglês.
PRINCE, David Chandler (1891-1983) - engenheiro estadunidense.
PUPIN, Michael (1858-1935) - físico sérvio-estadunidense.
RANDALL, John (1905-1984) - físico inglês.
RAYLEIGH, Lorde - v. Strut.
REEVES, Alec Harley (1902-1971) - engenheiro inglês.
REIS, Johann Philipp (1834-1874) - professor e cientista autodidata alemão.
REISZ, Eugen (1879-1957) - inventor e fabricante de aparelhos alemão.
RICCI, Michelangelo (1619-1682) - sacerdote católico e matemático italiano.
RICHARDSON, Owen Willans (1879-1959) - físico inglês.
RIGHI, Augusto (1850-1920) - físico italiano.
RIJLANT, Bernard Louis Pierre (1902-1983) - médico cardiologista belga.

RITTER, Johann Wilhelm (1776-1810) - físico alemão.
RIVE, Auguste de la (1801-1873) - engenheiro e físico suíço.
ROBERTS, M. J. (séc. XIX) - inventor inglês.
RODDA, Sidney (séc. XX) - engenheiro inglês.
ROENTGEN - v. Röntgen.
ROGERS, William (séc. XX) - pesquisador estadunidense, parceiro de Langmuir (v.).
RÖNTGEN, Wilhelm C. (1845-1923) - físico alemão.
ROSE, G. M. (séc. XX) - pesquisador estadunidense, parceiro de Browder Thompson (v.).
ROSENTHAL, A. H. (séc. XX) - pesquisador e inventor estadunidense.
ROSING, Boris Lvovich (1869-1933) - físico russo.
ROUND, Henry Joseph (1881-1966) - engenheiro militar inglês.
RUE, Warren de la (1815-1889) - químico e fotógrafo inglês.
RUHMKORFF, Heinrich Daniel (1803-1877) - mecânico alemão.
RUSKA, Ernst (1906-1988) - físico alemão.
RUTHERFORD, Ernest (1871-1937) - físico e químico neozelandês.
SALISBURY, W. W. (séc. XX) - pesquisador e professor estadunidense.
SAMUEL, Arthur Lee (1901-1990) - engenheiro estadunidense.
SANDERS, John Milton (c. 1821-1877) - inventor estadunidense, sócio de Starr (v.).
SAWYER, William Edward (1850-1883) - empreendedor e inventor estadunidense.
SAXTON, Joseph (1799-1873) - mecânico e inventor estadunidense.
SCHOKLEY, William Bradford (1910-1989) - físico e inventor estadunidense.
SCHOTTKY, Walter Hermann (1886-1976) - físico alemão.
SCHRÖDINGER, Erwin Rudolf Josef Alexander (1887-1961) - físico austríaco.
SCHUSTER, Franz Arthur Friedrich (1851-1934), físico teuto-inglês.
SERRIN, Victor Louis Marie (1829-1905) - engenheiro francês.
SHREEVE, Herbert E. (1873-1942) - engenheiro anglo-estadunidense.
SIEMENS, Ernst Werner von (1816-1892) - engenheiro, inventor e empresário alemão.
SLABY, Adolph Karl Heinrich (1849-1913) - engenheiro, matemático e professor alemão.
SLEPIAN, Joseph (1891-1969) - engenheiro estadunidense.
SLOAN, D. H. (séc. XX) - engenheiro estadunidense.
SPERRY, Elmer Ambrose (1860-1930) - empresário e inventor estadunidense.
SPRENGEL, Hermann (1834-1906) - químico alemão.
STAITE, William Edwards (1809-1854) - técnico e inventor inglês.
STAMPALIA, Giovanni Querini (1799-1869) - empreendedor e pesquisador italiano.
STANLEY Jr., William (1858-1916) - físico estadunidense.
STARR, John Wellington (c. 1822-1846) - inventor estadunidense.
STEARN, Charles (séc. XIX) - empresário inglês associado a Swan (v.).
STEARNS, Joseph Baker (1831-1895) - engenheiro e inventor estadunidense.
STEINMETZ, Charles Proteus [Karl A. Rudolf] (1865-1923) - engenheiro teuto-estadunidense.
STOKES, George Gabriel (1819-1903) - matemático e físico irlandês.
STONE, John Stone (1869-1943) - físico e matemático estadunidense.
STONE, George Johnstone (1826-1911) - físico irlandês.
STRAUSS, Sigmund (1875-1942) - engenheiro austríaco-estadunidense.
STRUT, John William, Lorde Rayleigh (1842-1919) - matemático e físico inglês.
STURGEON, William (1783-1850) - físico e inventor inglês.
SWAN, Joseph Wilson (1828-1914) - químico e inventor inglês.
SWARTZEL Jr., Karl Dale (1907-1998) - inventor estadunidense.
SWEDENBORG, Emanuel (1688-1772) - engenheiro e filósofo sueco; inspirador da Nova Igreja.
TALES (c. 624 AEC - 546 AEC) - matemático e filósofo grego.
TEDHAM, William Francis (1902-2000) - físico e inventor inglês.
TELLEGEN, Bernardus Domenicus Hubertus (1900-1990) - engenheiro neerlandês.
TERMAN, Frederick Emmons (1900-1982) - engenheiro estadunidense.
TESLA, Nikola (1856-1943) - engenheiro sérvio-estadunidense.
TESZNER, Stanislaus (séc. XX) - cientista polonês radicado na França.
THÉNARD, Louis Jacques (1777-1857) - químico francês.

THIERS, Rodolphe (séc. XVIII) - inventor e fabricante de instrumentos francês.
THOMPSON, Browder J. (1903-1944) - engenheiro estadunidense.
THOMPSON, Silvanus Phillips (1851-1916) - físico e professor inglês.
THOMSON, Joseph John (1856-1940) - físico e professor inglês.
THOMSON, William, Lorde Kelvin (1824-1907) - matemático irlandês.
TIZARD, Henry Thomas (1885-1959) - químico inglês.
TOOTILL, Geoff C. (1922-2017) - engenheiro inglês.
TÖPLER, August Joseph Ignaz (1836-1912) - físico alemão.
TORRICELLI, Evangelista (1608-1647) - físico e matemático italiano.
TURING, Alan Mathison (1912-1954) - matemático e criptoanalista inglês.
TUVE, Merle Antony (1901-1982) - geofísico estadunidense.
VAIL, Alfred Lewis (1807-1859) - mecânico e inventor estadunidense; v. Theodore Vail.
VAIL, Theodore Newton (1845-1920) - empresário estadunidense; primo de Alfred Vail (v.).
VAN DE GRAAFF - v. Graaff.
VARIAN, Russell Harrison (1898-1959) - físico estadunidense; irmão de Sigurd Varian (v.).
VARIAN, Sigurd Fergus (1901-1961) - piloto de avião estadunidense; v. Russell Varian.
VARLEY, Cromwell Fleetwood (1828-1883) - engenheiro inglês; irmão de Samuel Varley.
VARLEY, Samuel Alfred (1832-1921) - engenheiro inglês; v. Cromwell Varley.
VASCHY, Aimé (1857-1899) - engenheiro francês.
VAUQUELIN, Louis Nicolas (1763-1829) - químico e farmacêutico francês.
VIVIANI, Vincenzo (1622-1703) - matemático e físico italiano, aluno de Galilei (v.).
VOLFKE, M. (séc. XIX) - cientista russo.
VOLTA, Alessandro (1745-1827) - físico italiano.
VYVYAN, Richard Norman (1876-1946) - engenheiro inglês.
WALLACE, William (1825-1904) - inventor e empresário estadunidense.
WALTON, Ernest Thomas Sinton (1903-1995) - físico irlandês.
WAY, John Thomas (séc. XIX) - químico inglês.
WEBER, Wilhelm Eduard (1804-1891) - físico alemão.
WEHNELT, Arthur Rudolph Berthold (1871-1944) - físico alemão.
WEILLER, Lazare (1858-1928) - engenheiro, inventor e empresário francês.
WELKER, Heinrich Johann (1912-1981) - físico alemão.
WELSBACH, Carl Auer von -(1858-1929) - físico e matemático austríaco.
WESTINGHOUSE, George (1846-1914) - engenheiro e empresário estadunidense.
WESTON, Edward (1850-1936) - químico e inventor estadunidense.
WHEATSTONE, Charles (1802-1875) - inventor e fabricante de instrumentos inglês.
WHITE, William Comings (1890-1965) - engenheiro estadunidense.
WHITNEY, Willis Rodney (1868-1958) - químico estadunidense.
WIEN, Max Karl Werner (1866-1938) - físico alemão; primo de Wilhelm Wien (v.).
WIEN, Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz (1864-1928) - físico alemão; v. Max Wien.
WILLIAMS, Frederic Calland (1911-1977) - engenheiro inglês.
WILLISEN, Hans-Karl Herman Edwin Heinrich Freiherr von (1906-1966) - engenheiro alemão.
WILSON, Benjamin (1721-1788) - pintor, impressos e cientista inglês.
WILSON, William (séc. XX) - engenheiro estadunidense.
WOODWARD, Henry (séc. XIX) - inventor canadense parceiro de Evans (v.).
WRIGHT, Thomas (séc. XIX) - inventor inglês.
YOUNG, Owen Daniel (1874-1962) - empresário estadunidense.
ZEEMAN, Pieter (1865-1943) - físico neerlandês.
ZENNECK, Jonathan (1871-1959) - matemático e físico alemão.
ZIMMERMANN, Arthur (1864-1940) - ministro do exterior do Império Alemão.
ZUSE, Konrad (1910-1995) - engenheiro alemão.
ZWORYKIN, Vladimir Kosmich (1888-1982) - engenheiro russo-estadunidense.

ANEXO

Folhas de dados de algumas válvulas

7586

Medium-Mu Triode

NUVISTOR TYPE
For Industrial Applications

GENERAL DATA

Electrical:

Heater, for Unipotential Cathode:

| | | |
|--------------------------------|-----------|-------|
| Voltage (AC or DC) | 6.3 ± 10% | volts |
| Current at 6.3 volts | 0.135 | amp ← |

Direct Interelectrode Capacitances
(Approx.):

| | | |
|--|------|----|
| Grid to plate. | 2.2 | μf |
| Grid to cathode, shell, and heater | 4.2 | μf |
| Plate to cathode, shell, and heater. | 1.6 | μf |
| Plate to cathode | 0.26 | μf |
| Heater to cathode. | 1.4 | μf |

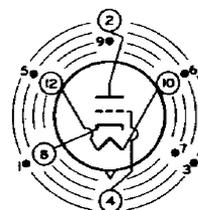
Characteristics, Class A₁ Amplifier:

| | | | | |
|--|------|-------|-------|--------|
| Plate Supply Voltage | - | - | 75 | volts |
| Plate Voltage. | 26.5 | 40 | - | volts |
| Grid Supply Voltage. | 0 | 0 | 0 | volts |
| Cathode Resistor | - | - | 100 | ohms |
| Amplification Factor | 31 | 35 | 35 | |
| Grid-Circuit Resistance. | 0.5 | 0.5 | - | megohm |
| Plate Resistance (Approx.) | 4400 | 3200 | 3000 | ohms |
| Transconductance | 7000 | 11000 | 11500 | μmhos |
| Plate Current. | 2.8 | 6.8 | 10.5 | ma |
| Grid Voltage (Approx.) for plate μa = 10. | - | - | -7 | volts |

Mechanical:

| | | |
|--|--|-------------------|
| Operating Position | | . Any |
| Maximum Overall Length | | 0.800" |
| Maximum Seated Length. | | 0.625" |
| Maximum Diameter | | 0.440" |
| Weight (Approx.) | | 1/15 oz ← |
| Envelope | | Metal Shell MT4 ← |
| Socket | Cinch Mfg. Corp. No. 133 65 10 001, or equivalent | |
| Base | Medium Ceramic-Wafer Twelvar 5-Pin (JEDEC No. E5-65) | |
| Basing Designation for BOTTOM VIEW | | 12AQ |

- Pin 1^a - Internal Connection—
Do Not Use
- Pin 2 - Plate
- Pin 3 - Same as Pin 1
- Pin 4 - Grid
- Pin 5 - Same as Pin 1
- Pin 6 - Same as Pin 1
- Pin 7 - Same as Pin 1
- Pin 8 - Cathode
- Pin 9 - Same as Pin 1
- Pin 10 - Heater
- Pin 12 - Heater



INDEX=LARGE LUG
●=PIN CUT OFF

← Indicates a change.



RADIO CORPORATION OF AMERICA
Electron Tube Division
Harrison, N. J.

DATA 1
5-61



DOUBLE TRIODE

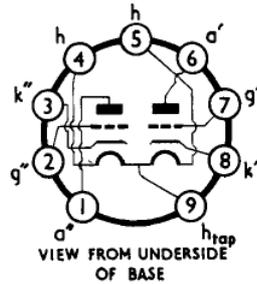
12.6V INDIRECTLY HEATED

PROVISIONAL
B329/12AU7
AUGUST 1955

ISSUE I

The B329/12AU7 is a commercial equivalent of Type CV491

BASE CONNECTIONS AND VALVE DIMENSIONS



Base: B9A
Bulb: Tubular
Max. overall length: 56mm
Max. seated length: 49mm
Max. diameter: 22.2mm

HEATER

| | | | |
|-------|-----|------|---|
| V_h | 6.3 | 12.6 | V |
| I_h | 0.3 | 0.15 | A |

MAXIMUM RATINGS (Each section)

| | | |
|-----------|------|----|
| V_a | 300 | V |
| p_a | 2.75 | W |
| I_k | 20 | mA |
| V_{h-k} | 180 | V |

CAPACITANCES

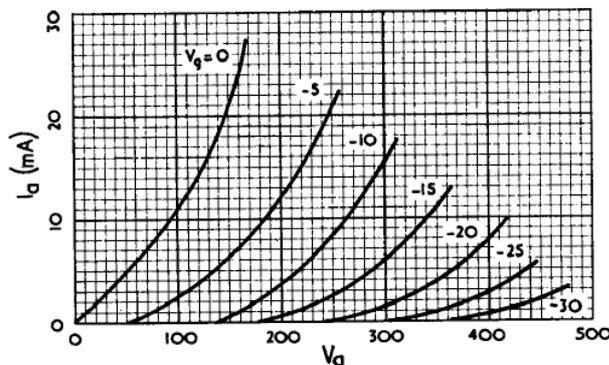
| | | | |
|---------------------------|--------|---------------|--------|
| c_{a-g} (each section): | 1.5pF. | $c_{a'-k'}$ | 0.5pF |
| c_{g-k} (each section): | 1.6pF. | $c_{a''-k''}$ | 0.35pF |

CHARACTERISTICS (Each section)

| | | |
|-------|------|------------|
| V_a | 250 | V |
| I_a | 10.5 | mA |
| V_g | -8.5 | V |
| g_m | 2.2 | mA/V |
| μ | 17 | |
| r_a | 7.7 | k Ω |

TYPICAL OPERATION

| | | |
|------------|-----|------------|
| $V_a(b)$ | 250 | V |
| R_a | 100 | k Ω |
| R_k | 2.7 | k Ω |
| V_{gain} | 12 | |



MARCONI'S WIRELESS TELEGRAPH COMPANY LIMITED

Head Office: Marconi House, Chelmsford · Telephone: Chelmsford 3221 · Telegraphic Address: Expanse, Chelmsford



RECTIFIERS

5

High-Vacuum, Gaseous And Mercury-Vapor Tubes For High-Voltage Rectifier Service

GASEOUS OR MERCURY-VAPOR TYPES

| Type No. | No. of Electrodes | Cathode | | Anode | | | Temp Range Condensed Mercury C | Warranty |
|------------------|-------------------|---------|------|---------------------|----------|----------|--------------------------------|----------|
| | | Volts | Amp | Peak Inverse, Volts | Peak Amp | Avg, Amp | | |
| GL-4832 | 2 | 5.0 | 7.5 | 10,000 | 5.0 | 1.25 | -55-+70* | C-500 |
| GL-266-B | 2 | 5.0 | 30.0 | 22,000 | 40.0 | 10.0 | +30-+40 | C-1000 |
| FG-280 | 2 | 5.0 | 10.0 | 2000 | 40.0 | 6.4 | +40-+80 | H-12 |
| GL-575-A | 2 | 5.0 | 10.0 | 15,000 | 6.0 | 1.5 | +20-+50 | C-1000 |
| GL-673 | 2 | 5.0 | 10.0 | 15,000 | 6.0 | 1.5 | +20-+50 | C-1000 |
| GL-816 | 2 | 2.5 | 2.0 | 7500 | 0.5 | 0.125 | +20-+60 | G-1 |
| GL-857-B | 2 | 5.0 | 30.0 | 22,000 | 40.0 | 10.0 | +30-+40 | C-1000 |
| GL-866-A | 2 | 2.5 | 5.0 | 10,000 | 1.0 | 0.25 | +20-+60 | G-1 |
| GL-869-B | 2 | 5.0 | 19.0 | 20,000 | 10.0 | 2.5 | +30-+40 | C-1000 |
| GL-870-A | 2 | 5.0 | 65.0 | 16,000 | 45.0 | 75.0 | +35-+40 | C-1000 |
| GL-872-A | 2 | 5.0 | 7.5 | 10,000 | 5.0 | 1.25 | +20-+60 | C-1000 |
| GL-5558 FG-32 | 2 | 5.0 | 4.5 | 5000 | 15.0 | 2.5 | +30-+60 | H-12 |
| GL-5561 / FG-104 | 2 | 5.0 | 10.0 | 3000 | 40.0 | 6.4 | +40-+80 | H-12 |
| GL-6930 / 635-P | 2 | 2.5 | 18.0 | 1000 | 77.0 | 6.4 | +35-+100 | H-12 |
| GL-8008 | 2 | 5.0 | 7.5 | 10,000 | 5.0 | 1.25 | +20-+60 | C-1000 |

*Gas-filled tube. Temperature ratings expressed in terms of ambient temperature range over which the tube will operate.



HIGH-VACUUM TYPES

| Type No. | No. of Electrodes | Cathode | | Plate | | | Voltage Drop, Volts | Average Dissipation, Watts | Warranty |
|----------------|-------------------|---------|------|----------------|----------|--------------|---------------------|----------------------------|----------|
| | | Volts | Amp | Max Inv, Volts | Max, Amp | Average, Amp | | | |
| KC-1 | 2 | 9.0 | 32.0 | 100,000 | 1.0 | — | — | — | C-1000 |
| GL-2822 | 2 | 6.3 | 0.75 | 100 | 0.7 | — | 0.02 | — | C-1000 |
| GL-2823 | 2 | 6.3 | 0.3 | 150 | 0.03 | — | — | — | C-1000 |
| 2X2-A | 2 | 2.5 | 1.75 | 12,500 | 0.1 | — | — | — | W-1 |
| KC-3 | 2 | 12.5 | 32.0 | 150,000 | 1.0 | — | — | — | C-1000 |
| GL-3B24 | 2 | 2.5 | 3.0 | 20,000 | 0.15 | 0.03 | — | — | C-1000 |
| | | 5.0 | 3.0 | 20,000 | 0.3 | 0.06 | — | — | |
| SR4-GYA | 3 | 5.0 | 2.0 | 2800 | 0.65† | — | — | — | W-1 |
| FP-400 | 2 | 4.0 | 2.25 | 125 | 0.025 | — | — | — | C-1000 |
| GL-411 | 2 | 10.0 | 14.5 | 100,000 | 0.3 | — | — | 500 | C-1000 |
| GL-836 | 2 | 2.5 | 5.0 | 5000 | 1.0 | 0.25 | 45.0 | — | G-1 |
| GL-1616 | 2 | 2.5 | 5.0 | 5500 | 0.8 | 0.13 | 75.0 | — | G-1 |
| GL-5625 / KC-4 | 2 | 20.0 | 24.5 | 150,000 | 1.0 | — | 4000 | 750 | C-1000 |
| GL-5973 | 2 | 16.0 | 19.1 | 75,000 | 5.0 | — | — | 850 | C-1000 |
| GL-8013-A | 2 | 2.5 | 5.0 | 40,000 | 0.15 | 0.02 | — | 120 | C-1000 |
| | | 5.0 | 6.0 | 40,000 | 0.75 | 0.1 | 200 | — | |
| GL-8020 | 2 | 5.8Δ | — | 12,500Δ | 2.0Δ | — | — | 75Δ | C-1000 |

† Per section. Δ Surge-limiting diode operation.



PHASITRONS

6

Phase-Modulators

| Type No. | Cathode | | Anode, Volts | Deflector, Volts | RF Output, Volts | Frequency For Max Ratings, Kc | Warranty |
|----------|---------|-----|--------------|------------------|------------------|-------------------------------|----------|
| | Volts | Amp | | | | | |
| GL-2H21 | 6.3 | 0.3 | 300 | 100 | 4 | 500 | C-1000 |
| GL-5593 | 6.3 | 0.3 | 300 | 100 | 4 | 250 | C-1000 |



TELEVISION CAMERA TUBES

12

For Use In Television Broadcast Service

| Type No. | Cathode | | Anode Voltage | Photocathode Voltage | Image Size Inches | Warranty |
|-------------------|---------|--------------|------------------------------|--|-------------------|----------|
| | Volts | Current, Amp | | | | |
| GL-5820 | 6.3 | 0.6 | 1350 | -550 | 1.6 Diagonal | C-500 |
| VIDICONS | | | | | | |
| | | | Max Signal-Electrode Voltage | | | |
| GL-6198 | 6.3 | 0.6 | 125 | Magnetic Focus, Magnetic Deflection | | C-500 |
| GL-6326 | 6.3 | 0.6 | 125 | Magnetic Focus, Magnetic Deflection | | C-500 |
| ICONOSCOPE | | | | | | |
| GL-1850-A | 6.3 | 0.6 | 1200 | Electrostatic Focus, Magnetic Deflection | | C-500 |