

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

LEONARDO VAICBERG

O HELICÓPTERO DE SANTOS=DUMONT:
SUAS ORIGENS, SUA VIABILIDADE E OS PRIMÓRDIOS DA AVIAÇÃO DE ASAS
ROTATIVAS

RIO DE JANEIRO

2015

LEONARDO VAICBERG

O HELICÓPTERO DE SANTOS=DUMONT: SUAS ORIGENS, SUA VIABILIDADE E OS
PRIMÓRDIOS DA AVIAÇÃO DE ASAS ROTATIVAS

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 à obtenção do título de Doutor em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia.

Orientador: Henrique Gomes de Paiva Lins de Barros, Ph.D.

RIO DE JANEIRO

2015

CIP - Catalogação na Publicação

V128h Vaicberg, Leonardo
 O helicóptero de Santos=Dumont: suas origens,
 sua viabilidade e os primórdios da aviação de asas
 rotativas. / Leonardo Vaicberg. -- Rio de
 Janeiro, 2015.
 200 f.

 Orientador: Henrique Gomes de Paiva Lins de
 Barros.
 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, 2015.

 1. Alberto Santos Dumont. 2. História da
 Aviação. 3. História das Técnicas. 4. História da
 Aerodinâmica. 5. Helicóptero. I. Gomes de Paiva
 Lins de Barros, Henrique , orient. II. Título.

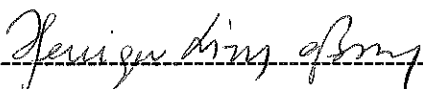
FOLHA DE APROVAÇÃO

Leonardo Vaicberg

O HELICÓPTERO DE SANTOS=DUMONT: SUAS ORIGENS, SUA VIABILIDADE E OS PRIMÓRDIOS DA AVIAÇÃO DE ASAS ROTATIVAS.

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 à obtenção do título de Doutor em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia.

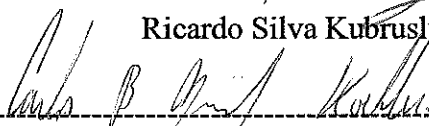
Aprovada em: 15/12/2015



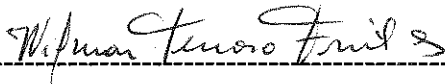
Henrique Gomes de Paiva Lins de Barros, Ph.D., CBPF, HCTE/UFRJ



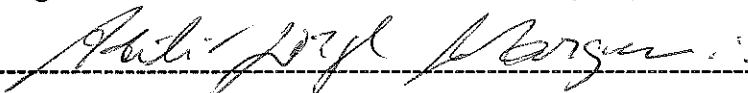
Ricardo Silva Kubrusly, Ph.D., HCTE/UFRJ



Carlos Benevenuto Guisard Koehler, Dr., HCTE/UFRJ



Major-Brigadeiro-do-Ar R1 Wilmar Terroso Freitas, Dr., INCAER/MAER



Adílio Jorge Marques, Dr., UFF



André Bueno, Dr., UERJ

Aos meus pais, ao meu filho, à minha família e à Puá que,
com seu amor desinteressado, dão sentido à minha vida.

AGRADECIMENTOS

Venho de formações diferentes. Ex-oficial da Marinha do Brasil habilitado em eletrônica, piloto de helicópteros e Psicólogo pela UERJ, encontrei no curso de História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia (HCTE) da UFRJ uma verdadeira família, onde pude tentar conciliar minhas formações anteriores com o amor pelas ciências, num ambiente acolhedor e multidisciplinar.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Henrique Lins de Barros, pela orientação precisa, pela paixão a tudo que diga respeito ao voo e pela confiança em mim depositada.

Ao Prof. Carlos Koehler, um legítimo historiador e filósofo da ciência, agradeço pelo enorme conhecimento que transmitiu em suas aulas, onde tudo enfim se ligava, e pela liberdade reinante, onde nossas dúvidas eram sempre sanadas, fossem quais fossem, em um ambiente extremamente saudável e animado. Seu incentivo, sua confiança e sua amizade não têm preço.

Agradeço também ao Prof. Ricardo Kubrusly, que me abriu as portas para o HCTE, pela competência em nos livrar das certezas inúteis aos bons pesquisadores, pelo alto nível de consciência, pelo humor afiado e pelas demonstrações de confiança e amor ao ser humano, o “macaco sem rabo”.

Ao Prof. Adilio Jorge Marques, agradeço pelo exemplo em vários aspectos da vida acadêmica e da vida como um todo, bem como pela clareza de objetivos e pelo constante incentivo oriundo de uma amizade sincera.

Ao Prof. André Bueno, que me ensinou que as antigas (e algumas ainda atuais) religiões carregam em si o germe e a origem da racionalidade, agradeço por fazer-me contactar uma dimensão minha que achava esquecida.

Ao Brigadeiro Terroso, que conheci a bordo do saudoso NAeL Minas Gerais, agradeço a enorme honra por fazer parte da minha banca de doutorado.

Agradeço especialmente ao Prof. Carlos Alberto Lombardi Filgueiras, a quem admiro imensamente, pela generosidade com que transmitia seu conhecimento oceânico e pela forma como incentivava seus alunos. Nunca esquecerei sua máxima para que cumpríssemos os prazos: “num tempo infinito, tudo é possível...”.

Enfim, agradeço aos colegas, hoje amigos, que percorreram comigo este caminho.

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein.

RESUMO

VAICBERG, Leonardo. **O helicóptero de Santos=Dumont: suas origens, sua viabilidade e os primórdios da aviação de asas rotativas**. Rio de Janeiro, 2015. Tese (Doutorado em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia) – Programa de História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Este trabalho mostra a amplitude de visão de Alberto Santos Dumont, herdeiro de Leonardo da Vinci e de Sir George Cayley, que foi capaz de reunir em si as diversas correntes que buscavam a conquista dos ares e de engendrar soluções simples e diretas para os problemas do voo. Algumas destas soluções ele chegou a aplicar a uma interessante concepção de helicóptero na qual, infelizmente, não persistiu, por prioridades pessoais e por deficiências tecnológicas e teóricas da época (i.e. materiais apropriados, motor com boa relação peso-potência e conhecimento da aerodinâmica do rotor). Apresenta, igualmente, a evolução do conceito do voo com asas rotativas e as ideias do célebre inventor, que não ficou preso a apenas um único modelo mental como a maioria dos expoentes de sua época.

Palavras-chave: Alberto Santos Dumont. História da Aviação. História das Técnicas. História da Aerodinâmica. Helicóptero. História.

ABSTRACT

VAICBERG, Leonardo. **O helicóptero de Santos=Dumont: suas origens, sua viabilidade e os primórdios da aviação de asas rotativas.** Rio de Janeiro, 2015. Tese (Doutorado em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia) – Programa de História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

This work shows the breadth of Alberto Santos Dumont's vision, heir of Leonardo da Vinci and Sir George Cayley, who was able to gather in himself the various currents that sought the conquest of the skies and engender simple and straightforward solutions to the problems of flight. Some of these solutions he came to apply to an interesting helicopter design in which, unfortunately, he did not persist, for personal priorities and technological and theoretical shortcomings of the time (i.e. appropriate materials, engine with good power-to-weight ratio and knowledge of the rotor's aerodynamics). It also shows the evolution of the rotary-wing flight concept and the ideas of the famous inventor, who was not tied to a single mental model as most of the exponents of his time.

Keywords: Alberto Santos Dumont. Aviation History. History of Techniques. History of Aerodynamics. Helicopter. History.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: O telegrama dos irmãos Wright para o pai (17 de dezembro de 1903).	18
Figura 1.2: Otto Lilienthal em voo.	19
Figura 1.3: Octave Chanute.	19
Figura 1.4: O Focke-Wulf Fw 61, também conhecido como Focke-Achgelis Fa-61.	26
Figura 1.5: O Sikorsky VS-316, primeiro helicóptero de produção industrial adquirido pelos militares americanos.	27
Figura 2.1: Capa de “Robur, o Conquistador” (1886).	30
Figura 2.2: Os hemisférios de Magdeburg – Gravação de Gaspar Schott (1657).	31
Figura 2.3: Francesco Lana de Terzi e o “barco aéreo”.	32
Figura 2.4: A “Passarola”.	34
Figura 2.5: A utilização do balão na Batalha de Fleurus em 26 de junho de 1794.	36
Figura 2.6: Desenho do primeiro dirigível pelo General Meusnier (1784).	38
Figura 2.7: Visão esquemática do Dirigível de Meusnier.	38
Figura 2.8: O dirigível de Giffard (1852).	40
Figura 2.9: O dirigível de Dupuy de Lôme.	41
Figura 2.10: A “cesta” do balão dirigível dos irmãos Tissandier.	42
Figura 2.11: Gaston Tissandier tornou-se, também, editor de revistas científicas e foi fundador da revista La Nature, em 1873.	43
Figura 2.12: O “La France”.	44
Figura 3.1: Wilhelm Conrad Röntgen e a 1ª radiografia da História.	48
Figura 3.2: Cartaz anunciando o cinematógrafo dos irmãos Lumière (1895).	50
Figura 3.3: Peugeot Tipo 3, construído na França em 1891.	51
Figura 3.4: Peugeot 1898 de 3,5 hp de Santos-Dumont.	52
Figura 3.5: O balão Brasil (1898).	55
Figura 4.1: O triciclo De Dion e o motor em “tandem”.	59
Figura 4.2: Detalhes da motorização e propulsão do Dirigível Nº 1.	60
Figura 4.3: BP0197- Bilhete postal Santos Dumont/Dirigível Nº 1 (1998).	61
Figura 4.4: Válvulas utilizadas por Santos-Dumont para alívio da pressão do H ₂ e do ar, em face de sua expansão e contração em função da altitude.	63
Figura 4.5: O Dirigível Nº 3.	65
Figura 4.6: O primeiro hangar do mundo em Saint-Cloud.	71
Figura 4.7: Aeroestação de Saint-Cloud (1899).	71
Figura 4.8: O percurso do Prêmio Deutsch de la Meurthe: do Aeroclube de France à Torre Eiffel e volta ao ponto de partida, em menos de meia hora.	72
Figura 4.9: O desenho nº 1 mostra escapamento de hidrogênio pela válvula, em função da expansão do gás. No desenho2, o ventilador é usado para inflar o balonete interno, de forma a evitar a dobra do invólucro.	72
Figura 4.10: O Dirigível Nº 4.	73
Figura 4.11: O Dirigível Nº 6.	74
Figura 4.12: O Dirigível Nº 9 – “Baladeuse”.	74
Figura 4.13: Wolfert e Knabe em 12/06/1897.	76
Figura 4.14: Dirigível rígido de Schwarz (1897).	77
Figura 4.15: O LZ 127 Graf Zeppelin.	78
Figura 5.1: Projeto de avião com base no planador monoplano de Sir George Cayley.	80
Figura 5.2: Jesus criança brincando com um helicóptero. Retábulo do priorado de Vivoin, no Maine, por volta de 1460 (Museu de belas artes de Tessé, na cidade de Mans).	81
Figura 5.3: “La Hélice de Da Vinci” (1483).	83

Figura 5.4: Reprodução atual do “Helicóptero” de Da Vinci.	84
Figura 5.5: Frontispício da obra <i>Théorie de La Vis D'Archimede</i> (1768).	85
Figura 5.6: Mikhail Lomonosov e seu aparelho denominado “Aerodinâmica”.	87
Figura 5.7: O modelo de Launoy e Bienvenu.	88
Figura 5.8: Sir George Cayley. National Portrait Gallery, Londres.	90
Figura 5.9: O “helicóptero” de Launoy e Bienvenu (esq.) modificado por Cayley (dir.).	91
Figura 5.10: O Medalhão Cayley e suas duas faces, representando, à esquerda, um monoplano planador com linhas de "flappers" sob as asas para o impulso e, à direita, as forças de sustentação e arrasto (1799). Atualmente no British Science Museum.	91
Figura 5.11: O planador de Cayley, em perspectiva, com asas fixas e curvadas para a sustentação, e uma cauda móvel para o controle (1799).	92
Figura 5.12: Esboço por George Cayley do seu modelo de Planador Monoplano (1804).	92
Figura 5.13: O modelo de Planador Monoplano de Cayley (reconstrução).	93
Figura 5.14: O ornitóptero de J. Degen (1807).	94
Figura 5.15: O helicóptero de Cayley na Mechanics' Magazine , 8 de abril de 1843.	96
Figura 5.16: O “helicóptero” de Cayley.	97
Figura 5.17: Esboço, por George Cayley, do planador triplano “Boy Carrier” (1849).	98
Figura 5.18: Outra visão do triplano de Cayley (1849).	98
Figura 5.19: O planador “Paraquedas Governável” de Sir George Cayley (1852/1853).	99
Figura 5.20: Projeto de planador com a figura do cocheiro (1853).	100
Figura 6.1: O projeto de Cossus (1845).	103
Figura 6.2: O modelo de Bright (1859).	104
Figura 6.3: Alphonse Pénaud (1850-1880).	106
Figura 6.4: O “helicóptero” de Pénaud (1870), e seu desenho.	107
Figura 6.5: O “Planophore” de Pénaud (1871).	108
Figura 6.6: O ornitóptero de Pénaud (1872).	109
Figura 6.7: O aeroplano anfíbio de Pénaud e Gauchot (1876).	110
Figura 6.8: Gustave de Ponton D’Amécourt e a fotografia de seu helicóptero por Nadar.	112
Figura 6.9: O helicóptero imaginado por La Landelle, com 4 rotores coaxiais por eixo.	113
Figura 6.10: A aeronave de <i>Robur, o Conquistador</i> (1886), o <i>Albatross</i> , um precursor no ideário do helicóptero.	113
Figura 6.11: A aeronave de <i>Robur, o Conquistador</i> (1886), o <i>Albatross</i> , um precursor no ideário do helicóptero.	114
Figura 6.12: O <i>Albatross</i> , em ilustração da época, por George Roux 114	114
Figura 6.13: Um Spiralifère.	115
Figura 6.14: O aparelho de Dieuaide (1877).	116
Figura 6.15: O aparelho de Mélikoff (1877).	117
Figura 6.16: O aparelho de Castel (1878).	118
Figura 6.17: O aparelho de Forlanini (1878).	119
Figura 6.18: O aparelho de Forlanini (1878) - fotografia.	119
Figura 6.19: Patente de helicóptero de Thomas Edison (1908).	120
Figura 6.20: Pôster educacional, gravado por Emmanuel Dieuaide, intitulado “ <i>Tableau D’Aviation</i> ”, retratando várias máquinas voadoras concebidas entre 1500 e 1880. Sua própria máquina, de 1879, aparece em destaque.	121
Figura 7.1: O motor do helicóptero dos irmãos Dufaux (1905).	123
Figura 7.2: O helicóptero dos irmãos Dufaux (1905).	124
Figura 7.3: Os biplanos (“Chanutes”) e os mecanismos de direção da máquina voadora dos Dufaux (1905).	125

Figura 7.4: O Giroplano Bréguet-Richet nº 1 (1907).	127
Figura 7.5: Ilustração do helicóptero de Paul Cornu (1907).	128
Figura 7.6: O helicóptero de Paul Cornu (1907) - fotografia.	128
Figura 7.7: O protótipo do Coronel Renard (1904).	129
Figura 7.8: O dispositivo de controle por aletas móveis do protótipo de Cornu.	130
Figura 7.9: Esboço de uma patente de Cornu, mostrando um dispositivo que poderia ser usado para controlar um helicóptero em voo, através da colocação de aletas na esteira dos rotores.	131
Figura 7.10: Croqui do helicóptero de Santos-Dumont (1906).	135
Figura 7.11: O helicóptero de Santos-Dumont em construção.	136
Figura 8.1: O motor radial de Charles Manly e seu associado Stephen Balzer (1903).	139
Figura 8.2: Samuel Pierpont Langley (à direita) e seu mecânico Charles Manly, este com óculos de proteção às mãos e bússola presa na perna esquerda, na balsa sobre o Rio Potomac, antes do lançamento do <i>Aerodrome A</i> (1903).	140
Figura 8.3: Lawrence Hargrave (c. 1910).	141
Figura 8.4: O motor Antoinette V-8, patenteado em 1902, já era bem operacional em 1904. O mostrado acima provavelmente é de 1909.	142
Figura 8.5: Léon Levavasseur (1863-1922).	143
Figura 8.6: Forças no helicóptero de Santos-Dumont em voo librado.	146
Figura 8.7: Modelo de Disco Atuador.	147
Figura 8.8: Padrões de circulação do ar em voo librado fora e dentro do “efeito solo”.	152
Figura 8.9: Forças agindo na pá de um rotor.	153
Figura 8.10: Forças atuantes em um rotor de helicóptero.	154
Figura 8.11: Efeito cone nas pás do rotor.	155
Figura 8.12: Resultante da sustentação e da força centrífuga.	155
Figura 8.13: O torque e sua compensação.	156
Figura 8.14: Classificação moderna dos tipos de rotores.	158
Figura 8.15: O autogiro de La Cierva.	159
Figura 8.16: Deslocamento das pás.	160
Figura 8.17: Distribuição de velocidades no voo para vante.	161
Figura 8.18: Velocidades diferenciais no sistema do rotor em voo adiante.	161
Figura 8.19: A combinação de batimento para cima (sustentação reduzida) da pá que avança e batimento para baixo (sustentação aumentada) da pá que recua equaliza a sustentação no disco do rotor, de forma a corrigir a dissimetria de sustentação.	163
Figura 8.20: Esquema funcional de uma cabeça de rotor, mostrando as várias articulações.	163
Figura 8.21: Os três movimentos de uma pá de helicóptero.	164
Figura 8.22: O CH-47 Chinook.	165
Figura 9.1: O helicóptero de Ellehammer (1912).	169
Figura 9.2: O helicóptero de De Bothezat (1923).	171
Figura 9.3: Helicóptero Berliner Nº 5 (1924).	172
Figura 9.4: O helicóptero de Oehmichen (1922).	173
Figura 9.5: O Pescara Nº 3 (1923-24).	175
Figura 9.6: O autogiro Cierva C.4 (1923).	177
Figura 9.7: O helicóptero de D’Ascanio (1930).	178
Figura 9.8: O Bréguet-Dorand “Gyroplane Laboratoire” (1935).	180
Figura 9.9: O Focke-Achgelis Fa-61 (1936).	181
Figura 9.10: O sincróptero Flettner Fl 282 Kolibri (1940).	183
Figura 9.11: O Vought-Sikorsky VS-300 (1939).	184

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 A SURPRESA	15
1.2 AS QUATRO CORRENTES	20
1.3 OBJETIVOS	21
1.3.1 Objetivos Gerais	21
1.3.2 Objetivos Específicos	21
1.4 ESTRUTURA DO TEXTO	22
2 NO INÍCIO	29
2.1 MAIS LEVE QUE O AR	29
2.2 O BALÃO DIRIGÍVEL	36
2.3 O USO DO MOTOR	39
3 O LUGAR PARA ONDE EMIGRA A ALMA DOS BONS AMERICANOS QUANDO MORREM	46
3.1 UMA JANELA PARA O MUNDO	46
3.2 NAVEGAR OS CÉUS.....	53
4 OS DIRIGÍVEIS DE SANTOS-DUMONT	57
4.1 O FABULOSO MOTOR A PETRÓLEO	57
4.2 AVANÇOS, RECUOS E NOVOS AVANÇOS	59
4.3 OUTRAS TENTATIVAS COM O MOTOR A PETRÓLEO	75
4.4 O ZEPPELIN	77
5 AS ORIGENS DO HELICÓPTERO	79
5.1 UM BRINQUEDO MUDA TUDO	79
5.2 LAUNOY E BIENVENU E A AERODINÂMICA PRÁTICA.	87
5.3 A PATERNIDADE DA NAVEGAÇÃO AÉREA	88
6 OUTROS DESENVOLVIMENTOS EM ASAS ROTATIVAS	102
6.1 HERDEIROS DE CAYLEY E NOVOS PROJETISTAS	102
6.2 O PRIMEIRO TÚNEL DE VENTO E UM GÊNIO TRÁGICO	105
6.3 NOVAS PROPOSTAS DE ASAS ROTATIVAS.....	116
7 OS HELICÓPTEROS COMEÇAM A DAR CERTO	122
7.1 O HELICÓPTERO DUFAUX	122
7.2 O GIROPLANO Nº 1	126

7.3 O HELICÓPTERO DE CORNU.....	127
7.4 O HELICÓPTERO DE SANTOS-DUMONT	133
8 ANÁLISE DO HELICÓPTERO DE SANTOS-DUMONT	138
8.1 MOTORIZAÇÃO	138
8.2 ANÁLISE DA POTÊNCIA DO MOTOR	143
8.3 CONTRAPONDO A AÇÃO DO TORQUE DO ROTOR	152
8.4 A DISSIMETRIA DE SUSTENTAÇÃO E A PRECESSÃO GIROSCÓPICA	156
8.5 A QUESTÃO DAS VIBRAÇÕES	165
9 APÓS SANTOS-DUMONT	167
9.1 ENGATINHANDO	167
9.2 O FABULOSO AUTOGIRO	175
9.3 O HELICÓPTERO PRÁTICO	178
10 CONSIDERAÇÕES FINAIS	186
10.1 CRÍTICAS DA ÉPOCA	186
10.2 CONCLUSÕES	188
REFERÊNCIAS	191
GLOSSÁRIO	196

1 - INTRODUÇÃO

“Sentiu um peso, mas não era o peso do fardo e
sim da insustentável leveza do ser.”

Milan Kundera.

1.1 – A SURPRESA

O ano de 1904 caminhava para o seu final quando, em 15 de dezembro, os senhores Henry Deutsch de La Meurthe e Ernest Archdeacon,¹ dois desportistas franceses e mecenas da aviação nascente, lançaram um prêmio, o Grande Prêmio de Aviação, que levava os seus nomes e encerrava uma dotação de 50.000 francos àquele que construísse o primeiro aparelho aéreo sem balão que pudesse cumprir um percurso fechado de no mínimo um quilômetro, virando a redor de um ponto situado a 500 m do local da partida.²

Tal prêmio, a princípio, não suscitou nenhuma reação dos aeronautas de então. Porém, em 02 de janeiro de 1906, o *Aeroclube da França*,³ do qual faziam parte os desportistas citados, recebeu uma inesperada correspondência. Nela, Alberto Santos-Dumont, um aeronauta já conhecido por suas conquistas em dirigibilidade de balões e participação em competições

¹ Henry Deutsch de La Meurthe (1846-1919) foi um importante pioneiro da indústria francesa de petróleo, conhecido como “O Rei do Petróleo da Europa” e Ernest Archdeacon (1863-1950), um advogado francês de renome, de ascendência irlandesa. Ambos apaixonados pela aeronáutica, foram de grande influência no desenvolvimento da aviação, ainda que não fossem pilotos. Archdeacon era, também, construtor aeronáutico. Henry Deutsch e seu irmão Émile fundaram a companhia *Pétroles Jupiter* que, mais tarde, após fusão com a gigante do petróleo Shell, se tornaria a *Shell France*.

² Em outubro de 1904, como encorajamento às pesquisas e ensaios em aviação, três prêmios foram criados na França: o Prêmio Archdeacon, o Prêmio do Aeroclube da França e o Grande Prêmio de Aviação Deutsch-Archdeacon. No primeiro, o milionário Ernest Archdeacon concederia um valor mínimo de 2.000 francos (400 dólares) para quem voasse um aeroplano em percurso superior a 25 metros, com a condição que o ângulo de queda fosse inferior a 25% ou 14 graus; O segundo, financiado pelo Aeroclube de França, concederia 1.500 francos (300 dólares) para quem voasse em um aeroplano, munido ou não de motor, a distância de 100 metros na direção contrária à do vento, o que abria oportunidade a planadores e a ornitópteros movidos por força humana; O terceiro seria patrocinado por Henry Deutsch de la Meurthe e Ernest Archdeacon, que concederiam 50.000 francos (10.000 dólares) para quem voasse, em aparelho aéreo sem balão, a distância de 1.000 metros em circuito fechado, isto é, retornando ao ponto de partida, sem tocar o solo. Com exceção deste último, que excluía categoricamente o uso de balões, os demais prêmios deixavam em aberto a questão da decolagem. Uma exigência compartilhada por todos os prêmios era a de que a prova ocorresse na França e sob a supervisão de uma comissão aeronáutica do Aeroclube, convocada no mais tardar na noite da véspera (VISONI e CANALLE, 2009, p. 3). A correspondência em dólares citada era a que vigorava na época.

³ O Aeroclube da França foi fundado em 1898 e era o local de reunião de balonistas, inventores e entusiastas da aviação, um dos círculos sociais mais ricos e elegantes de Paris no final do século XIX. Dentre seus fundadores faziam parte: Henry de La Vaulx, Henri de La Valette, Albert de Dion, Léon Serpollet, Ernest Archdeacon, Henry Deutsch de la Meurthe, além, é claro, do próprio Santos-Dumont. O Aeroclube buscou definir os critérios do que seria um voo controlado, tanto para dirigíveis quanto para o voo mecânico. Santos Dumont acreditava que o Aeroclube fora fundado devido às suas experiências com os dirigíveis N^{os} 1 e 2 (Cf. SANTOS DUMONT, 2000, p.33).

automobilísticas (bem como pelas aparições nas colunas sociais parisienses), solicitou à Comissão de Aviação sua inscrição como primeiro concorrente ao **Prêmio Deutsch-Archdeacon**.⁴ Ao mesmo tempo, oferecia ao Clube, de presente, um *aeróstato* seu de 2000 metros cúbicos - o *Santos-Dumont N° 13*, um dirigível aero-Montgolfier de forma pouco alongada, o que permitia seu uso como um balão normal.

A máquina voadora com a qual o famoso solucionador da dirigibilidade dos balões e futuro criador do primeiro avião de decolagem autopropulsada pretendia disputar o prêmio era nada mais, nada menos, que um aparelho mais-pesado-que-o-ar do tipo..helicóptero!!!

O brasileiro já fora responsável por inúmeras soluções e inovações tecnológicas no que tangia à construção e à dirigibilidade de balões. Não se discutia a sua capacidade e muito dele se esperava. Mas se lançava agora num desafio, numa empreitada sem solução há séculos: a possibilidade da decolagem e do pouso verticais, além da translação horizontal.

Em que pesem as biografias conhecidas de Alberto Santos-Dumont, os anos anteriores foram-lhe muito produtivos. Em 1903, finalizou a construção de um novo hangar em Neuilly Saint-James, Paris,⁵ fez os primeiros ensaios com o dirigível N° 9, conhecido como *Balladeuse* - dirigível leve para uma pessoa, seguro e de fácil manejo, com o qual realizou diversas ascensões - e construiu o dirigível N° 10, chamado de “dirigível-ônibus”, com capacidade para dez passageiros. Este último fez algumas ascensões, sem passageiros, em outubro de 1903, mas não foi terminado.

Em maio de 1904, um ano infeliz para Santos-Dumont, o dirigível N° 7, projetado para ser um dirigível de corrida, foi testado em Neuilly. No mês seguinte, a aeronave sofreu sabotagem em uma exposição organizada em Saint Louis (Estados Unidos da América), ficando esfaçalhada e não podendo ser reconstruída – o aeróstato foi encontrado com quarenta e oito perfurações causadas por quatro grandes cortes à faca no invólucro dobrado e o sabotador jamais foi identificado –, o que deixou seu construtor amargurado.

Ainda em 1904, ele escreve o livro autobiográfico *Dans L’Air* (traduzido como *Os Meus Balões*), mas aparentemente nada está fabricando de revolucionário, o mesmo se dando no seguinte, 1905 (mas veremos que não era isso o que acontecia...), dando a impressão de que caíra de produção. Então, em 19 de julho de 1906, no campo de Bagatelle, aparece, de repente, com o surpreendente 14bis, uma máquina híbrida, união de avião e balão de hidrogênio, este

⁴ O Regulamento detalhado da prova encontra-se publicado na revista *L’Aérophile*, **octobre** 1904, p. 225.

⁵ Na verdade, a primeira estação de aeronaves do mundo, com um enorme hangar de 51 metros de comprimento por nove metros de largura e 13,6 metros de altura, além de uma usina de produção de hidrogênio e alojamento para operários, dentre outras instalações.

último usado para reduzir o peso e facilitar a decolagem, servindo também para a prática de direção e testes dos controles do avião acoplado.

Talvez ouvindo as críticas do colega e entusiasta da aviação, o capitão Ferdinand Ferber que, após observar as demonstrações do *aeródino*, declarou que “a aviação deve ser resolvida pela aviação”,⁶ Santos-Dumont desfez-se do aeróstato que, apesar de facilitar a decolagem, oferecia muito *arrasto*. O biplano, assim liberto do balão, recebeu da imprensa o apelido de *Oiseau de Proie* (“Ave de Rapina”).

O que ocorria, de fato, era uma tensão do inventor, que abandonava temporariamente os dirigíveis e buscava uma nova solução para o voo, em face das notícias do *mais-pesado-que-o-ar* vindas da América. Mas ele ainda era o “Rei do Ar” na França e, por conseguinte, na Europa e nos Estados-Unidos.

A principal causa da tensão e do salto tecnológico buscado por Santos-Dumont foi o fato de que, no início de 1904, chegava à França (e ao Aeroclube) a notícia de que os irmãos Wilbur e Orville Wright teriam conseguido voar com um aparelho mais-pesado-que-o-ar no dia 17 de dezembro de 1903. Em telegrama enviado ao pai, o bispo Milton Wright, naquela data, Orville informava:

Sucesso quatro voos quinta-feira manhã todos contra vento de vinte e uma milhas iniciados do solo com potência do motor somente velocidade média através do ar trinta e uma milhas o mais longo 57 segundos informe Imprensa em casa para Natal (tradução nossa).⁷

Octave Chanute⁸ telegrafou aos irmãos Wright no dia seguinte: “Imensamente satisfeito com o seu sucesso. Quando prontos para tornar isto público por favor avisem-me” (tradução nossa).⁹ Chanute mantinha os franceses informados dos avanços da aviação no outro lado do Atlântico. E toda a comunidade aeronáutica, científica e de inventores, que até então não sabia bem o que estava sendo feito na América, voltou os olhos para o mais-pesado-que-o-ar, uma vez que o balão dirigível já estava “resolvido”. O dirigível N° 6 de Santos-Dumont, que ganhara

⁶ VISONI; CANALLE, 2009, p. 3.

⁷ “Success four flights thursday morning all against twenty one mile wind started from level with engine power alone average speed through air thirty one miles longest 57 seconds inform Press home Christmas.” (McFARLAND, 2001, p. 397).

⁸ Famoso engenheiro ferroviário americano, nascido na França e amante da aviação, além de construtor pioneiro de planadores, usando como base as realizações do alemão Otto Lilienthal. Foi, também, um grande sintetizador de informações aeronáuticas e importante ponte de contato entre vários inventores da Europa e da América, bem como o principal incentivador do trabalho dos irmãos Wright. Escreveu um livro chamado *Progress in Flight Machines* (1894), no qual compilou a história da evolução da aviação, de seus experimentos e dados técnicos até então.

⁹ “Immensely pleased at your success. When ready to make it public please advise me.” (McFARLAND, 2001, p. 398).

o **Prêmio Deutsch**¹⁰ em 19 de outubro de 1901, partindo de Saint-Cloud, contornando a torre Eiffel e passando pelo ponto de partida no espaço de 29 minutos e 30 segundos era frágil, mas mostrara que a dirigibilidade era possível. Era capaz de ir e de voltar, voando contra ou a favor do vento. Sua evolução era apenas questão de desenvolvimento (o que viria com o *Zeppelin*). Mas não era mais isso o que se almejava dentre os aeronautas de então. Daí Archdeacon, Chanute e outros nomes do mesmo quilate se polarizarem para o invento dos Wright.

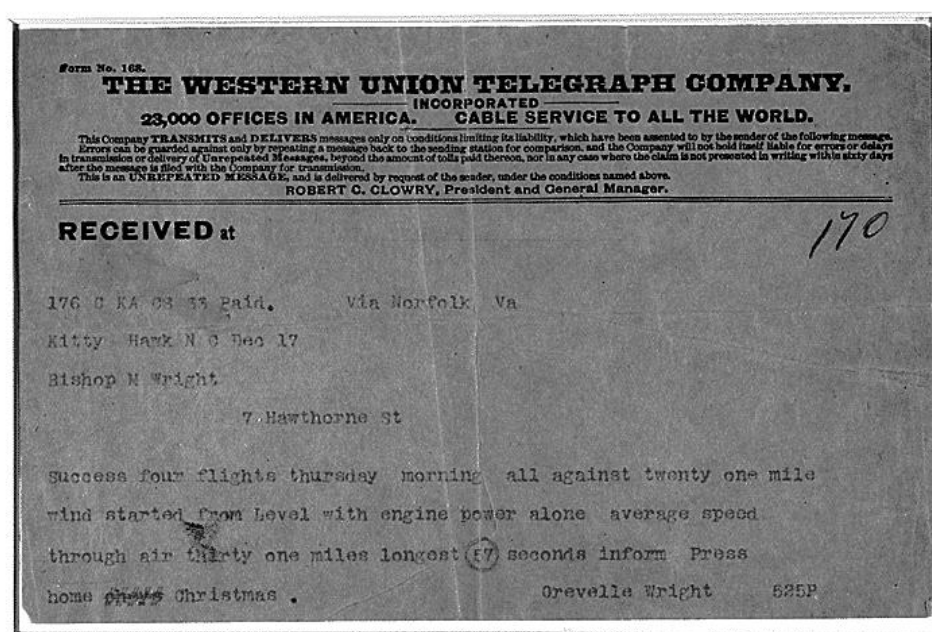


Figura 1.1 - O telegrama dos irmãos Wright para o pai (17 de dezembro de 1903).

Fonte: *Library of Congress, Washington, D.C.* Disponível em:

<<http://memory.loc.gov/ammem/today/dec17.html>>. Acesso em 06/10/2014.

Voos planados sem motor já estavam sendo realizados com algum sucesso pelo alemão Otto Lilienthal¹¹ no final do século anterior, bem como pelos Wright e por Chanute, com seus

¹⁰ Grande Prêmio instituído em 24 de março de 1900 pelo magnata do petróleo Henry Deutsch de La Meurthe, ano das comemorações, em Paris, da passagem do século e da realização, em setembro, do Congresso Internacional de Aeronáutica. Tal prêmio, no valor de 100.000 francos (20.000 dólares), seria oferecido àquele que conseguisse circundar a torre Eiffel sem tocar o solo - num voo aproximado de 11 quilômetros - e voltar ao ponto de partida em tempo máximo de 30 minutos. Visava encorajar o desenvolvimento de aerostatos dirigíveis com a utilização de motores a petróleo (gasolina).

¹¹ Otto Lilienthal (1848-1896), engenheiro alemão, foi o primeiro aviador de sucesso da história humana. Suas pesquisas sobre pássaros e aerofólios foram de enorme contribuição à ciência da Aerodinâmica, exemplificadas no livro *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst* (O Voo dos Pássaros como Base da Aviação), de 1889, que virou um clássico na história da aeronáutica porque não apenas estudou a forma e a estrutura das asas dos pássaros, mas também utilizou os dados obtidos para o desenho e a construção de asas mecânicas, enfatizando sua curvatura para a sustentação. Seu livro impressiona. Ele continha os mais precisos dados aerodinâmicos coligidos até o momento, e foi a “Bíblia” utilizada pelos irmãos Wright nos seus projetos de planadores de 1900 e 1901, assim como referência para outros aeronautas. Lilienthal foi o primeiro a ser fotografado em voo “a bordo” de um engenho mais-pesado-que-o-ar. Realizou mais de 2000 voos planados antes de morrer em consequência de uma

planadores multiplanos.¹² Na França, Ernest Archdeacon e Gabriel Voisin ensaiavam. A grande questão era a difícil adaptação de um motor aos planadores, que resultasse numa solução equilibrada e estável, que foi posteriormente resolvida pelos Wright.

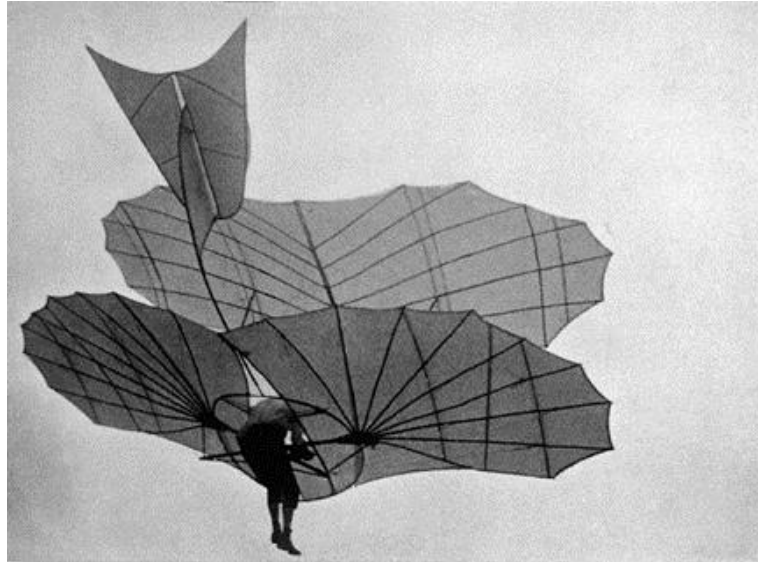


Figura 1.2 - Otto Lilienthal em voo.

Fonte: *Encyclopaedia Britannica*. Disponível em: <<http://global.britannica.com/EBchecked/topic/340975/Otto-Lilienthal>>. Acesso em 17/11/2014.



Figura 1.3 - Octave Chanute.

Fonte: Disponível em <<http://www.uh.edu/engines/epi2702.htm>>. Acesso em 19/10/2014.

queda, em 1896, e planejava motorizar seus engenhos planadores. Mas a intenção era a de aparelhar asas que batessem (ornitóptero).

¹² Com vários planos de asas.

1.2 - AS QUATRO CORRENTES

O mais-pesado-que-o-ar era, cada vez mais, a resposta buscada dentro de um contexto que, no início do século XX, incluía as quatro soluções plausíveis para o voo, com seus respectivos partidários: a dos balões dirigíveis, a dos ornitópteros (aparelhos que alçariam voo através do batimento de “asas”, como os pássaros), a dos aviões (aeroplanos) e a dos helicópteros.

Os balões esféricos já voavam há mais de um século e sua evolução em equipamentos dirigíveis encontrava-se em marcha. A questão da dirigibilidade estava equacionada, mas não era a solução desejada para o voo. Os dirigíveis de Santos-Dumont eram frágeis e pouco potentes, apesar de capazes de ser manobrados a favor ou contra o vento, de ir e de voltar. O campo dos “ornitopteristas” era quase deserto (existem novas experiências sendo realizadas atualmente, mas ainda sem muito sucesso, a não ser em escalas reduzidas)¹³, enquanto nos demais se encontravam pessoas empolgadas.

Em *Os Meus Balões*, Santos-Dumont mostra que, desde cedo, já tinha a convicção de que aeronaves que batessem asas ou mecanismos que se agitassem não funcionariam a contento. Isto se baseava em sua experiência de infância na usina de café de propriedade de sua família, quando pôde observar descascadores, separadores e peneiras móveis. Dizia ele:

Causava-me espécie que, entre todas as máquinas da usina, só essas desastradas peneiras móveis não fossem rotativas. Não eram rotativas, e eram defeituosas! Creio que foi este pequeno fato que, desde cedo, me pôs de prevenção contra todos os processos mecânicos de agitação, e me predis pôs a favor do movimento rotatório, de mais fácil governo e mais prático.¹⁴

É muito provável que venha daí o fato de Santos-Dumont nunca ter sido partidário do ornitóptero. O mesmo não podemos dizer quanto ao movimento rotativo como solução, pelo qual nutria simpatia. Dizia ainda, profeticamente:

Mas há um ponto a respeito do qual minha convicção está perfeitamente definida: é saber que no dia em que for produzida a invenção vitoriosa ela não será constituída nem por asas que batam, nem por qualquer coisa [sic] de análogo que se agite.¹⁵

¹³ Um protótipo em escala real chegou a ser construído em projeto capitaneado pelo professor James DeLaurier com seu time de estudantes do Instituto de Estudos Aeroespaciais da Universidade de Toronto, no Canadá, visando tornar realidade o sonho de Leonardo da Vinci. A aeronave, equipada com um motor (à turbina) de 24 hp de potência, voou por 14 segundos a uma velocidade média de 88 km/h, chegando a percorrer um terço de quilômetro, antes de rolar para a esquerda e bater com a asa no solo. A filmagem do voo encontra-se disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=a-qS7oN-3tA>> (acesso em 26/03/2015).

¹⁴ SANTOS DUMONT, 1986, p.26.

¹⁵ Ibid, p.27.

Obviamente, o divulgado sucesso dos Wright acirrou a corrida em busca das duas últimas soluções descritas: os aeroplanos e os helicópteros. A “solução helicóptero” é, aparentemente, mais óbvia. Bastaria uma hélice horizontal girando com determinado *ângulo de ataque* para fazer um engenho subir. Mas, na verdade, tal solução se mostrou por demais complexa, para não dizer complicada.

Dentre os partidários do helicóptero havia realmente uma chama de esperança. Eles não desejavam apenas desenvolver pequenos modelos em escala. Acreditavam sinceramente na possibilidade do voo vertical, a despeito da advertência de Otto Lilienthal de que “a ascensão vertical dinâmica do helicóptero é tão dificilmente realizável pelo homem quanto pelos grandes pássaros, porque ela exige esforços absolutamente anormais” (tradução nossa).¹⁶

No entanto, eis que, em 1905, Santos-Dumont apresenta suas ideias para o Prêmio Deutsch-Archdeacon: um avião monoplane inspirado no planador monoplane de Sir George Cayley¹⁷ de 1804 e um helicóptero. Debruçou-se sobre o problema do voo vertical ao mesmo tempo em que desenvolvia um aeroplano. Mas ele não foi o primeiro nem o último a lançar-se sobre tal problema...

1.3 – OBJETIVOS

1.3.1 – Objetivos Gerais

O objetivo geral deste estudo é analisar o projeto de helicóptero proposto por Santos-Dumont, suas virtudes, seus avanços tecnológicos e suas deficiências, examinando sua real possibilidade de voo em termos de motorização e aerodinâmica. Igualmente apresentamos e acrescentamos à literatura sobre Santos-Dumont fato novo, trazendo à luz um projeto apenas citado, mas ainda não estudado detalhadamente, considerando-se a extensa bibliografia sobre o aeronauta.

1.3.2 – Objetivos Específicos

Outro dos focos deste trabalho é tentar entender melhor o que motivava os esforços de Santos-Dumont na época da apresentação de seu projeto em asas rotativas e a razão de o considerarmos um gênio universal. Pretendemos mostrar, também, a capacidade de Santos-

¹⁶ “*L’ascension verticale dynamique de l’hélicoptère est aussi difficilement réalisable pour l’homme que pour les grands oiseaux, parce qu’elle exige des efforts tout à fait anormaux*” (PEYREY, 1909, p.21).

¹⁷ Considerado o Pai da Aeronáutica Britânica e Pai da Aviação. (VAICBERG, 2011, p. 422-428 e Cap. 5 deste trabalho).

Dumont de buscar a simplicidade, a leveza e a eficiência na concepção de seus projetos, utilizando o conhecimento da época para a solução de problemas técnicos, assim como uma notável aptidão de alterar seus modelos mentais, oferecendo contribuições relevantes ao desenvolvimento de balões esféricos, dirigíveis e aviões¹⁸ (e voando suas máquinas!), bem como a busca, como poderemos comprovar, de soluções lógicas para o helicóptero, muitas delas usadas nos modelos atuais. Tais soluções serão contextualizadas no âmbito de um desenvolvimento breve, porém detalhado, da história dos helicópteros.

1.4 – ESTRUTURA DO TEXTO

No corrente capítulo, é apresentada a relevância do estudo do projeto de helicóptero de Santos-Dumont, como fato novo capaz de ampliar nosso conhecimento acerca não só do aviador mas, principalmente, da tecnologia e das soluções que chegou a partilhar em sua época, através da análise teórica do engenho apontado. Também são apresentados os objetivos gerais e específicos propostos para o corrente trabalho.

O Capítulo 2, tomando por mote a fascinação de Santos-Dumont, desde tenra idade, por máquinas voadoras dirigíveis, traça um pequeno histórico do desenvolvimento dos aeróstatos mais celebrados, anteriores à entrada do brasileiro no cenário aeronáutico. A existência de tais aeróstatos era de seu pleno conhecimento.

O Capítulo 3 apresenta uma breve descrição da chegada de Santos-Dumont à França e do momento histórico vivido pela *Cidade-Luz*. Traça, igualmente, um pequeno inventário das invenções e descobertas recentes (à época) em vários campos do saber, um ambiente tecnológico, cultural e científico no qual Alberto realizará suas primeiras ascensões e projetos inovadores em balões esféricos, e que viriam a incentivá-lo firmemente na busca da dirigibilidade para balões.

O Capítulo 4 fala da descoberta, por Santos-Dumont, do motor a petróleo e de sua utilização no desenvolvimento de seus próprios dirigíveis. São delineadas as inovações e as soluções técnicas para os problemas de motorização e dirigibilidade que foram surgindo, culminando com a conquista do Prêmio Deutsch. Tais soluções seriam retomadas, em parte, em sua proposta para o helicóptero. São relatadas, ainda, tentativas de dirigibilidade de aeróstatos de outros inventores, com motores a petróleo.

O Capítulo 5 versará sobre as origens do helicóptero, com ênfase em Sir George Cayley, criador de um novo paradigma em “navegação aérea”, autor de projetos basilares em asas fixas

¹⁸ Sem passar por experimentos com planadores.

e rotativas. O Capítulo 6 dará prosseguimento ao anterior, abordando os desenvolvimentos e soluções posteriores a Cayley, mas ainda incipientes.

O Capítulo 7 prossegue com uma abordagem mais técnica e detalhada dos primeiros mecanismos promissores em asas rotativas, alguns dos quais podem ter influenciado Santos-Dumont. Na sequência, o projeto de helicóptero do brasileiro é apresentado.

No Capítulo 8, o mais complexo do ponto de vista técnico, são analisadas teoricamente a motorização e a aerodinâmica do helicóptero de Santos-Dumont, com vistas a determinar se tal projeto teria possibilidade de êxito.

O Capítulo 9 apresenta as tentativas de solução para o helicóptero posteriores a Santos-Dumont, que só viriam a coroar-se de êxito no final da década de 1930. Procuramos salientar de que forma tais soluções foram resolvendo os complexos problemas em aerodinâmica e motorização de asas rotativas até o surgimento do helicóptero moderno, ajudando a dimensionar e a contextualizar o helicóptero de Santos-Dumont ante às possibilidades e dificuldades teóricas, técnicas e materiais de seu tempo.

Por fim, no Capítulo 10, são apresentadas as conclusões obtidas com este estudo.

Acrescentamos ainda que, comparada ao desenvolvimento dos aeroplanos, que facilmente remontamos aos esforços de Sir George Cayley, Otto Lilienthal, Samuel Langley¹⁹, Octave Chanute e aos voos supostamente controlados dos irmãos Orville e Wilbur Wright em 1903 - visto que não foram realizados diante de muitas testemunhas ou de qualquer comissão técnica -, passando pelas demonstrações públicas de Alberto Santos Dumont com o 14bis, em 1906, a origem da concepção e do sucesso do helicóptero não é tão clara. E ainda hoje, apesar do enorme desenvolvimento alcançado, estudos técnicos e teóricos buscam aumentar a eficiência das máquinas existentes e projetar soluções futuras.

¹⁹ Samuel Pierpoint Langley (1834-1906), astrônomo e físico americano de destaque, foi Secretário do *Smithsonian Institution* e pioneiro da aviação, sendo mais lembrado atualmente (e injustamente) por seus insucessos nas tentativas de voo tripulado com aparelhos mais-pesados-que-o-ar. Inventor do Bolômetro (instrumento utilizado na medição da radiação eletromagnética), foi um dos fundadores da nova disciplina da *Astrofísica*, bem como do Observatório Astrofísico do *Smithsonian*. Influenciado pelos trabalhos de Alphonse Pénaud, construiu pequenos modelos impulsados por tiras elásticas e pequenos motores a vapor. Como vários de seus contemporâneos, construiu um *braço girante* (de 6m) para testar vários tipos de aerofólios e modelos. Seu primeiro sucesso genuíno ocorreu em 6 de maio de 1896, com o seu *Aerodrome* N° 5, lançado por catapulta montada sobre uma balsa no rio Potomac. Foi o primeiro voo bem sucedido do mundo de um aparelho não tripulado, impulsado por motor, de dimensões consideráveis (4m de comprimento por 4,2 m de envergadura). O aparelho chegou a voar cerca de 1km em 90 s, a uma velocidade de 40 km/h, tendo pousado na água, por não possuir trem de pouso. Em novembro, seu N° 6 chegou a voar mais de 1500 m. Langley, então, solicitou financiamento governamental para a construção de uma aeronave tripulada em tamanho real - o *Aerodrome A* com motor de 53 hp -, que foi igualmente catapultada de uma balsa no Rio Potomac. Ambas as tentativas, datadas de 7 de outubro e de 8 de dezembro de 1903, fracassaram e a aeronave caiu no rio, mas o piloto (o mecânico de Langley, Charles Manly) milagrosamente sobreviveu, o mesmo não se dando com a reputação do inventor, antes o maior nome da aviação americana.

Alcançamos, atualmente, um alto nível de sofisticação e segurança, no que se refere às modernas máquinas de decolagem e pouso vertical. E, antes de mais nada, em face de nossa proposta, é necessário que se defina o que é um *helicóptero*. Segundo Leishman:

Um helicóptero puro pode ser definido como qualquer máquina voadora que utilize asas rotativas (isto é, um rotor com pás que giram em torno de um eixo) para prover sustentação, propulsão e forças de controle que possibilitem à aeronave ficar suspensa²⁰ relativamente ao solo, sem velocidade fornecida por voo adiante para gerar tais forças. Somado a isto, a máquina deve estar apta a voar para frente, subir, deslocar-se em velocidade, e então descer e voltar ao hover para pouso (tradução nossa).²¹

Na natureza, apenas o beija-flor e a libélula²² conseguem efetuar semelhante tipo de voo, em função da velocidade e angulação do batimento de suas asas, mas, obviamente, não há movimento de rotação completo de qualquer de suas partes, visto que não há solução biológica da natureza para partes que giram totalmente, tanto quanto à circulação sanguínea, quanto à enervação. Daí, concluímos que o helicóptero não foi construído buscando copiar-se a natureza,²³ como ocorreu na gênese do aeroplano. É uma concepção totalmente humana e sem paralelos, fruto da técnica, da tecnologia e da ciência.²⁴

As soluções para a performance eficiente e segura de uma aeronave que obedeça a tais características são bastante mais complexas que as de uma aeronave de asas fixas (aeroplanos ou aviões), tanto mecânica quanto aerodinamicamente. Apesar de alguns paralelos entre o desenvolvimento de aeroplanos e helicópteros, o voo vertical foi o resultado de um grande aprofundamento do conhecimento referente aos problemas mecânicos, aerotécnicos e aerodinâmicos que já existiam ou que foram aparecendo, sendo sua gestação bem mais tumultuada, como veremos. Com a história da evolução do helicóptero e das aeronaves em geral, bem como da aerodinâmica, poderemos avaliar os principais problemas que foram surgindo e sendo solucionados com o conhecimento técnico e científico e como deles se apropriou Santos-Dumont.

²⁰ “Hoverar” ou “librar”, no jargão aeronáutico (N. do A.).

²¹ “*A pure helicopter can be defined as any flying machine using rotating wings (i.e., a rotor with blades that spin about a shaft) to provide lift, propulsion, and control forces that enable the aircraft to hover relative to the ground without forward flight speed to generate these forces. In addition, to be practical, the machine must also be able to fly forward, climb, cruise at speed, and then descend and come back into a hover for landing.*” (LEISHMAN, 2000).

²² Alguns dípteros também são capazes de manter-se em voo pairado.

²³ Apesar de, possivelmente, ter-se inspirado nela, em suas concepções iniciais.

²⁴ Tecnologia aí entendida como técnica informada pela ciência.

Podemos dizer que a primeira ideia de voo vertical pode ser rastreada até um antigo brinquedo chinês, utilizado pela primeira vez por volta do ano 400 a.C. Consistia em penas de aves presas a uma haste de bambu que, quando girada em movimento rápido com as palmas das mãos, ganhava sustentação. Tal dispositivo - primeira concepção de um rotor - talvez tenha sido inspirado na observação da natureza, no movimento semelhante de algumas sementes carregadas pelo vento, ao caírem das árvores. Foi denominado “pião Chinês”.

O primeiro documento conhecido referindo-se às asas rotativas é um livro chamado *Pao Phu Tau*, do ano 320. Nele, o grande alquimista taoísta Ko Hung nos conta sobre um “mestre” que descrevia carros alados (*fei chhe*), confeccionados com madeira da parte interna da árvore do jujube e cintas de couro de boi fixadas a lâminas retornáveis, de modo a colocar a máquina em movimento (*huan chien i yin chhi chi*).²⁵ Joseph Needham, em seu famoso livro *Science and Civilization in China*, escreve:

Não pode haver nenhuma dúvida que o primeiro plano que Ko Hung propõe para o voo é o pião helicóptero; ‘lâminas retornáveis (ou girantes)’ dificilmente significariam outra coisa, especialmente em íntima associação com uma cinta ou correia. Este tipo de brinquedo foi denominado na Europa do século 18 de ‘pião Chinês’, embora pareça que ele tenha sido conhecido no Ocidente já no final dos tempos medievais (tradução nossa).²⁶

Este é o primeiro padrão registrado daquilo que nós podemos compreender como um precursor do helicóptero. A tecnologia necessária para criá-lo não tinha sido produzida ainda, mas o conceito da sustentação com asa giratória havia sido indiscutivelmente encontrado.

A partir daí, avanços foram-se somando de maneira lenta, porém gradual e, já no final do século XIX e início do XX, de maneira vertiginosa, até que culminassem na concepção do helicóptero moderno.

Atualmente, o helicóptero é considerado o veículo aéreo mais versátil que existe, servindo a diversas nações em todo o mundo. Sua viabilidade tecnológica é recente, e seu primeiro voo controlável tem pouco mais de setenta anos, mas já é empregado de forma civil ou militar para as mais variadas finalidades, como transporte de pessoas e cargas, combate a

²⁵ FAY, 1976, p. 125-126.

²⁶ “There can be no doubt that the first plan which Ko Hung proposes for flight is the helicopter top; ‘returning (or revolving) blades’ can hardly mean anything else, especially in close association with a belt or strap. This kind of toy was termed in 18th-century Europe the ‘Chinese top’, a though it seems to have been known in the West already in late medieval times.” (NEEDHAM, 2000, p. 583).

incêndios, resgate, guindaste e operações militares, dentre outras. E isto, de dia ou de noite, em qualquer condição de tempo ou latitude.

A vantagem primária do helicóptero é que as pás do rotor (ou rotores) giram através do ar gerando sua própria sustentação, sem necessitar do movimento da aeronave para adiante. Isto faz com que não haja necessidade de pistas para pousos e decolagens, permitindo o uso do aparelho em áreas confinadas ou mesmo em regiões congestionadas, onde o uso do avião seria proibitivo.

O controle de um helicóptero é complexo: pela necessidade de se pensar e trabalhar com as três dimensões, o piloto deve utilizar ambas as mãos e pés para um voo eficiente, sendo a variação em qualquer dos controles seguida por ajustes e compensações nos demais.²⁷

Apesar do imenso trabalho desenvolvido no início do século XX para o desenvolvimento da asa rotativa, foi somente em 1935 que voou o primeiro helicóptero de sucesso no mundo. Era o *Breguet-Dorand "Gyroplane Laboratoire"*, de rotores coaxiais, que foi seguido pelo *Focke-Achgelis Fa-61*, que voou inicialmente na Alemanha, em 1936. Este possuía dois rotores montados lado a lado, tendo sido considerado o primeiro helicóptero prático. Mas, dentre outros, merece destaque o VS-300 de Igor Sikorsky, no qual o engenheiro e inventor russo naturalizado americano testou seus conceitos, inaugurando a concepção moderna de um rotor principal e um rotor anti-torque de cauda. O VS-300 foi testado em 14 de setembro de 1939 e, devido ao seu sucesso, seus conceitos e princípios serviram de base para a criação do primeiro modelo feito em escala industrial, o VS-316.²⁸



Figura 1.4 - O Focke-Wulf Fw 61, também conhecido como Focke-Achgelis Fa-61.

Fonte: disponível em <http://en.wikipedia.org/wiki/Focke-Wulf_Fw_61>. Acesso em 20/05/2014.

²⁷ Os helicópteros modernos já contam, há algum tempo, com sistemas automatizados e computadorizados de auxílio à pilotagem, como piloto automático, coupler e computador de voo.

²⁸ THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS & AMERICAN HELICOPTER SOCIETY, 1984.

Assim, o voo vertical, apesar de ter sido o primeiro a ser tecnicamente buscado, foi o último a ser desenvolvido, face às dificuldades técnicas e teóricas envolvidas.



Figura 1.5 - O Sikorsky VS-316, primeiro helicóptero de produção industrial adquirido pelos militares americanos.

Fonte: disponível em <<http://celticowboy.com/Vought%20and%20Helicopters.htm>>. Acesso em 20/05/2014.

Por fim, entendemos que Alberto Santos-Dumont era detentor de razoável conhecimento teórico em mecânica e em eletricidade e que chegou a dominar boa parte da tecnologia aeronáutica de seu tempo, mas nunca saberemos o quanto dominou da ciência aeronáutica, pois, deprimido com o tratamento a ele dispensado pelas autoridades francesas nas vésperas e início da Primeira Grande Guerra, acusando-o de espionagem,²⁹ queimou seus desenhos, projetos e anotações.³⁰ Seu trabalho inovador foi eminentemente técnico, de artesão mesmo, utilizando-se dos materiais e conquistas tecnológicas da época, como os instrumentos de voo, o alumínio, os têxteis e os vernizes, dentre outros.³¹

²⁹ Por ter deixado de apagar as luzes durante um blecaute e por possuir uma luneta de grande alcance em sua residência de Benerville, próximo a Deauville, que era conhecida como a “Paris à beira-mar” durante a *Belle Époque*, antes da Primeira Guerra. Uma pequena estância balneária, na baía do Sena, a 30 quilômetros de Caen, na França.

³⁰ Um estudo atual sobre a física e as técnicas envolvidas nos balões e dirigíveis de Santos-Dumont pode ser encontrada em MEDEIROS, 2006a.

³¹ Tecnologia aqui não é usada apenas como sinônimo de ciência aplicada, o que acarretaria como premissa a falta de diálogo com a ciência pura, o avanço tecnológico só se dando apenas por um avanço na ciência que lhe serve de base. Veremos que não é isso que ocorreu na gênese da aviação. Aqui o termo possui certa autonomia como *ciência voltada para a produção* ou *ciência do trabalho produtivo*, como bem a define Ruy Gama em seu artigo *A tecnologia em questão*. O termo *técnica*, nesta tese, é usado quase como arte, como método particular ou compartilhado, habilidade ou método.

A metodologia utilizada para a realização deste trabalho fundou-se em uma análise dedutiva baseada em pesquisas bibliográficas e documentais de fontes primárias da época, consultas a arquivos públicos e particulares e aos livros de grandes pesquisadores e divulgadores da aviação, além de manuais atuais sobre aerodinâmica de helicópteros, não possuindo qualquer viés ideológico ou político. Tratou-se apenas de buscar os dados técnicos de aparelhos seminais (com algumas informações pessoais consagradas dos construtores), de forma a sustentar as conclusões a que chegamos.

Tendo sido feita esta introdução, percorreremos agora um caminho que nos levará a entender a concepção do helicóptero de Santos-Dumont em face do “conhecimento aéreo acumulado” já existente e daquele que era febrilmente produzido à sua época...

2 - NO INÍCIO

“Uma grande descoberta envolve a solução de um grande problema, mas há uma semente de descoberta na solução de qualquer problema.”

George Pólya (1887-1985), matemático húngaro.

2.1 - MAIS LEVE QUE O AR

Alberto Santos-Dumont era uma criança “diferente”. Sexto e o mais novo dos três meninos dentre os oito filhos de Henrique Dumont - engenheiro civil nascido em Minas Gerais e formado pela *École Centrale des Arts et Métiers* de Paris - e de D. Francisca de Paula Santos, nasceu em 20/07/1873, na casa do sítio de Cabangu, no distrito de João Aires,³² Minas Gerais. Seu pai havia sido contratado para construir parte da Estrada de Ferro D. Pedro II até essa região. Após a conclusão dos trabalhos, Henrique adquiriu, com a herança da esposa, terras na região de Ribeirão Preto, em São Paulo, onde desenvolveu uma fazenda cafeeira extremamente produtiva e tão extensa que foi necessário construir uma estrada de ferro particular com 96 km para percorrê-la.

Alberto, na infância, não se interessava particularmente pela vida social ou pelas brincadeiras com as demais crianças de sua idade, preferindo observar as máquinas da fazenda de café de sua família e aprendendo a consertá-las. Era solitário por temperamento e, à noite, optava por ler até altas horas os livros da numerosa biblioteca de seu pai. Na adolescência, dentre os livros em francês, inglês e português da coleção, alguns em especial atraíam a sua atenção: os de Júlio Verne. Esses livros, de ficção científica à época, possuíam um apelo indizível para o menino, como a personalidade forte e a excentricidade de seus protagonistas e, sobretudo, o domínio da natureza através das máquinas. Santos-Dumont leu-os todos. De *Voyage au centre de la Terre* e *Vingt mille lieues sous les mers* a *Cinq semaines en ballon* e *Robur le Conquérant*, o pequeno Alberto passeou por terra, mar e ar de diversas formas em sua imaginação juvenil...³³

Em *Os Meus Balões*, Santos-Dumont nos dá conta, em uma projeção idílica do que fora sua tenra idade, de que acreditava piamente que o homem voaria algum dia de forma controlada. Em uma introdução em forma de fábula, quase sempre negligenciada pelos biógrafos, deixa à mostra seu sonho baconiano de domínio da natureza. Luís (seu alterego sonhador) e Pedro, dois

³² Na localidade de Palmira, hoje Município de Santos Dumont.

³³ De fato, o aeronauta relata que, de 1888 a 1891, leu com grande interesse todos os livros de Verne (SANTOS DUMONT, 2000, p.17).

meninos, discutem sobre as possibilidades de construção de engenhos mais eficientes para vencer os meios terrestre, marítimo e aéreo. Pedro é o contraponto a Luís, lembrando-o das limitações que a natureza impõe às inovações que, passo-a-passo insistem em se realizar, à despeito daquele. Já surgira o trem e o navio. O clímax se dá quando o comandante de um navio que atracara na localidade tenta mostrar a Luís que o seu sonho de algo parecido com um grande balão de São João, com uma barquinha e um motor, já fora tentado antes por um engenheiro francês chamado Giffard, que evidenciara a impossibilidade de dirigir um balão nos ares. Isto enquanto Pedro alegava que para voar dever-se-ia imitar o pássaro, posto que a "Natureza fez o pássaro e ela não se engana". Luís, contra todas as evidências preconcebidas (numa atitude que seria a marca de Santos-Dumont), não perde de vista o seu sonho de navegar os ares através de um engenho. E assim termina a fábula: "Luís porém não se deu por convencido. Do seu canto, murmurou, com a incredulidade de um Galileu: — Ele será dirigível!" ³⁴



Figura 2.1 - Capa de “Robur, o Conquistador” (1886).

Fonte: disponível em <http://belcikowski.org/la_dormeuse/gilbert_durand_mythe3.php>. Acesso em 22/10/2013.

De fato, em meados do século XIX, um engenheiro francês de nome Henri Giffard tentara desenvolver o *balão dirigível*. Mas, antes disto, surgira o *balão*. Voar é, desde tempos remotos, um desejo que habita a alma humana. Observando os pássaros e outros animais alados,

³⁴ SANTOS-DUMONT, 1986, p. 20.

o homem buscou, inicialmente, imitar seus movimentos, construindo artefatos para capacitá-lo a alçar os ares, em tentativas sempre malsucedidas. Asas artificiais construídas com madeira e penas de aves ou mesmo grandes pipas que pudessem carregar um homem foram utilizadas para tais empreitadas, que terminavam, normalmente, em fiasco ou em tragédia. Foi somente através do balão de ar quente, já no século XVIII, que o sonho humano começou a realizar-se...

O surgimento e o desenvolvimento dos balões foi fruto da evolução das ideias, das técnicas e, até mesmo, do acaso. E a história dos balões começa com um princípio fundador: “todo corpo imerso em um fluido sofre ação de uma força (empuxo) verticalmente para cima, cuja intensidade é igual ao peso do volume de fluido deslocado pelo corpo”. Este fenômeno físico ficou conhecido como “Princípio de Arquimedes” e deve seu nome ao matemático, físico e inventor grego que o observou no século III a.C., no contexto de um pitoresco episódio envolvendo ele próprio, um banho público e a consulta de um rei da época, que desconfiava estar sendo lesado por um ourives.

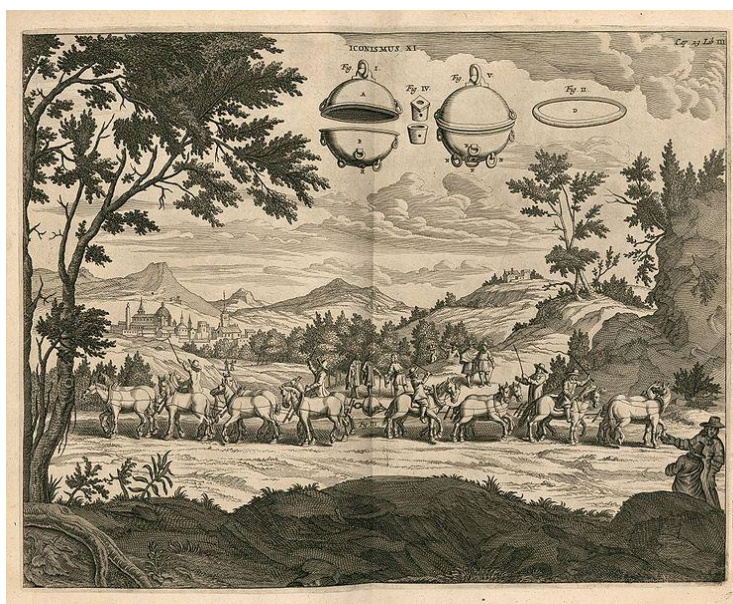


Figura 2.2 - Os hemisférios de Magdeburg – Gravação de Gaspar Schott (1657).

Fonte: disponível em <<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Magdeburg.jpg>> (domínio público). Acesso em 19/04/2014.

A ideia de elevar-se no ar através do “Princípio de Arquimedes” ocorreu, em 1670, ao padre jesuíta Francesco Lana de Terzi (1631-1687), de Brescia, na Itália, pouco tempo após a construção de uma bomba de vácuo por Otto von Guericke,³⁵ nos idos de 1650. O padre Lana

³⁵ Em 1654, Otto von Guericke, prefeito de Magdeburg, utilizou uma bomba para remover o ar de uma grande esfera metálica formada por dois hemisférios unidos e perfeitamente encaixados. Após, atrelou vários cavalos a

concebeu um veículo, o “barco aéreo”,³⁶ sustentado por quatro grandes esferas de cobre de paredes bem finas e leves e, ao mesmo tempo, fortes, de modo que o ar pudesse ser bombeado para fora delas, criando vácuo em seu interior. Isto as faria pesar menos do que o ar que deslocavam e, assim, o artefato ascenderia aos céus. Tal ideia também tinha fulcro nas descobertas dos filósofos naturais dos séculos XVII, que estudavam a física e a química da atmosfera, mostrando a possibilidade da existência do vácuo, como Blaise Pascal e Evangelista Torricelli. O engenho “movido a vácuo”, apesar de impraticável (até porque o peso das esferas, da barca e do material seria bem maior que o empuxo), continha, porém, o germe do legítimo pensamento científico.

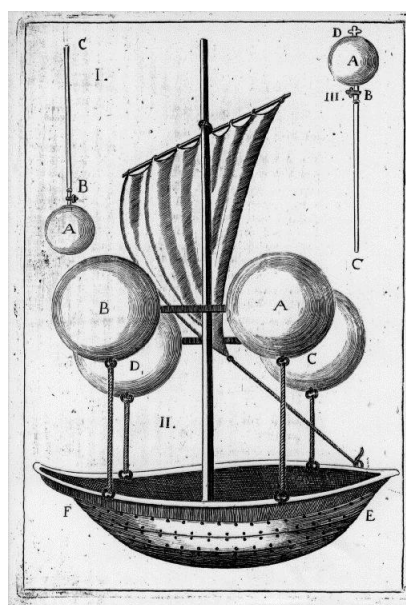


Figura 2.3 - Francesco Lana de Terzi e o “barco aéreo”.

Fonte: disponível em <<http://www.aerostati.it/padrelana.htm>>. Acesso em 02/11/2012.

Aeróstatos sustentados por ar quente já não eram novidade em meados do século XVIII, pois, apesar de seus sucessos questionáveis, ficaram famosos os experimentos do padre brasileiro Bartholomeu Lourenço de Gusmão (1685–1724). Com seu espírito inventivo, o

cada um desses hemisférios, para que tentassem separá-los. O resultado assombrou os expectadores que estavam presentes, pois mesmo com a força dos animais, a esfera permaneceu intacta, evidenciando que o vácuo formado no interior da estrutura estava sendo forçado efetivamente pela pressão do ar externo. Guericke teve contato com os estudos de Torricelli. O experimento viria a ser conhecido como os “hemisférios de Magdeburg”, cidade natal do físico alemão e local do experimento. Robert Boyle buscou aperfeiçoar o trabalho de Guericke e, com a assistência de Robert Hooke, desenvolveu sua bomba, ou “motor pneumático”, em 1659, com o qual realizou pesquisas sobre as propriedades do ar.

³⁶ Conforme seu livro *Prodromo ovvero saggio di invenzioni nuove all'Arte Maestra*, de 1670.

jesuíta inspirou-se na busca de um aparelho mais leve que o ar, chegando a obter do Rei de Portugal um Alvará expedido em seu favor, decorrente de um pedido de privilégio para o seu “instrumento para andar pelo ar”.

Como as promessas da petição de privilégio relativas a um fantástico invento estavam distantes da realidade apresentada, Bartholomeu tentou explicar-se de modo ainda mais obscuro no *Manifesto Sumário para os que Ignoram Poder-se Navegar pelo Elemento Ar*, de 1709, mas seus argumentos, ainda apegados à física Aristotélica,³⁷ não convenceram nem os eruditos e nem o público. Gusmão foi satirizado, criticado e desconsiderado. Porém, como nos mostra Filgueiras:

Todos os relatos, mesmo aqueles satíricos e impiedosos, apontam numa direção: o padre voador parecia ter grande interesse por física, conhecendo as propriedades de empuxo dos fluidos, estudada por Arquimedes no caso da água, e agora as estendia ao ar. Além disso, o conhecimento da variação da densidade dos gases com a temperatura, essencial ao se projetar um balão de ar quente, estava bem presente.³⁸

Bartholomeu fez para a corte portuguesa, em 1709, quatro demonstrações de seus aeróstatos, os quais, na verdade, eram balões de ar quente, semelhantes aos “balões japoneses” hoje lançados em festas. A partir daí o religioso brasileiro passou a ser conhecido como “padre voador”. Outro invento seu, a *Passarola*, fosse dotada de ímãs ou de gás (contido em pequenos globos) para sustentação, além de instrumentos náuticos e superfícies de controle, era impraticável e extravagante,³⁹ mas polarizou a imaginação da época, e a notícia de que um padre voara em Lisboa espalhou-se por outros países.

³⁷ Esta física pré-Galileana era a física ainda adotada ferrenhamente pelas Universidades portuguesas, mormente a de Coimbra, antes da reforma pombalina, na segunda metade do século XVIII. Portugal, até então, vivia num descompasso enorme em relação ao resto da Europa, já imerso na Revolução Científica desencadeada pelos trabalhos de Galileu, Descartes e Newton. Esta ortodoxia científica, somada à religiosa, contribuiu para o descaso em relação às obras de Bartholomeu de Gusmão, sua fuga face à Inquisição e sua morte prematura, além da destruição de seus escritos por ele próprio, o que nos impediu de conhecer melhor seus achados científicos.

³⁸ FILGUEIRAS, 1995, p. 388.

³⁹ O mais provável é que o desenho bastante alegórico da “Passarola”, que muito circulou na Europa da época, tivesse a finalidade de despistar os demais governos quanto às intenções do governo português de um futuro uso militar dos balões engendrados por Bartholomeu.

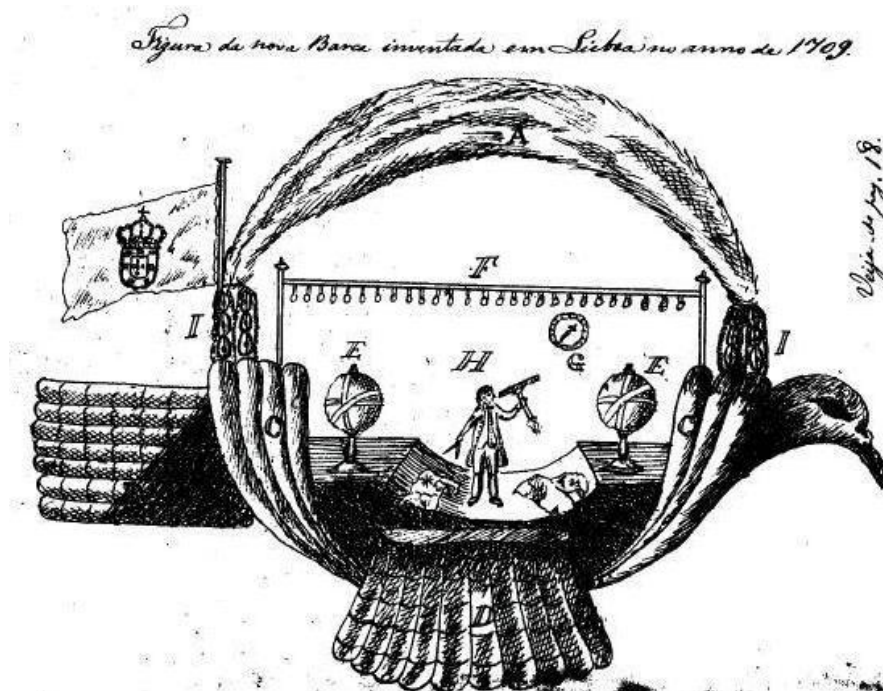


Figura 2.4 - A “Passarola”.

Fonte: disponível em <<http://aconquistadabolina.blogspot.com.br/2010/10/bartolomeu-de-gusmao.html>>. Acesso em fev. 2011.

Os balões de grandes proporções, capazes de levar passageiros a bordo, surgiram 74 anos após o “invento” de Bartholomeu de Gusmão, em 1783, pelas mãos dos irmãos franceses Joseph-Michel (1740–1810) e Jacques-Étienne (1745–1799) Montgolfier,⁴⁰ filhos de um fabricante de papel de Annonay, sul de Lyon. Em 5 de junho de 1783, foi efetuada a primeira experiência pública, diante da assembleia dos Estados de Vivarais, na França, o Conselho Geral da época. O balão, com triplo invólucro de papel, foi inflado por ar quente proveniente da queima de palha e lã, às quais foram adicionados sapatos velhos, liberando um odor insuportável. Em dez minutos após ser solto, o aeróstato alcançou cerca de 2.000 metros de altitude, vindo depois a cair numa vinha, na paróquia de Davézieux, a 3 km de seu ponto de partida. Tinha aproximadamente 37 metros de circunferência e cerca de 230 kg de peso.⁴¹

⁴⁰ Estando Joseph em Avignon, em 1782, para vender papel aos impressores, devido ao frio, resolveu aquecer uma camisa sobre uma lareira. Ao vê-la ascender por sobre a lareira, idealizou o invento que iria imortalizar os Montgolfier. Comprou tafetá (tecido leve de seda), cortou-o e com ele fez um pequeno paralelepípedo, deixando um orifício na base. Então queimou sob ele montes de papéis e o paralelepípedo elevou-se no ar até o teto do local onde realizava a experiência! Joseph então escreveu à Étienne: “Prépare promptement des provisions de taffetas, de cordage et tu verras une des choses les plus étonnantes du monde.” (“Prepare prontamente uma provisão de tafetás, de cordas e tu verás uma das coisas mais espantosas do mundo”. Tradução nossa.). (TISSANDIER, 1887-1890, p. 7).

⁴¹ A palavra “peso” é usada por simplificação, o que ocorrerá ao longo do texto. O correto seria utilizar a palavra “massa”, sendo o peso de um corpo dado pela multiplicação da massa pela aceleração da gravidade (g), que é de, aproximadamente, 10 m/s². O peso em questão, em Newtons (N), seria próximo de 2300 N.

A notícia foi comunicada à *Academia de Ciências de Paris*, causando euforia. Foi nomeada uma comissão, que decidiu pela vinda dos irmãos para Paris, a fim de repetirem a experiência.

No dia 27 de agosto de 1783, dois meses após o químico francês Antoine-Laurent Lavoisier ter batizado de “hidrogênio”⁴² um gás recém descoberto, o cientista Jacques Alexandre Cesar Charles e o construtor Marie-Noël Robert inflaram um balão de tecido envernizado⁴³ de 3,5 m de diâmetro com o gás e o lançaram do Campo de Marte, em Paris. O balão, que não tinha válvula de escape, ao atingir a altura de 1.000 m explodiu em função da expansão do gás, caindo despedaçado em Gonesse, a 25 km do local de partida. Os aldeões locais pensaram tratar-se de um monstro caído do céu e os restos do balão foram apedrejados e cortados por facas e forcados. Depois, como humilhação final, foi o inofensivo tecido, já em frangalhos, atado à cauda de um cavalo e arrastado até o seu fim... No entanto, Charles e Robert superaram o tempo de permanência no ar dos Montgolfier e receberam os louros deste fato.

Charles determinou a densidade do hidrogênio e verificou que era quatorze vezes menos denso que o ar, podendo ser usado com vantagens em um balão menor que os de ar quente. Passou a produzi-lo em laboratório. A partir daí, iniciou-se uma verdadeira competição balonística entre Charles (e suas Charlières) e os irmãos Montgolfier (e suas Montgolfières). Em 19 de setembro, em Versalhes, diante da corte, foi lançada uma Montgolfière com um galo, um pato e uma ovelha, que desceu sem incidentes graves e, a 21 de novembro, foi realizado o primeiro voo com humanos, ocasião em que um balão de ar quente decolou com Jean-François Pilâtre de Rozier e o Marquês d'Arlandes. Charles foi eleito para a Academia de Ciências da França dois anos depois e a fórmula que relaciona a pressão e a temperatura de um gás ideal, a volume constante, leva o seu nome (*Lei de Charles*).

Grandes viagens passaram a ser possíveis graças ao balão de hidrogênio (bem similar ao que é usado hoje, cheio com o gás inerte hélio). Enfim, o Canal da Mancha foi atravessado em 7 de janeiro de 1785, de Dover a Calais, pelo francês Jean-Pierre Blanchard e pelo americano John Jeffries, em um balão de hidrogênio, através de um voo bem planejado. Mas os balões também fizeram vítimas. O primeiro a voá-los está entre elas. Pilâtre de Rozier, acompanhado por Pierre-Ange Romain, descobridor dos meios para a impermeabilização de

⁴² Em 1766, o cientista inglês Henry Cavendish descobriu o hidrogênio. O gás já houvera sido isolado antes por Robert Boyle. Joseph Priestley, contemporâneo de Cavendish, também o fizera, mas foi Cavendish quem primeiro investigou suas propriedades, inclusive sua densidade, através de engenhosa aparelhagem. O gás era o produto da mistura de ferro, estanho e aparas de zinco com ácido sulfúrico. Cavendish denominou-o “ar inflamável”. O nome “hidrogênio” só viria com Lavoisier (do grego *hydro* = água e *gen* = gerador). Para uma informação mais completa, vide STRATHERN, 2002.

⁴³ A impermeabilização era feita por um verniz à base de borracha.

balões, caíram e morreram tentando atravessar o Canal, partindo da França. O famoso Rozier tornou-se o primeiro mártir da aerostação.

2.2 - O BALÃO DIRIGÍVEL

O homem podia voar e isto não se discutia. A evolução do balão foi rápida, sendo usado como esporte e mesmo para fins militares.⁴⁴ Mas subia por convecção e era dirigido ao sabor da vontade dos ventos. Ideias pitorescas foram surgindo como alternativas para dar-lhe dirigibilidade. Remos, velas e pesados propulsores estavam entre elas, mas não resolviam o problema de dar direção ao aeróstato, independentemente do regime de ventos e correntes de ar.

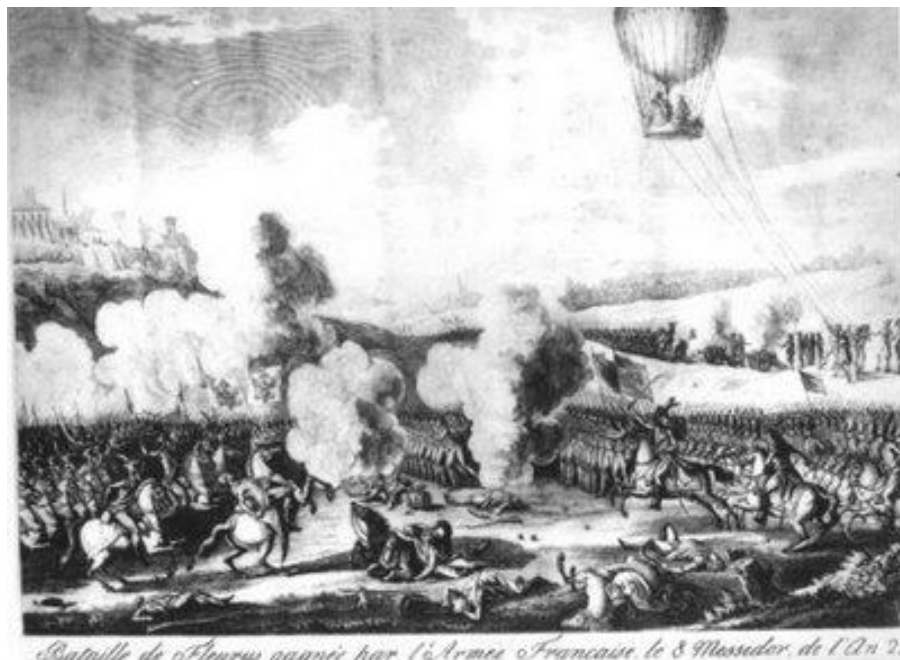


Figura 2.5 - A utilização do balão na Batalha de Fleurus em 26 de junho de 1794.

Fonte: disponível em <<http://sonharvoar.blogspot.com/>>. Acesso em 11/03/2011.

Deixar de ser um brinquedo dos ventos e poder atravessar o espaço para onde se desejasse, este era agora o objetivo. O balão refletia a primeira encarnação do voo humano, atingida em fins do período iluminista. O voo a partir de outros meios teria que esperar ainda algum tempo. Tal período de gestação deveu-se e foi condicionado a um interesse cada vez maior nas descobertas científicas e na tecnologia de mecanização. Os pioneiros do voo eram heroicizados,

⁴⁴ Em 1794, um balão nomeado *l'Entreprenant* foi utilizado para observação e reconhecimento do Exército Austríaco pelo Exército Republicano Francês, na batalha de Fleurus, na Bélgica, o que contribuiu para a vitória do Exército Francês. Duas companhias de observação com balões chegaram a ser formadas na França, porém foram desativadas após um ano.

pois ofereciam expectativas de novos meios de locomoção, transporte e diversão social. Neste cenário, Jean-Baptiste Marie Meusnier de La Place (1754-1793), general do corpo de engenharia francês, apresentou, em 1783 (no mesmo ano, portanto, das experiências dos irmãos Montgolfier), um projeto de aeróstato que seria de fundamental importância para os desenvolvimentos seguintes.⁴⁵

Seu dirigível tinha a forma de um elipsóide de revolução (como um grande ovo),⁴⁶ que “poderia nadar no ar como um peixe na água”. Foi o primeiro projeto a incorporar uma forma mais alongada, visando menor resistência ao ar e melhor manobrabilidade, contrapondo-se aos balões de até então, esféricos. Era dotado de um duplo invólucro, na verdade um balão interno de hidrogênio (balonete)⁴⁷, circundado por ar atmosférico selado em outro balão externo. O ar seria injetado por ventiladores manobrados pela tripulação,⁴⁸ e tinha a função de manter a forma do aeróstato, além de servir de lastro, proporcionando controle da altitude. Uma tela reforçada no fundo prendia cabos triangulados que apoiavam um “carro” suspenso sob o aparelho, com formato propício para flutuação em caso de queda na água. Possuía, aproximadamente, 80 m de comprimento, cubando 1.700 m³ (seu volume). O projeto incluía, ainda, aletas horizontais para a estabilidade e 3 grandes hélices a ser acionadas manualmente pela numerosa tripulação (80 homens). O dirigível nunca chegou a ser construído, pois Meusnier foi precocemente morto por uma bala prussiana em Mogúncia, no ano de 1793, durante as guerras revolucionárias francesas.

A aviação e os experimentadores seguintes devem a Meusnier, dentre outras, as seguintes inovações: a forma alongada do balão, o balonete compensador e o emprego de um propulsor helicoidal.⁴⁹

⁴⁵ Meusnier é mais conhecido pelo seu teorema sobre curvatura de superfícies e pela descoberta do *helicóide*. Trabalhou, também, com Lavoisier na decomposição da água em estudos sobre o hidrogênio. Foi professor de Gaspard Monge.

⁴⁶ A busca das formas mais apropriadas para o voo consistia num problema à parte, e abordá-las tornaria esta obra por demais extensa. Cabe, porém, acrescentar que tais formas eram procuradas na natureza, buscando nesta evidências dos melhores designs, baseando-se em princípios da teleologia.

⁴⁷ Santos-Dumont fez largo uso de balonetes internos nos invólucros de seus dirigíveis.

⁴⁸ VASCONCELLOS, 1908, p.81.

⁴⁹ Ibid, p. 81.

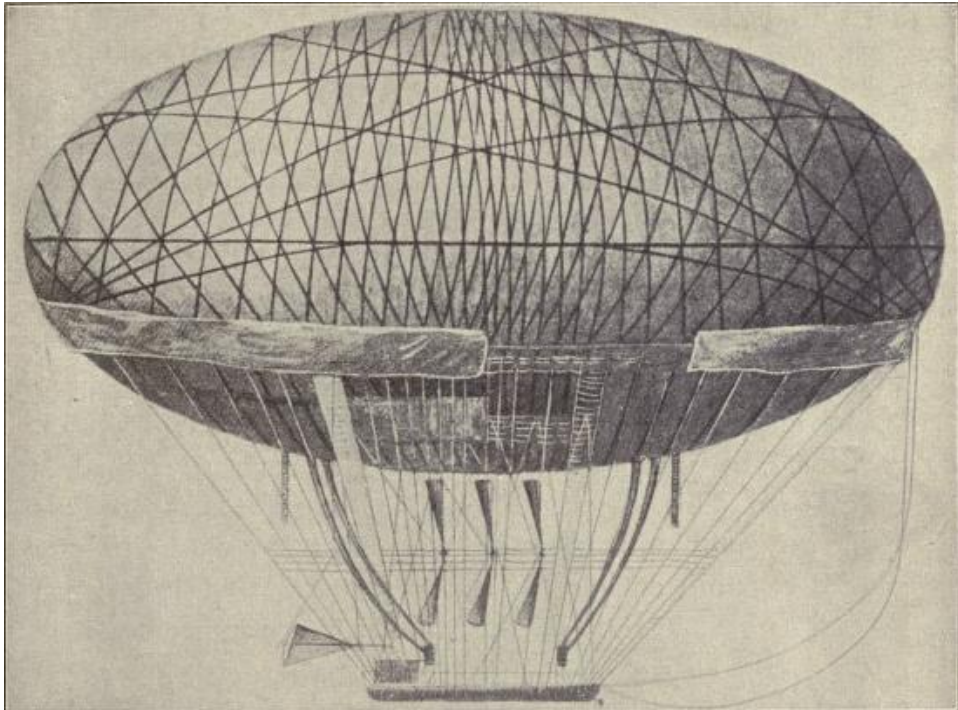


Figura 2.6 - Desenho do primeiro dirigível pelo General Meusnier (1784).
Fonte: HILDEBRANDT, 1908, p. 45.

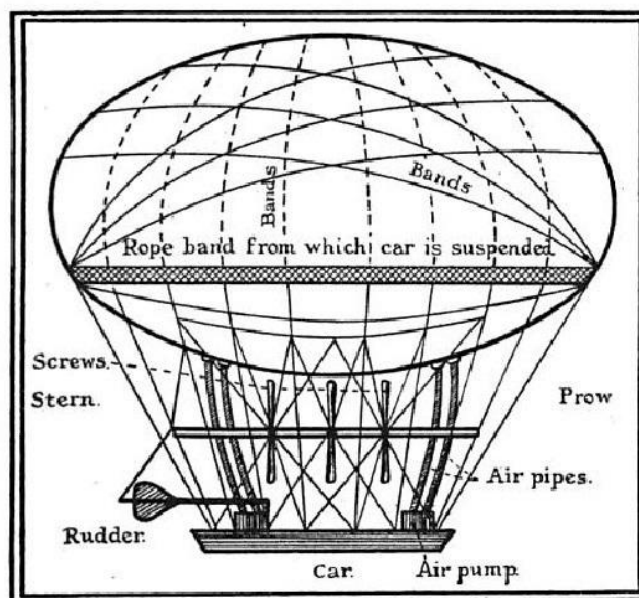


Figura 2.7 - Visão esquemática do Dirigível de Meusnier.
Fonte: disponível em <http://www.academia.edu/1727862/Jean-Baptiste_Meusnier>. Acesso em 23/08/2014.

2.3 - O USO DO MOTOR

Outros projetos de dirigibilidade surgiram, mas a evolução foi pequena. Até que em 1852, o já citado Henri Giffard (1825–1882), um talentoso engenheiro francês, deu um impulso considerável à aerostação. Em 1851, lhe ocorrera a ideia de construir um pequeno motor a vapor de 5 hp, pesando apenas 45 kg, a ser usado em conjunto com um balão. Construiu, então, um dirigível em formato de charuto, com extremidades em ponta, que possuía aproximados 44 m de comprimento por 12 m de diâmetro na parte mais grossa, e cubando 2.500 m³. Possuía um leme direcional em forma de vela triangular. O motor, suspenso, construído com apenas 3 cv, movimentava uma hélice propulsora de três pás e 3 m de diâmetro a 110 rpm. O motor e sua caldeira pesavam perto de 160 kg. Giffard calculou o *passo* da hélice e o esforço de propulsão.⁵⁰

Tudo foi matematicamente calculado. A rede que envolvia o invólucro prendia-se a uma trave de madeira de 20 m, a qual se constituía na “quilha” do dirigível. Em sua extremidade, estava o leme direcional em forma de vela triangular, ligado à última corda do feixe e à plataforma onde se apoiavam motor e acessórios, 6 m abaixo da quilha. Para evitar incêndios ou explosão, uma vez que o gás utilizado era o hidrogênio, ele colocou um pedaço de gaze de arame, semelhante à utilizada em lanternas de segurança, em frente à boca da fornalha, e os gases da caldeira foram enviados para um dos cantos da plataforma.

Giffard alçou os ares em Paris no dia 24 de setembro de 1852, percorrendo 27 km a aproximadamente 10 km/h. Esse foi o primeiro voo controlado e motorizado da história. O aparelho era estável e obedecia ao leme nas manobras, mas falhou em avançar contra o vento e Giffard não conseguiu voltar ao local de partida. O voo estável só era possível com ventos calmos, mas o aparelho era promissor. Sua segunda máquina, testada em 1855, mostrou-se instável e chocou-se contra o solo ao pousar.⁵¹

⁵⁰ TISSANDIER, 1886, p. 258.

⁵¹ Giffard suicidou-se em Paris em 1882, em resposta ao declínio de sua visão. Doou o seu patrimônio à nação Francesa, para fins humanitários e científicos. Seu nome é um dos 72 que foram gravados na Torre Eiffel, em reconhecimento por suas contribuições à República Francesa.

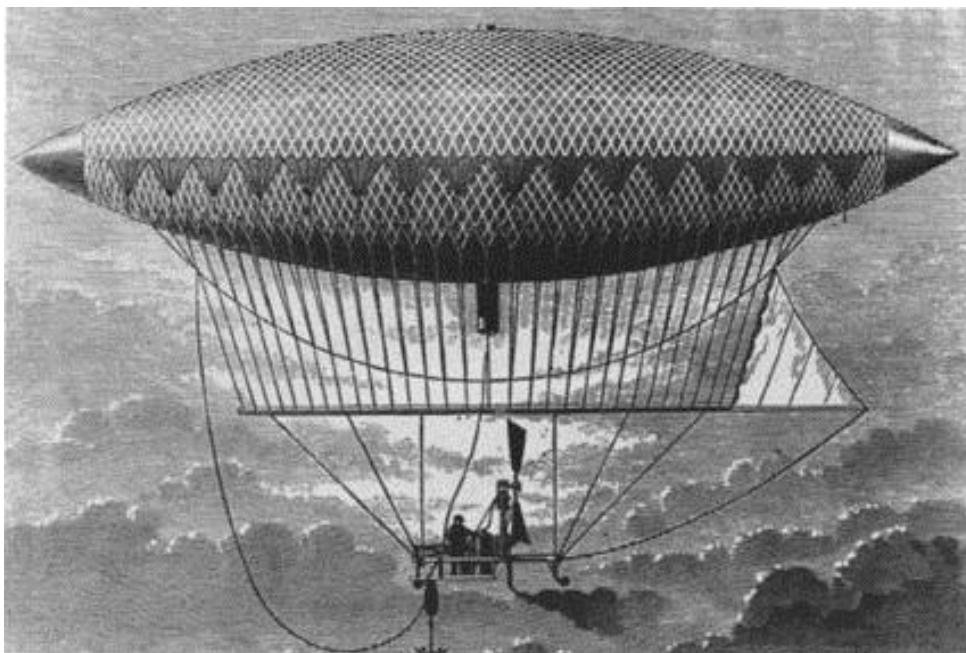


Figura 2.8 - O dirigível de Giffard.(1852).

Fonte: *National Air and Space Museum, Smithsonian Institution*. Disponível em <<http://www.space.com/16623-first-powered-airship.html>>. Acesso em 16/10/2012.

Em 10 de outubro de 1870, Stanislas Charles Henri Dupuy de Lôme (1816-1885), um conhecido arquiteto naval,⁵² se prontificou, perante à *Academia de Ciências de Paris*, a construir um balão dirigível que pudesse ultrapassar o garrote prussiano a Paris, restabelecendo as relações com o resto da França. Em plena Guerra Franco- Prussiana e diante da autoridade do homem que fizera a proposta, foi dado a Lôme um crédito de 40.000 francos para que levasse o projeto adiante.

O dirigível de Dupuy de Lôme tinha 36 m de comprimento e 29 m de largura, cubando aproximadamente 3.500 m³. Obtinha direção e movimento pela aplicação de força humana (8 homens) sobre uma grande hélice. Apesar de sua construção ter-se iniciado durante a guerra, o aeróstato só foi experimentado após o armistício, com resultados medíocres, porém a maneira como a barquinha foi suspensa trazia avanços na área da estabilidade.⁵³ Dupuy de Lôme não aproveitou as lições de Giffard quanto à motorização do dirigível.

⁵² Ele é ainda considerado o maior arquiteto naval da história da França, tendo construído o primeiro encouraçado a vapor, o *Napoléon* (1847) e o primeiro navio de guerra oceânico com revestimento de ferro, o *La Gloire* (1858).

⁵³ VASCONCELLOS, 1908, p.83.

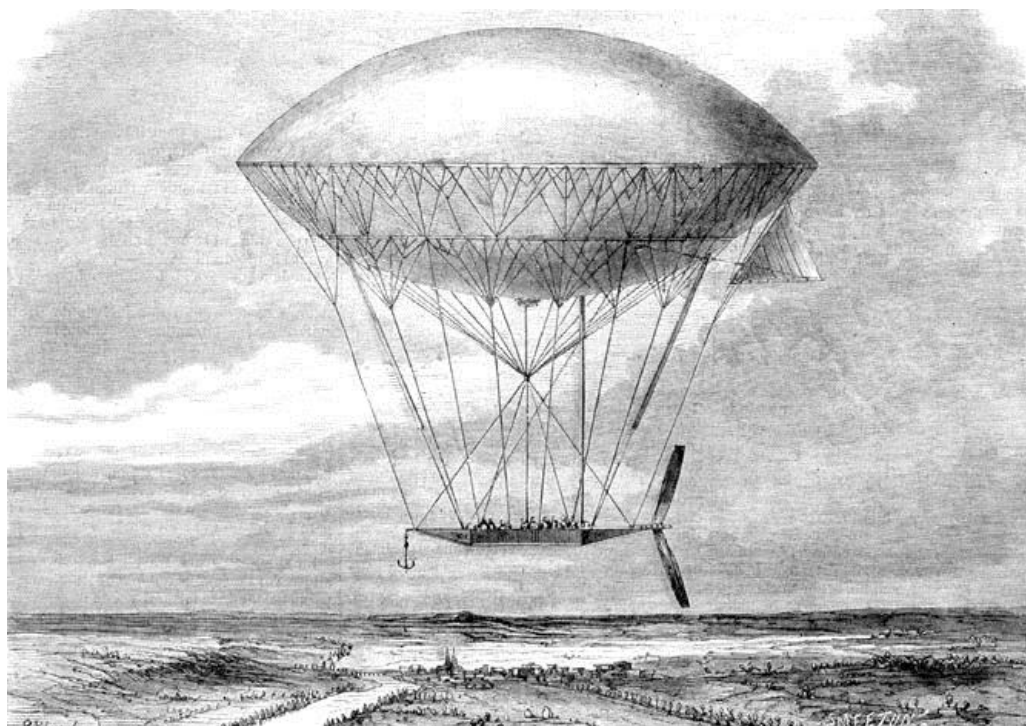


Figura 2.9 - O dirigível de Dupuy de Lôme.

Fonte: disponível em <<http://en.wikipedia.org/wiki/File:DupuyLomeDirigeable.jpg>>. Acesso em 23/08/2011.

Os irmãos Gaston e Albert Tissandier, discípulos de Giffard, preocupados com o problema da dirigibilidade, realizaram, em 1883 e 1884, experiências com algo de que se esperava maravilhas: o motor elétrico. Procuravam mostrar que uma hélice movida por tal motor poderia dar governabilidade a um dirigível. Este, por sua vez, guardava formas similares ao de Giffard. A eletricidade era gerada e fornecida ao motor (um dínamo Siemens pesando 55 kg) por 24 elementos de pilha de bicromato de potássio, desenvolvendo uma força motriz de 1,5 hp. O dirigível possuía 28 m de comprimento e 9,20 m de diâmetro na parte central. Seu volume era de 1.060 m^3 e pesava, no total, 1.240 kg,⁵⁴ com pilhas, motor, hélice, fluido para as pilhas, instrumentos e passageiros. Era munido, em sua parte inferior, de um apêndice cônico terminado por uma válvula automática. A nacelle (“cesta”) tinha a forma de uma gaiola, sendo composta por uma estrutura de bambus amarrados por cordas e fios de cobre, e recoberta por uma capa. Segundo Figuier, o hidrogênio preparado pelos Tissandier, quase puro, era obtido por meio de ácido sulfúrico, água e ferro, em um aparelho inovador.⁵⁵

⁵⁴ FIGUIER, 1887, p.202.

⁵⁵ Ibid, p. 203.

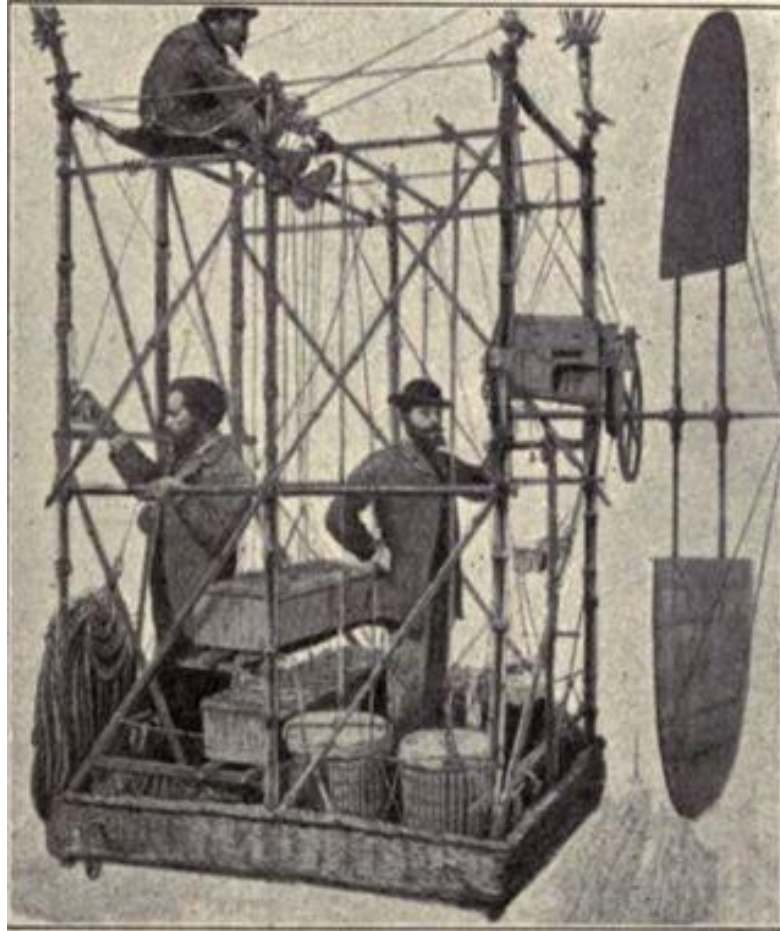


Figura 2.10 - A “cesta” do balão dirigível dos irmãos Tissandier.
Fonte: HILDEBRANDT, 1908, p. 53.

Alguns poucos minutos após a partida, em 8 de outubro de 1883, a bateria de pilhas funcionou. Era dividida em quatro partes, com seis compartimentos cada. Um comutador a mercúrio permitia que se utilizasse, dependendo da vontade do condutor, seis, doze, dezoito ou vinte-e-quatro elementos, variando a velocidade da hélice de 60 a 180 rpm. O aeróstato funcionou bem ao vento mas, contra o vento, permaneceu quase imóvel e seu leme não pôde controlar os movimentos giratórios. Houve problemas também em manter a invariabilidade da forma.

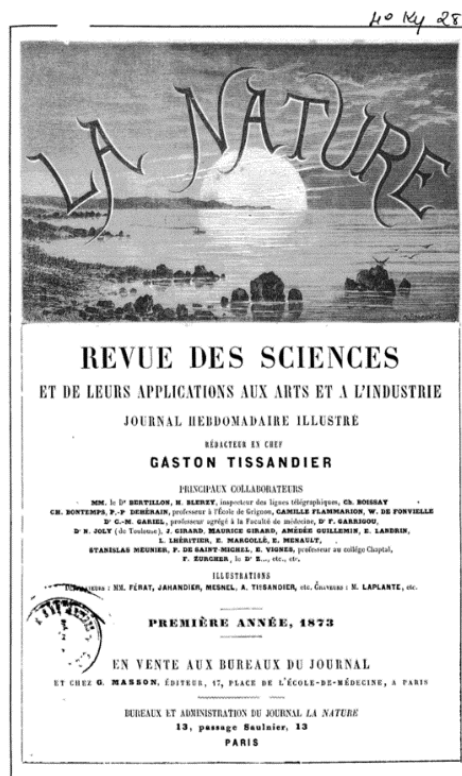


Figura 2.11 - Gaston Tissandier tornou-se, também, editor de revistas científicas e foi fundador da revista *La Nature*, em 1873.

Fonte: disponível em <http://en.wikipedia.org/wiki/La_Nature>. Acesso em 24/09/2011.

Se o dirigível dos irmãos Tissandier não foi realmente uma fracasso, tampouco foi um sucesso esmagador. Ele só havia mostrado que um balão equipado com bom senso poderia, sob certas condições, evoluir pelo ar. Por conseguinte, o capitão Charles Renard, diretor do Estabelecimento Militar da Aeronáutica de Chalais-Meudon, e seu colega e colaborador Arthur Krebs, foram levados a estudar um modelo de dirigível estável, estabelecido sobre os mesmos princípios gerais que o dos Tissandier. Mas eles alteraram e aperfeiçoaram bastante a estrutura e os detalhes técnicos. A aeronave estava pronta em 1884 e foi nomeada *La France*.

O dirigível, alongado, era afilado nas pontas e conservava sua forma através de um balonete compensador. Possuía 51 m de comprimento, um diâmetro de 8,40 m na parte mais larga e um volume de 1.864 m³. Era dotado de uma enorme nacelle de bambu, de 33 m de comprimento, 1,30 m de largura e 1,80 m de altura. O motor elétrico, alimentado por pilhas, pesava 96 kg e fornecia uma potência prevista de 8 hp a 3.600 rpm. A hélice possuía um diâmetro de 7 metros e pesava 40 kg. A primeira ascensão ocorreu em 9 de agosto de 1884, em Meudon. A viagem durou vinte e três minutos: o dirigível viajara 7.600 m, conseguindo atingir uma velocidade de 23 km/h, aterrissando no mesmo ponto de onde havia partido. Por toda a

Europa, mensagens triunfantes saudaram o sucesso do *La France*. Sete voos foram realizados, cinco deles com sucesso, tendo o aeróstato regressado ao ponto de partida.⁵⁶ O problema da navegação aérea parecia ter sido resolvido de uma vez por todas, e os motores elétricos estavam se firmando como uma solução viável, mas ainda eram pesados e não forneciam potência suficiente para enfrentar ventos fortes. Eram necessários motores leves e mais potentes. De qualquer forma, demorou 101 anos para que este melhoramento, o da controlabilidade, aparecesse, desde o primeiro voo dos Montgolfier.

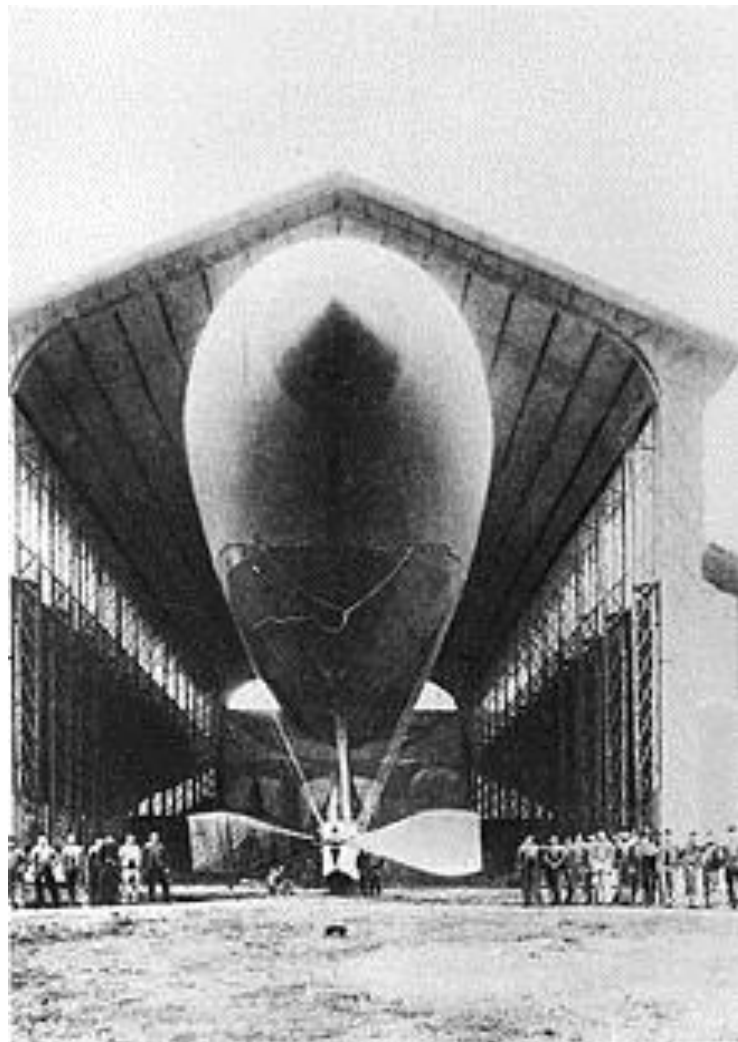


Figura 2.12 - O “La France”.

Fonte: disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Charles_Renard>. Acesso em 24/09/2011.

⁵⁶ VIVIAN, 1921, p.339.

Alberto Santos-Dumont só veria um balão pela primeira vez em 1888, numa exposição em São Paulo. Ele ficou fascinado, pois conhecia a história do desenvolvimento dos balões através dos livros de engenharia de seu pai:

Sabia da mania de aerostação que, com uma série de corajosas e brilhantes experiências, marcou de maneira significativa os últimos anos do século XVIII e os primeiros do século XIX. E havia devotado um verdadeiro culto de admiração aos quatro gênios — os Montgolfier, os físicos Charles e Pilâtre de Rozier e o mecânico Henry Giffard — que haviam indissolivelmente ligado os seus nomes aos grandes problemas da navegação aérea.⁵⁷

Em 1890, o grande fazendeiro de café e pai de Alberto, Henrique Dumont, sofreu um acidente de charrete que o deixou hemiplégico, sendo obrigado a vender a fazenda. O dinheiro da venda foi dividido, parte para ele e a esposa (4.000 contos) e parte para os filhos (1.000 contos para cada). Henrique poderia, então, dedicar-se a cuidar da saúde e foi procurar ajuda médica no melhor centro da época: Paris. Em 1891, a família embarcou para a França no vapor Elbe, seguindo depois para a *Cidade-Luz*.

⁵⁷ SANTOS-DUMONT, 1986, p. 30.

3 - O LUGAR PARA ONDE EMIGRA A ALMA DOS BONS AMERICANOS QUANDO MORREM

“Com o Capitão Nemo e seus convidados explorei as profundidades do oceano, nesse precursor do submarino, o “Nautilus”. Com Philéas Fogg fiz em oitenta dias a volta ao mundo. Na “Ilha à Helice” e na “Casa a Vapor”, minha credulidade de menino saudou com entusiástico acolhimento o triunfo definitivo do automobilismo, que nessa ocasião não tinha ainda nome. Com Heitor Servadoc naveguei pelo espaço.”

Alberto Santos-Dumont em *Os Meus Balões*.

3.1 – UMA JANELA PARA O MUNDO

Foi com grande surpresa que Alberto Santos-Dumont, de sua chegada a Paris com a família, em 1891, constatou incrédulo que os céus não estavam salpicados de balões dirigíveis. Leitor assíduo de Júlio Verne e sabedor dos experimentos de Henri Giffard com dirigíveis movidos por motor a vapor (1852), bem como dos irmãos Tissandier (1883) e dos militares Renard e Krebs (1884) com dirigíveis a motor elétrico, ficou desencantado por ver no céu apenas balões esféricos de hidrogênio, as “Charlières”. Alberto registrou:

Com grande surpresa soube que não existiam ainda balões dirigíveis, mas apenas balões esféricos como o de Charles, em 1783. Ninguém havia, depois de Giffard, prosseguido experiências com balões alongados, propelidos por motor térmico. O ensaio de balões similares, a motor elétrico, tentado pelos irmãos Tissandier em 1883, havia sido retomado por dois construtores no ano seguinte, mas fora definitivamente abandonado em 1885. Desde anos, não se via nos ares um só balão em forma de charuto.⁵⁸

Nesta época, o mundo passava por grandes transformações, tendo a Europa e os Estados- Unidos como polos de desenvolvimento. A França e, principalmente, sua capital, estavam no centro das mudanças. Os franceses se recuperavam da Guerra Franco-Prussiana e Paris era um centro exportador da cultura e da “decadência romântica” do *fin-de-siècle*, com seus artistas, seus bares e seus cabarés regados a absinto. Aos românticos sucederam-se os positivistas que, fiéis às ideias de Comte, estavam convencidos de que se estava no alvorecer de uma nova era de progresso técnico e humano. Grandes soavoengosmas de dinheiro eram movimentadas e o

⁵⁸ SANTOS-DUMONT, 1986, p. 34.

capitalismo se fortalecia. Cada acontecimento relevante tinha repercussão internacional. O mundo encolhia...

Os vários campos do saber apresentavam suas contribuições: a matemática criando métodos que seriam usados por outras ciências, com o rigoroso trabalho de Henri Poincaré e a originalidade do alemão Georg Friedrich Bernhard Riemann. Os físicos como Helmholtz, Clausius e Lorde Kelvin aperfeiçoavam a termodinâmica, o estudo da relação entre calor e trabalho. Maxwell estabelecia, com base nos trabalhos experimentais de Faraday, suas célebres equações - conhecidas como as "equações de Maxwell" - do eletromagnetismo. Com elas, demonstrava que a ação eletromagnética viaja pelo espaço em ondas transversais semelhantes às da luz e com a mesma velocidade, concluindo, daí, serem luz e eletricidade, em última instância, da mesma natureza, assim unindo eletricidade, magnetismo e ótica.⁵⁹

Fizeau e Foucault determinavam as condições e a velocidade de propagação da luz em diversos meios. Em 1860, Kirchoff e Bunsen desenvolviam trabalhos para determinar a estrutura da matéria com a análise espectroscópica. Berthelot alavancava a química orgânica e Le Bel e Van't Hoff criavam a estereoquímica.⁶⁰ As previsões de Mendeleiev se confirmavam, na tabela periódica dos elementos. Na Alemanha, a indústria de pigmentos se desenvolvia em ritmo acelerado. Na metalurgia, Henri Sainte-Claire Deville conseguiu, em 1854, preparar industrialmente o alumínio, abrindo um novo campo. Na área biológica, Louis Pasteur revolucionava a medicina, ao expor que a fermentação era causada por micro-organismos, os *micróbios*, vindo, em 1867, a descobrir o processo que hoje conhecemos por "pasteurização" e enterrando a teoria da abiogênese. Foi também o primeiro a desenvolver uma vacina anti-rábica. A prática da assepsia decorrente permitiu progressos nas cirurgias. Credita-se a esta revolução boa parcela do crescimento demográfico. A publicação da *Origem das Espécies* de Darwin e das teorias de hereditariedade de Mendel causavam suas revoluções particulares e de grande alcance, sendo a primeira fortemente combatida pelo Vaticano. E uma nova revolução científica se avizinhava, com a descoberta dos raios X por Roentgen, da natureza da eletricidade por Lorenz e da divulgação da radioatividade de alguns materiais pelo casal Curie. Em 1900, Max Planck formulava a *Teoria dos Quanta*, com os impressionantes desdobramentos que conhecemos.

⁵⁹ Disponível em: <<http://educacao.uol.com.br/biografias/james-clerk-maxwell.jhtm>>. Acesso em 22/04/2014.

⁶⁰ Ramo da química que estuda os aspectos tridimensionais das moléculas.



Figura 3.1 - Wilhelm Conrad Röntgen e a 1ª radiografia da História.

Fonte: disponível em <<http://origemdascoisas.com/a-origem-dos-raios-x/>>. Acesso em 19/04/2014.

O carvão era a principal força motriz da época, passando sua extração de 90 milhões de toneladas em 1850 para 1,2 bilhão de toneladas em 1914. A Inglaterra, principal produtora, perdia cada vez mais terreno para os Estados-Unidos. A hulha era efetivamente, o combustível motriz da indústria. A máquina a vapor, criada no final do século XVIII, teve efetivamente difundido o seu emprego na Europa do século XIX. Já em finais do século, a turbina a vapor era amplamente utilizada em propulsão de navios e centrais térmicas. Mas o carvão começava a sofrer concorrência de duas novas fontes: a eletricidade e o petróleo.

Em 1859, a pilha elétrica criada por Volta em 1800 foi suplantada pelo acumulador de Planté (acumulador de chumbo ou bateria chumbo-ácida).⁶¹ Empregado na eletrólise, fez surgir a indústria do alumínio. Em 1890 surge o dínamo e, após a resolução técnica do transporte da corrente elétrica, os usos da eletricidade foram enormemente ampliados. Hertz, Branly e Marconi inventavam o telégrafo sem fio e Graham Bell o telefone. Em 1887, com a utilização do arco voltaico de alta temperatura, desenvolveu-se a metalurgia. Daí para o motor elétrico foi um passo. Ao mesmo tempo surgia um forte concorrente à eletricidade: o petróleo. Este, inicialmente usado para iluminação, foi aplicado ao motor a explosão desenvolvido por Beau

⁶¹ YOUMANS, 1896, p. 716.

de Rochas e por Etienne Lenoir (este com o uso de gás). Daimler e Benz desenvolveram um motor a benzina e, alguns anos depois, Rudolf Diesel apresentou um motor que utilizava produtos da destilação do petróleo. A produção de petróleo passaria de 760.000 toneladas em 1871 para 52 milhões de toneladas em 1914. Mesmo assim, petróleo e, principalmente, eletricidade, eram fontes bem escassas e pouco utilizadas diante do carvão. Os Estados Unidos se desenvolviam em ritmo acelerado, embalados pelo petróleo da *Standard Oil Company*, de John D. Rockefeller e pelo aço da *Carnegie Steel Corporation*, de Andrew Carnegie, o qual investiu fortemente no *processo Bessemer* de fabricação de aço, atingindo um enorme domínio da indústria metalúrgica americana. George Westinghouse e Nikola Tesla travavam e venciam a “Guerra das Correntes” contra o influente Thomas Edison, conseguindo financiamento governamental para a instalação de uma usina de geração de corrente alternada nas Cataratas do Niágara, em contraposição ao projeto de implantação de corrente contínua de Edison.⁶²

A França, por sua vez, aproveitava o período de paz que se seguiu à guerra com a Prússia e à Comuna de Paris, sendo a *Cidade-Luz* considerada o novo centro exportador da cultura mundial e local de visita obrigatória das elites, uma referência de vida para os intelectuais brasileiros. Santos-Dumont, encantado, chegou a escrever que “Paris é, como se diz, o lugar para onde emigra a alma dos bons americanos quando morrem”.⁶³ Escritores como Zola, Rimbaud e Balzac, dentre outros, eram leitura obrigatória. O *cinematógrafo*, inventado por Léon Bouly e aperfeiçoado pelos irmãos Lumière encantava multidões, assim como os *teatrofones*, invenção de Clément Ader⁶⁴ que, colocada em pontos estratégicos da cidade, permitia ao transeunte, mediante alguma quantia, ouvir à distância óperas, recitais e peças de teatro.

⁶² Lord Kelvin foi o líder da *Comissão Internacional das Cataratas do Niágara* que deu a vitória à proposta de Westinghouse e Tesla, apesar da forte oposição da *General Electric* de Edison.

⁶³ SANTOS DUMONT, 1986, p.33.

⁶⁴ Engenheiro francês, representante da Bell na França e conhecido construtor aeronáutico.

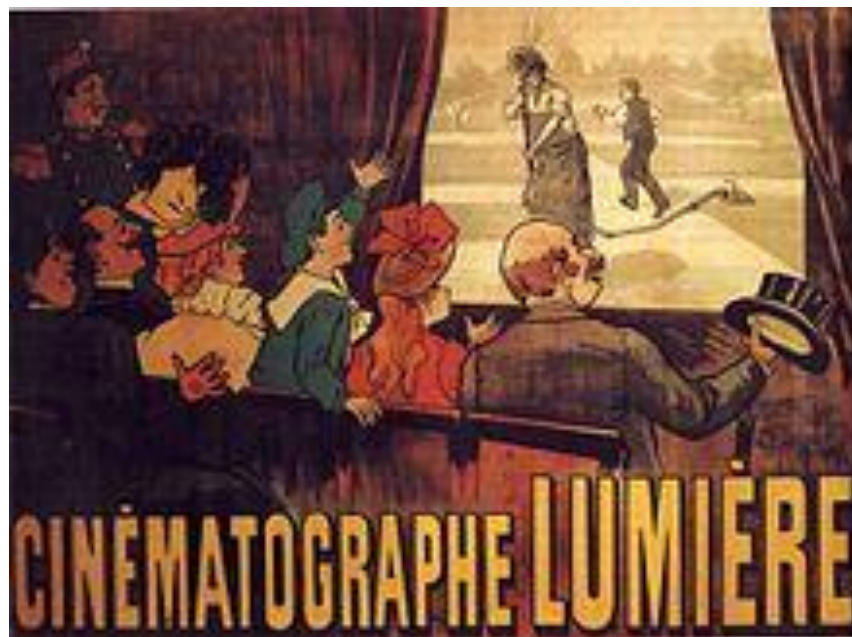


Figura 3.2 - Cartaz anunciando o cinematógrafo dos irmãos Lumière (1895).

Fonte: disponível em <<http://www.cinetom.fr/archives/2013/11/10/28396385.html>>. Acesso em 10/12/2013.

A França era, também, indubitavelmente, o país líder na aviação e a sala de visitas da Europa. Monumentos como a Torre Eiffel, ícone da engenharia de estruturas metálicas, construída para o centenário da Revolução Francesa, bem como a concorrida Exposição Universal de Paris, contribuíam para a aura de progresso e confiança na ciência, muito própria do pensamento positivista em cujo seio Santos-Dumont estava imerso, não só por ter estudado, dos dez aos doze anos, no *Colégio Culto à Ciência*,⁶⁵ criado por ricos fazendeiros da região de Campinas - muitos deles ligados à Maçonaria e adeptos do positivismo como implantado no Brasil por Benjamin Constant -, mas também pela admiração por seu pai, homem racional e inserido no espírito científico da época, que muito o influenciou. “Para mim”, dizia Alberto,

de acordo com a convicção adquirida em leituras, a França, terra dos avoengos de meu pai, que fizera seu curso de engenheiro na Escola Central, representava a própria grandeza e o progresso.⁶⁶

O jovem Santos-Dumont não estava em Paris a passeio, simplesmente. Henrique Dumont viajara com a família em 1891, pois era lá, pensava, que teria auxílio da medicina mais avançada da época, visto que o próprio Pasteur ali realizava curas importantes. Não obteve

⁶⁵ Para aprofundamento na educação de Santos-Dumont, sugerimos esclarecedor artigo em MEDEIROS, 2006b.

⁶⁶ SANTOS DUMONT, 1986, p.33.

resultados satisfatórios, mas foi nessa viagem que Santos-Dumont contemplou o céu vazio de aeronaves. Alberto acompanhou seu pai em visita à Torre Eiffel, com seu incrível elevador elétrico e deslumbrou-se com as bicicletas com pneus de borracha e com os poucos carros a motor que cruzavam as ruas. No Palácio da Indústria, construído também para a Exposição, o jovem pôde observar os diversos usos da eletricidade, os teares a vapor e um invento que iria marcá-lo para sempre: o motor de combustão interna, pequeno e potente, com uma relação peso-potência muitíssimo menor que a dos consagrados motores a vapor. Podemos mesmo dizer que Santos-Dumont não teria seguido o caminho que seguiu e conseguido os sucessos que obteve, não fosse o tal motor pelo qual se enamorou para sempre. E que a aviação deve a tal máquina sua evolução até hoje...



Figura 3.3 - Peugeot Tipo 3, construído na França em 1891.

Fonte: disponível em <http://en.wikipedia.org/wiki/Belle_Époque>. Acesso em 10/11/2014.

Procurando um balonista em Paris para realizar seu sonho de voar em balão esférico, Alberto frustrou-se com as exigências absurdas do dono do aeróstato, tanto em preço quanto em responsabilidade por eventuais danos, e desistiu, por algum tempo, da empreitada. Comprou um automóvel Peugeot, um dos primeiros representantes desta nova invenção que começava a ganhar as ruas da *Cidade-Luz* e o trouxe para o Brasil. O motor a petróleo agora fazia parte de sua vida diária. O automóvel era um verdadeiro símbolo do poder, da liberdade e da autonomia,

e Santos-Dumont adquiriu vários deles. Era, também, fruto do entendimento humano dos processos de transformação de energia: de química em térmica e de térmica em mecânica.



Figura 3.4 - Peugeot 1898 de 3,5 hp de Santos-Dumont.

Fonte: disponível em <http://www.ihp.org.br/lib_ihp/docs/msl20011008.htm>. Acesso em 23/11/2014.

Santos-Dumont não cursou a Universidade. Sem conseguir cura para o grave problema que o afligia, o Dr. Henrique Dumont voltou para o Brasil com a família e, conhecendo a paixão do filho pela navegação aérea,⁶⁷ emancipou-o aos 18 anos e deu-lhe títulos no valor de “muitas centenas de contos”. Para sua educação, aconselhou-o, quase como que antevendo o futuro do filho:

(...) prefiro que não se faça doutor; em Paris, com o auxílio de nossos primos, você procurará um especialista em Física, Química, Mecânica, Eletricidade, etc., estude essas matérias e não se esqueça que o futuro do mundo está na Mecânica.⁶⁸

⁶⁷ Como a aviação era chamada na época.

⁶⁸ SANTOS DUMONT, 1986, p. 36-37.

Santos Dumont, seguindo a recomendação paterna, “não se fez doutor”, sendo o único filho homem de Henrique a não se formar em engenharia. De volta a Paris em 1892, com a ajuda dos primos, encontrou um sábio de origem espanhola do qual praticamente nenhuma informação sobrou, o enigmático *professor Garcia*,⁶⁹ que se tornou preceptor de Alberto e nas palavras deste, um homem que “sabia tudo”. Henrique veio a falecer em 30 de agosto... Alberto estudou com Garcia por, no mínimo, cinco anos.⁷⁰ Frequentou, também, aulas como ouvinte na Universidade de Bristol, na Inglaterra, onde possuía primos. Nesta condição, não se expunha, em vista de sua personalidade um tanto tímida e reservada.

3.2 – NAVEGAR OS CÉUS

O fato é que os dirigíveis não singravam os céus porque, apesar de todos os esforços de seus precursores, o controle do voo era algo ainda não alcançado e, quando muito, só existia em situações onde quase não havia vento. A sustentação mesma não estava resolvida e os dirigíveis nada mais eram do que balões alongados para diminuir sua resistência ao movimento (arrasto), com motores de alta relação peso-potência, falhos e não confiáveis. Pouco se sabia ainda sobre superfícies de controle de voo, apesar dos avanços de Sir George Cayley no século anterior.

Deixar de ser um brinquedo dos ventos e poder atravessar o espaço para onde se desejasse fora o objetivo de Meusnier, de Giffard, dos Tissandier e de Renard e Krebs, dentre outros. E este era, agora, o objetivo de Alberto Santos-Dumont. Mas antes, precisava dominar a arte de voar balões esféricos...

Algum tempo se passara desde a desilusão de Alberto com o balonista que o tentou extorquir, em 1891. Isto o fizera desistir temporariamente da aerostação, fazendo-o dedicar-se aos seus automóveis de diversos modelos. Amadurecendo no manejo dos frágeis motores, sua curiosidade associada ao talento com máquinas, datado de sua tenra infância, ele foi rapidamente dominando a tecnologia dos motores a petróleo e elétrico, com larga preferência pelo primeiro.

Em 1897, mais uma vez a sorte indicou-lhe o caminho. Por ocasião da doença do pai, em 1891, conhecera o motor a petróleo. Agora, em curta estada no Brasil, encontrara por acaso, em uma livraria no Rio de Janeiro, uma obra intitulada *Andrée's Balloon Expedition, In Search*

⁶⁹ O professor Garcia, “um verdadeiro sábio de origem espanhola, que muito se afeioou ao discípulo”, tinha vasto conhecimento nas áreas de Física, Mecânica e Eletricidade. Alberto seguia, então, seus anseios e os conselhos de seu pai.

⁷⁰ SANTOS-DUMONT, 2000, p.22.

of the North Pole,⁷¹ escrita por Henri Lachambre e Alexis Machuron, tio e sobrinho construtores de balões, radicados em Paris. Ao voltar àquela cidade, no outono, procurou-os na tradicional *Casa Lachambre* e, com eles, não só voou a preço justo, como aprendeu a “dirigir” balões esféricos, substituindo-os por inúmeras vezes no transporte de passageiros. Mas, mais do que isso, eles passaram a ser os construtores dos aeróstatos projetados por Santos-Dumont.

O esforço de Santos-Dumont para dar dirigibilidade aos balões, ou melhor, para resolver este problema, passa por inúmeras soluções aerotécnicas. As principais fontes para tais dados são os seus livros “*Os Meus Balões*”, de 1904, e “*O que eu vi, o que nós veremos*”, de 1918, além das revistas especializadas da época. Suas primeiras inovações foram feitas nos tradicionais balões esféricos, e consistiram em utilizar seda japonesa, mais leve e quase tão resistente quanto a seda chinesa habitual,⁷² e baixar o centro de gravidade do conjunto balão-cesta através de cordas mais longas para dar estabilidade, sem aumento de peso, ao seu pequeno balão *Brasil*, de 113 m³. Assim, este não ficava tão sensível aos movimentos do aeronauta na cesta do balão. Os construtores Lachambre e Machuron tentaram demovê-lo da ideia, pois queriam construir para seu cliente um balão de dimensões habituais, de 500 a 2.000 m³, acreditando que um balão deveria pesar mais para ter mais estabilidade. Mas Santos-Dumont era um empirista, e fez os ensaios da seda japonesa no dinamômetro. Conhecia a teoria das tensões. As questões de estabilidade tiveram sua resolução, talvez, com base nos estudos anteriores com Garcia. O fato é que tal projeto, ou melhor, tal cálculo inovador, considerando-se o peso dos equipamentos e o do aeronauta, levou Santos-Dumont a um voo bem sucedido, que se deu em 4 de junho de 1898, seguido de outras diversas ascensões.⁷³

⁷¹ Salomon August Andrée (1854-1897) foi um cientista sueco que liderou uma tentativa de alcançar o Pólo Norte em um balão, o *Öern (Águia)*, juntamente com outros dois companheiros. A expedição, iniciada no litoral da Noruega, estava prevista para seis dias de duração. Era repleta de instrumentos científicos, câmaras fotográficas e equipamentos para sobrevivência, além de pombos-correio. Mas a tentativa fracassou e resultou nas mortes de todos os três integrantes da equipe. Seus corpos só foram achados três décadas depois (HOFFMAN, 2004, p. 39).

⁷² A seda japonesa suportava uma tensão de 700 kg/m contra 1000 kg/m da seda chinesa, porém o peso era bem menor e era 30 vezes mais resistente do que o necessário, segundo informações do próprio Santos-Dumont, ensaiadas no dinamômetro. Há aqui um possível erro de unidades, sendo N/m a unidade correta a ser utilizada, ao invés de kg/m.

⁷³ Com o *Brasil* ele fez mais de 200 ascensões.



Figura 3.5 - O balão Brasil (1898).

Fonte: disponível em <<http://cineastv.forumeiros.com/t694-santos-dumont-fotografias-historicas>>. Acesso em 10/08/2012.

Ainda em 1898, Santos-Dumont mandou construir na mesma *Casa Lachambre* seu balão *L’Amerique*, que cubava 500 m³ de hidrogênio. Com ele, participou do concurso promovido pelo *Aeroclube da França* para voos de grande altitude. O Aeroclube buscava, com a competição, avaliar o comportamento das correntes atmosféricas em tais alturas. Santos-Dumont ficou 23 horas no ar.

Com a infinidade de voos e situações que encontrava, muitas de grande risco, foi adquirindo experiência e aprendendo a malícia e as peculiaridades das correntes atmosféricas e como se comportar diante delas. Santos-Dumont realizou suas inúmeras ascensões em balões esféricos livres, mas sonhava com um meio de locomoção aérea dirigível, a despeito da advertência de Machuron, durante um voo um tanto turbulento para os dois. Dissera-lhe o construtor de balões, no primeiro voo do brasileiro, quando o *guide-rope*⁷⁴ prendeu-se a uma árvore, fazendo o balão sacudir violentamente:

⁷⁴ Corda levada a bordo das cestas dos balões e que serve de lastro, bem como para redução gradual do peso nas aterrissagens e para que pessoas no solo possam segurá-lo.

Observe a trêta [sic] e o humor vingativo desse vento, gritava-me ele no meio dos balanços. Estamos presos á arvore, e veja com que força ele procura arrancar-nos! (...) Que propulsor a hélice seria capaz de vencê-lo? Que balão alongado não se dobraria em dois?⁷⁵

Apesar do alerta do experiente balonista, Santos-Dumont se manteve firme na busca da dirigibilidade para balões. Afinal, sonhava em fazer parte do ambiente tecnológico que começava a trazer para a realidade alguns dos inventos que antes pertenciam apenas às histórias. E suas contribuições seriam vitais para a evolução dos aeróstatos.⁷⁶

⁷⁵ SANTOS DUMONT, 1986, p.66.

⁷⁶ Modernamente falando, as aeronaves se classificam em *aeróstatos*, veículos mais leves que o ar, e *aeródinos*, os mais pesados que o ar. Os primeiros valem-se do "Princípio de Arquimedes". Nessa categoria incluem-se os balões de gás, os de ar quente e os dirigíveis. Na categoria dos aeródinos, temos os planadores, aviões, helicópteros, mísseis, foguetes e suas variações. Esses veículos sustentam-se no ar dinamicamente através das reações aerodinâmicas que surgem entre o ar e a aeronave e seus dispositivos.

4 - OS DIRIGÍVEIS DE SANTOS-DUMONT

"Aprende-se a resolver problemas resolvendo problemas."

George Pólya (1887-1985), matemático húngaro.

4.1 – O FABULOSO MOTOR A PETRÓLEO

Admirador de Giffard, Alberto Santos-Dumont ficara surpreso que os ensaios com dirigíveis em forma de charuto tivessem sido interrompidos por volta de 1885, após as tentativas dos Tissandier e de Renard e Krebs com motores elétricos. Mas pelos idos de 1890, já se contava com uma nova tecnologia, e Alberto tratou de tirar proveito disto. Tratava-se do motor a explosão, que era chamado de “motor a petróleo”, do tipo que equipava seus automóveis. Dotado de carburador, trazia a possibilidade de uma relação peso-potência mais eficaz que os motores a vapor ou o pesado motor elétrico.

A teoria fundamental dos motores de combustão interna foi publicada por Nicolas Léonard Sadi Carnot, criador do “Ciclo de Carnot”, em 1824. O primeiro motor de combustão interna funcional já havia sido construído pelo belga Etienne Lenoir em 1859 e patenteado em 1860. Era um motor de um cilindro e dois tempos, a gás de carvão (hulha) ou a óleo leve (xisto ou alcatrão), cuja mistura com o ar era inflamada por uma centelha gerada por uma bobina de indução, e era desenhado dentro dos conceitos dos motores a vapor da época, a eles se assemelhando.⁷⁷

Em 1863, Lenoir desenvolveu um motor de 1,5 hp movido a petróleo,⁷⁸ com um carburador primitivo, que foi usado para movimentar um triciclo rudimentar. Era um motor ineficiente e barulhento, que movia o triciclo a uma velocidade que se assemelhava à de um homem andando. Suas outras invenções incluíam um freio elétrico para trens (1855), uma lancha equipada com o seu motor (1886), bem como um método de curtimento de couro com ozônio.⁷⁹ Lenoir teve seu papel de destaque na substituição do vapor pelo gás.

Mas a afirmação do motor de combustão interna veio mesmo com Nikolaus August Otto. Empolgado com a tecnologia do gás, ele desenvolveu um motor melhor, o “motor atmosférico livre de pistão”, premiado na Exposição Universal de Paris em 1867. Barulhento ainda, ele era aproximadamente 60% mais eficiente que os demais motores produzidos por

⁷⁷ DERRY; WILLIAMS, 1961, p. 601. A mistura de gás e ar não era comprimida.

⁷⁸ O termo “motor a petróleo”, encontrado na literatura da época, significa motor cujo combustível é um derivado do petróleo, como a gasolina.

⁷⁹ *Britannica Online Encyclopedia*. Disponível em: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/336021/Etienne-Lenoir>>. Acesso em 03/10/2013.

concorrentes quanto ao consumo de combustível. Em 1876, foi criado o *motor Otto*. Tratava-se de um motor a gás de quatro tempos (admissão – compressão – combustão – descarga),⁸⁰ onde a mistura gás-ar era comprimida antes da centelha e posterior explosão da mistura. Gás também era usado como fonte externa de ignição. Após a explosão, que gerava a força útil para mover o pistão, os gases provenientes da queima eram expelidos (descarga). Movimento retilíneo era transformado em circular através de bielas e manivelas. Tal desenvolvimento fortaleceu o uso de combustíveis gasosos. Em 1883, Otto finalmente construiu um motor que também usava petróleo. Karl Benz aperfeiçoou o motor com ciclo de quatro tempos e apresentou o primeiro automóvel em 1886.

Santos-Dumont precisava de um motor confiável para uma solução de dirigibilidade diante das correntes de ar. Os motores a petróleo eram uma novidade ainda não confiável e sua regulação, precária. Uma falha no chão já era arriscada. No ar, poderia ser fatal... Mas tudo mudou depois da compra de um triciclo *De Dion* motorizado, cuja simplicidade de seu pequeno motor deu novo alento ao ímpeto do aeronauta. O motor, um *Dion-Bouton* de 1,75 cv, foi readaptado. Em uma oficina de sua escolha, na rua do Coliseu, superpôs dois cilindros sobre um único cárter (motor em “tandem”), conseguindo obter um motor de 3,5 cv com o baixíssimo peso de 30 kg.⁸¹

Procurei, próximo da minha residência, no centro de Paris, a oficina de algum pequeno mecânico onde eu pudesse fazer executar o meu plano sob as minhas próprias vistas, e eu pudesse meter a mão na obra. Encontrei o que queria na rua do Coliseu. Comecei por proceder à superposição de dois motores de triciclo sobre um só Carter, de modo a acionar somente uma biela, o todo sendo alimentado por um único carburador. Para reduzir o peso ao mínimo, aliviei cada um dos órgãos tanto quanto pude, sem prejuízo da respectiva solidez. Neste particular realizei algo de interessante para a época, um motor de três e meio cavalos pesando 30 quilos.⁸²

Santos-Dumont estava encantado com a simplicidade e boa performance do motor do triciclo. Mas faltava analisar sua vibração, para não ter surpresas desagradáveis no ar. Testou sua trepidação pendurando o veículo a uma árvore e ficou feliz com a suavidade da máquina.

⁸⁰ Proposto anteriormente por Beau de Rochas em 1862 e, em seguida, esquecido. Otto deu ênfase à importância da compressão da mistura de combustível e ar antes da ignição.

⁸¹ Aproximadamente 8,6 kg/cv, o que estava muito além das previsões de relação peso-potência mais otimistas para a época, três vezes maiores.

⁸² SANTOS DUMONT, 1986, p. 70 e 73.

Ampliou os testes na corrida Paris-Amsterdã, em 1897, ficando satisfeito. Giffard e os demais não tiveram tal possibilidade de motorização.

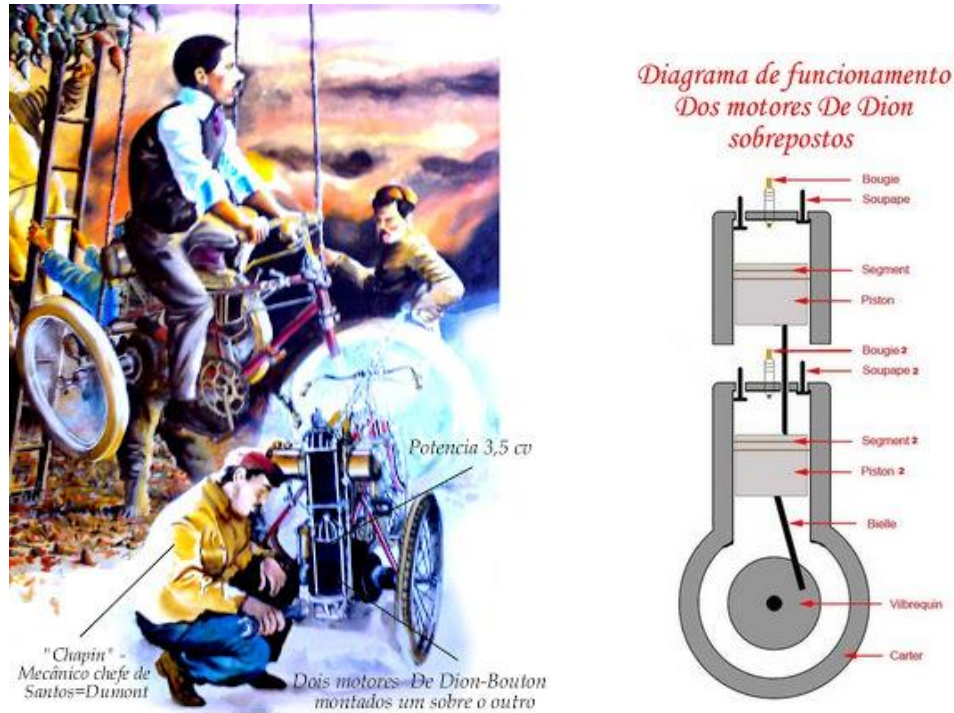


Figura 4.1 - O triciclo De Dion e o motor em “tandem”.

Fonte: disponível em <<http://santosdumontvida.blogspot.com.br/2008/03/comeo-da-vida-de-inventor.html>>.

Acesso em 19/12/2014.

4.2 – AVANÇOS, RECUOS E NOVOS AVANÇOS

Já contando com um motor a petróleo confiável e cada vez mais inconformado em ficar ao sabor dos ventos e dos riscos na aterragem de um balão esférico, Santos-Dumont procurou, então, construir uma aeronave para o motor que criara, que foi o seu dirigível Nº 1, onde colocaria a marca do gênio. É bem verdade que tivera a vantagem de conhecer os modelos de seus predecessores, suas virtudes e seus pontos fracos. O gênio, porém, não está apenas em aperfeiçoar, mas também em propor soluções novas. E como ele as fez... Não só o motor em tandem já era em si uma grande inovação, mas o Nº 1, de 25 m de comprimento por 3,5 m de diâmetro, tipo “charuto”, era esguio para oferecer mínima resistência ao ar. Foi o primeiro dirigível a ter um invólucro de seda. O motor forneceria tração para uma hélice com duas pás de 0,4 m de comprimento cada.

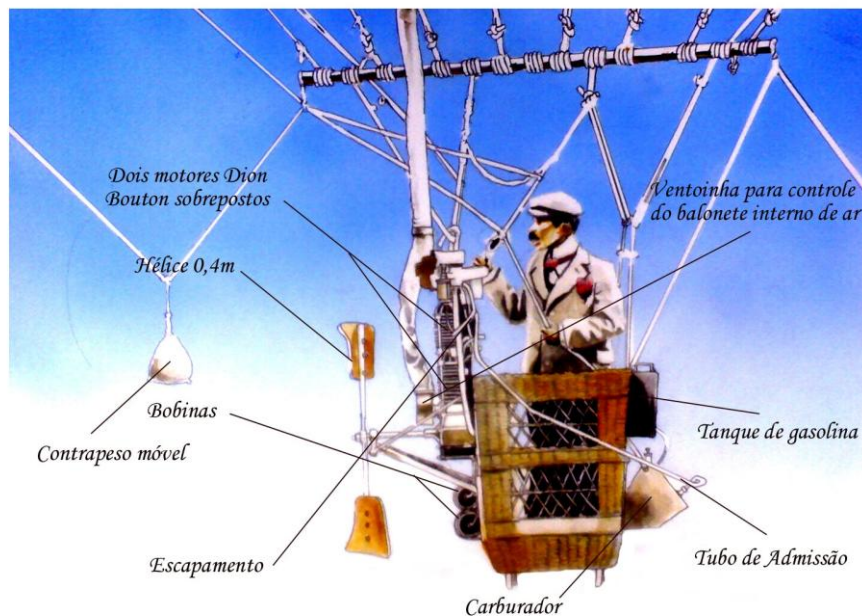


Figura 4.2 - Detalhes da motorização e propulsão do Dirigível Nº 1.

Fonte: disponível em <<http://santosdumontvida.blogspot.com.br/2008/03/comeo-da-vida-de-inventor.html>>.

Acesso em 19/12/2014.

Seguiram-se outras inovações. Para evitar o peso da rede - que nos balões esféricos envolvia seus invólucros e sustentava as cestas, com aeronauta, lastro e equipamentos -, ele mandou costurar, nas laterais do próprio invólucro do dirigível, dois compartimentos que alojavam as hastes das quais saíam os cabos de sustentação. Propôs uma estrutura triangular de aço para o leme, revestida de seda – a forma talvez remetendo às velas triangulares de veleiros -, bem como um sistema de pesos deslocáveis para fazer subir ou descer o aeróstato, alterando o centro de gravidade. Barquinha, piloto, motor e reservatório de combustível ficavam pendurados a alguma distância do balão. Mas restava um grande problema ainda, o dos gases quentes e eventuais fagulhas que escapavam do motor. O gás que preenchia o balão era hidrogênio, altamente inflamável, e a combinação motor a explosão - hidrogênio era desencorajada pelos balonistas veteranos. Aí entrou mais uma ideia lógica, porém inspirada, de manter a descarga do motor virada para baixo. Alberto gostava de resolver as coisas da forma mais simples. “Sempre adorei a simplicidade, razão pela qual não aprecio as complicações, por mais engenhosas que sejam”.⁸³ Ele, assim como o frade franciscano Guilherme de Ockham

⁸³ SANTOS DUMONT, 1986, p.68.

(1285-1347),⁸⁴ apreciava as soluções mais simples e eficazes e unia assim, sem perigo, balão de hidrogênio⁸⁵ e motor a explosão.

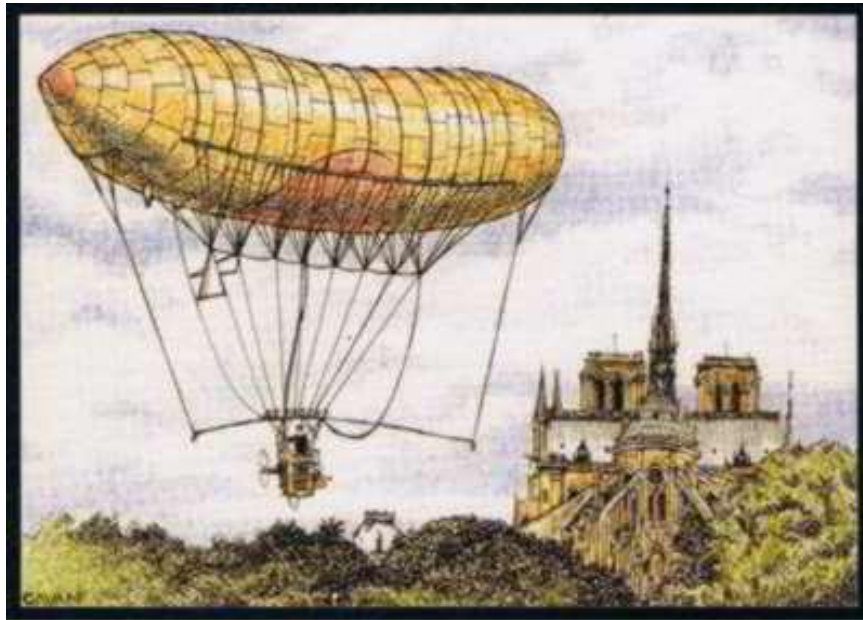


Figura 4.3 - BP0197-BILHETE POSTAL SANTOS DUMONT/DIRIGÍVEL Nº 1 (1998).

Fonte: disponível em <http://www.filatelia77.com.br/popup_image.php?PID=49283>. Acesso em 30/01/2012.

Notemos a clareza com que Santos-Dumont percebeu a necessidade da redução da relação peso-potência dos motores dos aeróstatos para a eficiência do voo, obtendo inclusive a aprovação do célebre inventor Thomas Edson:

Utilizar-me-ei deste motor leve e potente, disse eu. Giffard não teve um tal auxiliar. A máquina a vapor de Giffard, máquina primitiva e de pouca força relativamente ao seu peso, com uma fornalha que vomitava faíscas ardentes, não oferecia ao corajoso inovador nenhuma possibilidade séria de êxito. Não perdi tempo pensando num motor elétrico que, se apresenta poucos perigos, sob o ponto de vista da aerostação, tem o defeito capital de ser a máquina mais pesada que se conhece, com relação ao peso da sua bateria. Minha preferência teve aliás a aprovação de Edison, que em abril de 1902 me dizia: "O senhor fez bem em escolher o motor a petróleo; é o único em que pôde pensar o aeronauta no estado atual da indústria; os motores elétricos, tais como eram

⁸⁴ "As entidades não devem ser multiplicadas além do necessário, a natureza é por si econômica e não se multiplica em vão" (princípio da economia conhecido como a "navalha de Ockham").

⁸⁵ O gás hélio, inerte, ainda não era usado na época.

notadamente quinze ou vinte anos atrás, não podiam conduzir a nenhum resultado. Por isto é que os irmãos Tissandier desistiram”.⁸⁶

E, comparando o motor a vapor ao motor de combustão interna:

Quanto à máquina a vapor, por mais extraordinários que tivessem sido os aperfeiçoamentos nela introduzidos nos últimos tempos, não eram bastantes para me animarem. Em verdade, motor por motor, talvez vale mais a vapor do que a petróleo. Mas comparai a caldeira e o carburador: onde este último pesa N gramas por cavalo de força, a caldeira, N quilos. Em certos motores leves a vapor, de leveza mesmo maior que a dos motores a petróleo, a caldeira destrói sempre a proporção. Com uma libra de petróleo podeis desenvolver um cavalo de força durante uma hora. Para obter esta mesma energia da máquina a vapor mais aperfeiçoada, precisareis de muitos quilos d'água e de combustível, petróleo ou outro. Não podereis descer a menos de vários quilos por cavalo, mesmo pela condensação da água.⁸⁷

Santos-Dumont parecia dominar bem o conhecimento tecnológico da época, assim como física básica e aplicada. Em seguida, verifiquemos como ele fazia as medições da potência necessária para realizar determinado esforço. Em suas próprias palavras:

Pus o motor em ação e medi a força do movimento de impulsão que determinava o propulsor batendo o ar; opus-me a este movimento de impulsão por meio de uma corda fixa a um dinamômetro, e constatei que a força de tração desenvolvida pelo motor no propulsor, com dois braços medindo cada um, 1 metro, atingia 25 libras, ou sejam 11 quilos e meio. Tal número prometia uma boa velocidade a um balão cilíndrico das dimensões do meu, cujo comprimento era igual a cerca de sete vezes o diâmetro. Com 1.200 voltas por minuto, e caso tudo corresse normalmente, o propulsor, fixo diretamente à árvore do motor, imprimiria sem esforço à aeronave uma velocidade de pelo menos 8 metros por segundo.⁸⁸

Havia, ainda, um balonete dentro do invólucro, mantido cheio por uma bomba de ar ligada ao motor, para manter a forma e a pressão interna do balão, que cubava 186 m³. No dia 18 de setembro de 1898, em sua primeira decolagem, acatando a opinião de balonistas presentes de que deveria decolar a favor do vento, chocou-se contra as árvores próximas, rasgando-se o dirigível. Mas, impecável, na manhã de 20 de setembro de 1898, com o dirigível N° 1 já

⁸⁶ SANTOS DUMONT, 1986, p.68-69.

⁸⁷ Ibid., p.69.

⁸⁸ Ibid., p.75

consertado, Santos-Dumont fez o aparelho elevar-se, contra o vento, do Jardim da Aclimação, no Bois de Boulogne, sob aclamação do público presente. Os comandos responderam bem e ele alcançou os 450 m. No retorno, sobre o Bois de Boulogne, uma das válvulas do balonete deixou de funcionar a contento, e a forma do invólucro perdeu a rigidez. A bomba de ar também mostrou-se insuficiente. O balão começou a dobrar-se, derivando para o Campo de Bagatelle, descendo “na razão de quatro ou cinco metros por segundo”,⁸⁹ em franca queda, quando, a um pedido do aeronauta, meninos que ali estavam empinando papagaios de papel fizeram o mesmo com o artefato em queda, tendo por corda o *guide-rop*e (cabo pendente). Assim, pela calma e presença de espírito, Alberto escapou da morte precoce. Mas teve medo e continuou a buscar soluções. O medo não o paralisava. O movia...

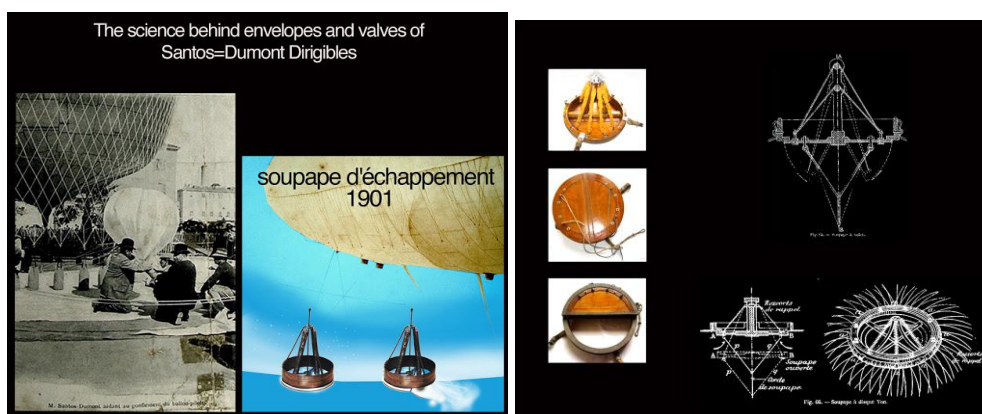


Figura 4.4 - Válvulas utilizadas por Santos-Dumont para alívio da pressão do H₂ e do ar, em face de sua expansão e contração em função da altitude.

Fonte: disponível em <<http://santosdumontvida.blogspot.com.br/>>. Acesso em 10/11/2014.

Santos-Dumont acreditava que o problema do seu dirigível estava ligado ao mau funcionamento da válvula do balonete. Não se apercebeu que o problema era da estrutura alongada e não-rígida do dirigível, até que seu N° 2, de 200 m³ e formato semelhante ao de N° 1, que voou em 11 de maio de 1899, também sucumbiu dobrado por um golpe de vento, em função da contração do gás devido ao mau tempo e à evaporação da água da chuva absorvida e depositada sobre o balão, acelerada pelo vento.⁹⁰

É verdade que, no N° 2, o aeronauta realizou modificações razoáveis e mesmo algumas inovações. Aumentou sua capacidade ascensional em relação ao N° 1, com mais 14 m³ de hidrogênio, logo mais 20 kgf de empuxo ascensional. Pela primeira vez em um aeróstato,

⁸⁹ AIMÉ, avril 1901, p.76.

⁹⁰ MEDEIROS, 2006a, p. 105.

utilizou o alumínio, material leve, nas pás do ventilador responsável por injetar ar no balonete compensador, em substituição à bomba de ar defeituosa, regulando as válvulas do balão principal e do balonete, de modo que esta última abrisse primeiro, para evitar a perda do precioso gás. Aumentou, também, a potência de seu motor tandem para 4,5 cv.

Preocupado com a baixa resistência do invólucro a deformações, construiu o dirigível Nº 3 menor em comprimento, mas com maior volume de gás (500 m³) e mais “arredondado” que os anteriores, para evitar que se dobrasse. Possuía, o aeróstato, 20 m de comprimento por 7,5 m de diâmetro em sua parte mais larga e voou com sucesso! O motor era o mesmo, sendo adaptado, assim como no Nº 2, para gerar 4,5 cv. Usou gás de iluminação, menos inflamável,⁹¹ porém mais denso que o hidrogênio, valendo-se da maior cubagem para obter uma maior força ascensional.

Com o Nº 3, dispensou o balonete interno e sua bomba de ar (acreditando ser esta o elo fraco). Desafiando as superstições, decolou em 13 de novembro de 1899, data do fim do mundo prevista pelos astrólogos da época,⁹² do parque de aerostação de Vaugirard em direção ao Campo de Marte, onde descreveu círculos, subiu e desceu em diagonal utilizando os pesos deslocáveis e a potência do motor e chegou a uma verdade essencial da aerostação dirigível: “descer sem sacrificar o gás, subir sem sacrificar lastro”.⁹³ Contornou diversas vezes a Torre Eiffel e, após voar sobre o Parc des Princes, veio a pousar em Bagatelle, receoso de voltar à estação de Vaugirard, pequena e de difícil acesso, face ao vento reinante. Com o Nº 3, a questão da dirigibilidade ficava bem encaminhada, mas percebia-se, ainda, a necessidade de maiores potências e velocidades, bem como de controles mais seguros e efetivos para fazer frente ao vento. Cabe assinalar a percepção do aeronauta, então, de que *o maior problema que se apresentava era o da estrutura* e, para tanto, o Nº 3 possuía uma haste de bambu de 10 m suspensa sob o invólucro, servindo de “quilha”. Esta passou a suportar a nacelle (cesta, com motor e reservatório de combustível) e dois *guide-ropes* de 30 m e 60 m, ligados um avante e outro a ré da “quilha”.⁹⁴ Percebeu, também, a necessidade de um motor mais potente para contrapor o maior arrasto do invólucro (que apresentava maior seção ao vento relativo) e o maior peso devido à qualidade do gás usado, voltando, nos modelos seguintes, a usar o hidrogênio.

⁹¹ Segundo Santos-Dumont, com mais ou menos metade da força ascensional do hidrogênio (SANTOS DUMONT, 1986, p. 110).

⁹² AIMÉ, avril 1901, p.77.

⁹³ SANTOS DUMONT, 1986, p. 111.

⁹⁴ AIMÉ, avril 1901, p.77.

Depois de vários voos bem sucedidos com o Nº 3, Santos-Dumont sofreu um pequeno acidente. Perdeu o seu leme e foi obrigado a realizar um pouso forçado, após o que decidiu abandonar o aparelho para dedicar-se a um modelo novo. Além do mais, achava-o pesado e de pouca potência.

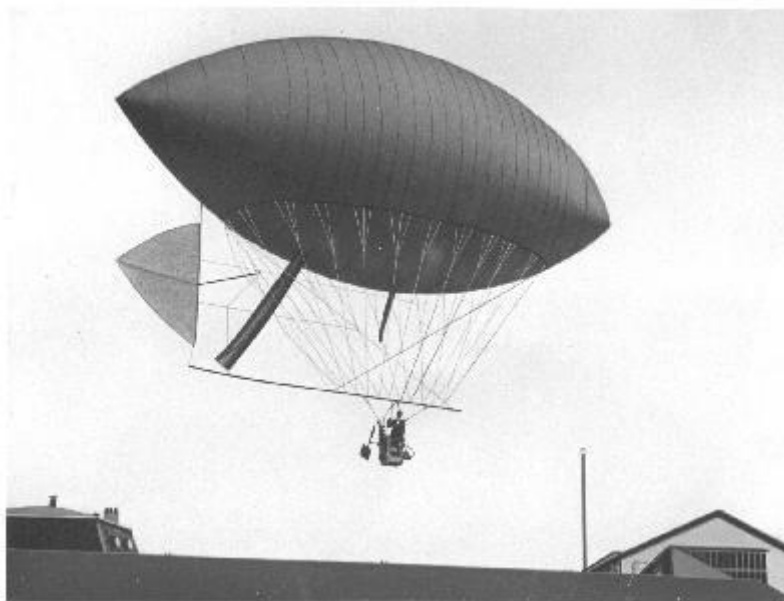


Figura 4.5 - O Dirigível Nº 3.

Fonte: disponível em <<http://www.snookerclube.com.br/santosdumont/fotoshistor.htm>>. Acesso em 27/06/14.

No Nº 4, de projeto totalmente novo, Alberto retorna ao hidrogênio e ao balonete compensador e busca aperfeiçoar o dirigível, trocando a barquinha por um selim de bicicleta, colocado diretamente sobre a “haste-quilha”, de forma a manter o centro de gravidade o mais baixo possível. Em busca de inovação, usou hélice tratora a vante da aeronave,⁹⁵ o que prejudicou sua saúde, pois o forte vento gerado incidia diretamente sobre ele. O formato do aeróstato era “cilindro-cônico”, assimétrico, uma transição entre os delgados Nºs 1 e 2 e o bojudo Nº 3. Utilizava um motor novo e mais potente: o *Buchet* de dois cilindros, que gerava 7 cv de potência girando a 100 rpm e produzindo, de um ponto fixo, um esforço de tração de cerca de 30 quilos, segundo os seus cálculos. Usava pedais para acionar o motor (como num triciclo). O leme era comandado por um guidão. Cordas à mão governavam os pesos deslocáveis, a faísca (ignição) do motor, as válvulas do balão e as torneiras de liberação do

⁹⁵ O peso da hélice tratora à vante, com duas pás de seda esticada sobre placas de aço de 2 m de comprimento cada, tendia a fazer a aeronave picar (abaixar a parte dianteira, levantando a traseira em torno do eixo transversal), o que era compensado pelos já conhecidos pesos deslocáveis.

lastro líquido em seu, talvez, primeiro uso aeronáutico.⁹⁶ Como num projeto de Da Vinci, todos os seus membros estavam envolvidos na manutenção da sustentação e da dirigibilidade. Com um menor entrecruzamento de peças verticais e horizontais, tendo a quilha por limite inferior, distribuiu melhor as tensões por cabos dispostos “como em uma teia de aranha”.⁹⁷ Tal busca de simplificação estaria presente, também, em seu projeto de helicóptero, o qual veremos, possuía pouca rigidez em face de soluções advindas de projetos de dirigíveis...

Em verdade, o aeróstato estava sendo preparado para o *Congresso Internacional Aeronáutico*, que ocorreria em setembro de 1900, em Paris. A cidade também sediaria uma grande exposição industrial comemorativa da passagem do século, com a presença de luminares da ciência da época. Em agosto de 1900, Santos-Dumont voava pela primeira vez com seu dirigível N.º 4, um aparelho assimétrico de 29 m de comprimento e 5 m de diâmetro, com 420 m³ de hidrogênio, uma mescla em formato, como vimos, de seus modelos anteriores.⁹⁸ Com esta aeronave, apesar de um acidente de última hora no leme, elevou-se contra o vento e fez demonstrações para o *Congresso* em 19 de setembro de 1900. Demonstrou a eficácia de um propulsor acionado por motor a gasolina e recebeu palavras de estímulo do astrônomo, inventor e secretário do *Smithsonian Institution*, o americano Samuel Pierpont Langley, maior nome da ciência aeronáutica na época e que trabalhava na construção de um aparelho mais-pesado-que-o-ar.

Santos-Dumont decidiu, então, aprimorar seu aparelho, dobrando a potência do motor, agora um *Buchet* de 4 cilindros e 14 cv, refrigerado a ar,⁹⁹ que realizava um “esforço de tração de 55 kg” de um ponto fixo, buscando melhorar a estabilidade ainda através do uso de lastro líquido e estudos sobre o passeio do C.G. (centro de gravidade). Devido ao aumento de peso, em função do motor mais potente, aumentou para 33 m o comprimento do dirigível - cortando o balão ao meio e intercalando um acréscimo -, que passou a cubicar 520 m³. Em consequência disto e para antecipar-se à construção de aeronaves maiores, estendeu o comprimento de seu hangar em 4 m.

⁹⁶ As oscilações da água e seus efeitos inerciais poderiam causar instabilidade no aeróstato, mas como bem assinalou MEDEIROS, 2006a, p. 120, Santos-Dumont, em mais uma demonstração de capacidade técnica, dividiu o lastro em dois reservatórios menores, equilibrados entre si, minimizando o problema.

⁹⁷ SANTOS DUMONT, 1986, p. 118.

⁹⁸ Santos-Dumont já possuía, à época, equipamento gerador de hidrogênio em seu hangar, o primeiro no mundo, construído, no ano de 1899 em Saint-Cloud, em terreno adquirido ao Aeroclube da França. O hangar possuía 11 m de altura, 7 m de largura e 30 m de profundidade, o que evitava a necessidade de esvaziar os dirigíveis após cada utilização. O sistema de produção de hidrogênio se baseava na reação exotérmica do ácido sulfúrico com limalhas de ferro em grandes tanques.

⁹⁹ O motor, sem camisa d'água, era refrigerado por uma ventoinha. Isto diminuía seu peso, em face do aumento de potência.

Mas a forte corrente de ar gerada pelo novo motor, no tempo frio do outono, acabou por causar uma pneumonia em Santos-Dumont, que foi para Nice, na Riviera Francesa, recuperar-se.

Lá teve a ideia de fazer uma “verdadeira quilha de aeronave”, de madeira de pinho e seção triangular, na verdade uma treliça de 18 m e 41 kg, leve e em condições de oferecer resistência mínima ao ar. As juntas eram em alumínio para dar leveza.¹⁰⁰ Para evitar variações higrométricas, reforçou o conjunto com cordas de piano, ao invés das convencionais e regozijou-se pelo ineditismo da ideia de usá-las, também, nas suspensões de toda a aeronave, visando reforçar a estrutura, reduzindo peso e arrasto. Em suas palavras:

(...) Realizei a inovação e não tive senão que louvar-me. Estas cordas de piano cujo diâmetro é de oito décimos de milímetro possuem alto coeficiente de ruptura, e uma superfície tão delgada que sua substituição à corda ordinária nas suspensões constitui maior progresso que muitas invenções mais brilhantes. De fato, constatou-se que as cordas de suspensão opõem ao ar quase tanta resistência quanto o próprio balão.¹⁰¹

Abandonava, assim, o N° 4 e dava início à construção de seu Dirigível N° 5, aproveitando alguns equipamentos do aeróstato anterior. Um novo motor de 4 cilindros sem “camisa d’água”, com 16 cv, foi posicionado a 7 m de uma extremidade,¹⁰² próximo ao centro da quilha, para baixar e centralizar o centro de gravidade, aumentando a estabilidade do conjunto e diminuindo o torque na estrutura. E este acionava o propulsor, que voltou para a popa da aeronave, através de um eixo oco de aço, cujo efeito positivo era o de reduzir o peso e aumentar a inércia rotacional. O selim dava lugar novamente à cesta (barquinha) e Santos-Dumont posicionava-se na proa desta para oferecer contrapeso ao motor. A cubagem foi aumentada para 550 m³. Fez uso original de lastro líquido, através de dois reservatórios de cobre finos, que portavam 54 litros (54 kg) de água, afixados na quilha, entre motor e propulsor. Este último era o mesmo do N° 4, ou seja, uma hélice de madeira com duas pás inclinadas e 4 m de

¹⁰⁰ A construção de treliças envolveu o necessário conhecimento, por Santos-Dumont, de *estática das estruturas*, um dos ramos da Mecânica. O uso frequente do alumínio em aparelhos voadores, pelo aeronauta, demonstra seu ineditismo em aviação, acompanhado, na Alemanha, pelo Conde Zeppelin. O alumínio é um metal maleável, resistente tanto mecanicamente quanto à corrosão. Apesar do alumínio ter sido primeiramente obtido por via química, realização de Henry Saint-Claire Deville em 1854, em 1885/1886 tornou-se difundido o seu processo de obtenção por meio da redução eletrolítica da alumina dissolvida em banho fundido de criolita. Este procedimento foi desenvolvido separadamente pelo norte-americano Charles Martin Hall e pelo francês Paul Louis Toussaint Héroult, que o descobriram e o patentearam quase simultaneamente. Esse processo ficou conhecido como Hall-Héroult e foi o que permitiu o estabelecimento da indústria global do alumínio que, em época anterior, chegava a custar mais que o ouro.

¹⁰¹ SANTOS DUMONT, 1986, p. 123.

¹⁰² AIMÉ, avril 1901, p. 81.

diâmetro, passo (geométrico) de 4 m e superfície de 2 m², que desenvolvia em relação a um ponto fixo um esforço de 100 kg, medido no dinamômetro.¹⁰³

Os pesos deslocáveis foram substituídos pela movimentação do *guide-rope* para vante ou para ré, através de uma corda ligada ao mesmo e a uma roldana às mãos do piloto. A liberação do lastro líquido também se fazia através de torneiras ligadas a dois fios de aço, igualmente manobrados da barquinha. O lastro líquido possuía o inconveniente da inércia de rotação e do efeito de superfície livre, daí sua divisão em dois recipientes, de forma a diminuir tal efeito. Como notamos, nada era gratuito, porém a distribuição equilibrada dos pesos e dos comandos era assaz complexa... Acreditamos que muitas soluções do inventor, juntamente com seus mecânicos, eram intuitivas e frutos da experiência comum, porém inspiradas pelo conhecimento científico adquirido por Santos-Dumont com Garcia.

Enfim, em 12 de julho de 1901, animado pela expectativa de vencer o Prêmio Deutsch, Santos-Dumont decolou com o N° 5 e fez várias manobras sobre Paris, passando várias vezes em frente à tribuna presidencial do hipódromo de Longchamps, no Bois de Boulogne. Fez medidas de velocidade utilizando um anemômetro e concluiu que chegara ao 40 km/h. Contornou a Torre Eiffel, sem contagem de tempo, para ganhar traquejo. No dia seguinte, diante de uma comissão do Aeroclube, tentou novamente fazer o percurso do prêmio, mas caiu no parque do Sr. Edmond de Rothschild, sem avarias no aparelho.

Na última tentativa com o N° 5, no dia 8 de agosto de 1901, um acidente grave quase lhe custou a vida. Após contornar a torre Eiffel, sob as vistas da comissão do Aeroclube e da multidão presente, o balão começou a contrair-se, ficando reduzida a tração em algumas das cordas de suspensão e aumentada em outras. As mais próximas ao propulsor foram cortadas e arrancadas pelo mesmo. Santos-Dumont desligou o motor. A perda de gás era razoável. O balão escapou do choque com a torre e explodiu ao contato com o telhado do Grande Hotel do Trocadero. A aeronave ficou pendurada com seu piloto, que foi prontamente salvo pelo Corpo de Bombeiros, junto com o que restou do equipamento.

Santos-Dumont creditou o acidente ao mau funcionamento da mola de uma das válvulas automáticas, que teria dado passagem ao hidrogênio e a perda da forma do invólucro à parada do ventilador que alimentava o balonete interno de ar, quando da parada do motor, mas poderiam haver outros motivos:

¹⁰³ AIMÉ, août, 1901, p. 184.

Um empregado do construtor que veio ver-me no dia seguinte, para receber os planos do invólucro dum “Nº 6”, fez-me concluir que o verniz do balão interno de ar do “Nº 5” não havia secado convenientemente, antes de ele ser posto no seu lugar, e que algumas das suas partes, ou haviam aderido entre si, ou aos fundos, ou aos lados do balão externo. Eis o que se ganha com pressas excessivas!¹⁰⁴

Na mesma noite do acidente, Santos-Dumont forneceu aos construtores da *Casa Lachambre* a descrição completa do que seria o seu vitorioso Dirigível Nº 6. “O novo balão apresentava a forma de um elipsoide alongado. Media 33 m no seu eixo maior, por 6, nos eixos pequenos, e terminava em cone, à frente e atrás”.¹⁰⁵ Cubava 630 m³, era muito semelhante ao Nº 5 e utilizava a mesma estrutura para a “quilha”, em forma de treliça.

Colocou no interior do invólucro um balonete compensador de 60 m³, constantemente cheio por um ventilador que era parte integrante do motor, o excesso de ar (mormente na expansão do hidrogênio do balão principal) sendo expelido por uma válvula de limite mais baixo (“mais fraca”). Com isto, procurava evitar que o balonete só fosse inflado por ocasião de perda ou compressão do gás. Para o caso da dilatação do hidrogênio, proveu o balão principal de duas válvulas de gás, as melhores que pôde encontrar. Buscava consertar o que acreditava terem sido as falhas dos projetos anteriores. Todas as válvulas eram automáticas, abrindo-se de dentro para fora, talvez acionadas por molas com diferentes coeficientes de elasticidade.¹⁰⁶

O motor, um *Buchet* de quatro cilindros e refrigerado a água, possuía a potência de 20 cv e, segundo Santos- Dumont, “era capaz de comunicar ao propulsor uma força de tração de 66 quilos”.¹⁰⁷

Voou em 6 de setembro de 1901 e sofreu um acidente sem grande importância. No dia 19 do mesmo mês, o balão foi arremessado sobre uma árvore por um vento mais forte. Santos-Dumont sempre aproveitou os acidentes para tirar-lhes lições. Não se abalava, pelo menos aparentemente...

Em voo oficial, a 19 de outubro de 1901, à tarde, mesmo sob condições meteorológicas não muito favoráveis, decolou e navegou pelo ar tranquilo, em sua perna de ida até a torre

¹⁰⁴ SANTOS DUMONT, 1986, p. 138.

¹⁰⁵ Ibid., p. 145.

¹⁰⁶ A intensidade da Força elástica (F_{el}) é diretamente proporcional à deformação (Δx). Matematicamente, temos: $F_{el} = k \cdot \Delta x$; ou vetorialmente: $F_{el} = -k \cdot \Delta x$, onde k é uma constante positiva denominada *Constante Elástica da mola*, com unidade no S.I. de N/m. A Constante Elástica da mola traduz a rigidez da mola, ou seja, representa uma medida de sua resistência à deformação. Quanto maior for a Constante Elástica da mola, mais difícil será comprimi-la ou expandi-la.

¹⁰⁷ SANTOS DUMONT, 1986, p. 149.

Eiffel com “vento de popa”. Na volta, com o vento contra, o motor ameaçou parar e o aeronauta teve de abandonar o leme para cuidar da manete do carburador e controlar o tempo da faísca de ignição através de um comando, de modo que a combustão acontecesse no tempo certo. O motor retomou seu ritmo e Santos-Dumont, ainda controlando a atitude do balão e sua horizontalidade, passou pela comissão do Aeroclube em Saint-Cloud em 29 minutos e 30 segundos. Porém, só parou no local de partida aos 30 minutos e 30 segundos, quando o “*guide-rope*” foi apanhado, após dar uma meia-volta.

Para a multidão e para alguns dos membros mais proeminentes do Aeroclube,¹⁰⁸ o aeronauta vencera o Prêmio Deutsch. Independentemente da campanha promovida contra a vitória por alguns membros do Aeroclube - devido ao tempo estipulado para a prova -, Santos-Dumont acabou sendo considerado vencedor (somente após reunião do Aeroclube em 4 de novembro) e recebeu a quantia de 125.000 francos,¹⁰⁹ repartindo-a em partes desiguais: 75.000 francos ajudaram os pobres de Paris a recuperar seus bens de trabalho retidos em casas de penhores e 50.000 francos foram distribuídos entre os seus mecânicos. Com o orgulho ferido pela falta de consenso dos membros do Aeroclube e por algumas críticas recebidas, que menosprezavam o valor de seu feito, decidiu afastar-se da instituição.

Observamos que foi através da resolução dos problemas de motorização, relação peso-potência, válvulas, estabilidade e controlabilidade de seus dirigíveis, o que equacionou melhor nos N^{os} 5 e 6, que Santos-Dumont conseguiu comprovar, ainda que de maneira frágil, a dirigibilidade dos aeróstatos, unindo assim, de maneira equilibrada, motor a explosão, balão a hidrogênio e dirigibilidade. Tudo era ainda precário e, em um quilômetro apenas, eram necessários vários ajustes em voo, fosse do carburador/ignição ou da inclinação do aparelho. Santos-Dumont progredira a cada contratempo, a cada acidente, aperfeiçoando suas máquinas. Seu sucesso rivalizava agora o do dirigível *La France* e capitaneava o movimento aeronáutico.

¹⁰⁸ Principalmente o Príncipe Rolando Bonaparte e os senhores Deutsch de la Meurthe (instituidor do prêmio) e Emmanuel Aimé (secretário do Aeroclube).

¹⁰⁹ O prêmio, inicialmente de 100.000 francos, foi elevado para 125.000 francos por conta de juros.

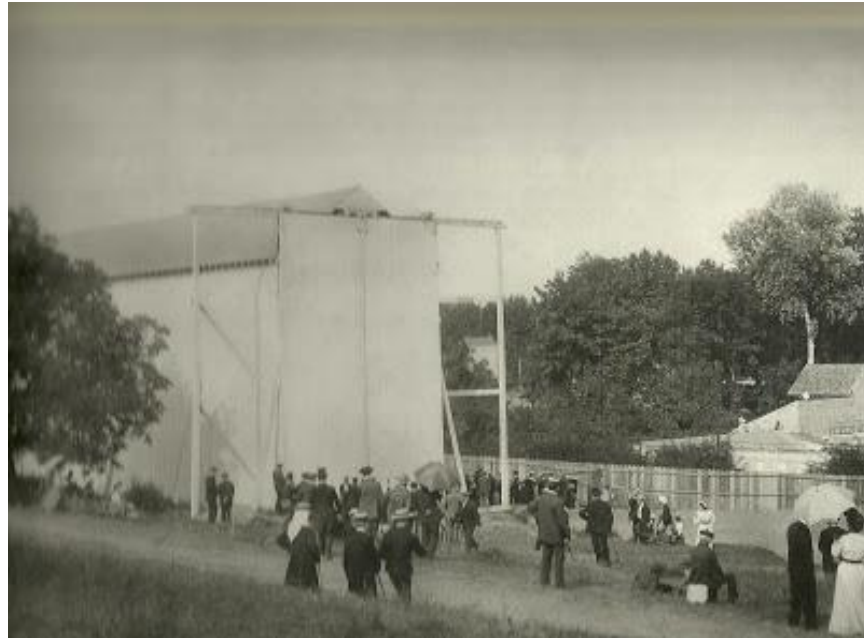


Figura 4.6 - O primeiro hangar do mundo em Saint-Cloud.

Fonte: disponível em <<http://culturaaeronautica.blogspot.com.br/2013/01/st-cloud-o-primeiro-hangar-do-mundo.html>>. Acesso em 18/08/2013.



Figura 4.7 - Aeroestação de Saint-Cloud (1899).

Fonte: disponível em <<http://culturaaeronautica.blogspot.com.br/2013/01/st-cloud-o-primeiro-hangar-do-mundo.html>>. Acesso em 18/08/2013.

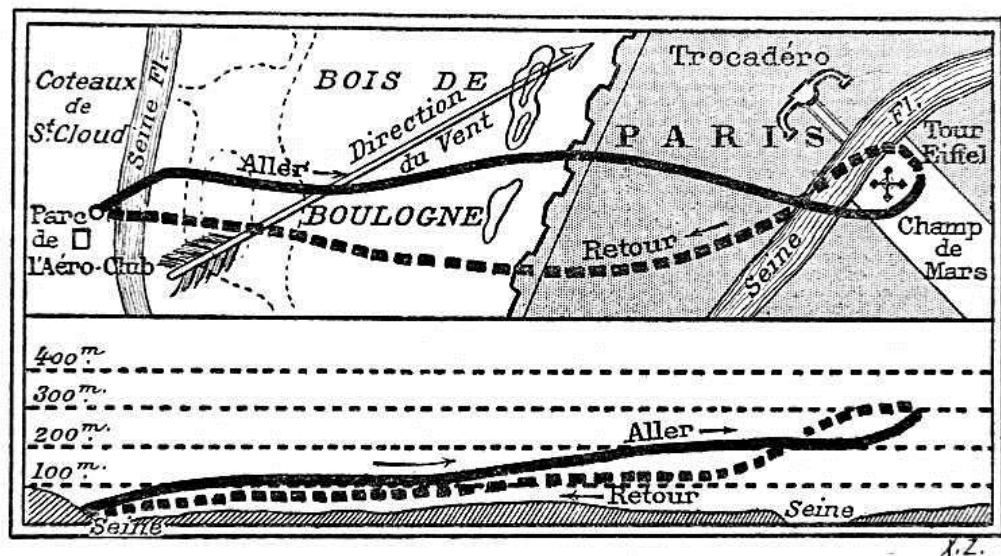


FIG. 32. — CARTE EN PLAN ET EN HAUTEUR DU VOYAGE DE SANTOS-DUMONT (PRIX DEUTSCH, OCTOBRE 1901).

Figura 4.8 - O percurso do Prêmio Deutsch de la Meurthe: do Aeroclube de France à Torre Eiffel e volta ao ponto de partida, em menos de meia hora.

Fonte: disponível em <http://www.cabangu.com.br/pai_da_aviacao/3-dirig/05e6/percdir6.jpg>. Acesso em 21/09/2013.

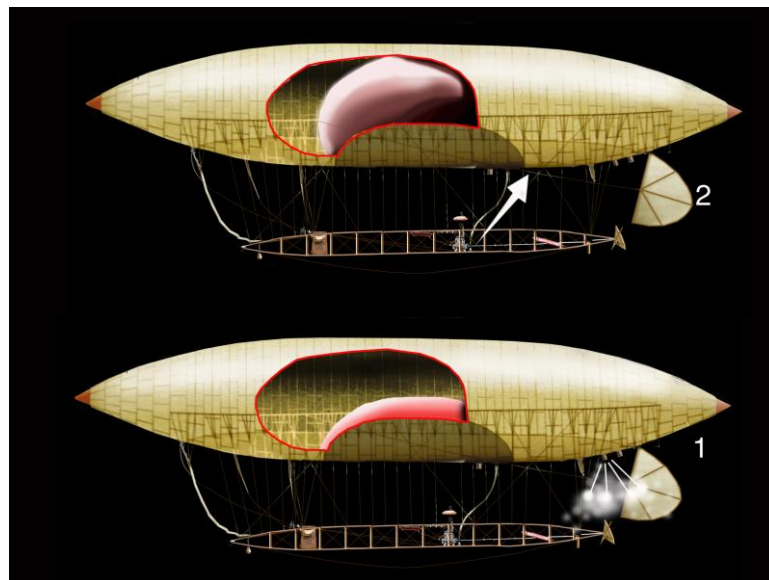


Figura 4.9 - O desenho nº 1 mostra escapamento de hidrogênio pela válvula, em função da expansão do gás. No desenho 2, o ventilador é usado para inflar o balonete interno, de forma a evitar a dobra do invólucro.

Fonte: disponível em <<http://santosdumontvida.blogspot.com.br/>>. Acesso em 14/12/2013.

Seu Dirigível Nº 7, com potência aumentada (60 cv) e mais afilado, portando duas hélices propulsoras de 5m de diâmetro, uma na proa e outra na popa, foi projetado para ser um dirigível de corrida, em uma competição a ser realizada em Saint Louis, nos Estados Unidos da

América. Possuía invólucro reforçado para suportar velocidades maiores e motor refrigerado a água. Mas o aeróstato foi esfaqueado no local, em 28/06/1904, a facadas, ainda na caixa, causando grande polêmica. O N° 8, uma cópia do vencedor N° 6, foi vendido ao Sr. Boyce, vice-presidente do Aeroclube da América, tendo ficado destruído no primeiro voo.

Com o N° 9, a famosa *Baladeuse*, ele reduziu dimensões – 12 m de comprimento e cubagem de 220 m³ - para tornar o aeróstato veículo de deslocamento pessoal, como um “automóvel aéreo”. Até hoje isso é único na história da aviação, pois Santos-Dumont o usava efetivamente como veículo pessoal para deslocar-se dentro de Paris e nas cercanias, estacionando a aeronave diante de sua residência ou de restaurantes da moda, como hoje faríamos com um carro. No N° 10, *L'Omnibus* ou *dirigível ônibus*, ele ampliou dimensões e potência (48 m de comprimento e 46 cv de potência), para que servisse de transporte coletivo, sem sucesso. A partir do N° 7 ele deixa de usar motores *Buchet*, passando a utilizar os motores *Clement-Bayard*, mais potentes.

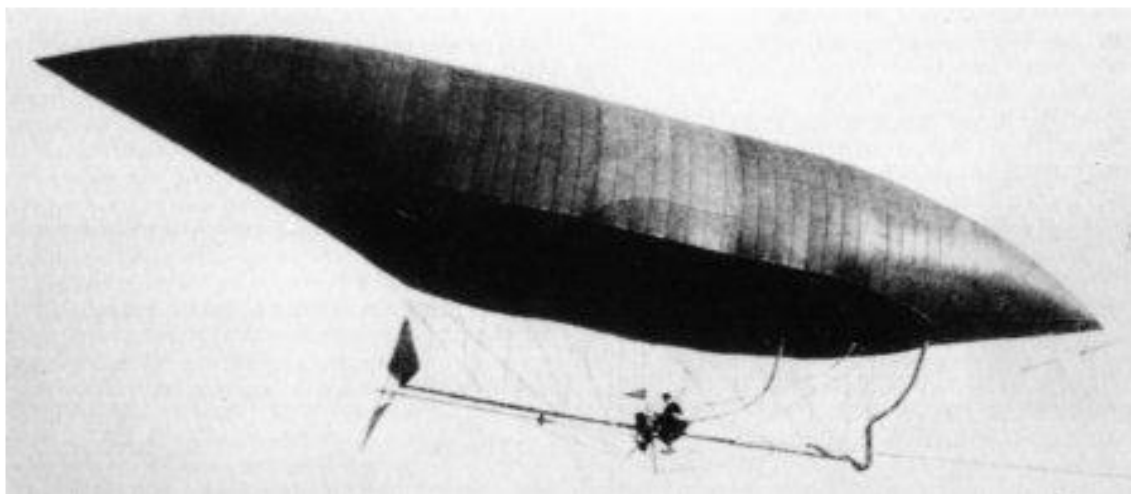


Figura 4.10 - O Dirigível N° 4.

Fonte: disponível em <<http://www2.anac.gov.br/certificacao/Diversos/Portug/SantosDumont-02.pdf>>. Acesso em 23/09/2013.

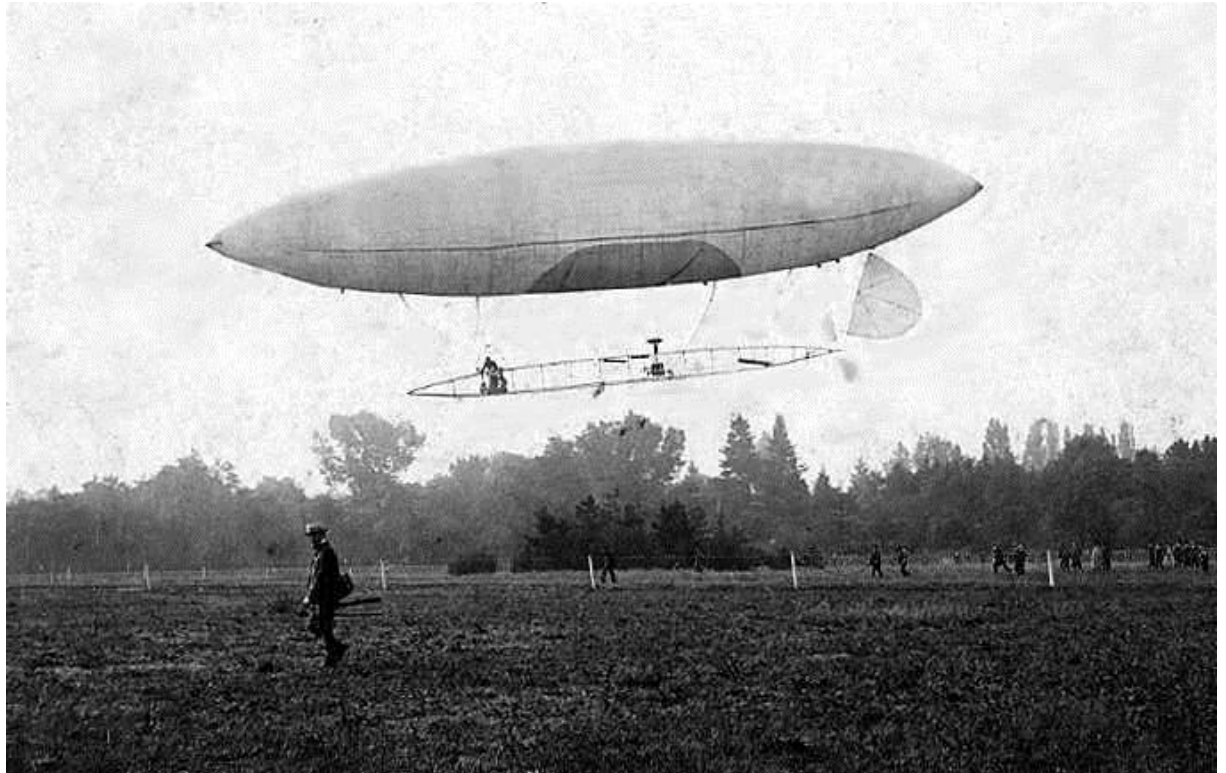


Figura 4.11 - O Dirigível Nº 6.

Fonte: disponível em

<http://freepages.military.rootsweb.ancestry.com/~otranto/fab/santos_dumont.htm>. Acesso em 05/03/2013.



Figura 4.12 - O Dirigível Nº 9 – “Baladeuse”.

Fonte: disponível em <http://ninja-brasil.blogspot.com.br/2011_07_01_archive.html>. Acesso em 13/03/2013.

Foge ao escopo deste trabalho rever em detalhes os dirigíveis de Santos Dumont e os inúmeros inventos posteriores ao ano de 1905, dentre os quais o 14bis, o *Demoiselle* - o primeiro “ultra-leve” da história - e o “transformador (ou conversor) marciano”, um esquí mecânico para escalar montanhas, que transformava o movimento rotativo (de um motor) em alternativo.¹¹⁰ Mantivemos o foco em mostrar suas inovações e soluções para o problema da dirigibilidade até a época do projeto de seu helicóptero e como ele as utilizou na modelagem deste aparelho.

4.3 – OUTRAS TENTATIVAS COM O MOTOR A PETRÓLEO

Devemos ainda acrescentar que a utilização do motor a petróleo adaptado a balões já havia sido tentada antes de Santos-Dumont, na Alemanha. De fato, Werner von Siemens (1816-1892), inventor e industrial, já preconizava o uso de motores leves como pré-requisito para o controle de veículos aéreos. Em 1895, Herman Wolfert instalou, pela primeira vez, um motor a quatro tempos de 8 hp em um dirigível. Tendo recorrido aos conselhos técnicos de Gottlieb Daimler, pioneiro da indústria automobilística, executou testes satisfatórios. O voo se deu em 12 de junho de 1897, diante de uma comissão militar do Kaiser. Wolfert decolava com seu mecânico Hans Knabe e um oficial do exército prussiano. Este último desistiu e, na pressa de decolar, Wolfert não compensou o peso faltante do oficial com lastro. O aeróstato subiu depressa. Após 5 minutos de voo, possivelmente devido a uma fagulha do motor, o invólucro do dirigível explodiu e a aeronave, tomada por chamas, caiu, matando seus ocupantes, no primeiro acidente fatal envolvendo um dirigível. A distância de 2 m entre a nacelle (gôndola) e o invólucro, provavelmente, foi insuficiente para impedir que as fagulhas do motor inflamassem o hidrogênio.¹¹¹ Acidente semelhante ocorreu ao dirigível *Pax*, de Augusto Severo, deputado brasileiro, conterrâneo e amigo de Santos-Dumont. Pouco após a decolagem em Paris, em 1902, o aeróstato explodiu e caiu, matando Severo e seu maquinista. Isto fez com que Santos-Dumont redobrasse as atenções com a segurança.

¹¹⁰ Para tal, recomendamos, dentre outros, os seguintes livros: BARROS, 2003 e HOFFMAN, 2010.

¹¹¹ HIRSCHER; PREM; MADELUNG, 2004, p. 24.

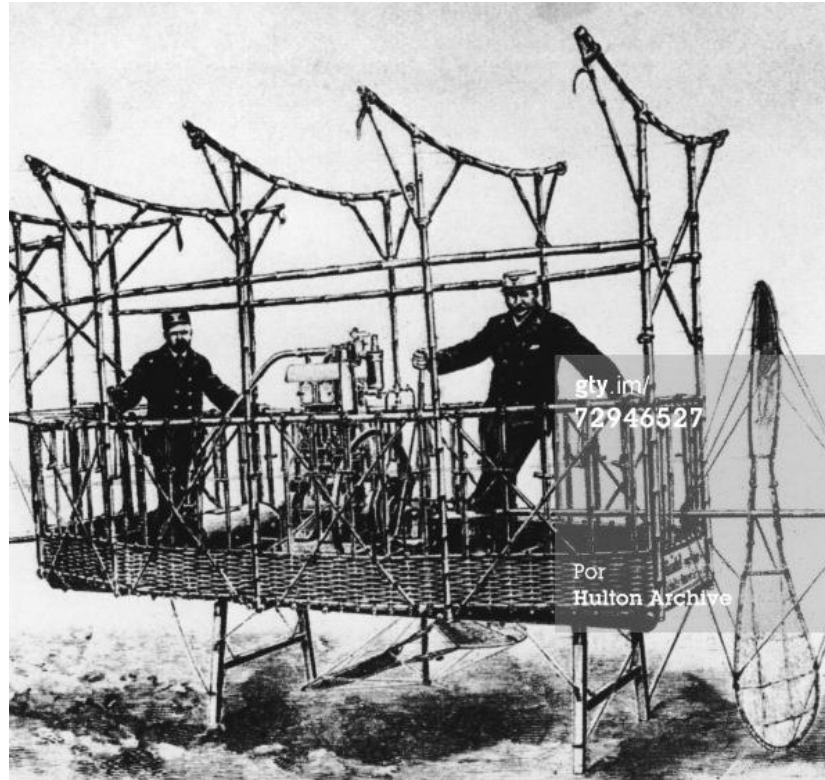


Figura 4.13 - Wolfert e Knabe em 12/06/1897.

Fonte: disponível em <<http://www.gettyimages.com/detail/news-photo/german-aviators-karl-wolfert-and-hans-knabe-in-the-gondola-news-photo/72946527>>. Acesso em 12/05/2014.

Outra tentativa de controle em dirigíveis foi feita por David Schwarz (1852-1897), judeu húngaro-croata e o primeiro a criar um dirigível com invólucro totalmente em metal, no caso longas folhas de alumínio bem finas (0,18-0,20 mm), fornecidas pelo industrial Carl Berg (1851-1906). As folhas eram dobradas e rebitadas hermeticamente. A nacelle era suspensa do corpo principal por quatro longarinas e um motor *Daimler* de 16 hp alimentava duas hélices propulsoras.¹¹² Havia, ainda, uma terceira sobre a nacelle, colocada para dar direção ao dirigível. Infelizmente, Schwarz morreu antes de ver seu engenho voar. Após a morte de Schwarz, Carl Berg continuou trabalhando com a viúva de Schwarz. Infelizmente, em 03 de novembro de 1897, após uma decolagem com sucesso, houve uma falha em uma das hélices. A falta de previsão de estabilizadores e superfícies de controle, que poderiam corrigir a falha, levou o voo ao fracasso ou, na melhor das hipóteses, a um sucesso parcial. Algumas fontes alegam que o conde Ferdinand von Zeppelin teria comprado a patente do dirigível de Schwarz de sua viúva, o que é contestado.

¹¹² HIRSCHER; PREM; MADELUNG, 2004, p. 24.

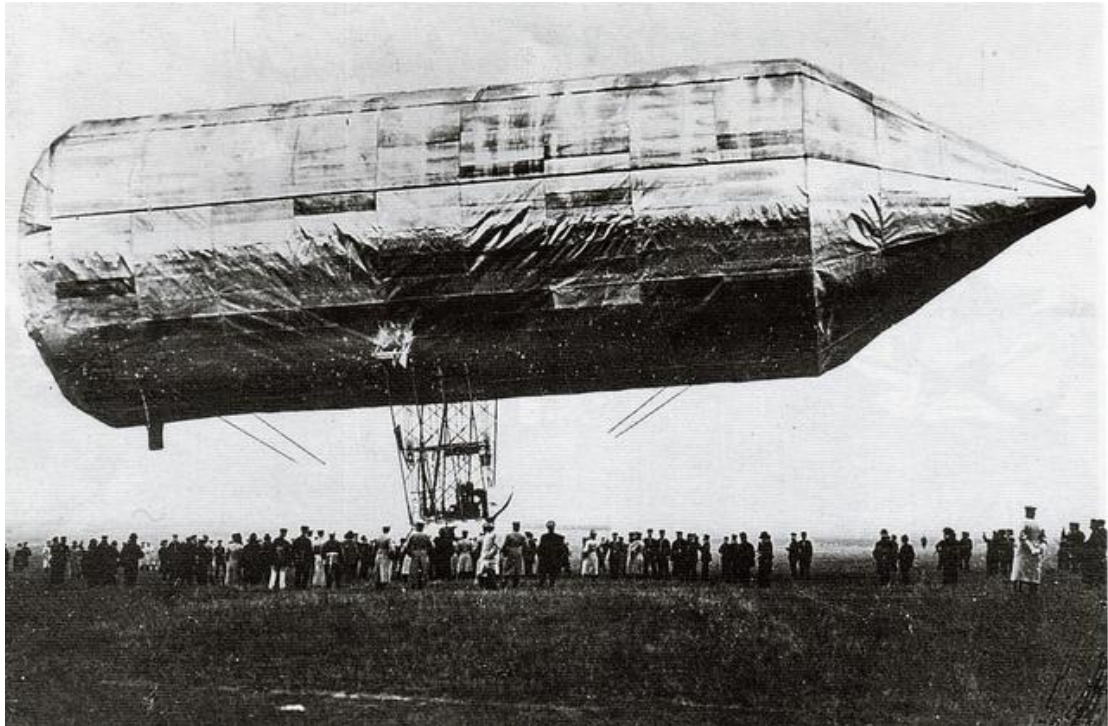


Figura 4.14 - Dirigível rígido de Schwarz (1897).

Fonte: disponível em <<http://www.theaerodrome.com/forum/pioneer-aviation/59795-david-schwarzs-airship.html>>. Acesso em 12/05/2014.

4.4 - O ZEPPELIN

O conde Ferdinand Adolf August Heinrich von Zeppelin (1838-1917), oficial do Exército Alemão, foi observador militar na Guerra Civil Americana (1863) junto ao exército da União, onde teve oportunidade de voar em balões de observação cativos. Participou da Guerra Austro-Prussiana (1866) vencida pela Prússia e da Guerra Franco-Prussiana (1870/1871), de igual resultado, onde pôde observar os balões franceses que levavam pessoas e correspondências para fora do garrote germânico.

Zeppelin prestou muita atenção ao trabalho dos militares franceses Renard e Krebs, ficando bastante preocupado com o possível uso militar dos dirigíveis. Estava atento, também, ao trabalho de Schwarz. Após sua aposentadoria involuntária, passou a dedicar-se à construção dos maiores dirigíveis construídos até então.

Projetado em 1898, com estrutura rígida de alumínio, o LZ 1 (Luftschiff-Zeppelin 1) possuía 140 m de comprimento por 11,4 m de diâmetro, sendo coberto por seda e linho tratados com pergamóide (produto industrial que imita pele). Em seu interior, compartimentos foram projetados para abrigar 17 células de gás hidrogênio, fazendo-o cubicar 12.000 m³. Pesava 13 toneladas. Equipado por dois motores *Daimler* de combustão interna de 15 hp, efetuou seu

primeiro voo em 2 de julho de 1900. Enorme, submotorizado e pouco controlável, fracassou, assim como o LZ 2, destruído em seu segundo voo.

O pouco apoio financeiro do governo não parou o conde, que obteve sucesso limitado com os dirigíveis seguintes, muito graças ao apoio de recursos vindos de todas as partes do Reich. O povo alemão adotara o Zeppelin e seus desenvolvimentos posteriores o levaram a um grau de sofisticação e eficiência inédito, já com o patrocínio do governo alemão. O conde criou a primeira companhia aérea, a alemã *Companhia Zeppelin (Delag)*, em 1909, com uma frota de cinco dirigíveis. O Zeppelin foi utilizado na Primeira Grande Guerra para bombardear Paris e a Inglaterra. Após o conflito, estabeleceram-se rotas aéreas. O conde já havia morrido, quando ícones da aviação como o LZ 127 *Graf Zeppelin* e o LZ 129 *Hindenburg* foram construídos no final da década de 1920. Coube ao *Graf Zeppelin* a primazia de ser o primeiro objeto voador a dar a volta ao mundo (em etapas). Ele percorreu mais de 500 mil quilômetros, transportando pelo menos 17 mil pessoas até 1937, quando foi descomissionado e, posteriormente, desmontado.¹¹³



Figura 4.15 - O LZ 127 Graf Zeppelin.

Fonte: disponível em <<http://ad-orientem.blogspot.com.br/2011/01/return-of-zeppelin.html>>. Acesso em 05/11/2012.

¹¹³ Para o dirigível de Schwarz, Berg usara uma liga de composição desconhecida chamada “alumínio Viktoria”. O Conde Zeppelin também usou o alumínio produzido por Berg. Para o Zeppelin LZ 1, o primeiro projeto do Conde, Berg utilizou alumínio puro. Para os Zeppelins LZ 2 a LZ 25, Berg utilizou alumínio com liga de zinco e de cobre-zinco. Berg também produziu duralumínio - inventado por Alfred Wilm - uma liga de cobre, manganês e magnésio. Zeppelin imediatamente quis usar esta liga superior, mas tinha dificuldades técnicas ainda não resolvidas até 1915, quando tal liga foi utilizada no LZ 26 (DOOLEY, 2004).

5 - AS ORIGENS DO HELICÓPTERO

"... Eu descobri que um dispositivo em forma de parafuso como este, se for bem feito com linho engomado, irá subir no ar se girado rapidamente..."

Leonardo Da Vinci - Códice Atlântico.

5.1 – UM BRINQUEDO MUDA TUDO

Quando da inscrição de Santos-Dumont ao **Prêmio Deutsch-Archdeacon**, houve uma inquietação no Aeroclube da França. Será que ele estava desistindo de seus balões dirigíveis para dedicar-se apenas ao mais-pesado-que-o-ar? A maioria dos membros do Clube e as publicações especializadas acreditavam que não. E a razão era a dedicação que ele sempre demonstrara à aerostação, fazendo sucessivas melhorias nos seus dirigíveis, com alto custo financeiro e de saúde pessoal, fora o risco de vida. Além disto, ainda havia muito a evoluir neste campo...

Como já observamos, sua repentina guinada para os aeródinos tinha por inspiração o medo que ele sentia de perder a primazia das invenções aéreas, medo este causado, principalmente, pela ameaça que vinha da América, personificada pelos irmãos Wright. Foi, então, que delineou, em 1905, seus dois primeiros projetos para o mais-pesado-que-o-ar, dentre as opções plausíveis. O primeiro, o Santos-Dumont Nº 11, era um monoplano com flutuadores, que foi rebocado por um barco a motor, não tendo conseguido boa sustentação.¹¹⁴ A ideia era dotá-lo de um motor e duas hélices, uma avante e outra a ré das asas, inspirado no planador monoplano de 1804 do engenheiro e “Pai da Aviação Inglesa” Sir George Cayley. O segundo, o Santos-Dumont Nº 12, um helicóptero, tem igualmente um débito para com o projeto de Cayley para um helicóptero, datado de 1843, mas incorporava muitas melhorias realizadas no campo das asas rotativas desde então.

Acreditava-se, na época, que, assim como o movimento rotativo substituíra com eficiência, respectivamente em terra e no mar, os cavalos pelas locomotivas e os remos por rodas de pás e hélices, dispositivos rotativos deveriam igualmente ceder seus préstimos à navegação aérea, sustentando e transladando aparelhos voadores através de sua inclinação a determinado ângulo ou adicionando-se um “parafuso voador” a um aparelho já dotado de propulsor. Sabia-se, também, da necessidade de um motor leve para fornecer razoável potência com baixo peso, e os motores a petróleo já prometiam tais qualidades.

¹¹⁴ Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/certificacao/Diversos/Portug/SantosDumont-02.pdf>>. Acesso em 14/12/2014.

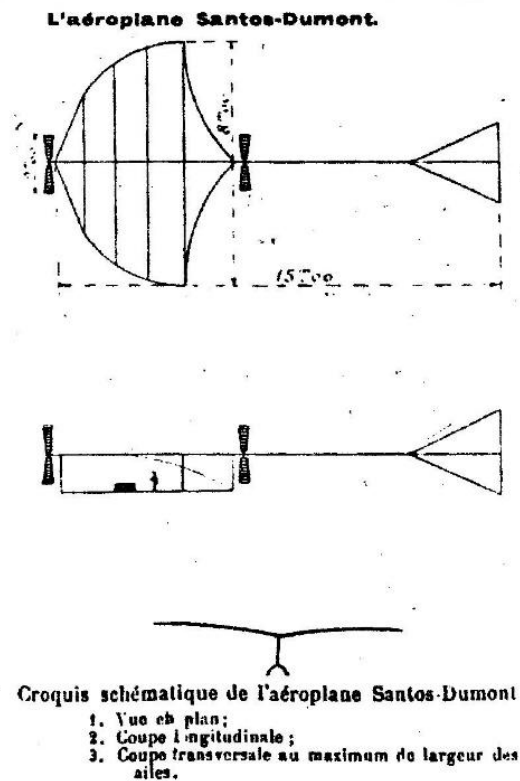


Figura 5.1 - Projeto de avião com base no planador monoplano de Sir George Cayley.
Fonte: LAGRANGE, 1906, p.28.

O movimento rotativo capaz de acionar um aparelho deve muito ao desenvolvimento dos moinhos de vento e rodas d'água,¹¹⁵ responsáveis pela “revolução industrial medieval” dos séculos XIV e XV, bem como aos seus artífices anônimos, que foram importantes na introdução das primeiras lições práticas de mecânica dos fluidos. Daí para o “cata-vento” foi apenas um pulo. O brinquedo, descrito pela primeira vez em um manuscrito flamengo de 1325, consistia num carretel oco, no qual uma haste era introduzida. Esta era dotada, em sua extremidade superior, de lâminas horizontais, possuindo também uma corda amarrada em torno. Segurando-se o carretel, puxava-se a corda e então haste e lâminas ascendiam rodopiando no ar.¹¹⁶ Não devemos esquecer que o “pião Chinês” e suas variações circulavam pela Europa.

¹¹⁵ Moinhos de vento de estrutura vertical já eram usados no Afeganistão no século X. Na França e Inglaterra, no século XII (Cf. CROUCH, 2008, p.35).

¹¹⁶ CROUCH, 2008, p.35.



Figura 5.2 - Jesus criança brincando com um helicóptero. Retábulo do priorado de Vivoin, no Maine, por volta de 1460 (Museu de belas artes de Tessé, na cidade de Mans).

Fonte: disponível em <<http://alain.vassel.pagesperso-orange.fr/siecle19.htm>>. Acesso em 05/10/2014.

Isto mostra a importância que um brinquedo pode ter nos avanços tecnológicos. Assim como as pipas se tornaram fontes para estudos sobre o comportamento da passagem dos fluidos sobre superfícies de voo,¹¹⁷ o mesmo se deu de maneira fantástica com o “cata-vento”. Enquanto as pás de um moinho eram movidas pela ação da pressão do ar, o que agora se via, numa brilhante inversão, era que, através da rotação de um dispositivo, criava-se sustentação

¹¹⁷ Parece, deixando de lado as mitologias e relatos fantásticos, que foram as pipas os primeiros artefatos voadores construídos por mãos humanas. Elas apareceram na China, por volta de 1000 a.C., e eram usadas para diversas finalidades, desde a pesca ou para carregar lanternas para assustar inimigos a fins cerimoniais. O notável é que se percebeu que superfícies planas ou pouco curvadas poderiam, dependendo da habilidade em lidar com o vento, sustentar-se no ar e transportar algo. A pipa difundiu-se por todo o Oriente. Há relatos da época em que Marco Polo esteve na China (± 1285), sugerindo que pipas que levantavam homens eram de uso comum pelo império Mongol, basicamente com funções divinatórias, a fim de verificar se os comandantes dos barcos teriam ou não boa sorte em suas missões (NEEDHAM, 2000, p. 589). Provavelmente seu uso foi estendido a missões de espionagem.

necessária para vencer a pressão/resistência do ar e o próprio peso do equipamento, que então ascendia.

Gerações de pais e filhos devem ter conhecido o brinquedo, cuja representação pode ser encontrada em alguns quadros da época, como, por exemplo, no quadro *Jogos Infantis* de Pieter Brueghel, de 1560. Este dado é corroborado por Needham,¹¹⁸ que nos informa também de pinturas chinesas antigas sobre o tema. Finalmente, em pleno século XVIII, o brinquedo atraiu a atenção de alguns pioneiros do helicóptero e virou coisa de “gente grande”... Mas, antes que isto viesse a acontecer, a Europa entraria na Era Moderna, onde a racionalidade e a experimentação elevaram a ciência a outros patamares. E o impulso para isto se deu com o Renascimento.

Neste contexto, não seria possível falar da gestação da ideia do helicóptero sem tocar no nome de Leonardo da Vinci (1452-1519), cientista e artista italiano da Renascença. O importante, tendo em vista que o estudo sobre Da Vinci é extenso e fascinante, é perceber que, à medida que ele avançava nas soluções técnicas para os problemas apresentados em seus projetos de máquinas voadoras, notadamente ornitópteros, viu-se também envolvido com problemas mecânicos e de materiais que o desencorajaram. Foi então que a ideia do helicóptero começou a passar pela mente do gênio.

Não se sabe exatamente como ele começou a pensar nesta solução para o voo. É bem provável que tenha tido contato com o “pião Chinês”, já difundido por toda a Europa, por conta dos viajantes e comerciantes que transitavam por Florença e outros centros importantes da Itália. O certo é que, em suas anotações, aparece o desenho de um dispositivo do tipo parafuso, um eixo envolto por uma rosca ou sulco, formando uma hélice. O parafuso tem a vantagem de converter, através de reduzido esforço, movimento rotacional em translação, avançando ou retrocedendo. Tal desenho, já com essa concepção de voo, datado de 1483, foi denominado “La Hélice de Da Vinci”, sendo também conhecido como *Parafuso Aéreo Helicoidal* ou, simplesmente, *Parafuso Aéreo*, e é tido como um ancestral do helicóptero. De fato, tratava-se de uma asa em espiral com um eixo central, configurando o princípio básico dos helicópteros atuais. O engenho seria construído com junco, sendo a superfície helicoidal feita a partir de fios de ferro e coberta com tela de linho engomada, para ser impermeável. Da Vinci previa apenas o deslocamento na vertical. Para alguns, o parafuso helicoidal pode também ser visto como um precursor dos propulsores aeronáuticos.

¹¹⁸ NEEDHAM, 2000, p.583.

Seu acionamento dava-se através de um sistema bem complicado de cordas, cilindros e pedais, o piloto acionando o “parafuso” através dos movimentos de seus pés, mãos, e cabeça. Quatro homens, sobre uma plataforma, fariam o eixo girar através de manivelas e, assim, o ergueriam do chão. Sua ideia era comprimir o ar, gerando sustentação, teoria bem semelhante à da moderna aerodinâmica de helicópteros. Não havia nenhuma previsão para lidar com o torque produzido no engenho pelo giro do “parafuso”. Media, aproximadamente, 4,5 m de diâmetro. Tal engenho nunca saiu do papel, mas aguçou o imaginário da época.

Tentativas modernas de reproduzir tal máquina mostraram que, devido a restrições de peso, ela jamais levantaria voo. No entanto, a ideia de que o contrário aconteceria, caso ela fosse dotada de força motriz necessária para “aparafusar-se” no ar, permanece válida. Na realidade, Leonardo manifestou esse desejo, após construir um modelo em miniatura de seu “helicóptero”. Em suas notas “ele queria saber se a máquina teria que esperar por uma fonte de potência mais leve que um ser humano para poder funcionar”.¹¹⁹

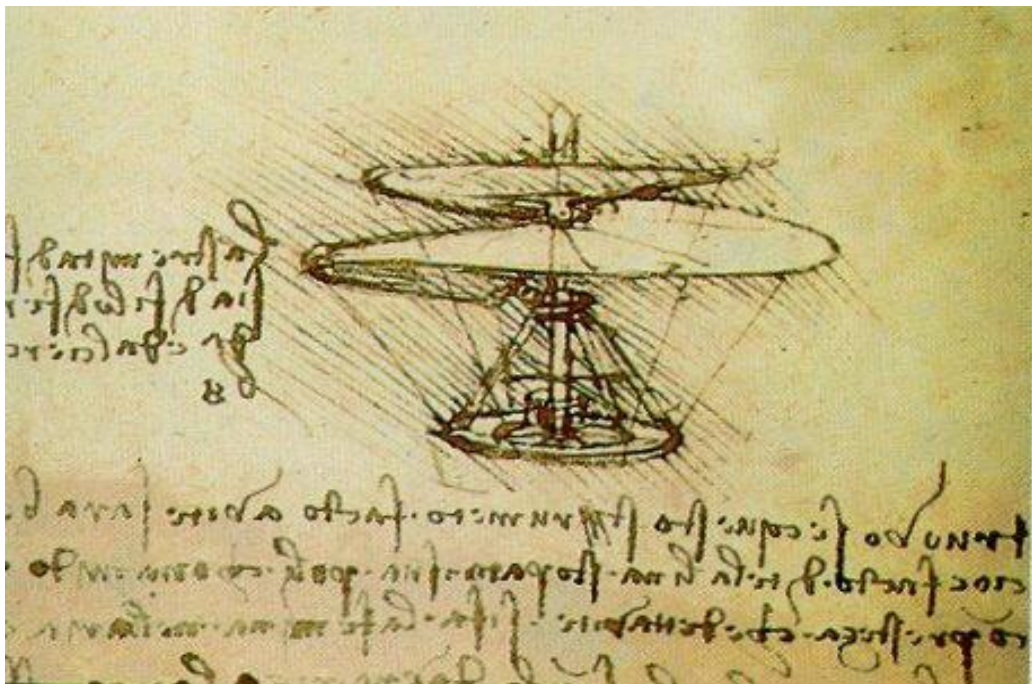


Figura 5.3 - “La Hélice de Da Vinci” (1483).

Fonte: disponível em <<http://www.leonardodavincis inventions-for-flight/leonardo-da-vinci-helicopter/>>. Acesso em 21/10/2014.

¹¹⁹ RABINOWITZ, 1996, p.16.



Figura 5.4 - Reprodução atual do “Helicóptero” de Da Vinci.

Fonte: disponível em

<https://web.archive.org/web/20110629140626/http://www.vectorsite.net/avheli_1.html#m2>. Acesso em 12/10/2014.

Apesar de suas ideias, entretanto, Da Vinci não teve praticamente influência alguma no desenvolvimento do voo, pois seu trabalho só viria a público no final do século XIX, tendo permanecido por mais de três séculos em coleções particulares.

A primeira ideia de uma hélice propulsora a tornar-se pública pertenceria a Alexis-Jean-Pierre Paucton (1732-1798) ou, como é mais conhecido, J. P. Paucton, um matemático francês. Ele produziu um estudo sobre o desenvolvimento do princípio do helicóptero, que foi publicado em 1768, denominado *Théorie de La Vis D'Archimede*. Paucton imaginou uma máquina voadora movida por força humana, denominada *Ptérophore*, que possuía dois “parafusos”, um para propulsão e outro para manter o voo, fixados a uma cadeira leve. O experimentador seria o “novo Dédalo”. Ele acreditava que, se um homem fosse capaz de possuir uma força capaz de vencer o peso do próprio corpo, colocando-se (...)

(...) entre as mão deste homem uma Máquina tal que, por seu meio, ele agisse sobre o ar com toda a força de que de que fosse capaz, e toda a destreza possível, ele se elevará

com a ajuda deste fluido, como com a ajuda da água ou mesmo de um corpo sólido (tradução nossa).¹²⁰

A ideia de usar um parafuso aéreo para propulsão foi utilizada durante o final do século XVIII e início do século XIX. Só após muita experimentação, os inventores concluíram que mais potência propulsiva poderia ser obtida simplesmente curvando-se as superfícies das lâminas das hélices.

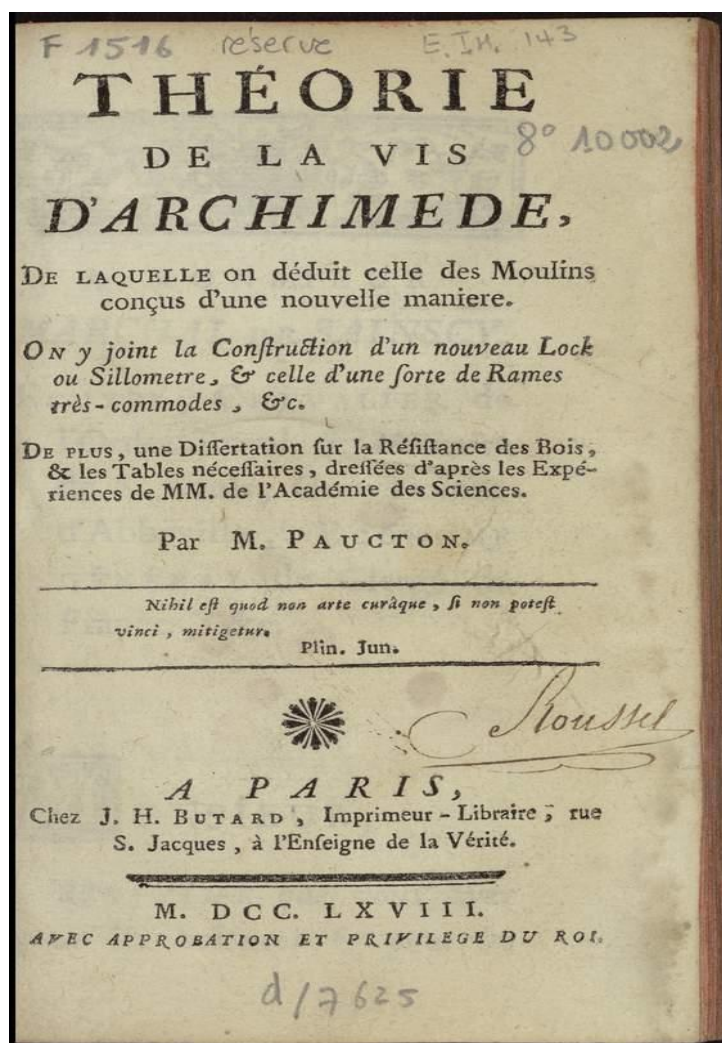


Figura 5.5 – Frontispício da obra *Théorie de La Vis D'Archimede* (1768).
Fonte: disponível em <<http://hydraulica.grenet.fr/items/show/30>>. Acesso em 21/09/14.

¹²⁰ “Si donc je mets entre les mains de cet homme une Machine telle que par son moyen il agisse sur l’air avec tout ela fource dont il est capable, & toute l’adresse possible, il s’élevera à l’aide de ce fluide, comme à l’aide de l’eau ou même d’un corps solide.” (PAUCTON, 1768, p. 211).

Em 1754, cerca de 250 anos depois de Leonardo da Vinci, o russo Mikhail Lomonosov (1711–1765) fabricou e fez voar o primeiro modelo autopropulsado de um “parafuso aéreo voador”. Lomonosov foi um físico pioneiro, químico, astrônomo, geólogo, geógrafo e, também, um investigador do voo. Considerado um gênio universal e muitas vezes negligenciado pelos historiadores da aviação, foi membro da Academia de São Petersburgo e também enciclopedista e poeta, tendo sido o primeiro cientista russo de projeção fora de sua terra natal. Trabalhando com a calcinação de metais em recipientes fechados, publicou, em 1760, um ensaio sobre a *Lei da Conservação das Massas*, quatorze anos antes de Lavoisier, mas sua obra não teve repercussão na Europa Ocidental pela limitada circulação. Escreveu, também, a primeira gramática russa.¹²¹

Buscando uma maneira de elevar equipamentos meteorológicos no ar e intrigado com o sonho do voo do helicóptero, apresentou seu modelo à *Academia Russa de Ciências* em julho de 1754, modelo este dotado de um pequeno rotor inspirado nos “piões Chineses”, mas impulsionado por um sistema de corda com molas do tipo das de relógio. “O aparelho voou livremente e subiu a uma altura considerável” (tradução nossa).¹²²

O modelo introduziu a ideia de hélices coaxiais, que compensariam o torque gerado por uma única hélice, caso em que o dispositivo giraria em sentido contrário ao da rotação daquela. A essa compensação denominamos “efeito anti-torque”.

A *ata* da Academia assim se referiu ao engenho, para o qual Lomonosov pretendia outros usos inéditos, como a elevação de termômetros e outros instrumentos:

O honorável Conselheiro Lomonosov demonstrou sua invenção chamada “**Aerodinamica**” para ser usada com a finalidade de comprimir o ar por meio de asas giradas horizontalmente em direções opostas por intermédio de uma mola do tipo usada em relógios a fim levantar a máquina nas camadas superiores do ar (tradução nossa).¹²³

Ao que tudo indica, o modelo estava suspenso por uma corda, e não em voo livre. Mas a dúvida permanece...

¹²¹ Para saber mais sobre Lomonosov, sugerimos a leitura do livro do químico russo Boris N. Menshutkin, *Russia's Lomonosov: Chemist, Courtier, Physicist, Poet*, traduzido para o inglês em 1952.

¹²² “*The device flew freely and climbed to a good altitude.*” (LEISHMAN, 2000).

¹²³ “*The honorable Advisor Lomonosov demonstrated his invention called “Aerodynamic” to be used for the purpose of depressing the air by means of wings rotated horizontally in the opposite directions by the agency of a spring of the type used in clocks in order to lift the machine into the upper layers of the air.*” (GABLEHOUSE, 1969, p.3). Lomonosov é considerado o “Pai da Ciência Russa”.

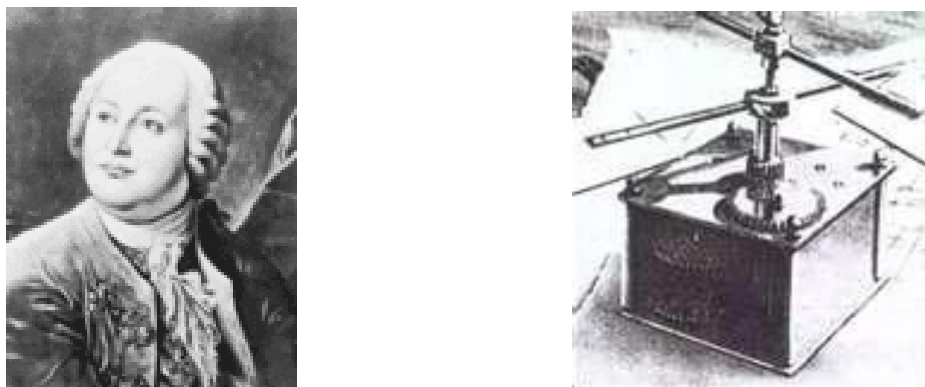


Figura 5.6 - Mikhail Lomonosov e seu aparelho denominado “Aerodinâmica”.

Fontes: disponíveis em <<http://global.britannica.com/EBchecked/topic/346787/Mikhail-Vasilyevich-Lomonosov>> (Encyclopaedia Britannica) e <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/lomonosov.php>. Acesso em 30/10/2013.

5.2 - LAUNOY E BIENVENU E A AERODINÂMICA PRÁTICA

Os franceses Christian de Launoy, um naturalista, e seu mecânico Bienvenu, em 28 de abril de 1784, apresentaram à *Academia de Ciências Francesa* uma pequena versão aperfeiçoada do “pião Chinês”.¹²⁴ Tratava-se de um brinquedo dotado de rotores coaxiais, com quatro plumas cada, fixadas em soquetes de madeira e energizados por uma corda de arco torcida em volta de uma haste,¹²⁵ cuja inovação foi introduzir definitivamente o princípio contra rotativo para evitar o efeito do torque. Os dois conjuntos de penas giravam em sentidos contrários, impulsionados pela tensão em outro arco. Este modelo gerou bastante interesse no meio científico da época. Dizia a comunicação dos inventores à *Academia Francesa*, em 1 de maio de 1784:

O funcionamento desta máquina é bem simples. Quando o arco tiver sido curvado pelo enrolamento da corda, e o eixo colocado na direção desejada do voo - verticalmente, por exemplo - a máquina é lançada. O arco inflexível gira rapidamente, as asas superiores em um sentido e as asas inferiores em sentido contrário, essas asas sendo dispostas de forma que as percussões horizontais do ar neutralizem-se mutuamente, e as percussões verticais combinem-se para levantar a máquina. Ela,

¹²⁴ É muito improvável que conhecessem o “parafuso aéreo de Da Vinci” mas, como vimos, existiam pinturas que mostravam o “pião Chinês” ou similares, evidenciando que a ideia não era nova. O diâmetro dos rotores do brinquedo de Launoy e Bienvenu era de 1 ft (aproximadamente 30 cm).

¹²⁵ CROUCH, 2008, p. 36.

portanto, sobe e cai de volta posteriormente devido ao seu próprio peso (tradução nossa).¹²⁶

Launoy e Bienvenu se propuseram a voar em um equipamento maior, mas isto não foi realizado, mesmo porque não havia, à época, meios de se obter a potência necessária para elevar apenas o peso dos dois, quanto mais o de uma máquina incluída.

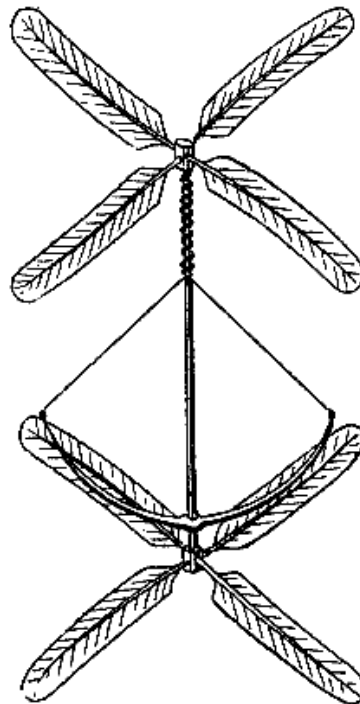


Figura5.7 - O modelo de Launoy e Bienvenu.
Fonte: CHANUTE, 1997, p.49.

5.3 - A PATERNIDADE DA NAVEGAÇÃO AÉREA

Sir George Cayley (1773-1857), engenheiro inglês, membro do Parlamento e do Partido Whig, e um dos nomes mais importantes na história da aeronáutica é considerado o primeiro verdadeiro investigador aéreo científico e a primeira pessoa a entender os princípios subjacentes e as forças em jogo no voo. Cayley foi um divisor de águas na história da aviação. Ele redefiniu

¹²⁶ "The working of this machine is very simple. When the bow has been bent by winding the cord, and the axle placed in the desired direction of flight - say vertically, for instance - the machine is released. The unbending bow rotates rapidly, the upper wings one way and the lower wings the other way, these wings being arranged so that the horizontal percussions of the air neutralize each other, and the vertical percussions combine to raise the machine. It therefore rises and falls back afterward from its own weight." (CHANUTE, 1997, p.50).

a agenda dos teóricos e empiristas da navegação aérea no século XIX e determinou os problemas que iriam enfrentar. Com ele, a ingenuidade em aviação começou a desaparecer, e sua influência sobre a engenharia de aeronaves abarcou todas as gerações futuras.

O balão de ar quente dos irmãos Montgolfier, lançado em 5 de junho de 1783, dividira as opiniões daqueles que estudavam a conquista do ar em duas facções: uma partidária de veículos mais leves que o ar, sustentados por meio de gás, e outra, cujo ideal pode ser sintetizado pelas palavras de Cayley: “Todo o problema” - ele afirmou - “está confinado dentro destes limites: fazer uma superfície apoiar um peso dado pela aplicação de potência para a resistência do ar” (tradução nossa).¹²⁷ Por dez anos os balões dominaram completamente o campo da aviação, sendo considerados como a única solução possível para o voo. Mas isto começaria a mudar.

Em 1800, Thomas Young¹²⁸ demonstrou que certas superfícies curvas, suspensas por uma corda, moviam-se para dentro e não para fora de uma corrente de ar horizontal. O experimento foi repetido, mas sem sucesso. Suspeitou-se que a corrente de ar utilizada por Young não era horizontal.¹²⁹ Outros pesquisadores estudavam o efeito das correntes de ar em superfícies planas, quando Cayley começou a se interessar pelo assunto, com os resultados que lhe deram o título de “Pai da Aeronáutica Britânica” e “Pai da Aviação”.

As tentativas de prever as forças atuantes em um corpo movendo-se através de um fluido já permeavam os esforços de alguns pesquisadores da época. “O tratamento dado por Newton ao escoamento dos fluidos em seu *Principia* (1687) foi em parte orientado no sentido da predição das forças sobre uma superfície inclinada” (tradução nossa),¹³⁰ o que já era uma base para os estudiosos do assunto. Somou-se a isso o fato de que os naturalistas do século XVIII praticamente confirmaram que o homem não tinha força muscular suficiente para bater asas artificiais, por mais superfície que tivessem. A relação entre peso e massa muscular peitoral era desfavorável aos humanos. Leonardo da Vinci já havia percebido este fato.¹³¹

¹²⁷ “The whole problem is confined within these limits, viz. To make a surface support a given weight by the application of power to the resistance of air.” (CAYLEY, 1809).

¹²⁸ Thomas Young introduziu o conceito físico de energia, tendo sido o primeiro a utilizar a palavra *energia* com seu presente significado em Física, como a capacidade que um sistema possui de realizar trabalho. Descreveu, também, o módulo de elasticidade e propôs uma teoria sobre a natureza ondulatória da luz.

¹²⁹ VIVIAN, 1921, p. 43.

¹³⁰ “(...) Newton’s treatment of fluid flow in his *Principia* (1687) was oriented in part towards the prediction of forces on an inclined surface.” (ANDERSON, 1982, p. 22).

¹³¹ O fisiologista, físico e matemático italiano Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679), em sua obra *De Motu Animalium* (publicada postumamente em 1680), fez um estudo relacionando estruturas animais e humanas com máquinas, através do uso da matemática. Uma seção da primeira parte do livro, denominada *De Volatu*, analisa o voo dos pássaros. Considerado o pai da moderna Biomecânica, tentou provar que a musculatura humana é insuficiente para suportar as enormes asas necessárias ao voo. De acordo com os cálculos de Borelli, os humanos

Cayley, o 6º Baronete, nasceu em uma família inglesa abastada, sob o reinado de Jorge III, em plena Revolução Industrial. Recebeu uma educação primorosa e racional. Foi membro fundador da *Associação Britânica para o Progresso da Ciência* e ajudou a fundar a *Politécnica de Regent Street*, atualmente *Universidade de Westminster*, além de ter sido membro do Parlamento pelo distrito de Scarborough.



Figura 5.8 - Sir George Cayley. National Portrait Gallery, Londres.

Fonte: *National Portrait Gallery*. Disponível em:

<<http://www.npg.org.uk/collections/search/portrait/mw01159/Sir-George-Cayley-6th-Bt>>. Acesso em 25/12/2014.

Cayley se interessou por um grande leque de aparatos técnicos e científicos e sua mente brilhante nos faz lembrar Da Vinci. Trabalhou com arquitetura, estradas de ferro, projetou barcos e próteses, tendo patenteado o desenho de um trator que se deslocava através de “lagarta”. Pesquisou, ainda, motores calóricos ou de “ar quente”.¹³²

Podemos dizer que, ao cair nas mãos de Cayley, o brinquedo de Launoy e Bienvenu literalmente mudou o curso da história da aviação. Em 1796, ele criou sua própria versão do

precisariam possuir músculos peitorais vinte vezes mais fortes do que os normais para poderem deixar o solo. Robert Hooke (1635-1703), através de seus experimentos com modelos, chegou a conclusões semelhantes.

¹³² CROUCH, 2008, p.41.

brinquedo, um modelinho de helicóptero com hélices contra-rotativas. Até o final do século 18, ele havia construído vários modelinhos bem sucedidos de voo vertical, com rotores feitos de folhas de estanho e impulsionados por molas de relógio.¹³³ Era, também, desde menino, fascinado por balões.



Figura 5.9 - O “helicóptero” de Launoy e Bienvenu (esq.) modificado por Cayley (dir.).

Fontes: *Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia Leonardo da Vinci*. Disponível em: <http://www.museoscienza.org/approfondimenti/documenti/storia_elicottero/>. Acesso em 24/12/2014 e *Academy of Model Aeronautics*. Disponível em: <<http://www.modelaircraft.org/museum/first.aspx>>. Acesso em 04/03/2014.

Três anos depois, em 1799, Cayley gravou um medalhão de prata (abaixo), no qual claramente representou as forças que se aplicam no voo, mostrando que o estudo da aerodinâmica começava realmente a avançar. Do outro lado do medalhão, Cayley esboçou o seu desenho de uma máquina tipo monoplano planador.



Figura 5.10 - O Medalhão Cayley e suas duas faces, representando, à esquerda, um monoplano planador com linhas de “flappers” sob as asas para o impulso e, à direita, as forças de sustentação e arrasto (1799). Atualmente no British Science Museum.

Fonte: disponível em <<http://www.flyingmachines.org/cayl.html>>. Acesso em 03/09/2011.

¹³³ Disponível em: <http://www.centennialofflight.net/essay/Rotary/early_helicopters/HE1.htm>. Acesso em 05/09/2011.

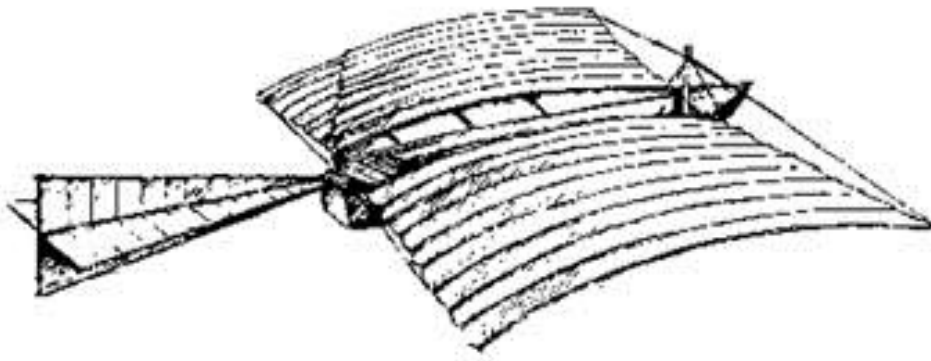


Figura 5.11 - O planador de Cayley, em perspectiva, com asas fixas e curvadas para a sustentação, e uma cauda móvel para o controle (1799).

Fonte: disponível em <<http://www.flyingmachines.org/cayl.html>>. Acesso em 03/09/2011.

Em 1804, Cayley projetou e construiu um modelo de planador monoplane de aparência surpreendentemente moderna. Tinha aproximadamente 1 m de comprimento e era feito para ser lançado manualmente.¹³⁴ O modelo apresentava uma cauda cruciforme ajustável, uma asa em forma de papagaio de papel montada em um alto ângulo de incidência e um peso móvel para alterar o centro da gravidade. Este foi provavelmente o primeiro dispositivo planador a fazer voos significativos. Os planadores podem parecer triviais hoje, mas para a época significavam uma quebra de paradigma e um avanço tecnológico enorme. Foi a primeira configuração a incorporar os elementos de um aeroplano moderno.



Figura 5.12 - Esboço por George Cayley do seu modelo de Planador Monoplano (1804).
Fonte: disponível em <<http://www.flyingmachines.org/cayl.html>>. Acesso em 05/09/2011.

¹³⁴ Tal modelo serviu de inspiração para o projeto do avião monoplane de Santos-Dumont, o N° 11.



Figura 5.13 - O modelo de Planador Monoplano de Cayley (reconstrução).
 Fonte: disponível em <<http://www.flyingmachines.org/cayl.html>>. Acesso em 05/09/2011.

O que vemos aí é um engenho mais pesado que o ar, composto de asa fixa, fuselagem e estruturas vertical e horizontal na cauda, a fim de gerar estabilidade em voo. Isto ia frontalmente de encontro às tendências aeronáuticas da época, fortemente presas às ideias dos ornitópteros e dos balões. Leonardo da Vinci, tardiamente em sua vida, chegou, também, à conclusão de que um aparelho dotado de asas fixas teria maior chance de sucesso do que os modelos com asas batentes, mas coube a Cayley dar este salto no estado da arte em aviação.

Cayley propôs uma ideia sensacional: dividir os meios para domar as forças necessárias ao voo. Ou seja, uma asa fixa para gerar sustentação se contrapondo ao peso, um modo separado de propulsão para superar a resistência (arrasto) gerada pelo movimento da máquina através do ar, e superfícies vertical e horizontal na cauda, para gerar *estabilidade direcional e longitudinal*,¹³⁵ antecipando o trabalho de Otto Lilienthal.

No ano seguinte, Cayley descobriu que o *diedro* (asas fixadas mais baixo em seu centro e mais alto em suas extremidades) melhorava a *estabilidade lateral*. Ele continuou a sua pesquisa usando modelos e, por volta de 1807, veio a entender que uma superfície de sustentação curvada poderia gerar mais sustentação do que uma superfície plana de mesma área.

Em 1809, Cayley tem a notícia de que um relojoeiro suíço, que vivia em Viena, de nome Jacob Degen, conseguira elevar-se no ar por meios mecânicos, através de um aparelho do tipo ornitóptero, com asas em forma de guarda-chuva. Sem saber que o tal relojoeiro estava suspenso por um balão no pretenso voo e com receio de perder a primazia de suas descobertas, ele escreve para o editor do Nicholson's Journal, em novembro de 1809:

“Senhor, eu observei no seu Jornal do mês passado, que um relojoeiro em Viena, de nome Degen, conseguiu elevar-se no ar por meios mecânicos. Esperei para receber o seu número atual, na expectativa de ver mais aprofundada descrição sobre este

¹³⁵ ANDERSON, 2001, p. 28.

experimento, antes de começar a transcrever o seguinte ensaio sobre navegação aérea, a partir de um número de memorandos que tenho feito por diversas ocasiões sobre este assunto. Sou induzido a solicitar a sua publicação deste ensaio, porque eu concebo, que, em afirmando os princípios fundamentais desta arte, juntamente com um número considerável de fatos e observações práticas, que têm surgido no decurso de muita atenção a este assunto, posso estar apressando a obtenção de um objeto, que será em tempo descoberto de grande importância à humanidade; tanto assim, que uma nova era na sociedade terá início, a partir do momento em que a navegação aérea for familiarmente realizada” (tradução nossa).¹³⁶

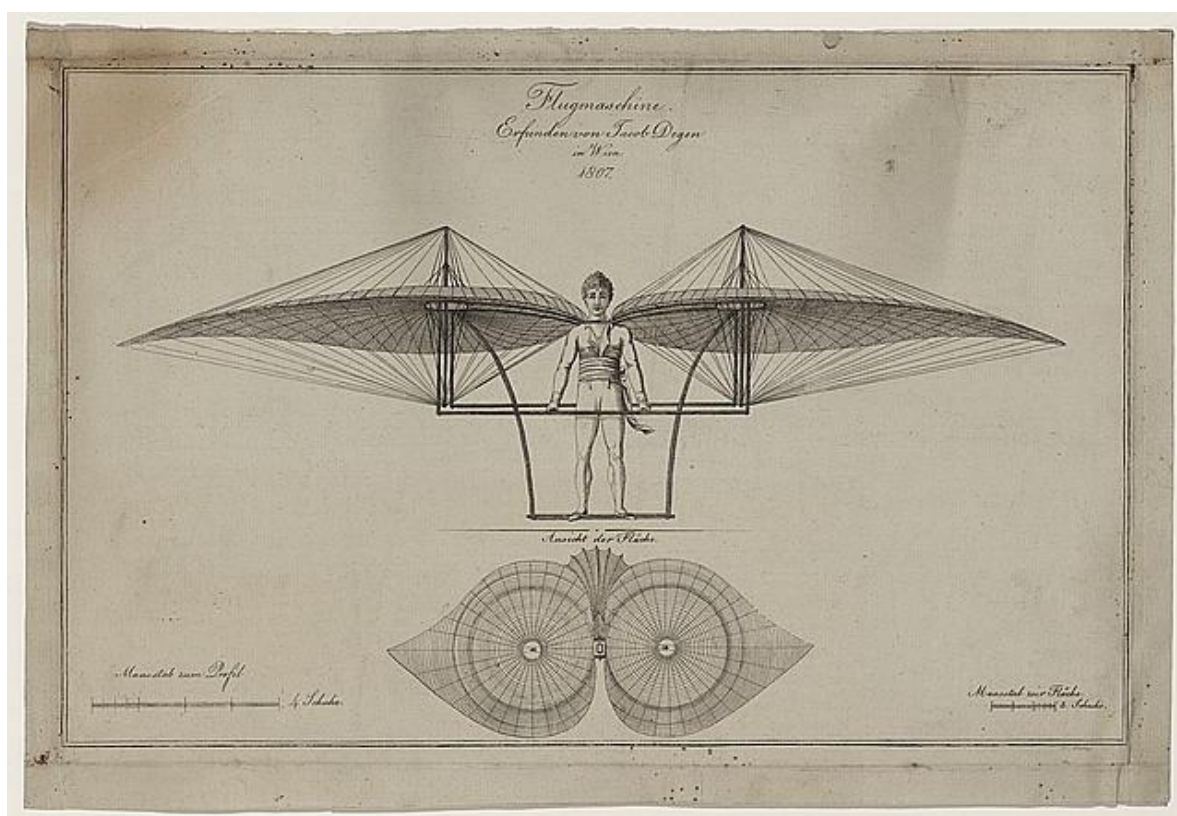


Figura 5.14 - O ornitóptero de J. Degen (1807).

Fonte: Library of Congress, Washington, D.C. Disponível em:

<<http://www.loc.gov/pictures/resource/ppmsca.02517/>>. Acesso em 28/12/2014.

¹³⁶ “SIR, I observed in your Journal for last month, that a watchmaker at Vienna, of the name of Degen, has succeeded in raising himself in the air by mechanical means. I waited to receive your present number, in expectation of seeing some farther account of this experiment, before I commenced transcribing the following essay upon aerial navigation, from a number of memoranda which I have made at various times upon this subject. I am induced to request your publication of this essay, because I conceive, that, in stating the fundamental principles of this art, together with a considerable number of facts and practical observations, that have arisen in the course of much attention to this subject, I may be expediting the attainment of an object, that will in time be found of great importance to mankind; so much so, that a new aera in society will commence, from the moment that aerial navigation is familiarly realized.” (CAYLEY, 1809).

Entre setembro de 1809 e março de 1810, Cayley publicou seu agora clássico tratado *Sobre Navegação Aérea*, em três partes, no *Nicholson's Journal of Natural Philosophy*, onde afirmou que a sustentação, a propulsão e o controle eram os três elementos necessários ao sucesso do voo, sendo, aparentemente, a primeira pessoa a constatar e a declarar isto. Neste tratado, que foi a base para os futuros pesquisadores aeronáuticos, Cayley:

- Confirmou que uma asa curva produz maior sustentação que uma superfície lisa posicionada em baixo ângulo de ataque (em relação ao vento relativo);
- Identificou as áreas de baixa pressão e alta pressão respectivamente sobre e sob uma asa arqueada em voo;
- Sugeriu um ângulo de diedro, ou seja, a ponta das asas acima da linha central da aeronave, de modo a aumentar a estabilidade lateral;
- Proporcionou os estudos iniciais sobre a variação do centro de pressão nas asas durante os voos; e
- Forneceu alguns cálculos para o desempenho de uma aeronave.¹³⁷

Os livros mencionam que Cayley teve dois grandes surtos de criatividade. O primeiro vimos acima, pois, depois disso, ele tratou de suas outras atividades pelos próximos quarenta anos, se bem que, por volta de 1816, tenha voltado a sua atenção para máquinas mais-leves-do-que-ar, projetando um aeróstato modernizado com uma estrutura semirrígida. Ele também aconselhou o uso de bolsas de gás separadas para limitar a perda de gás de sustentação devida a avarias.¹³⁸ Em 1837, Cayley projetou um aeróstato modernizado a ser acionado por um motor a vapor.

O helicóptero foi uma das mais importantes investigações de Cayley. O “aeroplano de asas rotativas” era uma ideia que impressionava sua imaginação há tempos. Em 1843, Cayley finalmente desenhou uma máquina voadora baseada no princípio do helicóptero. Ele a denominou “carruagem aérea”.

Parecia um pequeno barco com dois conjuntos duplos de grandes rotores e, em cada conjunto, um rotor sobre o outro, conectados ao corpo da aeronave por um sistema de longarinas. Um acionamento através de correias conectava o motor a vapor aos rotores que, girados, supostamente dariam poder de sustentação à máquina. Os rotores de cada lado da máquina girariam em sentido contrário aos do lado oposto, evitando o *efeito torque*. Quando a

¹³⁷ CROUCH, 2008, p. 44.

¹³⁸ O que só viria a ser feito posteriormente na construção do Zeppelin.

aeronave estivesse no ar, duas hélices localizadas na “popa” forneceriam potência para o voo adiante. O corpo do helicóptero tinha forma assemelhada a de um pássaro e era coberto com lona, sendo a “proa” em formato de cabeça de pássaro.

No interior do “pássaro helicóptero” moraria um motor a vapor que acionaria tanto os rotores quanto as hélices propulsoras. Podemos notar, no projeto, o cuidado em equipá-lo com um trem de pouso de quatro rodas e com um amplo leme horizontal para controlar as ações de subida e descida. Incluiu, também, um leme vertical para guiar a máquina para a direita ou para a esquerda.

De fato, o engenho se aproximaria do que hoje chamamos *convertiplano*.¹³⁹ O aparelho decolaria verticalmente, após o que as hélices propulsoras seriam aceleradas para o voo horizontal. Os rotores então parariam gradualmente, convertendo -se em asas circulares.¹⁴⁰

O helicóptero de Cayley nunca chegou a ser realmente construído. É bem provável que isso se tenha devido às dificuldades que tal projeto de engenharia engendrava, principalmente na construção de um motor a vapor eficiente e com boa relação peso-potência para que a máquina pudesse se sustentar no ar. Isso era, ainda, um obstáculo para a tecnologia da época.

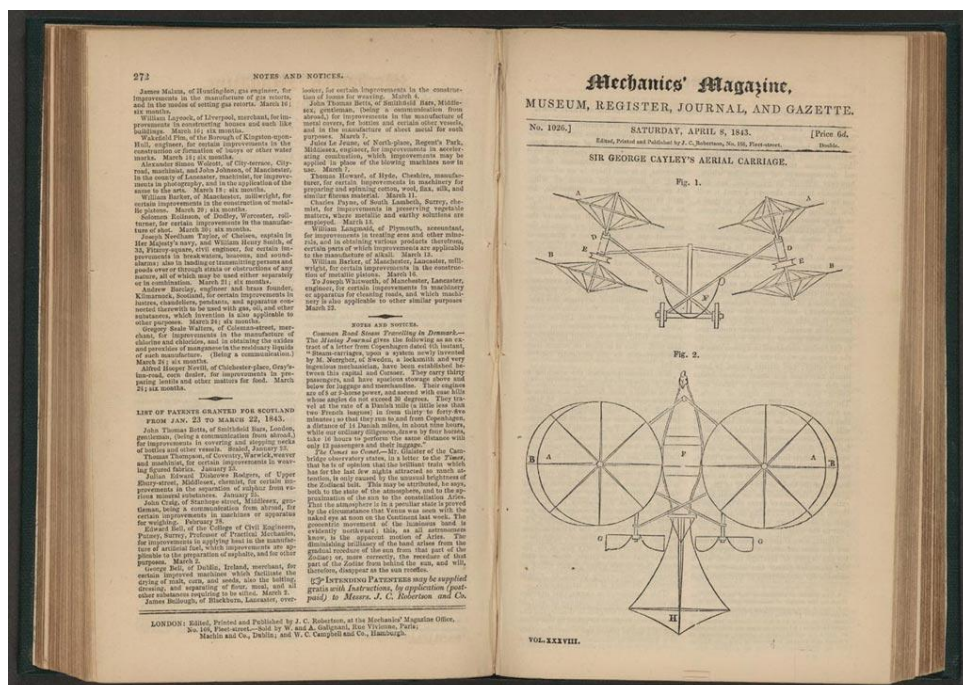


Figura 5.15 - O helicóptero de Cayley na **Mechanics' Magazine**, 8 de abril de 1843.

Fonte: Library of Congress, Washington, D.C. Disponível em:

<<http://www.loc.gov/exhibits/treasures/images/wb0036.jpg>>. Acesso em 28/08/2011.

¹³⁹ Os convertiplanos são aeronaves híbridas que contém características tanto de aviões quanto de helicópteros.

¹⁴⁰ HALLION, 2003, p. 112.

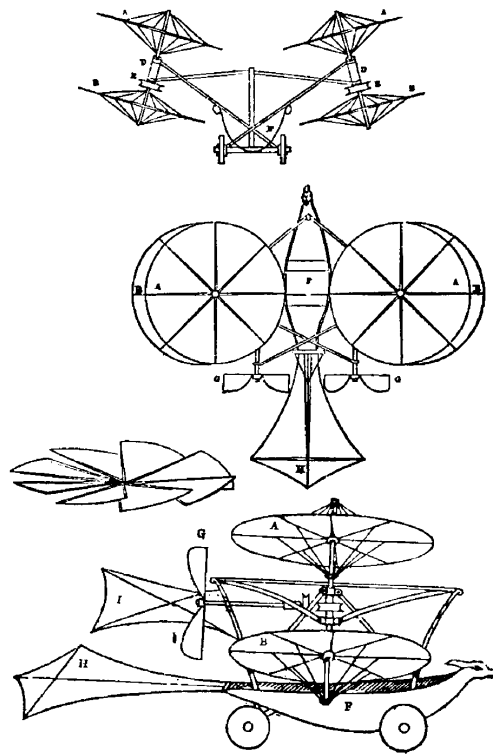


Figura 5.16 - O “helicóptero” de Cayley.
Fonte: GABLEHOUSE, 1969, p. 8.

Em 1849, ele novamente voltou sua poderosa mente para o problema do mais-pesado-que-o-ar. Neste ano construiu um grande planador de asas triplas (triplano) para a sustentação, com um carro em forma de barco sob as asas, seguindo as linhas mestras do seu desenho de 1799, e testou o dispositivo com um menino de 10 anos a bordo. O planador transportou o menino por uma curta distância em dois voos. A “máquina” tinha como características estruturais *cordas* iguais às *envergaduras* das asas em dimensões, bem como “flappers” em forma de pás movidos manualmente, para a propulsão quando o planador estivesse no ar, além de leme e elevador para pilotagem.

As asas tinham forma hexagonal e eram feitas de linho, assim como as superfícies de controle de cauda, todas sobre uma armação de cana apoiada por fios.¹⁴¹ As duas unidades cruciformes na cauda davam estabilidade ao engenho, que respondeu bem aos quesitos

¹⁴¹ Disponível em: <<http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=546>>. Acesso em 04/05/2013.

equilíbrio e direcionamento, e máquina e menino foram lançados sem registro de acidentes, ao descer uma colina.

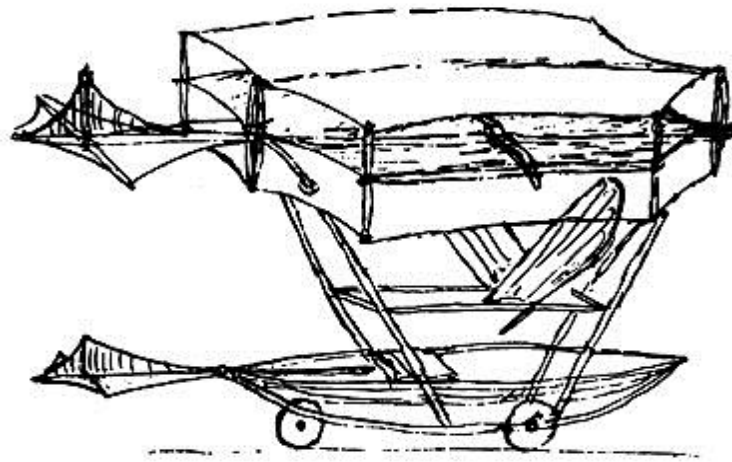


Figura 5.17 – Esboço, por George Cayley, do planador triplano “Boy Carrier” (1849).
Fonte: disponível em <www.century-of-flight.net>. Acesso em 21/05/2012.



Figura 5.18 – Outra visão do triplano de Cayley (1849).
Fonte: disponível em <<http://feixinghistory.blogspot.com.br/2009/05/sir-george-cayley-1796-1853.html>>.
Acesso em 28/12/2014.

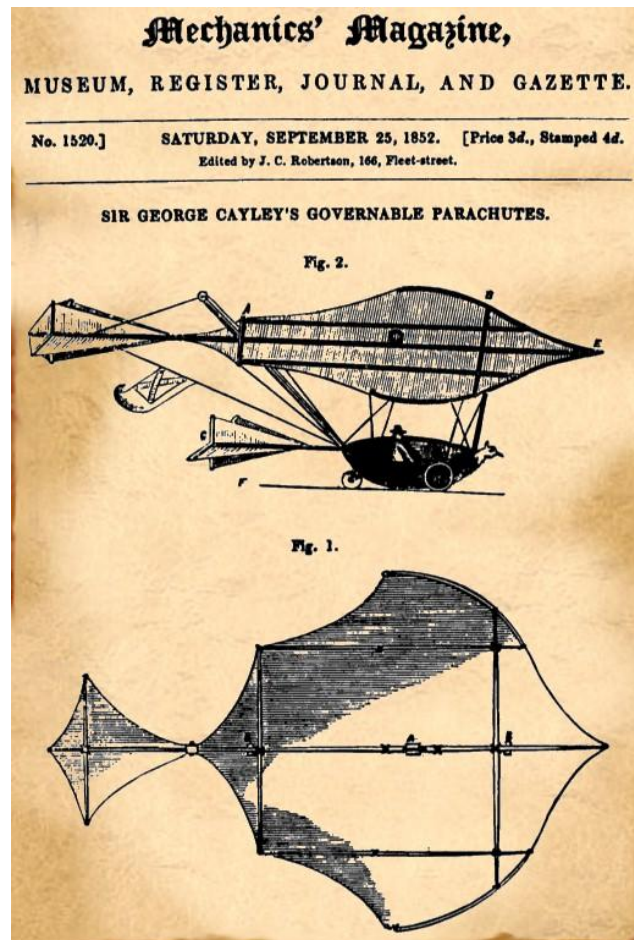


Figura 5.19 - O planador “Paraquedas Governável” de Sir George Cayley (1852/1853).
 Fonte: Wright Brothers Aeroplane Company. Disponível em: <www.wright-brothers.org>. Acesso em 28/12/2014.

Logo depois, em 1853, Cayley construiu um planador ainda maior e colocou o seu cocheiro a bordo para testar o dispositivo naquele mesmo ano. Possuía uma asa em diedro de aproximadamente 43 m^2 , elevada de 8° a 10° em relação à horizontal, com um leme horizontal cruciforme na cauda. Uma história muitas vezes repetida conta que, depois do voo curto, o cocheiro de Cayley afirmou que “tinha sido contratado para dirigir um coche e não voar um planador”, o que foi motivo de diversão para a elite social da época. Parece que os nomes, tanto do menino como do cocheiro, foram esquecidos. Igualmente, os esforços de Sir George Cayley (inclusive em outras áreas além da aeronáutica) foram também esquecidos, mas apenas temporariamente, já que ele é visto, atualmente, como o mais importante pesquisador e teórico aéreo de seu tempo.

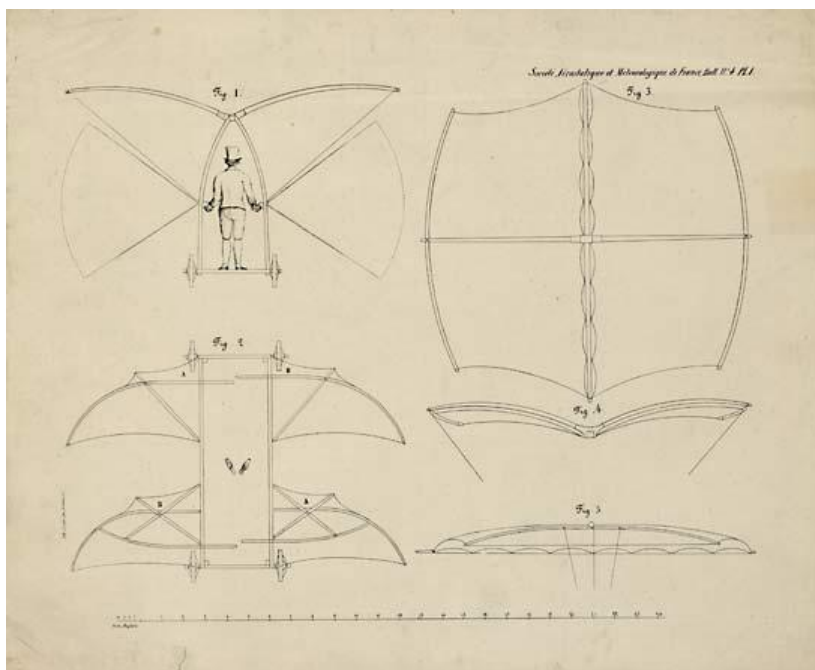


Figura 5.20 - Projeto de planador com a figura do cocheiro (1853).

Fonte: disponível em <<http://www.gettyimages.com/detail/news-photo/from-mechanics-magazine-25-september-1852-sir-george-cayley-news-photo/90745735>>. Acesso em 28/03/2015.

Sua importância como rara ponte tecnológica entre eras na aviação é imensa. Paradoxalmente, foi pouco valorizado na Inglaterra, mas isto vem mudando. De fato, foi o grande idealizador e, nesta concepção, o pai da aeronave de asas fixas, sendo, talvez, sua maior contribuição para o voo uma *nova filosofia de design*.¹⁴² Antes de Cayley, os pretensos aeronautas acreditavam no conceito vigente do *ornitóptero*, onde o sistema de propulsão deveria gerar, ao mesmo tempo, sustentação e movimento para a frente (impulsão), como as aves. Para Cayley, diferentemente, o motor deveria criar o impulso para a frente, deixando-se a tarefa de gerar sustentação ao movimento das asas (em relação ao ar).¹⁴³

Além de seus achados já citados, cabe ressaltar, no que tange à aerodinâmica, que seus experimentos com *braços girantes*, levados a cabo a partir de 1804 - e que nos legaram as conclusões de seus artigos de 1809 -, mostraram, também, falhas na chamada “Lei do Seno Quadrado”,¹⁴⁴ derivada do *Principia* de Newton (que, caso correta, praticamente

¹⁴² National Aeronautics and Space Administration (NASA). Disponível em: <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/WindTunnel/history.html>>. Acesso em 14/10/2014.

¹⁴³ Ibid.

¹⁴⁴ Em seus estudos sobre fluidos, Newton apresentou a **primeira dedução teórica da equação do arrasto**. Ele concluiu que o arrasto variava com o quadrado da velocidade, com a área da seção reta (“razão do quadrado do diâmetro”) do corpo e com a massa específica do fluido: “However, that the resistance of bodies is in the ratio of the velocity is more a mathematical hypothesis than a physical one. In mediums void of all tenacity, the resistances made to bodies are as the square of the velocities.” (NEWTON, 1960, p.244). Matematicamente: $D \propto \rho S V^2$ (trabalho com corpos esféricos), sendo D o arrasto, ρ a massa específica ou densidade do fluido, S a área da seção

impossibilitaria o voo com asas fixas), bem como a incorreção da *constante de Smeaton*, que ele alterou, quase precisamente, para 0,0038,¹⁴⁵ sendo que tal correção foi desprezada até a época dos cálculos dos Wright. Orville Wright escreveu:¹⁴⁶

Cayley foi um homem notável. Ele sabia mais dos princípios da aeronáutica do que qualquer um de seus antecessores, e mais do que qualquer que o seguiu até o final do século 19. Seu trabalho publicado é extraordinariamente isento de erros e foi a maior contribuição para a ciência” (tradução nossa).¹⁴⁷

Em sua enorme relevância, Cayley definiu muitos dos conceitos e elementos do aeroplano moderno em termos de engenharia e utilizou métodos e ferramentas da ciência para a solução dos problemas do voo, casando teoria e experimentação.

Ele morreu pouco antes de completar 84 anos e, mesmo nesta idade, conta-se que seu interesse em aeronáutica não arrefecera. Pelos seus excelentes trabalhos no campo da ciência, ele foi homenageado com o título de Cavaleiro. As suas teorias e atividades inspiraram as ondas seguintes de aeronautas, além da criação, cinco anos após sua morte, da *Société Aerostatique et Météorologique de France* e, pouco tempo depois, da *Aeronautical Society of Great Britain*, em 1866.

reta do corpo em relação ao fluido e V a velocidade do fluido em relação ao corpo (ou vice-versa). Derivou que o impacto da força exercida pelo fluido em uma superfície curva seria proporcional a $\sin^2 \theta$, onde θ é o ângulo entre a tangente à superfície e a direção do fluxo do fluido. Posteriormente, os newtonianos aplicaram este princípio a uma superfície plana, obtendo as seguintes fórmulas para a sustentação (L) e o arrasto (D): $L = \rho V^2 S \sin^2 \alpha \cos \alpha$ e $D = \rho V^2 S \sin^3 \alpha$, sendo α o ângulo formado entre a superfície plana e a direção do fluxo do fluido, e L e D as componentes vertical e horizontal da resultante $R = \rho V^2 S \sin^2 \alpha$. Logo, para ângulos de ataque pequenos, os senos e cossenos seriam muito pequenos. Ao quadrado ficariam ainda menores. Para a sustentação contrabalançar o peso seria necessário (Cf. ANDERSON, 2001, p. 39-40):

1. Aumentar enormemente a área da asa, o que tornaria uma máquina voadora impraticável;
2. Aumentar o ângulo de ataque, mas, como podemos perceber, isto aumentaria não só a sustentação, mas também o arrasto, e este em taxa maior;
3. Um motor extremamente potente para contrabalançar o arrasto.

Devido a isto, havia muita discussão no Século XIX, a maioria delas mostrando que o voo do mais-pesado-que-o-ar não era factível. O túnel de vento de Francis Wenham (1824-1908) desmontou tal teoria. Mostrou ser a resistência (arrasto) proporcional ao seno e não ao seu quadrado.

¹⁴⁵ HALLION, 2003, p. 109. O coeficiente de Smeaton, criado pelo engenheiro civil e famoso construtor de faróis inglês John Smeaton (1724-1792), obtido através de experimentos com braços girantes, era um valor importante e um termo chave no cálculo das equações de sustentação e arrasto, e representava a densidade do ar. Um valor para o coeficiente de 0,00492 foi amplamente utilizado desde o século XVIII. Cayley, com braços girantes, calculou o valor de 0,0038. As correções de Cayley ficaram desconhecidas e grandes pioneiros da aviação, dentre eles Otto Lilienthal, continuaram usando o errôneo valor de Smeaton, o que prejudicou o desenvolvimento da aviação. Os irmãos Wright, através de medições obtidas a partir de seus testes com planadores em Kitty Hawk para obtenção da equação de sustentação, calcularam um valor médio de 0,0033 para o coeficiente. Este valor se aproxima, dentro de pequena margem de erro, ao valor atual calculado pelos físicos e especialistas em aerodinâmica.

¹⁴⁶ HALLION, 2003, p. 105.

¹⁴⁷ "Cayley was a remarkable man. He knew more of the principles of aeronautics than any of his predecessors, and as much as any that followed him up to the end of the 19th century. His published work is remarkably free from error and was a most important contribution to the science." (HALLION, 2003, p. 105).

6 - OUTROS DESENVOLVIMENTOS EM ASAS ROTATIVAS

“Valorize suas limitações, e, por certo, não se livrará delas”.

“Nunca lhe dão um desejo sem também lhe darem o poder de realizá-lo. Você pode ter de trabalhar por ele, porém”.

Richard Bach em *Ilusões*.

6.1 – HERDEIROS DE CAYLEY E NOVOS PROJETISTAS

Ao tempo em que Cayley voltava seus esforços para a máquina aérea de asas rotativas, um conterrâneo seu, o cientista e experimentador inglês, W. H. Phillips estava empenhado em assunto semelhante. Em 1842, ou seja, um ano antes do projeto da “carruagem aérea” de Cayley, Phillips conseguiu um voo real com um modelo reduzido de helicóptero. Tal modelo era impulsionado por um diminuto motor a vapor, vapor este gerado por um também diminuto boiler. Todo o dispositivo pesava em torno de 9 kg. O pequeno aeromodelo fez vários voos bem sucedidos e possuía um sistema de propulsão inédito: o vapor esguichava por pequenas aberturas nos braços do rotor,¹⁴⁸ fazendo-os girar e elevando, assim, o aparelho.¹⁴⁹

A ciência da aeronáutica deu um passo à frente com tal criação, considerando-se o uso do princípio do jato. Segundo palavras de seu criador:

Tudo arranjado, o vapor subiu em poucos segundos, quando todo o aparato girou como um pião e montou no ar mais rápido do que qualquer ave; para que altura ele ascendeu eu não tinha meios de averiguar. A distância percorrida atravessou dois campos, onde, após uma longa busca, eu encontrei a máquina menos as asas, que tinham sido arrancadas pelo contato com o solo (tradução nossa).¹⁵⁰

A notícia da máquina voadora de Phillips entusiasmou o meio científico da época e, principalmente, os engenheiros, quanto à possibilidade de se construir uma máquina de maior

¹⁴⁸ O vapor era ejetado pelas pontas das pás do “rotor”, neste caso um tipo de ventoinha com as pás dispostas num ângulo de 20° com a horizontal. O dispositivo lembrava a Eolípila ou “Bola de Éolo” (o deus do vento) de Heron de Alexandria. Tal invento marca a primeira vez em que um modelo de helicóptero foi alimentado a motor, ao invés de dispositivos armazenadores de energia como molas e arcos torcidos. O modelo foi apresentado na Exposição Aeronáutica em Londres, no Palácio de Cristal, em 1868 (CHANUTE, 1997, p. 50-51).

¹⁴⁹ ROSS, JR., 1956, p. 26.

¹⁵⁰ “All being arranged, the steam was up in a few seconds, when the whole apparatus spun around like a top and mounted into the air faster than any bird; to what height it ascended I had no means of ascertaining. The distance traveled was across two fields, where, after a long search, I found the machine minus the wings, which had been torn off from contact with the ground.” (CHANUTE, 1894, p. 51).

porte sob os mesmos princípios, para o transporte de passageiros. Mas a ousadia da ideia foi posta por terra diante do imenso volume e do enorme peso que teria a máquina a vapor necessária a tal fim.

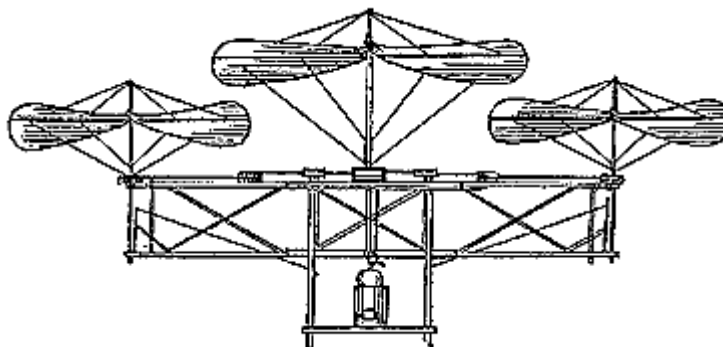


Figura 6.1 – O projeto de Cossus (1845).
Fonte: CHANUTE, 1997, p. 51.

Chanute documenta que um certo Sr. Cossus apresentou, em 1845, o projeto de um interessante aparelho que continha três *parafusos aéreos rotativos*,¹⁵¹ movidos pelo poder do vapor: um central, maior, e dois menores nas extremidades. Eram articulados e a mudança na direção poderia ser obtida variando-se a inclinação dos rotores externos, sendo a sustentação garantida pelo rotor central.¹⁵² Chanute também menciona um dispositivo criado pelo Sr. Bright, em 1859, com dois rotores (“parafusos”), acionados por eixos que giravam em direções opostas, um no interior do outro. O aparelho seria suspenso por um balão e os rotores girados por força humana, de modo a alterar ou manter a altitude, poupando lastro. Tais benefícios, entretanto, se mostraram insuficientes e impraticáveis.

¹⁵¹ Parafusos aéreos rotativos ou apenas “parafusos” era o nome pelo qual os rotores eram ainda chamados, na época.

¹⁵² CHANUTE, 1997, p. 51.

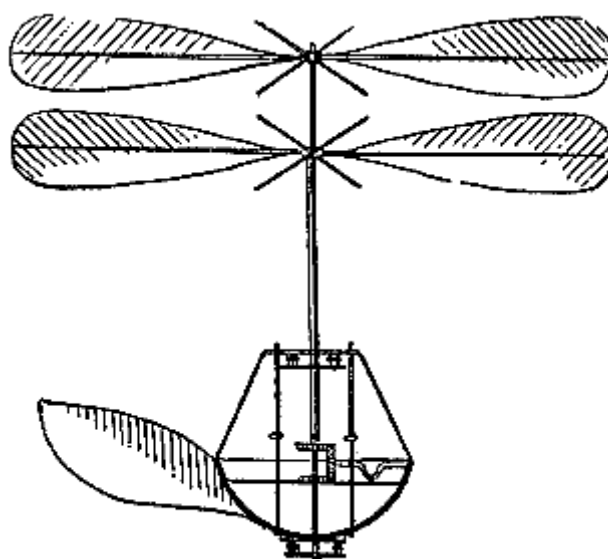


Figura 6.2 – O modelo de Bright (1859).
Fonte: CHANUTE, 1997, p. 52.

É interessante notar que, na época, ampliava-se o interesse por prever a melhor forma dos propulsores, assim como a preocupação em fazê-los mais eficientes. Em um artigo no periódico *L'Aeronaute*,¹⁵³ M. Crocé Spinelli faz uma análise do movimento circular para a propulsão, comparando sua eficiência com o batimento das asas dos pássaros, mostrando que as relações entre *centro de pressão* (que ele chama de *centro de ação*) e *centro de gravidade* começam a se delinear. Faz uma pequena comparação entre o rendimento das hélices marinhas (e rodas d'água) e o das aéreas, com relação a seus diâmetros, e chega à conclusão que, dentre todos os propulsores de movimento circular existentes, o mais confiável é a hélice, principalmente pela regularidade de seu movimento de rotação. Analisa a posição do plano das hélices sustentadoras em relação ao centro de gravidade, tendo por base as distâncias entre os eixos, relacionando-a às chances de ruptura. Acredita que os primeiros aparelhos a transportar humanos terão quatro hélices. Cita Giffard e analisa suas conclusões sobre a velocidade periférica das hélices e os melhores ângulos de inclinação que, segundo ele, variariam entre 20° e 30°, comparando-os aos ângulos das pás dos moinhos de vento - que teriam semelhante inclinação, se de pequenos diâmetros e inclinações bem menores (até 7°), se de grandes diâmetros, chegando a 10° para propulsores aeronáuticos, em sua extremidade. E chega à conclusão que, para diminuir a inclinação das hélices, seria necessário um rotor maior, com maior velocidade periférica. Em suas palavras:

¹⁵³ SPINNELLI, 1870, p. 49-61.

Quanto à velocidade na extremidade dos ramos da hélice, é necessário que ela seja a mais considerável possível, pois a força sustentadora cresce como o quadrado da velocidade. O cálculo indica que é necessário aumentar o diâmetro para ampliar a velocidade na periferia e diminuir a inclinação. De fato, no restante em certos limites, a força sustentadora poderá ser praticamente aumentada por um trabalho constante, pois esta força é proporcional ao quadrado da velocidade na extremidade das asas, ao quadrado do diâmetro e aproximadamente inversamente proporcional ao passo e à velocidade de rotação. Além disso, a força centrífuga decresce com o aumento do diâmetro para uma mesma velocidade na extremidade das asas (tradução nossa).¹⁵⁴

6.2 – O PRIMEIRO TÚNEL DE VENTO E UM GÊNIO TRÁGICO

Francis Herbert Wenham (1824-1908), engenheiro naval britânico,¹⁵⁵ também viria a propor, em 1872, em comunicação à *Sociedade Aeronáutica Britânica*, um engenhoso método para variar o passo das hélices, através de molas helicoidais. Após experiências insatisfatórias com braços girantes,¹⁵⁶ desenhou e construiu em 1871, em colaboração com John Browning (1831-1925), o primeiro túnel de vento da história. Tratava-se de um tubo de 3,65 m de comprimento por 116 cm² de seção reta, em cujo interior perfis de asas eram colocados, recebendo um fluxo horizontal de ar gerado por uma ventoinha acionada por motor a vapor. Ele conduziu extensos estudos sobre sustentação em asas curvas e *razões de aspecto*. Suas conclusões foram de enorme importância: descobriu, com seus colaboradores, que a baixos ângulos de ataque (ex: 15°), a razão sustentação/arrasto chegava ao incrível valor de 5, o que contradizia as previsões negativas dos newtonianos. E que asas longas e estreitas (como aquelas dos planadores modernos) fornecem muito mais sustentação do que asas curtas e largas com as mesmas áreas.¹⁵⁷

O túnel de vento começava a mostrar seu potencial. Mas uma questão intrigava os que começavam a lidar com a nascente aerodinâmica: será que o que acontecia nos modelos em

¹⁵⁴ “Quant à la vitesse à l'extrémité des branches de l'hélice, il faut qu'elle soit la plus considérable possible, car la force soulevante croît comme le carré de la vitesse. Le calcul indique qu'il faut augmenter le diamètre pour accroître la vitesse à la périphérie et diminuer l'inclinaison. En effet, en restant dans certaines limites, la force soulevante pourra être pratiquement augmentée pour un travail constant, car cette force est proportionnelle au carré de la vitesse à l'extrémité des ailes, au carré du diamètre et à peu près inversement proportionnelle au pas et à la vitesse de rotation. De plus, la force centrifuge décroît avec l'augmentation de diamètre pour une même vitesse à l'extrémité des ailes.” (SPINELLI, 1870, p.58).

¹⁵⁵ Foi também membro fundador da *Sociedade Aeronáutica Britânica*.

¹⁵⁶ O braço girante era um dispositivo rotativo (normalmente acionado pela queda de um peso ligado a uma corda enrolada a um eixo) dotado de um braço, em cuja extremidade se afixavam superfícies de diversos formatos e inclinações (e mesmo asas de pássaros) de forma a medir parâmetros aerodinâmicos como sustentação e arrasto, os quais eram, então, registrados. Foi empregado pela primeira vez por Benjamin Robins (1707-1751), engenheiro militar e matemático britânico, um dos fundadores da balística, sendo tal aparato o precursor do túnel de vento.

¹⁵⁷ Disponível em: <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/WindTunnel/history.html>>. Acesso em 10/12/2014.

escala poderia ser transplantado para um modelo em tamanho real? A resposta seria dada, num futuro próximo, por Osborne Reynolds (1842-1912), da Universidade de Manchester. Ele demonstrou que, se o padrão de fluxo de ar ao longo de um modelo em escala fosse o mesmo para um aparelho em tamanho real, um parâmetro de fluxo era o mesmo em ambos os casos. Este parâmetro, um fator agora conhecido como *número de Reynolds*, é básico para a descrição de inúmeras situações onde se estuda o fluxo de fluidos.¹⁵⁸

Essa foi uma época romântica da história da aviação, onde as leis e os princípios do voo começavam a ser divisados, gerando em seu encalço sonhos e paixões. É certo que o modelo de Launoy e Bienvenu, bem como os de Cayley, influenciaram também um gênio trágico da história da aviação.

Alphonse Pénaud nasceu em 1850 e estava destinado a seguir os passos de seu pai Almirante entrando na Marinha francesa, quando uma doença incapacitante nos quadris deu fim aos seus sonhados planos. Talvez tal fato o tenha levado a desenvolver seu espírito criativo, de modo que, ao final da adolescência, ele passou a dedicar-se ao problema de inventar uma máquina voadora.

Em 1839, o americano Charles Goodyear descobrira acidentalmente o processo de vulcanização da borracha, o que tornou possível a fabricação de luvas, galochas, pneumáticos e até as tiras elásticas que foram utilizadas por Pénaud para propulsionar seus históricos aeromodelos.



Figura 6.3 - Alphonse Pénaud (1850-1880).

Fonte: disponível em <<http://aerostories.free.fr/precursseurs/penaud/penaud.jpg>>. Acesso em 20/08/2014.

¹⁵⁸ Disponível em: <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/WindTunnel/history.html>>. Acesso em 10/12/2014.

Pénaud não era apenas um sonhador. Trabalhou metodicamente, pensando com cuidado nas questões de estabilidade e propulsão.¹⁵⁹ Aos vinte anos, em 1870, inventou um modo de propulsão ingênuo para os nossos dias, mas tão fenomenal para sua época, que deu a tônica para as experimentações em pequena escala. Tratava-se de um modelo artesanal de helicóptero, com um par de hélices contra-rotativas axiais impulsionadas por tiras de borracha torcidas (como as usadas em aeromodelos leves até hoje).

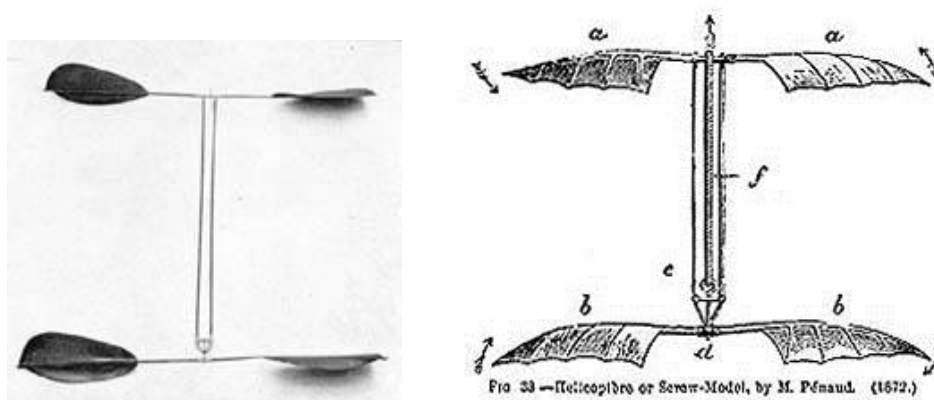


Figura 6.4 - O “helicóptero” de Pénaud (1870), e seu desenho.

Fontes: disponíveis em: <<http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/penaud.html>> e <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Penaud%27s_Helicopter.jpg>. Acesso em 07/01/2015.

O modelo acima possuía altura de 28 centímetros, diâmetro de 31 centímetros e peso de 6 gramas. Em 1871, Pénaud avançou pelo segmento de asas fixas lançando seu conhecido *Planophore*, um avião monoplano em pequena escala, impulsionado igualmente por uma tira de borracha torcida e uma hélice de duas pás. O modelo, de 50 cm de comprimento, 45 cm de envergadura e peso de 15 gramas, trazia inovações importantes: as asas eram ligeiramente torcidas para cima próximo às pontas para melhorar a estabilidade lateral e, na cauda, superfícies horizontais (estabilizadores) garantiam uma melhoria na estabilidade longitudinal.¹⁶⁰ O motor, de tiras de borracha, às vezes funcionava como um “empurrador” (na parte de trás do aparelho) ou como “trator” (quando na parte de vante), dependendo do modelo, que era capaz de voar de forma estável por consideráveis 60 metros, passando a servir como modelo de ensaios de voo. Para compensar o efeito torque do propulsor, Pénaud adicionou peso a uma das asas.¹⁶¹ Ele fez voar seu *Planophore* nos Jardins das Tulherias, em Paris, em 18 de

¹⁵⁹ LIENHARD, 2003, p. 153.

¹⁶⁰ BRADY, 2000, p. 23.

¹⁶¹ Disponível em: <<http://aerostories.free.fr/precursers/penaud/page2.html>>. Acesso em 05/04/2013.

agosto de 1871, diante de um grande grupo de convidados. O modelo ascendeu através de dois círculos e depois deslizou de volta para pouso em um local próximo ao seu ponto de decolagem, tendo percorrido cerca de 40 metros em 11 segundos, em trajetória estável e segura, conforme foi noticiado no jornal especializado em balonismo *L'Aeronaute*.¹⁶² O aparelho tinha 45 centímetros de envergadura e 50 centímetros de comprimento. Este é considerado o primeiro voo de sucesso (e público) de um modelo de *aeronave auto estável*, ou seja, com “equilíbrio automático”.¹⁶³

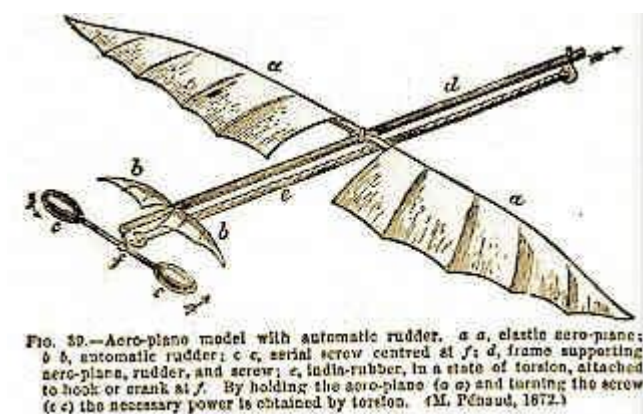


Figura 6.5 - O “Planophore” de Pénaud (1871).

Fonte: *Encyclopaedia Britannica*, 1897. Disponível em: <<http://www.uh.edu/engines/epi1129.htm>>. Acesso em 17/11/2012.

O *Planophore* adquiria estabilidade longitudinal através de um arranjo crítico de seus centros de gravidade e de pressão e do alinhamento de sua cauda horizontal. A posição da asa fazia com que o centro de pressão ficasse atrás do centro de gravidade, gerando uma atitude de “nariz baixo”. Para compensar este efeito, Pénaud montou a cauda com um ângulo de incidência 8° menor que o da asa, de modo que a atitude se invertesse (“nariz alto”) e o aparelho ganhasse em estabilidade, podendo manter um padrão de voo nivelado. Tal método para manter a estabilidade longitudinal, somado à posterior inclusão de uma superfície vertical (leme) para dar controle direcional, fazendo o modelo mover-se em linha reta, constituíram-se em enormes avanços para a ciência aeronáutica,¹⁶⁴ com grandes repercussões. A estabilidade em elevação, que foi obtida fixando-se o estabilizador horizontal em um ângulo ligeiramente negativo, foi uma das mais notáveis descobertas de Pénaud, gerando também discussões matemáticas úteis sobre o assunto. Assim, o pequeno *Planophore* exerceu uma enorme influência nas gerações de

¹⁶² PÉNAUD, 1872, p.7.

¹⁶³ CHANUTE, 1997, P. 117.

¹⁶⁴ BRADY, 2000, p. 23.

experimentadores subsequentes, até que chegassem aos passos finais da invenção do avião e, posteriormente, do helicóptero.

Em 1872, já tendo obtido sucesso em seus modelos de asa fixa e rotativa, Pénauud aventurou-se a fabricar um ornitóptero movido também pela força elástica contida em uma tira de borracha enrolada, que era utilizada para fazer bater as asas do modelo. As asas batiam direto para baixo, e a propulsão era obtida a partir da flexão de suas bordas externas produzida pela reação do ar. Uma superfície foi incluída na cauda para dar estabilidade. Porém, o engenho só voava após lançamento manual, se sustentando enquanto durasse a força elástica.

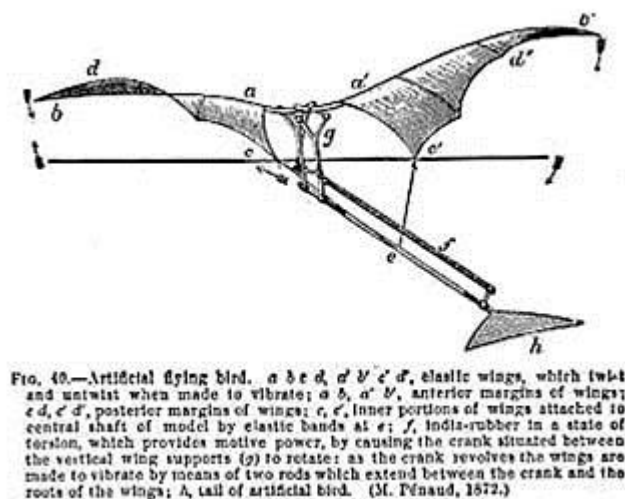


Figura 6.6 - O ornitóptero de Pénauud (1872).

Fonte: *Encyclopaedia Britannica*, 1897. Disponível em: <<http://www.uh.edu/engines/epi1129.htm>>. Acesso em 15/09/2013.

Pénauud não ignorou o trabalho de seus predecessores, tendo revisto e publicado os trabalhos de George Cayley. Publicou também, entre 1872 e 1875, vários estudos seus concernentes ao fluxo de ar ao redor das máquinas, sobre a resistência do ar (arrasto) e sobre as características do voo planado. Devemos a ele a definição de três problemas básicos: resistência do ar, força das máquinas e necessidade de motores leves. Indo contra a corrente da época, que favorecia ora os motores a vapor,¹⁶⁵ ora os motores elétricos, Pénauud era um partidário

¹⁶⁵ Conforme desenvolvia Clément Ader (1841-1926) em seus protótipos aos quais denominou *Avions*. A palavra *Avião* do latim *avis*, que significa pássaro. Foi inventada em 1863 por Gabriel de La Landelle, referindo-se ao “barco alado” de Jean-Marie Le Bris (1817-1872). Ader foi engenheiro de estradas de ferro e prolífico inventor. Construiu um balão em 1870-1871, durante a Guerra Franco-Prussiana e propôs ao governo uma espécie de pipa que levaria um homem para observação dos movimentos da tropa inimiga. Inventou e patenteou inúmeros engenhos, dentre eles um modelo de bicicleta e uma máquina de restaurar trilhos. Representante da Bell na França, instalou os primeiros telefones de Paris em 1879. Apresentou um sistema estéreo denominado *teatrofone*, um tipo de telefone que, colocado em pontos estratégicos da cidade, permitia ao transeunte, mediante alguma quantia, ouvir

irredutível do motor a combustão. Seus modelinhos movidos a elástico viriam a influenciar os irmãos Wright.¹⁶⁶

Em 1875, ele recebeu um prêmio da *Academia Francesa de Ciências* por suas ideias brilhantes. Sua principal preocupação à época era resolver os problemas aerodinâmicos de peso e arrasto. Juntou-se, então, a um mecânico chamado Paul Gauchot e juntos patentearam, em 1876, um modelo de aeroplano em grande escala. Tratava-se de um monoplano de dois lugares, anfíbio, que empregava duas hélices frontais tratoras e contra rotativas. As *asas cantilever*, aerodinâmicas e de forma elíptica, eram dotadas de flutuadores em suas pontas para operação aquática. Possuía anemômetro e indicadores de vento relativo, de *bank* (inclinação lateral) e de pressão sobre as asas.¹⁶⁷ Um trem de pouso retrátil, elevador e leme operados por alavancas de controle, além de uma cabine envidraçada, completavam este incrível e ambicioso projeto. Foi o primeiro projeto de um hidroavião.

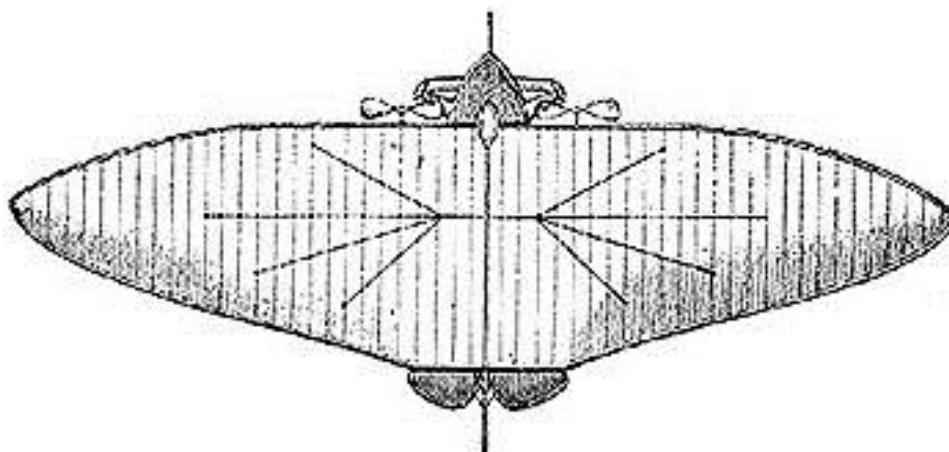


Figura 6.7 - O aeroplano anfíbio de Pénaud e Gauchot (1876).

Fonte: disponível em <<http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/penaud.html>>. Acesso em 23/11/2011.

à distância óperas, recitais e peças de teatro apresentadas na capital. O equipamento produzia uma sensação de som espacial para os ouvintes. Já rico, dedicou-se às aeronaves mais-pesadas-que-o-ar, construindo o *Éole* (*Avion I*) com as asas no formato das de um morcego e que se dobravam como tal. Em 9 de outubro de 1890, movido por um motor a vapor incrivelmente planejado e pesando 296 kg (incluindo Ader), o *Éole* moveu-se pesadamente para a frente e subiu apenas a 20 cm do solo, num “voo” de apenas 50 m. O orgulhoso Ader achou que fora o primeiro a voar, por ter conseguido desprender-se do solo com um mais-pesado-que-o-ar, mas a verdade é que o voo não se sustentou e não teve controle. Construiu, ainda, com apoio governamental, os protótipos *Zephyr* (*Avion II*) e o *Aquilon* (*Avion III*), os quais, apesar dos enormes avanços em mecânica, igualmente não obtiveram sucesso. Ader, atualmente, passou a ser cultuado em alguns meios na França como “Pai da Aviação”, em face de seu discutível “voo”.

¹⁶⁶ O bispo Milton Wright, pai dos irmãos Wilbur e Orville, compraria um desses “helicópteros” de Pénaud para os filhos, em 1878. Quando os brinquedo quebrou, os meninos passaram a construir os seus próprios modelinhos de helicópteros voadores (CROUCH, 2008, p.37).

¹⁶⁷ <<http://aerostories.free.fr/precursseurs/penaud/page2.html>>. Acesso em 10/04/2013.

Pénaud tentou, nos quatro anos seguintes, angariar meios para concluir e voar tal máquina. Nessa época, Henri Giffard era o aviador experimental mais conhecido da França. Pénaud, então, dirigiu-se a ele em busca de ajuda para realizar sua máquina mais-pesada-que-o-ar, obtendo de volta um tratamento frio.

Alphonse Pénaud não conseguiu lidar com tal frustração. Construiu uma pequena caixa de madeira em forma de caixão e nela colocou todos os seus desenhos. Dirigiu-se, então, à casa de Giffard, onde deixou a caixa, voltou para casa e, com a idade de apenas trinta anos, suicidou-se com uma pistola. Ele não tinha como saber que Giffard também sofria de depressão, vindo a suicidar-se dois anos depois. Era o fim de dois gigantes sobre cujas ideias geniais se debruçaram novas gerações de aeronautas.¹⁶⁸

É necessário observar que, desde o início do século XIX, o helicóptero, como uma aeronave mais-pesada-que-o-ar, foi tão pensado quanto os aviões de asas fixas. E, embora este último tenha ganhado a corrida para chegar primeiro aos céus, os adeptos do helicóptero nunca se deram por vencidos em sua luta para construir uma máquina funcional. Sentiam que as gerações futuras poderiam usufruir de suas múltiplas qualidades, algumas superiores às demais aeronaves, daí sua grande lealdade ao voo vertical.

Esforços vinham sendo envidados para a obtenção do voo vertical, mas seu amadorismo e a falta de experimentos científicos vinculados levaram-nos, inevitavelmente, ao fracasso. No entanto, em 1863, iniciou-se em Paris o que poderia ser descrito como um grande “boom” de projetos relacionados à navegação do ar por meio dos “parafusos aéreos”, o que gerou grande entusiasmo. Destacaram-se os trabalhos do Visconde Gustave de Ponton d’Amécourt e de Gabriel de la Landelle.¹⁶⁹ O primeiro, que cunhou o termo **hélicoptère** (derivado do adjetivo grego “elikeoieas,” significando *espiralado* ou *sinuoso* e do substantivo “pteron”, significando *pena* ou *asa*),¹⁷⁰ idealizou um modelo com hélices contra rotativas, confeccionadas em um novo

¹⁶⁸ Um paralelo com a genialidade seguida de suicídio dos brilhantes inventores citados, pode ser encontrado na vida de Santos-Dumont, bem como a destruição de registros de projetos.

¹⁶⁹ Deve-se a Gabriel de la Landelle a primeira menção à palavra “aviação” (de “avis” - “oiseau” e de “actio” = “action”), em seu livro *Aviation ou navigation aérienne sans ballons* (LANDELLE, 1863). La Landelle foi um oficial de Marinha bretão nascido em Montpellier, em 1812. A partir de 1861, com o seu amigo Gustave de Ponton d’Amécourt, desenvolveu pequenos helicópteros conhecidos como *Spiralifères* e, em 1863, em conexão com o fotógrafo e balonista Nadar, fundou a *Sociedade de incentivo para a locomoção aérea, por meio de aparelhos mais pesados que o ar*, onde se encontrava a elite intelectual parisiense. Os três entusiastas do voo vertical ficaram conhecidos como o “triumvirato helicoidal” (GABLEHOUSE, 1969, p.10).

¹⁷⁰ Em 3 de abril de 1861, Gustave de Ponton d’Amécourt obteve uma patente para sua invenção, um pequeno aparelho com duas hélices horizontais, concêntricas e superpostas, girando em sentidos contrários e acionadas por uma fonte motriz qualquer. Uma outra hélice, na parte posterior do veículo, o faria progredir e um leme vertical imprimiria direção. La Landelle imaginou uma utilização de salvatagem marítima para a invenção do amigo. Na patente a palavra *aeronave* (nave aérea) era empregada, mas no aditivo de 16 de abril de 1862, aparece pela primeira vez a palavra *hélicoptère* (LE ROY, 2007).

material, o alumínio, e movido por um motor a vapor, que foi apresentado na *Exposição Aeronáutica de Londres*, em 1868, também sem êxito (outro engenho seu, impulsionado à mola, obteve resultado melhor). Quanto ao segundo, publicou seus planos para um helicóptero sustentado por vários mecanismos rotatórios - como os de Ponton D'Amécourt - movidos a vapor. Tais desenhos inspiraram o escritor Júlio Verne na caracterização do “helicóptero” (na verdade um navio com múltiplos rotores) descrito em seu livro *Robur, o Conquistador*, de 1886, ano da morte de La Landelle.¹⁷¹



Figura 6.8 – Gustave de Ponton D'Amécourt e a fotografia de seu helicóptero por Nadar.

Fontes: disponíveis em <[http://www.famille-damecourt.com/post/Gustave-Vicomte-de-Ponton-d%E2%80%99Am%C3%A9court-\(1825-1888\)2](http://www.famille-damecourt.com/post/Gustave-Vicomte-de-Ponton-d%E2%80%99Am%C3%A9court-(1825-1888)2)> e

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Gustave_Ponton_d'Am%C3%A9court#mediaviewer/File:Chere_helice.jpg>

Acesso em 07/01/2015.

¹⁷¹ Gabriel de la Landelle também escreveu um livro chamado *Aventures et embuscades: histoire d'une colonisation au Brésil*. Paris: R. Haton, 1883.

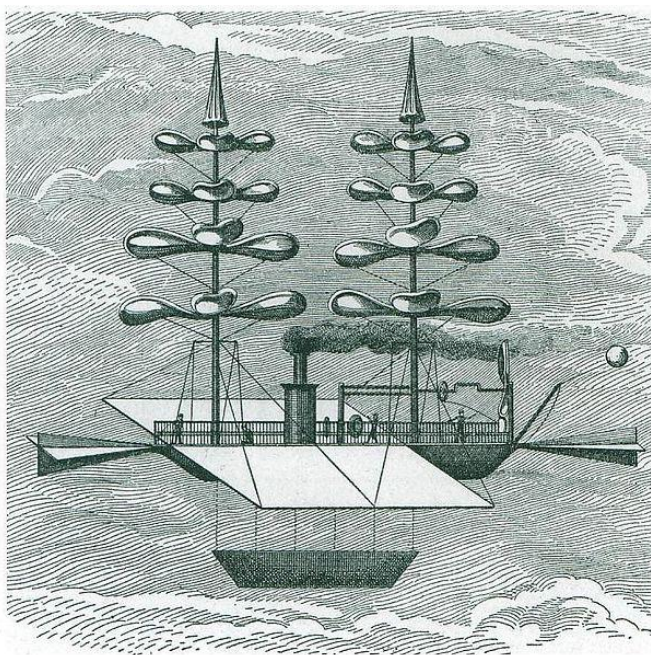


Figura 6.9 - O helicóptero imaginado por La Landelle, com 4 rotores coaxiais por eixo.
Fonte: disponível em <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Helicopter_of_de_La_Landelle.JPG>. Acesso em 12/01/2013.

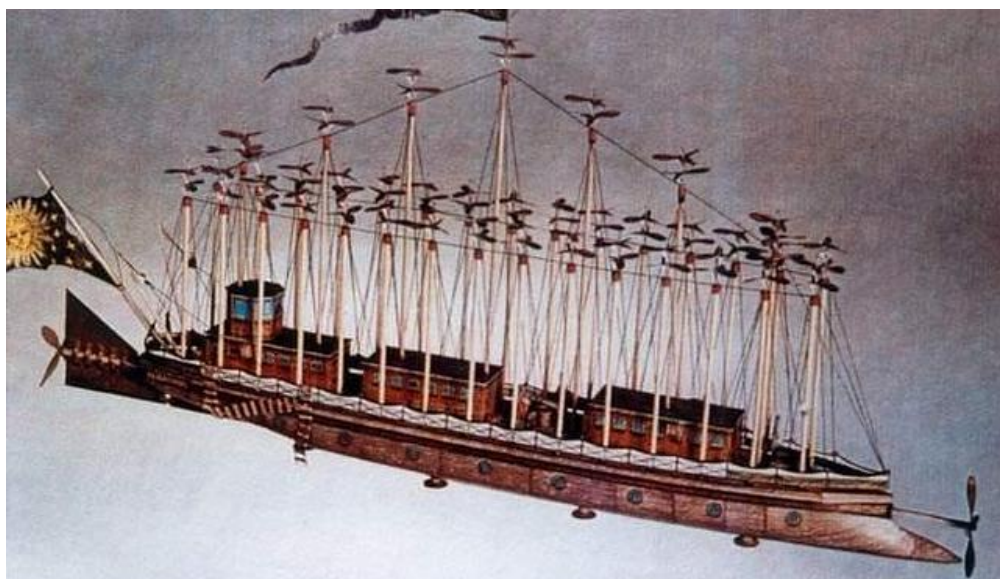


Figura 6.10 - A aeronave de Robur, o Conquistador (1886), o Albatross, um precursor no ideário do helicóptero.
Fonte: disponível em <<http://foro.astroelche.es/index.php?topic=7012.0>>. Acesso em 07/01/2014.

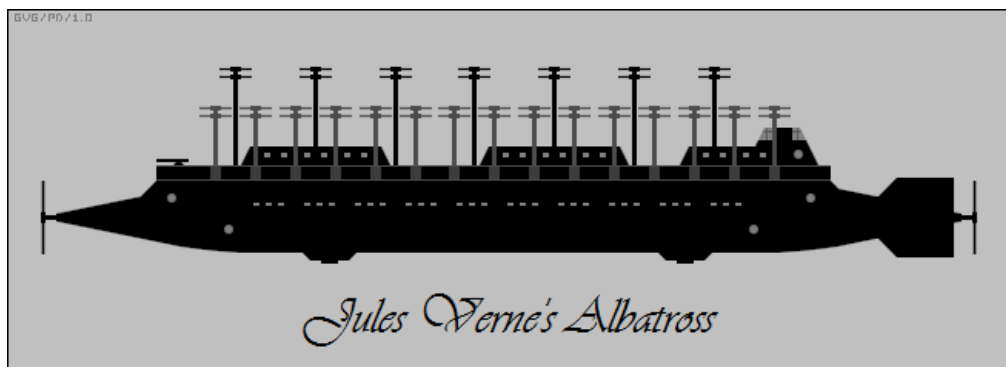


Figura 6.11 - A aeronave de Robur, o Conquistador (1886), o Albatross, um precursor no ideário do helicóptero.
 Fonte: disponível em <https://web.archive.org/web/20110629140626/http://www.vectorsite.net/avheli_1.html>.
 Acesso em 12/10/2014.

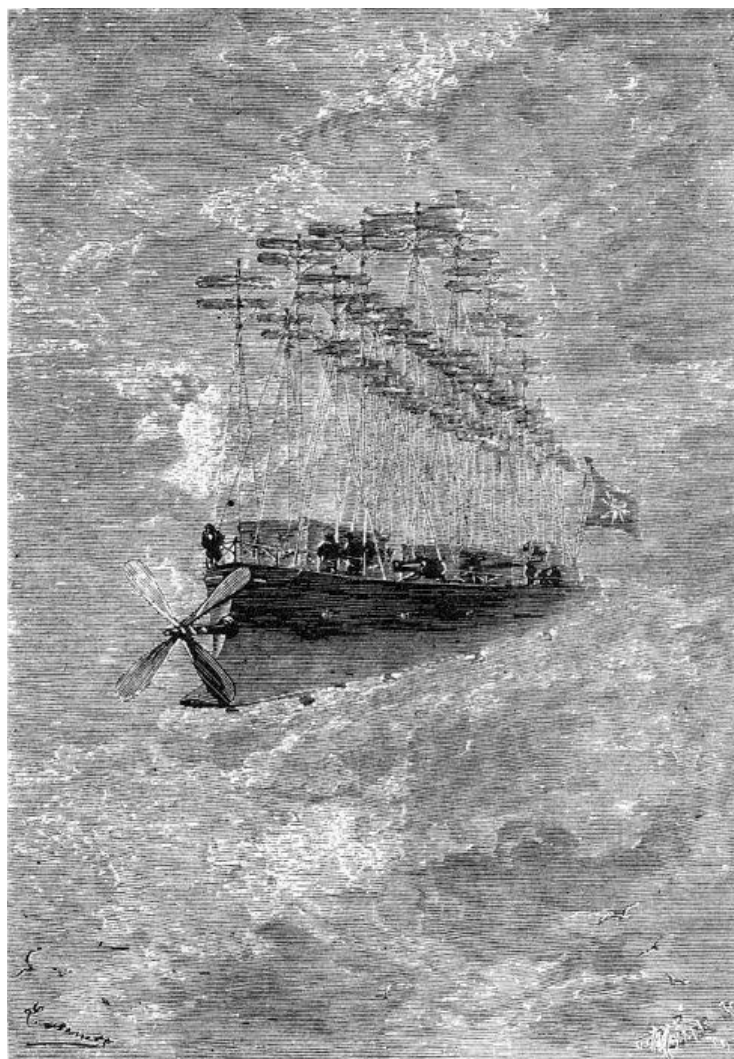


Figura 6.12 – O Albatross, em ilustração da época, por George Roux.
 Fonte: disponível em <<http://jv.gilead.org.il/rpaul/Robur%20le%20conqu%C3%A9rant/>> e
 <<http://io9.com/how-jules-verne-helped-invent-the-helicopter-461659686>>. Acesso em 07/01/2015.

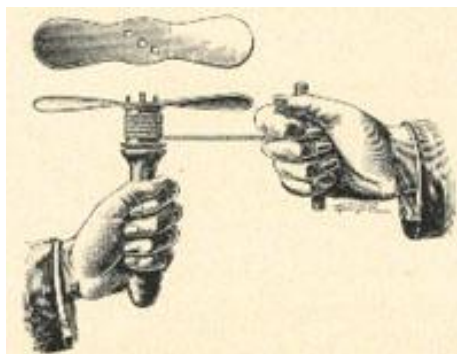


Figura 6.13 - Um Spiralifère.

Fonte: disponível em <<http://www.bretagne-aviation.fr/Pionniers/page%20landelle.htm>>. Acesso em 13/10/2014.

Gabriel de la Landelle, que era um romancista, também publicou outros livros sobre aviação, dentre os quais: *Dans les airs - Histoire élémentaire de l'aviation* (Haton, Paris, 1884). É, em grande parte, graças a este livro, que hoje conhecemos pioneiros tão importantes quanto Jean-Marie Le Bris, Eugene Bélégueic (com quem manteve correspondência) e os irmãos Louis e Félix du Temple. Este livro também serviu como fonte primária para a obra já citada de Verne - *Robur, o Conquistador*. Ponton D'Amécourt, Landelle e Júlio Verne faziam parte do círculo de amizades de Nadar.

Nadar, cujo verdadeiro nome era Félix Tournachon, foi um dos mais famosos fotógrafos do século XIX, e também um polarizador de artistas e homens da ciência, além de um grande simpatizante e incentivador do mais-pesado-que-o-ar. Ainda em 1863, ele convidou Ponton D'amécourt e Gabriel de la Landelle à sua sala de recepção, onde se encontrava reunida a elite da imprensa, da ciência e das artes para a leitura de seu famoso *Manifesto sobre Automovimento Aéreo*, o qual apareceu na imprensa no dia seguinte, tendo sido republicado e comentado por toda a Europa.¹⁷² De acordo com Chanute:

Neste manifesto, escrito com muita eloquência, *Nadar* expressou a opinião de que a principal obstrução no caminho para navegar o ar foi a atenção que havia sido dada aos balões; portanto, a fim de imitar a natureza, uma máquina voadora deve ser feita mais pesada do que o ar. Também que o meio mais seguro de sucesso foi o emprego do parafuso aéreo - "a santa hélice", como um ilustre matemático a chamou, a qual era conhecida por ser capaz de suspender um rato, e deve, portanto, à *fortiori*, ser capaz de sustentar um elefante" (tradução nossa).¹⁷³

¹⁷² CHANUTE, 1997, p.52.

¹⁷³ "In this manifesto, written with much eloquence, Nadar expressed the opinion that the principal obstruction in the way of navigating the air was the attention which had been given to balloons; that, in order to imitate nature, a flying machine must be made heavier than the air. Also that the surest means of success was the employment of

Em 1872 o Sr. Francis Herbert Wenham propôs um método para variar o passo do “parafuso”, conforme relatório da *Sociedade Aeronáutica da Grã-Bretanha* do mesmo ano. Lâminas confeccionadas em tecido possuíam uma extremidade ligada a um braço de um dispositivo em cruz firmado no eixo do parafuso. A outra extremidade do tecido era, então, fixada ao outro braço transversal, podendo ser colocada em qualquer posição sobre o eixo e fixada em tal posição, sendo este braço, então, ajustável. Para manter os dois braços transversais separados e o tecido firmemente esticado era usada uma mola helicoidal. Movendo-se o braço ajustável mais ou menos para determinado lado, conseguir-se-ia o passo desejado.¹⁷⁴

6.3 – NOVAS PROPOSTAS DE ASAS ROTATIVAS

A propulsão a vapor, muito popular na época, influenciou o ex-secretário da *Sociedade Aeronáutica Francesa*, Emmanuel Dieuaide, a projetar, em 1877, um helicóptero com rotores contra-rotativos. A caldeira ficava no solo e era ligada ao motor de dois cilindros do aparelho através de um tubo flexível. Os rotores consistiam em dois pares de palhetas quadradas, fixadas em diferentes ângulos em relação à linha de movimento, de forma a obter passos variados, girando em sentidos contrários através de engrenagens. As perdas de potência eram grandes e o projeto não foi levado adiante, mas começou a levantar importantes questões sobre a força de sustentação que poderia ser gerada por dada potência de motor.

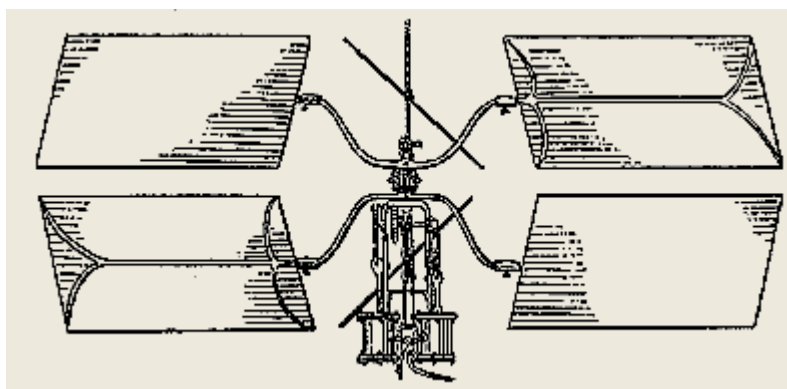


Figura 6.14 - O aparelho de Dieuaide (1877).
Fonte: CHANUTE, 1997, p. 59.

the aerial screw — "the sainted screw," as an illustrious mathematician called it, which was known to be capable of carrying up a mouse, and must, therefore, à fortiori, be able to sustain an elephant." (CHANUTE, 1997, p.53).

¹⁷⁴ CHANUTE, 1997, p. 59.

Também nesse ano, Mélikoff projetou e patenteou um helicóptero do qual não consta testemunho de experimentação, mas que era de grande originalidade. Mélikoff era engenheiro graduado na *École Nationale des Ponts et Chaussées*. Seu engenho consistia em um rotor cônico, espécie de “paraquedas parafuso” composto por “dois parabolóides hiperbólicos unidos por suas concavidades em uma espécie de cone ou pirâmide com uma base retangular em projeção” (tradução nossa).¹⁷⁵ O aparelho, com a forma de uma lança, se enroscaria no ar e desceria como um paraquedas. A potência necessária para o giro era fornecida por uma “turbina a gás”, composta de oito câmaras curvas, em cada qual o vapor do combustível (derivado de petróleo) era misturado ao ar e explodido por uma centelha elétrica. Sua expansão, realizaria trabalho, gerando movimento. Havia, também, a preocupação com a refrigeração da turbina e, por isto, gelo era levado em um reservatório próximo ao de combustível, que iria se fundindo e, com isso, refrigerando o motor. O compartimento para o operador ficava na extremidade inferior do aparelho.

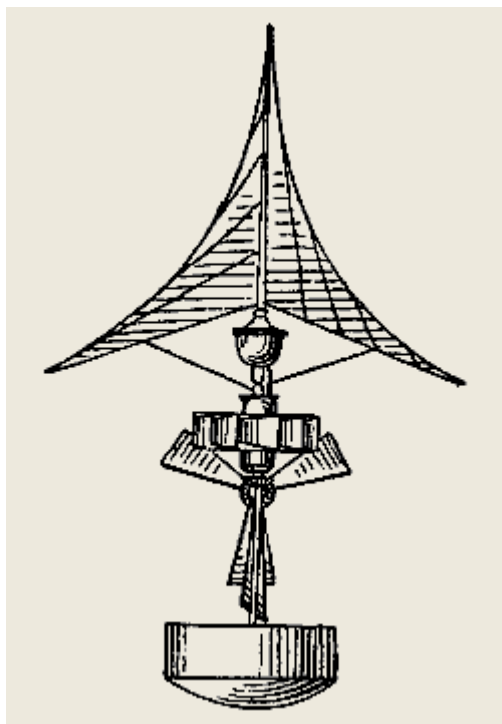


Figura 6.15 - O aparelho de Mélikoff (1877).
Fonte: Fonte: CHANUTE, 1997, p. 60.

¹⁷⁵ “[...] two hyperbolic paraboloids united by their concavities into a sort of cone or pyramid with a rectangular base in projection.” (CHANUTE, 1997, p. 60).

Seguindo os caminhos de La Landelle, outro francês, de nome Castel, propôs e construiu, em 1878, um helicóptero com oito rotores de duas pás cada, quatro em cada lado, em conjuntos contra-rotativos.¹⁷⁶ Era movido por um motor de ar comprimido, alimentado por uma mangueira de borracha, e apoiava-se sobre rodas. Pesava perto de 22 kg, tendo os rotores 1,2 m de diâmetro. Após algumas tentativas, o aparelho veio a decolar, para depois chocar-se contra uma parede, fazendo seu inventor desistir de novas experiências.¹⁷⁷ Parece que um modelo em escala menor, construído por Dandrieux entre 1878 e 1879 e movido por elásticos, teve resultado melhor.

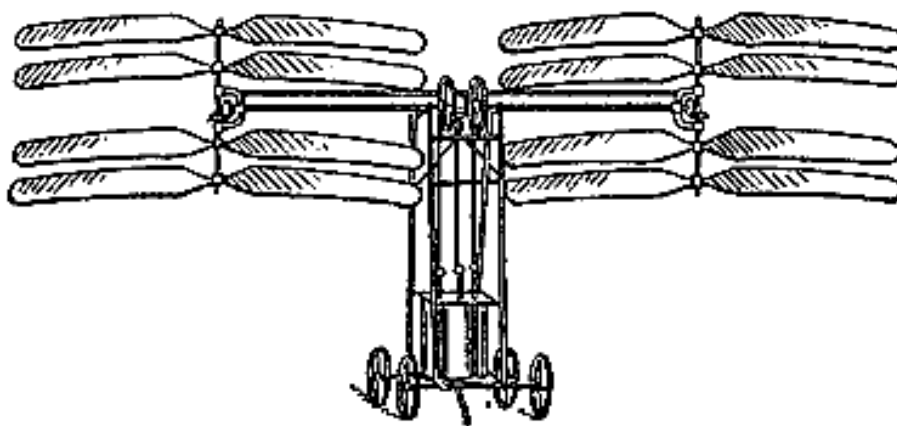


Figura 6.16 - O aparelho de Castel (1878).
Fonte: CHANUTE, 1997, p. 61.

Também em 1878, Enrico Forlanini, um engenheiro civil italiano, construiu o segundo modelo de helicóptero alimentado com seu próprio suprimento de vapor, tendo sido o primeiro o já citado modelo de Phillips. O vapor superaquecido era armazenado sob pressão (10 kg/cm²)¹⁷⁸ em um globo de metal suspenso sob os rotores e liberado por um sistema de válvulas a um motor de 0,25 hp, que propulsionava dois rotores de duas pás contra-rotativos. O aparelho de 3,5 kg subiu a 12 m, permanecendo no ar por 20 segundos.¹⁷⁹

¹⁷⁶ Sua ideia era calcular o trabalho mecânico requerido para sustentar um motor no ar (Cf. CHANUTE, 1997, p. 61).

¹⁷⁷ CHANUTE, 1997, ps. 61-62; VIVIAN, 1921, p.87.

¹⁷⁸ LAMBERMONT, 1970, p. 9.

¹⁷⁹ CHANUTE, 1997, p. 62 e 63.

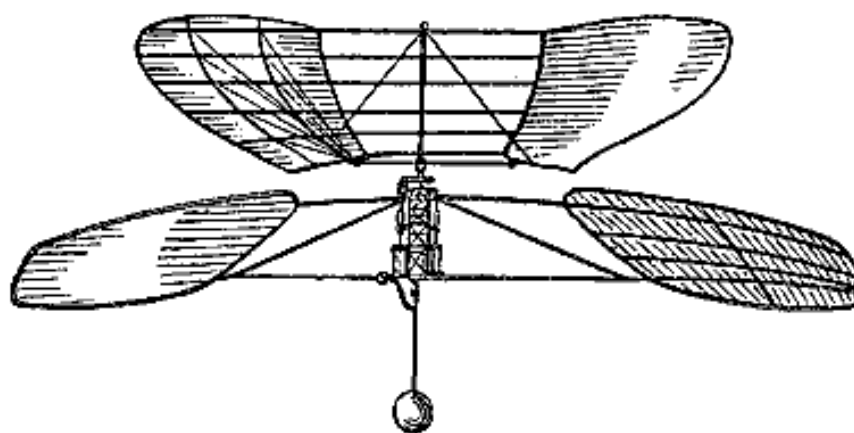
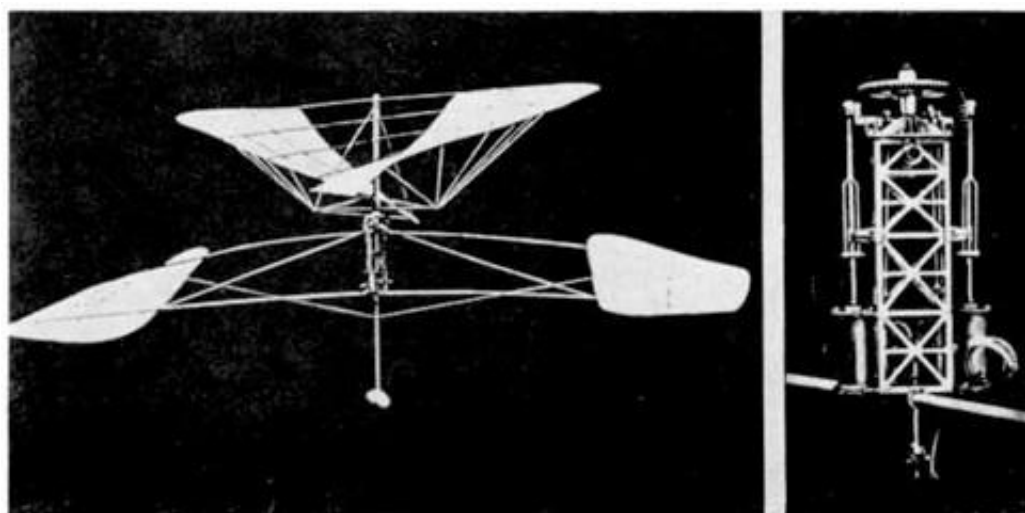


Figura 6.17 - O aparelho de Forlanini (1878).
Fonte: CHANUTE, 1997, p. 63.



FORLANINI STEAM HELICOPTER—In 1877, Enrico Forlanini of Italy built this steam-driven helicopter model which rose to 40 feet and stayed up 20 seconds. At right is close-up of steam engine, which had many ingenious features contributing to lightness.

Figura 6.18 - O aparelho de Forlanini (1878) - fotografia.
Fonte: disponível em <http://www.whirlycopter.com/heli_evolution/Forlanini.html>. Acesso em 12/10/2014.

Outros notáveis modelos de voo vertical foram construídos nessa época. Wilhelm von Achenbach, da Alemanha, construiu, em 1874, um modelo com rotor único e foi, provavelmente, o primeiro a utilizar a idéia de um rotor de cauda empurrando o aparelho para um dos lados, de forma a neutralizar a reação ao torque do rotor principal.¹⁸⁰ Posteriormente, conduziu experimentos com hélices, cujos resultados foram publicados pela NACA.¹⁸¹ Em

¹⁸⁰ LEISHMAN, 2000.

¹⁸¹ **NACA - National Advisory Committee for Aeronautics** (Comitê Consultivo Nacional para a Aeronáutica). Foi uma agência federal americana, fundada em 3 de março de 1915, para realizar, promover e institucionalizar a

1869, um helicóptero conceitual elétrico foi desenvolvido pelo russo Alexander Lodygin, usando um rotor para sustentação e uma hélice para propulsão e controle.¹⁸²

O conhecido inventor americano Thomas Edison também aventurou-se no projeto de helicópteros. Recebeu US\$1,000 do editor do New York Herald, James Gordon Bennett, Jr., a propósito de promover experimentos que visassem ao desenvolvimento da navegação aérea. Edison tentou criar um motor de combustão interna utilizando um material extremamente explosivo, o “gun cotton”, para utilizar em um protótipo de helicóptero. Tal experimento com combustível explosivo e um motor rudimentar gerou uma situação de alto risco, em face de uma explosão que feriu um de seus trabalhadores e danificou o engenho criado.¹⁸³ Apesar disto, ele chegou à conclusão de que, para o voo vertical, seria necessário um rotor de grande diâmetro e lâminas (pás) de pequena área. Concluiu, ainda, que não haveria possibilidade de sucesso no voo vertical enquanto não houvesse motores capazes de fornecer uma relação peso-potência de 1 a 2 kg/hp ou menos.¹⁸⁴ Em 1910, patentearia um complexo projeto de helicóptero à gasolina, tendo as pás do rotor, fixadas ao mastro (ou eixo do rotor), uma forma semelhante à de “pipas-caixa”.

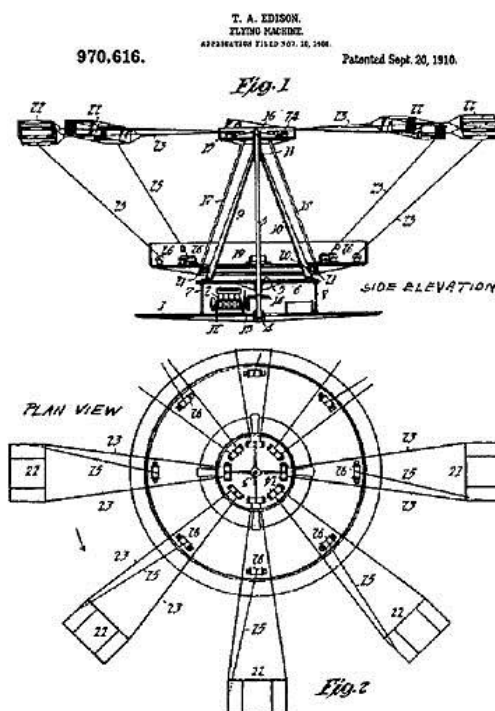


Figura 6.19 - Patente de helicóptero de Thomas Edison (1908).

Fonte: disponível em <<http://www.aerofiles.com/edison.jpg>>. Acesso em 14/12/2014.

pesquisa aeronáutica, que viria a ser encampada pela NASA - National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço) em 1958, pouco após ato do Presidente americano Dwight D. Eisenhower criando esta última (*National Aeronautics and Space Act*.).

¹⁸² LEISHMAN, 2000.

¹⁸³ PETRESCU; PETRESCU, 2012-2013, p. 73.

¹⁸⁴ JOHNSON, 1994, p. 12.

Importa observar que, no final do século XIX, começava a delinear-se o que Cayley já vaticinara. Era de suma importância priorizar a busca de uma adequada e confiável fonte de potência caso se desejasse alçar os ares, principalmente para decolagens e pousos verticais...

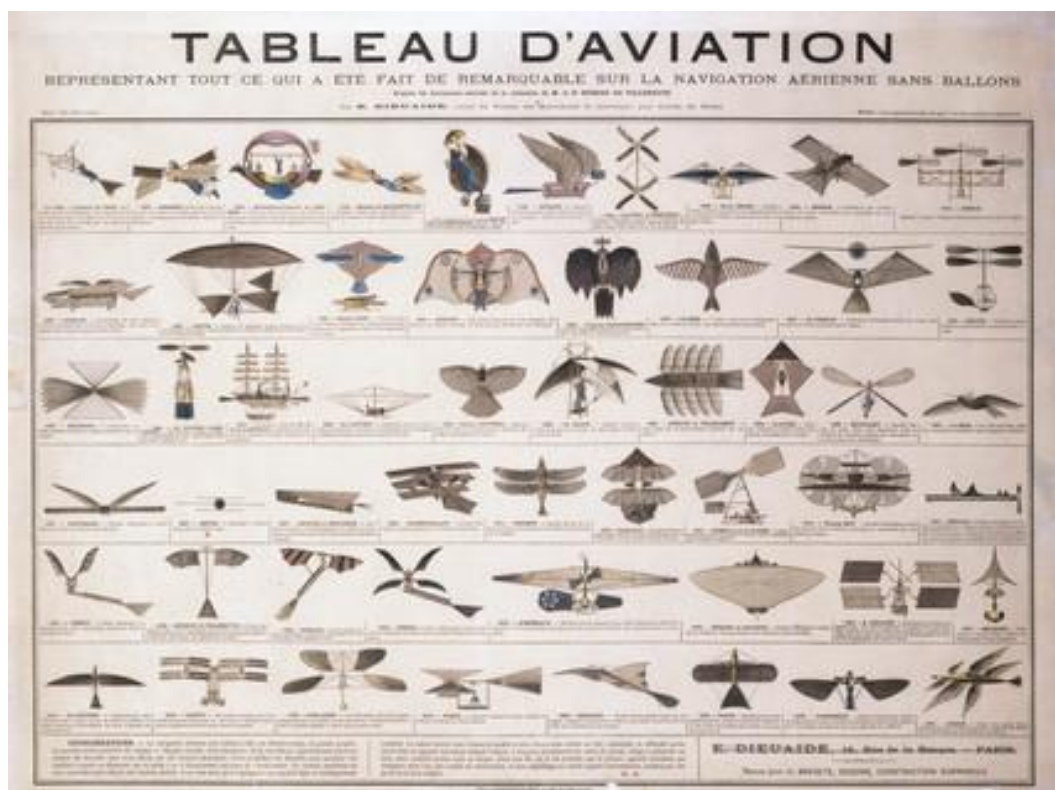


Figura 6.20 - Pôster educacional, gravado por Emmanuel Dieuaide, intitulado "*Tableau D'Aviation*", retratando várias máquinas voadoras concebidas entre 1500 e 1880. Sua própria máquina, de 1879, aparece em destaque.

Fonte: *Science Museum / Science & Society Picture Library*. Disponível em:

<<http://www.ssplprints.com/image/95760/dieuaide-e-aviation-chart-by-e-dieuaide-1880>>. Acesso em 05/03/2015.

7 - OS HELICÓPTEROS COMEÇAM A DAR CERTO

“...e agora se abatiam sobre mim, com seus largos bicos de arqueoptérix, o aeroplano de Breguet, o de Blériot, o de Esnault, e o helicóptero de Dufaux.”

Umberto Eco em *O Pêndulo de Foucault*.

7.1 - O HELICÓPTERO DUFAUX

Na mesma época em que Santos-Dumont projetava, a princípio secretamente, seu helicóptero, os suíços Armand e Henri Dufaux desenvolviam um aparelho que bem poderia ser chamado de “divisor de águas” na história da aviação de asas rotativas.

Nascidos na França, filhos de uma Baronesa e de um célebre retratista e escultor local, Henri (1879–1980) foi um pintor talentoso, que estudou em Escolas de Belas Artes em Paris, Florença e Genebra. Já Armand (1883-1941), estudou engenharia mecânica. A combinação de arte e técnica rendeu bons frutos. Em 1898, os irmãos já haviam construído seu primeiro motor à gasolina, cuja finalidade era ser adaptável a uma bicicleta, o que os levou, um ano mais tarde, a fundar a sociedade HADF (H. & A. Dufaux Fils), juntamente com François Cuillery e Edouard Demole, com sede em um subúrbio de Genebra.¹⁸⁵

Em 1900, desenvolveram um motor leve, a gasolina, de 0,25 hp, 4 tempos e 1200 rpm, para um peso de 18 kg, que podia fazer uma bicicleta atingir velocidades de até 21 km/h, e que eles patentearam em 1901.¹⁸⁶ Em 1902, iniciaram as primeiras pesquisas para um aparelho de decolagem vertical curta. Após uma série de estudos e experimentações com pipas, hélices e maquetes de aeronaves, eles decidiram iniciar a construção de um modelo de helicóptero. Este possuía dois rotores em tandem, com um diâmetro de 2 metros cada e era alimentado por um motor à gasolina de dois cilindros superpostos e duplo efeito,¹⁸⁷ com duas câmaras de combustão, uma em cada extremidade, quatro ignições separadas e refrigerado a ar, com 3,1 cv de potência (3,14 hp), girando a 1550 rpm e pesando 4,5 kg. Possuía aletas para refrigeração e um carburador ultra leve, de nível constante, em alumínio e cobre. A corrente para as ignições provinha de acumuladores, sendo distribuída por uma *bobina Dufaux* com previsão para

¹⁸⁵ Com a evolução de sua invenção do motor adaptável a bicicletas e a criação da companhia, começaram a produção em série de motocicletas. A empresa produziu a famosa *Motosacoche*, uma marca que ainda é amplamente conhecida, especialmente entre os colecionadores de motocicletas.

¹⁸⁶ Disponível em: <<http://www.pionnair-ge.com/spip1/spip.php?article34/>>. Acesso em 15/01/2015.

¹⁸⁷ Pressão agindo nas duas faces do pistão.

excessos de tensão, como as usadas em suas motocicletas. Uma pequena ventoinha com armação de madeira coberta com seda esticada, válvulas controladas e lubrificação automática, assim como um reservatório de alumínio com 1 litro de gasolina, suficiente para 20 minutos de voo, completavam essa pequena jóia da engenharia, que permitia, para o motor, uma relação peso-potência de 1,5 kg/cv (ou 1,43 kg/hp).

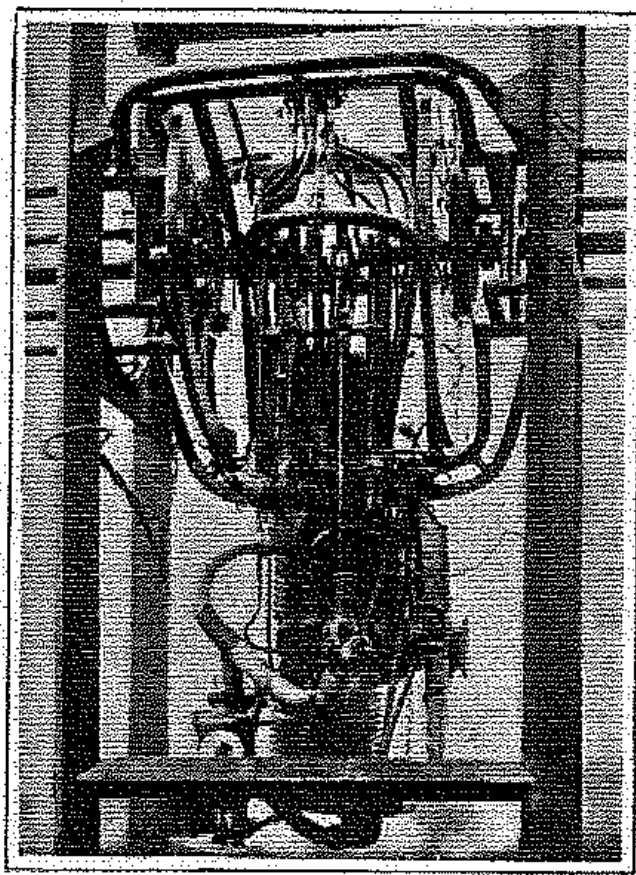


Figura 7.1 – O motor do helicóptero dos irmãos Dufaux (1905).
Fonte: SCIENTIFIC AMERICAN, 1905, p.316.

Um par de hélices, com duas pás em cada hélice, montadas em eixos verticais curtos, localizavam-se em cada extremidade de uma armadura transversal em aço, cada par girando num mesmo sentido e em sentido oposto ao par do outro extremo. Em cada par, as duas hélices eram perpendiculares. Giravam, usualmente, a 250 rpm.

O modelo, de 17 kg no total (e com capacidade para 7 kg de peso extra),¹⁸⁸ foi oficialmente apresentado ao público em Genebra entre os dias 13 e 17 de abril de 1905. Ele

¹⁸⁸ SCIENTIFIC AMERICAN, 1905, p.316.

alçou voo contido por cabos e cercado por um público atônito. Um mês depois, o helicóptero foi novamente apresentado no enorme hangar de balões do Aeroclube da França, em Saint-Cloud. Os voos foram realizados, com sucesso, por diversas vezes e testemunhados por alguns dos pioneiros da aviação, dentre os quais Santos-Dumont, que pode ter-se inspirado no modelo dos irmãos suíços para o projeto e a construção de seu helicóptero, o Santos-Dumont Nº 12, posteriormente, no mesmo ano.¹⁸⁹

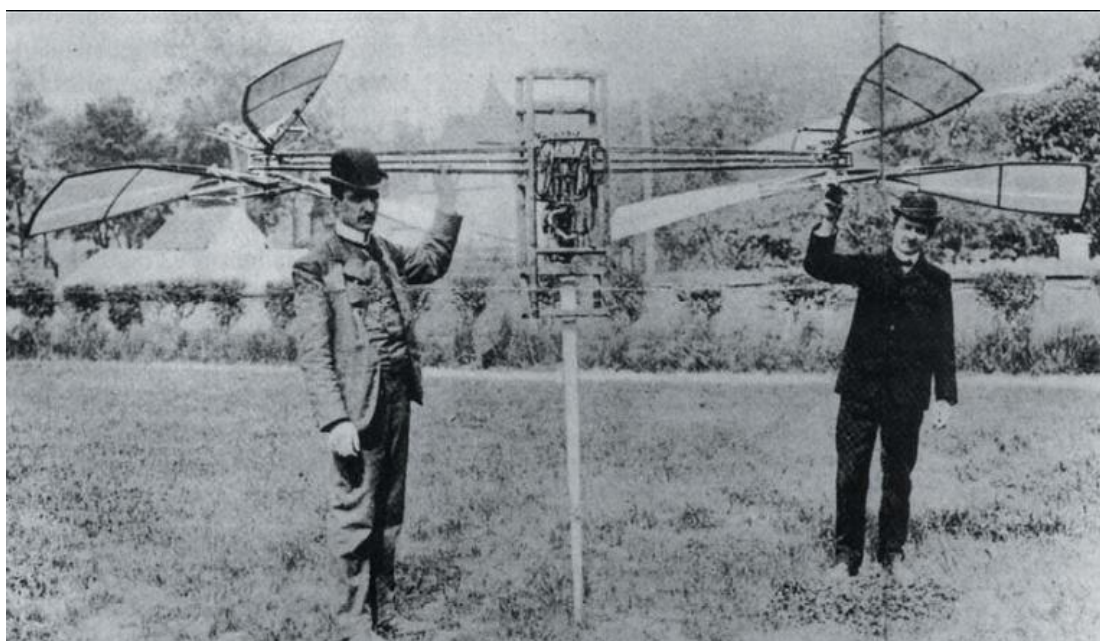


Figura 7.2 - O helicóptero dos irmãos Dufaux (1905).
Fonte: BOULET, 1982, p. 12.

O rebuliço no meio aeronáutico que tal aparelho gerou tinha fundamento: foi o primeiro helicóptero acionado por motor a explosão que obteve sucesso em levantar consigo “peso útil”, no caso seu próprio combustível, para manter-se no ar.¹⁹⁰ Outra particularidade deste helicóptero é que não foi construído apenas para decolagem vertical, possuindo uso misto, através da adaptação de um par de biplanos (“Chanutes”) nas extremidades de um eixo longitudinal (perpendicular à armadura), o que proporcionaria translação horizontal. Estes biplanos, em seda, possuíam área total de 11 m². Um leme vertical triangular, fixado na frente do aparato, completava o conjunto, que perfazia, assim, 23 kg.

¹⁸⁹ Disponível em: <<http://www.heli-archive.ch/en/people/swiss-builders/dufaux-armand-and-henri/>>. Acesso em 28/10/2014.

¹⁹⁰ MASFRAND, 1905, p. 97.

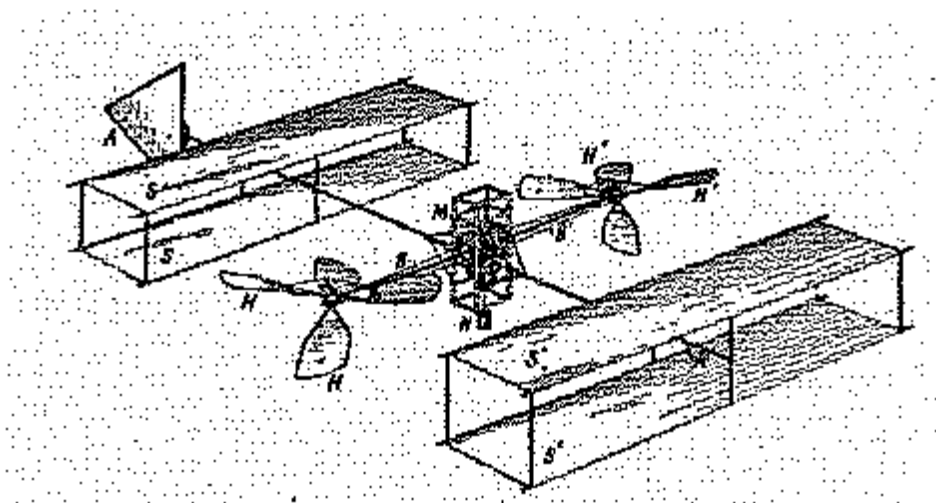


Figura 7.3 – Os biplanos (“Chanutes”) e os mecanismos de direção da máquina voadora dos Dufaux (1905).
Fonte: SCIENTIFIC AMERICAN, 1905, p. 316.

O aparelho era engenhoso. O eixo longitudinal era livre para girar em volta do transversal, de forma a manter a estabilidade. O motor, logo o centro de aplicação da força motora, ficava no cruzamento dos eixos, dentro de uma “cela”, e mais próximo da parte de vante do aparelho. Motor e peso útil manter-se-iam na vertical, por influência da gravidade. Já o eixo de rotação das hélices poderia ser inclinado em relação ao motor, podendo chegar á posição horizontal. Os irmãos ligaram o aparelho a dois cabos “sem fim” que haviam improvisado em seu galpão experimental, e o testaram: “Eles ficaram encantados quando ele subiu com pouca dificuldade e foi parado somente pelo telhado” (tradução nossa).¹⁹¹

Os irmãos Dufaux receberam uma série de elogios e o comitê de aviação do Aeroclube da França considerou que sua máquina representava um grande passo no avanço das máquinas voadoras (e do desenvolvimento do helicóptero em particular), em face do seu equilíbrio e estabilidade no ar e por sua leveza em relação à potência, enorme questão a ser resolvida pelos construtores aeronáuticos à época. O motor do aparelho Dufaux obteve, como visto, 1,5 kg/cv de relação peso-potência, um marco.

A isto seguiram-se exposições e a proposta de construção de uma aeronave em tamanho real, com 100 hp de potência. Teoricamente, a nova máquina voadora seria capaz de decolar na vertical como um helicóptero e depois translacionar, voando como um avião. Este protótipo - denominado nos dias de hoje “convertiplano”, “VTOL” (Vertical Take-Off and Landing) ou mesmo “tilt-rotor”, foi testado durante o verão de 1909, mas foi incapaz de levantar-se no ar,

¹⁹¹ “They were delighted when it rose with little difficulty and was stopped only by the roof.” (MOORE, 1934, p. 8).

tendo sido abandonado. Ainda em 1909, os irmãos fundaram a primeira empresa suíça para produção de aviões. Com o biplano Dufaux N° 4, Armand sobrevoou o lago Genebra no dia 28 de agosto de 1910, cobrindo uma distância de 64 km em 56 minutos e 5 segundos.

Apesar do sucesso, os Dufaux não continuaram a trabalhar em aviação. Em 1911, após uma produção limitada, decidiram vender sua empresa de aviação. Seu modelo de helicóptero encontra-se exposto em Paris, no *Conservatório Nacional de Artes e Ofícios*, juntamente com outras invenções históricas. Seu projeto visionário de fazer um aparelho decolar verticalmente como um helicóptero e voar horizontalmente como um avião, continuará sendo lembrado como muito ambicioso, para uma época em que nem aviões ou helicópteros voavam ainda...

7.2 – O GIROPLANO N° 1

Na França, o professor e futuro ganhador do Prêmio Nobel de medicina Charles Robert Richet, interessava-se também por aviação e construía um pequeno helicóptero não pilotado. Um de seus estudantes seria considerado um dos maiores pioneiros da aviação e amigo pessoal de Santos-Dumont. Seu nome era Louis Charles Bréguet (1880-1955). Inspirados e orientados por Richet, Louis e seu irmão Jacques, vindos de uma família de relojoeiros, construíram seu primeiro helicóptero, o Giroplano n° 1, um quadrirotor que nada mais era do que uma longa cruz construída com tubos de aço, possuindo em suas extremidades quatro lâminas duplas cobertas com tecido (“biplanos”), num total de 32 superfícies de sustentação. Possuía um motor *Antoinette* a pistão, refrigerado a água, de 8 cilindros em “V”, com potência aproximada de 46 hp. O piloto sentava-se no centro da estrutura, abaixo do motor, o qual transmitia movimento aos rotores através de correias e polias.

Louis Bréguet tinha uma boa noção de engenharia e realizou inúmeros testes com diversos formatos de aerofólios. Seu trabalho no Giroplano tinha a vantagem de ser uma aplicação do conhecimento adquirido na área. A fuselagem pesava 345 kg e o motor e o combustível pesavam 165 kg. O piloto, o Sr. Volumard, de baixa estatura, pesava apenas 68 kg, de forma que o peso bruto do aparelho para decolagem era de 578 kg. Os rotores diagonalmente opostos giravam no mesmo sentido. Os da outra diagonal giravam em sentido oposto, para evitar o efeito do torque.



Figura 7.4 - O Giroplano Bréguet-Richet nº 1 (1907).

Fonte: disponível em <<http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/breguet.html>>. Acesso em 02/12/2013.

Os experimentos foram realizados em Douai, França, entre agosto e setembro de 1907, recebendo o mesmo crédito as datas de 24 de agosto e 19 de setembro (há divergências quanto à data exata). O aparelho, com rotores de 8,1 m de diâmetro cada, elevou-se a apenas 0,60 m do solo. Numa segunda tentativa, em 29 de setembro, a máquina elevou-se a 1,5 m do solo,¹⁹² mas era instável, precisando de vários homens para segurá-la, não qualificando-se como capaz de realizar um voo livre. Altura semelhante foi obtida nos testes subsequentes. O único controle em posse do piloto era um acelerador para alterar a rotação do motor e, logo, dos rotores.¹⁹³

7.3 – O HELICÓPTERO DE CORNU

Paul Cornu (1881-1944), engenheiro francês, é considerado, em muitas bibliografias, como o projetista e construtor do primeiro helicóptero a realizar um curto voo livre tripulado, o que é controverso em face de pesquisas recentes. O certo é que, juntamente com seu pai Jules e seu irmão Jacques, foi responsável, entre 1906 e 1908, pelo desenvolvimento de protótipos para voo vertical, assim como de um helicóptero tripulado em escala real e de um modelo híbrido ou convertiplano (o “helicoplano”). Seu helicóptero, apesar de importante historicamente, era impraticável e foi posteriormente abandonado,¹⁹⁴ mas possuía soluções técnicas interessantes.

¹⁹² Disponível em: <<http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/breguet.html>>. Acesso em 02/12/2013.

¹⁹³ Disponível em: <<http://aero.umd.edu/~leishman/Aero/Breguet.pdf>>. Acesso em 05/07/2014.

¹⁹⁴ Disponível em: <<http://global.britannica.com/EBchecked/topic/138077/Paul-Cornu>>. Acesso em 29/01/2015.



Figura 7.5 – Ilustração do helicóptero de Paul Cornu (1907).

Fonte: disponível em <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/cornu.php>. Acesso em 29/01/2015.



Figura 7.6 - O helicóptero de Paul Cornu (1907) - fotografia.

Fonte: disponível em <http://farm4.static.flickr.com/3127/5855294959_83515bc45b_z.jpg>. Acesso em 29/01/2015.

Nos anos 1890, a firma *Cornu & Fils* especializou-se na fabricação de bicicletas, motocicletas e um automóvel. Após a divulgação do Prêmio Deutsch-Archdeacon, os Cornu, assim como Santos-Dumont, resolveram projetar um modelo de aeroplano e um modelo de helicóptero, acompanhando as tendências aeronáuticas da época.

Seu protótipo de helicóptero era similar ao desenvolvido pelo Coronel Charles Renard, em 1904, este com dois rotores laterais de 2,5 m de diâmetro cada, ligados a rodas de bicicleta

horizontais, acionadas por um motor de combustão interna, através de cabos e polias e que não obteve sucesso em elevar-se.¹⁹⁵



Figura 7.7 - O protótipo do Coronel Renard (1904).

Fonte: disponível em <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/renard.php>. Acesso em 29/01/2015.

Paul Cornu desenvolveu seu protótipo com um motor Buchet de um cilindro, redesenhado para que seu peso de 14 kg fosse reduzido à metade, e que fornecia uma potência de 2 hp. E entendeu alguns conceitos básicos relativos aos rotores que proveem sustentação: para uma boa eficiência, o passo de suas pás deve ser o menor possível, devido à absorção do trabalho pelo deslizamento, ou seja, pelo arrasto, o que seria compensado por um aumento em seus diâmetros.¹⁹⁶ Percebeu, intuitivamente, sem a sofisticação da teoria, que a carga alar do rotor (disk-loading) - que é o peso bruto da aeronave dividido pela área criada pelo disco do rotor - deve ser a menor possível no voo librado. Hoje sabemos que tal carga aumenta com o aumento do cone¹⁹⁷ formado pela rotação das pás, em função do aumento de peso da aeronave ou de manobras que produzam esforços capazes de aumentar o peso do aparelho (aumento do “g”).

Podemos notar, tanto no protótipo de Renard quanto no de Cornu, que as pás do rotor possuíam baixa *razão de aspecto*,¹⁹⁸ o que demonstra que o conhecimento da aerodinâmica das pás era igualmente incipiente.

¹⁹⁵ A Renard credita-se a invenção da articulação de batimento (flapping hinge), que foi redescoberta posteriormente por Juan de la Cierva, inconsciente da descoberta daquele pioneiro (FAY, 1976, p. 131).

¹⁹⁶ LEISHMAN; JOHNSON, 2007, p. 4.

¹⁹⁷ *Ângulo de cone* é o ângulo formado pelo plano de rotação das pás com sua flexão para cima.

¹⁹⁸ *Razão de aspecto* é a razão entre a envergadura e a corda da pá. Quanto maior o seu valor, maior será a sustentação e menor será o arrasto induzido e os vórtices nas pontas das pás. (JOFFILY, 2000, p. 67).

Ainda falando do protótipo, cabe ressaltar a fundamental preocupação de Cornu com o controle do voo, o que buscou através de um primitivo controle de passo das pás e com dois dispositivos de aletas móveis (ou “asas ajustáveis”) situados, cada um, sob o fluxo de ar de seu respectivo rotor, responsáveis pelo deslocamento do engenho. Cada dispositivo continha 7 aletas, num total de 14. Tais aletas, fixadas entre duas hastes e presas em dobradiças, podiam ser movidas coletivamente ou de forma diferencial através de uma alavanca, tornando possível o movimento do aparelho para adiante e para trás, sem variar a velocidade de rotação dos rotores. A velocidade de deslocamento dependeria da inclinação das aletas. Os sistemas de propulsão e controle foram patenteados pelos Cornu em maio de 1907. Em nosso entendimento, tal tecnologia constitui um primeiro esboço do que viria a ser o *controle de passo coletivo* das pás nos futuros helicópteros. É necessário frisar, porém, que esta configuração trazia outras questões aerodinâmicas em voo translacional, como a variação do fluxo de ar dos rotores sobre as aletas, afetando a estabilidade.

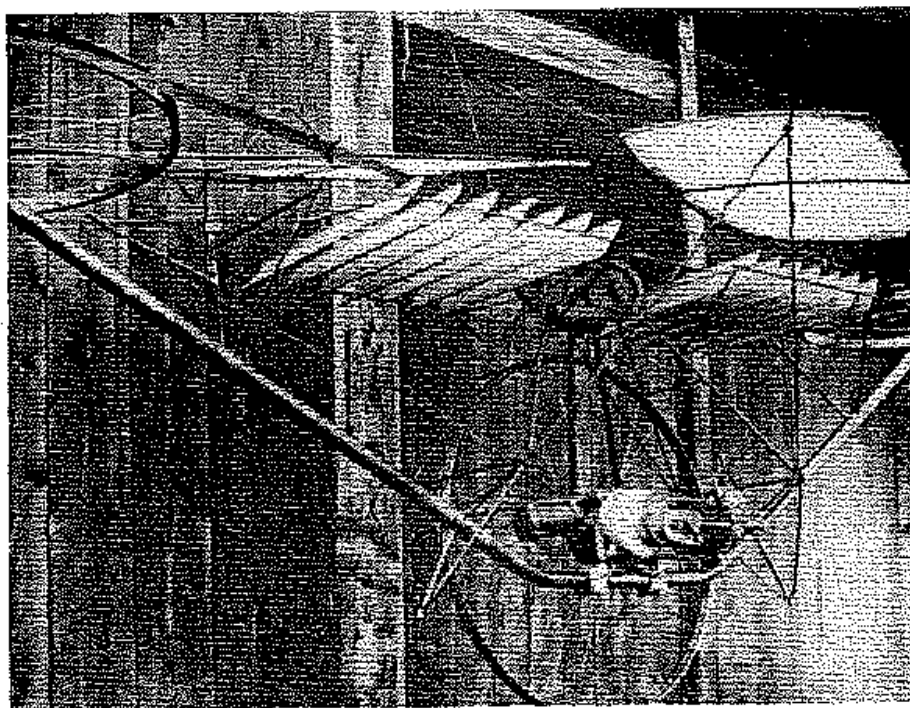


Figura 7.8 – O dispositivo de controle por aletas móveis do protótipo de Cornu.
Fonte: LEISHMAN; JOHNSON, 2007.

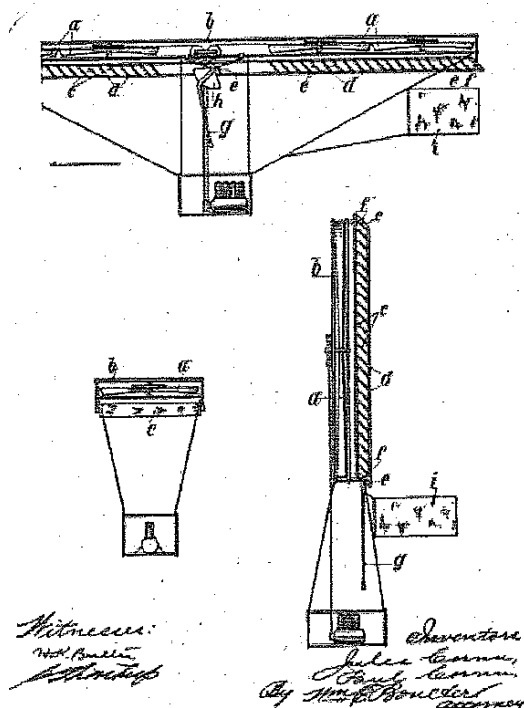


Figura 7.9 - Esboço de uma patente de Cornu, mostrando um dispositivo que poderia ser usado para controlar um helicóptero em voo, através da colocação de aletas na esteira dos rotores. (Patente Britânica N ° 19.259 de 30 de Maio de 1907)
Fonte: LEISHMAN; JOHNSON, 2007.

Em maio de 1906, o protótipo elevou-se no ar pela primeira vez e, em 4 de outubro de 1906, em Lisieux, foi feita uma demonstração pública, com sucesso, do modelo amarrado e restrito a uma trajetória circular de 25 metros de diâmetro e a uma elevação de 3 m de altura.

Com o sucesso do protótipo, Paul Cornu e seu pai patentearam, ainda em 1906, um projeto de helicóptero conceitual para transportar um piloto, com uma inovadora transmissão acionada por correia. O modelo lembrava o protótipo anterior, com o motor colocado na parte inferior do aparelho e um arranjo especial de polias cruzadas para que os rotores fossem contra-rotativos. Mas o mais importante era o sofisticado sistema de controle. Composto de aletas do tipo “veneziana” pivotadas, colocadas sob os rotores e acionadas através de várias alavancas, o arranjo proporcionava força propulsiva, caso as aletas fossem coletivamente inclinadas e um certo controle de passo, caso elas fossem acionadas de forma diferencial. Girando-as para fora do eixo longitudinal, obtinha-se o controle de giro do aparelho. Um sistema de pêndulos, preso por correntes às venezianas, criava a oscilação necessária para a alteração da posição das aletas apropriadas, variando seu ângulo de ataque e gerando o momento necessário para a recuperação da estabilidade do aparelho, em caso de inclinação em relação ao solo.

O sucesso do protótipo também incentivou Cornu a construir um helicóptero real, semelhante ao protótipo e ao projeto patenteado. Em 30 de outubro de 1906, encomendou um motor Levavasseur *Antoinette* de 24 hp e começou a projetar a aeronave. A estrutura central tinha a forma de um “V” aberto em grosso tubo de aço e “estrelas” estruturais também em aço, tudo amarrado por cabos Bowden entrecruzados para dar resistência à estrutura de 6,20 m de comprimento e 50 kg, montada sobre 4 rodas.¹⁹⁹ Cornu decidiu manter grandes rotores, ao invés de rotores menores e mais rápidos.

No centro do aparelho ficava o assento do aviador e, à sua frente, alojava-se o motor de 8 cilindros em “V” sobre o virabrequim, com injeção de combustível e refrigerado a água. O motor acionava, através de polias guia e de uma correia “sem fim” plana de 22 m, um par de hélices (ou rotores) com duas pás cada e diâmetro de 6 m, localizadas em cada extremidade da estrutura. À esquerda do piloto ficava a embreagem de esticador enrolado; à direita, a manete de ascensão, de avanço de ignição. Um sistema de polias cruzadas garantia que os rotores girassem em sentidos opostos.

Os “cubos” ou partes internas dos rotores eram, em si, grandes polias em aço de 1,80 m de diâmetro, na forma de grandes rodas de bicicleta raiadas, em cuja periferia foram instaladas as pás em tubo de aço, cobertas com seda emborrachada e esticada, que se afilavam da raiz para as extremidades. A base das pás terminava em forquilha, esta se prolongando por um tubo que atravessava uma placa de alumínio vazada na periferia do cubo – permitindo o pivoteamento das pás - até um came de fixação situado ligeiramente fora do centro do cubo (excêntrico). As pás recebiam sua inclinação ou passo através de cabos ligados ao cubo e que as conectavam próximo às suas bases e em 2/3 de seu comprimento, estes a partir do centro do cubo. Aletas nas extremidades do aparelho contribuíam para a estabilidade.

O helicóptero de Cornu apresentou diversos problemas, dentre eles a derrapagem das correias, o que se tentou resolver através da instalação de esticadores, bem como pela adição de couro à superfície das polias menores e de borracha às maiores, mas isto não resolveu o problema.²⁰⁰ Cornu tentou obter um bom balanceamento dos rotores, para evitar vibrações, colocando pesos nas extremidades das pás de modo a distribuir equitativamente as massas, algo como o que hoje fazemos ao balancear as rodas de um carro. Consta que a máquina se elevou a 30 cm do solo por cerca de 20 segundos, com seu construtor, em 17 de novembro de 1907. Outras tentativas mostraram que o invento era por demais frágil e pouco sujeito a melhorias, com sérios problemas de deslizamento nas correias e na aerodinâmica do rotor. No final, Cornu

¹⁹⁹ CORNU, 1908, p. 138-141.

²⁰⁰ LEISHMAN; JOHNSON, 2007, p. 9.

concluiu que um futuro helicóptero deveria possuir rotores menores com alta velocidade de rotação.

Por fim, o famoso Prêmio Deutsch-Archdeacon foi conquistado em 13 de janeiro de 1908 por Henry Farman, voando não um helicóptero e sim um aeroplano Voisin-Farman HF-1, que cobriu o percurso fechado de 1 km em apenas 28 segundos.

7.3 – O HELICÓPTERO DE SANTOS-DUMONT

Alberto Santos Dumont já percebera, no início de 1904, que o interesse do meio aeronáutico começava a pender seriamente para os aeroplanos, e não mais para os balões dirigíveis. Nos dois lados do Atlântico procuravam-se inovações tecnológicas e o desenvolvimentos dos materiais, e o flerte entre aerotécnica e ciência tornava-se uma relação mais séria... Além disso, os experimentadores em asas rotativas faziam valiosos progressos, com máquinas bem elaboradas. Havia, ainda, o Prêmio Deutsch-Archdeacon de 50.000 francos, correspondente a 10.000 dólares, na época.

Como vimos, o orgulhoso e talentoso aeronauta optou por enveredar não só por uma, mas pelas duas opções em destaque no momento: o aeroplano e o helicóptero, mas pouco depois abandonou a segunda opção em favor da primeira, o que viria a torná-lo vitorioso e uma lenda da aviação e da aeronáutica.

Mas por que teria Santos-Dumont abandonado seu projeto de helicóptero? Podemos provavelmente especular que o grande inventor brasileiro deparou-se com problemas técnicos insolúveis para a época ou mesmo que seguiu os conselhos de Archdeacon, o qual observou que o helicóptero, por mais interessante que fosse, não se comparava ao avião do ponto de vista de comodidade e velocidade de translação. Ele aconselhou o amigo Santos-Dumont a lançar-se na via do aeroplano, onde suas raras qualidades o conduziriam mais facilmente ao sucesso,²⁰¹ em projetos a ele mais familiares. Esta tese é partidária do primeiro motivo, sem negar ou desmerecer o segundo, uma vez que os problemas técnicos do helicóptero eram por demais complexos para a época. Suas soluções, que levariam ainda quase quarenta anos para serem delineadas, aos poucos serão vislumbradas. Por que Santos-Dumont não enfrentou tais desafios, já que solucionara tantos outros? E quais eram estes desafios?

Embora se possa tecer um paralelo entre o desenvolvimento do helicóptero e o da aeronave de asas fixas, o primeiro foi mais tumultuado em virtude da complexidade e da maior

²⁰¹ LAGRANGE, 1906, p. 28.

profundidade de conhecimento necessário antes que todas as diversas questões e variáveis aerodinâmicas e mecânicas pudessem ser entendidas, superadas ou equacionadas.

Santos-Dumont era um autodidata e um experimentador empírico. Não era muito afeito ao estudo de dados abstratos, teorias e métodos científicos e pouco pesquisou em aerodinâmica, como fizeram Langley, Chanute e os Wright. Estes últimos chegaram a desenvolver um pequeno túnel de vento para estudar os parâmetros das superfícies em geral, bem como as utilizadas em suas aeronaves. Dizia Santos-Dumont:

Nunca me dediquei seriamente ao estudo de dados abstratos. As minhas invenções foram realizadas por meio de uma série de testes, com base no bom senso e experiência.²⁰²

Podemos afirmar que Santos-Dumont deparou-se com problemas técnicos comuns a todo aquele que projeta máquinas voadoras, que são: a necessidade de minimizar os pesos estrutural e do motor, a contraposição à reação ao torque deste, a obtenção de um motor com relação peso-potência adequada, a resolução das questões de estabilidade nos três eixos e o problema das vibrações. Em um helicóptero, soma-se, ainda, a necessidade da compreensão da aerodinâmica dos rotores e do próprio voo vertical.²⁰³

A compreensão da aerodinâmica do helicóptero de Santos-Dumont passa pela estrutura do aparelho, pela eficiência aerodinâmica dos rotores e de suas pás e pelo material utilizado. Pensando nisso, Alberto se valeu de sua experiência com os dirigíveis, tentando combinar peso mínimo com alta potência. Para tal, utilizou materiais leves para a armação e o cordame, como bambu, seda e cordas de piano. Somente o motor e os mecanismos de transmissão eram necessariamente compostos de metais mais pesados. Não se tem notícia da utilização do alumínio neste projeto.²⁰⁴

²⁰² HOFFMAN, 2004, p. 230.

²⁰³ LEISHMAN, 2000.

²⁰⁴ Santos-Dumont usou o alumínio, material leve e resistente, em seus dirigíveis N° 2, N° 4 (pás do ventilador insuflador de ar no balonete compensador) e N° 5 (em juntas da armação da quilha em forma de treliça, mostrando avançado conhecimento de Estática). Propôs um uso inovador do alumínio em aviação, material caro na época e só tornado mais disponível em função dos métodos eletrolíticos recentes à época (1886). O duralumínio, liga muito resistente, criada em 1908 por Alfred Wilm, foi utilizado nos dirigíveis rígidos alemães, sendo considerado segredo de Estado (Cf. MEDEIROS, 2006a, p. 127-128).

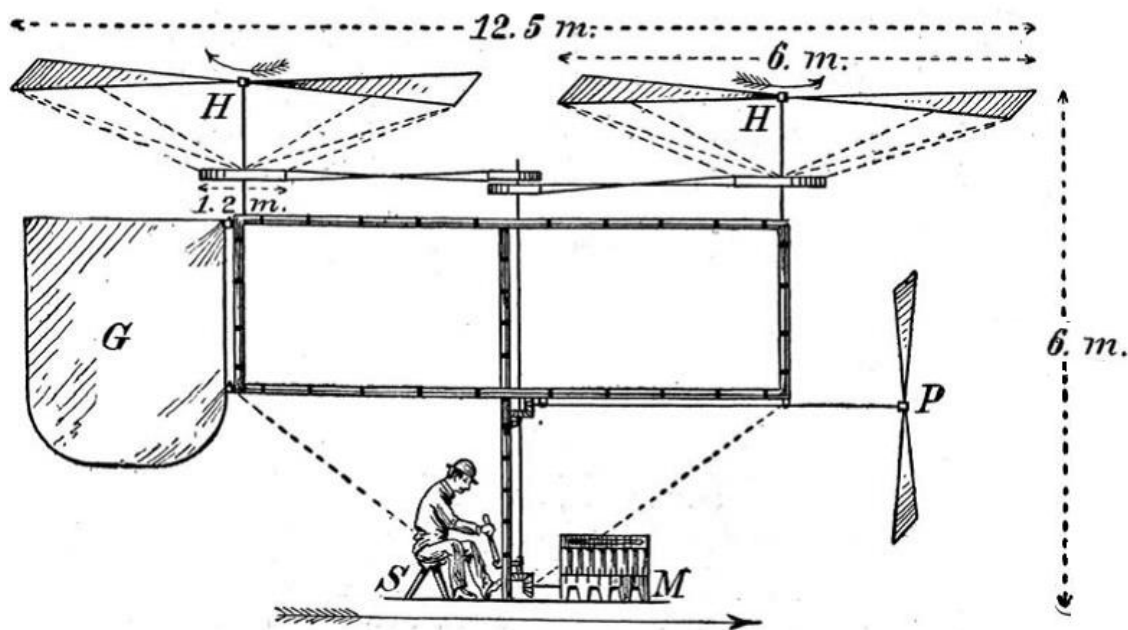


Figura 7.10 - Croqui do helicóptero de Santos-Dumont (1906).
Fonte: RAMAKERS, 1906, p. 129.

A aeronave, de 12,5 m de comprimento por 6 m de altura, possuía dois rotores (ou hélices sustentadoras),²⁰⁵ cada qual com duas pás. Cada rotor atingia inacreditáveis 6 m de diâmetro, pesando apenas 8,5 kg. Somando-se o eixo e uma polia de transmissão, o valor alcançava 13,5 kg. As pás, embora confeccionadas em armadura rígida de bambu e cana e cobertas por seda esticada e envernizada (o que lhes conferia grande leveza), conseguiam fazer com que cada rotor desenvolvesse e resistisse a um esforço de tração de 90 kg cada,²⁰⁶ quando o eixo girava entre 90 e 100 rpm sob uma potência fornecida pelo motor de 9 hp, ou seja, 10 kg de tração por hp, uma façanha para a época... Todo o aparelho, mais o avião, pesavam um pouco menos de 170 kg e Santos-Dumont concluiu erradamente, como veremos, que um motor de 18 hp, com rotores em tais moldes, sustentaria um peso de 180 kg, podendo mesmo ascender com uma pequena quantidade de peso útil. De fato, o aparelho era equipado por um motor de 24 hp de potência e refrigerado a ar, este pesando 36 kg. Teríamos uma relação peso-potência para o motor de 2 kg/hp no primeiro caso e de 1,5 kg/hp no segundo e, para todo o aparelho, próxima, respectivamente, de 10 kg/hp e de 7,5 kg/hp. É claro que o desempenho de um helicóptero depende de diversos fatores, sendo a relação peso-potência um dos mais

²⁰⁵ Para todos os efeitos, consideraremos aqui “hélice” = “rotor”, em face da literatura de época consultada. Cada hélice ou rotor possui duas pás.

²⁰⁶ RAMAKERS, 1906. p.129. Os ensaios eram feitos a um ponto fixo.

importantes, mas não o único. Depende muito das transmissões, da aerodinâmica, das curvas de potência e torque, e de outros, mas é fato que de nada adianta o motor de uma aeronave produzir centenas de “cavalos”, se o peso for muito grande.

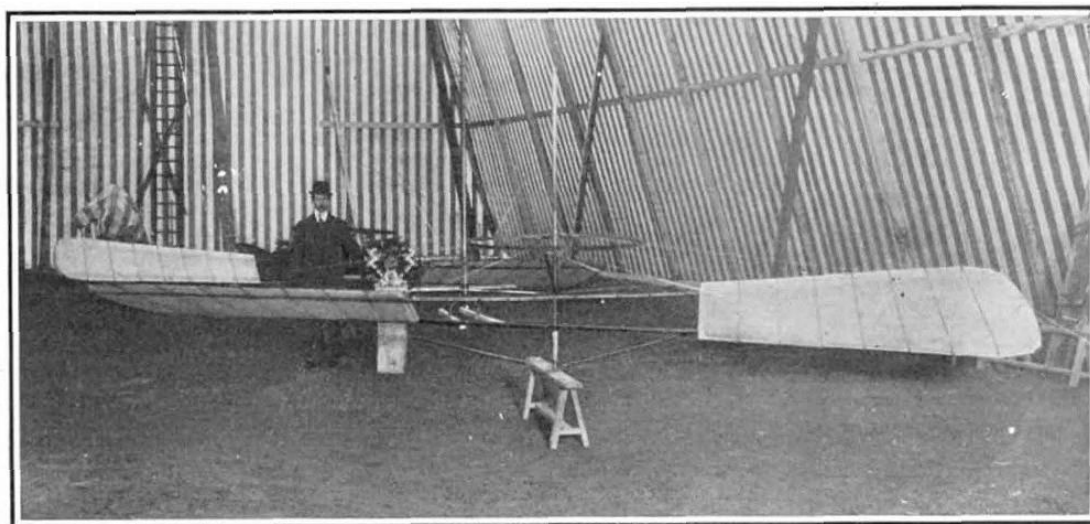


Figura 7.11 - O helicóptero de Santos-Dumont em construção.

Fonte: RAMAKERS, 1906, p. 129.

O helicóptero era formado por uma construção retangular, o *quadro*, confeccionado em bambu grosso, de alta rigidez. Das extremidades deste, subiam os dois eixos verticais dos rotores em tubos de aço, com as pás montadas nos topos dos mesmos. Do meio do quadro descia verticalmente um terceiro eixo, uma sólida haste de bambu, terminada em sua parte inferior por uma leve plataforma que suportava o motor e um selim de bicicleta, onde ficaria assentado o condutor da máquina. A superfície de cada pá era de 2 m^2 , perfazendo cada rotor 4 m^2 , num total de 8 m^2 para os dois rotores sustentadores. Os rotores giravam um em frente ao outro²⁰⁷ e em sentidos contrários, para evitar o efeito do torque ou giro que arrastaria toda a estrutura, não fossem assim construídos. Já para a translação do aparelho, foi projetada uma hélice tratora de eixo horizontal, com 2 m de diâmetro, afixada na proa da estrutura do aparelho. Para a direção foi confeccionado um grande leme traseiro, móvel em torno de um eixo horizontal, de modo a receber, nas diversas inclinações assumidas, o choque da coluna de ar descendente produzida pelo rotor de ré.

A força motriz para as hélices sustentadoras e a propulsora era fornecida por um motor Levavasseur (motores *Antoinette*), de 8 cilindros e 24-28 hp a 1800 giros. O peso, com

²⁰⁷ Como no helicóptero Dufaux.

carburador, velas, fios e cilindro com água, somados à bobina, tanque de combustível (com 2 litros de gasolina) e bateria, não excedia a 56 kg.

A transmissão do motor aos rotores se dava através de um eixo vertical, em aço, acionado diretamente, em sua extremidade inferior, pelo eixo do motor, através de engrenagens cônicas. Em sua parte superior, e de forma a imprimir giros opostos nos rotores, duas pequenas polias horizontais transmitiam seu movimento, por meio de correias de motocicleta, uma direita e outra cruzada, a duas grandes rodas de bicicleta igualmente horizontais, de 1,20 m de diâmetro, montadas no mesmo eixo das hélices e que, em seu movimento, arrastavam as pás dos rotores localizadas sobre elas, imprimindo-lhes rotações opostas. Isto porque as pás eram ligadas às rodas de bicicleta, em diversos pontos, por fios de aço, denominados “fios de treinamento”. As hélices eram montadas “loucas” sobre seus eixos não girantes - que serviam apenas como pivô – de forma a reduzir os esforços de torsão sobre os eixos, permitindo-lhes construção mais leve. Essa construção de hélices suspensas, como aponta L. Lagrange,²⁰⁸ lembra em muito o helicóptero dos irmãos Dufaux, reforçando a hipótese de que ou Santos-Dumont conhecia o seu trabalho já patenteado, ou que tal tecnologia já era compartilhada na época...

Um pinhão cônico, introduzido ou retirado de uma engrenagem, através de uma embreagem, permitia movimentar ou parar a hélice tratora, responsável pela translação do aparelho.

Uma verga horizontal em bambu, atravessando normalmente o quadro, oferecia pontos suplementares de ligação, de modo a que todo o aparelho ficasse envolvido por uma “manta” ou carcaça de cordas de piano, em aço fino e resistente, para que o conjunto pudesse resistir às tensões de deformação.

O peso da carcaça de cordas metálicas que formava a estrutura do aparelho, incluindo a plataforma destinada a suportar o motor e o experimentador, assim como os rolamentos de esferas do eixo vertical e dos eixos das hélices perfazia 17 kg. O eixo vertical e as correias de transmissão, 8 kg; os pinhões (engrenagens cônicas), 6 kg. Computando-se o peso do motor e das hélices, já descrito, bem como o do próprio Santos-Dumont, que era de 52 kg, a parte sustentadora do helicóptero não ultrapassava 166 Kg. A hélice propulsora acrescentaria a este valor 3 ou 4 kg, no máximo, de modo que poderíamos estimar o peso total do aparelho, já com seu piloto, em 170 kg.

²⁰⁸ LAGRANGE, 1906, p. 27.

8 - ANÁLISE DO HELICÓPTERO DE SANTOS-DUMONT

“Cure o passado. Viva o presente. Sonhe o futuro.”

Provérbio irlandês.

8.1 - MOTORIZAÇÃO

Até os primórdios do século XX, o problema da falta de um motor adequado às máquinas aéreas se manteve, só sendo superado pelo desenvolvimento dos motores de combustão interna (gasolina). Entretanto, só em meados dos anos 1920, é que os motores com potência suficiente e com relação peso-potência adequados para o voo vertical tornaram-se mais amplamente disponíveis. Isto já acontecera com os motores para aviões, pouco mais de uma década antes.

Enquanto os aviões requeriam motores de menor potência para o voo, os helicópteros tiveram que esperar por motores mais potentes e refinados para o seu sucesso. A chave, efetivamente, estava na relação peso-potência. Até meados da década de 1880, os motores aeronáuticos utilizados ou eram a vapor ou elétricos, como vimos no Capítulo 2. O motor a vapor exigia, além das partes móveis, uma caldeira separada, reservatório de água e condensador, o que tornava seu peso e, por conseguinte, sua relação peso-potência, proibitivos para as máquinas aéreas, principalmente as de decolagem vertical. O mesmo se dava para o motor elétrico, em face do alto peso das baterias.

Alguns projetos de motor a vapor pareciam promissores. Os britânicos William Samuel Henson e John Stringfellow gastaram um enorme tempo na busca de um motor perfeito para sua “carruagem aérea a vapor”, denominada *Ariel*, que de fato nunca voou, mas teve sua patente registrada em 1842,²⁰⁹ já guardando muitas das características do avião moderno. Ar comprimido foi tentado e abandonado. Cames, tuchos e excêntricos foram exaustivamente testados para trabalhar com válvulas deslizantes, de forma a obter os melhores resultados possíveis.²¹⁰ Era alimentado por álcool metílico e, como não possuía condensador, levava seu próprio suprimento de água, como o engenho de Forlanini. Mas, devido ao seu grande consumo de água, tornou-se impróprio para máquinas aéreas. Ainda assim, os britânicos conseguiram

²⁰⁹ O princípio de funcionamento do aparelho é explicado no pedido de patente *British patent N° 9478*, daquele ano (Cf. informação disponível em: <<http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/stringfellow.html>>. Acesso em 26/07/2014).

²¹⁰ Ibid.

obter um motor enxuto, de 7,26 kg produzindo 1 hp, ou seja, uma relação peso-potência de 7,26 kg/hp, três vezes melhor do que a existente até então.

Outro motor digno de nota foi o construído pelo mecânico Charles Manly e seu associado Stephen Balzer. Manly era assistente de Samuel Pierpoint Langley, Secretário do *Smithsonian Institution* e o motor estava destinado a equipar sua aeronave denominada *Aerodrome A*. A máquina tinha influência dos motores de automóveis Balzer, de 1894 e De Dion-Bouton, de 1900.²¹¹ Tratava-se de um espetacular motor refrigerado a água de 5 cilindros radiais com 52,4 hp, pesando apenas 94 kg, ou seja, 1,79 kg/hp, o que era um grande feito para a época. O aparelho, com dois pares de asas em formato de “V” pesava, com seu piloto, 340 kg.²¹² Porém, tanto em 7 de outubro quanto em 8 de dezembro de 1903, após ser catapultado de sobre uma balsa no Rio Potomac, o *Aerodrome* foi lançado diretamente na água, e seu piloto, o próprio Manly, saiu quase congelado, mas ileso. O insucesso do *Aerodrome* levou ao descrédito de Langley, maior autoridade aeronáutica da época, que, arrasado e desapontado, viria a morrer em 27 de fevereiro de 1906.

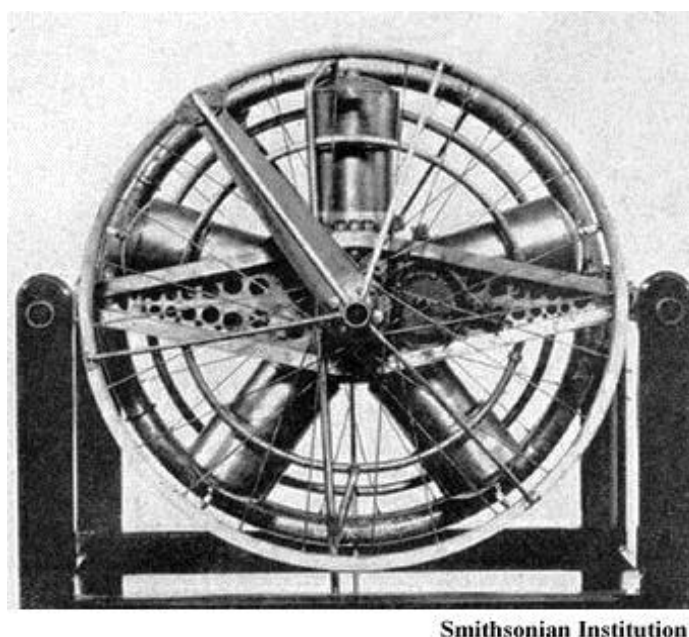


Figura 8.1 - O motor radial de Charles Manly e seu associado Stephen Balzer (1903).
Fonte: Disponível em <<http://www.flyingmachines.org/langaer.html>>. Acesso em 20/10/2013.

²¹¹ MEYER, 1971.

²¹² Site do Smithsonian National Air and Space Museum. Disponível em: <http://airandspace.si.edu/collections/artifact.cfm?object=nasm_A19180001000>. Acesso em 02/12/2014.

É sabido, também, que australiano Lawrence Hargrave, entre 1884 e 1892, fez experiências com modelos do tipo monoplano e, em 1889, construiu um motor rotativo de avião, a ar comprimido.²¹³ Outros experimentadores, através de ensaio-e-erro e observações de outras máquinas, foram desenvolvendo a tecnologia dos motores de combustão interna, primordialmente.



Figura 8.2 - Samuel Pierpoint Langley (à direita) e seu mecânico Charles Manly, este com óculos de proteção às mãos e bússola presa na perna esquerda, na balsa sobre o Rio Potomac, antes do lançamento do *Aerodrome A* (1903).

Fonte: disponível em <<http://www.flyingmachines.org/langaer.html>>. Acesso em 26/08/2015.

²¹³ Na realidade, Hargrave inventou o motor rotativo radial, que reapareceu (sem qualquer reconhecimento para ele) de forma modificada em 1908, como o motor Gnome francês (WEBB; JANEEN, 1995, p. 24).

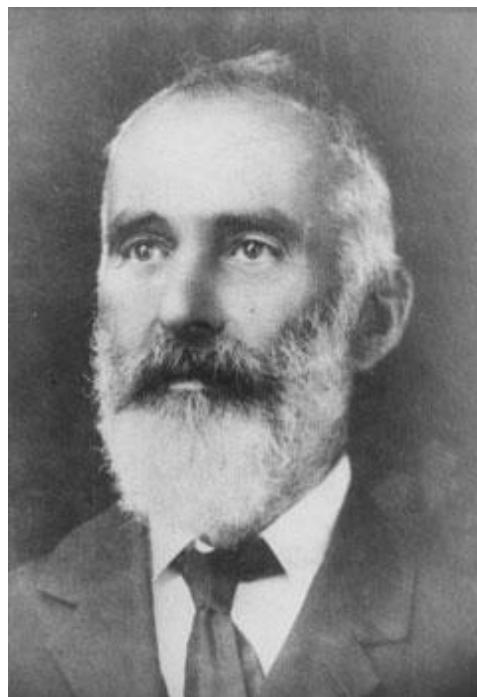


Figura 8.3 - Lawrence Hargrave (c. 1910).

Fonte: *State Library of New South Wales*. Disponível em:

<http://www.sl.nsw.gov.au/discover_collections/history_nation/aviation/hargrave/index.html>. Acesso em 10/08/2015.

Os irmãos Wright desenvolveram e construíram para o seu Flyer um motor de 12 hp, com quatro cilindros em linha e quatro tempos, com cárter em alumínio fundido. Era um motor ainda bruto, sem carburador, bomba de combustível, velas e acelerador. A alimentação por gasolina dava-se por gravidade, a partir de um pequeno tanque montado em um suporte sob a asa superior. O combustível se misturava ao ar de entrada numa câmara rasa, ao lado dos cilindros e era o calor do cárter que vaporizava a mistura, fazendo-a passar através do coletor de admissão para dentro dos cilindros. Não existia radiador com água circulando. Apenas uma jaqueta reabastecida com água a partir de um reservatório, água esta que resfriava o motor por evaporação.²¹⁴ A pouca potência gerada pelo motor face ao peso do aparelho fazia com que a aeronave precisasse de uma catapulta para decolagem.

O helicóptero de Santos-Dumont contava, como vimos, com um motor Antoinette²¹⁵ de 8 cilindros, 24-28 hp a 1800 giros. Não existem mais informações técnicas sobre o motor em

²¹⁴ Site do *Smithsonian National Air and Space Museum*. Disponível em: <<http://airandspace.si.edu/exhibitions/wright-brothers/online/fly/1903/engine.cfm>>. Acesso em 19/01/2015.

²¹⁵ A *Sociedade Antoinette* foi criada em Puteaux, um subúrbio parisiense, pelo engenheiro Léon Levavasseur e seu financiador, o Sr. Jules Gastambide, dono de uma estação geradora de energia na Argélia. Antoinette é o prenome da filha de Gastambide (CLERMONTTEL; CLERMONTTEL, 2009, p. 251). Motores Antoinette V-8

questão na rara bibliografia sobre tal aeronave, mas levando-se em conta o modelo patenteado por Levavasseur em 1902 e que, em 1904 já equipava muitas das lanchas vencedoras de competições em velocidade,²¹⁶ é quase certo que se tratava de um modelo em “V” a 90°, com cilindros confeccionados em aço e cárter em alumínio fundido, para dar leveza. A gasolina, filtrada, era injetada sob pressão e dosada precisamente para cada cilindro, com características muito avançadas para a época. Era refrigerado pela água pulverizada ao redor dos cilindros, que retirava o calor destes por evaporação.²¹⁷



Figura 8.4 - O motor Antoinette V-8, patenteado em 1902, já era bem operacional em 1904. O mostrado acima provavelmente é de 1909.

Fonte: disponível em <<http://www.wwi-models.org/Photos/Engines/Antoinette/>>. Acesso em 05/04/2015.

equiparam, como vimos, o helicóptero de Paul Cornu e Giroplano de Bréguet. Equipariam, também, o 14bis de Santos-Dumont.

²¹⁶ Este motor, modificado e com mais potência (50 hp com 86 kg) a pedido de Santos-Dumont, seria usado futuramente na aeronave 14bis. É provável que o aviador tenha tomado conhecimento do motor original nas corridas de lanchas na Côte d'Azur.

²¹⁷ Site *Cultura Aeronáutica*. Disponível em: <<http://culturaaeronautica.blogspot.com.br/2009/12/antoinette-v-8-o-motor-do-14-bis.html>>. Acesso em 19/01/2015.



Figura 8.5 - Léon Levavasseur (1863-1922).

Fonte: *Past to Present Vintage Photo Gallery*. Disponível em: <<http://www.past-to-present.com/avportrait06.cfm>>. Acesso em 19/01/2015.

8.2 – ANÁLISE DA POTÊNCIA DO MOTOR

Trabalhemos agora a potência necessária ao voo. Como as leis físicas se mantêm e as equações atuais necessárias ao cálculo do voo do helicóptero são igualmente válidas em relação ao cálculo de aparelhos pioneiros, tendo, no entanto, sido paulatinamente descobertas em momento posterior ao tema tratado, nos sentiremos à vontade em utilizar fórmulas atuais para verificar se era possível a Santos-Dumont decolar seu helicóptero.

Analisaremos o desempenho motor-rotor em voo pairado ou estacionário, que é aquele no qual um helicóptero se mantém em uma posição fixa em relação ao solo ou a um ponto exterior a ele. O voo pairado pode ser efetuado dentro do “efeito solo” ou fora dele. Estamos

no primeiro caso quando o aparelho se mantém em uma altura em relação ao solo equivalente ao raio de seu rotor principal.

O voo pairado constitui-se num dos elementos do voo vertical e, para obtê-lo, é necessário que o rotor (ou rotores) principal (ais) forneça (m) uma força de sustentação igual ao peso do aparelho com seu(s) piloto(s), combustível e carga. O turbilhonamento de ar que ocorre nas pontas das pás compromete o rendimento dos rotores e, obviamente, a sustentação total gerada por eles. Tal turbilhonamento gera vórtices continuamente, os quais, somados a outros fatores existentes, como o arrasto de fuselagem, são as principais causas da exigência de altas potências para o voo pairado. Há ainda um aumento de consumo de potência do rotor por ele acelerar grandes volumes de ar em relação ao solo, em altas velocidades.²¹⁸

A ideia de utilizar pás rotativas para transformar a energia eólica, a fim de realizar trabalho mecânico, é bem antiga. O advento dos motores inverteu o processo e possibilitou que hélices fossem usadas para propulsão. Aplicando potência às hélices, tração é produzida para utilização em navios, bombas de ar e aeronaves, dentre outras aplicações. A teoria para tais propulsores foi desenvolvida inicialmente por W. J. R. Rankine em 1865, sendo aperfeiçoada por R. E. Froude em 1889, ambos interessados em propulsão naval. A teoria desenvolvida por Rankine e Froude é comumente denominada *Teoria do Disco Atuador* ou *Teoria do Momentum*, na qual a hélice é substituída por um disco,²¹⁹ através do qual há um incremento da velocidade da massa de ar.

Tal teoria descreve o modelo matemático de um disco atuador ideal. Assumiu-se que o rotor (ou hélice) seria modelado de forma a ter espessura irrelevante, possuindo um número infinito de lâminas (pás), que induzem um constante salto ou aumento de pressão sobre a área do disco e ao longo de seu eixo de rotação. Tal modelo, com as condições de contorno impostas, permite o cálculo das forças geradas num helicóptero em “hover” ou voo pairado, onde a tração T produzida pelas pás do rotor equilibra exatamente o peso W do helicóptero. As forças aerodinâmicas são verticais, não havendo força lateral.

A ação ascendente sobre o helicóptero resulta numa reação ao ar descendente que flui através do rotor, aumentando sua velocidade, logo sua energia cinética (do ar). A perda de energia induzida da asa rotativa é exatamente a energia transferida do rotor para o ar, que é, em intensidade, igual ao valor da mudança total de sua energia cinética. A conservação do momento linear refere-se à velocidade induzida para baixo na esteira mais afastada da tração do rotor por

²¹⁸ VIEIRA; SERAPIÃO, 2003, p.167-168.

²¹⁹ GRAEBEL, 2001, p. 143-144.

unidade de fluxo de massa. A teoria leva em conta, ainda, os princípios de conservação de energia, momentum e massa, esta última relacionada ao fluxo de massa para a velocidade induzida. Isso resultará na fórmula de potência ideal que veremos adiante.²²⁰

Para calcularmos a potência do motor necessária ao voo pairado da aeronave de Santos-Dumont, utilizaremos a teoria citada, que é utilizada para explicar e calcular as forças produzidas pelo rotor principal. As hipóteses de contorno, para simplificação, desprezam o arrasto parasita provocado pelo fluxo de ar descendente, incidindo sobre a estrutura do aparelho, bem como a espessura do disco do rotor e as componentes transversais das velocidades aerodinâmicas (só as axiais são ponderadas). Considera-se, ainda, o ar um gás perfeito e incompressível.

Tal abordagem torna-se necessária, pois Santos-Dumont propôs-se a experimentar primeiramente o sistema de sustentação. Se o aparelho obtivesse êxito em elevar-se, ele tentaria mantê-lo o mais próximo possível do solo, a 2 ou 3 metros apenas, logo, dentro do chamado *efeito solo*. Em seguida, acionaria a hélice propulsora para obter um deslocamento lateral rápido o suficiente para preencher as condições do Grande-Prêmio, o qual não previa limite de tempo para o circuito fechado de 1 quilômetro a percorrer.

Em um helicóptero, a sustentação não é criada por asas fixas, como no aeroplano, mas sim pelas pás rotativas. É isso que irá permitir ao helicóptero o voo pairado ou “hover”. Neste caso, a tração T provocada pelas pás deve igualar-se ao peso W . Com o helicóptero em “hover”, há uma aceleração da massa de ar da condição de repouso, bem acima do rotor, para a condição de “esteira”, abaixo do rotor. A massa de ar deslocada pelo rotor, por sua vez, reage empurrando o rotor para cima, conforme a terceira lei de Newton. De acordo, agora com a segunda lei de Newton, a força desenvolvida pelo rotor é medida pela variação, no tempo, da quantidade de movimento da massa de ar deslocada por ele.

²²⁰ Está fora do escopo deste trabalho analisar as equações que levaram à fórmula prevista. Recomendamos o excelente trabalho de VIEIRA e SERAPIÃO, 2003, p. 167 a 173.

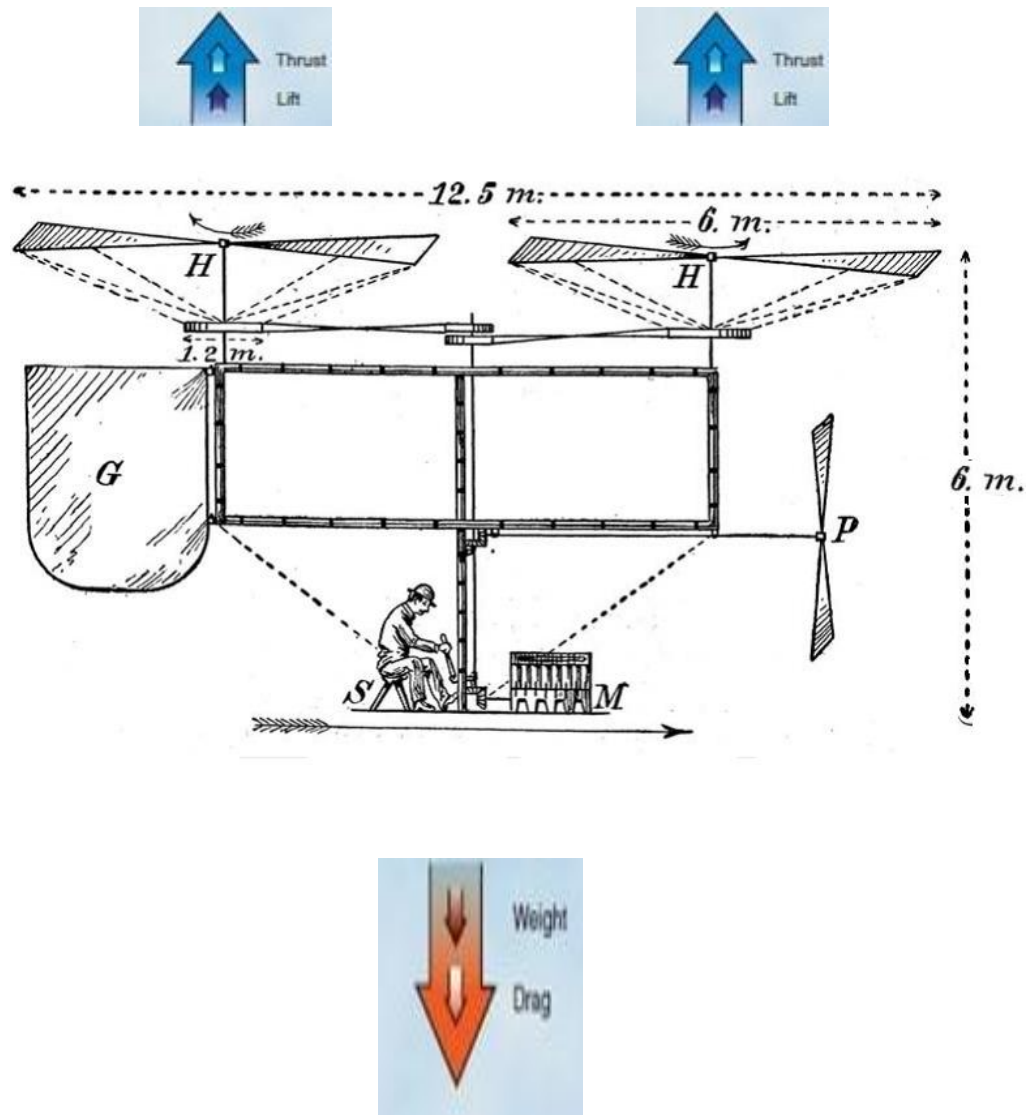


Figura 8.6 - Forças no helicóptero de Santos-Dumont em voo librado.

Tentaremos simplificar, considerando o rotor um disco atuador que utiliza a teoria da quantidade de movimento. Consideremos 4 pontos em relação ao disco: Ponto 0 infinitamente distante à esquerda e ponto 1 bem próximo à esquerda, enquanto o ponto 2 é bem próximo à direita do disco e o ponto 3 bem distante à direita. Se assumirmos que a velocidade é uniformemente distribuída sobre o disco atuador e que o fluxo é incompressível e irrotacional, podemos derivar algumas relações bem simples.²²¹

²²¹ Disponível em: <<http://www.aerostudents.com/files/aircraftPerformance2/helicopters.pdf>> Acesso em 06/06/2014 e SEDDON, 1990, p. 5-8.

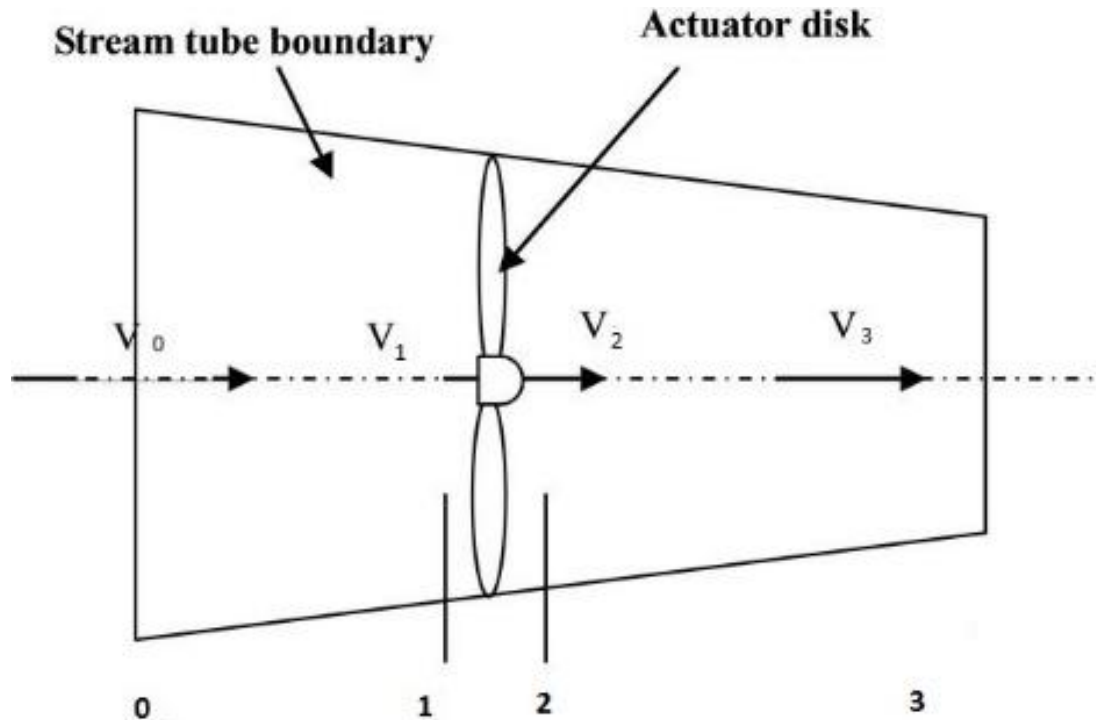


Figura 8.7 - Modelo de Disco Atuador.

Fonte: Scientific Research Publishing Inc. Disponível em:
http://file.scirp.org/Html/3-6201432_26376.htm. Acesso em 02/06/2014.

Definindo velocidade induzida $V_i = V_1 - V_0$, percebemos logo que $V_2 = V_1$ e que $V_3 - V_2 = V_i$. Logo, o incremento total de velocidade do ar é $V_3 - V_0 = 2 V_i$. Pode-se mostrar que a tração pode ser matematicamente definida por:

$$T = 2mV_i = 2\rho\pi r^2 V_i, \quad (I)$$

sendo m a massa do fluxo de ar através do disco e r o raio do disco atuador.

A pergunta agora é: qual a potência a ser fornecida pelo motor para prover o hover da aeronave? A resposta é a diferença entre a potência que sai do sistema e a que entra no mesmo. Com essa diferença, calculamos a potência ideal (ou induzida), sendo que “a energia passada para o ar no tempo é a mudança total de sua energia cinética”.²²²

$$P_{id} = e_{sai} - e_{ent} = \frac{1}{2} m (V_0 + 2 V_i)^2 - \frac{1}{2} m V_0^2 = 2mV_i(V_0 + V_i) = T (V_0 + V_i) \quad (II)$$

No “hover”, podemos considerar que a velocidade inicial V_0 (velocidade do ar bem afastado do disco) é igual a 0. Daí temos: $P_{id} = TV_i = WV_i$, sendo W o peso da aeronave. Como no hover $T = W$, a equação (I) nos dá:

²²² VIEIRA; SERAPIÃO, 2003, p.170.

$$V_i = \sqrt{\frac{W}{2 \rho A}} \quad \text{ou} \quad V_i = \sqrt{\frac{W}{2 \rho \Pi r^2}}$$

Sendo Πr^2 é a área A do disco. A potência ideal para helicópteros seria dada, então, por:

$$P_i = TV_i = W V_i = W \sqrt{\frac{W}{2 \rho \Pi r^2}}$$

De modo que, para reduzir a potência ideal, necessitamos diminuir o peso ou aumentar as dimensões do rotor, ou ainda, voar em menores altitudes.

Como a potência ideal não é igual à potência real transmitida ao(s) rotor(es), devido às perdas por motivos diversos, criou-se uma entidade chamada *Figura de Mérito* (FM) que combina todas as perdas e é função da geometria do rotor/helicóptero, traduzindo-se na relação entre as duas potências descritas requeridas para o “hover”. Os rotores pioneiros tinham performance aerodinâmica muito pobre e suas figuras de mérito não ultrapassavam a ordem de 0,5 (50%).²²³ Para os helicópteros atuais, a figura de mérito é computada na ordem de 0,6.²²⁴ Algumas referências citam 0,7.²²⁵

$$FM = \frac{P_i}{P_{real}}$$

Consideraremos, para o helicóptero de Santos-Dumont, $FM = 0,5$. Verifiquemos a relação peso-potência empregada. Assumindo que cada rotor sustente metade do peso total da aeronave, a teoria do momentum nos fornece a potência mínima possível (ou ideal) requerida para impulsionar ambos os rotores em voo livre do solo.

Sendo W o peso da aeronave, em libras, A a área varrida por cada rotor (“área do disco”) e ρ a densidade do ar ao nível do mar, a potência ideal, no caso de um rotor, seria dada pela fórmula:

$$P_{id} = W \sqrt{\frac{W}{2 \rho \Pi r^2}}$$

²²³ LEISHMAN, 2000.

²²⁴ VIEIRA; SERAPIÃO, 2003, p. 175.

²²⁵ Disponível em: <<http://www.aerostudents.com/files/aircraftPerformance2/helicopters.pdf>>. Acesso em 04/03/2014.

Como são dois os rotores, a potência ideal para cada rotor (considerando-se a área do disco dos mesmos) seria:

$$P_{id \text{ cada rotor}} = \frac{W}{2} \sqrt{\frac{\frac{W}{2}}{2 \rho A}} = \left(\frac{\left(\frac{W}{2}\right)^{3/2}}{\sqrt{2\rho A}} \right)$$

Sendo a potência ideal para os dois rotores:

$$P_{id} = 2 \left(\frac{\left(\frac{W}{2}\right)^{3/2}}{\sqrt{2\rho A}} \right) \quad (\text{III})$$

Consultando os pesos descritos para projeto de Santos-Dumont,²²⁶ observamos:

- cada hélice = 8,5 kg, mais eixo e polia de transmissão = 13,5 kg (x 2) = 27 kg
- motor + carburador + velas + fios + cilindro com água = 51 kg
- bobina + bateria + tanque de combustível de 2 litros = 5 kg
- estrutura do aparelho, aí incluídas a carcaça de cordas de piano e a plataforma de sustentação do motor e do condutor, somada aos rolamentos de bilhas do eixo vertical e dos eixos das hélices = 17 kg
- eixo vertical e correias de transmissão = 8 kg
- pinhões = 6 kg
- peso de Santos- Dumont = 52 kg
- hélice propulsora = 4 kg

Peso Total = 170 kg

Diâmetro do disco = 6 m, raio r = 3 m

Área do disco = $\Pi R^2 = 28,26 \text{ m}^2$

Assumiremos, ainda:

Densidade do ar ao nível do mar e a 15° C = $1,225 \text{ kg/m}^3$

²²⁶ LAGRANGE, 1906, p. 26-28.

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

- Cálculo da Potência Ideal para o helicóptero de Santos-Dumont:

Utilizando a fórmula (III), obtemos:

$$P_i = 2 \left(\frac{\left(\frac{1667,7}{2} \right)^{3/2}}{\sqrt{2 \cdot 1,225 \cdot 28,26}} \right) = 5787,51 \text{ Watts},$$

o que, convertido, nos dará, aproximadamente 7,76 hp ou 7,87 cv. Mas a potência ideal não é a potência real requerida do motor. Sempre haverá perdas. Considerando-se uma baixa expectativa de eficiência para o rotor de 50% (Figura de Mérito = 0,5), em face da baixa razão de aspecto das pás²²⁷, teremos uma potência aerodinâmica para ambos os rotores de:

$$P_{aero} = \frac{P_i}{FM}$$

$$\text{Logo } P_{aero} = 7,76/0,5 = 15,52 \text{ hp}.$$

Não devemos esquecer as perdas de potência devidas à baixa eficiência das correias e polias à época. Se estimarmos, para nossos cálculos, uma eficiência na transmissão de $\eta = 0.75$ (a transmissão por correias nunca é eficiente como a engrenada, devido a certa quantidade de deslizamento ou derrapagem)²²⁸, teremos a necessidade de uma potência real ou no eixo (para os dois rotores) de:

$$P_{real} = \frac{15,52}{0,75} = 20,69 \text{ hp} = 20,98 \text{ cv}.$$

Como são dois os rotores, a tração gerada por cada um equilibrará a metade do peso total do aparelho.

Sabemos que o motor que Santos-Dumont empregava possuía potência de 24-28 hp, o que o deixaria confortável quanto à potência requerida para a sustentação do aparelho. Se

²²⁷ Comprimento da pá dividido pela corda do perfil.

²²⁸ LEISHMAN; JOHNSON, 2007, p. 5.

considerarmos a eficiência um pouco maior (visto que a eficiência atual de transmissão por correias é de cerca de 97%)²²⁹, teríamos, para $\eta = 0.80$, por exemplo, $P_{real} = 19,4 \text{ hp} = 19,67 \text{ cv}$. Como o aeronauta pretendia, inicialmente, manter-se a 2 ou 3 metros do solo e, portanto, dentro do “efeito solo”, a literatura atual sobre o tema indica uma redução entre 15% e 20% da potência requerida para o voo pairado (“hover”) em relação ao voo fora deste efeito. Portanto, considerando as menores percentagens, dentre as acima, Santos-Dumont necessitaria de uma potência próxima de 17,59 hp para manter sua aeronave dentro do “efeito solo”.

Sabemos que, antes de 1900, Rankine e Froude já haviam concebido uma teoria geral das hélices e rotores, utilizando a *Teoria do Momentum*, gerando, em sua esteira, uma rápida evolução na teoria aerodinâmica básica. Por exemplo, uma teoria híbrida *momentum-elemento da pá* foi desenvolvida, por volta de 1900, pelo polonês Stephan K. Drzewiecky. Resta saber se Santos-Dumont conhecia a *Teoria do Disco Atuador* ou *Teoria do Momentum* (Quantidade de Movimento), para um cálculo tão preciso da potência ideal ou se isso foi fruto apenas de sua experiência empírica anterior e de trocas de informações com outros aeronautas e construtores. Acreditamos na segunda hipótese.

Um motor que forneça potência suficiente para voar é apenas uma parte do problema do desenvolvimento de um helicóptero bem sucedido. Existem outras questões que, na época de Santos-Dumont, eram, em nosso entender, mais críticas, tais como o controle do voo e sua estabilidade e que envolviam, em seu cerne, o conhecimento da aerodinâmica do rotor, ainda em fase inicial de descobertas.

²²⁹ BIM, 2012, Cap. 14 item 14.3.3.

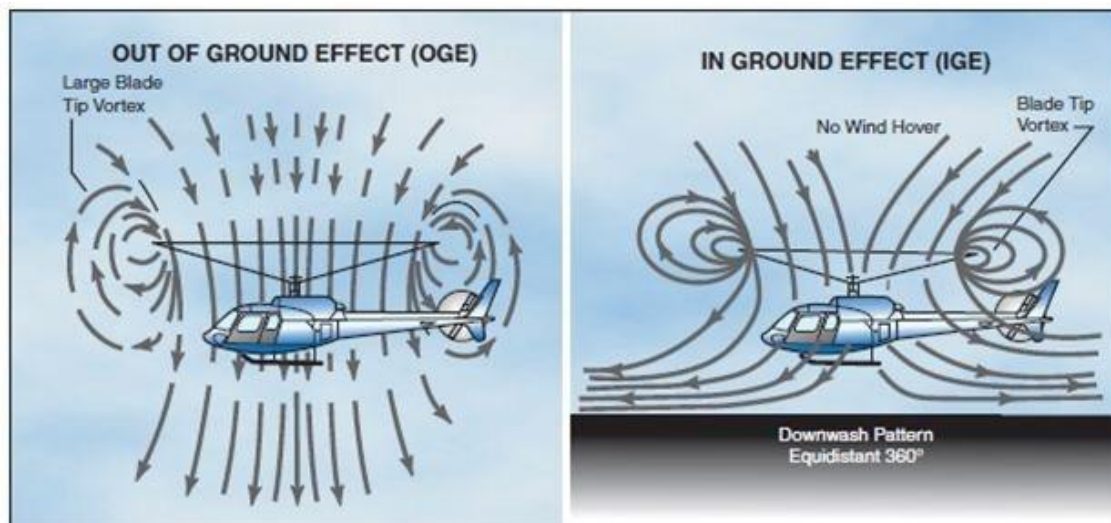


Figura 8.8 - Padrões de circulação do ar em voo librado fora e dentro do “efeito solo”.

Fonte: Rotorcraft Flying Handbook, 2000, p. 3-3.

8.3 - CONTRAPONDO A AÇÃO DO TORQUE DO ROTOR

O helicóptero de Santos-Dumont incorporava uma solução para contrapor o efeito torque do motor, ainda usada em nossos dias. Seu projeto, como vimos, contava com dois rotores em linha (tandem) contra-rotativos. Tal solução foi, provavelmente, inspirada no helicóptero dos irmãos Dufaux e no protótipo do Coronel Charles Renard. Antes, era mais comum os dois rotores serem projetados para acionamento pelo mesmo eixo e, por isto, chamados de coaxiais.

Rotores de helicóptero dependem da rotação de suas pás para produzir o vento relativo que desenvolve a resultante aerodinâmica necessária para o voo, vento este que é oposto ao sentido de rotação do rotor. Devido à sua rotação e peso, o sistema do rotor é sujeito às forças e momentos particulares de todas as massas em rotação. Uma das forças produzidas é a centrífuga (inércia),²³⁰ que tende a puxar as pás diretamente para fora do centro do rotor (cubo), onde estão ligadas, e sua intensidade depende da velocidade de giro das pás. A força centrífuga dá às pás do rotor a rigidez necessária para suportar o peso do aparelho e determina sua RPM máxima em função das cargas estruturais. Ela é contrabalançada pela força centrípeta, que proporciona o equilíbrio necessário à manutenção de um certo raio (da pá) em relação ao eixo do rotor. As três principais forças agindo na pá de um rotor são as forças de sustentação, de

²³⁰ Força que tende a fazer corpos rotativos se afastarem do centro de rotação.

arrasto e centrífuga. A força de sustentação (L) é a força para cima que surge da interação entre o aerofólio (e sua geometria) e a massa de ar, sendo a força de arrasto (D) a resistência que o ar impõe ao movimento do aerofólio.

As forças de sustentação (L) e arrasto (D) são dadas pelas fórmulas a seguir:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_L$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_D$$

Onde:

ρ é a massa específica do ar, função da pressão atmosférica e da temperatura ambiente;

V é a velocidade em relação à massa de ar;

S é a área de referência;

C_L é o coeficiente de sustentação e C_D o coeficiente de arrasto.

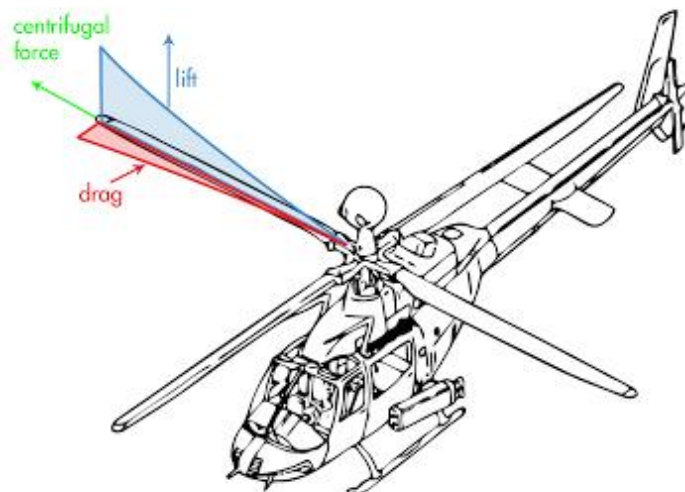


Figura 8.9 – Forças agindo na pá de um rotor.

Fonte: disponível em <<http://cesarvandevelde-constructieleer.blogspot.com.br/2011/01/forces-acting-on-helicopter.html>>. Acesso em 25/01/2015.

Quando uma decolagem vertical é feita, as duas maiores forças em ação são a centrífuga, agindo para fora perpendicularmente ao eixo do rotor, e a sustentação, agindo para cima, paralelamente ao eixo do rotor. O resultado destas duas forças sobre as pás é que elas passam a assumir um caminho cônico em vez de permanecer no plano perpendicular ao mastro. O

aumento do cone dependerá da RPM, do peso bruto e das variações de força G experimentadas durante o voo. O aumento do cone acarretará em diminuição da área de disco, reduzindo a força de sustentação. A uma RPM constante dos rotores, o cone aumentaria por aumento de peso ou de força G. Se houvesse mecanismo de variação cíclica de *passo* (aí no caso em interpretação similar a *ângulo de ataque*) - caso o plano do rotor ou dos rotores pudesse ser intencionalmente modificado -, isto implicaria em cones assimétricos. Por fim, caso sejam mantidos o peso e a força G, qualquer diminuição da potência do motor causaria aumento do cone e consequente diminuição da sustentação.

Ora, Santos-Dumont era um ótimo experimentador e não foi inocente quanto a esta questão. Ao montar os rotores ou hélices sobre eixos não girantes, que serviam apenas como pivô, e amarrando em vários pontos, com fios de aço, as pás a rodas de bicicleta, buscou reduzir o efeito da força centrífuga nos engates das pás, evitando que fossem arrancadas e proporcionando-lhes maior flexibilidade. Porém, podemos apenas supor, em face da carência de dados, que a vantagem acima obtida oferecia, por outro lado, uma extrema fragilidade do conjunto a um efeito de cone elevado ou a variações de plano do rotor, o que ocasionaria esforços desiguais no cabeamento descrito e nas frágeis pás de bambu e cana, cobertas de seda envernizada. Isto sem levar em conta qualquer variação aleatória de potência do motor, muito comum na época e as alterações de força G porventura existentes, devidas à inclinação do aparelho face aos ventos.

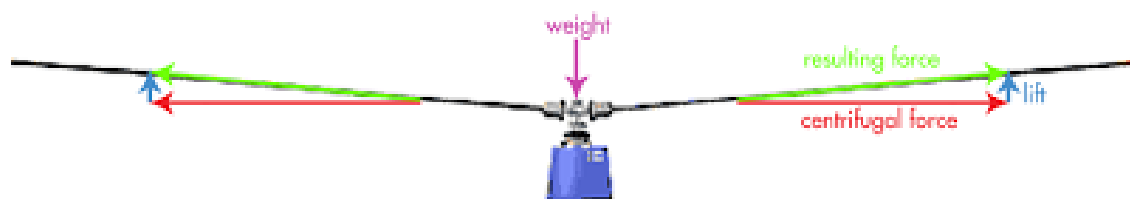


Figura 8.10 – Forças atuantes em um rotor de helicóptero.

Fonte: disponível em <<http://cesarvandevelde-constructieleer.blogspot.com.br/2011/01/forces-acting-on-helicopter.html>>. Acesso em 27/01/2015.

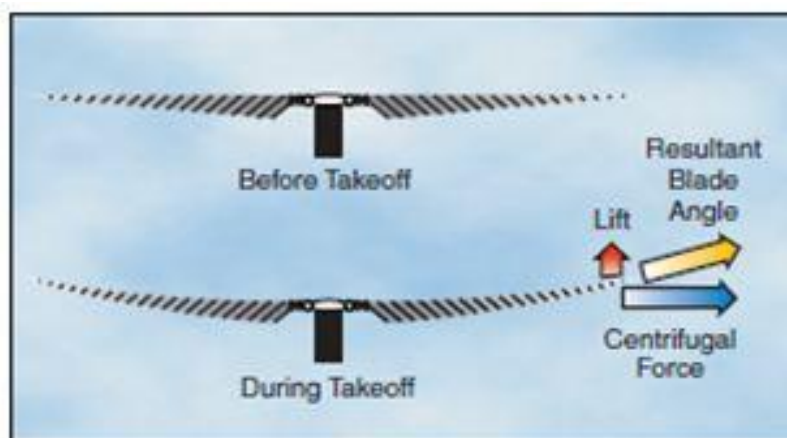


Figure 3-2: Rotor blade coning occurs as the rotor blades begin to develop lift. In semi-rigid and rigid rotor systems, coning results in blade bending. In an articulated rotor system, the blades assume an upward angle through movement about the flapping hinges.

Figura 8.11 – Efeito cone nas pás do rotor.

Fonte: *Federal Aviation Administration*. Disponível em:

<https://www.faa.gov/gslac/ALC/course_content.aspx?cID=104&sID=449&preview=true>. Acesso em 27/01/2015.



Figura 8.12 - Resultante da sustentação e da força centrífuga.

Fonte: disponível em <http://www.copters.com/aero/centrifugal_force.html>. Acesso em 30/01/2015.

Acrescente-se que esforços desiguais nas pás poderiam ser transmitidos às rodas de bicicleta pelos “fios de treinamento”, afetando sua velocidade de rotação e, portanto, a compensação do torque, com reflexos na frágil estrutura do aparelho, mesmo no caso hipotético de não haver deslizamento (logo perdas) nas correias. Mas sabemos que tais perdas eram

consideráveis na época. Os esforços citados, em função de forças aerodinâmicas, poderiam ainda acarretar danos na frágil estrutura (armadura) de bambu e cana das pás dos rotores, em face de torções e tensões de cisalhamento, por sua forma de amarração. Não há, no projeto, mecanismo para alteração de passo cíclico das pás nem previsão para a precessão giroscópica.

A conclusão parcial a que chegamos é que a estrutura do engenho não suportaria os esforços decorrentes do torque e suas variações.

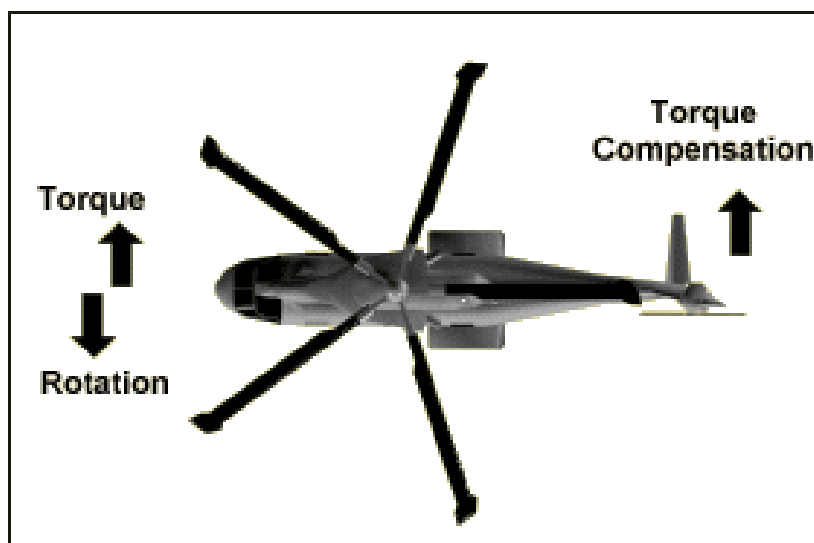


Figura 8.13 – O torque e sua compensação.

Fonte: disponível em <<http://www.helis.com/howflies/prflight.php>>. Acesso em 17/11/14.

8.4 - A DISSIMETRIA DE SUSTENTAÇÃO E A PRECESSÃO GIROSCÓPICA

Os experimentos com aeronaves de asas rotativas mostravam que elas eram instáveis e de difícil controle. Existia o problema dos enormes torques gerados pelas grandes pás de seus rotores, bem como a busca ainda incipiente de comandos e superfícies de controle a eles vinculadas, que oferecessem aos pilotos a possibilidade de “domar” o aparelho. Os construtores colecionavam mais insucessos do que vitórias, e isto perdurou pelos vinte primeiros anos do século XX. Por um período, pareceu que a resposta seria o *autogiro*,²³¹ criado pelo espanhol

²³¹ O que aconteceu, de fato, foi que as soluções adotadas para o autogiro serviram de base, uma verdadeira bancada de testes, para o desenvolvimento do helicóptero moderno, tendo o primeiro caído em desuso. O nome *autogiro* foi adotado posteriormente por Juan de la Cueva como marca registrada de sua aeronave. Autogiro é o mesmo que giroplano.

Juan de la Cierva, que usava um motor convencional – ou motopropulsor - para a translação horizontal para vante, confiando na sustentação gerada por um rotor com sistema de *roda livre*²³² montado sobre a fuselagem. Embora sem capacidade para subidas ou descidas verticais acentuadas ou para o “hover”, o espaço requerido para o pouso e decolagem era pequeno, sendo ainda capaz de realizar com qualidade voos baixos a baixas velocidades, o que gerou grande interesse do meio aeronáutico pelo aparelho.²³³ No autogiro, o motor ou motopropulsor é que gera a tração necessária para a translação do aparelho, esta última provocando a rotação do rotor, que sustentará a aeronave. Apesar de alguns autogiros possuírem asas, ele é, na realidade, um avião no qual as asas foram substituídas por um rotor. As demais superfícies auxiliam no controle e na estabilidade do aparelho.²³⁴

Muitos dos experimentos de construção de aparelhos com asas rotativas anteriores possuíam rotores primitivos, em forma de “leque”. As pás também eram ingenuamente construídas, muitas sem torção alguma. Neste caso, se observadas ao longo do comprimento, cada uma de suas seções transversais possui uma velocidade linear diferente, em função da variação do raio, sofrendo diferentes esforços, de modo que a ponta da pá viaja mais rápido que a raiz. Como a sustentação é função da velocidade ao quadrado, fica claro por que, nos primeiros testes com helicópteros, as pás simplesmente flexionavam violentamente pra cima e quebravam. A saída foi torcer ligeiramente as pás em torno do eixo longitudinal, mais na raiz (maior ângulo de incidência) e menos na ponta (menor ângulo de incidência), de forma a distribuir a sustentação ao longo da pá, reduzindo assim os momentos fletores.²³⁵

Os primeiros rotores eram o que hoje classificamos como rotores rígidos, uma vez que as pás eram presas à cabeça do rotor e moviam-se apenas em torno de seu eixo longitudinal, movimento este conhecido como mudança de passo, através de uma articulação de rolamento. Esses rotores, além de transmitirem muita vibração para a estrutura e comandos, submetiam a raiz das pás a elevados esforços de flexão e compressão. Além disso, o fenômeno da dissimetria de sustentação, como veremos a seguir, age fazendo as pás subirem quando avançam e descerem quando recuam, movimento este conhecido como “batimento”. Como não havia tal liberdade para o batimento, as pás, com a evolução do helicóptero, passaram a ser construídas

²³² Também conhecido como Embreagem de Roda Livre, é um sistema que tem a função de desconectar o motor do eixo de transmissão caso este gire mais devagar que os rotores. Para fins de semelhança e simplificação, podemos associá-lo a uma catraca de bicicleta.

²³³ BILSTEIN, 2001, p. 117.

²³⁴ VIEIRA; SERAPIÃO, 2003, p. 23.

²³⁵ VIEIRA; SERAPIÃO, 2003, p. 56 e <<http://www.avioesemusicas.com/numero-de-pas-no-rotor-de-um-helicoptero.html>>. Acesso em 15/01/2015.

com material flexível e caro (muitas vezes ligas de alumínio,²³⁶ hoje ligas de titânio), o que passou a permitir que literalmente flexionassem (ou “batessem”), além de permitir o arrasto – avanço e recuo – no plano horizontal. Assim, as pás do rotor rígido realizavam o “batimento” através de flexão. Deviam ser igualmente resistentes para suportar as forças geradas no engaste com a cabeça do rotor. Essa era e é sua grande desvantagem, apesar de sua simplicidade de construção, que dispensa várias articulações presentes em outros tipos de rotores²³⁷.

	Mudança de Passo	Batimento	Avanço e Recuo	Principal vantagem	Principal desvantagem
Rígido	SIM	NÃO	NÃO	O mais simples de construir	Desgaste e complexidade das Pás
Semi-Rígido	SIM	SIM	NÃO	Simple de construir	Batida de mastro
Articulado	SIM	SIM	SIM	Eficiência	Construção complexa e ressonância com o solo

Figura 8.14 – Classificação moderna dos tipos de rotores.

Fonte: *Canal Piloto*. Disponível em: <<http://canalpiloto.com.br/teorias-rotativas-04/>>. Acesso em 11/05/2015.

²³⁶ Material ainda não disponível em 1905/1906. As pás do helicóptero de Santos-Dumont, como vimos, eram confeccionadas em armadura rígida de bambu e cana e cobertas por seda esticada e envernizada.

²³⁷ Rotores rígidos ainda são usados hoje, por oferecerem menor atraso nas respostas aos controles e por apresentarem menos oscilação. O sistema de rotor rígido também anula o risco de batida de mastro (“mast bumping”) inerente a rotores que oscilam, o que pode ocasionar o rompimento do mastro por pancadas recebidas pelos batentes limitadores de abano das pás. Tais rotores são utilizados em helicópteros que executam acrobacias aéreas limitadas, como o MBB Bo 105, usado em shows aéreos (Cf. <<http://canalpiloto.com.br/teorias-rotativas-04/>>. Acesso em 11/05/2015). Em alguns helicópteros modernos, como o AS 350 “Esquilo” da Eurocopter, os movimentos de batimento, avanço-e-recuo e mudança de passo, são intermediados por elastômeros, na verdade, um sanduíche de lâminas metálicas intercaladas por finas camadas de elastômero, no lugar dos tradicionais rolamentos, o que permitiu menor necessidade de manutenção, economia na troca de peças e ausência da necessidade de lubrificação constante. A manutenção se dá através do monitoramento do desgaste (“on condition”).



Figura 8.15 - O autogiro de La Cierva.

Fonte: disponível em <<http://www.tecnologias.us/JUAN%20DE%20LA%20CIERVA.htm>>. Acesso em 14/08/2014.

O dia 9 de janeiro de 1923 marcou a primeira observação oficial do voo de um autogiro. A criação de La Cierva introduziu uma nova tecnologia no rotor em relação aos esforços aerodinâmicos, o que tornou possível o voo para a frente de aeronaves de asas rotativas.²³⁸ O problema aerodinâmico existente, e que foi solucionado com sucesso, recebeu o nome de “Dissimetria (Lateral) de Sustentação”. A instabilidade, não existente em voo pairado, se colocava quando a aeronave adquiria movimento horizontal para adiante, o que levava ao abandono da maior parte dos desenvolvimentos em asas rotativas feitos no início do século.

Nas aeronaves de asas rotativas, o rotor (com suas pás, que são as *asas rotativas*) é posto mecanicamente em rotação e, desta forma, mesmo com a aeronave em voo pairado, já há sustentação, porque o giro do rotor produz nas pás as reações aerodinâmicas necessárias ao voo. Quando em voo pairado, a aeronave não se desloca em relação à massa de ar e a velocidade em relação a esta é igual a zero ($V = 0$). Em qualquer ponto da trajetória de cada uma das pás do rotor principal, a velocidade angular (ou rotacional) do perfil aerodinâmico (ω) em relação ao ar é a mesma. A velocidade na extremidade da pá é igual a $\omega.R$, sendo R o comprimento da pá. A força de sustentação é função do quadrado da velocidade (V^2). Consideremos que V é a

²³⁸ ROTORCRAFT FLYING HANDBOOK, 2000, p. 15-1.

velocidade tangencial do *centro de pressão* das pás. Como esta velocidade é igual em todas as pás, suas sustentações serão idênticas (a igualdade de velocidades se verificaria em qualquer elemento das pás que guardassem a mesma cota radial) e sua soma pode ser considerada como se aplicada no centro do disco do rotor.

Como ρ , S e C_L são fixos, a sustentação dependerá basicamente da velocidade das pás em relação ao vento relativo.²³⁹

O ângulo Ψ representa a posição da pá em determinado instante. Quando o helicóptero começa a deslocar-se para vante, a velocidade para frente se soma vetorialmente à velocidade de rotação. Considerando um helicóptero cujo rotor gire no sentido anti-horário, visto de topo, e que seu voo seja reto e nivelado, a velocidade de deslocamento tem direção constante, enquanto a velocidade de rotação terá uma direção diferente em cada ponto da trajetória circular que cada uma das pás descreve.

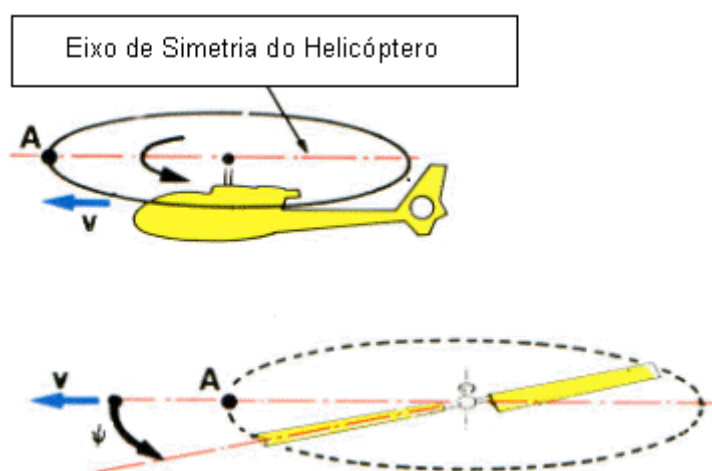


Figura 8.16 – Deslocamento das pás.

Fonte: disponível em <<http://www.aerotecnologia.com.br/pilotos/paginas/07b.htm>>. Acesso em 09/09/2013.

Quando em deslocamento para vante em relação à massa de ar ($V \neq 0$), a pá que avança tem sua velocidade aumentada, a qual atinge valor máximo quando $\Psi = 90^\circ$,²⁴⁰ enquanto a pá que recua tem sua velocidade diminuída, atingindo um mínimo quando $\Psi = 270^\circ$. Isto acontece porque a pá que avança tem a sua velocidade de rotação somada à velocidade de deslocamento,

²³⁹ Neste caso, o vento relativo gerado será igual e oposto à velocidade de rotação das pás, considerando-se a inexistência local de movimento da massa de ar atmosférica (vento).

²⁴⁰ Consideramos, por convenção, que $\Psi = 0^\circ$ representa a posição ocupada pela pá quando alinhada com a parte traseira do helicóptero.

enquanto a pá que recua tem a sua velocidade de rotação diminuída do valor correspondente à velocidade de deslocamento, conforme o esquema abaixo:

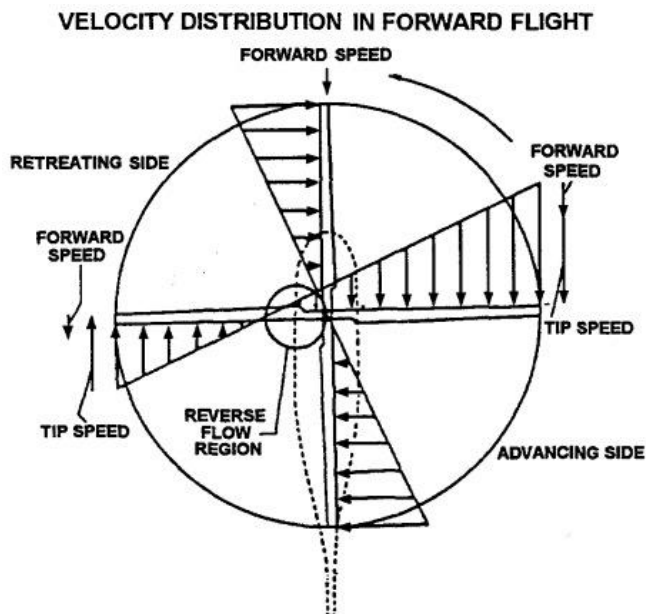


Figura 8.17 - Distribuição de velocidades no voo para frente.

Fonte: disponível em <http://marinegouge.com/mediawiki-1.17.0/index.php?title=Fam_14_Discuss_Items>.

Acesso em 03/08/2013.

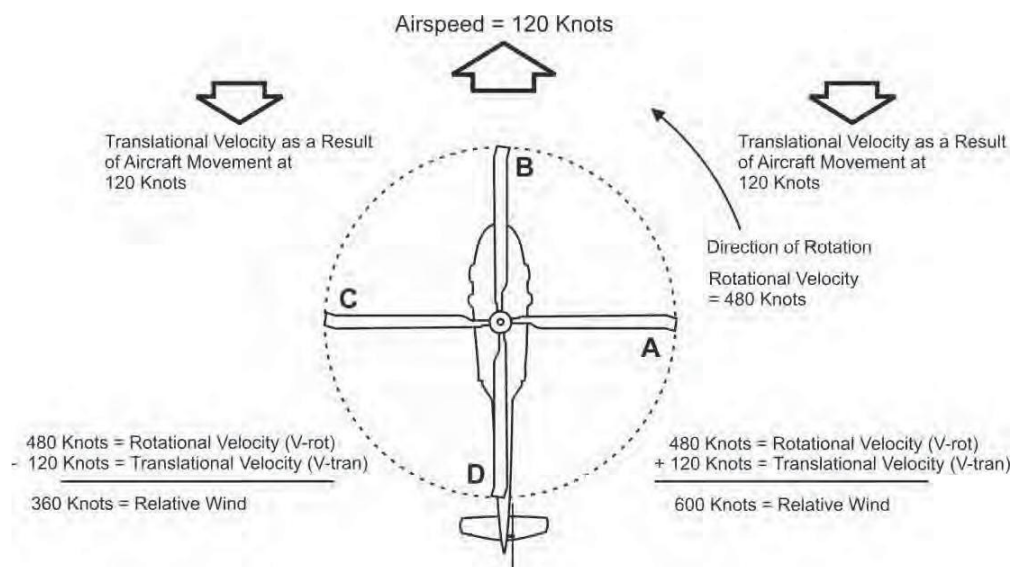


Figura 8.18 - Velocidades diferenciais no sistema do rotor em voo adiante.

Fonte: disponível em <<https://rdl.train.army.mil/catalog/view/100.atsc/>>. Acesso em 12/09/2014.

Daí, quando o helicóptero se desloca para frente, aparece uma dissimetria de velocidades: a velocidade da pá alcança um valor máximo quando passa pelo lado direito e um

valor mínimo quando passa pelo lado esquerdo (o inverso ocorre no caso de giro do rotor no sentido horário), de modo que a pá que avança fornece mais sustentação do que a pá que recua.

Tal dissimetria de sustentação resulta na aplicação de um momento de rolamento sobre o rotor, que aumenta de intensidade à medida que aumenta a velocidade para adiante do helicóptero, uma vez que se busca manter constante a velocidade de rotação do rotor.²⁴¹ A ação desse momento se dará 90° após a aplicação da força e tenderá a fazer o aparelho cabrar (levantar o “nariz”), devido à *precessão giroscópica*.²⁴²

Em função da precessão giroscópica, uma força irá levantar o “nariz” do helicóptero e uma outra força irá abaixar sua “cauda”. A solução encontrada para isto foi a variação do ângulo de ataque das pás. Para compensar o efeito da precessão giroscópica devida à dissimetria de sustentação, é necessário diminuir o ângulo de passo da pá que avança (diminuindo, conseqüentemente, seu ângulo de ataque) e aumentar o ângulo de passo da pá que recua (aumentando seu ângulo de ataque). Quem encontrou tal solução foi Juan de la Cierva. Ele criou, para seu autogiro, uma *articulação de batimento*, que permitia às pás tal variação de passo, sem a qual os esforços verticais de flexão proibitivos na raiz das pás, bem como a própria dissimetria de sustentação, tornariam sua máquina ingovernável. Com esta nova articulação, Cierva criou o que hoje conhecemos por rotor semi-rígido, que é de construção mais simples, tendo por vantagem a diminuição de esforços e vibrações, além do fato de reduzir drasticamente o movimento de arrasto (avanço e recuo). A articulação de batimento foi uma das chaves para o futuro sucesso do helicóptero.²⁴³

²⁴¹ O *governor* do helicóptero (espécie de carburador avançado) busca manter uma RPM fixa para as pás, que varia de equipamento a equipamento. Normalmente, as aeronaves operam com rotações entre 250 e 400 RPM. Já para o rotor de cauda, o número de rotações pode variar entre 1500 e 2000 RPM.

²⁴² O rotor funciona como um giroscópio, que tem a propriedade de resistir à mudança de direção de seu eixo, alterando-a apenas 90° após o ponto de aplicação de uma força, no sentido da rotação. Por isto, os comandos de mudança de passo devem ser feitos 90° antes da posição desejada (e o são, através de hastes com desfasamento apropriado a este fim). (VIEIRA; SERAPIÃO, 2003, p. 256-257 e DOLE; LEWIS, 2000, p. 158).

²⁴³ Segundo Leishman (2000), o princípio de pás que “batessem” foi realmente sugerido inicialmente por Charles Renard, mas a ideia de pás articuladas foi formalmente patenteada por Louis Bréguet em 1908.

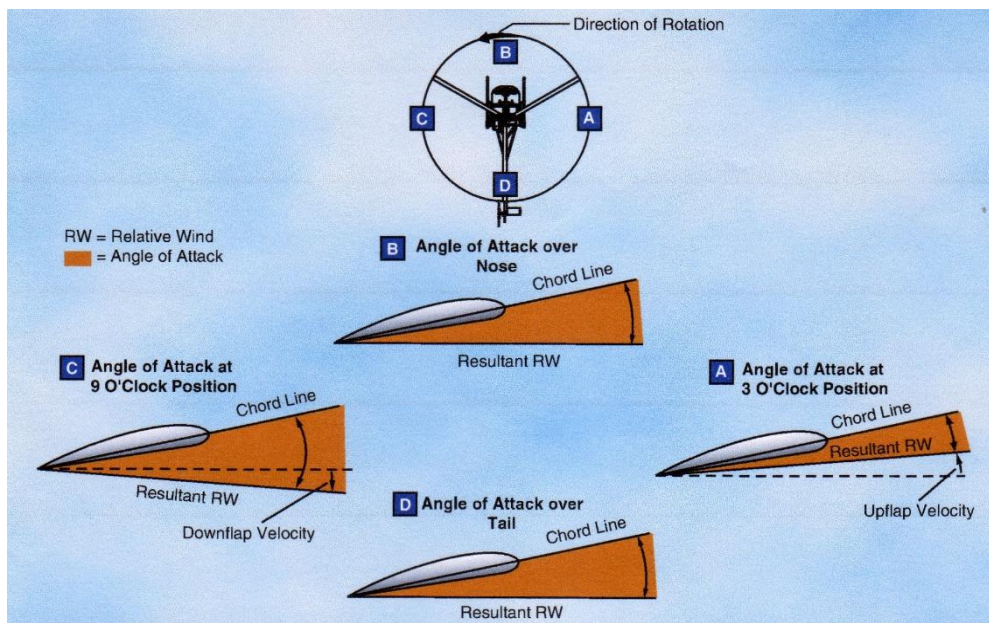


Figura 8.19 – A combinação de batimento para cima (sustentação reduzida) da pá que avança e batimento para baixo (sustentação aumentada) da pá que recua equaliza a sustentação no disco do rotor, de forma a corrigir a dissimetria de sustentação.

Fonte: *Federal Aviation Administration*. Disponível em:

<http://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/media/faa-h-8083-21.pdf>. Acesso em 14/12/2014.

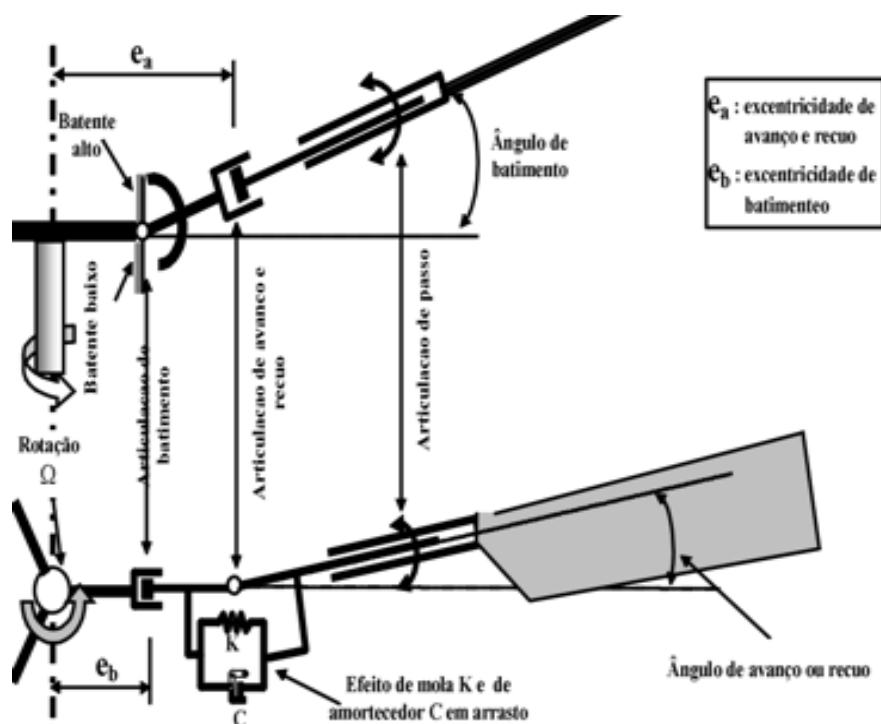


Figura 8.20 – Esquema funcional de uma cabeça de rotor, mostrando as várias articulações.

Fonte: *Aerotecnologia*. Disponível em: <<http://www.aerotecnologia.com.br/engenheiros/pages/engaer5.htm>>. Acesso em 15/05/2015.

Nos modelos posteriores de autogiro, basicamente a partir do C-8²⁴⁴, Cierva adicionou uma articulação de “avanço e recuo” (também chamada de “atraso”) para cada pá, que aliviava os estresses causados pelos esforços de flexão na raiz da pá, no plano de rotação (arrasto no plano do rotor), causados pela aceleração de Coriolis (devida à conservação de momento angular).²⁴⁵ Completou, assim, o desenvolvimento do que hoje chamamos de *rotor articulado* ou *cubo do rotor articulado*, com as articulações para passo, batimento e avanço-e-recuo. Foi igualmente aperfeiçoada, nesta época, a articulação de passo, de forma a variar a força aerodinâmica gerada pelo rotor principal em intensidade (passo coletivo) e em inclinação (passo cíclico).

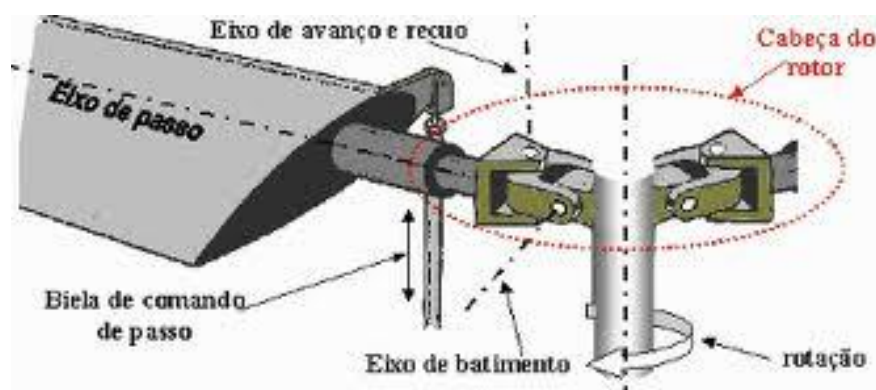


Figura 8.21 - Os três movimentos de uma pá de helicóptero.

Fonte: Aerotecnologia. Disponível em: <<http://www.aerotecnologia.com.br/engenhheiros/pages/engaer3.htm>>. Acesso em 18/08/2014.

Certamente, um autogiro é mecanicamente mais simples do que um helicóptero. Motor e transmissão para a rotação do mastro (eixo) do rotor puderam ser dispensados e, portanto, não havia necessidade de se contrapor o torque, o que barateou a construção. Cierva percebeu ainda que, inclinando para trás o disco do rotor com pequeno ângulo de ataque, à medida que o aparelho se deslocava para frente face à força do motopropulsor, o rotor automaticamente girava pela ação do fluxo de ar nas pás. Tal rotação aerodinâmica própria foi denominada auto-rotação.

Tal tecnologia não existia em 1905, enquanto Santos-Dumont desenvolvia seu projeto de helicóptero. As pás eram construídas com madeiras rígidas e leves, como as usadas para seus dirigíveis, mas possivelmente muito frágeis para suportar os esforços causados pela dissimetria de sustentação/batimento e pelo arrasto. Tomando ainda, por base, o projeto a que tivemos

²⁴⁴ Juan de la Cierva nomeava seus autogiros numericamente: C.1, C.2, ...

²⁴⁵ Uma vez que cada pá, ao elevar-se, tem sua velocidade aumentada, o inverso acontecendo quando desce.

acesso na bibliografia selecionada, com rotores em tandem, podemos depreender que, em voo pairado, os dois discos rotores girando em sentidos opostos, reverteriam as direções relevantes da adição de vetores mas, em voo adiante, sofreriam o efeito da dissimetria e da precessão, com ação dupla de cabragem e enormes esforços fletores e de compressão sobre as pás, bem como considerável tração no cabeamento, o que acarretaria enorme instabilidade e tendências a rupturas. Rotores dispostos dessa forma, como no moderno CH-47 Chinook, dispensam rotor de cauda, pois são contra-rotativos, mas exigem servomecanismos e sistemas complexos para controle de sua extrema instabilidade, além da colocação de um rotor em nível diferente do outro, de forma a reduzir problemas de turbulência. O helicóptero, sabemos hoje, é uma máquina complexa e, ao tempo de Santos-Dumont, muito da aerodinâmica do rotor ainda estava por ser descoberta e desenvolvida.



Figura 8.22 - O CH-47 Chinook.

Fonte: disponível em <http://www.enemyforces.net/helicopters/ch47_chinook.htm>. Acesso em

10/09/2015.

8.5- A QUESTÃO DAS VIBRAÇÕES

Os rotores de um helicóptero, seu(s) motor(es) e componentes dinâmicos geram vibrações em sua estrutura, que reage através de flexões e torções, desencadeando um modo

vibratório, que deve ser mantido dentro de limites aceitáveis. O desbalanceamento dos rotores é uma outra séria questão quando analisamos a viabilidade e a estabilidade do voo e diz respeito, basicamente, à alteração do momento angular do centro de gravidade das pás do rotor. É a principal causa das vibrações. Durante seu funcionamento, os centros de gravidade dos rotores deverão coincidir com os respectivos eixos de rotação. Caso contrário, haverá oscilações e vibrações. Isto pode ser fruto de uma “diferença de massa de um elemento qualquer do rotor, de uma dissimetria da cabeça do rotor e de uma diferença no movimento de arrasto de uma pá em relação às demais”,²⁴⁶ resultando em diferenças nas trajetórias das pás, logo de seus batimentos. As vibrações podem ser de baixa, média ou alta frequência, verticais e laterais.

Ao reflexo das vibrações do aparelho contra o solo denominamos *ressonância no solo*, efeito este que aumenta a amplitude das vibrações. Este desbalanceamento se torna crítico quando a aeronave encontra-se em contato com o solo, antes mesmo da decolagem, podendo causar danos estruturais.

Sabemos que o helicóptero de Santos-Dumont possuía rotores com pás ligadas por cabos a grandes rodas do tipo das de bicicleta, o que os aproximaria mais do conceito de rotores rígidos, sem articulações, pouco sujeito a ressonância no solo. Porém não havia equipamento para realizar o adequado “tracking” das pás,²⁴⁷ de modo a fazê-las adquirir a mesma trajetória. Somado a isso, qualquer alteração angular entre as pás ou seu desbalanceamento poderia contribuir para a existência de ressonância. Segundo Leishman, dentre os problemas técnicos que limitaram os experimentos pioneiros com helicópteros, a “vibração era uma fonte de muitas falhas mecânicas do rotor e estrutura, e refletia um entendimento insuficiente do comportamento dinâmico e aerodinâmico das asas-rotativas”.²⁴⁸

²⁴⁶ VIEIRA E SERAPIÃO, p. 250.

²⁴⁷ Tracking é o equilíbrio dinâmico das pás entre si, quando suas pontas giram no mesmo plano de rotação. Caso isso não aconteça, poderão ocorrer vibrações excessivas (JOFFILY, 2000, p. 70).

²⁴⁸ LEISHMAN, 2000.

9 - APÓS SANTOS-DUMONT

“E, andando os seres vivos, andavam as rodas ao lado deles; e, elevando-se os seres vivos da terra, elevavam-se também as rodas.”

Ezequiel 1:19

9.1 – ENGATINHANDO

De extrema importância para o desenvolvimento do helicóptero moderno foi a ideia de um *passo cíclico* para as pás, ou seja, a alteração do passo (ângulo de ataque) das pás do(s) rotor(es) principal(is), ao longo do plano de rotação, aumentando o passo (pelo pivoteamento ou torção das pás) em partes da trajetória (maior sustentação) e diminuindo-o na trajetória diametralmente oposta (menor sustentação). Isto faz com que o plano de rotação das pás²⁴⁹ se incline na direção desejada - proporcionando a variação da resultante aerodinâmica (tração total), que é vetorialmente perpendicular ao plano do rotor -, gerando movimento para adiante ou para qualquer outro azimute. Esta mudança automática se repete a cada volta das pás (daí mudança de passo *cíclico*). Quem patenteou uma concepção inicial de controle de passo cíclico para as pás foi o italiano Gaetano A. Crocco, em 1906.

Os irmãos Bréguet, com a colaboração do professor Charles Richet, construíram, em 1908 e em 1908/1909, respectivamente, os Giroplanos Bréguet-Richet N° 2 e N° 2bis, aeronaves híbridas, com dois rotores, combinando asas rotativas e aeroplano. Foram relatados sucessos limitados do N° 2 em meados de 1908 e do N° 2bis em abril de 1909, mas um furacão, em maio daquele ano, destruiu as instalações dos Bréguet. Isto, somado à falta de materiais adequados e de motores com boa relação peso-potência, fez com que Louis Bréguet voltasse sua atenção aos aeroplanos, com os resultados que legou à história. Mas, na verdade, ele nunca desistiu do voo vertical, ao qual retornaria nos anos 1930, através do Breguet-Dorand "Gyroplane Laboratoire", de 1935.

Nos Estados Unidos, uma máquina pioneira de decolagem vertical foi desenvolvida por Emile Berliner, o criador do gramofone, e John Newton Williams. Berliner, alemão naturalizado americano, projetou o que pode ter sido o primeiro motor produzido para utilização em aeronaves de asas rotativas e que foi amplamente utilizado em helicópteros, o motor *Adams-*

²⁴⁹ Plano de rotação das pás é o mesmo que plano do rotor.

Farwell, de 36 hp.²⁵⁰ Em 1908, Williams construiu uma máquina com rotores coaxiais para Berliner, utilizando dois desses motores. O aparelho teria levantado seu próprio peso e o de Williams (por muitas vezes o piloto), um total de 277 kg, mas foi um voo cativo (amarrado ao solo). Berliner foi o primeiro a propor o rotor de cauda auxiliar montado verticalmente.

Igor Sikorsky experimentava na Rússia. Em junho de 1909, construiu seu primeiro helicóptero, o S-1, em Kiev. O aparelho, construído em madeira, possuía dois rotores coaxiais com 3 pás cada e pesava 204 kg. As pás eram feitas em estrutura de madeira coberta com linho e o motor ficava na parte inferior, protegido por uma “jaula” em madeira, amarrada por cabos. Os rotores se mostraram ineficientes, e o motor *Anzani*, de origem francesa, com 25 cv (20 kW), não conseguiu levantar seu próprio peso. No ano seguinte, Sikorsky construiu o S-2, mais leve, com 181 kg.²⁵¹ O modelo chegou a sair do solo, mas o motor era fraco demais para transportar um passageiro. A máquina apresentou muita vibração pela falta de uma armação mais rígida. Sikorsky voltou-se, então, para o desenvolvimento do avião. Emigrou para os Estados-Unidos em 1919 devido à Revolução Russa e só voltou ao estudo e desenvolvimento das aeronaves de decolagem vertical no final da década de 1930.

Em 1912, o estudante russo Boris Yuriev construiu um pequeno helicóptero que possuía um único rotor principal e um rotor de cauda. O eixo principal do engenho quebrou durante os testes e o projeto foi abandonado, mas a ideia de um rotor de cauda para contrapor o torque do rotor principal e evitar o giro da aeronave acabou se tornando uma construção padrão na maioria dos helicópteros modernos.

Também em 1912, o pioneiro da aviação dinamarquês Jacob Christian Ellehammer construiu um helicóptero experimental interessante, “composto”, dotado de dois rotores coaxiais e de um propulsor (hélice tratora). Cada um dos rotores contra rotativos consistia de um grande anel de alumínio de cerca de 6 m de diâmetro e 6 lâminas (pás) de 1,5 m de comprimento por 0,66 m de largura afixadas à sua borda externa, a espaços regulares. O rotor inferior era coberto com tecido, com o intuito de aumentar a sustentação. Um motor de 6 hp, desenhado por ele próprio, impulsionava os rotores e a hélice convencional. Um mecanismo de passo cíclico pioneiro era utilizado para alterar a inclinação das pás rotativas em voo (visto que eram pivotadas em torno de seu eixo horizontal) e para o controle.²⁵² O aparelho fez algumas decolagens amarrado e, posteriormente, uma decolagem livre, com testemunhas, mas nunca

²⁵⁰ Disponível em: <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/berliner-1908.php> e <http://www.centennialofflight.net/essay/Rotary/early_20th_century/HE2.htm>. Acesso em 03/03/2015.

²⁵¹ Disponível em: <http://www.centennialofflight.net/essay/Rotary/early_20th_century/HE2.htm>. Acesso em 14/02/2015.

²⁵² Disponível em: <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/ellehammer.php>. Acesso em 14/02/2015.

realizou mais do que pequenos saltos. Os testes continuaram até 1916, quando os rotores da aeronave se chocaram contra o solo, destruindo-a.

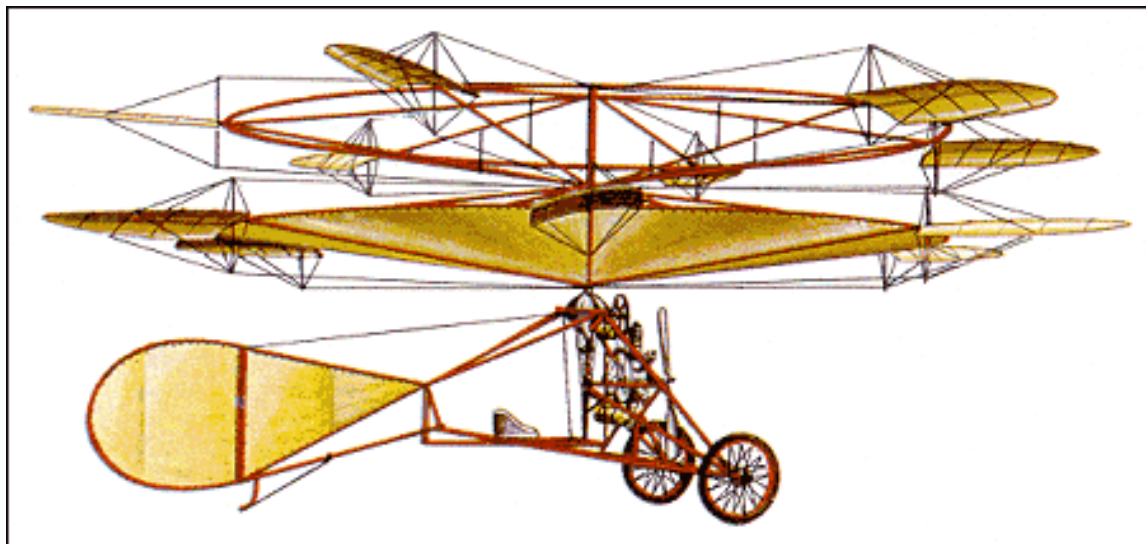


Figura 9.1 – O helicóptero de Ellehammer (1912).

Fonte: disponível em <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/ellehammer.php>. Acesso em 14/02/2015.

Com a Primeira Guerra Mundial, houve uma pausa nos estudos e projetos em decolagem vertical, com a afirmação definitiva e o triunfo dos aeroplanos. Mas alguns poucos pesquisadores persistiram. Entre eles, Emile Berliner, o francês Étienne Oehmichen e o marquês de origem argentina Raúl Pateras Pescara.

A guerra também estimulou enormemente o desenvolvimento da indústria aeronáutica, particularmente o dos motores, que se tornaram mais efetivos, leves e potentes. Um motor, em particular, tornou-se o mais utilizado em helicópteros e autogiros, o atualmente extinto *motor rotativo*, que foi também utilizado em aviões. Refrigerado a ar, cárter, cilindros e propulsor (hélice) giravam livremente em volta do eixo de manivelas (ou virabrequim, que era fixo) devido a rolamentos, em contraposição aos motores de virabrequim rotativo e cárter estacionário. Isto permitia ao motor girar a 1300 rpm, proporcionando a refrigeração do cárter pelo grande fluxo de ar forçado sobre os cilindros, munidos de aletas de alumínio para dissipar o calor.²⁵³ A vantagem de tal motor estava no peso, pois dispensava os radiadores, camisas d'água, reservatórios, bombas e outros acessórios. Uma das desvantagens, além do alto consumo de óleo, é que a força centrífuga fazia com que grandes quantidades deste

²⁵³ GABLEHOUSE, 1969, p. 19.

atravessassem o motor, lançando-se sobre a estrutura da aeronave e sobre o piloto, devido à corrente de ar gerada pelo movimento.²⁵⁴

Um exemplo pioneiro do uso de motores rotativos em helicópteros no pós-guerra foi a máquina construída pelo imigrante russo Dr. George de Bothezat.²⁵⁵ Ele começou a trabalhar nos Estados-Unidos em 1921 e projetou para o Corpo Aéreo do Exército americano um aparelho com estrutura em formato de “X”, pesando pouco mais de 1600 kg e 20 m de comprimento. Na extremidade de cada “braço” de 9 m da aeronave estava instalado um rotor de 6 pás e 8,1 m de diâmetro. Para a propulsão e o controle de guinada, duas hélices foram dispostas nas extremidades dos braços laterais. Os rotores, em forma de ventoinha, se assemelhavam ao projeto de Cayley de 1843. O motor era um *Le Rhone* radial de 180 hp, que logo depois foi substituído por um *Bentley BR-2* rotativo de 220 hp.

Os rotores não possuíam eixos paralelos. Estes eram levemente inclinados para dentro e, se imaginariamente prolongados, convergiriam em um ponto sobre o centro de gravidade do aparelho. Cada rotor tinha controle individual de passo coletivo, de forma a produzir sustentação diferencial através da inclinação do aparelho para translação.²⁵⁶ O passo do conjunto de pás dos 4 rotores era comandado por um volante. Arfagem e rolagem eram comandadas por um manche cujo movimento proporcionava variações diferenciais do passo dos rotores 2 a 2, sendo os rotores de vante e de ré os responsáveis pelo movimento em torno do eixo lateral (arfagem) e os rotores laterais pelo movimento em torno do eixo longitudinal (rolagem).

A aeronave fez seu primeiro voo em 18 de dezembro de 1922, com peso completo de 1700 kg, tendo o major Bane, chefe da Divisão de Engenharia do Serviço Aéreo, no comando. A aeronave subiu a 1,8 m do solo, onde se manteve praticamente estável por 1min42s, mas um lento e inevitável deslocamento a obrigou a uma aterrisagem igualmente controlada. “Pela primeira vez no mundo, um helicóptero havia voado diante de testemunhas por mais de um minuto” (tradução nossa).²⁵⁷

Outros voos, basicamente estacionários, foram realizados. Em 19 de janeiro de 1923, a aeronave decolou com dois passageiros a 1,2 m do solo. Em 17 de abril, além do piloto, decolou

²⁵⁴ MONDEY, 2001, p.18.

²⁵⁵ Bothezat era um matemático russo de renome, mas devido à Revolução, exilou-se nos Estados-Unidos. Já havia escrito uma teoria sobre rotores de helicópteros publicada pela NACA. Com ele os EUA assinou o primeiro contrato militar para a construção de um helicóptero (BOULET, 1982, p. 41).

²⁵⁶ Disponível em: <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/bothezat.php>. Acesso em 05/03/2015 e GABLEHOUSE, 1969, p.20.

²⁵⁷ “Pour la première fois dans le monde, un hélicoptère avait volé devant témoins pendant plus d’une minute.” (BOULET, 1982, p. 41).

com mais três pessoas penduradas à estrutura, provando alta estabilidade em face do grande momento de inércia. Mas, apesar de tudo isso, a performance e os riscos de ruptura devidos à dissimetria tornavam o aparelho insuficiente para os contratantes e o Serviço Aéreo decidiu abandonar o projeto, para desespero do inventor.

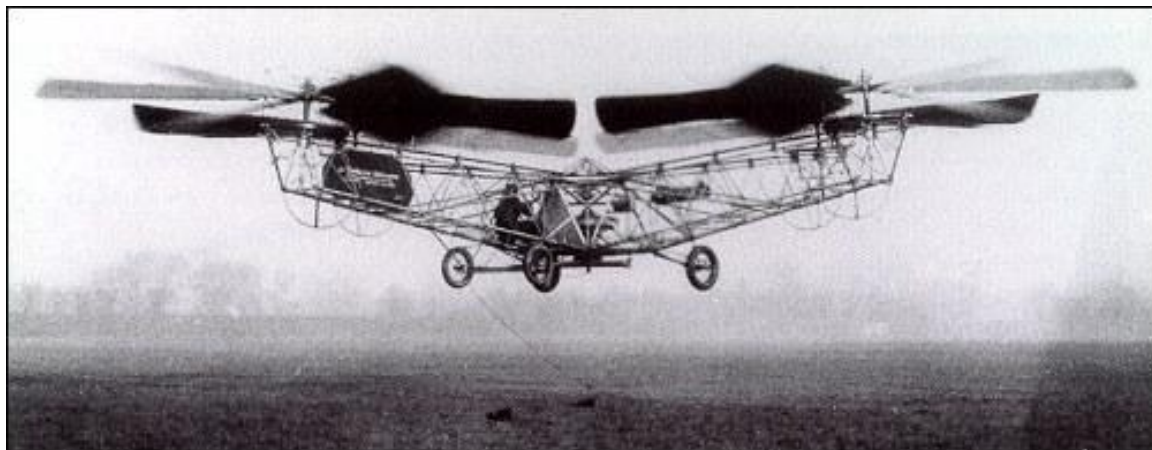


Figura 9.2 – O helicóptero de De Bothezat (1923).

Fonte: disponível em <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/bothezat.php>. Acesso em 05/03/2015.

A partir de 1919 e pela década de 1920, logo após a Primeira Grande Guerra, Henry, filho de Emile Berliner e ex-piloto do Exército americano, passou a ajudar o pai na construção de helicópteros pouco usuais, na verdade híbridos, cruzamentos entre aeroplano e helicóptero, possuindo rotores bi-pás montados lado-a-lado sobre as asas de monoplanos, biplanos ou triplanos. Os rotores eram feitos em madeira rígida, no formato de hélices de aeroplanos.

O controle era de grande engenhosidade. Um conjunto de palhetas móveis era montado sob os rotores, como no helicóptero de Cornu, podendo variar da posição vertical à horizontal. Com isso, a força gerada pelo fluxo de ar descendente sobre as mesmas possibilitava a rolagem da aeronave para os lados. Uma versão posterior contava com uma pequena hélice extra, ligada por um eixo de transmissão ao motor, com a função de levantar e baixar a cauda do aparelho.²⁵⁸ Uma de suas aeronaves chegou a voar aproximadamente 90 m em 1,5min, mas os Berliner não conseguiram solução adequada para os problemas de estabilidade e controle, o que começou a mudar com um sistema mais efetivo de controle de passo do rotor principal, como o utilizado por Raul Pateras Pescara, que viria a dar um novo impulso aos helicópteros. Mas, antes, vejamos os avanços de outro experimentador francês, Etienne Oehmichen.

²⁵⁸ GABLEHOUSE, 1969, p. 27.

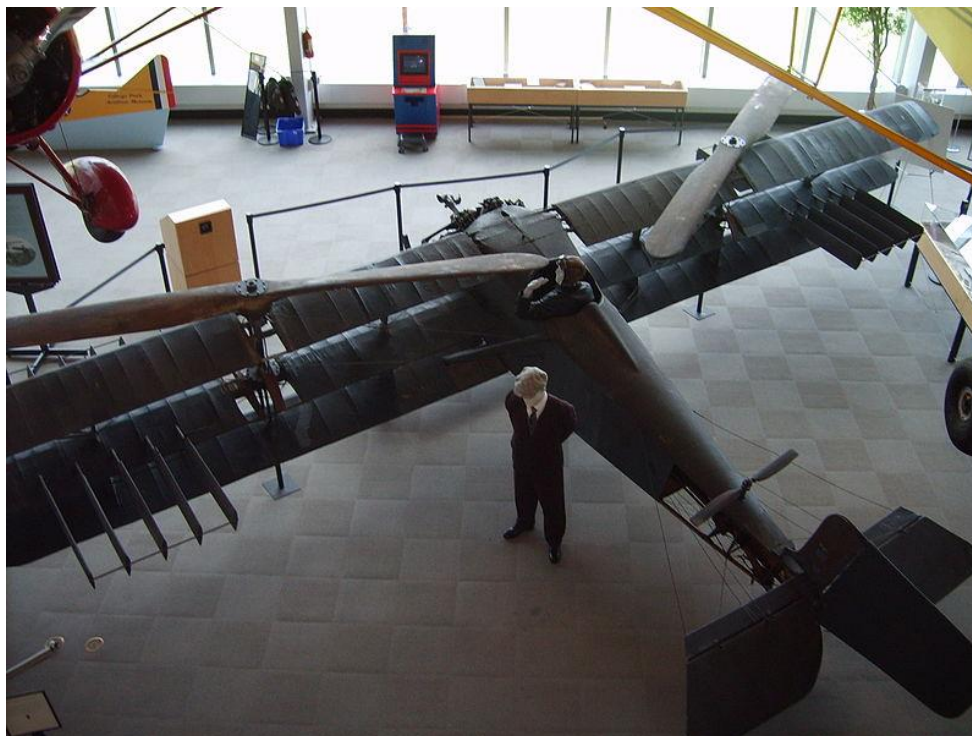


Figura 9.3 - Helicóptero Berliner Nº 5 (1924).

Fonte: disponível em

<http://en.wikipedia.org/wiki/Henry_Berliner#mediaviewer/File:Berliner_Helicopter_in_College_Park_Aviation_Museum.jpg>. Acesso em 03/03/2015.

Oehmichen, engenheiro formado pela *École Centrale* em 1908, aprofundou-se no estudo do voo das aves e dos insetos e de suas asas, principalmente as da libélula. Jovem engenheiro da companhia de motores para automóveis Peugeot e em associação com esta, começou a experimentar seus projetos em asas rotativas em 1920 e construiu, ao todo, seis diferentes máquinas de decolagem vertical. A primeira, semelhante ao helicóptero de Cornu, não conseguiu obter sustentação suficiente de seu par de rotores bi-pás e do motor *Dutheil-Chalmer* de 20-25 cv, tendo ele acrescentado um balão de hidrogênio de 70 m³ sobre o aparelho,²⁵⁹ para dar-lhe sustentação e estabilidade. Sua aeronave mais impressionante foi o Oehmichen Nº 2, que possuía quatro rotores de duas pás (hélices) cada, impulsionados por um único motor rotativo *Le Rhone* de 120 hp, que voou pela primeira vez em 11 de novembro de 1922. O motor foi, posteriormente, substituído por um *Gnome* de 180 hp.²⁶⁰

O Oehmichen Nº 2 era basicamente uma evolução do Giroplano de Bréguet, composto de um quadro em tubos de aço de disposição cruciforme, as pás dos rotores em forma de remo, localizadas nas extremidades dos quatro braços. O ângulo das pás podia ser variado por

²⁵⁹ BOULET, 1982, p.42.

²⁶⁰ Disponível em: <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/oemichen.php>. Acesso em 18/02/2015.

empenamento através de cabos. Cinco hélices horizontais (de passo variável e reversível) estabilizavam a máquina em relação a arfagem e rolamento. Mais um par, de passo fixo, era usado para tração (ou propulsão para a frente) e outra, na parte dianteira, servia para a direção do helicóptero. Os pares opostos de rotores possuíam diâmetros ligeiramente diferentes.²⁶¹ O aparelho pesava cerca de 900 kg e executou diversos voos em 1923 e 1924.²⁶²

Em maio de 1923 foi executado o primeiro voo estacionário de mais de 5 minutos. Em 14 de abril de 1924, o aparelho voou 360 metros, estabelecendo o primeiro recorde de distância para helicóptero oficialmente reconhecido pela *Federação Aeronáutica Internacional* (FAI). Em 17 de abril de 1924, aumentou seu recorde para 525 metros. Finalmente, em 4 de maio de 1924, Oehmichen foi o primeiro a pilotar oficialmente um helicóptero por um percurso de 1 km, no tempo de 7min40s, em um circuito fechado balizado por três estacas colocadas de modo a formar um triângulo, em altura máxima de 16 metros, dezesseis anos após Henri Farman realizar o mesmo feito com um aeroplano.²⁶³

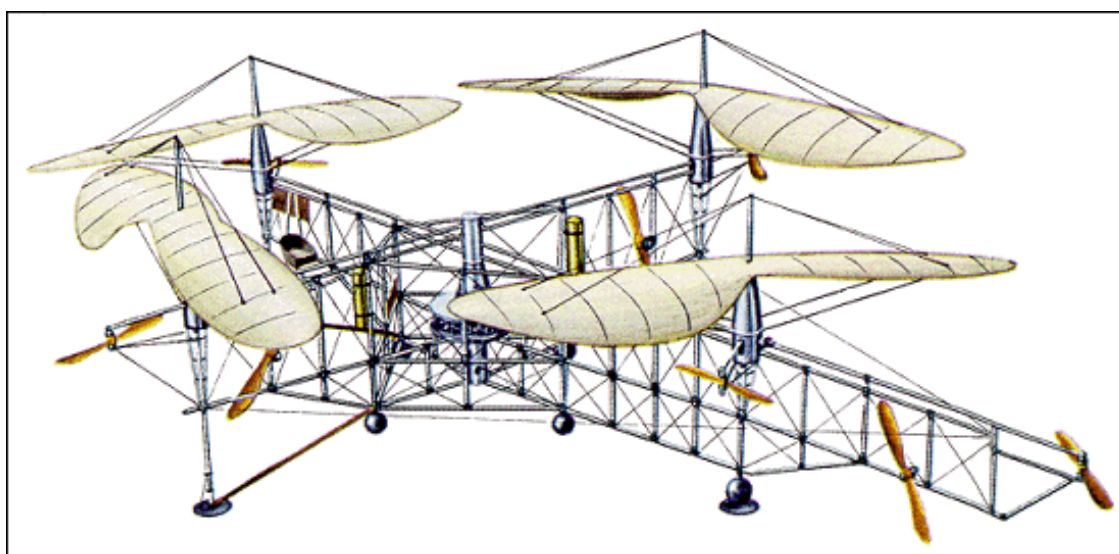


Figura 9.4 – O helicóptero de Oehmichen (1922).

Fonte: disponível em <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/oemichen.php>. Acesso em 25/02/2015.

Outro importante passo tecnológico no desenvolvimento dos helicópteros foi dado pelo argentino Raúl Pateras Pescara de Castelluccio. Este construiu seu primeiro helicóptero, uma máquina estranha e desajeitada, em 1919-20, na Espanha. Pesava vazia, sem combustível ou

²⁶¹ Disponível em: <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/oemichen.php>. Acesso em 18/02/2015.

²⁶² BOULET, 1982, p..43.

²⁶³ BOULET, 1982, p..43.

piloto, 600 kg e utilizava um motor *Hispano*, a combustão interna, de 45 hp. Utilizava dois rotores coaxiais, cada um com 6 pares de pás “biplanos”, com diâmetro de 6,40 m, num total de 24 superfícies de sustentação, mas o motor foi insuficiente para levantar o aparelho. Pescara o trocou por um motor *Le Rhone* de 170 hp e, apesar de deixar o solo em maio de 1921, o aparelho não possuía estabilidade. Pescara foi para a França em 1922 e confeccionou seu N° 2, que subiu a apenas 1,5 m.

Seu aparelho de maior destaque foi o N° 3 que, construído em 1923, foi o primeiro helicóptero realmente manejável. Parecia “um trator pendente de um moinho de vento horizontal”. Mas, além do fato de que realmente voou em 1924, incorporou uma série de novas tecnologias que mudaram o estado da arte em aviação de asas rotativas: um controle de passo cíclico, através da inclinação do disco do rotor, que variava o passo das pás, empenando-as individualmente e proporcionando controle direcional,²⁶⁴ através de uma alavanca de controle central no cockpit, assim como um controle de passo coletivo para elevação do aparelho, através de uma alavanca montada lateralmente no cockpit e que proporcionava o aumento do passo de todas as pás simultaneamente.²⁶⁵ O aparelho continuou empregando rotores coaxiais, cada um com 4 pares de pás “biplanos” com um diâmetro aumentado para 7,20 m, girando ao redor de um eixo em forma de mastro.²⁶⁶ O motor usado foi um *Hispano-Suiza* com 180 hp, a ré do aparelho. Em 18 de abril de 1924, o N° 3, apesar da velocidade modesta (13 km/h), voou uma distância de 736 m em Issy-les-Moulineaux, batendo o recorde de Oehmichen obtido quatro dias antes e também o do dia anterior. Pescara também foi um dos primeiros a compreender a auto-rotação e os rotores foram projetados para que a aeronave pudesse pousar de forma segura, na hipótese de perda do motor.²⁶⁷

²⁶⁴ Isto eliminou a necessidade de hélices auxiliares para o deslocamento, como no helicóptero de Oehmichen.

²⁶⁵ Disponível em: <<http://home.iwichita.com/rh1/hold/av/avhist/helo/helohist.htm>>. Acesso em 04/03/2015.

²⁶⁶ Disponível em: <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/pescara.php>. Acesso em 04/03/2015.

²⁶⁷ FAY, 1976, p. 134.



Figura 9.5 – O Pescara Nº 3 (1923-24).

Fonte: disponível em <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/pescara.php>. Acesso em 04/03/2015.

Enquanto isso, os aviões se desenvolviam em larga escala, com motores cada vez mais potentes e estruturas cada vez mais eficientes, voando a velocidades que beiravam os 200 km/h, decolando e pousando em algumas centenas de metros e transportando passageiros e cargas. O helicóptero, apesar dos avanços, ainda patinava nos quesitos controle, estabilidade e velocidade, muito em função do desconhecimento da dinâmica dos rotores. Mas isto viria a mudar com o *autogiro* e seu criador, o engenheiro espanhol Juan de la Cierva, no que seria uma verdadeira revolução nas aeronaves de asas rotativas.

9.2 – O FABULOSO AUTOGIRO

Juan de la Cierva y Codorníu (1895-1936) nasceu em Murcia, na Espanha. Formou-se em engenharia civil por não haver, na Espanha da época, engenharia aeronáutica. Com a idade de 17 anos, ele já havia participado na fabricação de vários planadores e de um avião com um motor de 50 hp (apelidado de "Caranguejo Vermelho"). Em 1918, o governo promoveu uma competição para o design de um novo bombardeiro militar, cujo prêmio para o vencedor era

uma grande soma em dinheiro (10.000 dólares). A aeronave projetada e construída por Cierva para a disputa, com a ajuda financeira de alguns amigos, um biplano, pesava 5,5 tons e possuía envergadura de 25 m. Era alimentada por três motores de 220 hp cada. Foi testada em maio de 1919. O primeiro voo foi um sucesso, porém no segundo, a aeronave estolou e caiu, após uma curva acentuada a baixa altura e baixa velocidade. O piloto, do Exército espanhol, sobreviveu, ficando destruída a aeronave.

Cierva passou a pensar numa solução na qual aeronaves não estolassem, mesmo voando a baixas velocidades e, após algumas semanas, chegou à conclusão de que isto era possível, utilizando asas giratórias para gerar sustentação, rotacionando em volta de um eixo central. Pensou, então, num helicóptero, mas os problemas mecânicos e materiais envolvidos nos insucessos dos helicópteros pioneiros o fizeram desistir da ideia. Desenhou, então, uma aeronave com rotor auto-rotativo (de roda livre, como um cata-vento) no topo, o qual girava gerando sustentação, enquanto uma hélice tratora movia o aparelho para a frente. A corrente de ar passando através do rotor mantinha-o girando. Deu ao seu invento o nome de *autogiro*, patenteado em 1920. Seus protótipos C.1, C.2 e C.3 foram construídos em 1920, 1921 e 1922, respectivamente e as melhorias foram sendo patenteadas.

Enquanto os pequenos modelos funcionavam bem, os protótipos em escala real apresentavam um problema: sempre rolavam para um lado, logo após a decolagem. Cierva atentou para o fato de que as pás do rotor que avançavam obtinham mais sustentação do que as que recuavam, fenômeno que passamos a conhecer como “dissimetria de sustentação”, o que causava o tombamento descrito. Ele resolveu o problema fixando as pás ao cubo central do rotor através de articulações, chamadas “articulações de batimento” (conforme abordado no Capítulo 8). Tais articulações permitiam que as pás se movimentassem, subindo (pás que avançam) e descendo (pás que recuam), equalizando a sustentação nos dois lados da aeronave. Embora a ideia tenha sido proposta anteriormente, a Cierva é creditada sua primeira utilização em um sistema rotor.²⁶⁸

Sua aeronave C.4, utilizando tais inovações, fez grande sucesso ao voar em Madri em 9 de janeiro de 1923, tendo o tenente Alejandro Gomez Spencer aos controles. Cierva foi para a Inglaterra em 1925, onde construiu o C.6 com quatro pás e controles convencionais de avião para arfagem, rolagem e guinada. Apoiado por financiadores ingleses, criou a *Cierva Autogiro Company* no ano seguinte e construiu outros autogiros. Posteriormente, em 1927, adicionou articulações de arrasto ao cubo do rotor para permitir pequenos avanços e recuos das pás,

²⁶⁸ Disponível em: <http://www.helistart.com/helicopters/Juan_de_la_Cierva/C4>. Acesso em 16/03/2015.

diminuindo os esforços de flexão. Cierva ainda voou de Londres a Paris em 1928, cruzando o Canal da Mancha com um autogiro C.8, sua aeronave mais potente, indo, depois, a Berlim, Bruxelas e Amsterdã.



Figura 9.6 – O autogiro Cierva C.4 (1923).

Fonte: disponível em <http://www.helistart.com/helicopters/Juan_de_la_Cierva/C4>. Acesso em 16/03/2015.

Cierva construiu autogiros com asas até desenvolver mecanismos de controle que pudessem dispensá-las, como os comandos para alteração de passo cíclico e coletivo das pás, depois utilizados nos helicópteros e que hoje chamados simplesmente de “cíclico” e “coletivo”. Ironicamente, o homem que buscou fabricar aeronaves seguras e que, através de seu mecanismo auto-rotativo proporcionou pousos a salvo, mesmo com perda de motor, morreu em um acidente aéreo como passageiro de um Douglas DC-2, que viajava de Londres para Amsterdã, em 9 de dezembro de 1936. Muitos autogiros foram construídos até a Segunda Grande Guerra, quando foram substituídos por helicópteros, os quais incorporaram muitas de suas inovações e mecanismos de controle daqueles, guardando em sua estrutura o legado de Cierva.

Na Europa, muitos construtores tentaram desenvolver suas ideias para a confecção de um helicóptero viável, principalmente devido às evoluções oriundas do autogiro. Na Itália, Corradino D’Ascanio construiu um helicóptero com rotores coaxiais contra-rotativos de 13 m de diâmetro e duas pás cada, acionados por um motor *Fiat* de 95 hp e peso de 800 kg. O controle era obtido através de pequenas asas auxiliares colocadas no bordo de fuga das pás, acionadas através de um servomecanismo, produzindo alterações de passo cíclico e coletivo. Este servomecanismo as fazia defletir ciclicamente (bem como as pás), através de um sistema de

cabos e polias, o que fazia variar a sustentação em seu percurso ao redor do eixo. As pequenas asas moviam-se também coletivamente, para a decolagem vertical. As pás eram presas ao eixo por articulações de batimento e articulações para mudança de passo (ou empenamento). Três pequenas hélices fixadas à estrutura auxiliavam os movimentos de arfagem, rolagem e guinada.²⁶⁹ O veículo manteve, por muitos anos, três recordes mundiais obtidos pela Federação Aeronáutica Internacional (FAI), em 8 de outubro de 1930: altitude (18 m), distância (1078 m) e resistência (8min45s).²⁷⁰ Porém, sua estabilidade e seu controle ainda deixavam a desejar.

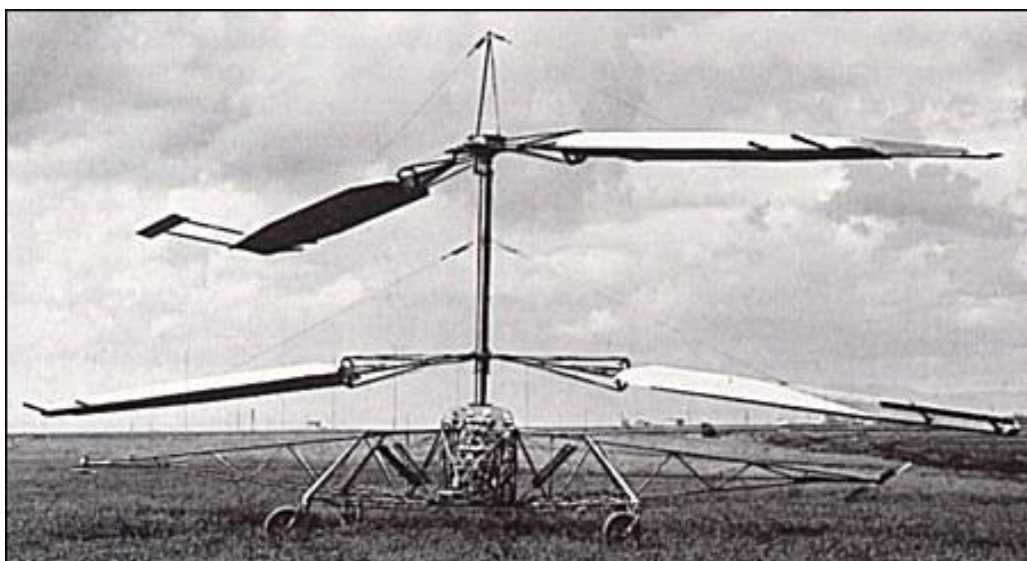


Figura 9.7 – O helicóptero de D'Ascanio (1930).

Fonte: disponível em <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/askanio.php>. Acesso em 16/03/2015.

9.3 – O HELICÓPTERO PRÁTICO

Louis Bréguet, já por volta dos seus 50 anos, decidiu retornar às pesquisas com helicópteros, uma fascinação que sempre o acompanhou. Em 1929, anunciou um conjunto de patentes que versava sobre o controle e a estabilização do voo de aeronaves de asas rotativas e, em 1931, com o engenheiro Rene Dorand, criou o "Sindicato de Estudos do Autogiro", que teve como rebento uma aeronave experimental, o "Gyroplane Laboratoire". A estrutura da aeronave foi construída em tubos de aço, aberta, em cujo interior alojavam-se motor, tanque de combustível, controles e piloto. Na parte de ré foi fixado um conjunto de superfícies estabilizadoras horizontais e verticais em madeira. O trem de pouso incluía o trem principal,

²⁶⁹ LEISHMAN, 2000.

²⁷⁰ BOULET, 1982, p. 52 e JOHNSON, 2013, p.19.

uma bequilha (roda na parte de ré), além de uma pequena roda adicional na frente para evitar *nosling-over*²⁷¹ durante o pouso.

A complicada máquina possuía um potente motor radial *Hispano-Wright* de 420 hp. Os rotores eram coaxiais e contra-rotativos, e seus eixos giravam um no interior do outro (no mesmo mastro). Cuidado adicional foi tomado na distância entre os rotores, de forma que não viessem a chocar-se em suas flexões para cima ou para baixo.²⁷² Os rotores contra-rotativos cancelavam o efeito torque um do outro. As pás, longas e delgadas, com características bem modernas, eram presas ao cubo do rotor por articulações de batimento que permitiam suas subidas e descidas, de forma a compensar a dissimetria de sustentação, bem como por articulações de arrasto ou atraso (avanço e recuo). O diâmetro dos rotores era de 16,5 m. A aeronave possuía *controle de passo cíclico*, que fazia o passo das pás variar ao longo do plano de rotação, mais passo em um dos lados significando o inverso no outro, de modo que a aeronave se deslocava após inclinação do plano de rotação para qualquer lado, até mesmo para trás. Um *controle de passo coletivo* aumentava ou diminuía o passo das pás coletivamente, de maneira a controlar a subida vertical. Para o controle de guinada, o “Laboratoire” possuía um *sistema coletivo diferencial*, no qual o aumento de passo coletivo de um rotor poderia ser aumentado mais do que o outro, gerando diferença de torque entre os dois e giro em torno do eixo vertical.²⁷³

²⁷¹ Falha durante o pouso onde a cauda da aeronave sobe e o “nariz” se choca contra o solo.

²⁷² GABLEHOUSE, 1969, p. 72.

²⁷³ GABLEHOUSE, 1969, p. 75.



Figura 9.8 – O Bréguet-Dorand “Gyroplane Laboratoire” (1935).
Fonte: GABLEHOUSE, 1969, p. 73.

A aeronave foi terminada em 1933. Após um acidente em testes de solo, o primeiro voo se deu em 26 de junho de 1935, com o piloto Maurice Claisse aos comandos. Nesta época, a aeronave atingiu inúmeros recordes pela FAI, incluindo distância percorrida em circuito fechado (44 km em 22 voltas), duração de voo (62min50 s), velocidade (120 km/h) e altitude (158 m). O início da Segunda Grande Guerra interrompeu o desenvolvimento da aeronave, fazendo com que Bréguet se voltasse para a construção de aviões bombardeiros. O “Laboratoire”, guardado após danos por testes de auto-rotação em 1939, foi destruído por um bombardeio aliado em 1943. Porém, os helicópteros não estavam mais presos ao “efeito solo” e o “Gyroplane Laboratoire” é considerado por muitos o primeiro helicóptero de sucesso, mas logo foi superado pelo alemão Focke-Achgelis Fa-61 em desempenho e possibilidades de desenvolvimento.

O professor Heinrich Focke, um dos criadores da *Focke-Wulf Flugzeugbau AG* (Companhia de Aviação Focke-Wulf), em conjunto com Gerd Achgelis, desenvolveu, em 1936 (logo, um ano após o “Laboratoire”), o Focke-Achgelis Fa-61 (comumente chamado de Focke-Wulf Fw 61). Largamente baseada na tecnologia aperfeiçoada por Juan de la Cierva para seu autogiro na década anterior, a aeronave foi para o ar em 26 de junho de 1936, com o piloto de testes Ewald Rohlf nos comandos. A aeronave utilizava a fuselagem e o motor de um popular

biplano de treinamento conhecido como Focke-Wulf Fw 44 Stieglitz. Os construtores mantiveram aberta a cabine de popa do Stieglitz, removeram as asas e as substituíram por dois grandes rotores de três pás montados em suportes tubulares de aço conectados em ambos os lados da fuselagem dianteira da aeronave, fazendo com que o Fa-61 lembrasse um autogiro com dois rotores em vez de um. Os rotores eram ligeiramente inclinados para dentro para proporcionar estabilidade lateral e as pás eram fixadas ao cubo dos rotores por meio de articulações de batimento e arrasto.²⁷⁴ Uma hélice dianteira de pás curtas não fornecia potência para o voo adiante, como num autogiro, servindo para a refrigeração do motor radial *Siemens-Halske Sh 14a* de 160 cv (119 kW) que alimentava os dois rotores através de um complicado sistema de engrenagens e eixos.²⁷⁵ A aeronave pesava completa, com combustível e piloto, 950 kg,²⁷⁶ e possuía estabilidade e controle excelentes, sendo capaz de pairar, subir, descer e mover-se para a frente e para trás.



Figura 9.9 – O Focke-Achgelis Fa-61 (1936).

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Focke-Wulf_Fw_61>. Acesso em 17/03/2015.

Como Bréguet, Focke resolveu o problema do torque utilizando dois rotores girando em direções opostas. Mas o sistema de controle do Fa-61 alcançava um novo patamar. Muito mais

²⁷⁴ LEISHMAN, 2000.

²⁷⁵ Disponível em: <<http://www.centennialofflight.net/essay/Rotary/Focke/HE5.htm>>. Acesso em 17/03/2015.

²⁷⁶ STEMPEL, 2012, p. 371.

elaborado, possuía um mecanismo (“swashplate” ou “prato oscilante”) que permitia ao piloto, através do movimento de uma alavanca, mover a aeronave na direção desejada. Ao empurrá-la para frente, o sistema fazia com que os discos dos rotores se inclinassem para a frente em conjunto, permitindo que a sustentação de ambos gerasse uma componente nesta direção. O mesmo se dava no movimento para trás. Através da variação diferencial do ângulo das pás (aumento de um lado e sua respectiva diminuição do outro), movia-se a aeronave para os lados, igualmente atuando-se sobre a alavanca para o lado desejado. Com isto, controlava-se a rolagem do aparelho. O movimento de guinada era controlado através dos pedais do leme, que inclinavam os rotores para a frente e para trás em direções opostas. O Fa-61, porém, não possuía controle de passo coletivo. A solução encontrada para realizar as subidas e descidas em voo librado consistia em um sistema que aumentava ou diminuía a sustentação dos rotores, através do aumento ou redução da velocidade de rotação das pás. Leme vertical e cauda horizontal proporcionavam estabilidade direcional.

Em maio de 1937, o Fa-61 realizou o primeiro pouso em auto-rotação, inaugurando uma importantíssima nova etapa (um novo paradigma até) no desenvolvimento em asas rotativas.²⁷⁷ O piloto Rohlfs levou a aeronave a 344 m de altitude; trouxe, então, o acelerador para “ponto morto” e, utilizando apenas a rotação das pás dos rotores, conseguiu pousar o aparelho, mostrando que um helicóptero poderia pousar em segurança mesmo no caso de falha do motor.

Considerado o primeiro helicóptero prático do mundo, capaz de voar com total controle e executar auto-rotações, o Fa-61 ganhou notoriedade ao decolar no interior do estádio Deutschlandhalle, em Berlim, Alemanha, sob o comando da piloto de testes Hanna Reitsch, na iminência da Segunda Grande Guerra (1938), a fim de demonstrar a manobrabilidade e segurança do aparelho, mesmo em áreas confinadas.²⁷⁸ O Fa-61 obteve vários recordes: tempo de voo contínuo de 1h20min; velocidade máxima de 122 km/h; autonomia de 233 km; teto operacional de 3.427 m e razão de subida de 3,5 m/s, dentre outros.²⁷⁹

O problema do Fa-61 eram as enormes estruturas estabilizadoras para suportar os rotores, e o engenheiro alemão Anton Flettner sugeriu, como alternativa para resolver a questão do torque, rotores contra-rotativos com eixos próximos e sob certo ângulo um em relação ao outro, cujas pás se intercalavam como as lâminas de uma bateadeira, tendo feito seu voo inaugural em Berlim, em maio de 1939. A aeronave passou a ser conhecida como *sincróptero*,

²⁷⁷ GABLEHOUSE, 1969, p. 75.

²⁷⁸ Disponível em: <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/fw-61.php>. Acesso em 17/03/2015 e LEISHMAN, 2000.

²⁷⁹ Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Focke-Wulf_Fw_61>. Acesso em 17/03/2015 e LEISHMAN, 2000.

tendo sido desenvolvida posteriormente por outros construtores, principalmente a *Kaman Aircraft*.



Figura 9.10 - O sincróptero Flettner Fl 282 Kolibri (1940).

Fonte: disponível em <<http://www.luftwaffe39-45.historia.nom.br/aero/fl282.htm>>. Acesso em 19/03/2015.

Em 1939, Igor Sikorsky novamente voltou sua atenção para os helicópteros, quando era Gerente de Engenharia da *Divisão Vought-Sikorsky* da *United Aircraft Corporation*. Após os insucessos de 1909 e 1910, dedicou-se à construção de aviões, desenvolvendo aeronaves com múltiplos motores para o Czar russo, que foram usadas como bombardeiros na Primeira Grande Guerra. Já tendo emigrado para os Estados-Unidos, fundou, em 1923, a *Sikorsky Aero Engineering Corporation*. Nos anos seguintes, construiu grandes hidroaviões, dentre eles o famoso VS-44, primeiro avião de passageiros a atravessar o Atlântico sem escalas.

O primeiro helicóptero de Sikorsky foi o VS-300. Projetado e construído no primeiro semestre de 1939, decolou em sua primeira versão no dia 14 de setembro, ainda preso ao solo, com Sikorsky aos comandos. Pesos foram presos na parte de baixo do aparelho para mantê-lo estável. Na época já se encontrava motores com potência suficiente para o voo vertical e a aeronave era alimentada por um motor de 4 cilindros *Lycoming* de 75 hp. Possuía um rotor principal com controle de passo cíclico e um pequeno rotor de cauda para compensar o torque, numa configuração hoje clássica, que lembrava a concepção de 1912 de Boris Yuriev. As pás eram fixadas ao cubo do rotor por articulações de batimento.

A aeronave mostrou-se instável, particularmente devido ao sistema de controle do rotor de cauda, bem como o do passo cíclico. O primeiro voo livre deu-se em 13 de maio de 1940, já com um motor *Franklin* de 90 hp. Dois anos de tentativas foram gastos no aperfeiçoamento da

aeronave, que chegou a ter dezoito versões. O VS-300 passou, então, a contar com três rotores de cauda, um vertical e dois horizontais, estes últimos presos a suportes na extremidade de uma estrutura em “V”. O controle da quantidade de sustentação para o “hover” se dava através da alteração do passo das três pás do rotor principal, de 4,3 m de raio. Controle longitudinal e lateral eram obtidos por meio da variação de passo dos rotores de cauda horizontais, através de uma alavanca,²⁸⁰ e o controle de guinada e anti-torque pelo controle de passo do rotor de cauda vertical, através de pedais. A estrutura da aeronave era aberta e confeccionada em tubos de aço.

O VS-300 podia hoverar, voar para frente, para trás e para os lados, além de executar manobras. Em 6 de maio de 1941 o VS-300 bateu o recorde de permanência no ar, que pertencia ao Fa-61, com o tempo de 1h32min26s.

Várias modificações foram executadas no aparelho em 1940/41, sendo a principal delas a substituição dos suportes verticais da cauda por um pequeno *pylon*, no qual se instalava um único rotor de cauda vertical. O controle de passo cíclico do rotor principal foi aperfeiçoado, ficando totalmente satisfatório. Na sua versão final, o VS-300 possuía um motor *Franklin* de 150hp, uma fuselagem coberta por tecido e um trem de pouso triciclo.



Figura 9.11 – O Vought-Sikorsky VS-300 (1939).

Fonte: disponível em <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/sik_vs-300.php>. Acesso em 19/03/2015.

Os primeiros helicópteros práticos, capazes de realizar manobras de forma satisfatória como decolagem vertical e pouso, pairar, voar para a frente, para trás e para os lados, foram o “Gyroplane Laboratoire” e o Fa-61. O VS-300 foi mais longe, podendo ser considerado o

²⁸⁰ Movendo-se a alavanca para frente e para trás, o passo dos rotores de cauda horizontais variavam simultaneamente na mesma direção, de forma a obter controle longitudinal, como nos profundos em um avião. Para o controle lateral, o passos destes rotores variava diferencialmente, como nos ailerons.

primeiro helicóptero de sucesso com apenas um rotor principal, fato que permitiu não apenas simplicidade nos mecanismos para obtenção de sustentação e controle, necessários a um voo estável, mas também a facilidade e o barateamento da manutenção, com redução do custo, o que abriu caminho para a produção industrial de helicópteros, para os mais diversos tipos de emprego, transformando o VS-300 no arquétipo do helicóptero moderno.

10 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

“Jamais poderás encontrar os limites da alma, por mais que percorras seus caminhos, tão profundo é o seu logos”.

Heráclito.

“A necessidade ensina o sapo a pular”.
Anônimo.

10.1 – CRÍTICAS DA ÉPOCA

Críticas e objeções foram feitas, na época, ao helicóptero de Santos-Dumont e ao seu projeto. Um dos principais críticos era o próprio Ernest Archdeacon, amigo do inventor, que acreditava em duas hipóteses: que o aparelho ou seria leve o bastante para ser suspenso pelos rotores, porém frágil e, então, se quebraria ou que seria mais robusto e pesado, o que impediria que saísse do solo. Archdeacon também acreditava que as transmissões absorveriam grande parte da potência do motor, de modo que os 9 cv previstos para acionarem cada rotor não corresponderiam à realidade.

Os experientes irmãos Dufaux também fizeram objeções ao projeto. Alegavam que era impossível para Santos-Dumont construir tal máquina com o peso divulgado, pois

(...) quando se deduz o peso do motor (35 kg), as grandes hélices horizontais (18 kg), e Santos-Dumont (54 kg) do peso total declarado (160 kg), apenas 53 kg (116,84 libras) permanecem para toda a estrutura da máquina, a hélice vertical, quatro engrenagens cónicas, duas polias, duas rodas de bicicleta, duas correias, e dois fortes eixos de transmissão de potência (tradução nossa).²⁸¹

Acreditavam que Santos-Dumont se equivocara para menos quanto aos pesos dos equipamentos e da estrutura, que avaliaram da seguinte forma, aceitando que o motor pesava 35 kg e que os rotores principais perfaziam apenas 18 kg (9 kg cada):²⁸²

- o quadro com sua armação de cabos de aço (cordas de piano) – 50 kg;

²⁸¹ “(...) when one deducts the weight of the motor (35 kilogrammes), the large horizontal propellers (18 kilogrammes), and Santos-Dumont (54 kilogrammes) from the total stated weight (160 kilogrammes), only 53 kilogrammes (116,84 pounds) remain for the entire framework of the machine, the vertical propeller, four bevel gears, two pulleys, two bicycle wheels, two belts, and two strong power-transmitting shafts.” (RAMAKERS, 1906, p. 130).

²⁸² RAMAKERS, 1906. LAGRANGE, 1906 informa o peso de 8,5 kg para cada rotor.

- eixos de transmissão, engrenagens, correias, rodas de bicicleta e demais equipamentos (transmissão) – 40 kg;
- acessórios do motor, como bobina de ignição, baterias, tanque de gasolina e demais relacionados – 15 kg;

Somando-se o peso de Santos-Dumont (para eles estimado em 54 kg), a aeronave teria um peso total de 212 kg, diferente do estimado anteriormente, de 170 kg.

Caso os Dufaux estivessem corretos, a potência necessária para elevar a aeronave em efeito solo seria próxima da calculada abaixo, utilizando os mesmos parâmetros de eficiência das correias e Figura de Mérito.

Utilizando a fórmula (III) da p.149, obteríamos:

$$P_i = 2 \left(\frac{\left(\frac{2079,72}{2} \right)^{3/2}}{\sqrt{2} \cdot 1,225 \cdot 28,26} \right) = 8058,78 \text{ Watts} = 10,81 \text{ hp},$$

$$P_{aero} = 10,81/0,5 = 21,62 \text{ hp}$$

$$P_{real} = 21,62/0,75 = 28,83 \text{ hp}$$

Ou seja, a potência real necessária ultrapassaria em pouco o limite máximo de potência do motor utilizado por Santos-Dumont, o que o tornaria insuficiente para a decolagem, considerando-se mesmo a inexistência de ventos fortes ou outros quaisquer fatores que pudessem influenciar a eficiência do aparelho nas especificações planejadas.

Os Dufaux também acreditavam que as perdas na transmissão seriam grandes e que o motor não conseguiria entregar a cada rotor os 9 hp previstos, mas somente 15 hp no total, que dariam sustentação necessária a uma massa de apenas 150 kg. Segundo sua avaliação, a potência entregue seria deficitária para os 62 kg restantes. Alegavam, ainda, que Santos-Dumont não levava em conta a resistência ao ar oferecida pelo aparelho, bem como pela hélice tratora, deixando de prever reserva de potência para estes fatores em seus cálculos.

Alertaram, também, para uma tendência à inclinação da aeronave, uma vez acionada a hélice tratora após a decolagem, ou seja, apontaram para o efeito torque gerado por esta hélice, independente das compensações mútuas dos rotores contra-rotativos.

Quanto ao risco de perigo por perda de motor, o autor do artigo da *Scientific American*²⁸³ deixou a informação pouco clara de que Santos-Dumont alegava nada haver a temer, em face do movimento dos rotores não ser imediatamente detido em tal situação, agindo os rotores como paraquedas. Lembremo-nos que a ideia de Santos-Dumont era voar dentro do “efeito solo”, no máximo a 3 m do solo. Mas não havia, no projeto, sistema de roda-livre, desconectando a transmissão do motor em caso de falha deste. Como os rotores eram ligados a rodas de bicicleta por fios de treinamento e as rodas ao sistema de correias e polias, não fica claro como os rotores manteriam por algum tempo sua rotação.

Tanto os Dufaux quanto Archdeacon acreditavam que os esforços e os talentos de Santos-Dumont seriam melhor aproveitados no desenvolvimento do avião. Archdeacon tinha essa visão não só por questões de projeto do helicóptero, mas também por entender que o avião era o aparelho a ser buscado, por sua comodidade e velocidade de translação previstas. Já os Dufaux, numa visão mais técnica, sabiam que era ainda muito incipiente o conhecimento da dinâmica de rotores e o desenvolvimento de hélices sustentadoras eficientes.

10.2 – CONCLUSÕES

Tendo revisto um pouco da história da aviação, mais propriamente no que se refere ao voo vertical, assim como aspectos da vida e da tecnologia dos inventos de Alberto Santos-Dumont, bem como seu projeto para um helicóptero, sua motorização, aerodinâmica e vibrações e, em face de nossas colocações e pressupostos iniciais, pudemos constatar o seguinte:

- 1- Santos-Dumont decidiu construir um helicóptero não só devido ao Prêmio Deutsch-Archdeacon, mas basicamente por ter percebido uma mudança de foco dentre os aeronautas da época, dos dirigíveis para o mais-pesado-que-o-ar, assim como para não perder a primazia como inventor aéreo, em face das notícias vindas da América em relação ao trabalho dos irmãos Wright e dos experimentos de seus pares europeus com asas rotativas;
- 2- Santos-Dumont era capaz de mudar seu modelo mental, de forma a projetar, construir e pilotar diferentes modelos de aeronaves, não ficando preso a um modelo único, como os demais aeronautas (fora poucas exceções), ganhando experiência em navegação aérea pela experimentação, o que envolvia altos riscos pessoais;

²⁸³ RAMAKERS, 1906, p. 130.

- 3- Apresentou grandes inovações em dirigíveis, principalmente pela introdução, com segurança e sucesso, do motor a explosão associado a balão de hidrogênio, além de materiais mais leves na composição dos aeróstatos;
- 4- Era autodidata e obtinha soluções em aviação mais por experimentação do que através de estudos teóricos, principalmente em aerodinâmica;
- 5- Buscava soluções simples, leves e eficientes, a maioria delas compilação adequada e melhorada de soluções anteriores de outros inventores, evitando os riscos e os erros destes, bem como os seus próprios. Reunia, em si, as diversas correntes que buscavam o voo seguro e controlado, bem como o conhecimento técnico da época;
- 6- Buscou aplicar tais soluções à concepção de um helicóptero, tendo desistido após sua construção.

Da análise do helicóptero de Santos-Dumont, concluímos que:

- 1- A motorização era suficiente para impulsionar os rotores sob efeito solo, com pequena reserva de potência, isto considerando os dados fornecidos pelo próprio Santos-Dumont;
- 2- A aeronave proposta era deficiente quanto à rigidez da estrutura e aerodinâmica dos rotores, bem como na confecção das pás, em face do material utilizado e da falta de previsão de correta distribuição dos esforços ao longo das mesmas;
- 3- Não havia previsão de mecanismos capazes de dar conta dos efeitos da dissimetria de sustentação e da precessão giroscópica, bem como de mecanismos que proporcionassem o controle dos passo cíclico e coletivo das pás dos rotores;
- 4- Há grande probabilidade de que fosse sujeito a vibrações que causassem danos estruturais ainda no solo ou logo após a decolagem.

Santos-Dumont buscou usar as melhores soluções compartilhadas na época para a solução do voo do helicóptero, como rotores em tandem contra-rotativos, para evitar o efeito torque, ligados as rodas de bicicletas, estas acionadas por polias ligadas por eixos a um motor. Não há, na bibliografia pesquisada, informações apontando que Santos-Dumont teve a preocupação em desenvolver mecanismos capazes de fornecer passo às pás, o que é de extrema importância, em face dos avanços dos contemporâneos Paul Cornu, Charles Renard e os Dufaux. No entanto, desenvolveu uma interessante solução para o leme de direção de sua aeronave, que aproveitava, em diversas inclinações, o fluxo descendente de ar de um dos rotores.

Podemos afirmar que o estudo da aerodinâmica de rotores era ainda incipiente na época, assim como o desenvolvimento de materiais adequados aos esforços e performances requeridos;

e estes motivos (que certamente levaram ou levariam a um insucesso do helicóptero), somados ao incentivo dos colegas aeronautas visando ao desenvolvimento do avião, bem como uma maior facilidade tecnológica de construção de aeronaves de asas fixas, em nosso entendimento, levaram Santos-Dumont ao abandono do projeto do helicóptero em prol do que viria a ser o seu grande marco: o primeiro voo autopropulsado e homologado da história, com o 14bis.

Referências

- ANACpedia. Disponível em <<http://www2.anac.gov.br/anacpedia/>>. Acesso em: jun. 2015.
- ANDERSON, John David. **A history of aerodynamics and its impact on flying machines**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2001.
- _____. **Modern compressible flow: with historical perspective**. New York: McGraw-Hill Book Co., 1982.
- AIMÉ, Emmanuel. Portraits d'aéronautes contemporains: Alberto Santos-Dumont. **L'Aérophile**, Paris, 9^e Année, n. 4, p. 69-86, avril 1901.
- _____. Le Santos-Dumont N^o 5. **L'Aérophile**, Paris, 9^e Année, n. 8, p. 181- 206, août 1901.
- BARROS, Henrique Lins de. **Desafio de voar: brasileiros e a conquista do ar 1709-1914**. São Paulo: Metalivros, 2006.
- _____. **Santos-Dumont e a invenção do voo**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2003.
- BILSTEIN, Roger E.. **Flight in America: from the Wrights to the astronauts**. 3. ed. Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins University Press, 2001.
- BIM, Edson. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus: Elsevier, 2012.
- BORELLI, Giovanni Alphonsi. **De motu animalium**. Roma: ex typographia Angeli Bernarbò, 1680. Disponível em: <<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k512312.r=De+motu+animalium+Giovanni+Alphonsi.la ngPT>>. Acesso em: 02 set. 2015.
- BOULET, Jean. **L'Histoire de l'Hélicoptère racontée par ses pionniers 1907-1956**. Paris: Éditions France-Empire, 1982.
- BRADY, Tim. **The American aviation experience: a history**. United States of America: Southern Illinois University Press, 2000.
- CAYLEY, Sir George, **On Aerial Navigation, Part 1**, September 6, 1809. Reprinted from Nicholson's Journal of Natural Philosophy, November, 1809. Disponível em: <<http://invention.psychology.msstate.edu/inventors/i/Cayley/CayleyP1.html>>. Acesso em: 07 set. 2011.
- CHANUTE, Octave. **Progress in Flying Machines**. New York: Dover ed., 1997. Originally published: New York: American Engineer & Railroad Journal, 1894.
- CLERMONTTEL, Danièle; CLERMONTTEL, Jean-Claude. **Chronologie scientifique, technologique et économique de la France**. Paris: Éditions Publibook, 2009.
- CORNU, Paul. L'Hélicoptère Paul Cornu: Construction et Essais. **L'Aérophile**, Paris, 16^e Année, n. 8, p. 138-141, 15 avril 1908.
- CROUCH, Tom D.. **Asas**. Rio de Janeiro: Record, 2008.
- CROUCHER Phil. **Professional Helicopter Pilot Studies**. JAA Version. 2006, 2007, 2008.
- _____. **Private Helicopter Pilot Studies**. Electrocuton Technical Publishers, 2014.
- DERRY, Thomas Kingston; WILLIAMS, Trevor I.. **A short history of technology: from the earliest times to A.D. 1900**. New York: Oxford University Press, 1961.

DOLE, Charles E.; LEWIS, James E. **Flight Theory and Aerodynamics: A Practical Guide for Operational Safety**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

DOOLEY, Sean C.. **The Development of Material-Adapted Structural Form**. Suisse: École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, 2004. 194 f. Thèse (Doctorat em Sciences) - Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit - Institut de Structures, Section d'Architecture. Thèse n° 2986, 2004. Disponível em: <http://infoscience.epfl.ch/record/33458/files/EPFL_TH2986.pdf>. Acesso em: 01 set. 2015.

Encyclopaedia Britannica online. Disponível em: <<http://www.britannica.com/>>. Acesso em: 29 jan. 2015.

FAY, John. **The Helicopter: History, Piloting and How It Flies**. United States of America: David & Charles Inc, 1976.

FARNDON, John et al. **Engineers: from the great pyramids to the pioneers of space travel**. New York: D K Publishing, 2012.

FIGUIER, Louis. **Les Aérostats**. Paris: Librairie Furne, Jouvet et Cie éditeurs, 1887.

FILGUEIRAS, Carlos Alberto Lombardi. Bartolomeu de Gusmão – um Eco da Revolução Científica no Brasil Colonial. In: GOLDFARB, A. M.; MAIA, C. A. (Org.). **História da Ciência: o Mapa do Conhecimento, Expressão e Cultura**. São Paulo: Edusp, 1995.

GABLEHOUSE, Charles. **Helicopters and Autogiros**. Philadelphia and New York: J. B. Lippincott Company, 1969.

GAMA, Ruy. A tecnologia em questão. **Revista USP**, São Paulo, setembro, outubro, novembro, p. 43-48, 1990. Disponível em: <<http://www.usp.br/revistausp/07/06-ruy.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2014.

GRAEBEL, William P.. **Engineering Fluid Mechanics**. New York: Taylor & Francis, 2001.

HALLION, Richard, P. **Taking flight: inventing the aerial age from antiquity through the First World War**. New York: Oxford University Press, Inc., 2003.

HILDEBRANDT, A. **Airships Past and Present**. Trad. W. H. Story. London: Archibald Constable & Co. Ltd., 1908.

HIRSCHEL, Ernst Heinrich; PREM, Horst; MADELUNG, Gero. **Aeronautical research in Germany: from Lilienthal until today**. Germany: Springer-Verlag, 2004.

HOFFMAN, Paul. **Asas da Loucura: A extraordinária vida de Santos-Dumont**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2004.

JOFFILY, Kleber. **Aerodinâmica do helicóptero: teoria de voo, conhecimentos técnicos**. Curitiba: s.c.p, 2000.

JOHNSON, Wayne. **Helicopter Theory**. United States: Dover, 1994. Reprint of the Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1980 edition.

_____. **Rotorcraft Aeromechanics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

LAMBERMONT, Paul Marcel; PIRIE, Anthony. **Helicopters and autogyros of the world**. South Brunswick: Barnes, 1970.

LANDELLE, Gabriel de la. **Aviation ou navigation aérienne sans ballons**. Paris: E. Dentu, 1863.

LAGRANGE, L. Santos-Dumont Aviateur. **L'Aérophile**, Paris, 14^e Année, n. 1, p. 26-29, janvier 1906.

LE ROY, Thierry. L'hélicoptère: une invention prometteuse au XIX^e siècle. **Pour la Science, Les génies de la science**, n^o 31, mai-juillet 2007. Disponível em: <http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/article-l-helicoptere-une-invention-prometteuse-au-xixe-siecle-21031.php>. Acesso em: 07 jan. 2015.

LEISHMAN, J. Gordon. **A History of Helicopter Flight**. College Park, University of Maryland, 2000. Disponível em: <http://www.itlims.meil.pw.edu.pl/zsis/pomoce/SSR/A_History_of_Helicopter_Flight.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2015.

_____. **The Bréguet-Richet Quad-Rotor Helicopter of 1907**. Disponível em: <http://www.academia.edu/815361/The_breguet-richet_quad-rotor_helicopter_of_1907>. Acesso em: 07 abr. 2015.

LEISHMAN, J. Gordon; JOHNSON, Bradley. **Engineering Analysis of the 1907 Cornu Helicopter**. University of Maryland, College Park, MD 20742 : Glenn L. Martin Institute of Technology, Department of Aerospace Engineering, 17/11/2007. Disponível em: <http://www.helicopter-history.org/Cornu/Cornu_LJpaper.pdf>. Acesso em: jan. 2015.

Les concours d'aviation. **L'Aérophile**. Aéroclub de France, Paris, 12^e Anée, n. 10, p. 223-225, octobre, 1904.

LIENHARD, John H.. **Inventing modern: growing up with x-rays, skyscrapers, and tailfins**. New York: Oxford University Press Inc., 2003.

MASFRAND, A. de. L'Hélicoptère des Frères Dufaux. **L'Aérophile**, Paris, 13^e Année, n. 5, p. 97-104, mai 1905.

MCFARLAND, Marvin W. **The Papers of Wilbur & Orville Wright, Including the Chanute-Wright Papers: 1899-1905**. Blacklick, Ohio, U.S.A.: McGraw-Hill, 2001.

MEDEIROS, Alexandre. **Santos Dumont e a Física do Cotidiano**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006a.

_____. A busca da liberdade e a educação básica de Santos Dumont. **Física na Escola**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 29-32, 2006b. Disponível em <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol7/Num2/v13a05.pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2014.

MENSHUTKIN, Boris Nicolaevich. **Russia's Lomonosov: Chemist, Courtier, Physicist, Poet**. USA: Princeton University Press, 1952.

MEUNIER, M. Victor (rédacteur en chef). **Cosmos: revue encyclopédique hebdomadaire des progrès des sciences 3^e Série – tome II**. Paris: A La Librairie Germer Baillière, 1868, 1^{er} semestre.

MEYER, JR, Robert B. **Langley's Aero Engine of 1903**. Washington: Smithsonian Institution Press, 1971. Disponível em: <http://www.sil.si.edu/smithsoniancontributions/AnnalsofFlight/pdf_hi/SAOF-0006.pdf>. Acesso em: 20 out. 2013.

MONDEY, David. **Nova Enciclopédia Ilustrada da Aviação**. Lisboa: Editorial Estampa, Lda., 2001.

MOORE, Alvin Edward. Will the helicopter become the future flying machine? **Popular Aviation**, Chicago, v. 14, n. 1, p. 8-9, 1934.

MURADAS, Duane Quireza. **Os Projetos de Santos=Dumont: Balões, Dirigíveis, Helicópteros e Aeroplanos**. Disponível em:

<<http://www2.anac.gov.br/certificacao/Diversos/Portug/SantosDumont-02.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2014.

NEEDHAM, Joseph. **Science & Civilization in China**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2000, Vol. IV: 2.

NEWTON, Isaac Sir. **Mathematical Principles of Natural Philosophy** (translated from the third edition in 1729 by Andrew Motte and revised by Florian Cajori). Berkeley, CA: University of California Press, 1960.

PAUCTON, Alexis-Jean-Pierre. **Théorie de la vis d'Archimède, de laquelle on déduit celle des Moulins conçus d'une nouvelle manière. On y joint la Construction d'un nouveau Lock ou Sillometre, et celle d'une sorte de Rames très-commode, etc. De plus, une dissertation sur la Résistance des Bois, et les Tables nécessaires, dressées d'après les Expériences de MM. de l'Académie des Sciences**. Paris: J.H. Butard Imptimeur-Libraire, 1768. Disponível em: <<http://hydraulica.grenet.fr/items/show/30>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

PÉNAUD, Alphonse. Aeroplane Automoteur: Équilibre Automatique. **L'Aéronaute**, Paris, 5^e Année, n. 1, p. 2-9, Janvier 1872.

PETRESCU, Rely Victoria; PETRESCU, Florian Ion. **The Aviation History**. Nordestedt: Books on DemandGmbH, 2012-2013.

PEYREY, François. **Les Oiseaux Artificiels**. Paris: H. Dunod et E. Pinat, Éditeurs, 1909.

RABINOWITZ, Harold. **Conquer the Sky: Great Moments in Aviation**. New York: MetroBooks, 1996.

RAMAKERS, L. The Hélicoptère: Santos-Dumont Latest Flying Machine. **Scientific American**, New York, v. 94, n. 6, p. 129-130, February 10, 1906.

ROLLAND, Jacques-Francis. **Historama: a grande aventura do homem**. Buenos Aires. Editora Códex Ltda., v. 11, 1972.

ROSS, JR., Frank. **Flying Windmills: The Story of the Helicopter**. London: Museum Press, 1956.

Rotorcraft Flying Handbook. U.S. Department of Transportation: Federal Aviation Administration - Flight Standards Service, 2000.

SANTOS DUMONT, Alberto. **Os Meus Balões (Dans L'air)**. Tradução de A. de Miranda Bastos. Fundação Projeto Rondon – MINTER, Ministério da Aeronáutica, 1986.

_____. **O que eu vi, o que nós veremos**. São Paulo: Hedra, 2000.

SCIENTIFIC AMERICAN. New York, v. 93, n. 17, October 21, 1905. Disponível em: <<https://archive.org/details/scientific-american-1905-10-21>>. Acesso em: 28 out. 2014.

SEDDON, J. **Basic Helicopter Aerodynamics**. Oxford: BSP Professional Books, 1990.

SPINNELLI, Crocé. Du meilleur propulseur applicable a la navigation aérienne. **L'aéronaute**, Paris, 3^e Année, n. 4, p. 49-61, avril, 1870.

STEMP, P.D. **Kites, Birds & Stuff: German Aircraft, v. 2** – E to H. LULU Author, 2012.

STRATHERN, Paul. **O sonho de Mendeleiev: a verdadeira história da química**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2002.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS & AMERICAN HELICOPTER SOCIETY: **A National Historic Engineering Landmark: VS-300 Helicopter (1939)**. U.S.A.: Cristal City, Virginia, May 17, 1984.

TISSANDIER, Gaston. **Histoire des ballons et des aéronautes célèbres 1783-1800 [1801-1890]**. Paris: Launette e Cie., 1887-1890.

_____. **La navigation aérienne: l'aviation et la direction des aérostats dans les temps anciens et modernes**. Paris: Librairie Hachette et Cie, 1886.

VAICBERG, Leonardo. Sir George Cayley: a paternidade da “navegação aérea” e as forças nos aerofólios. In: **Congresso Scientiarum Historia IV (Livro de Anais)**: 19 a 21 de outubro de 2011. Rio de Janeiro, 2011, p. 422-428. Disponível em: <<http://www.hcte.ufrj.br/downloads/sh/sh4/trabalhos/Leonardo%20Vaicberg.pdf>>. Acesso em: fev. 2014.

VAN RIPER, A. Bowdoin. **A biographical encyclopedia of scientists and inventors in American film and tv since 1930**. United Kingdom: Scarecrow Press, Inc., 2011.

VASCONCELLOS, Amadeu de. **Actualidades Scientificas III: A Aeroestação**. Porto: Livraria Portuense de Lopes & C.a – Successor, 1908.

VIEIRA, Boanerges; SERAPIÃO, Antonio Carlos de Souza. **Aerodinâmica de helicópteros**. Rio de Janeiro: Ed. Rio: Universidade Estácio de Sá. Departamento de Pesquisa, 2003.

VISONI, Rodrigo Moura; CANALLE, João Batista Garcia. Como Santos Dumont inventou o avião. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, 2009.

VIVIAN E. Charles. **A History of Aeronautics**. New York: Harcourt, Brace and Company, 1921.

WEBB, Janeen; DANN, Jack. Lawrence Hargrave: unheralded aeroplane pioneer. **Omni Magazine**, v. 17, n. 4, January, 1995. Disponível em <<https://archive.org/details/omni-magazine-1995-01>>. Acesso em: 10 set. 2015.

WENHAM, Francis Herbert. **On Aerial Locomotion and the Laws by which Heavy Bodies impelled through Air are Sustained**. Paper read at the first meeting of the Aeronautical Society of Great Britain, held on the 27th day of June, 1866. His Grace the Duke of Argyll in the Chair. Disponível em: <<http://invention.psychology.msstate.edu/library/Wenham/WenhamLocomotion.html>>. Acesso em: 03 out. 2013.

YOUMANS, William Jay. Evolution of the Storage Battery. **Appletons' Popular Science Monthly**. New York: D. Appleton and Company, v. XLIX, p. 716, May to October, 1896.

YOUNG, Rosamond McPherson; FITZGERALD, Catharine. **Twelve seconds to the moon: a story of the Wright brothers**. 2. ed. United States Air Force Museum Foundation, 1983.

Glossário

Aeródinos - designação genérica das aeronaves mais pesadas que o ar, cuja sustentação provém principalmente das forças aerodinâmicas produzidas por asas fixas (aviões) ou asas rotativas (helicópteros, girocópteros, etc.). Se movimentam no ar devido a uma força motriz, produzida por hélices, rotores ou turbinas. São aeronaves baseadas na Lei da Ação e Reação (3ª Lei de Newton).

Aerostação - voo com aeróstatos e seu estudo.

Aeronave - é todo aparelho capaz de se sustentar e navegar no ar. As aeronaves se classificam em aeróstatos e aeródinos.

Aeróstatos - são aeronaves baseadas no *Princípio de Arquimedes* da Física e vulgarmente conhecidas como “veículos mais leves que o ar”, como balões e dirigíveis. A atividade relacionada ao voo e ao estudo dos aeróstatos é levada a cabo por um ramo da Aeronáutica chamado Aerostação. Nos aeróstatos, o piloto só controla o empuxo da aeronave, com exceção do dirigível, que possui leme(s) e motopropulsor(es).

Ângulo de ataque - ângulo formado entre a corda do aerofólio ou da asa e o fluxo de ar (direção do movimento relativo do ar). A variação do passo altera o ângulo de ataque das pás (helicóptero).

Ângulo de cone - é o ângulo formado pelo plano de rotação das pás com sua flexão para cima.

Área de disco - área do disco formado pelas pontas das pás do rotor em movimento (helicóptero).

Autogiro (ou giroplano) - aeronave de asas rotativas, cujo rotor não é acionados pelo motor; o rotor gira por efeito da reação dinâmica do ar, quanto o aparelho se desloca em voo. Para a propulsão do autogiro usualmente são empregadas hélices convencionais, independentes do conjunto rotor.

Arrasto - resistência do ar ao movimento do aparelho ou, mais apropriadamente, a força que resiste ao movimento para a frente de um corpo imerso em um fluido.

Arrasto induzido - arrasto causado pelo fluxo de ar na ponta das asas ou das pás dos rotores da região de maior pressão para a de menor pressão, gerando vórtices.

Asa cantilever - asa fixada à fuselagem sem suportes (montantes) externos.

Braço girante - dispositivo rotativo pioneiro, antecessor do túnel de vento, utilizado para medir forças em superfícies, principalmente sustentação e arrasto, os quais eram, então, registrados.

As superfícies a ser estudadas, de diversos formatos e inclinações (mesmo asas de pássaros), eram fixadas na extremidade de um braço (ou braços) em madeira na posição desejada para estudo. O(s) braço(s) era(m) fixados(s), na outra extremidade, a um eixo livre para girar, normalmente acionado pela queda de um peso ligado a uma corda enrolada ao eixo. Foi empregado pela primeira vez por Benjamin Robins (1707-1751), engenheiro militar e matemático britânico, um dos fundadores da balística.

Carga alar - peso bruto da aeronave dividido pela área criada pelo disco do rotor.

Centro de Gravidade (C.G.) - o centro de gravidade de um corpo é o ponto de aplicação da resultante de todas as forças que pesam no corpo, para qualquer posição dele.

Centro de Pressão - ponto de interseção da resultante das forças aerodinâmicas que atuam sobre um corpo com a corda do perfil. Sua localização é dada em percentagem do comprimento da corda, a partir do bordo de ataque.

Cinematógrafo - antigo aparelho destinado a registrar e depois projetar imagens em movimento.

Corda - distância entre o bordo de ataque e o bordo de fuga de um aerofólio (asa por exemplo).

Cubagem - capacidade em m^3 de gás.

CV (cavalo-vapor) - medida de potência mecânica. Corresponde a 0,99 hp e a 735,5 Watts.

Efeito de superfície livre - quando um reservatório com líquido recebe uma inclinação, o centro de gravidade do líquido não permanece na mesma posição em que estava com o reservatório sem inclinação. Ele se move, afetando a estabilidade do conjunto. Quando o reservatório está completamente cheio, a posição do centro de gravidade do líquido não muda.

Efeito Solo - significa o aumento de sustentação produzido pela reação ao deslocamento do ar quando uma aeronave paira ou se desloca próximo ao solo. Considera-se um helicóptero sob este efeito quando o aparelho se mantém em uma altura em relação ao solo equivalente ao raio de seu rotor principal.

Efeito Torque - tendência que qualquer motor (logo a estrutura da aeronave à qual está afixado) tem de rodar sobre si mesmo em sentido contrário à rotação do eixo a que dá movimento.

Elevador (ou profundor ou timão de profundidade) - aerofólio auxiliar, geralmente articulado ao estabilizador horizontal, e cuja função é imprimir um movimento de arfagem à aeronave (avião).

Envergadura - a maior distância entre as pontas das asas de um avião ou o comprimento de uma pá de helicóptero.

Estabilidade Direcional - estabilidade em torno do eixo vertical, de forma que, estando a aeronave em voo reto e nivelado, permaneça em sua proa, mesmo que o piloto tire suas mãos e

pés dos controles. O estabilizador vertical é a superfície primária que controla a estabilidade direcional. Quando uma aeronave sofre uma glissada ou uma guinada, o estabilizador vertical sofre uma alteração no ângulo de ataque, com uma mudança resultante na sustentação (não confundir com a sustentação criada pelas asas). A mudança na sustentação, ou força lateral, sobre o estabilizador vertical, cria um momento de guinada sobre o centro de gravidade, o qual tende a retornar a aeronave à sua trajetória original.

Estabilidade Lateral - o movimento em torno do eixo longitudinal da aeronave é um movimento lateral ou de rolamento. A tendência de retornar para a atitude original é chamada estabilidade lateral. A estabilidade lateral de uma aeronave envolve considerações sobre o momento de rolamento devido à glissada. Uma glissada tende a produzir os movimentos tanto de rolagem quanto de guinada. Se uma aeronave tem um momento de rolamento favorável, uma guinada tende a retornar a aeronave para a atitude de voo nivelado. A superfície principal, em termos de contribuição para a estabilidade lateral de uma aeronave, é a asa. O efeito da geometria do diedro de uma asa é uma contribuição em potencial para a estabilidade lateral. Uma asa com diedro desenvolve momentos de rolagem estáveis com glissada. Com vento relativo lateral, a asa do lado do vento está sujeita a um aumento do ângulo de ataque, e desenvolve um aumento de sustentação. A asa contrária à direção do vento está sujeita a uma diminuição do ângulo de ataque e desenvolve menos sustentação. As mudanças na sustentação produzem um momento de rolagem que tende a levantar a “asa contra o vento”.

Estabilidade Longitudinal - estabilidade em torno do eixo lateral, ou seja: quando uma aeronave tende a manter um ângulo de ataque constante com relação ao vento relativo, não tendendo a jogar seu nariz para baixo e mergulhar ou levantar seu nariz e perder velocidade, diz-se que ela possui estabilidade longitudinal. Estabilidade longitudinal se refere ao movimento de arfagem. O estabilizador horizontal é a superfície primária que controla a estabilidade longitudinal. A ação do estabilizador depende da velocidade e do ângulo de ataque da aeronave. Se uma aeronave muda seu ângulo de ataque, ocorre uma mudança na sustentação no centro aerodinâmico (centro de pressão) do estabilizador horizontal. O fluxo de ar sobre o estabilizador horizontal cria uma força, a qual empurra a empenagem para cima ou para baixo. Quando, devido às condições presentes, o fluxo de ar cria forças iguais para cima e para baixo, dizemos que as forças estão em equilíbrio. Essa condição é geralmente encontrada em voo nivelado e em vento calmo.

Estol - condição onde um aerofólio ou avião perde sua sustentação útil devido à sua posição em relação ao vento relativo ou por operação em um ângulo de ataque maior do que aquele de máxima sustentação. Ocorre uma perda da velocidade de voo e, em muitos casos, perda

temporária ou total da sustentação e do controle da aeronave. Os filetes de ar que circundam e sustentam o aerofólio entram em turbulência, reduzindo o valor total da sustentação e provocando a queda brusca do aerofólio ou do avião no espaço.

Força centrífuga - movimento para fora de um objeto ou corpo em rotação que tende a afastá-lo do centro de rotação. É uma “força fictícia”.

Força centrípeta - força que atua numa direção que é contrária àquela da força centrífuga, ou seja, atua no sentido do centro de rotação.

Força G - força devida à aceleração da gravidade. Pode aumentar muito em decorrência de manobras com a aeronave, devido à tendência da massa em manter sua direção original.

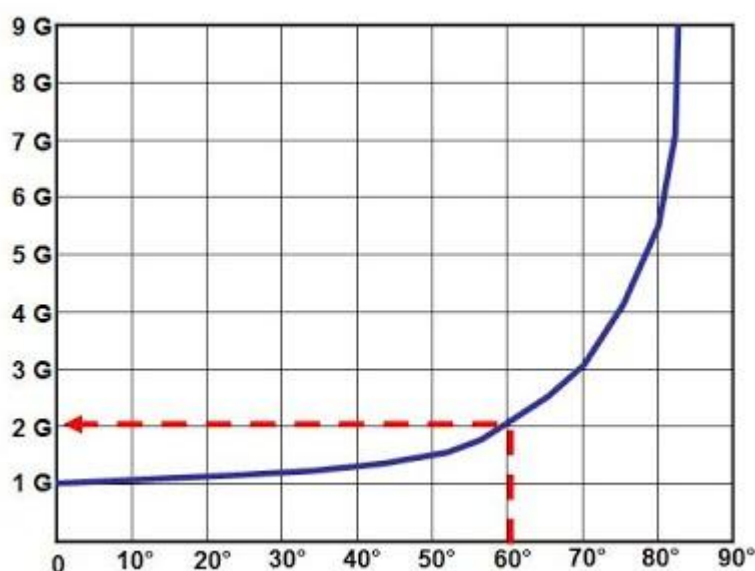


Figura - Gráfico que representa o aumento na força G para uma determinada inclinação da aeronave.

Fonte: <<https://sites.google.com/site/invacivil/performance/conceituperf/inclinastall>>. Acesso em 11 mar. 2015.

Glissada - movimento da aeronave com componente transversal de velocidade relativa ao ar calmo.

Guide-rope (cabo pendente) - corda levada a bordo das cestas dos balões e que serve de lastro, bem como para redução gradual do peso nas aterrissagens e para que pessoas no solo possam segurá-lo.

Helicóide - corpo em forma de hélice, considerado uma das “formas perfeitas” com superfície mínima, pois é completa, finita e mergulhada em R^3 . Fonte: <www.aedi.ufpa.br/.../Celso%20%20Costa%20-%20Beinal_matematica_n...>. Acesso em 19 ago. 2015.

Hp (horse power) - Medida de potência mecânica. Corresponde a 1,01 cv e a 745,7 Watts.

Inércia rotacional - resistência de um corpo à mudança no seu movimento rotacional. Esta resistência à mudança em sua velocidade angular é conhecida como momento de inércia do referido corpo.

Lei da Ação e Reação (3ª Lei de Newton) - “A toda ação corresponde uma reação de igual intensidade, mesma direção e sentido contrário”.

Mais-pesado-que-o-ar – nesta Tese, refere-se às aeronaves que não utilizam aeróstatos para sustentação.

Nacelle – barquinha.

Ornitóptero - é um aeródino que obtém tanto a sustentação quanto a propulsão por intermédio do movimento alternativo de suas asas, semelhante ao que ocorre em aves, morcegos e insetos voadores.

Passo (geométrico) da hélice - distância teórica que um elemento da pá avançaria em uma rotação completa, quando se movendo ao longo de uma linha helicoidal tangente a esse elemento.

Passo - para helicópteros, podemos basicamente entender como ângulo de ataque das pás.

Princípio de Arquimedes - “Todo corpo mergulhado num fluido recebe um empuxo para cima igual ao peso do volume do fluido deslocado”.

Processo Bessemer – “O processo Bessemer, inventado em 1856, deve o seu nome ao engenheiro inglês Sir Henry Bessemer (1813-1898). Consiste numa maneira de converter ferro-gusa de um alto-forno em aço. O ferro-gusa líquido é colocado numa fornalha refratária alinhada (conversor de Bessemer) a uma temperatura de 1250 °C. Da base da fornalha é injetado ar e adiciona-se ainda ferro especular para introduzir a quantidade de carbono correta. As impurezas, nomeadamente o silício, o fósforo e o manganês, são retiradas através do revestimento do conversor, formando-se escória. Finalmente, a fornalha é inclinada de maneira a permitir que o aço derretido possa ser retirado. Atualmente, existe uma versão mais moderna deste processo, que se denomina de VLN ("Very Low Nitrogen"). Segundo este processo insufla-se oxigênio e vapor d'água para a fornalha em substituição ao ar de modo a minimizar a absorção de azoto do ar pelo aço.” Fonte: <[http://www.infopedia.pt/\\$processo-de-bessemer](http://www.infopedia.pt/$processo-de-bessemer)>. Acesso em 19 ago. 2015.

Propulsor - hélice.

Pylon - estrutura utilizada para a montagem de equipamentos externos de uma aeronave.

Razão de aspecto - é a razão entre a envergadura e a corda da pá. Quanto maior o seu valor, maior será a sustentação e menor será o arrasto induzido e os vórtices nas pontas das pás.