

## Carta do Editor

**H**á 100 anos, no dia 12 de novembro, Santos-Dumont ganhou o prêmio Aeroclube da França e teve os primeiros recordes (altura e distância) homologados da história da aviação. O acontecimento histórico está sendo comemorado com um sem-número de eventos, produções midiáticas, concursos literários, entre outros, em destaque para a semana de Ciência e Tecnologia que congregou atividades exuberantes em todo o país.

A *Física na Escola* se junta a essas manifestações de admiração e reverência a este grande brasileiro, lançando um número especial em que se tentou reunir aspectos das invenções de Santos-Dumont e da física do vôo.

A literatura sobre a vida e os feitos de Santos-Dumont foi enriquecida nos últimos anos com uma profusão de livros – como se nota na seção *Na Prateleira*. Não há o que substitua uma boa biografia. No entanto, para introduzir o leitor à vida e obra de Santos-Dumont, a *FnE* traz uma cronologia que visa a estabelecer uma série de situações e acontecimentos de cada ano de modo a possibilitar uma viagem no tempo com nosso homenageado. E, mais interessante, o próprio inventor fala de si mesmo neste número, através de uma seleção de textos dos seus dois livros *Os Meus balões* e *O que vi... O que Veremos* assim como de citações da bibliografia especializada.

Santos-Dumont não foi um cientista nem atuou na academia. “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 na experiência.” Não teve uma educação formal em nível superior. Foi, no entanto, um extraordinário autodidata. O historiador Alexandre Medeiros foi buscar as bases de sua instrução inicial em colégios do estado de São Paulo e do Rio de Janeiro. Medeiros discute ainda a relevância do pouco conhecido professor Garcia, seu tutor em Paris. São excertos do seu instrutivo livro *Santos Dumont e a Física do Cotidiano*.

Santos-Dumont é mais reconhecido no nível internacional pelos seus balões dirigíveis, em especial os de números 6 e 9 que empolgaram o mundo (não só sua querida Paris) na virada do século XX. Apenas em meados de 1906 ele apresentou seu excêntrico 14 bis. Como se deu a evolução dos conceitos do vôo a partir do 14 bis até a sua obra-prima, o *Demoiselle*, o primeiro (sem contestação!) avião esportivo do mundo? Os irmãos Lins de Barros mostram o desenvolvimento acentuado de suas idéias em curto período, no artigo seminal publicado originalmente nos anais de uma conferência internacional de História. As comemorações deste ano deveriam continuar em 1907. Para mim, este foi o “*annus mirabilis*” de Santos-Dumont. Confira no artigo o acerto ou não desta minha avaliação.

De Santos-Dumont passamos à física do vôo. Este Editor e Silvio Dahmen sugerem alguns temas para serem abordados em sala de aula usando o vôo como fator motivador e para demonstrar a aplicação de princípios básicos da Física em exemplos

atraentes. A seguir a física do vôo é descrita por físicos e engenheiros que apresentam visões diferentes de como abordar o fascinante tema da sustentação das asas no Ensino Médio e para um público leigo, mas interessado. O leitor poderá adquirir uma compreensão mais aprofundada desta velha questão que permeia livros didáticos, artigos em revistas de ensino e de divulgação científica e sítios da Internet. O grupo Fundação Ciência Jovem, liderado por Eduardo Valadares, apresenta ainda quatro instigantes experimentos – as aerodescobertas – no estilo “faça você mesmo”.

A óptica – ilusão sobre o tamanho da Lua e polarização da luz do laser – e a física atômica – raios espectrais dos elementos químicos – são alvo de artigos muito interessantes. Experiências sobre a velha e surpreendente braquistócrona, e sobre circuitos simples para verificação da lei de Ohm são propostas. Na linha da exploração dos super-heróis em revistas em quadrinhos e de filmes para motivar os alunos ao estudo da Física, uma experiência em sala de aula numa escola de Ensino Médio é descrita em *Aprendendo Física com o Homem-Aranha*.

Enfim, a revista está recheada de atrações. Divirta-se e espero que estes conhecimentos possam ser úteis em sua prática docente. Um Feliz 2007.

*Nelson Stuard*



## Santos Dumont por Ele Mesmo

### O reconhecimento e a gratidão com os esforços de outros pioneiros

Não fosse a audácia digna de todas as nossas homenagens, dos Capitaine Ferber, Lilienthal, Pilcher, Barão de Bradsky, Augusto Severo, Sachet, Charles, Morin, Delagrangre, irmãos Nieuport, Chavez e tantos outros - verdadeiros mártires da Ciência - e hoje não assistiríamos, talvez, a esse progresso maravilhoso da Aeronáutica, conseguido, todo inteiro a custa dessas vidas, de cujo sacrifício ficava sempre uma lição.

Penso, a maior parte dos meus leitores serão jovens nascidos depois dessa época, que já se vai tanto ensombreado na memória; suplico-lhes, pois, não se esquecerem destes nomes. A eles cabe, em grande parte, o mérito do que hoje se faz nos ares...



### Sobre o pai

Tudo lhe devo, desde os exemplos. Nascido na cidade de Diamantina, o Dr. Henrique Dumont, formou-se, em Engenharia, pela Escola Central de Paris e, depois de trabalhar vários anos na E.F. Central (foi em uma casita situada na garganta João Aires que eu nasci) dedicou-se à lavoura no estado do Rio. Vendo que aí nada de grande podia fazer, partiu com minha mãe e oito filhos, então todos crianças, para Ribeirão Preto, que se achava a três dias de viagem a cavalo da ponta dos trilhos da Mogiana. Explorara, antes, o interior do estado de São Paulo e ficou maravilhado com as matas de Ribeirão Preto. Neste país essencialmente agrícola, ele foi o protótipo do fazendeiro audacioso, e, com uma energia tão grande como a sua confiança no futuro, desbravou sertões e cultivou o solo, aí trabalhou durante dez anos, ao cabo dos quais, por ter sido acometido de uma paralisia, vendeu aquelas "matas", então transformadas em cerca de 5.000.000 de cafeeiros, servidos por uma estrada de

ferro particular, por ele construída e que os liga a Ribeirão Preto. Hoje, para que não morresse na memória dos homens a lembrança do valor desse audacioso, os ingleses, em significativa homenagem, conservaram em seu nome na companhia proprietária atual daquelas terras. Em 1905, a Dumont Coffee Company colheu, naquele cafezal, 498 mil arrobas; em 1911, obteve uma renda bruta de 3.883 contos de réis. Um de nossos grandes estadistas, depois de uma visita que fizera a meu pai, escreveu, em uma impressão de viagem, referindo-se àquela fazenda: *Ali tudo é grande, tudo é imenso; só há uma coisa modesta; a casa onde mora o fundador de tudo aquilo.*



### Primeiros tempos

No Brasil, onde nasci em 20 de julho de 1873, o céu é tão belo, os pássaros voam tão alto e planam tão à vontade sobre as grandes asas estendidas, as nuvens sobem tão alegremente na pura luz do dia, onde se deitam tão languidamente, na atmosfera



O pai, Henrique Dumont.

Santos Dumont escreveu três livros, fez discursos e deu entrevistas a órgãos da imprensa. Descrições de suas experiências, impressões, recordações e feitos são aqui apresentadas a partir de seus próprios textos (Seleção e Notas de Nelson Studart).



A família Dumont na fazenda Arindeúva em Ribeirão Preto (circa 1880).

embalsamada das noites, que basta levantar os olhos para ficar amante do espaço e da liberdade.

Cada ano, no dia 24 de junho, diante das fogueiras de São João, que no Brasil constituem uma tradição imemorial, eu enchia dúzias destes pequenos “montgolfiers”<sup>1</sup> e contemplava extasiado a ascensão deles ao céu.

Nesse tempo, confesso, meu autor favorito era Jules Verne. A sadia imaginação deste grande escritor, atuando com magia sobre as imutáveis leis da matéria, me fascinou desde a infância. Nas suas concepções audaciosas eu via, sem nunca me embarçar em qualquer dúvida, a mecânica e a ciência dos tempos do porvir, em que o homem, unicamente pelo seu gênio, se transformaria em semideus.

Com o capitão Nemo e seus convidados explorei as profundezas do oceano, nesse precursor do submarino, o Nautilus. Com Fileas Fogg fiz em oitenta dias a volta ao mundo. Na “Ilha a Hélice” 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 Servadac naveguei pelo espaço (...)

De 1888, mais ou menos, a 1891, quando parti pela primeira vez para a Europa, li, com grande interesse, todos os livros desse grande vidente da locomoção aérea e submarina. (...) Naquele tempo, só conhecia o existente em nossa fazenda, que era de um aspecto e peso fantástico; assim o eram, também, os tratores que meu pai mandava vir da Inglaterra: puxavam duas carroças de café, mas pesavam muitas toneladas (...) Senti um bafejo de esperança quando meu pai me anunciou que ia construir um caminho de ferro para ligar a Fazenda à estação da Companhia Mogiana; pensei que nessas locomotivas, que deviam ser pequenas, iria encontrar base para a minha máquina com que realizar as ficções de Jules Verne. Tal não se deu; elas eram de aspecto ainda mais pesado. Fiquei,

então, certo de que Jules Verne era um grande romancista.

Todas estas máquinas de que acabo de falar [despolpadores, secadoras, descascadoras e separadoras de café], bem como as que forneciam a força motriz, foram os brinquedos de minha meninice. O hábito de vê-las funcionar diariamente ensinou-me, muito depressa, a reparar qualquer das suas partes. As peneiras móveis, com especialidade, arriscam-se a se avariar a cada momento. Sua velocidade bastante grande, seu balanço horizontal muito rápido, consumiam uma quantidade enorme de energia motriz. Constantemente fazia-se necessário trocar as polias. E bem me recorro dos vãos esforços que todos empregávamos para remediar os defeitos mecânicos do sistema.

Aos 7 anos, já eu tinha permissão para guiar as locomóveis de grandes rodas empregadas na nossa propriedade nos trabalhos do campo. Aos 12, deixavam-me tomar o lugar do maquinista das locomotivas Baldwin que puxavam os trens carregados de café nas 60 milhas de via férrea assentadas por entre as plantações. Enquanto meu pai e meus irmãos montavam a cavalo para irem mais ou menos distante ver se os cafeeiros eram tratados, se a colheita ia bem ou se as chuvas causavam prejuízos, eu preferia fugir para a usina, para brincar com as máquinas de beneficiamento.

Eu já estava perfeitamente familiarizado com a história de Montgolfier. 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 a Montgolfier, Charles<sup>2</sup>, Pilatre de Rozier<sup>3</sup> e Henry Giffard<sup>4</sup>, que haviam indissolivelmente ligado os seus nomes aos grandes progressos da navegação aérea.



Brincadeira de infância: dirigir locomóveis.



Santos Dumont quando jovem.



### Planos futuros

Eu queria, por minha vez, construir balões. Durante as compridas tardes ensolaradas do Brasil, ninado pelo zumbido dos insetos e pelo grito distante de algum pássaro, deitado à sombra da varanda, eu me detinha horas e horas a contemplar o belo céu brasileiro e a admirar a facilidade com que as aves, com suas longas asas abertas, atingiam grandes alturas. E ao ver as nuvens que flutuavam alegremente à luz do dia, sentia-me apaixonado pelo espaço livre.

Assim, meditando sobre a exploração do grande oceano celeste, por minha vez eu criava aeronaves e inventava máquinas.

Tais devaneios eu os guardava comigo. Nessa época, no Brasil, falar em inventar uma máquina voadora, um balão dirigível, seria querer passar por desequilibrado ou visionário. Os aeronautas que subiam em balões esféricos eram considerados como profissionais habilíssimos, quase semelhantes aos acrobatas de circo. Se o filho de um fazendeiro de café sonhasse em se transformar em êmulo deles, cometeria um verdadeiro pecado social.



### 1891 em Paris

Vou encontrar novidades em Paris – balões dirigíveis, automóveis. Paris, é como se diz, o lugar para onde emigra a alma dos bons americanos quando morrem.

Na França é que fora lançado o primeiro balão cheio com hidrogênio, que voara a primeira aeronave com sua máquina a vapor, seu propulsor de hélice e seu leme.

Naturalmente eu acreditava que a questão havia avançado consideravelmente desde que, em 1852, Henri Giffard, com uma coragem tão grande quanto a sua ciência, havia demonstrado de maneira magistral a possibilidade de dirigir um balão.

Eu me lembro que eu encontrei muitas pessoas que colocavam no mesmo plano o problema da direção de balões e aquela do movimento perpétuo infligindo aos dois o mesmo nome irônico de quimera. *Dieu Merci*, a questão da direção dos balões mostra-se lógica a todo mundo, enquanto que aquela o movimento perpétuo será eternamente absurda.



### Balões ou automóveis?

Se eu arriscar mil e duzentos francos pelo prazer de uma tarde, posso gostar, ou não. No segundo caso, empregarei meu dinheiro em pura perda; no primeiro, ficarei com vontade de repetir o divertimento, e não disporei de meios.



O dilema mostrou-me o caminho a seguir. Renunciei, não sem mágoa, à aerostação e fui buscar consolo no automobilismo.



Os automóveis eram ainda raros em Paris em 1891. Tive de ir à fábrica de Valentigney para comprar a minha primeira máquina, uma Peugeot de estrada de três e meio cavalos de força.

Era uma curiosidade. Nesse tempo não existia ainda nem licença de automóvel, nem exame de motorista. Quando alguém dirigia a nova invenção pelas ruas da capital, era por sua própria conta e risco. E tal era o interesse popular que eu não podia parar em certas praças, como a da Ópera, com receio de juntar a multidão e interromper o trânsito.



De então em diante tornei-me adepto fervoroso do automóvel. Entretive-me a estudar os seus diversos órgãos e a ação de cada um. Aprendi a tratar e consertar a máquina. E quando ao fim de sete meses, minha família voltou ao Brasil, levei comigo a minha Peugeot.



É bem certo que se não houvesse me dedicado à aerostação, ter-me-ia feito entusiasta das corridas de automóveis, passando continuamente dum tipo pra outro, procurando constantemente uma velocidade superior, avançando com os progressos da indústria, como fazem tantos e do novel espírito esportivo parisiense.

### A emancipação

Uma manhã, em São Paulo, com grande surpresa minha, convidou-me meu pai a ir à cidade e, dirigindo-se a um cartório de tabelião, mandou lavrar escritura de minha emancipação. Tinha eu dezoito anos. De volta à casa, chamou-me ao escritório e disse-me: *Já lhe dei hoje a liberdade; aqui está mais este capital*, e entregou-me títulos no valor de muitas centenas de contos. *Tenho ainda alguns anos de vida; quero ver como você se conduz: vai para Paris, o lugar mais perigoso para um rapaz. Vamos ver se você se faz um homem; 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. Você não precisa pensar em ganhar a vida; eu lhe deixarei o necessário para viver...*



### 1898 em Paris

Chegando a Paris, decidi-me a deixar de lado os aeronautas profissionais e dirigir-me aos construtores. Meu empenho particular era conhecer o sr. Lachambre, que havia construído o balão de Andrée, e seu associado o sr. Machuron, autor do livro<sup>5</sup>. Digo com toda a sinceridade que encontrei neles o acolhimento que desejava. Quando perguntei ao sr. Lachambre o preço de um ligeiro passeio em balão, fiquei tão surpreso com a resposta que lhe pedi ma repetisse: Uma ascensão de três ou quatro horas, com todas as despesas pagas, incluindo o transporte de volta do balão em caminho de ferro, custar-lhe-á 250 francos. [...] Fechei imediatamente o negócio. E combinamos tudo para a manhã do outro dia.



### Primeira ascensão<sup>6</sup>

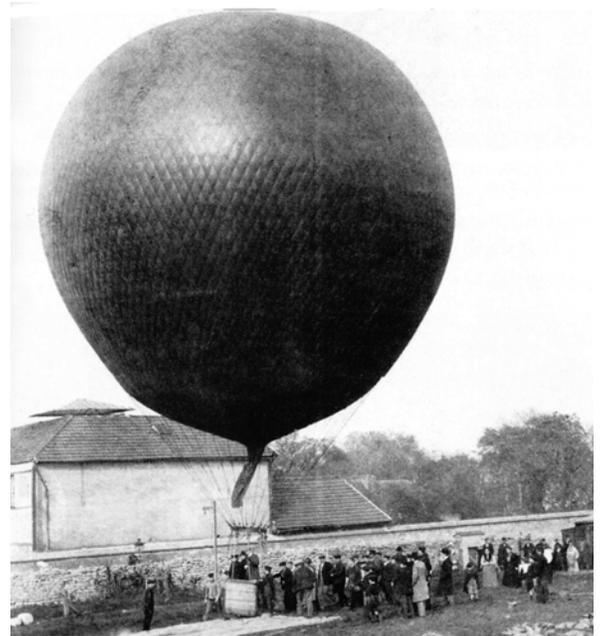
Guardo uma recordação indelével das deliciosas sensações de minha primeira tentativa aérea. Cheguei cedo ao parque de aerostação de Vaugirard, a fim de não perder nenhum dos preparativos. O balão, de uma capacidade de setecentos e cinqüenta metros cúbicos, jazia estendido sobre a grama. A uma ordem do Sr. Lachambre, os operários começaram a enchê-lo de gás. E em pouco a massa informe começou a se transformar numa vasta esfera.

Às 11 horas os preparativos estavam terminados. Uma brisa fresca acariciava a barquinha, que se balançava suavemente sobre o chão. A um dos cantos dela, com um saco de lastro na mão, eu aguardava com impaciência o momento da partida. Do outro, o Sr. Machuron gritou: - *Lâchez tout!* No mesmo instante, o vento deixou de soprar. Era como se o ar em volta de nós se tivesse imobilizado. É que havíamos partido, e a corrente de ar que atravessávamos nos comunicava sua própria velocidade. Eis o primeiro grande fato que se observa quando se sobe num balão esférico.



Esse movimento imperceptível de marcha possui um sabor infinitamente agradável. A ilusão é absoluta. Acreditar-se-ia, não que é o balão que se move, mas é a terra que foge dele e se abaixa. No fundo de um abismo que se cavava sob nós, a mil e quinhentos metros, a terra, em lugar de parecer redonda como uma bola, apresentava a forma côncava de uma tigela, por efeito de um fenômeno de refração que faz o círculo do horizonte elevar-se continuamente aos olhos do aeronauta.

Aldeias e bosques, prados e castelos desfilavam como quadros moveiços em cima dos quais os apitos das locomotivas desferiam notas agudas e longínquas. Com os latidos dos cães, eram os únicos sons que chegavam ao alto. A voz humana não vai a essas solidões sem limites. As pessoas apresentavam o aspecto de formigas caminhando sobre linhas brancas, as estradas; as filas de casas assemelha-



Santos Dumont em sua primeira ascensão descrita em detalhes em *Os Meus Balões*.

vam-se a brinquedos de crianças.

A sombra assim produzida [por uma nuvem que encobriu o sol] provocou um esfriamento do gás do balão que, murchando, começou a descer, a princípio lentamente, depois com velocidade cada vez maior. Para reagir, deitamos lastro fora.



Sobre esse fundo de alvura imaculada, [acima da camada de nuvens] o sol projetava a sombra do balão; e nossos perfis, fantasticamente aumentados, desenhavam-se no centro de um triplo arco-íris.



O calor do sol, pondo as nuvens em ebulição, fazia-as lançar em derredor de nossa mesa [um almoço com ovos duros, vitela e frangos frios, queijo, gelo, frutos, doces e regado a champanhe, café e licor] jatos irisados de vapor gelado, comparáveis a grandes feixes de fogos de artifício. A neve, como que por obra de um milagre, espargia-se em todos os sentidos, em lindas e minúsculas palhetas brancas. Por instantes os flocos formavam-se, espon-tâneos, sob os nossos olhos, mesmo nos nossos corpos.



Acabava eu de beber um cálice de licor quando uma cortina desceu subitamente sobre esse admirável cenário de sol, nuvens e céu azul. O barômetro elevou-se rapidamente cinco milímetros, indicando brusca ruptura do equilíbrio e uma descida precipitada. O balão devia ter-se sobrecarregado de muitos quilos de neve; caía como uma nuvem.

A neblina nos envolveu em uma obscuridade quase completa. Distinguíamos ainda a barquinha, nossos instrumentos, as partes mais próximas do cordame. Mas a rede que nos prendia ao balão não era mais visível senão até certa altura; e o balão, ele próprio, desaparecera.

Experimentamos assim, e por instantes, a singular sensação de estarmos suspensos no vácuo, sem nenhuma sustentação, como se houvéssemos perdido nosso último grama de gravidade e nos achássemos prisioneiros do nada opaco.



Após alguns minutos de uma queda que amortecemos soltando lastro, vimonos abaixo das nuvens, a uma distância de cerca de 300 metros do solo. A nuvem que provocara a nossa descida era prenúncio de uma mudança de tempo. Pequenas rajadas começavam a impelir o balão da direita para a esquerda e de cima para baixo. De espaço a espaço o *guide-rope*<sup>7</sup> - uma grande corda de uns 100 metros de comprimento, que flutuava fora da barquinha, - tocava no chão. A barquinha não tardou

por sua vez a roçar as copas das árvores. O que se denomina fazer o *guide-rope* apresentou-se-me assim em condições particularmente instrutivas. Tínhamos ao alcance da mão um saco de lastro: se um obstáculo qualquer se apresentasse no caminho soltávamos alguns punhados de areia; o balão subiria um pouco e a dificuldade seria vencida. Mais de 50 metros do cabo arrastavam-se já pelo chão. Não era preciso tanto para nos mantermos em equilíbrio a uma altitude inferior a 100 metros, pois havíamos decidido não exceder disso até o fim da viagem.



Durante um quarto de hora fomos sacudidos como um cesto de legumes e só nos libertamos aliviando um pouco de lastro. O balão deu então um pulo terrível e foi como uma bala furar as nuvens. Estávamos ameaçados de atingir alturas que depois nos podiam ser perigosas para a descida, dada a pequena provisão de lastro de que já dispúnhamos. Era tempo de recorrer a meios mais eficazes: abrir a válvula de manobra para que o gás escapasse. Foi obra dum minuto. O balão retomou a descida e o *guide-rope* tocou de novo o solo. Não nos restava senão dar por encerrada aí a excursão; a areia estava quase toda esgotada<sup>8</sup>.



[O local de aterrissagem] pertencia ao parque do castelo de La Ferrière, propriedade do sr. Alphonse de Rothschild. (...) Partimos para a estação da estrada de ferro, [...] Às seis e meia estávamos novamente em Paris. Havíamos efetuado um percurso de 100 quilômetros e passeado quase duas horas.



### O primeiro balão "Brasil"

De volta, em caminho de ferro, pois descêramos longe, transmiti ao piloto o meu desejo de construir, para mim, um pequeno balão. Tive como resposta que a fábrica a que ele pertencia, tinha, havia pouco, recebido amostras de seda do Japão de grande beleza e peso insignificante. No dia seguinte estava eu no atelier dos construtores. Apresentaram-me projetos, mostraram-me

sedas... Propuseram-me fazer construir um balão de 250 metros cúbicos...

Tomei a palavra:

- O Sr. disse-me ontem que o peso dessa seda, depois de envernizada, é de tantos gramas; o gás hidrogênio puro eleva tal peso; desejo uma barquinha minúscula e, pelo que vi ontem, um saco de lastro me será bastante para passar algumas horas no ar; eu peso 50 quilos; conclusão: quero um balão de cem metros cúbicos - grande espanto! Creio mesmo que pensaram que eu era doido.

Alguns meses depois, o "Brasil", com grande espanto de todos os entendidos, atravessava Paris, lindo na sua transparência, como uma grande bola de sabão. As suas dimensões eram: diâmetro 6 metros, volume 113 metros cúbicos, a seda empregada (113 metros quadrados) pesava 3 quilos e meio, envernizada e pronta, 14 quilos. A rede envolvente e cordas de suspensão pesavam 1.800 gramas. A barquinha, 6 quilos. A corda-guia (corda de compensação), comprido de 6 metros, pesava 8 quilos, uma ancorazinha, 3 quilos. Os meus cálculos tinham sido exatos: parti com mais de um saco de lastro.



O primeiro balão, o "Brasil" (1898).

Este minúsculo “Brasil” despertou grande curiosidade. Era tão pequeno que diziam que eu viajava com ele dentro da minha mala!

Nele e em outros, fiz, em vários meses, amiadadas viagens, em que ia penetrando na intimidade do segredo das manobras aéreas.



### Em direção aos dirigíveis: Adquirindo experiência

Antes da minha primeira ascensão no pequenino “Brasil”, fiz vinte e cinco ou trinta em balões esféricos comuns, inteiramente só, ao mesmo tempo capitão e passageiro único. O sr. Lachambre, que se encarregara de diversas ascensões públicas, permitiu-me realizar algumas em seu lugar. Foi assim que subi em diversas cidades da França e da Bélgica. Isto evitava trabalho ao sr. Lachambre, a quem eu indenizava de todas as despesas e incômodos, proporcionava-me prazer e permitia-me praticar o “sport”. A combinação acomodava a nós dois.



Duvido que, sem uma série de estudos e experiências preliminares em balão esférico, um homem obtenha qualquer probabilidade de ser bem sucedido com um dirigível alongado, cujo manejo é muito mais delicado. Antes de tentar conduzir uma aeronave é indispensável ter, a bordo dum balão ordinário, aprendido as condições do meio atmosférico, feito conhecimento com os caprichos do vento, penetrado a fundo as dificuldades que apresenta o problema do lastro, sob o tríplice aspecto da partida, equilíbrio aéreo e aterrisagem.



Compreender-se-á, assim, que manifesto grande surpresa quando vejo inventores, sem nunca terem posto os pés numa barquinha, desenharem no papel e até executarem, no todo ou em parte, fantásticas aeronaves, com balões cubando milhares de metros, carregados de enormes motores que eles não conseguem levantar do chão, e providos de máquinas tão complicadas que nada faz marcharem. Os inventores desta classe nunca manifestam medo porque não fazem nenhuma idéia das dificuldades do problema. Se houvessem começado por viajar nos ares ao sabor do vento, enfrentando as influências hostis dos fenômenos atmosféricos, compreenderiam que um balão dirigível, para ser prático, requer, antes de mais nada, uma extrema simplicidade de mecanismos.



Alguns infelizes construtores, que pagaram com a vida sua triste imprudência, jamais haviam efetuado uma subida em balão esférico, como capitão e sob sua própria responsabilidade. A maior parte dos seus êmulos de hoje, tão devotados às suas tarefas, encontra-se ainda nas mesmas condições de inexperiência. Assim se explicam para mim seus insucessos. Estão na mesma situação de quem, sem haver jamais deixado a terra firme ou posto os pés num bote, pretendessem construir e comandar um transatlântico.



### Uma educação informal

(...) com o auxílio dos primos, fui procurar um professor. Não poderia ter sido mais feliz; descobrimos o Sr. Garcia, respeitável preceptor, de origem espanhola, que sabia tudo. Com ele estudei por muitos anos?



### Início do inventor - o nº 1

Comprei um dia um triciclo a petróleo. Levei-o ao “Bois de Boulogne” e, por três cordas, pendurei-o num galho horizontal de uma árvore, suspendendo-o a alguns centímetros do chão. É difícil explicar o meu contentamento ao verificar que, ao contrário do que se dava em terra, o motor do meu triciclo, suspenso, vibrava tão agradavelmente que quase parecia parado. Neste dia começou a minha vida de inventor.



Corri à casa, iniciei os cálculos e os desenhos do meu balão nº 1. Nas reuniões do Automóvel Club - pois o Aeroclube não existia ainda - disse aos meus amigos que pretendia subir aos ares levando um motor de explosão sob um balão fusiforme. Foi geral o espanto: chamavam de loucura o meu projeto. O hidrogênio era o que havia de mais explosivo! Se pretendia suicidar-me, talvez fosse melhor sentar-me sobre um barril de pólvora em companhia de um charuto aceso. Não encontrei ninguém que me encorajasse.

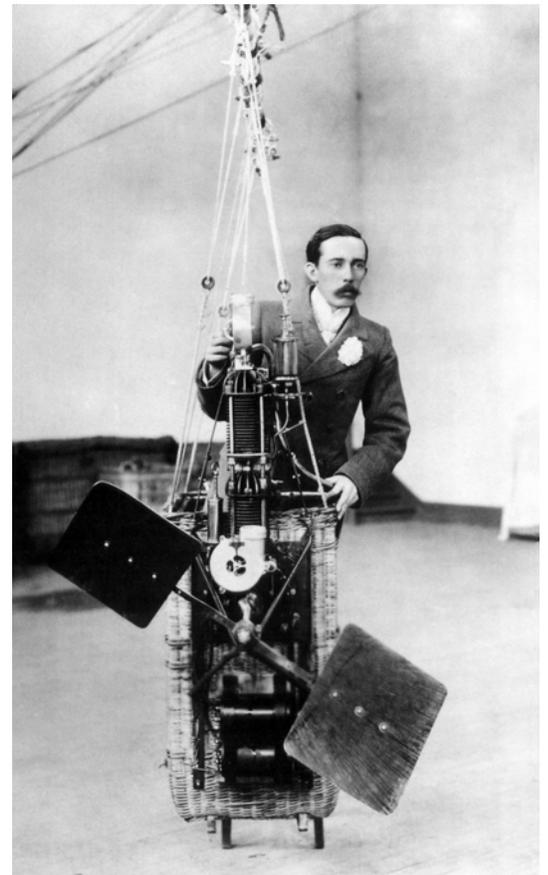


A 18 de setembro [1898], minha primeira aeronave, o “Santos Dumont nº 1” estava estendida sobre a relva, entre as lindas árvores do jardim. (...) Parti do local, que eles me indicaram, e no

mesmo segundo, tal como eu receava, meu navio aéreo foi se rasgar contra as árvores. O acidente serviu, pelo menos, para demonstrar aos incrédulos a eficiência do meu motor e do meu propulsor.



Não perdi tempo em lamentações. Dois dias mais tarde, a 20 de setembro, largava do mesmo campo, desta vez, porém, do ponto escolhido por mim. Transpus sem acidentes o cimo das árvores, e logo em seguida comecei a fazer evoluções para a demonstração da aeronave aos parisienses acorridos em multidão. Tive então, como sem cessar, daí por diante, os aplausos e a simpatia do povo de Paris, com quem meus esforços sempre encontraram um testemunho generoso e entusiasta. Sob a ação combinada do propulsor, que lhe imprimia movimento, do leme, que lhe permitia a direção, do *guide-ropes* que eu deslocava, e dos dois sacos de lastro que eu fazia deslizar conforme a minha fantasia, ora para diante, ora para trás, logrei a satisfação de evoluir em todos os sentidos, da direita para a esquerda, de cima para baixo e de baixo para cima. (...) Enquanto estive subindo, o hidrogênio, em razão da depressão atmosférica, aumentou de volume; e o balão, bem esti-



Na cesta do nº 1.



A queda do nº 1.

cado, conservou sua rigidez; tudo ia pelo melhor. A complicação foi, porém, na descida. A bomba de ar destinada a obviar a contração do hidrogênio mostrou-se de capacidade insuficiente. O longo cilindro, que formava o invólucro, repentinamente começou a dobrar-se pelo meio, como um canivete. (...) A descida transformava-se em queda. Por felicidade (...) um grupo de meninos brincava com papagaios. Uma súbita idéia atravessou-me o espírito: gritei-lhes que agarrassem o meu *guide-rope*, que já tocava o solo, e corresse com toda a força contra o vento. Eram garotos inteligentes, pegaram no instante propício a idéia e a corda. E o resultado deste auxílio *in extremis* foi imediato, e tal qual eu esperava. A manobra amorteceu a violência da queda e evitou-me, pelo menos, um choque perigoso. Estava eu salvo pela primeira vez! Agradei o inestimável serviço dos bravos meninos, que ainda me ajudaram a arrumar as coisas dentro da barquinha. Chamei uma carruagem, e transporte para Paris as relíquias da aeronave.



### Nº 5 - O quase vitorioso - Tentando o prêmio Deutsch

Chego agora ao dia terrível: 8 de agosto de 1901. Em presença da Comissão Científica do Aero clube, larguei-me para a Torre Eiffel. Contornei-a ao cabo de 9 minutos e tomei a direção de Saint Cloud. Por infelicidade, um acidente enfraquecera a mola de uma das válvulas automáticas e o balão perdia hidrogênio. Arrisquei prosseguir. O balão contraía-se visivelmente; a tal ponto que ao alcançar as fortificações de Paris, perto de La Muette,

te, as cordas de suspensão arqueavam-se tanto que as mais vizinhas do propulsor engancharam-se na hélice em marcha. Vi o propulsor cortá-las e arrancá-las. Parei o motor. O vento, que soprava com força, levou instantaneamente o aparelho para o lado da Torre Eiffel. Ao mesmo tempo, eu caía. A perda de gás era considerável. Teria podido atirar fora muito lastro e amortecer sensivelmente a queda, mas assim o vento teria tempo de me jogar contra os ferros do grande monumento. Preferi deixar a aeronave ir a seu modo (...)

Eu caía. E o vento me levava para a Torre Eiffel (...) a extremidade do meu balão alongado, que conservava ainda todo o seu gás, foi bater contra um telhado mesmo no momento de franqueá-lo. O balão estourou, com um grande barulho (...) encontrava-me suspenso, na minha barquinha de vime, por cima do pátio dos edifícios do Trocadero.



### Nº 6 - O prêmio Deutsch

Iniciei a construção de um novo balão e novo motor, este um pouco mais forte, aquele um pouco maior. Três semanas, contadas dia por dia, após o último desastre, meu aparelho, o nº 6, estava pronto. O tempo, porém, continuava mau. Em 19 de outubro [1901], à tarde, pois a manhã foi chuvosa, a partida oficial teve lugar às 2 horas e 42. Embora o vento me açoitasse de lado, com tendência para levar-me para a esquerda da Torre, mantive-me na sua linha direta. Avancei elevando gradualmente a aeronave a uma altitude de 10 metros acima do seu pico. Esta manobra fazia-me perder tempo, mas premunia-me, na medida do possível, contra todo perigo de contato com o monumento. Subi de novo, contornei a Torre, a uma altura de 250 metros, sobre uma enorme multidão que aí estacionava à minha espera. A volta foi demorada. O vento era contrário. O motor, que até então havia se comportado bem, assim que deixou a Torre para trás uns 500 metros, ameaçou parar. Tive um instante de grave indecisão. Era preciso tomar uma medida rápida. Com o risco de desviar o rumo, abandonei por um momento o leme a fim de concentrar a atenção na maneta do carburador e na alavanca de comando da fiação elétrica.

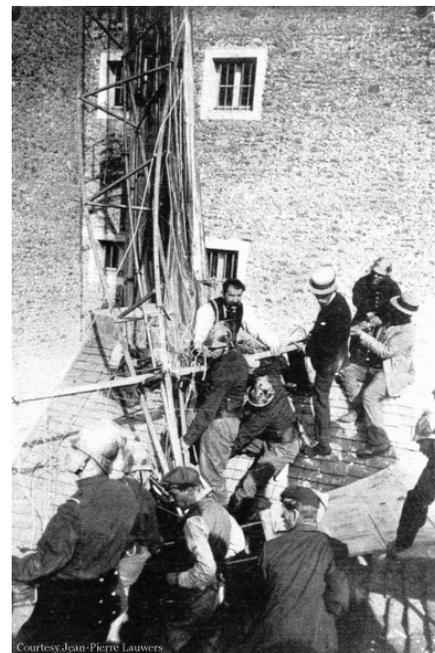
O motor, que havia quase parado, retomou o seu ritmo. Eu acabava de atingir o Bosque [de Bolonha]. Aí, por um fenômeno que bem conhecem todos os aeronautas, a frescura das árvores começou a fazer o balão progressivamente mais

pesado. E por desagradável coincidência, o motor voltou a moderar a velocidade. De tal sorte que a aeronave descia ao mesmo tempo que a força motriz tomava-se menor. Para me opor à descida tive que empurrar para trás o *guide-rope* e os pesos deslocáveis. A aeronave tomou uma posição diagonal e o que restava de energia ao propulsor fê-lo remontar de modo contínuo.

Eu havia chegado à pista do campo de corridas d'Auteuil. O aparelho passava por cima do público, com a proa levantada muito alto, e eu ouvia os aplausos da enorme multidão, quando, repentinamente, meu caprichoso motor readquiriu sua plena velocidade. Subitamente acelerado, o propulsor, que se encontrava quase sob a aeronave, tão empinada ia esta, exagerou ainda mais a inclinação. Às ovações sucederam-se gritos de alarme.



Da minha saída ao momento em que passei do zênite do ponto de partida, decorreram 29 minutos e 30 segundos. Com a velocidade que levava, passei a linha da chegada - como fazem os yachts, os barcos a petróleo, os cavalos de corridas, etc. - , diminuí a força do motor e virei de bordo; então, voltando, e com menos velocidade, manobrei para tocar a terra, o que fiz em 31 minutos após minha partida. Não sabia ainda qual o tempo exato. Gritei: - Ganhei? Foi a multidão que me respondeu: - Sim! Pois bem, alguns senhores quiseram que fosse esse o tempo oficial! Grandes polêmicas. Tive comigo toda a imprensa e o povo de Paris e tam-



Resgate do nº 5 pelos bombeiros de Paris.



O Balladeuse - seu grande sucesso.

bém *Son Altesse Imperiale le Prince Roland Bonaparte*, presidente da Comissão Científica que ia julgar o assunto. O voto me foi favorável.



### Nº 9 - Balladeuse - O sucesso

Depois do meu nº 6, construí vários outros balões, que não me deram os resultados desejados. Há um ditado que ensina “o gênio é uma grande paciência”; sem pretender ser gênio, teimei em ser um grande paciente. As invenções são, sobretudo, o resultado de um trabalho teimoso, em que não deve haver lugar para o esmorecimento. Consegui, afinal, construir o meu nº 9; com ele pude alcançar alguma coisa; fiz dezenas de passeios sobre Paris, fui várias vezes às corridas, dele me apeei à porta de minha casa, na Avenida dos Campos Elíseos, e nele, quase todas as noites, fiz curso sobre o Bois de Boulogne. A minha presença com ele na revista militar de Longchamps, em 14 de julho de 1903, causou um imenso sucesso.



Um menino de sete anos subiu comigo no nº 9. Uma encantadora mocinha o dirigiu literalmente, sozinha, durante um percurso de cerca de uma milha. O menino era o pequeno Clarkson Potter, que será seguramente, um magnífico capitão de



Aída d'Acosta, voou sozinha no nº 9.

aeronave, se quiser aproveitar deste lado sua inteligência. O caso passou-se a 26 de junho de 1903. Realizava-se uma festa infantil em Bagatelle. Desci com o nº 9 no meio desse pequeno mundo, e perguntei: - Há algum menino que queira subir comigo?

(...) Tive de escolher entre uma dúzia de voluntários. Levei o mais próximo.

Quanto à outra circunstância, a da primeira mulher que subiu numa aeronave, com ou sem companheiro, merece ser conservada nos anais da navegação aérea, pois a moça subiu sozinha e dirigiu o meu nº 9. A heroína, uma jovem e lindíssima cubana [Aída D'Acosta], muito relacionada na sociedade de Nova York, (...) manifestara-me seu ardente desejo de voar. (...) O simples fato de haver consentido, com a condição que a pretendente recebesse primeiramente algumas lições para a manobra do motor e dos maquinismos, diz eloqüentemente, suponho, da minha confiança no nº 9. Essas lições foram em número de três, após o que, quando chegou a data de 29 de junho de 1903, que ficará memorável na história da aerostação navegável, minha jovem discípula elevou-se dos terrenos da minha estação, no menor dos dirigíveis possíveis.

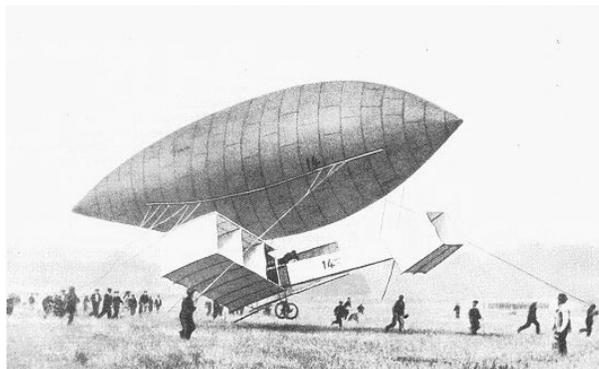


[O nº 9] foi o mais popular de todos os meus filhos, só mais tarde suplantado pela minúscula Demoiselle.



### 14 bis

Dormi três anos e no mês de julho de 1906 apresentei-me no campo de



O híbrido 14-bis.

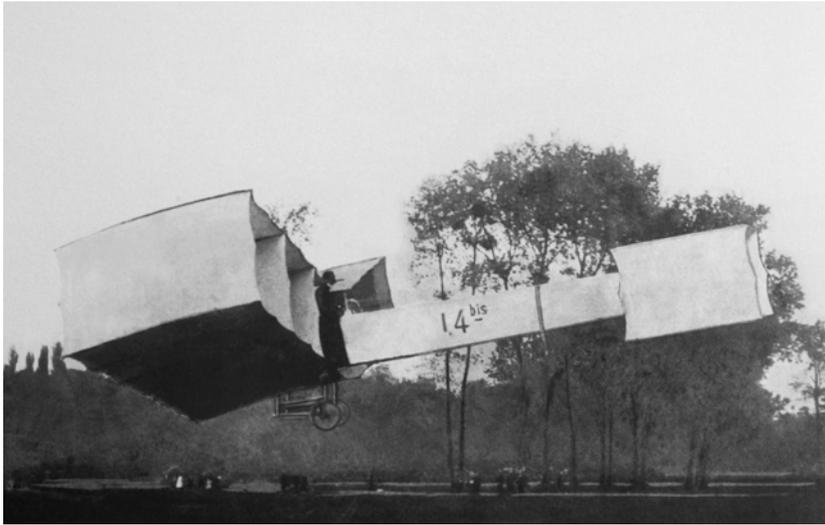
Bagatelle com o meu primeiro aeroplano. Perguntar-me-á o leitor porque não o construí mais cedo, ao mesmo tempo que os meus dirigíveis. É que o inventor, como a natureza de Lineu, não faz saltos; progride de manso, evolui. Comecei por fazer-me bom piloto de balão livre e só depois ataquei o problema de sua dirigibilidade. Fiz-me bom aeronauta no manejo dos meus dirigíveis; durante muitos anos, estudei a fundo o motor a petróleo e só quando verifiquei que o seu estado de perfeição era bastante para fazer voar, ataquei o problema do mais pesado que o ar. A questão do aeroplano estava, havia já alguns anos, na ordem do dia; eu, porém, nunca tomava parte nas discussões, porque sempre acreditei que o inventor deve trabalhar em silêncio; as opiniões estranhas nunca produzem nada de bom.



Abandonei meus balões (...) Em completo silêncio trabalhei três anos, até que, em fins de julho, após uma assembléia do Aeroclub, convidei meus amigos a assistirem minhas experiências, no dia seguinte. Foi um espanto geral. Todo mundo queria saber como era o aparelho. A suas dimensões eram: comprimento, 10 metros; envergadura, 12 metros;



Pronto para decolar no 14-bis.



14 bis, decolagem e vôo

superfície total, 80 metros quadrados; peso, 160 quilos; motor, 24 HP. Era um aparelho grande e biplano e assim o fiz, apenas, a fim de reunir maiores facilidades para voar, pois sempre preferi os aparelhos pequenos, tanto que me esforcei para inventá-los, o que consegui com o minúsculo Demoiselle, o aeroplano ideal para o amador. Continuando na minha idéia de evolução, dependurei o meu aeroplano em meu último balão, o nº 14; por esta razão, batizaram aquele com o nome de 14-bis. Com esse conjunto híbrido, fiz várias experiências em Bagatelle, habituando-me, dia a dia, com o governo do aeroplano, e só quando me senti senhor das manobras é que me desfiz do balão.

Lutei, a princípio, com as maiores dificuldades para conseguir a completa obediência do aeroplano. Era o mesmo que

tentar arremessar uma flecha com a cauda para a frente. Em meu primeiro vôo, após 60 metros, perdi a direção e caí.

Este meu primeiro vôo, de 60 metros, foi posto em dúvida por alguns, que o quiseram considerar apenas um salto. Eu, porém, no íntimo, estava convencido de que voara e, se me não mantive mais tempo no ar, não foi culpa de minha máquina, mas exclusivamente minha, que perdi a direção. Com grande velocidade, consertei rapidamente o aparelho, fiz-lhe algumas pequenas modificações e, durante algumas semanas, “rodei” em Bagatelle a fim de me aperfeiçoar no seu difícil governo. Logo depois, (...) perante a Comissão Científica do Aero clube e de grande multidão, fiz o célebre vôo de 250 metros, que confirmou inteiramente a possibilidade de um homem voar.

Um público numeroso assistiu aos

primeiros vôos feitos por um homem, como tais, reconhecidos por todos os jornais do mundo inteiro. Basta abri-los, mesmo os dos Estados Unidos, para se constatar essa opinião geral. Podia citar todos os jornais e revistas do mundo, todos foram, então, unânimes em glorificar *esse minuto memorável na história da navegação aérea*.

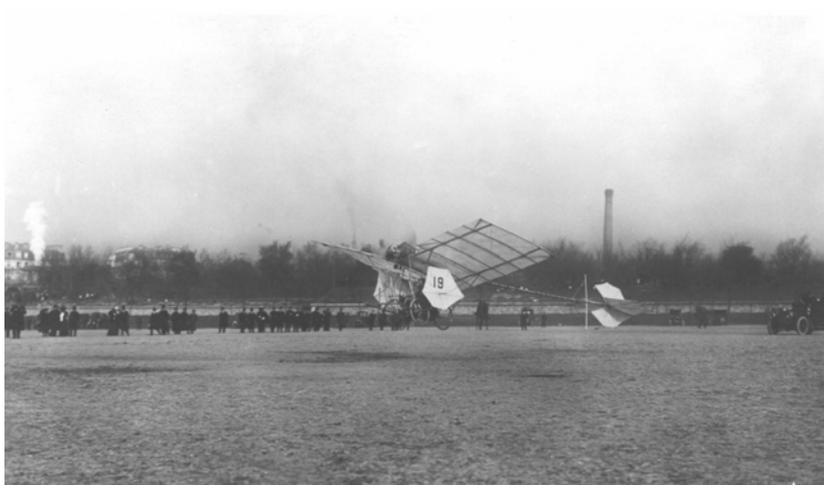


### Demoiselle - A jovem donzela

Nessa época, os aparelhos eram grandes, enormes, com pequenos motores, voavam devagar, uns 60 quilômetros por hora ou pouco mais. Mandei, então, construir um motor especial de minha invenção, desenhado especialmente para um aeroplano minúsculo.

Este motor possuía dois cilindros opostos, o que trás a inconveniência da dificuldade de lubrificação, mas, também, as vantagens consideráveis de um peso pequeno e um perfeito equilíbrio, não ultrapassado por qualquer outro motor. Pesava 40 quilos e desenvolvia 35 HP.

A Demoiselle media 10 metros quadrados de superfície de asas; era 8 vezes menor que o 14-bis! Com ela, durante um ano, fiz vôos todas as tardes e fui, mesmo, em certa ocasião, visitar um amigo em seu Castelo. Como era um aeroplano pequenino e transparente, deram-lhe o nome de Libelule ou Demoiselle. Este foi, de todos os meus aparelhos, o mais fácil de conduzir, e o que conseguiu maior popularidade. Com ele obtive a “Carta de piloto” de monoplanos. Fiquei, pois, possuidor de todas as cartas da Federação Aeronáutica Internacional: - Piloto de balão livre, piloto de dirigível, piloto de biplano e piloto de monoplano. Durante muitos anos, somente eu possuía todas essas cartas, e não sei mesmo se há já alguém que



O avião “moderno”: versão do Demoiselle de 1907.



Cavaleiro da Legião de Honra francesa (1904).



Brincando com as asas.

as possuía. Fui, pois, o único homem a ter verdadeiramente direito ao título de aeronauta, pois conduzia todos os aparelhos aéreos. Para conseguir este resultado me foi necessário não só inventar, mas também experimentar, e nestas experiências tinha, durante dez anos, recebido os choques mais terríveis; sentia-me com os nervos cansados.



### Sobre os irmãos Wright

No ano seguinte (1907) o aeroplano Farman fez vôos que se tornaram célebres; foi esse inventor-aviador que primeiro conseguiu um vôo de ida-e-volta. Depois dele, veio Bleriot, e só *dois anos* mais tarde é que os irmãos Wright fazem os seus vôos. É verdade que eles dizem ter feito outros, porém às escondidas. Eu não quero tirar em nada o mérito dos irmãos Wright, por quem tenho a maior admiração; mas é inegável que, só depois de nós, se apresentaram eles com um aparelho superior aos nossos, dizendo que era cópia de um que tinham construído antes dos nossos.

*Santos-Dumont*  
1903

*Santos-Dumont*  
Rio, 8-1-1929

Evolução da assinatura.



### Sobre patentes

Se quer prestar-me um grande obséquio, declare, pelo seu jornal, que, desejoso de propagar a locomoção aérea, eu ponho à disposição do público as patentes de invenção o meu aeroplano. Toda a gente tem o direito de construí-lo e, para isso, pode vir pedir-me os planos. O aparelho não custa caro. Mesmo o motor não chega a 5.000 francos<sup>10</sup>.



### Abandona o campo de provas

Anunciei a meus amigos a intenção de pôr fim à minha carreira de aeronauta, tive a aprovação de todos.



### Sobre o uso de aviões na guerra

Em 14 de julho de 1903, vooi sobre a revista militar de Longchamps. Nela tomavam parte 50.000 soldados e em seus arredores se acotovelavam 200.000 espectadores. Foi a primeira vez que a navegação aérea figurou em uma demonstração militar. Naquela época, predisse que a guerra aérea seria um dos aspectos mais interessantes das futuras campanhas militares. Minha predição foi ridicularizada por alguns militares; outros, entretanto, houve que, desde logo, alcançaram as futuras e imensas utilidades da navegação aérea.



Pessoalmente creio que se usará o aeroplano para correspondência e também para os passageiros entre os dois continentes, provavelmente muito em breve. Sem dúvida esta opinião motivará gestos de incredulidade e a predição será acolhida

com sorriso. Quando há doze anos disse que as máquinas aéreas seriam importantíssimas para o desenvolvimento das guerras futuras, toda a gente teve igualmente tais gestos e tais sorrisos. (...) Os militares contradiziam-me, considerando o aeroplano como um brinquedo, e resistiram ao meu propósito de discutir seriamente o assunto. Considera-se, agora, pelos acontecimentos posteriores, a inapreciável utilidade que o aeroplano alcançou nos exércitos. Na presente guerra, o avião revolucionou os processos. A grande importância da cavalaria desapareceu<sup>11</sup>.



Consideremos, entretanto, os acontecimentos desde aquela época. Consideremos o valioso trabalho que o aeroplano tem produzido na atual guerra. A aviação revolucionou a arte da guerra. A cavalaria, que teve grande importância em momentos valiosos, deixou de existir. O aeroplano provou a sua importância suprema nos reconhecimentos. De seu bordo, podem-se localizar as trincheiras inimigas, observar os seus movimentos, o transporte de tropas, munições e canhões. De bordo do aeroplano, por meio de telegrafia sem fios, ou de sinais, pode-se dirigir o fogo das forças. Por meio de informações transmitidas pelo telégrafo sem fios, grandes peças de artilharia podem precisar seus tiros contra as trincheiras e baterias inimigas. O avião é de maior valor na defesa das costas do que os cruzadores.

A aviação demonstrou-se a mais eficaz arma de guerra tanto na ofensiva como na defensiva. Desde o início da guerra, os aperfeiçoamentos do aeroplano têm sido maravilhosos.

Quem, há cinco anos atrás, acreditaria na utilização de aeroplanos para atacar forças inimigas? Que os projéteis de canhões poderiam ser lançados com efeitos mortíferos de alturas inacessíveis ao inimigo?

Desde o começo da guerra, os aparelhos têm melhorado. Têm sido aumentados em dimensões e alguns, hoje, são feitos exclusivamente de aço. Os motores igualmente se têm aperfeiçoado. O mais espantoso acontecimento foi o desenvolvimento dos canhões para aeroplanos. A princípio, o recuo dos canhões, ao atirar, constituía a maior dificuldade relativa aos ataques aéreos. Os constantes e repetidos choques do contragolpe do disparo mesmo de pequenos canhões, logo bambeavam as frágeis estruturas dos aeroplanos assim utilizados, pondo-os fora de uso. Este inconveniente já está sanado. Novos canhões foram inventados, que não produzem contrachoque. Consistem em um tubo do qual são expelidos dois projéteis,

por uma única explosão. No momento de atirar, um dos projéteis, uma mortífera bala de aço, desce velozmente em direção ao inimigo, e o outro, de areia, é descarregado no sentido contrário; dessas duas descargas simultâneas resulta a ausência de contra-choque. Imaginai o poder deste terrível fogo lançado de um aeroplano!

Eu não vejo por que razão não se pode proibir aos aeroplanos de jogar explosivos, quando se profbe jogar veneno na água e projeta-se proibir o uso de gases asfixiantes. Doente estou aqui, seguindo um tratamento para os meus pobres nervos<sup>12</sup>.

Venho te pedir um grande favor: como já deves saber, um senador propôs, sem me consultar, a minha nomeação de general! Isto parece coisa sarcástica, pois em fevereiro propus a abolição da aviação como arma de guerra. Venho pois, te pedir como sei que és muito amigo do nosso futuro presidente, para pedir a ele que mande parar tudo isto e mais homena-

gens, pois eu, como você sabe, ando há dois anos doente dos nervos e só peço a Deus uma coisa, é que me deixem em paz. Já estou aqui há dois meses e não tenho coragem de sair...<sup>13</sup>

### Previsões

Para fins comerciais e comunicações internacionais, tanto as estradas de ferro como os automóveis chegaram a um ponto em que a sua utilidade termina. Montanhas, florestas, rios e mares entravam o seu progresso. Mas o ar fornece um caminho livre e rápido para o aeroplano; para ele não há empecilhos. A atmosfera é o nosso oceano e temos portos em toda a parte!...

Prevejo uma época em que se farão carreiras regulares de aeroplano, entre cidades sul-americanas, e também não me surpreenderá se em poucos anos houver linhas de aeroplanos funcionando entre as cidades dos Estados Unidos e a América do Sul.



### Revolução constitucionalista de 1932

Meu Deus! Meu Deus! Não haverá meio de evitar derramamento de sangue de irmãos? Por que fiz eu esta invenção que, em vez de concorrer para o amor entre os homens, se transforma numa arma maldita de guerra? Horrorizam-me estes aeroplanos que estão constantemente pairando sobre Santos.

Solicitado pelos meus conterrâneos mineiros moradores neste estado para subscrever uma mensagem que reivindica o restabelecimento da ordem constitucional no país, não me é dado, por motivo de moléstia, sair do meu refúgio a que forçosamente me acolhi, mas posso ainda por estas palavras escritas afirmar-lhes, não só o meu inteiro aplauso, como também o apelo de quem, tendo sempre visado a glória de sua Pátria dentro do progresso harmônico da humanidade, julga poder dirigir-se em geral a todos os patrícios, como um crente sincero em que os problemas de ordem política e econômica que ora se debatem, somente dentro da lei magna poderão ser resolvidos, de forma a conduzir nossa Pátria à superior finalidade dos seus altos destinos. Viva o Brasil unido.

### Fontes Primárias

Santos Dumont. *Os Meus Balões*, tradução de *Dans L'Air*, Paris (1904) - Fundação do Projeto Rondon, Brasília (1986). Disponível em [www.dominiopublico.gov.br](http://www.dominiopublico.gov.br). Santos Dumont. *O Que Vi, O Que Veremos* (Edição do Autor, Petrópolis, 1918). Nova edição, Hedra (2002).

### Fontes Secundárias

Henrique Lins de Barros, *Santos Dumont - O Homem Voar!* (Contraponto, Rio de Janeiro, 2002).  
Henrique Lins de Barros, *Santos Dumont e a Invenção do Vôo* (Jorge Zahar, Rio de Janeiro, 2003).  
Henrique Lins de Barros, *Desafio do Ar: Os Pioneiros Brasileiros da Aeronáutica: 1709-1914* (Metalivros, Rio de Janeiro, 2006).  
Alexandre Medeiros, *Santos Dumont e a Física do Cotidiano* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006).

### Notas

<sup>1</sup>Étienne e Joseph Mongolfier construíram enormes balões de ar quente e fizeram inúmeras demonstrações. O primeiro vôo tripulado (um pato, um galo e

uma ovelha) foi realizado diante do rei Luís XVI da França em 19 de setembro de 1783.

<sup>2</sup>Alexander César Charles inventou o balão de hidrogênio (elemento descoberto por Henry Cavendish em 1766) e subiu pela primeira vez em 27 de agosto de 1783.

<sup>3</sup>Pilâtre de Rozier e o Marquês d'Arlandes realizaram o primeiro vôo em um balão Mongolfier, com duração de 25 minutos, em 21 de novembro de 1783.

<sup>4</sup>Henri Giffard, em 1852, dirigiu de modo precário um balão alongado com um motor a vapor.

<sup>5</sup>Aléxis Machuron e Henri Lachambre escreveram o livro de aventuras *Andrée au Pôle Nord em Ballon* que descrevia também os detalhes técnicos da preparação e do vôo de um balão exploratório rumo ao Pólo Norte a ser realizado pelo cientista sueco Salomon August Andrée. A expedição partiu em 11 de julho de 1897 e teve um triste fim com a morte dos tripulantes no gelo.

<sup>6</sup>Balão esférico construído pela *Maison Lachambre* e pilotado por Machuron.

<sup>7</sup>A corda-guia ou cabo pendente.

<sup>8</sup>Alexandre Medeiros no livro *Santos Dumont e a Física do Cotidiano* (Editora Livraria da Física, São Paulo) discute com clareza as questões científicas que permeiam as descrições de Santos Dumont de suas invenções e experiências. A descrição do primeiro vôo é rica em conceitos como a inércia, a imponderabilidade, o vácuo, corpos em equilíbrio, atrito; princípios e leis como as de Newton e dos gases perfeitos; e fenômenos como o efeito Doppler, o espalhamento de luz pelas nuvens, a formação de arco-íris, a opalescência crítica e ilusões ópticas.

<sup>9</sup>Ver artigos de Alexandre Medeiros neste número da FnE.

<sup>10</sup>Entrevista ao jornal *Le Matin* em 15 de dezembro de 1909.

<sup>11</sup>Discurso em Santiago do Chile (1916). Ao final queixou-se: *Eu tenho horror de falar em público! Prefiro uma queda de um balão.*

<sup>12</sup>Carta a Afrânio de Mello Franco, de Genebra (1926).

<sup>13</sup>Carta a Antônio Prado Jr., de um sanatório suíço em Valmont (11 de outubro de 1926).



.....  
**Nelson Studart**

Departamento de Física,  
 Universidade Federal de São Carlos,  
 São Carlos  
 e-mail: studart@df.usfcar.br  
 .....

## Cronologia de Santos Dumont

1873 1877 1883 1887 1889 1890 1891 1892 1897 1898 1899 1900 1901 1902 1903 1904

**8/8/1709 - Bartolomeu de Gusmão e o primeiro vôo bem sucedido de um balão de ar quente**

Na sala dos embaixadores da Casa da Índia, diante de D. João V, da Rainha, do Núncio Apostólico Cardeal Conti (depois papa Inocêncio XIII), do Corpo Diplomático e de demais membros da corte, Gusmão fez elevar a uns 4 metros de altura um pequeno balão de papel pardo grosso, cheio de ar quente, produzido pelo *fogo material contido numa tigela de barro incrustada na base de um tabuleiro de madeira encerada*. Com receio que pegasse fogo nos cortinados, dois criados destruíram o balão, mas a experiência tinha sido coroada de êxito e impressionado vivamente a Coroa.

**1783 - Vôos de balão dos irmãos Montgolfier**

Em 6 de junho eles exibiram publicamente um balão de linho que possuía 32 m de circunferência e que foi cheio com fumaça de uma fogueira de palha seca, elevando-se do chão cerca de 300 m durante cerca de 10 minutos, voando uma distância de aproximadamente 3 quilômetros. No dia 19 de setembro de 1783, perante o Rei Luis XVI e a Rainha Maria Antonieta, Joseph Montgolfier repetiu sua experiência, com o balão voando por 25 minutos com dois ocupantes (Pilatre de Rozier e François Laurent) e percorrendo mais ou menos 9 quilômetros. Em 27 de agosto de 1783, o físico Jacques Charles construiu e voou no primeiro balão de hidrogênio.

**20/7/1832 - Nasce o pai de Santos-Dumont**

Nasceu Henrique Dumont, o segundo dos três filhos do casal François Dumont e de D. Eufrasia Honorée Dumont, em Diamantina.

**6/9/1856 - Casamento dos pais de Santos-Dumont**

Casaram-se o engenheiro Henrique Dumont e Francisca de Paula Santos.

**20/7/1873 - Nasce Alberto Santos-Dumont**

Nasceu, na casa do sítio de Cabangu, no distrito de João Aires, Minas Gerais, o sexto dos oito filhos do casal Henrique Dumont e D. Francisca Santos-Dumont.

**20/2/1877 - Batizado de Alberto Santos-Dumont**

Foram batizados Alberto e sua irmã Sofia na Igreja de Santa Tereza. Ele foi batizado com o nome de Alberto Santos-Dumont.

**1883-1887 - A educação de Santos-Dumont**

Até os dez anos de idade não teve ensino formal, tendo sido alfabetizado por sua irmã Virgínia, sete anos mais velha. Dos dez aos doze anos freqüentou o Colégio Culto à Ciência em Campinas (1883-1884). A seguir mudou-se para o Colégio Kopke em São Paulo (1885), Colégio Morton (1886) e finalmente para o Colégio Menezes Vieira no Rio de Janeiro.

**31/3/1889 - Inauguração da Torre Eiffel**

Foi inaugurada a Torre Eiffel, monumento maior da Feira Internacional da Ciência e da Indústria realizada em Paris em comemoração aos 100 anos da Revolução Francesa.

**15/2/1890 - Oficialização do município de Palmira**

Foi oficialmente instalado o município de Palmira. A partir daí o sítio de Cabangu deixou de pertencer a Barbacena e passando para Palmira, que hoje é denominado Santos-Dumont.

**6/4/1891 - Primeira viagem a Paris em companhia de seus pais**

Viajou do Brasil para a Europa, acompanhando seus pais a bordo do vapor Elbe. Em Portugal, foram visitar três irmãs de Alberto que moravam na cidade do Porto: Maria, Virgínia e Gabriela. A casa de Virgínia era situada a beira-mar. Seguiram para a França, onde Alberto deslumbrou-se com as maravilhas tecnológicas, principalmente com os automóveis. Visitou o

---

Este artigo enumera fatos históricos relacionados a Santos-Dumont desde a primeira ascensão de um balão até o final de sua vida.

Pavilhão da Indústria remanescente da Exposição Internacional de Paris e lá ficou encantado com um pequeno motor a explosão. Em novembro, regressou ao Brasil pelo vapor Portugal.

### 12/2/1892 - Emancipação de Santos-Dumont

Foi emancipado pelo seu pai no Cartório do 3º Tabelião de Notas de São Paulo, que lhe entrega títulos no valor de muitas centenas de contos. *Tenho ainda alguns anos de vida; quero ver como você se conduz: vai para Paris, o lugar mais perigoso para um rapaz. Vamos ver se você se faz um homem; 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. Você não precisa pensar em ganhar a vida; eu lhe deixarei o necessário para viver...*

### 5/1892 - Segunda viagem do Brasil com destino à França

Viajou do Brasil com destino à França, acompanhado de seus pais. Porém, Henrique Dumont desembarcou com sua esposa na cidade do Porto, em Portugal, e voltou ao Brasil, devido a seus problemas de saúde. Em 1890 um acidente o deixara hemiplégico. Santos-Dumont continuou viagem para a França.

### 30/8/1892 - Falecimento de Henrique Dumont

Faleceu, no Rio de Janeiro, Henrique Dumont, sendo sepultado no Cemitério São João Batista.

### 1892-1897

A educação científica de Santos-Dumont se deu principalmente de forma autodidata, sendo porém auxiliada pela interação com o professor Garcia. Santos-Dumont assistiu aulas como ouvinte em instituições de ensino superior em Paris e em Bristol (Inglaterra).

### 1898

**Retorno ao Brasil.** Ficou encantado com a leitura do livro sobre as aventuras da viagem ao pólo norte em um balão do cientista sueco André. O balão havia sido construído pelos franceses Lachambre e Machuron.

### 23/3/1898 - Primeira ascensão aerostática

Realizou pela primeira vez em sua vida uma ascensão aerostática. Subiu em um balão dirigido pelo aeronauta francês Machuron e fabricado pela firma Lachambre & Macuhron, saindo do Parque de Aerostação de Vaugirard em Paris e descendo no terreno de Chateau de La Ferrière, propriedade de Alphonse de Rothschild.

### 30/5/1898 - Ascensão aerostática noturna

Realizou uma ascensão aerostática noturna, na qual seu balão foi envolvido por uma tempestade; nesse evento, Santos-Dumont partiu de Pérone e desceu próximo a Namur, na Bélgica.

### 14/7/1898 - O primeiro balão-livre esférico

Santos-Dumont subiu em seu primeiro balão individual, o Brasil. Voou várias vezes experimentando o aparelho e logo em seguida construiu o L'Amérique, bem maior e para vários passageiros.

### 18/9/1898 - Tentou decolar pela primeira vez com seu balão-dirigível nº 1

Neste evento, realizado no Jardim da Aclimação, concordou com os espectadores em decolar a favor do vento e acabou se acidentando.

### 20/9/1898 - Experiência bem sucedida com seu balão-dirigível nº 1

Realizou uma experiência bem sucedida com seu dirigível nº 1, partindo do Jardim da Aclimação até Bois de Boulogne, onde foi obrigado a descer no campo de Bagatelle devido ao mau funcionamento da bomba de ar do balonete.

### 25/10/1898 - Ascensão em um balão-livre

Santos-Dumont realizou ascensão em um balão-livre, que durou horas e foi de Paris a Vicarnes, próximo a Chantilly.

### 14/7/1898 Ascensão com o balão-livre Brasil

Realizou a ascensão com o balão livre Brasil, tendo partido do Jardim des Tuilleries, onde se realizava uma exposição de automóveis, descendo em Sevram.

### 11/5/1899 - Primeira experiência com o seu balão-dirigível nº 2

Partiu novamente do Jardim da Aclimação e logo após o início da ascensão o invólucro

lucro dobrou-se ao meio. O dirigível chocou-se contra as árvores, danificando-se.

### 13/11/1899 - Primeira experiência com seu dirigível nº 3

Saiu de Vaugirard e contornou a Torre Eiffel pela primeira vez. Segundo ele, *foi a ascensão mais feliz que até a data realizei.*

### 22/3/1900 - Construção do seu balão dirigível nº 4

Iniciou, em Paris, a construção do seu balão dirigível nº 4.

### 24/3/1900 - Criação do Prêmio Deutsch de la Meurthe

O vencedor seria o primeiro aeronauta que, com um balão dirigível, fizesse o percurso Saint Cloud - Torre Eiffel - Saint Cloud (11.000 metros), dentro do prazo de 30 minutos. Valor do prêmio: 100.000 francos.

### 15/6/1900 - Concluiu a construção do seu hangar no parque de aerostação do Aeroclube de França

Terminou a construção de seu hangar em Saint Cloud, no Parque da Aerostação do Aeroclube de França. O hangar media 30 metros de comprimento, 11 de altura e 7 de largura. Assim economizava gás e ganhava tempo. Seu lema de balonista viria a ser: *Descer sem sacrificar o gás, subir sem sacrificar o lastro.*

### 1/8/1900 - Termina a construção do balão dirigível nº 4 de Santos-Dumont

O Santos-Dumont nº 4 era um balão dirigível de forma cilindro-cônica, simétrica, com 28,6 m de comprimento, diâmetro na parte cilíndrica de 5,6 m e um volume de 420 m<sup>3</sup>. Algumas inovações foram incorporadas: motor mais potente de 7 cavalos e 2 cilindros, um selim de bicicleta no lugar do cesto, a hélice dianteira e pedais para acionar o motor.



Com o nº 3, comprova definitivamente a dirigibilidade aerostática.



Santos-Dumont era um estudioso de mecânica e planejava cada novo modelo meticulosamente.

#### 19/9/1900 - Experiências com seu nº 4, em Saint Cloud

Nessa ocasião, quebrou-se o leme de direção. A experiência foi feita na presença dos membros do Congresso Internacional de Aeronáutica. O astrônomo e inventor americano Samuel Langley, secretário do Smithsonian Institute, estudioso do vôo, entusiasmou-se com os testes. Langley construiu nos Estados Unidos excelentes aeromodelos, mas o seu avião foi um enorme fracasso.

#### 1/4/1901 - Prêmio Deutsch

Foi-lhe concedida pela Comissão Científica do Aero clube de França a quantia de 4.000 francos, juros do Prêmio Deutsch, por ter sido o aeronauta que mais se destacou naquele ano.

#### 13/4/1901 - Prêmio Santos-Dumont

Instituiu o Prêmio Santos-Dumont de 4.000 francos para quem, sem limite de

tempo, partisse de Saint Cloud, contornasse a Torre Eiffel e voltasse ao ponto de partida, usando somente os meios de bordo.

#### 12/7/1901 - Fez experiências com seu balão-dirigível nº 5

Decidiu mudar o nº 4 construindo um novo balão com melhores condições de dirigibilidade. Fez experiências com seu dirigível nº 5, com motor mais potente de 4 cilindros e 12 cavalos.

#### 13/7/1901 - Circulou em torno da Torre Eiffel

Com seu dirigível nº 5, na tentativa oficial para ganhar o Prêmio Deutsch, circulou em torno da Torre Eiffel antes de descer entre as árvores do parque da residência do barão Edmond de Rothschild. A vizinha de Rothschild, a princesa Isabel, condessa d'Eu, lhe ofereceu um *lunch au champagne* entre as árvores. Poucos dias

mais tarde, Santos-Dumont recebeu uma medalha para levar no pulso acompanhada de um pequeno bilhete: *Eis uma medalha de São Bento, padroeiro contra os acidentes. Aceite-a, e traga-a ao relógio, carteira ou ao pescoço.*

#### 1/8/1901 - Medalha de Ouro

O Aero clube de França conferiu-lhe uma medalha de ouro.

#### 8/8/1901 - Chocou-se com o telhado do Hotel Trocadero

Ao contornar a Torre Eiffel perdeu altura, indo chocar-se com o telhado do Hotel Trocadero. Ficou pendurado na cordoalha, sendo içado pelos bombeiros de Paris. O dirigível nº 5 ficou totalmente inutilizado, tendo ele, no mesmo dia, encomendado a construção do nº 6, aproveitando os restos do nº 5.

#### 11/8/1901 - Carta de agradecimento aos bombeiros de Paris

Foi publicada, na imprensa, uma carta de agradecimento aos bombeiros de Paris, por lhe terem socorrido quando se chocou com o Hotel Trocadero.

#### 30/8/1901 - Novo balão-dirigível, o nº 6

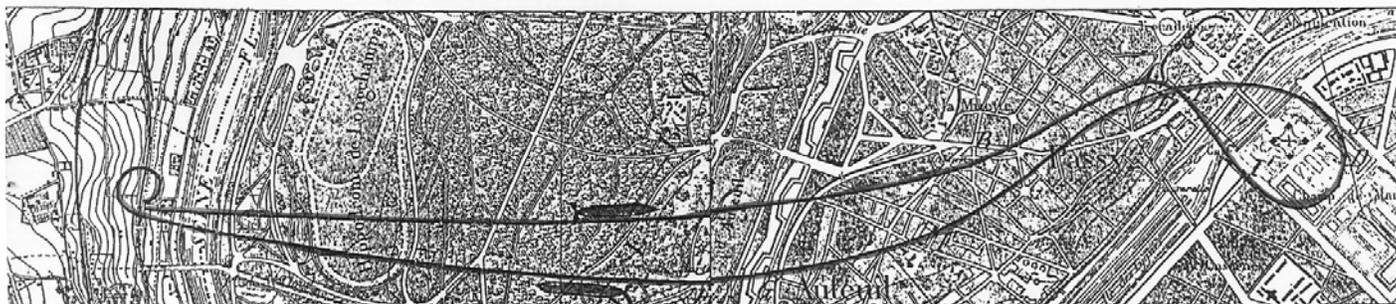
Em 22 dias estava pronto o novo balão, o nº 6 quase igual ao nº 5.

#### 6/9/1901 - Primeira experiência com o seu balão-dirigível nº 6

Realizou a primeira experiência com o seu dirigível nº 6. Nessa ascensão, Santos-Dumont colidiu com uma casa e seu balão sofreu avarias no invólucro e no leme.

#### 7/9/1901 - Modificações no regulamento do Prêmio Deutsch de la Meurthe

A Comissão de Aerostação do Aero clube de França tentou introduzir modificações no regulamento do Prêmio Deutsch de la Meurthe para torná-lo mais difícil. Três dias depois, Santos-Dumont escreveu ao Presidente do Aero clube de França, protestando contra as regras mais difíceis para obtenção do Prêmio Deutsch de la Meurthe.



O percurso a ser realizado para a conquista do Prêmio Deutsch de la Meurthe: do Aero clube de France à Torre Eiffel e volta ao Aero clube, em menos de meia hora.

### 18/9/1901 - Tenta vencer o Prêmio Deutsch

Tentou novamente vencer o Prêmio Deutsch, descendo no Prado de Long-champs, no Bois de Boulogne, devido a problemas técnicos no seu dirigível nº 6.

### 19/10/1901 - Vence o Prêmio Deutsch de la Meurthe

Em 19 de outubro de 1901, (menos de dois meses após seu quase fatal acidente com o nº 5!) às 14:42, Santos-Dumont partiu com seu dirigível nº 6, com 33 m de comprimento e 622 m<sup>3</sup>, para circundar a Torre Eiffel; após 29'30" o nº 6 encontrava-se sobre o ponto de partida. Finalmente vence o Prêmio Deutsch. Com esse feito Santos-Dumont provou que o homem podia controlar o seu deslocamento pelos ares.

### 5/11/1901 - Demissão do Aero clube de França

Pediu demissão do Aero clube de França.

### 8/11/1901 - Recebe o cheque do Prêmio de la Meurthe

Recebeu das mãos do Presidente do Aero clube de França, o Marquês der Dion, o cheque de 100.000 francos correspondente ao Prêmio de la Meurthe. Nesse dia, Santos-Dumont foi ao banco Crédit Lyonnais e trocou o cheque por 100 cédulas de 1000 francos; foi à Prefeitura de Polícia e entregou 50.000 francos para serem distribuídos aos pobres de Paris.

### 29/1/1902 - Vôos do nº 6 em Monte Carlo

Subiu com o nº 6 em Monte Carlo, onde passou uma temporada a convite do príncipe Dino, que mandou construir no bulevar de La Condanine um aeródromo e hangar para os seus balões.

### 1/2/1902 - Construção do balão-dirigível nº 7

Partiu de Nice para Paris a fim de tratar da construção do seu dirigível nº 7. As más condições atmosféricas lhe impediam de fazer ascensões com seu dirigível nº 6. Aproveitou para realizar obras de melhoria em seu hangar.

### 14/4/1902 - Publicação do encontro de Santos-Dumont com Thomas Edson

O periódico Argus Albany de Nova York publicou o encontro de Santos-Dumont com Thomas Edson, o inventor da lâmpada elétrica, em seu laboratório em West Orange, N.Y., no dia 13 de abril.

### 16/4/1902 - Santos-Dumont é recebido na Casa Branca

Santos-Dumont é recebido na Casa Branca por Theodore Roosevelt, presidente dos EUA.

### 22/6/1902 - Falecimento de Francisca Dumont

Faleceu, na cidade do Porto, Francisca Dumont, sua mãe, sendo enterrada no Cemitério Agromonte.

### 21/5/1903 - Balladeuse e o invento de nº 9

A partir desta data Santos-Dumont realizou vários vôos no Balladeuse, o menor dirigível até então construído. Pequeno, ágil e fácil de manobrar, foi a sensação de 1903. Tinha capacidade de apenas 261 m<sup>3</sup> de gás e 12 m de comprimento, podendo desenvolver a velocidade de 30 km/h com um motor de 3 cavalos.

### 23/6/1903 - Desce com o dirigível nº 9 na calçada de sua residência

Santos-Dumont desceu com seu dirigível nº 9 na calçada de sua residência na Av. Champs Elisées para tomar chá.

### 29/6/1903 - Aída d'Acosta realizou vôo no dirigível nº 9

A cubana Aída d'Acosta realizou um vôo solitário no nº 9, indo e retornando no trajeto de Neuilly a Bagatelle.

### 14/7/1903 - Passa em revista às tropas

Vouou sobre a parada militar em comemoração ao 114º aniversário da Queda da Bastilha. Santos-Dumont parou com seu nº 9 em frente ao palanque das autoridades e saudou o Presidente da República da França com uma salva de 21 tiros dados com seu revólver. Esse fato apre-

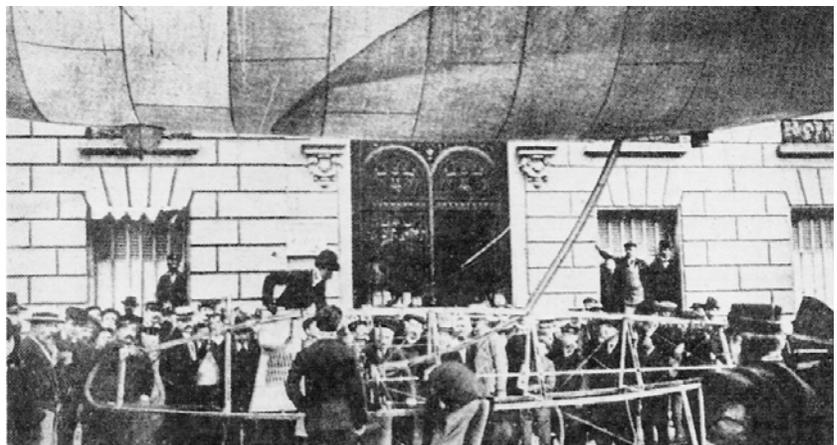


Com o nº 6, contornando a Torre Eiffel: a conquista do Prêmio Deutsch de la Meurthe.

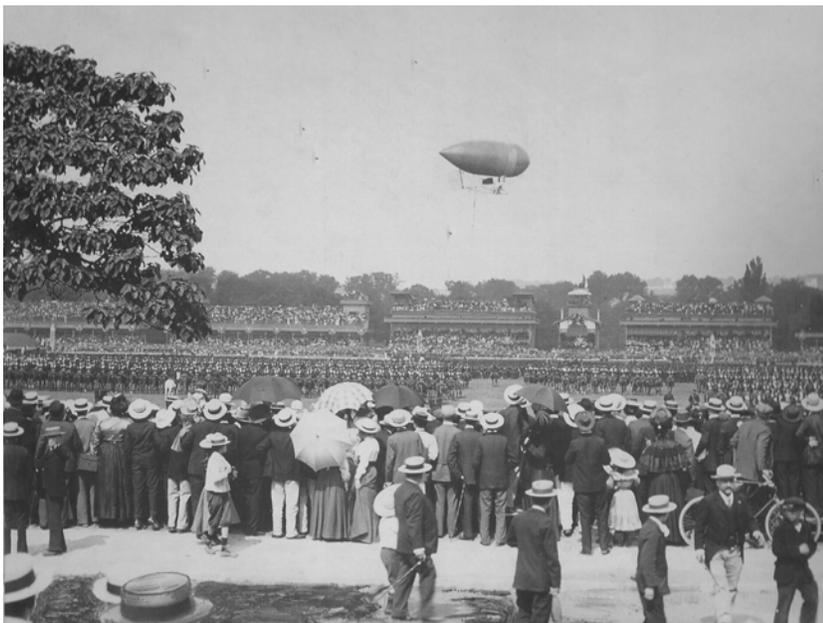
sentou-se como o primeiro desfile aéreo em uma parada militar.

### 7/9/1903 - De volta ao Rio de Janeiro

Partiu para o Brasil em 20 de agosto com a intenção de rever a família e amigos, de quem estava afastado havia seis anos, e restabelecer a saúde debilitada por trabalhos excessivos. Chegou ao Rio de Janeiro a bordo do vapor Atlantique. Teve recepção calorosa com comemorações



Com seu nº 9, Santos-Dumont mostrou sua confiança nos modelos que construía e em que os aviões seriam algum dia um meio de transporte bastante comum: ele desceu na calçada do prédio onde ficava seu seu apartamento para beber um chá.



Em revista às tropas na comemoração ao 114º aniversário da Queda da Bastilha: o primeiro desfile aéreo em uma parada militar.

intensas, sendo recepcionado como herói. Nesse dia, cumprimentou, no Palácio do Catete, o Presidente da República Rodrigues Alves e à noite assistiu a uma ópera no Teatro Lírico.

#### 9/1903 - Visita outras cidades

Santos-Dumont visitou Campinas e Belo Horizonte passando por Barbacena, Palmira e Juiz de Fora.

#### 23/9/1903 - Retorno à Europa

Santos-Dumont visitou o balão que José do Patrocínio estava construindo em Inhaúma, no Instituto Histórico e Geográfico Brasileiro. Despediu-se do Presidente da República e embarcou de volta no Atlantique. Chegou em Paris em 12 de outubro.

#### 3/4/1904 - Cavaleiro da Legião de Honra da França

Foi publicado no L'Officie o decreto nomeando-o como Cavaleiro da Legião de Honra da França.

#### 1904 - Publica *Dans l'Air*

Publicou em Paris o livro *Dans l'Air* que em seguida é publicado na Inglaterra sob o título *My Airships*. A versão brasileira *Os Meus Balões* só apareceu em outubro de 1938 nas comemorações da Semana da Asa. Neste livro deixou claro seu plano: *Nossa única esperança de navegar no ar [...] devemos procurá-la na natureza das coisas, no "mais-pesado-que-o-ar", na máquina voadora ou aeroplano.*

#### 28/6/1904 - Sabotagem em seu dirigível nº 7

Em junho, encontrou o invólucro do seu Santos-Dumont nº 7 rasgado. Não se

sabe ao certo a origem de tal incidente. Um fato semelhante ocorreu também na Inglaterra impedindo-o igualmente de exibir sua aeronave. Santos-Dumont apresentou a versão de sabotagem. As autoridades acusaram-no de rasgar a sua própria aeronave para não ter de submetê-la a um teste. Retornou a Paris abandonando as corridas.

#### 18/7/1906 - Inscrição em duas provas no Aeroclube de França

Inscreveu-se para disputar duas provas no Aeroclube de França: a Taça Ernest Archedeacon, para quem fizesse um voo de mais de 25 metros em aeronave mais pesada que o ar, e o Prêmio Aeroclube, de 1500 francos, para quem fizesse

um voo de mais de 100 metros.

#### 19/7/1906 - Apresenta seu 14 bis

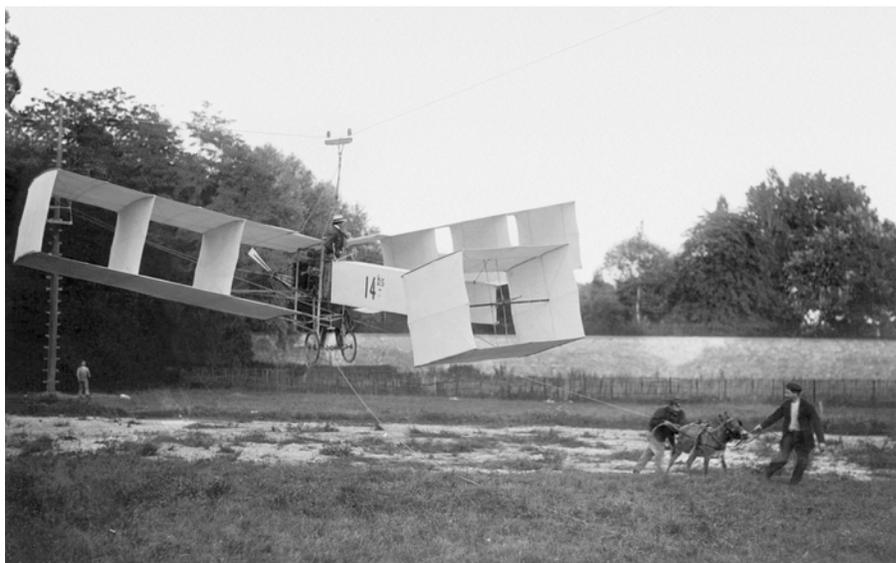
Surgiu com um aparelho extravagante com estrutura de caixas com motor de 25 cavalos (depois substituído por um de 50), 12 m de envergadura e 10 m de comprimento. *Dependurei meu aeroplano em meu último balão, o nº 14; por esta razão apelidaram aquele com o nome de 14 bis. Com este conjunto híbrido fiz várias experiências em Bagatelle, habituando-me dia a dia, com o governo do aeroplano, e só quando me senti senhor das manobras é que me desfiz do balão.*

#### 13/9/1906 - Realiza um voo de 7 metros de distância com o 14 bis no campo de Bagatelle

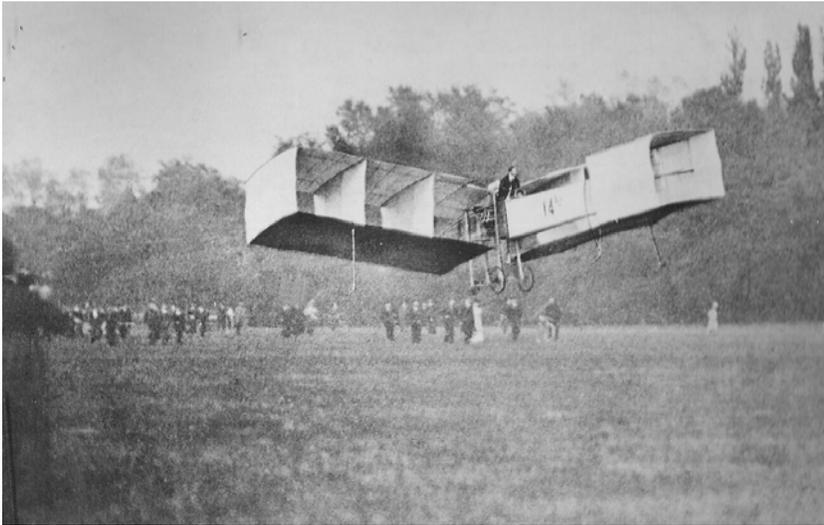
Foi notícia na revista francesa *La Nature*: *O dia 13 de setembro de 1906 será doravante histórico, pois, pela primeira vez, um homem elevou-se no ar por seus próprios meios, Santos-Dumont que, sem abandonar seus trabalhos nos "mais leves que o ar", fez também importantes estudos sobre o "mais pesado que o ar"; foi ele quem conseguiu "voar" neste dia memorável; diante de um público numeroso... Elevou-se no espaço, sem balão, e esta é uma vitória importante para os partidários do "mais pesado que o ar".*

#### 23/10/1906 - Primeiro voo do 14 bis

Santos-Dumont conseguiu realizar o primeiro "voo mecânico" do mundo, devidamente homologado, alcançando a distância de 60 m, em voo nivelado a uma altura que variava entre 2 m e 3 m com duração de 7 s. Venceu o prêmio Archedeacon, no valor de 3.000 francos. Ficou oficialmente provado que o ser humano podia voar com um aparelho mais-pesado-que-o-ar, utilizando seus próprios meios. Era um início promissor: *Lutei, a princípio, com as*



Teste de estabilidade do 14 bis: pendurado em um cabo e puxado por uma mula.



Aos últimos raios de sol da tarde de 23 de outubro de 1906 o mais pesado que o ar ascende para a história.

maiores dificuldades para conseguir a completa obediência do aeroplano. Era o mesmo que arremessar uma flecha com a cauda para a frente. Em meu primeiro vôo, após sessenta metros, perdi a direção e caí... Não mantive mais tempo no ar, não por culpa da máquina, mas exclusivamente minha.

#### 12/11/1906 - Conquista do Prêmio Aeroclub de França

Após três tentativas, o 14 bis realizou o segundo vôo homologado da história da aviação ao percorrer 220 m, a 6 m de altura do solo, em 21 s, a uma velocidade média de 41 km/h. Conquistou, portanto, o outro prêmio, oferecido pelo Aeroclub de França, batendo seu recorde de 23 de outubro. A multidão envolveu o 14 bis e Santos-Dumont saiu carregado em triunfo pelo povo que acorrera ao Campo de Bagatelle. Toda a imprensa mundial noticiou os dois grandes feitos do brasileiro. Este vôo ficou conhecido como "o minuto memorável da história da navegação aérea" A repercussão internacional foi enorme.

#### 4/4/1907 - Fim do 14 bis

Ao tentar decolar com o aeroplano 14 bis, acidentou-se no campo de provas de Saint Cyr, tendo a aeronave sido destruída.

#### 15/11/1907 - Experiências com a "jovem donzela"

Entre 15 a 17 de novembro Santos-Dumont realizou experiências com seu invento de número 19, que ficou conhecido como Demoiselle. Era um avião totalmente original, extremamente leve e de um design impressionante. Segundo ele, ...nessa época, os aparelhos eram grandes, enormes, com pequenos motores, voavam devagar, uns 60 km/h ou pouco mais. Mandei, então, construir um motor especial de minha invenção, desenhado especialmente

para um aeroplano minúsculo. Este motor possuía dois cilindros opostos, o que traz a inconveniência da dificuldade de lubrificação, mas, também, as vantagens consideráveis de um peso pequeno e um perfeito equilíbrio, não ultrapassado por qualquer outro motor. Pesava 40 quilos e desenvolvia 35 cavalos.

#### 21/11/1907 - Acidente com o nº 19 - Demoiselle

O primeiro modelo do "Santos-Dumont nº 19", o Demoiselle, sofreu acidente em Buc.

#### 23/12/1908 - Exposição aeronáutica no Grand Palais

Entre 23 a 30 de dezembro, realizou-se no Grand Palais, em Paris, uma exposição aeronáutica, na qual estava o Demoiselle de Santos-Dumont. Hoje, o Demoiselle nº 20 encontra-se em exposição permanente no Musée de l'Air et de l'Espace.

#### 6/4/1909 - Primeiras experiências com o Demoiselle 20

Santos-Dumont realizou as primeiras experiências com o Demoiselle 20: voou 2000 m. Em 13 de setembro atingiu a velocidade de 96 km/h em vôo com duração de 5 min.

#### 17/9/1909 - Visita inesperada ao castelo Gallard

Pilotando o novo modelo foi forçado a pousar nos jardins do Chateau d'Aion, do conde Gallard em Wideville, após percorrer 18 km.

#### 18/9/1909 - Passa rasante sobre a multidão com os braços levantados

De volta ao hangar, transportado no próprio carro, Santos-Dumont levantou vôo novamente. Em Saint Cyr passou rasante sobre a multidão com os braços levantados, demonstrando a perfeita estabi-

lidade da aeronave. Um repórter assim relatou: *Depois de um vôo maravilhoso de destreza e de leveza, voltou sobre nós, e enquanto os aplausos estouravam, afastou os braços, deixando naturalmente as alavancas e os manetes, pegou um lenço em cada mão e os deixou cair sobre nós... depois disso aterrissou, simplesmente, modestamente, como um herói.*

#### 4/1/1910 - Acidente com seu Demoiselle

Sofreu um acidente, com seu Demoiselle, tendo se machucado.

#### 12/11/1910 - Monumento em Bagatelle

Em comemoração à conquista do Prêmio Aeroclub de França, foi inaugurado o monumento em Bagatelle.

#### 19/10/1913 - Inaugurado o monumento sobre a conquista do Prêmio Deutsch

O monumento é encimado pela estátua de Ícaro.

#### 24/10/1913 - Promoção ao Grau de Comendador

Foi promovido ao Grau de Comendador da Legião de Honra da França.

#### 12/1913 - Da França para o Brasil

Partiu da França para o Brasil, aonde chegou em 2 de janeiro de 1914, pelo vapor Blucher.

#### 4/8/1914 - Oferece seus serviços ao Ministério da Guerra Francês

Ao iniciar a I Guerra Mundial, ofereceu seus serviços ao Ministério da Guerra.

#### 7/8/1914 - Recebe estranhas comunicações das autoridades militares francesas

Recebeu comunicação das autoridades militares francesas informando que sua casa, em Benerville, seria ocupada militarmente. Logo a seguir, outro comunicado requisitava seu automóvel. Em 14 de agosto, Santos-Dumont deu autorização para ocupação militar de sua casa. Depois recebeu novo comunicado informando



Voando em seu Demoiselle (1909).

que a luneta astronômica de sua casa não estava sendo usada para a vigilância do mar. Santos-Dumont não entendeu estes fatos, uma vez que havia se oferecido para o esforço de guerra. Ficou deprimido em virtude dos incidentes. Queimou seus desenhos, seus projetos e suas anotações.

#### 10/1915 - Voa em um hidroavião Curtiss

Santos-Dumont voou em um hidroavião Curtiss na fábrica em Long Island, N.Y.

#### 28/12/1915 - Inauguração do Segundo Congresso Científico Pan-americano

Inaugurou-se, em Washington, o Segundo Congresso Científico Pan-americano, no qual Santos-Dumont discorreu sobre o seguinte tema: "Como o aeroplano pode facilitar as relações entre as Américas". Sua conferência teve grande repercussão. Nessa ocasião o Aero clube da América convidou-o para representá-lo no Congresso Pan-americano de Aeronáutica no ano seguinte, em Santiago do Chile.

#### 9/3/1916 - Presidente da Primeira Conferência Pan-americana de Aeronáutica em Santiago do Chile

Santos-Dumont foi declarado Presidente de Honra. Participou ativamente das comissões que redigiram os estatutos da Federação Aeronáutica Pan-americana.

#### 24/4/1916 - Passagem pelo Paraná

Partiu de Santiago, dirigindo-se ao Brasil, através território argentino, subindo o Rio Paraná, tendo chegado a Foz do Iguaçu em 24 de abril. No mesmo dia foi a cavalo visitar as cataratas. Por sua sugestão foi criado o parque de Iguaçu. Em 3 de maio chegou a cavalo em Guarapuava. Três dias depois chegou de trem a Curitiba, passando por Ponta Grossa. Em Curitiba foi alvo de inúmeras homenagens.

#### 18/4/1918 - Adquire o terreno em Petrópolis

Adquiriu o terreno nº 22, na Rua do Encanto, em Petrópolis, onde mandou construir sua residência que recebeu o nome de "A Encantada". Ali, escreveu o livro *O Que Eu Vi, O Que Nós Veremos*. Quando de sua estada em Petrópolis, o governo brasileiro doou-lhe o Sítio de Cabangu, onde nasceu.

#### 4/1922 - De volta para a França

Partiu do Brasil para a França no vapor Lutetia. Ao passar por Fernando de Noronha, trocou telegramas com Sacadura Cabral e Gago Coutinho que se encontram a bordo do cruzador português República, aguardando o segundo hidroavião para prosseguir o reide para o Brasil.

#### 14/5/1922 - Última ascensão aerostática

Realizou sua última ascensão aerostática, em Paris, na companhia do conde de La Vaulx, no balão livre La Cigogne.

#### 23/4/1923 - Viagem a Portugal para trazer os restos mortais de sua mãe ao Brasil

Partiu do Brasil para Portugal, a fim de buscar os restos mortais de sua mãe. Em 11 de agosto os mesmos foram trasladados para o Cemitério São João Batista.

#### 21/8/1923 - Iniciada a construção do túmulo para seus pais

Por ocasião do centenário da Independência do Brasil, o governo francês fez uma réplica do monumento em Saint Cloud que ficou exposta no Pavilhão Francês. Ao final das comemorações, essa réplica foi ofertada a Santos-Dumont. Nesta data, foi iniciada a construção do túmulo para seus pais, no qual foi colocada a réplica do monumento.

#### 23/10/1923 - Translado dos restos mortais de seus pais

Fez o traslado dos restos mortais de seus pais para o túmulo por ele construído.

#### 6/11/1924 - Ordem de Leopoldo II da Bélgica

Foi feito Grande Oficial da Ordem de Leopoldo II da Bélgica.

#### 20/7/1925 - Repousa em clínica

Os problemas de saúde se agravaram e Santos-Dumont buscou tratamento para "os meus pobres nervos" na Clínica Valmont, em Gliion-sur-Montreux, Suíça. Em 15/12/1927 escreveu: *Doente aqui na Suíça, longe dos amigos, para distração tenho tomado aulas de encadernação*. Estava supostamente sendo vencido pela esclerose múltipla.

#### 11/1928 - Viagem da Europa para o Brasil

Viajou da Europa para o Brasil a bordo do vapor Cap Arcona, chegando ao destino em 3 de dezembro.

#### 10/7/1930 - Condecoração de Grande Oficial da Legião de Honra da França

Recebeu a condecoração de Grande Oficial da Legião de Honra da França, grau a que fora promovido em dezembro de 1929, num banquete organizado pelo Aero clube de França, no Hotel Claridge em Paris.

#### 28/10/1930 - Repouso na Casa de Saúde de Préville

Santos-Dumont internou-se na Casa de Saúde de Préville em Orthez, nos Baixos Pirineus, França. Em 14 de abril do ano seguinte fez seu primeiro testamento.

#### 28/5/1931 - Volta ao Brasil

Partiu da Europa a bordo do vapor Lutetia, chegando ao Brasil em junho. Não estava bem. Nada de cerimônias ou homenagens. O desembarque foi triste: *Em silêncio hierático, os braços tombados indiferentemente, olhava absorto para o tumultuado ambiente. Alongava o olhar para o mar e para o céu. Enfermo e em silêncio, desembarcou do Lutetia ao largo para fugir*

às emoções da aclamação popular. As pessoas de sua família, que o rodeavam, pediram-nos encarecidamente que nos abstivéssemos até de cumprimentá-lo. Olhamos Santos-Dumont. Sempre a sua fina sensibilidade. Santos-Dumont chorava... e foi chorando que desceu de braço com seus sobrinhos, a escada de bordo.

#### 4/6/1931 - Membro da Academia Brasileira de Letras

Santos-Dumont foi eleito membro da Academia Brasileira de Letras, para ocupar a cadeira nº 38, cujo patrono é Tobias Barreto. A cadeira achava-se vaga após a morte de José Pereira de Graça Aranha.

#### 14/7/1932 - Redige uma mensagem aos seus compatriotas

Redigiu uma mensagem ao governador de São Paulo, Pedro de Toledo, durante a Revolução Constitucionalista, em que reivindica o restabelecimento da ordem constitucional no país (...), como um crente sincero em que os problemas de ordem política e econômica que ora se debatem, somente dentro da lei magna poderão ser resolvidos.

#### 23/7/1932 - Morre Alberto Santos-Dumont

Às onze horas, a camareira do Hotel De La Plage, Francisca Mucci, desce as escadarias esbaforida e exclama: *O doutor do 152 está morto! Coitado do doutor!* O Decreto nº 21.668 estabelece luto de três dias. Em 2001, a Prefeitura de Guarujá restaurou o carro fúnebre que transportou o corpo de Santos-Dumont para São Paulo.

#### 21/12/1932 - Alberto Santos-Dumont é enterrado no Rio

O corpo de Alberto Santos-Dumont foi colocado no túmulo no Cemitério São João Batista, sua pousada definitiva. No instante em que seu corpo era colocado no túmulo, caía um forte temporal.

#### 10/1973 - Nome de Santos-Dumont a uma das crateras da Lua

Em outubro do ano do centenário de nascimento de Santos-Dumont, o Comitê de Nomenclatura da União Astronômica Internacional, por proposta do Museu Nacional do Ar e do Espaço da Smithsonian Institution, deu o nome de Santos-Dumont a uma das crateras da Lua.

#### Fontes

Sítio oficial do centenário do 14 bis: <http://www.14bis.mil.br/> - acesso em 4 de outubro de 2006.

Henrique Lins de Barros, *Santos Dumont e a Invenção do Vôo*, (Jorge Zahar, Riode Janeiro, 2003).

Henrique Lins de Barros, *Santos Dumont - O Homem Voa!* (Contraponto, Rio de Janeiro, 2002).

Santos Dumont, *O Que Vi, O Que Veremos* (Edição do Autor, Petrópolis, 1918).

Alexandre Medeiros, *Santos Dumont e a Física do Cotidiano* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006)



## Mudanças no Conceito de Vôo na Primeira Década do Século XX: O Trabalho Pioneiro de Santos Dumont

### Introdução

A conquista do vôo sustentado e controlado é um marco do século XX. Diversos inventores abordaram o problema desde que os balões livres de Montgolfier primeiro se elevaram do solo no final do século XVIII. Porém, a falta de um meio de propulsão leve, seguro e confiável retardou o progresso da aviação por um longo tempo. Apenas no final do século XIX, com a invenção do motor de combustão interna, o assunto começou a se popularizar. Para os especialistas, contudo, estava claro que melhorias importantes ainda seriam necessárias para se tornar o vôo possível.

Um aspecto interessante da história do vôo do mais-pesado-do-que-o-ar é o caminho ligando os modelos revolucionários de planadores feitos por Sir George Cayley por volta de 1804 aos primeiros aviões construídos no início do século XX. Apesar dos planadores de Cayley já incorporarem os elementos essenciais de uma configuração auto-estável, os pioneiros do início do século XX geralmente optaram por uma configuração intrinsecamente instável com respeito a um dos 3 eixos.

Na carreira do brasileiro Alberto Santos-Dumont (1873-1932)<sup>1-3</sup> acompanhamos o processo de desenvolvimento de uma configuração

instável a um avião bem sucedido. Ao mesmo tempo, demonstramos como o empirismo dominante da época sugeriu desvios que exigiram um enorme dispêndio de energia para rejeitar um modelo mental inapropriado em grande parte ligado à idéia de que força é associada à velocidade.

É curioso observar que na história da Ciência encontra-se um paralelo a este conceito na física do ímpeto. Focalizamos o curto período do meio de 1906, quando Santos-Dumont dirigiu sua atenção para o vôo do mais-pesado-que-o-ar, até novembro de 1907 quando ele alcançou aquilo que pode

ser considerado o verdadeiro precursor físico do avião moderno.

### Precusores conceituais e precusores físicos

O avião é um sistema complexo, *um sistema único composto de partes compatíveis cada uma das quais interagindo com as outras e contribuindo para a função básica, de tal modo combinadas que a remoção de uma parte impede o funcionamento eficiente do todo*<sup>4</sup>. Para examinar a evolução do avião, portanto, é conveniente tomar emprestados alguns conceitos do estudo dos sistemas complexos.

Nosso objetivo não é o de tratar sistemas mecânicos como se eles fossem sujeitos às regras de uma teoria evolucionista à maneira de Darwin ou a reduzir a questão a um mero for-

.....  
**Henrique Lins de Barros**

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas,  
Rio de Janeiro

.....  
**Mauro Lins de Barros**

Consultor Aeronáutico  
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas,  
Rio de Janeiro

.....

---

O início do século XX foi o palco da realização de um dos mais antigos sonhos do homem: voar. Santos-Dumont voou como os antigos gregos acreditavam que Ícaro voara: livre, controlando sua direção. Neste artigo comentamos os passos e as inovações introduzidas por Santos-Dumont em sua caminhada para conquistar os céus.

malismo que, em sua pior forma, pode tomar uma feição puramente matemática. Pelo contrário, nossa intenção é colocar a discussão em perspectiva com o auxílio de conceitos que permitam distinguir as nuances dos vários projetos que refletem as mudanças dos modelos mentais requeridas para a realização de uma máquina mais-pesada-do-que-o-ar bem sucedida. A história da aviação já é suficientemente rica em pretensões conflitantes e não desejamos adicionar a nossa parcela à controvérsia.

Duas noções – precursores conceituais e físicos – serão úteis para a nossa discussão. Um precursor conceitual é um artefato capaz de executar uma certa função. Ele não é necessariamente ligado a nenhuma solução técnica específica. No nosso caso, um dos conceitos envolvidos é o do vôo controlado. Sob este aspecto, um precursor conceitual é, por exemplo, o balão dirigível que desempenha a mesma função do avião (voar controladamente).

O precursor físico, por sua vez, é um elo em uma cadeia contínua que leva ao artefato final. Ele pode o preceder por uma ou mais etapas no desenvolvimento. Assim, é necessário ser possível chegar ao artefato final, partindo do precursor, através de transformações e adaptações incrementais.

Finalmente, entendemos que a função mínima<sup>4</sup> é a capacidade de executar uma dada tarefa (no nosso caso, o vôo controlado por uma máquina mais-pesada-do-que-o-ar) em condições fisicamente

realistas. O conceito de função mínima ajuda a discriminar aquelas invenções que, apesar de aparentemente adequadas, não são capazes de executar a tarefa requerida, seja pela falta de materiais apropriados, seja por causa do uso incorreto de algum outro elemento. No caso da aviação, veremos que a função mínima aparecerá explicitamente nos critérios de

testes instituídos pelos próprios inventores.

## Método e os inventores do século XIX

Um aspecto importante na invenção do avião é a quase completa ausência de um corpo de trabalho científico. Os inventores eram, na vasta maioria, leigos mecanicamente talentosos, com pouco conhecimento de princípios básicos bem estabelecidos<sup>5-8</sup>. Isso pode ser visto, por exemplo, na ausência de consideração do torque das diversas forças envolvidas, ao passo que o balanço das forças recebia a atenção devida<sup>9</sup>.

Este treinamento inadequado em Física levou os inventores do século XIX ao desenvolvimento de trabalho experimental. Experiências brutas abriram o caminho para a descoberta, sem a elaboração de modelos teóricos que poderiam ajudar e acelerar o progresso. O caminho para o sucesso foi muito mais longo do que o necessário, pois os modelos mentais sugeridos pela experimentação conduziram para longe da solução ótima. É um aspecto irônico que, na história da aviação,

as principais características de uma configuração estável eram bem conhecidas desde longa data, tendo sido propostas por Cayley e testadas por Otto Lilienthal durante o século XIX. Neste sentido, a invenção do avião é semelhante à do cronômetro marítimo, feita por Harrison no século XVIII<sup>10</sup>. Ainda assim, sabia-se que o vôo do avião estava por se transformar em uma realidade, como deixa claro artigo publicado na revista Science em 1885<sup>11</sup>:

*Chega-se à conclusão de que a arte da aerostação está muito mais próxima de um estágio de aplicação prá-*

*tica do que os cientistas geralmente supõem. Os objetivos agora buscados são o alcance de formas melhores e mais estáveis, o arranjo mais efetivo das partes, a invenção de motores mais leves, invariáveis em peso, e de garantir uma maior eficiência dos instrumentos de propulsão. Agora mesmo, com a experiência do passado, é possível construir uma máquina desta classe capaz de se locomover a pelo menos dez metros por segundo em relação ao meio circundante.*

**...e através de transformações e adaptações incrementais sobre modelos precursores, conseguiu-se chegar a um artefato final**

O desenvolvimento científico requer que se progrida na direção da abstração e da generalização: experimentos, como base

para o raciocínio, devem ser depurados de influências estranhas e devem ser capazes de fornecer os elementos para a construção de um modelo no qual diversas variáveis possam ser manipuladas ou compreendidas.

No caso do desenvolvimento tecnológico o processo é revertido, pois ele busca progredir do geral para o específico. Isso requer outras formas de pensamento nas quais a abstração tem pouca utilidade. A motivação é o objetivo desejado, seja ele a medida do tempo em alto mar ou a construção de uma máquina capaz de voar. Esta diferença no pensamento e na abordagem tornaram impossível a cientistas eminentes como Galileu, Newton e Huyghens, dentre outros, contribuir para a medida do tempo em navios, apesar de terem contribuído com a noção de tempo linear. Pela mesma medida, Lord Kelvin no século XIX, questionou a possibilidade de voar<sup>7</sup> com uma máquina mais pesada do que o ar. Isso também contribuiu para o fracasso de pessoas com uma boa formação acadêmica como Samuel Pierpoint Langley, enquanto leigos ousados e criativos alcançaram o sucesso.

Sem o trabalho de desenvolvimento baseado na mecânica dos fluidos ou experimentação sistemática preparada com critérios apropriados, os pioneiros aeronáuticos foram obriga-

dos a exercer a sua criatividade através de experiências ingênuas que eventualmente seguiram duas linhas. A primeira foi o desenvolvimento de modelos em escala que, apesar de alcançar algum sucesso, não produziram dados significantes. Isto ocorreu porque em mecânica dos fluidos, assim como em resistência dos materiais, mudanças de escala requerem um tratamento especial. A outra tendência foi a construção e teste de protótipos.

Também é interessante observar que nenhum dos inventores foi capaz de explorar os resultados em mecânica dos fluidos obtidos por Bernoulli no século XVIII. Isso teria simplificado enormemente as coisas, mas as equações não podem ser aplicadas diretamente a corpos de geometria complexa. Outra atitude era exigida: uma abordagem matemática com alto grau de abstração para estabelecer os limites de aplicação das equações de Bernoulli. Um avião não é um objeto fácil de ser modelado matematicamente e o regime de voo não é suficientemente regular para ser examinado de modo matemático. Naturalmente, depois do sucesso de uma invenção, torna-se muito mais fácil reexaminá-la sob uma luz teórica e acelerar o desenvolvimento com modelos matemáticos, pois os meios de calibrá-los e avaliar a validade das conclusões estão disponíveis.

De qualquer forma, o experimentalismo do século XIX produziu uma base de conhecimentos útil com relação às características essenciais do voo. Túneis de vento rudimentares e braços giratórios ajudaram a demonstrar que a sustentação gerada por uma superfície que se move no ar aumenta com o ângulo de incidência até que um valor máximo é alcançado no limite do estol. Lilienthal produziu tabelas; Horatio Phillips e Langley estudaram aerofólios, F.H. Wenham e J. Browning em 1871 e os irmãos

Wright em 1901 estudaram a sustentação de superfícies em túneis de vento e compararam seus resultados com os de Lilienthal. Experiências com modelos em escala demonstraram o voo auto-estabilizado. Em 1871, Alphonse Pénaud fez voar um modelo inerentemente estável e em 1896 o Aerodrome não pilotado de Langley voou com sucesso sobre o Potomac. E assim por diante<sup>6-8,12</sup>.

Os vãos de Lilienthal realizados no curto período de 1893-96 provaram que a configuração de Cayley fornecia uma boa solução para o requisito de estabilidade. Porém em 9 de agosto de 1896, seu planador estolou e entrou em parafuso até o solo, ferindo-o fatalmente. Sua morte lançou uma sombra sobre o futuro. O medo do estol, produzido pelo ângulo de incidência excessivo da asa, parecia requerer uma nova abordagem. O caminho para o sucesso estava para entrar por um longo desvio.

Nos Estados Unidos, Orville e Wilbur Wright introduziram uma superfície horizontal anterior (profundor) com a intenção de prevenir o estol<sup>7,12-14</sup>. Esta superfície introduzia instabilidade durante o voo mas evitava que o planador abaixasse o nariz caso a asa estolasse por causa de incidência excessiva ou falta de velocidade. Os vãos bem sucedidos dos Wright estabeleceram um novo paradigma.

### Critérios de testes e a questão da decolagem

Outra questão fundamental no desenvolvimento da aeronáutica, a capacidade da máquina alçar voo sob seus próprios meios, apareceu proeminentemente como um dos requisitos para os critérios de teste estabelecidos para julgar um sucesso. E, como

no caso do cronômetro marítimo, o teste público anunciado com antecedência e julgado por uma comissão previamente nomeada constituía a única prova de sucesso aceita geralmente, em oposição a relatos de testemunhas.

**É interessante observar que nenhum dos inventores foi capaz de explorar os resultados em mecânica dos fluidos obtidos por Bernoulli no século XVIII. Isso teria simplificado enormemente as coisas**

Langley, porém, recorreu ao relato de uma testemunha com credibilidade para alegar que seu Aerodrome N. 5 demonstrara a possibilidade do voo<sup>15</sup>:

*Ninguém poderia testemunhar estes experimentos sem ficar convencido de que a praticabilidade do voo mecânico foi demonstrada.*

*Atenciosamente*

*Alexander Graham Bell  
1331 Connecticut Avenue,  
Washington, AD, May 12, 1896*

Diferentemente do progresso científico, onde o principal critério de sucesso é a aceitação pelos pares, os critérios de teste em aeronáutica exigiam a circulação para todas as partes interessadas dos requisitos a serem alcançados e que seriam usados como base para o julgamento. Voisin sintetiza os pontos mais importantes que deveriam ser satisfeitos<sup>5</sup>:

*A primeira dessas demonstrações era a seguinte: (...que o teste deveria ser realizado...)*

- a) na presença de um corpo oficial habilitado por uma autoridade homologadora;*
  - b) em tempo calmo e sobre um terreno horizontal medido e controlado;*
  - c) deixando o solo por seus próprios meios em um ponto previamente determinado com um homem a bordo;*
  - d) levando a bordo as fontes necessárias de energia;*
  - e) manobrando em altitude (linha reta);*
  - f) manobrando em direção (curvas e círculos);*
  - g) retornando ao ponto de partida, tudo isso sem acidentes.*
- Aceitamos que nem a altitude nem a duração dos testes seja levada em consideração.*

Em 1903 o Aéro-Club de France instituiu o Troféu Archdeacon no valor de 1.500 francos, incorporando todos os critérios acima exceto o (f) para uma máquina que voasse 50 m. Voar em círculos era considerado como um estágio a ser alcançado mais tarde e seria objeto de outro prêmio.

É de se notar que o requisito para a decolagem sobre terreno plano, em ar calmo e sob sua própria potência representava o maior desafio técnico da competição. Este não é um detalhe, mas um ponto essencial que envolve a compreensão do que se entendia por voo e de como ele se realizaria, e isso envolveria a busca de uma solução que não poderia ser considerada como intuitiva.

De fato, para que um avião possa alçar vôo, é necessário prover um ângulo de incidência adequado para a asa durante a corrida de decolagem. Na maior parte dos projetos contemporâneos, isso exigia um torque para girar o avião no eixo transversal. Uma força para cima na frente do avião ou uma força para baixo atrás poderia prover este torque. A primeira solução parece ter sido preferida por duas razões: em primeiro lugar porque fazia que a força produtora do torque agisse para colaborar na produção de sustentação. Em segundo lugar, esta solução é coerente com um modelo mental<sup>16</sup> em que a força é paralela à velocidade: a força ascendente que produz o torque levanta o nariz. Vale notar que este raciocínio não encontra embasamento teórico - ele é, de fato, um sério mal-entendido - mas parece que este era o que prevalecia no começo do século.

Outro aspecto importante é ligado ao tema da estabilidade. A adoção de um profundor frontal por todos os pioneiros pode ter minimizado o perigo percebido de cair de nariz no estol, mas introduziu uma instabilidade inerente que leva o aparelho a levantar ou abaixar o nariz (cabragem) e que exige a ação contínua do piloto. Como Santos-Dumont escreveu em 1918<sup>17</sup>:

*Lutei a princípio com as maiores dificuldades para ganhar a completa obediência do aeroplano; na minha*

*primeira máquina (14bis) coloquei o profundor à frente pois, naquela época, havia a crença geral na necessidade de fazê-lo. O motivo era que, se fosse colocado atrás, seria necessário forçar a cauda para baixo para que a máquina pudesse subir. Há alguma verdade nisso, mas as dificuldades de controle eram tão grandes que tive de abandonar esta disposição. Era o mesmo que tentar lançar uma flexa (sic) com o rabo para a frente.*

A segunda alternativa, colocar o profundor atrás, demanda uma força para baixo que contribui negativamente para a sustentação. Por outro lado, ela confere estabilidade em cabragem e melhor controle.

A evolução conceitual de uma máquina com o leme na frente, de volta para a configuração original de Cayley não pode ser alcançada através de desenvolvimento incremental. Pelo contrário, as duas concepções são antagônicas e, neste sentido, não é razoável supor que tal mudança pudesse ocorrer gradualmente. O avião *Cannard* (ou de leme na frente) é uma concepção fundamentalmente diferente do que chamamos hoje de um avião convencional<sup>17</sup>. Ele é um precursor conceitual mas não um precursor físico, apesar de ambos serem capazes de atender à mesma função mínima.

### Alberto Santos-Dumont

Alberto Santos-Dumont<sup>1-3</sup> nasceu no Brasil em 1873. Já em 1898 ele estava ativo no campo da aeronáutica, projetando, construindo e voando seus protótipos. Em comum com outros inventores, ele não possuía uma formação acadêmica sólida, tendo recebido aulas privadas por alguns anos e freqüentado, como ouvinte, uns poucos cursos. Porém, ele logo atraiu atenção quando voou com o *Brasil*, o menor balão esférico até então construído. Logo em seguida, dedicou-se ao problema da navegação aérea dos balões. Ainda em 1898, construiu seu primeiro protótipo de um dirigível propulsado por um motor de combustão interna. Apesar de não ter sido realmente bem sucedido, ele demonstrou o uso de motores de

combustão interna em balões de hidrogênio sem risco de explosões, com as que já haviam causado um certo número de fatalidades. Nos três anos seguintes, construiu mais quatro dirigíveis, melhorando gradualmente o seu desempenho.

Em 1901, Santos-Dumont ganhou o prêmio Deutsch de la Meurthe para a navegação aérea ao voar com o seu dirigível N. 6 em volta da Torre Eiffel e retornar ao seu ponto de partida em menos de trinta minutos. Com este vôo, ele conquistou o aplauso do mundo aeronáutico: a navegação aérea de balões estava firmemente estabelecida.

De 1901 a 1905 ele construiu diversos outros dirigíveis. Em 1903, demonstrou o uso prático de um dirigível não rígido (o N. 9), voando e realizando demonstrações inúmeras vezes em volta de Paris.

Aparentemente, foi apenas em 1906 que Santos-Dumont se voltou para o problema do mais-pesado-do-que-o-ar. Ele estava informado, é verdade, dos ensaios realizados com planadores na França e esteve presente quando Gabriel Voisin e Louis Blériot rebocaram um planador com um barco no Sena. O resultado deste teste sugeria que seria necessária uma potência mínima de 50 CV para o vôo do mais-pesado-do-que-o-ar. Ele conhecia os resultados encontrados por Lawrence Hargrave na Austrália, mostrando que estruturas em caixa podiam fornecer estabilidade em dois eixos (rolagem e direção). Ele interagiu ativamente com os membros do Aéro-Club de France e era amigo de nomes importantes do período como Ferber, Voisin e Blériot. Ele também estava certamente informado do vôo de Wilbur Wright em Kitty Hawk em 17 de dezembro de 1903, bem como da tentativa mal-sucedida de Langley com o seu Aerodrome, apenas nove dias depois.

De 1906 a 1909, conforme veremos adiante, Santos-Dumont perseguiu o ideal de um avião prático e seguro, voltando-se então para discussões sobre o futuro da aviação. Até a sua morte por suicídio em 1932, Santos-Dumont teve um papel de grande relevância na história da

aviação.

## De junho de 1906 a novembro de 1907

Santos-Dumont designava seus projetos com um sistema seqüencial simples (N. 6, N. 14) e, em um caso modificado por um sufixo (N. 14-bis). Uma dificuldade que temos ao mapear a seqüência dos inventos está relacionada ao fato de Santos Dumont introduzir um grande número de alterações após cada teste sem alterar a designação inicial. É assim impossível usar apenas o seu sistema de numeração para representar a curva de aprendizado de uma invenção. Como exemplo, o N. 16 aparece ora com um motor girando uma hélice, ora com dois motores montados em uma nova estrutura, ligados a duas hélices. Neste trabalho, deliberadamente simplificamos a descrição de cada projeto, conservando seus aspectos essenciais e ignorando os detalhes menores.

### Santos-Dumont N. 14-bis

Provavelmente em meados de 1906 Santos-Dumont começou a trabalhar no seu N. 14-bis. Tratava-se de um biplano de configuração *Canard* (Fig. 1) propulsado por um motor Levavasseur de 50 CV (o motor de 25 CV instalado inicialmente foi logo abandonado). As asas tinham um diedro respeitável de  $10^\circ$  para garantir a estabilidade no eixo longitudinal (rolagem). Em sua configuração inicial, dispunha de um trem de pouso com três rodas, logo simplificado para duas. O peso era de cerca de 300 kg (115 kg para a célula, 125 kg para o grupo motopropulsor, 50 kg para o piloto e 10 kg para a gasolina e água)<sup>19</sup>.

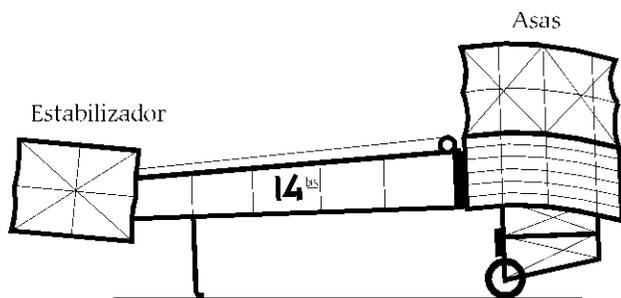


Figura 1. Biplano *Canard* Santos Dumont N. 14bis. Primeiro vôo homologado em 12 de novembro de 1906, em Bagatelle, Paris, França. É um precursor conceitual do avião moderno.

Os testes de estabilidade do N. 14-bis foram realizados entre 18 e 23 de junho de 1906, pendurado no dirigível N. 14 (incidentalmente explicando a anomalia no sistema de numeração). De 26 de julho a 22 de agosto, Santos-Dumont pendurou o N. 14-bis em cabos ou o colocou sobre uma carroça para testes adicionais. Entre 4 e 13 de setembro, mais testes foram realizados. Finalmente, em 23 de outubro, no campo de Bagatelle em Paris, Santos-Dumont decolou e voou uma distância de 60 m a uma altura de cerca de 3 m, vencendo o troféu Archdeacon. Em 12 de novembro de 1906, novamente em Bagatelle, ele voou 220 m a 6 m de altura por 21,2 s para vencer o prêmio do Aéro-Club de France com o primeiro vôo homologado da história da aeronáutica. Em 4 de abril ele voou o N. 14-bis pela última vez. Após percorrer cerca de 50 m, o avião entrou em oscilação e caiu, sendo destruído no acidente<sup>20-22</sup>.

### Santos-Dumont N. 15

Mantendo a estrutura de células de Hargrave para as asas e profundor, o N. 15 (Fig. 2) tinha a configuração invertida em relação ao N. 14-bis: as asas agora ficavam à frente do profundor que assumia a função de um estabilizador. As asas de corda estreita eram construídas de madeira envernizada com adaptadores de aço e cordas de piano para dar rigidez. Uma hélice de aço e alumínio era ligada diretamente ao motor

**A dificuldade que temos ao mapear a seqüência dos inventos de Santos Dumont está relacionada ao fato dele introduzir um grande número de alterações após cada teste sem alterar a designação inicial do projeto**

verter a configuração. O projeto falhou porque o ângulo no solo era muito raso e impedia que as asas alcançassem a incidência requerida na corrida da decolagem. Porém, Santos-Dumont não diagnosticou corretamente o problema e reagiu com um passo retrógrado, de volta aos balões e dirigíveis que lhe eram familiares. O N. 15 foi um precursor físico do avião moderno porque a única restrição a seu sucesso era o desenho inadequado de seu trem de pouso.

### Santos-Dumont N. 16

Preocupado com o fracasso do N. 15, Santos-Dumont tentou uma solução híbrida, combinando um balão de hidrogênio de  $99 \text{ m}^3$  e força ascensional de 110 kg com uma estrutura contendo asas, profundores e um motor de 50 CV (Fig. 3). O peso total era de 190 kg<sup>23</sup>. O aparelho era mais pesado do que o ar e não deve ser confundido com um dirigível. Santos-Dumont já havia recorrido, pelo menos em duas outras ocasiões, a soluções híbridas na tentativa de aumentar a sustentação - o balão

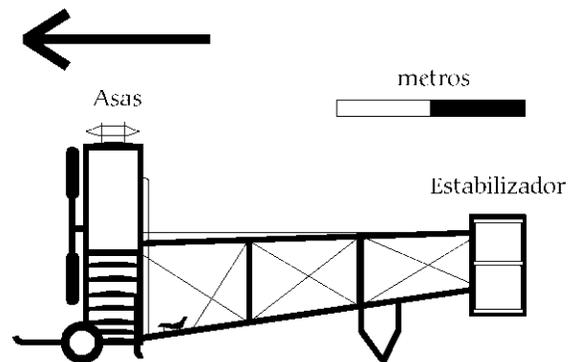


Figura 2. Um precursor físico do avião, o N. 15 tinha um trem de pouso que o impediu de decolar. Os primeiros testes foram realizados em 21 de março de 1907.

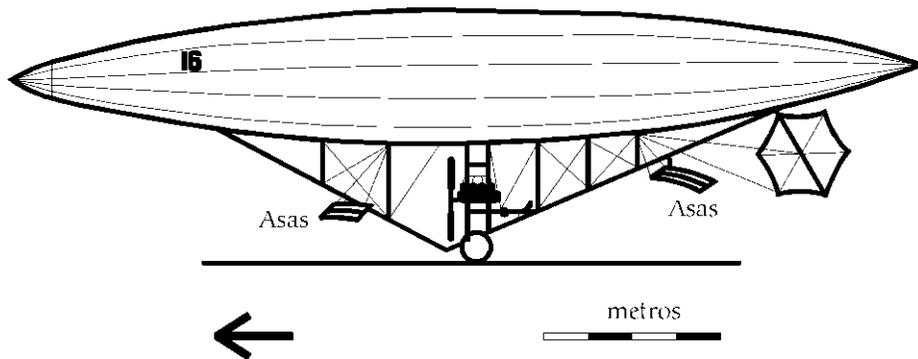


Figura 3. O N. 16 era um híbrido que procurava auxiliar a decolagem com a ajuda de um balão de hidrogênio. Testado em junho de 1907.

N. 13 usava um aparelho para aquecer o gás e seu balão *Les Deux Amériques* de 1906 empregava um grupo de hélices horizontais. Em nenhum desses casos ele alcançou sucesso.

Ele estava olhando na direção errada. Na decolagem de um avião, a sustentação e o peso não se relacionam de modo simples. A questão gira em torno de como acelerar o bastante para então ganhar sustentação pelo aumento do ângulo de ataque. O N. 16 foi um banco de ensaios que apenas exibia o grau de ignorância do inventor com relação ao voo mais-pesado-do-que-o-ar. Era um precursor conceitual que não alcançou a função mínima. Certamente, não foi um precursor físico.

### Santos-Dumont N. 17

Depois da falha do N. 16, Santos-Dumont voltou a seu projeto anterior. Poucas informações existem do N. 17 (Fig. 4), talvez o menos documentado de todos os projetos de

Santos-Dumont. Era uma modificação do N. 15 que buscava aumentar a sustentação através da duplicação da potência do motor (de 50 para 100 CV) e do conseqüente aumento da velocidade de decolagem. Santos-Dumont também foi forçado a projetar um trem de pouso mais alto, pois o posicionamento mais baixo do motor exigia uma maior altura para a hélice<sup>1</sup>.

Por infelicidade, os ensaios falharam miseravelmente. As asas com corda estreita não tinham a necessária rigidez em torção para absorver a potência do motor e o avião simplesmente se desintegrou. Isso foi duplamente lamentável, pois, o novo trem de pouso não permitia às asas terem a incidência adequada na decolagem. Com o N. 17, Santos-Dumont chegou à configuração ótima para um voo controlado bem sucedido.

Apesar de não alcançar a sua função básica, o N. 17 pode ser considerado como um dos membros da linha

de precursores físicos do avião. Um melhor conhecimento da dinâmica do voo teria, sem dúvida, levado a melhorar a rigidez torcional das asas. Ao invés disso, por um momento, Santos-Dumont foi levado a um outro desvio em seu caminho.

### Santos-Dumont N. 18, o Hidroglisseur

Em seu N. 18 (Fig. 5) Santos-Dumont parece ter abandonado, por um momento, a busca do voo. O Hidroplanador era um bote com o mesmo motor do N. 17. Duas asas em *tandem* eram submersas, à maneira de um hidrofólio moderno<sup>1</sup>. A asa posterior era móvel. Desta forma, ele pretendia prosseguir a investigação sobre a sustentação e estabilidade em um fluido com a viscosidade maior do que a do ar.

Um barco rebocou o N. 18 no Sena sob os olhos atentos de Blériot, Ferber, Delagrangue, Cody, Voisin e outros. Aparentemente, ele nunca foi testado com seu motor. Naturalmente, a questão real que impediu o sucesso do N. 15 não foi a sustentação mas a falta de incidência na decolagem. Porém, Santos-Dumont deve ter aproveitado bem estes testes, pois seu próximo projeto foi um vencedor.

### Santos-Dumont N. 19, o primeiro Demoiselle

Combinando o conhecimento adquirido com seus projetos anteriores, Santos-Dumont agora construiu o primeiro avião do mundo realmente prático: o N. 19, chamado Demoi-

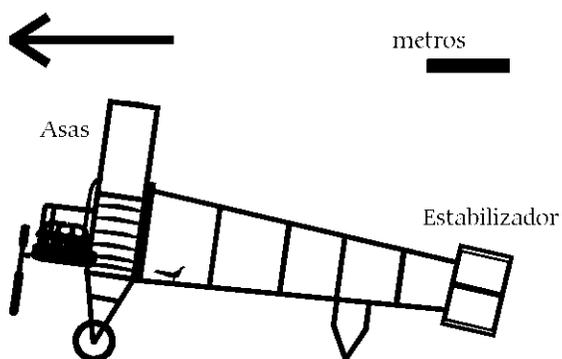


Figura 4. Tanto quanto se possa determinar esta era a aparência do N. 17, um melhoramento do N. 15. É um precursor físico do avião com trem de pouso apropriado mas asas frágeis. Não satisfaz a função básica do avião.

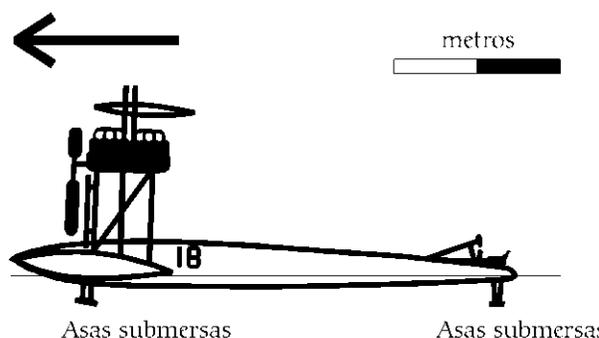


Figura 5. O Hidroplanador, Santos-Dumont N. 18, foi um estudo do "voo" na água. Observar o assento montado na extremidade traseira e os flutuadores laterais. A asa posterior é móvel.

selle<sup>1,22</sup> (Fig. 6), finalmente concretizou a configuração proposta por Cayley ainda no início do século XVIII: um monoplano com uma cauda cruciforme na extremidade de uma longa fuselagem tubular. O motor era instalado em um corte no bordo de ataque das asas que possuíam um generoso diedro para garantir a estabilidade longitudinal. O piloto se sentava sob as asas em um carrinho com três rodas. O trem de pouso permitia uma ampla folga para a hélice e incidência adequada para a decolagem. Santos-Dumont colocou superfícies auxiliares horizontais e verticais na frente das asas ainda influenciado pelo seu modelo mental antigo. Estas foram rapidamente descartadas, pois descobriu-se que em nada contribuíam nem para a estabilidade nem para a sustentação.

O N. 19 Demoiselle voou pela primeira vez em 16 de novembro de 1907. Pequeno, veloz, estável e seguro, em tudo parecendo um ultraleve moderno, o N. 19 tinha um bom desempenho, mas era um aparelho muito frágil. A partir dele, o N. 21 Demoiselle de 1909 foi desenvolvido e copiado em toda a Europa até 1910. O N. 19 deve ser considerado como o primeiro avião moderno.

## Conclusões

A precedência para o primeiro vôo bem sucedido tem sido objeto de discussões apaixonadas, mais orientadas por considerações patrióticas do que por um escrutínio objetivo. Diversos pioneiros, em particular Santos-Dumont, têm desafiado a precedência

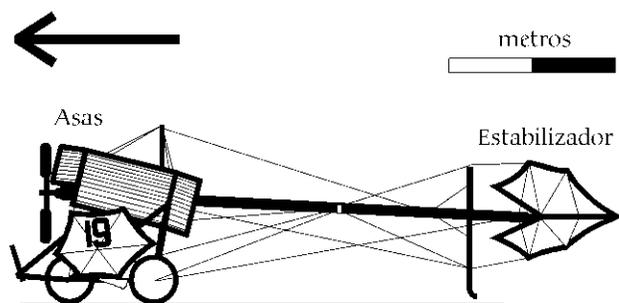


Figura 6. Santos Dumont N. 19, o primeiro Demoiselle. Envergadura de 5 m, comprimento de 8 m, motor de dois cilindros opostos horizontalmente Dutheil et Chalmer de 20 CV. Primeiro vôo em 16 de novembro de 1907. Esta foi a primeira invenção que atendeu a todos os critérios de um avião moderno.

do vôo do Wright Flier em 17 de dezembro de 1903, baseados na ausência de prova pública e na falha em atender aos critérios previamente estabelecidos (decolagem não assistida, ar calmo). De fato, até 1910, todos os aviões dos Wright requeriam alguma forma de auxílio para a decolagem e suas configurações eram inerentemente instáveis nos eixos de cabragem e rolamento (ausência de estabilizador, diedro negativo).

O N. 14-bis de Santos-Dumont também não possuía um estabilizador e era instável em cabragem. Apesar de ambos, o Wright Flier e o N. 14-bis, voarem sob controle e atenderem à função mínima, nem um nem outro podem ser considerados como precursores físicos do avião moderno devido à sua configuração.

Porém, Santos-Dumont continuou determinadamente a buscar um avião prático e seus projetos demonstram um progresso consciente em direção ao seu objetivo. Os N. 15 e N. 17 tinham estabilizadores mas não voaram; foram precursores físicos que não atenderam à função mínima. Com seu N. 16, o híbrido balão-avião, Santos-Dumont tentou sem sucesso reformular seu modelo mental baseado em sua experiência com dirigíveis. O N. 18 Hidroglisseur submergiu as asas na água para compreender a sustentação e a estabilidade. Finalmente, todos os problemas foram resolvidos no N. 19 Demoiselle. Depois do sucesso do N. 19, Santos-Dumont lançou a segunda geração de Demoiselles em 1908, projetos mais robustos e desenvolvidos que deixariam as suas marcas nos primeiros anos da aviação.

Permanece a pergunta freqüentemente formulada: quem in-

ventou o avião? Pode haver mais de uma resposta válida, dependendo de como entendemos o vôo ou, em outras palavras, de como definimos a função mínima. Hoje em dia, depois dos aviões se tornarem corriqueiros, tendemos a abandonar os requisitos para a prova pública e decolagem em ar calmo sem auxílio externo e consi-

deramos o vôo simplesmente como o movimento através do ar. Neste caso, a precedência do vôo permanece firmemente com os Wright.

Se os critérios de prova pública e de decolagem forem

**O N. 19 Demoiselle voou pela primeira vez em 16 de novembro de 1907.**

**Pequeno, veloz, estável e seguro, parecia um ultraleve moderno. A partir dele o N. 21 Demoiselle de 1909 foi desenvolvido e deve ser considerado como o primeiro avião moderno**

exigidos, como o faziam os contemporâneos dos pioneiros, então o primeiro avião a voar foi o N. 14-bis em 12 de novembro de 1906, conforme atestado pelos primeiros recordes de velocidade e distância percorrida registrados com a FAI - Fédération Aéronautique Internationale<sup>24</sup>.

Porém, tentamos demonstrar que nenhum destes aviões pode ser considerado como o primeiro avião moderno<sup>24</sup>. Outras respostas podem ser aventadas. Os N. 15 e N. 17 de Santos-Dumont tinham a configuração correta mas não voaram (e assim, podem pretender-se precursores físicos que não atenderam à função mínima).

Em 26 de outubro de 1907, o N. 1 de Voisin, pilotado por Farman, conquistou os recordes de velocidade em circuito fechado da FAI. Ele representava uma outra solução para o problema da estabilidade: profundos móveis à frente e um estabilizador traseiro fixo. Era uma espécie de híbrido e é questionável se pode ser considerado um precursor físico. Mas, sem dúvida, voava.

O Santos-Dumont N. 19 Demoiselle, que voou pela primeira vez em 16 de novembro de 1907, é, inquestionavelmente, representativo da configuração do avião moderno. Nós o propomos como o melhor candidato para o título de o "primeiro avião moderno".

## Notas

- <sup>1</sup>H. Lins de Barros, *Santos Dumont* (Ed. Index/API, Rio de Janeiro, 1986).
- <sup>2</sup>C. Dollfus, *Alberto Santos Dumont né le 20 juillet 1873*. Ícare **64bis**, 95 (1973).
- <sup>3</sup>H.D. Villares, *Quem Deu Asas ao homem* (Ed. Autor, São Paulo, 1953).
- <sup>4</sup>M. Behe, *A Caixa Preta de Darwin* (Jorge Zahar ed., Rio de Janeiro, 1997).
- <sup>5</sup>G. Voisin, *Més 10000 Cerfs-Volants* (La Table Ronde, Paris, 1960).
- <sup>6</sup>E. Petit, *Nouvelle Histoire Mondiale de l'Aviation* (Hachette Réalités, 1977), 3<sup>e</sup> ed.
- <sup>7</sup>T.D. Crouch, *A Dream of Wings: Americans and the Airplane 1875-1905* (Smithsonian Institution Press, 1989).
- <sup>8</sup>*Les Cahiers de Science et Vie: Les Grandes Controverses Scientifique*, n. 1, Février 1991: Naissance de l'aviation.
- <sup>9</sup>H.S. Wolko, *The Wright Flyer: An Engineering Perspective*. NASM. Smithsonian Institution Press. 1987.
- <sup>10</sup>D. Sobel, *Longitude* (Ediouro, Rio de Janeiro, 1996).
- <sup>11</sup>R.H. Thurston, *The Status of Aeronautics in 1884*. Science **5**, 295 (1885).
- <sup>12</sup>M.J.H. Taylor and D. Mondey, *Milestones of Flight*. Jane's ed. 1983. 288 pp.
- <sup>13</sup>T.D. Crouch, *The Bishop's Boys: a Life of Wilbur and Orville Wright* (W.W. Norton and Co., Nova Iorque, 1989).
- <sup>14</sup>H. Combs, *Kill Devil Hill. Discovering the Secret of the Wright Brothers* (TernStyle Press Ltd., Denver, 1979).
- <sup>15</sup>S.P. Langley, *A successful trial of the Aerodrome*. Science **3**, 753 (1896).
- <sup>16</sup>C. Franco, H. Lins de Barros, D. Colinviaux, S. Krapas and G. Queiroz, *Towards a Model of Mental Models. Perspective on Models and Modelling*. Convernors C.J. Boulter and J.K. Gilbert (eds), First Conference of European Science Education Research Association, Rome, Sept. 2-6, 1997, p. 1-8.
- <sup>17</sup>Os primeiros *Canards* não possuíam estabilizadores, o que os tornava inerentemente instáveis, exigindo a constante atuação do piloto nos controles. Aviões sem cauda ou asas voadoras bem sucedidas dependem da torsão e do enflexamento das asas para que a ponta das mesmas contrabalancem o momento de picada gerado pelo aerofólio, efetivamente funcionando como estabilizadores. Muito poucos aviões *Canard* voaram com sucesso antes que o advento dos computadores e tecnologias *fly-by-wire* abrissem o caminho para a estabilidade artificial.
- <sup>18</sup>A. Santos Dumont, *O que Eu Vi o que Nós Veremos* (editado pelo autor, Petrópolis, 1918).
- <sup>19</sup>F. Ferber, *L'Aerophile* (Fevereiro, 1907).
- <sup>20</sup>R. Vitrotto, *Histoire des Techniques: Un Étude Systematique sur le XIVbis de Santos Dumont*. Pégase **29-30**, 12 (1993).
- <sup>21</sup>P. Lissarrague, *Histoire des Techniques: Un Étude Systematique sur le XIVbis de Santos Dumont*. Pégase **31**, 4 (1983).
- <sup>22</sup>F. Peyrey, *Les Oiseaux Artificiels* (H. Dumont et E. Pinat editores, 1909).
- <sup>23</sup>L'illustration, 15 Juin 1907, n. 3.355, p. 400
- <sup>24</sup>K. Munson, *Jane's Pocket Book of Record-Breaking Aircraft*, editado por J.W.R. Taylor (Collier Books, Nova Iorque, 1981).



Ilustração bem humorada onde Santos-Dumont disputa os céus com Ícaro, Pégasus, etc. Publicada no *Span Shots* nº 589 - Londres



## A Busca da Liberdade e a Educação Básica de Santos Dumont

**A** educação de Santos Dumont foi, desde cedo, marcada por episódios de uma acentuada individualidade. Até os dez anos de idade, por exemplo, ele não frequentou qualquer escola formal, tendo iniciado sua instrução em casa com sua irmã Virgínia, sete anos mais velha que ele.

Dos dez aos doze anos de idade, frequentou um colégio na cidade de Campinas cujo nome seria de certo modo profético em sua vida: Colégio Culto à Ciência. Ali, ele não parece ter sido, entretanto, um aluno dos melhores; os registros históricos daquela escola, coletados pelo professor Carlos Francisco de Paula, não assinalam o seu nome entre os que conseguiram destaque em nenhuma das diversas matérias estudadas nos anos que por ali passou. O Colégio Culto à Ciência de Campinas havia sido fundado pelos ricos proprietários de terra daquela região, preocupados em propiciar aos seus filhos um ensino de qualidade inspirado nos ideais positivistas difundidos no Brasil por Benjamin Constant. A decisão de Henrique Dumont de colocar seu filho para estudar no Colégio Culto à Ciência já nos dá uma clara indicação da sua visão positivista da Ciência e sugere também a possível influência que tal visão pode ter exercido sobre o pequeno Alberto.

Para compreendermos melhor a concepção educacional do Colégio Culto à Ciência e a conseqüente influência que o seu ensino pode ter

exercido sobre os seus alunos, é preciso resgatar um pouco do que significou o positivismo em sua formulação mais ampla e em sua atuação mais específica no Brasil.

O extraordinário desenvolvimento científico ocorrido na Europa no início do século XIX pode ser visto como uma conseqüência da Primeira Revolução Industrial inglesa, do sucesso da introdução da máquina a vapor nos processos de industrialização em geral. Este desenvolvimento acelerado levou o homem a acreditar que ele seria capaz de exercer um domínio completo sobre a Natureza. O positivismo surgiu, então, como um reflexo deste sentimento e como uma expressão, portanto, de uma linha de pensamento que proclamava a superioridade da Ciência e do método empírico sobre as abstrações metafísicas da Filosofia e, em especial, sobre a Religião.

Enquanto um movimento intelectual, o positivismo - idealizado e arquitetado na França por Augusto Comte (1798-1857) - defendia que todo conhecimento humano do mundo físico era originário apenas da observação de fenômenos reais, ditos "positivos",

da experiência. Tais fenômenos seriam, assim, os únicos objetos da busca do conhecimento. As origens do positivismo podem ser encontradas no casamento do empirismo inglês de David Hume (1711-1776) - que concebia apenas a experiência como objeto do conhecimento - com o iluminismo francês do século XVIII que, por

**Até os dez anos de idade Santos Dumont não frequentou qualquer escola formal, tendo iniciado sua instrução em casa com sua irmã Virgínia, sete anos mais velha que ele**

.....  
**Alexandre Medeiros**

SCIENCO, PE

e-mail: alexandre@scienco.com.br  
.....

---

Um ponto algo intrigante na formação de Santos Dumont reside no fato dele não ter frequentado a escola formal, e, no período em que o fez, não adaptou-se muito bem ao sistema de ensino vigente. Este artigo comenta um pouco desse lado do inventor, e está baseado em parte do primeiro capítulo do livro *Santos Dumont e a Física do Cotidiano*, do mesmo autor (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006).



Santos Dumont com 30 anos.

sua vez, apregoava a razão como o único alicerce do avanço histórico da humanidade.

O ideário positivista chegou ao Brasil por volta de 1850 e foi naturalmente trazido por brasileiros que haviam estudado na França. Henrique Dumont, pai de Santos Dumont, engenheiro brilhante educado em Paris, muito provavelmente, estava entre os indivíduos que comungavam com tais ideais.

Um dos baluartes pioneiros das idéias positivistas no Brasil foi Benjamin Constant Botelho de Magalhães (1833-1891). Com ele, a doutrina positivista iniciou a sua influência no Brasil na Escola Militar do Rio de Janeiro e logo depois no Colégio Pedro II, para daí rapidamente espalhar-se pelos outros estados da nação. Em certa medida, a atuação do positivismo no Brasil pode ser vista ainda como uma reação intelectual burguesa contra os preceitos confessionais católicos dominantes àquela época e mais identificados com os interesses da nobreza. Aquela atuação doutri-

nária foi dinamizada principalmente pela indicação de Benjamin Constant como ministro da Guerra e, em seguida, como ministro da Instrução Pública na década de 1890, no primeiro governo republicano do marechal Deodoro da Fonseca. Coerente com as suas convicções positivistas, Benjamin Constant reformulou em sua atuação ministerial todo o ensino brasileiro de acordo com as idéias de Augusto Comte. Entretanto, como ressalta Rafael Segal, se para Comte o ensino na Europa deveria ser dedicado principalmente às camadas mais pobres da população, com o objetivo de formar um operariado tecnicamente mais bem preparado para os desafios tecnológicos necessários ao progresso

econômico, no Brasil essa meta mostrou-se absolutamente inexecutável, em face da carência de escolas e do baixíssimo nível de instrução do proletariado nacional. Assim, a difusão dos preceitos positivistas acabou restringindo-se aos poucos alunos que estudavam nas escolas militares ou em escolas especiais como o Colégio Culto à Ciência de Campinas.

O Culto à Ciência foi fundado em 1874, ano seguinte ao do nascimento de Santos Dumont. Inspirado e integralmente idealizado segundo os ideais positivistas de Augusto Comte, o referido colégio era, então, o único no gênero em todo o país. O jovem Santos Dumont, após fazer a sua educação primária em casa, sob a orientação de sua irmã Virgínia, iniciou os seus estudos secundários em 1883. Naquele ano, o Colégio Culto à Ciência registrou a matrícula de 112 alunos; Santos Dumont foi um deles e ali ficou até o final do ano seguinte.

O ano de 1883 foi também um marco especial para aquela instituição de ensino. O ensino de ciências natu-

rais, ministrado pelo emérito professor Dr. João Kopke, ressentia-se até então da falta de aparelhos para a parte experimental. A montagem de um gabinete de Física, que é como se costumava denominar então os laboratórios demonstrativos, fez-se em janeiro de 1882, com aparelhos que foram encomendados nos Estados Unidos da América do Norte e completou-se no ano seguinte. Como Santos Dumont ali estudou nos anos de 1883 e 1884, certamente, ele chegou a usufruir do uso do laboratório. A mudança freqüente de diretores do colégio parece, no entanto, haver contribuído para o rápido declínio daquele estabelecimento, sempre às voltas com uma certa instabilidade administrativa que culminou com a dissolução, em 1884, da Sociedade de mesmo nome que havia dado origem ao colégio.

A referida instituição de ensino continuou os seus passos, mas sofreu várias reformulações. Por motivo de conveniência à boa disciplina e aplicação nos estudos, a nova diretoria resolveu, em fevereiro de 1884, admitir apenas alunos internos, sendo, entretanto, permitido que continuassem durante aquele ano os alunos de outras categorias que já se achavam matriculados. Santos Dumont saiu da escola no ano seguinte, mas os motivos de sua saída podem ter sido os mais variados, desde a inadequação para ele das reformas ali estabelecidas até o seu próprio descontentamento com o crescente rigor disciplinar ali instalado.

No ano seguinte Dumont foi estudar em São Paulo, no Colégio Kopke, uma instituição bem mais liberal ligada à família do seu professor de Ciências no Colégio Culto à Ciência, o Dr. João Kopke.

O Colégio Kopke, havia sido fundado em 1850 e era uma instituição cara, destinada a educar a elite do estado. Ele estava instalado em um prédio especialmente projetado para ser uma escola modelo e que procurava atender a todas as exigências do ensino na época. Criado por Guilherme Kopke, um educador de origem alemã, o colégio procurava conciliar o estudo literário com os estudos e as

atividades científicas, sem se descuidar do preparo para o ensino superior nas academias do Império. Ele mantinha, também, uma preocupação permanente com a formação moral e religiosa dos seus alunos. Havia, ainda, uma acentuada preocupação em adequar o ensino às características individuais dos alunos. Neste sentido, o professor Kopke realizou um trabalho pioneiro no Brasil ao reunir os alunos em pequenos grupos de estudo ou turmas de mesmo grau de inteligência e de adiantamento intelectual. Tal procedimento possibilitava aos professores rea-

**O Menezes Vieira era um colégio que destacava-se pela adoção de um método mais intuitivo, livre de formalidades e de um ensino mais profissionalizante e menos retórico. Estas duas características devem ter sido bem do agrado de Santos Dumont, um garoto sempre preocupado em preservar a sua individualidade**

lizar um atendimento individual a cada um dos alunos destes pequenos grupos. Kopke alinhava-se assim com outros educadores modernos que, partindo das distinções tipológicas, buscam uma diferenciação metodológica para obter uma autêntica individualização do ensino. Para que isso se tornasse possível, o colégio recorreu à atuação de professores especialmente selecionados entre os melhores disponíveis no magistério nacional. O Colégio Kopke foi, em seu tempo, um dos melhores educandários do país e Fernando de Azevedo referiu-se ao seu diretor como um dos grandes combatentes em defesa da melhoria da educação no Brasil e da renovação dos métodos de ensino.

Pode-se perceber, a partir de então, um certo padrão nas sucessivas mudanças de escola experimentadas por Santos Dumont. Ele ia mudando sempre para escolas liberais e que permitiam um ensino individualizado. Além disso, por serem instituições de elite, elas ofereciam as condições para um ensino científico mais eficiente e variado. Mas não devemos nos iludir com essas múltiplas perspectivas de aprendizagem oferecidas pelas escolas que ele frequentou. Santos Dumont nunca foi exatamente um bom aluno, em seu sentido padrão. Ele estudava apenas aquilo que lhe interessava e apesar de nunca ter se destacado como

aluno notável, era um autodidata por excelência, pois ao mesmo tempo em que relaxava os seus estudos escolares, era capaz de ler vários livros da extensa biblioteca de seu pai, inclusive diversos manuais técnicos sobre máquinas e motores.

Não sabemos exatamente o que levou Santos Dumont a sair do Colégio Kopke, mas o seu colégio seguinte, o Morton, também de São Paulo, seria igualmente uma instituição bastante liberal.

O Colégio Morton foi fundado pelo reverendo norte-americano George Nash Morton, em 1880. Morton chegara ao Brasil em 1869 e instalara-se na cidade de Campinas. Lá, no ano seguinte, ele fundara a Igreja Presbiteriana local. Logo depois, em 1873, fundaria o Colégio Internacional. De certo modo, a filosofia educacional implantada no Colégio Morton, onde Santos Dumont viria a estudar em 1886, pode ser vista como uma continuação do trabalho realizado por aquele educador no Colégio Internacional de Campinas. Lá, Morton tivera um sucesso extraordinário ao fundar um educandário revolucionário para a época, um colégio misto, com uma postura liberal e que aceitava alunos e alunas, filhos de cidadãos estrangeiros e de famílias brasileiras abastadas do interior de São Paulo.

Apesar de ter sido um notável educador, Morton acumulou o colégio de dívidas devido a um ambicioso programa de ampliações das instalações e aos melhoramentos constantes que arquitetava para o colégio. Em 1880, ele se mudou para São Paulo e ali fundou um colégio particular com o seu nome, o Morton, do qual Santos Dumont foi aluno por um ano. Logo, entretanto, Morton enfrentaria os mesmos problemas

**Santos Dumont nunca foi exatamente um bom aluno, em seu sentido padrão. Ele estudava apenas aquilo que lhe interessava e apesar de nunca ter se destacado como aluno notável, era um autodidata por excelência**

financeiros já ocorridos em Campinas. Frustrado, ele retornou aos Estados Unidos em 1882, transferindo o colégio para as mãos de outros administradores não tão idealistas quanto ele. À época dos estudos de Santos Dumont no Colégio Morton, a nova diretoria ali instalada já não mais dava conta da qualidade concebida originalmente pelo seu fundador. Talvez por iniciativa de seu pai tenha o jovem Alberto mudado mais uma vez de escola, desta vez transferindo-se para a cidade do Rio de Janeiro, para a mais liberal de todas as escolas que frequentou, o Colégio Menezes Vieira.

O Menezes Vieira havia sido fundado em 1875 pelo seu idealizador, o médico e educador carioca Joaquim José de Menezes Vieira, um seguidor apaixonado das idéias de Froebel e que ali instalou o primeiro jardim da infância do Brasil. Assim como os outros colégios frequentados por Santos Dumont, o Menezes Vieira era um colégio dirigido às crianças da elite. Entre as inovações preconizadas por Froebel e que ali foram implantadas, pode-se destacar a adoção de um método intuitivo, livre de formalidades, assim como a de um ensino mais profissionalizante e menos retórico. Estas duas características, em particular, devem ter sido bem do agrado de Santos Dumont, um garoto sempre preocupado em preservar a sua individualidade.

Mesmo naquelas condições propícias de desenvolvimento intelectual, Santos Dumont não se revelou, mais uma vez, um aluno excepcional entre os seus colegas, a não ser pelo interesse peculiar e aplicação nos estudos de ciências. A sua condição social abastada colocava-lhe uma educação propedêutica como não mais que um

ornamento entediante. O jovem Alberto, por outro lado, tinha modos refinados, gostava de vestir-se de modo impecável e nos seus tempos parisienses seria, por isso, caracterizado como um autêntico dândi. Deste modo, não parece estranho que o seu

interesse pelos estudos não tenha desabrochado ainda na escola.

Como disse A.S. Neill, em seu livro *Liberdade sem Medo – Summerhill*, “às vezes é difícil ver a natureza da criança quando escondida atrás de muito dinheiro e de roupas dispendiosas. Quando uma menina sabe que aos vinte e um anos entrará na posse de substancial quantia, não é fácil estudar nela a natureza da criança”. Os professores das escolas liberais que Santos Dumont frequentou na infância e na juventude devem ter sentido um sentimento semelhante, uma enorme dificuldade de desvendar os mistérios da natureza extraordinária que jazia escondida por trás de sua

personalidade introvertida. Mas, felizmente, assim como a maior parte das crianças de A.S. Neill na sua escola de *Summerhill* não foi estragada pela fortuna, mas sim recuperadas pelo exercício da liberdade, o jovem Alberto também teve o seu momento propício de desabrochar os seus talentos e isso só veio a acontecer em sua estada na Europa.

Apesar da sua curiosidade infantil pelas questões técnicas e científicas, apenas quando o desafio da compreensão científica colocou-se frente a frente como um intermediário essencial para os seus anseios de voar, em Paris, foi que Santos Dumont desperdou realmente para a necessidade de

estudar seriamente a ciência.

Ainda no Brasil, uma vez concluída a sua educação secundária em excelentes escolas, mesmo que sem muito brilho, Santos Dumont chegou a matricular-se na Escola de Engenharia de Minas, em Ouro Preto, mas não deu seqüência aos estudos, logo desistindo do curso. Com o seu jeito tímido, mas com um gênio irrequieto e um espírito indômito, ele nunca se habituaria à rotina dos rigores curriculares e nem ao severo regime disciplinar daquela escola tradicional. Alberto não queria quaisquer amarras que fossem; ele precisava, sobretudo, de liberdade para literalmente dar asas ao seu pensamento.

## Leia mais

Henrique Lins de Barros, *Santos Dumont e a Invenção do Avião* (Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 2003).

Maria Helena Bastos, *Pro Patria Laboremus: Joaquim José de Menezes Vieira (1848-1897)* (Editora Universitária São Francisco, São Paulo, 2002).

Fernando Hippolyto da Costa, *Santos Dumont: História e Iconografia* (Villa Rica Editoras Reunidas Ltda, Belo Horizonte, 1990).

Carlos de Paula, *Monografia Histórica do Colégio Estadual Culto à Ciência*. 1946. Texto on-line acessado em 12 de outubro de 2005 em [http://www.francisco.paula.nom.br/Culto/pag\\_apresentacao.htm](http://www.francisco.paula.nom.br/Culto/pag_apresentacao.htm).

Paul Hoffman, *Asas da Loucura: A Extraordinária Vida de Santos Dumont* (Editora Objetiva Ltda, Rio de Janeiro, 2004).

Fernando Jorge, *As Lutas, a Glória e o Martírio de Santos Dumont* (T.A. Queiroz Editor, São Paulo, 2003).

Alderli Matos, O Colégio Protestante de São Paulo: Um estudo de caso sobre o lugar da educação na estratégia missionária da igreja. *Fides Reformata* 4(2) (1999).

Alexandre Medeiros, *Santos Dumont e a Física do Cotidiano* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006).

João Musa, Marcelo Mourão e Ricardo Tilkian, *Alberto Santos-Dumont: Eu Naveguei pelo Ar. Da Conquista da Dirigibilidade dos Balões ao Mais Pesado que o Ar* (Editora Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 2003).

Aluizio Napoleão, *Santos Dumont e a Conquista do Ar* (Editora Itatiaia Ltda, Belo Horizonte, 1988).

Alexander Neill, *Liberdade sem Medo – Summerhill* (IBRASA, São Paulo, 1973).

João Spacca Oliveira, *Santô e os Pais da Aviação*

(Companhia das Letras, São Paulo, 2005).  
Johannes Prüfer, *Federico Froebel* (Editorial Labor, Barcelona, 1940).

Alberto Santos Dumont, *A Conquista do Ar pelo Aeronauta Brasileiro Santos Dumont* (Aillaud & Cia. Paris, Paris, 1901).

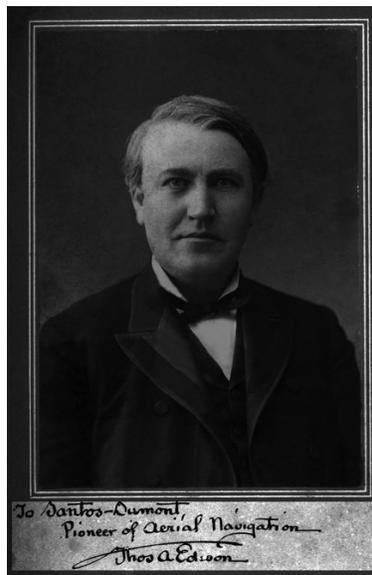
Alberto Santos Dumont, *O Que Eu Vi. O Que Veremos* (Editora Herdra, São Paulo, 2002).

Alberto Santos Dumont, *Os Meus Balões* (Fundação Projeto Rondon, Brasília, 1986).

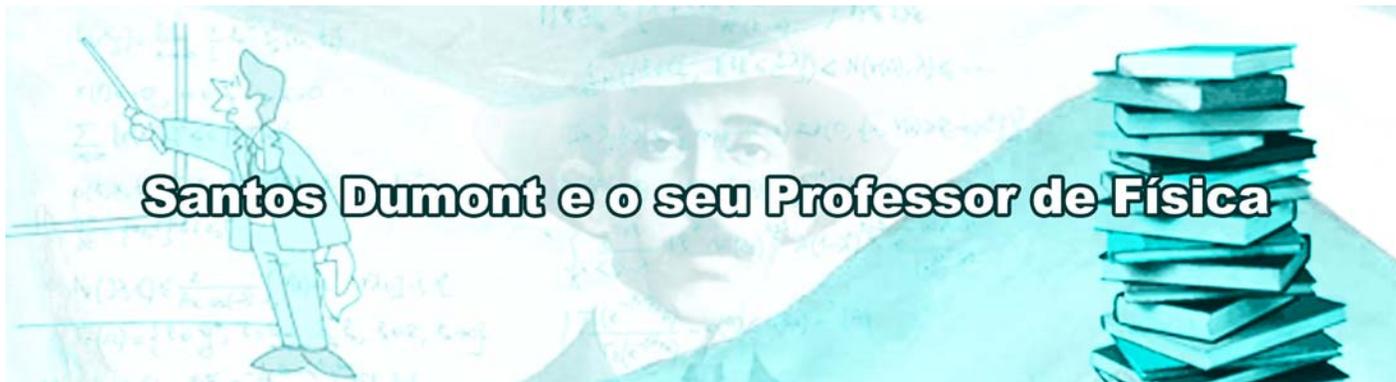
Rafael Segal, Ordem e progresso: A filosofia de Augusto-Comte inspirou o estabelecimento do Brasil Republicano. *Revista História Viva* 5, 12 (2004).

Nancy Winters, *O Homem Voa! A Vida de Santos Dumont, o Conquistador do Ar* (DBA, São Paulo, 2000).

Peter Wykeham, *Santos-Dumont: A Study in Obsession* (Harcourt, Brace & World, New York, 1963).



Fotografia doada por Thomas Edison (EUA) a Santos-Dumont, com a seguinte dedicatória: "Para Santos-Dumont, Pioneiro da Navegação Aérea".



## Santos Dumont e o seu Professor de Física

**O** próprio Santos Dumont relata em suas memórias que o seu pai, um engenheiro que havia estudado na França, na École Centrale des Art et Métiers, conhecendo a sua paixão pelas questões técnicas e científicas, recomendou que ele fosse para Paris onde deveria procurar um especialista em Física, Química, mecânica e eletricidade. Segundo relata Santos Dumont, o seu pai aconselhou-o ainda a estudar aquelas matérias e ter sempre em mente que o futuro do mundo estava na mecânica. Analisando este trecho das memórias de Santos Dumont e tendo em mente que a mecânica e a eletricidade são partes integrantes do que denominamos de Física, somos tenta-

dos a achar o seu discurso um tanto redundante ou até mesmo equivocado. Entretanto, o verdadeiro significado presente nas palavras do velho Henrique Dumont deve ser interpretado como uma sugestão para que o jovem Alberto concentrasse os seus esforços nas mais recentes aplicações da mecânica e da eletricidade, ou seja, nos campos da engenharia mecânica e da nascente engenharia elétrica.

Além disso, o velho Henrique, conhecendo bem o espírito indômito porém introvertido de seu filho, que dificilmente se adequaria a qualquer rigidez curricular, reforçou a recomendação dada ainda na primeira viagem a Paris para que ele procurasse um bom professor particular como alternativa ao tradicional ensino formal universi-

tário.

Santos Dumont iniciou os seus estudos mais avançados em Paris na primavera de 1892 e logo em seguida, já em agosto daquele mesmo ano, receberia a terrível notícia do falecimento de seu pai no Brasil. Após a morte de Henrique Dumont, Alberto frequentou livremente, sem qualquer compromisso formal, durante cinco anos, de 1892 a 1897, as aulas que lhe interessavam nos cursos de engenharia na Sorbonne

e também no College de France. Este é um detalhe muito importante de sua formação intelectual, destacado por Gérard Hartmann, mas praticamente ignorado por muitos dos seus biógrafos.

No ano seguinte, de 1893, com 21

anos de idade, Santos Dumont passou um tempo na Inglaterra, durante o qual frequentou, novamente como um aluno ouvinte, provavelmente aulas de navegação no Merchant Venturers' Technical College da cidade de Bristol<sup>1</sup>, onde alguns de seus primos eram estudantes regulares. Ele se interessou por aquela instituição, que daria origem à Universidade de Bristol, também provavelmente devido à sua forte reputação na área da engenharia, especialmente na área de navegação. Não existem, contudo, registros oficiais daquele seu período naquela instituição, pois um bombardeio ocorrido na Segunda Guerra Mundial destruiu uma parte relevante dos arquivos da instituição.

Como destaca Henrique Lins de

**Sem jamais fixar-se em uma carreira em particular, Santos Dumont passou pela Sorbonne e pelo College de France entre 1892 e 1897; pela escola de navegação no Merchant Venturers' Technical College em Bristol, em 1893, para então voltar a Paris**

.....  
**Alexandre Medeiros**

SCIENCO, PE

e-mail: alexandre@scienco.com.br  
.....

---

Santos Dumont sempre guiou a si mesmo na conquista do conhecimento. Neste trabalho veremos como ele trilhou os primeiros passos de seus estudos técnicos. O presente artigo está baseado em parte do primeiro capítulo do livro *Santos Dumont e a Física do Cotidiano*, do mesmo autor (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006).

Barros, temos, entretanto, o relato de um colega seu daquela época, o brasileiro Agenor Barbosa. Segundo ele, Santos Dumont era um aluno *pouco aplicado, ou melhor, nada estudioso para as 'teorias', mas de admirável talento prático e mecânico e, desde aí, revelando-se, em tudo, um gênio inventivo.*

O seu guia principal nos seus estudos acadêmicos não foi, entretanto, nenhum dos professores a cujas aulas tenha ele eventualmente assistido na Sorbonne, no College de France e nem mesmo no Merchant Venturers' Technical College de Bristol. Naqueles locais, Santos Dumont nunca seguiu currículos regulares, nem jamais estudou de um modo mais formal. Na verdade, o grande orientador dos seus estudos foi ele mesmo, com a sua liberdade indômita e o seu desejo incontido de guiar o próprio destino, de buscar os seus próprios caminhos.

Durante aqueles cinco anos formativos, ele não apenas estudou, mas também fez algumas viagens, não apenas à Inglaterra. Tudo isso fazia parte de sua auto-educação. Há relatos na literatura, por exemplo, sua escalada ao Monte Branco, o ponto mais alto da Europa e que muito o teria deslumbrado. O seu amor pelas alturas ultrapassava agora em muito a simples subida da torre Eiffel realizada ainda em sua primeira viagem a Paris.

Naqueles seus anos de estudos, ele não ia muito a festas e bebia pouco, mas já começava a freqüentar a animada noite parisiense, embora sem o mesmo destaque em relação ao que obteria anos depois, após os seus arriscados vôos de balão.

Para relaxar, ele recorria também aos novos carros adquiridos. Deixou de lado o seu Peugeot e comprou um novo e mais potente De Dion e também um triciclo Dion-Button com motor de dois

tempos. Ele tinha mais automóveis que qualquer outra pessoa em Paris, mas aquelas suas caras engenhocas quebravam freqüentemente. O lado bom dessa deficiência primitiva dos seus automóveis é que aquilo obrigava-o a

tornar-se cada vez mais íntimo dos segredos da máquina a explosão.

Ele fez novamente outras tentativas de voar em um balão esférico com os demonstradores de feiras, mas todas elas sem o esperado sucesso, pois aqueles indivíduos exigiam-lhe quantias absurdas e exageravam nos perigos da aventura. Santos Dumont chegou a comentar em seus escritos que era como se eles quisessem guardar os segredos da aerostação apenas para si mesmos. Assim, entre algumas viagens, noitadas e passeios de automóveis, ele seguia a sua vida de dedicação aos estudos em Paris naqueles anos de 1892 a 1897.

Desde o início desse seu período formativo em Paris, Santos Dumont seguiu à risca o conselho de seu pai e conseguiu um bom professor particular, não propriamente para guiá-lo, mas sim para auxiliar nos seus estudos individuais. Ele conta que logo conseguiu como tutor um antigo professor universitário francês, de origem espanhola, chamado Garcia e que veio a lhe ensinar praticamente tudo o que sabia sobre a Ciência.

O próprio Santos Dumont conta-nos, em seu livro *O Que Eu Vi; O Que Nós Veremos*, que estudou com o professor Garcia por muitos anos e que de fato não apenas estudou, mas que também viajou bastante naqueles anos formativos do seu conhecimento científico.

Não se sabe ao certo quem era esse tal professor Garcia, onde ele havia lecionado nem mesmo qual era o seu primeiro nome. Tudo o que se sabe, de fato, a respeito deste misterioso personagem, é que ele parece ter sido realmente a única pessoa a ter lecionado determinados conteúdos de Física de forma regular a Santos Dumont, ainda que de um modo bastante informal e bem adequado à personali-

dade do seu abastado, inteligente e caprichoso aluno.

Mas, afinal, como foram os tais estudos de Santos Dumont com esse tal professor Garcia, entre 1892 e 1897? Quase todas as suas biografias omitem

este seu importante período formativo, justamente o período no qual Santos Dumont estudou uma série de coisas que lhe interessavam, dentre elas a Física. Como saber, portanto, como teria sido esta sua formação?

Paul Hoffman descreve este período da vida de Santos Dumont como uma fase na qual ele teria mergulhado intensamente nos estudos, chegando a tornar-se um autêntico "rato de biblioteca". Não sabemos até que ponto uma tal inferência é de fato verdadeira, mas ela parece bastante factível, apesar das diversões já assinaladas, se levarmos em conta os seus interesses muito claros nos conhecimentos que desejava adquirir. Não se deve, entretanto, inferir de uma tal afirmação que ele tenha seguido alguma coisa semelhante a um rígido programa de estudos traçado pelo tal professor Garcia, a quem ele parecia muito estimar. O verdadeiro programa de estudos de Santos Dumont foi estabelecido por ele mesmo, certamente com a ajuda de Garcia, mas jamais comandado por este.

Peter Wykeham, outro importante biógrafo, conjectura com muita sensatez que mercê das características muito peculiares da personalidade de Santos Dumont e dos seus interesses específicos de estudo, Garcia deve ter sido não propriamente um guia, mas sim um conselheiro seguro, alguém em que ele podia confiar e com quem podia tirar as suas dúvidas sobre os assuntos estudados. Ele, de início, deve ter tentado outros professores, como conjectura Wykeham, mas não deveria ser tarefa fácil para mestres aposentados enfrentar uma entrevista com um jovem estrangeiro pequenino e dono de si mesmo, plenamente consciente de suas possibilidades. Garcia parece ter sido um achado feliz, um mestre, possivelmente aposentado, de Ciências e engenharia e que teria tido uma atitude positiva em relação a Santos Dumont - sempre receoso do ridículo - e diante de quem Alberto não se sentia constrangido em revelar os seus anseios aeronáuticos. Garcia visitava-o, provavelmente, todos os dias e trazia consigo algumas sugestões interessantes das muitas opções de estudo em Paris, de cursos que valeriam a pena serem seguidos ou de palestras que merece-

**(sobre Santos Dumont)...  
pouco aplicado, ou melhor,  
nada estudioso para as  
'teorias', mas de admirável  
talento prático e mecânico e,  
desde aí, revelando-se, em  
tudo, um gênio inventivo  
Agenor Barbosa,  
Colega de Dumont em Bristol**

riam ser assistidas. Ele deveria auxiliar Santos Dumont, sobretudo, a ter uma atitude de avaliação crítica em face das muitas possibilidades de acesso ao conhecimento disponíveis naquela grande cidade. Garcia dava-lhe aulas particulares sobre conteúdos específicos, discutia com ele as coisas interessantes que houvesse visto em alguma palestra ou aula que tivesse presenciado recentemente em alguma Universidade, alguma questão interessante aparecida nos livros que ele lia com frequência e, além disso, tirava as suas dúvidas, quando necessário.

**Com uma fortuna crescente face a boas aplicações na bolsa de valores, é notável e surpreendente que Santos Dumont tenha se interessado pelos estudos**

O professor Garcia dava-lhe, sem dúvida, uma ajuda inestimável, mas não era jamais um verdadeiro guia. Ele não conduzia, verdadeiramente, o processo educativo de Santos Dumont; essa era uma tarefa que cabia ao próprio Dumont fazê-lo, sob a sua própria conta e risco. Não era, assim, um relacionamento propriamente entre um mestre e o seu discípulo. A influência exercida era útil, mas controlada pelo próprio Santos Dumont. O resultado prático era que apesar da sua educação ser ampla e entusiasticamente conduzida, ela era também caracterizada por uma certa superficialidade.

Pode-se conjecturar que a sua educação científica poderia ter sido bem mais sólida, se não houvesse sido ele mesmo o próprio guia de todo o seu processo educativo; se não fosse ele mesmo que estivesse sempre no comando das direções a seguir. Mas isto seria praticamente impossível, pois Alberto aprendia sempre pelos seus próprios métodos de estudo.

Com a fortuna que possuía e que não parava de crescer em face das boas aplicações que ele havia feito em ações na bolsa de valores, o admirável mesmo é que ele tenha de fato estudado! E a admiração maior é pelo fato dele ter perseverado em seu objetivo de construir a sua auto-educação.

Em seu tempo, ainda não existiam, obviamente, cursos de engenharia aeronáutica. Deste modo, ele jamais poderia ter se formado em um curso universitário desta natureza. E outros títulos seriam para ele não mais do que

um simples ornamento dispensável. Também por isso, Santos Dumont optou, mais uma vez, pela sua liberdade, por não seguir nenhum curso universitário. Ele não se formou em engenharia aeronáutica, ele se fez a si próprio um engenheiro aeronáutico, um pioneiro autodidata que daria passos importantes para a inauguração de uma nova era nas conquistas tecnológicas aeronáuticas da humanidade.

Mas, afinal, como podemos saber o que Santos Dumont aprendeu de Física e quanto esse conhecimento influenciou em sua trajetória seguinte de conquistas tecnológicas?

Que conteúdos de Física eram esses não se sabe ao certo, mas uma análise cuidadosa dos trabalhos e das aventuras de Santos Dumont, assim como dos seus escritos sobre os mesmos, pode conduzir-nos a inferirmos os seus possíveis conhecimentos nesta área. Cremos que com um tal esforço analítico podemos desvendar muito do que, de fato, Santos Dumont estudou e aprendeu e que tipo de potencial interpretativo da Natureza um tal conhecimento lhe propiciou. Do mesmo modo, também, podemos reconhecer as possíveis deficiências e limitações deste seu conhecimento. Além disso, em um tal percurso, podemos ser levados a analisar uma série de fenômenos do cotidiano à luz das leis da Física em situações diversas ensejadas por Santos Dumont e, desta forma, refletirmos, aprendermos e ensinarmos uma série de conteúdos interessantes e úteis na compreensão do universo que nos cerca. Este, entretanto, é um desafio que transcende a extensão deste presente artigo e que nos remete necessariamente para estudos mais específicos que contemplem um tal tema.

### Nota

<sup>1</sup>A Universidade de Bristol teve a sua origem nesta escola que tinha, de fato, uma longa tradição na área de navegação. Esta escola superior originou-se de uma instituição ainda mais antiga fundada em 1595 pela Sociedade dos Mercadores Aventureiros de Bristol. Esta Sociedade dedicava-se ao arriscado comércio marítimo e os seus membros

fundaram inicialmente apenas uma escola de navegação, tendo sido ela uma das primeiras instituições de treinamento técnico da Inglaterra. Exatamente em 1893, no ano em que Santos Dumont foi estudar em Bristol, aquela Sociedade dos Mercadores decidira transformar a sua velha escola técnica do século XVI em uma Faculdade Técnica, o Merchant Venturers' Technical College, que posteriormente viria a transformar-se na atual Escola de Engenharia da Universidade de Bristol. Na verdade, o controle daquele College permaneceu sob a responsabilidade da Sociedade de Mercadores até 1949, quando foi finalmente incorporado pela prefeitura da cidade e deu origem simultaneamente à Escola de Engenharia da Universidade de Bristol, à Universidade Técnica de Bath e à Escola Politécnica de Bristol.

### Leia mais

- Henrique Lins de Barros, *Santos Dumont e a Invenção do Avião* (Rio de Janeiro, Jorge Zahar Editor, 2003).
- Fernando Hippolyto da Costa, *Santos Dumont: História e Iconografia* (Villa Rica Editoras Reunidas Ltda, Belo Horizonte, 1990).
- Gérard Hartmann, *Les Machines Volantes de Santos-Dumont*. Dossiers Historiques et Techniques Avions et Moteurs. Dezembro, 2005.
- Paul Hoffman, *Asas da Loucura: A Extraordinária Vida de Santos Dumont* (Editora Objetiva Ltda, Rio de Janeiro, 2004).
- Fernando Jorge, *As Lutas, a Glória e o Martírio de Santos Dumont* (T.A. Queiroz Editor, São Paulo, 2003).
- Alexandre Medeiros, *Santos Dumont e a Física do Cotidiano* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006).
- João Musa, Marcelo Mourão e Ricardo Tilkian, *Alberto Santos-Dumont: Eu Naveguei pelo Ar. Da Conquista da Dirigibilidade dos Balões ao Mais Pesado que o Ar* (Editora Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 2003).
- Aluizio Napoleão, *Santos Dumont e a Conquista do Ar* (Editora Itatiaia Ltda., Belo Horizonte, 1988).
- João Spacca Oliveira, *Santô e os Pais da Aviação* (Companhia das Letras, São Paulo, 2005).
- Alberto Santos Dumont, *A Conquista do Ar pelo Aeronauta Brasileiro Santos Dumont*. (Aillaud & Cia., Paris, 1901).
- Alberto Santos Dumont, *O Que eu Vi. O Que Veremos* (Editora Herdra, São Paulo, 2002).
- Alberto Santos Dumont, *Os Meus Balões* (Fundação Projeto Rondon, Brasília, 1986).
- Nancy Winters, *O Homem Voa! A Vida de Santos Dumont, o Conquistador do Ar* (DBA, São Paulo, 2000).
- Peter Wykeham, *Santos-Dumont: A Study in Obsession* (Harcourt, Brace & World, New York, 1963).



# A Física do Vôo na Sala de Aula

## Nelson Studart

Departamento de Física, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos  
e-mail: studart@df.ufscar.br

## Sílvio R. Dahmen

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre e Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Würzburg.  
e-mail: silvio.dahmen@ufrgs.br e sdahmen@physik.uni-wuerzburg.de

## As forças no avião

Para os físicos, as forças da natureza são quatro: a forte, responsável pela coesão nuclear, a fraca que produz a radioatividade, a eletromagnética que está relacionada à maioria dos fenômenos com os quais convivemos no cotidiano e finalmente a gravitacional que atua entre quaisquer corpos que possuem massa.

No jargão aeronáutico também se costuma falar em “quatro forças”. A menção obviamente restringe-se ao mundo particular de quem lida com o vôo e seu conhecimento é fundamental para que os pilotos possam voar apropriadamente. O vento fluindo em uma determinada direção em relação ao avião produz uma força sobre o aeroplano chamada de força aerodinâmica total. Uma outra grandeza intimamente ligada à força aerodinâmica e também

### No jargão aeronáutico costuma-se falar em “quatro forças”:

- Sustentação
- Arrasto
- Peso
- Tração

muito importante na descrição do vôo é o ângulo de ataque definido como o ângulo formado pela direção do vento (chamado usualmente de “vento relativo”) e a direção do avião.

A força aerodinâmica total pode ser decomposta em duas componentes: a sustentação e o arrasto. Além desta, atuam sobre o avião o peso e a força de tração (ou propulsão).

Podemos definir mais especificamente as quatro forças envolvidas na física do vôo como

• Sustentação ( $S$ ) é a componente da força aerodinâmica perpendicular à direção do movimento do vôo;

• Arrasto ( $R$ ), essencialmente uma força de atrito, é a componente da força aerodinâmica paralela à direção de vôo;

• Peso ( $P = mg$ ) atuando sobre o avião e dirigida para o centro da Terra;

• Tração ( $T$ ) é a força produzida pelo motor e é dirigida ao longo do eixo longitudinal do avião.

Antes de discutir o movimento do avião, é instrutivo calcular as forças de sustentação e arrasto na simples experiência com uma pipa. Para nossos propósitos, é suficiente considerar a pipa como uma placa plana de área  $A$ . Na Fig. 1, apresentamos as forças atuando sobre a pipa suposta em repouso. Nesta situação, a tensão no fio

exercida por quem empina a pipa deve ser igual à resultante das forças. Considerando o sistema ortogonal de coordenadas orientado na direção da Terra, obtemos

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow R = T \cos\theta, \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow S = T \sin\theta + P. \quad (2)$$

Se você medir com um dinamômetro a força sobre o fio  $T$  e o ângulo de inclinação  $\theta$ , você terá uma boa estimativa das forças de sustentação e de arrasto. É importante notar que o ângulo  $\theta$  destas equações é o ângulo que o fio da pipa faz com a relação à horizontal e não deve ser confundido com o ângulo que a pipa faz com relação a esta mesma horizontal. Este último é o chamado ângulo de ataque e embora não apareça explicitamente

O vôo tem inspirado a imaginação do homem desde tempos remotos. Antes algo restrito a poucos, hoje os aviões se tornaram um meio de transporte acessível, fato este comprovado pelo crescimento espantoso do transporte aéreo nos últimos anos. Mesmo com esta popularização a fascinação pelo vôo continua. Assim é surpreendente como a descrição do vôo não tenha sido usada intensamente em livros didáticos e na sala de aula para demonstrar em todos os níveis de escolaridade a aplicação de princípios básicos da Física em exemplos atraentes. Nada contra as roldanas, os planos inclinados e outros exemplos ideais, que ainda são importantes como maneira de se treinar a abstração e reduzir problemas a seus elementos fundamentais. Mas um exemplo prático de um dia-a-dia cada vez mais próximo das pessoas desempenha sem dúvida um papel essencial ao mostrar para os alunos uma física presente na sua vida. Neste artigo, propomos o exemplo prático e fascinante do vôo para ilustrar conceitos e leis da Física.

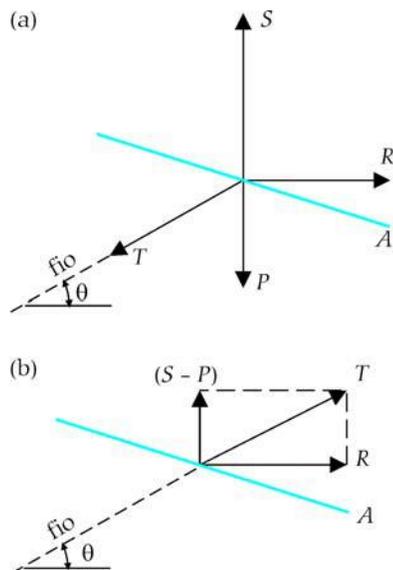


Figura 1. Forças atuando sobre uma pipa de seção reta com área  $A$ .

nas Eqs. 1 e 2, ele entra implicitamente nas fórmulas que determinam a sustentação  $S$  e o arrasto  $R$ . Além disso quem já empinou sabe que a tensão no fio depende da velocidade do vento. Assim também as forças de sustentação e arrasto, como veremos mais à frente.

Voltemos ao avião. A Fig. 2 é uma representação esquemática das quatro forças quando o avião está subindo [1].

A Fig. 3 mostra o avião na descida rápida com o motor fornecendo ainda alguma potência.

Para um avião que está nivelado em vôo de cruzeiro com velocidade constante (cerca de 900 km/h a 10.000 m de altitude) a resultante das forças é nula e devemos obter  $S = P$  e  $T = R$ .

No entanto na subida ou na descida a situação é bastante diferente. Por exemplo, na subida a uma velocidade constante e a uma taxa de ascen-

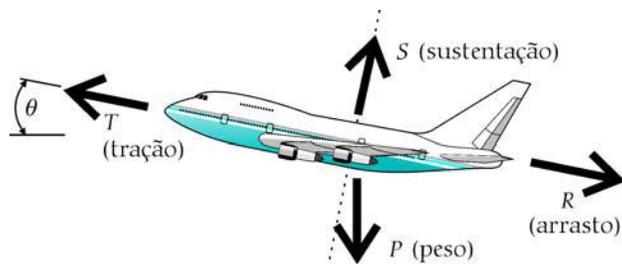


Figura 2. Forças sobre um avião no procedimento de subida com velocidade constante e taxa de ascensão constante.

são constante, o diagrama de forças referente às forças da Fig. 2 com o sistema de coordenadas orientado na direção longitudinal do avião (eixo  $x$ ) indica que

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow T - P \sin\theta - R = 0, \quad (3)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow S - P \cos\theta = 0. \quad (4)$$

Durante a descida e novamente supondo que não existe aceleração em qualquer direção temos que

$$S - P \cos\theta = 0, \quad (5)$$

$$T + P \sin\theta - R = 0. \quad (6)$$

A Eq. 4 indica que, na descida, a sustentação é menor do que o peso do avião, como se pode supor à primeira vista, já que a força da gravidade deve ser a responsável pela “queda” do avião [2]. Curiosamente, o mesmo acontece na subida. Para qualquer ângulo de ataque, a sustentação é menor do que o peso como mostram a Eqs. 4 e 6, se tornando igual apenas para vôo nivelado. Este resultado deve surpreender muitos estudantes que, em geral, têm a idéia preconcebida de que para que um avião suba, a força de sustentação deve exceder o peso do avião. Pergunte a opinião de seus estudantes antes de iniciar a aula.

A situação acima discutida é análoga ao caso, descrito na ampla maioria dos livros didáticos, de blocos sendo arrastados para cima ou escorregando em rampas com atrito. A força normal neste caso corresponde à força de sustentação e curiosamente não nos surpreendemos com o fato da normal  $N$  (o análogo à força  $S$  no nosso caso) ser menor que o peso  $P$ . A

diferença marcante é que enquanto as forças aerodinâmicas dependem da velocidade e do ângulo de ataque, a força normal e a força de atrito são constantes.

Há dois outros pontos interessantes que merecem uma discussão: talvez para os alunos seja mais “intuitivo” decompor as forças nos eixos  $x$  e  $y$  num referencial do observador no solo e não em um referencial relativo aos eixos do avião. Neste caso as Eqs. 3 e 4 passam a serem escritas na forma

$$\sum F_x = T \cos\theta - R \cos\theta - S \sin\theta = 0, \quad (7)$$

$$\sum F_y = T \sin\theta + S \cos\theta - R \sin\theta - P = 0. \quad (8)$$

Neste caso podemos ver pela Eq. 8 que se a tração for maior que o arrasto, então a diferença  $(T - R) \sin\theta$  é exatamente o termo extra que se adiciona à sustentação para contrabalançar o peso. Pergunte aos seus alunos o que aconteceria se  $T = R$ . O avião levantaria vôo?

Um outro ponto interessante que pode gerar alguma confusão deve ser destacado. A posição do avião na Fig. 3 é típica de um procedimento de descida rápida e não de pouso. Podemos imaginar as conseqüências se um avião pousasse nesta posição. Por este motivo pouco antes da aterrissagem o avião se posiciona como na Fig. 2. Para ilustrar este ponto realçamos na Fig. 4 as forças atuando sobre um aeroplano em uma descida lenta para pouso em atitude de nariz elevado com o motor ainda gerando uma pequena tração.

Neste caso, embora as Eqs. 3 e 4

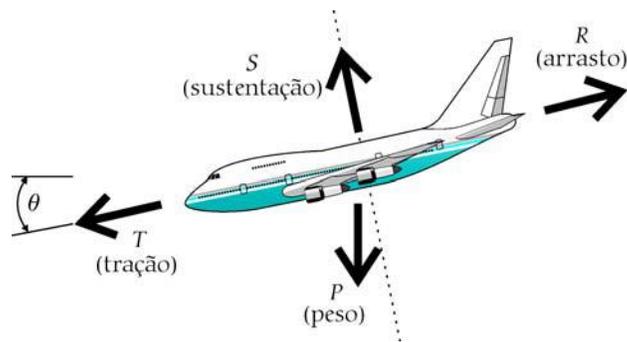


Figura 3. Forças sobre um avião no procedimento de descida com velocidade constante e taxa constante.

continuem válidas (ou as Eqs. 7 e 8, dependendo do referencial que escolhermos), a analogia com o plano inclinado deixa de ser válida em função da direção do voo, isto é, do movimento do avião. Outro ponto fundamental é que durante o procedimento de pouso o avião muda a configuração das asas (usando os chamados flaps), tornando assim a área efetiva da asa maior. Isto tem conseqüências importantes para os valores das forças de sustentação e arrasto, que dependem da geometria das asas e da velocidade do avião, como já pudemos explicar. Assim os valores de  $S$ ,  $T$  e  $R$  que aparecem nas equações são diferentes das outras situações discutidas.

Sugerimos que, na discussão das leis de Newton, o equilíbrio de forças seja discutido de um modo mais atraente e motivador usando um objeto tão fascinante como o avião para ilustrar um aparato tradicional como o “bloco sobre o plano inclinado”.

### Forças dependentes da velocidade

É comum associarmos o nome de Isaac Newton (1642-1727) à mecânica, em particular à mecânica de corpos rígidos ou à teoria da gravitação, bem como à óptica. Porém suas contribuições à dinâmica de fluidos e à hidrostática foram fundamentais, embora nem sempre tão lembradas quanto suas outras contribuições. Este “esquecimento” é algo recorrente na história das ciências, uma vez que grandes cientistas muitas vezes provocam mudanças tão profundas em seus campos de trabalho que outras contribuições também importantes por eles dadas acabam ficando em segundo plano.

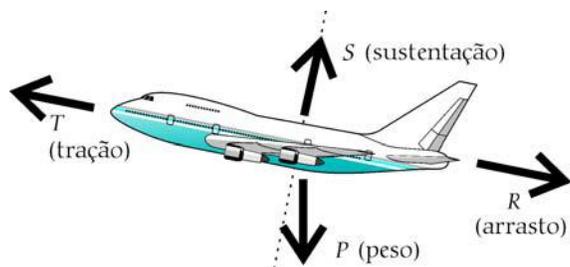


Figura 4. A direção das quatro forças em uma descida para pouso em atitude de nariz elevado.

A mecânica de fluidos era um importante tema de pesquisa à época de Newton em particular não menos devido à teoria do éter. Embora possamos encontrar as raízes do conceito de éter na filosofia dos pensadores gregos, foi René Descartes (1596-1650) quem pela primeira vez tentou introduzir de forma descritiva o conceito de éter em Física como um elemento indis-

pensável à realidade física do universo. Para Descartes toda a matéria do universo era formada a partir de uma proto-matéria que se manifestava de três formas: a matéria da qual eram formados o Sol e estrelas, a matéria que formava os planetas e cometas bem como um meio intermediário, que preenchia todo o espaço e intermediava as forças entre todos os corpos. Por isso a necessidade de se desenvolver uma teoria deste “meio intermediário”, uma tentativa que manteve os físicos ocupados até a segunda metade do século XIX. Segundo o historiador John Anderson Jr. em sua celebrada obra *A History of Aerodynamics* (Cambridge University Press, 1997), o interesse em hidrodinâmica por parte de Newton não foi devido a razões práticas, mas com o intuito de mostrar a inadequação do modelo de Descartes para o sistema solar que era baseado na hipótese de que o éter movia-se como vórtices em torno dos planetas. A única explicação possível para o movimento regular e periódico dos planetas, de acordo com as observações de Johannes Kepler (1571-1630), era que os corpos celestes movendo-se no éter não sofreriam arrasto aerodinâmico. Newton devotou-se a mostrar que sempre existiria um arrasto *finito* sobre os corpos (inclusive os celestes) movendo-se em um meio contínuo.

As contribuições de Newton para aerodinâmica aparecem no livro II dos *Principia* que trata exclusivamente da dinâmica dos

fluidos e da hidrostática. Na Proposição 33 ele mostrou que corpos movendo-se em um fluido sofrem “resistências em uma razão composta da razão do quadrado de suas velocidades, e uma razão do quadrado de seus diâmetros e uma razão simples da densidade das partes dos sistemas”. Esta é a lei do quadrado-velocidade para a força aerodinâmica de um corpo em um

É comum associarmos o nome de Isaac Newton à mecânica, em particular à mecânica de corpos rígidos ou à teoria da gravitação, bem como à óptica. Porém suas contribuições à dinâmica de fluidos e à hidrostática foram fundamentais, embora nem sempre tão lembradas

fluido. Ao mesmo tempo, Newton mostrou que esta força era proporcional à área da seção reta  $A$  (“a razão do quadrado de seus diâmetros”) e varia diretamente com a densidade (“a razão simples das densidades”). Em notação moderna, podemos escrever

$$F_r \propto \rho A v^2. \quad (9)$$

Ao final do século XIX, a essência desta fórmula estava justificada tanto do ponto de vista teórico como experimental. As equações para as forças de sustentação e arrasto podem, então, ser escritas como

$$S = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_L \quad (10)$$

e

$$R = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_R, \quad (11)$$

em que  $C_L$  e  $C_R$  são os coeficientes de sustentação e arrasto respectivamente e o fator  $1/2$  foi introduzido por convenção. A questão crucial era (e permanece de certo modo até hoje!) determinar como estes coeficientes dependem do ângulo de ataque. Foi Newton o primeiro a calcular esta dependência. O modelo de Newton para um fluido correspondia a uma coleção de partículas individuais que ao se chocar diretamente contra a superfície de um corpo perdiam as componentes dos momentos lineares na direção normal e seguiam na direção tangente à superfície do corpo. Com base neste modelo, ele mostrou na Proposição 34 que

$$F_r = \rho v^2 A \sin^2 \theta. \quad (12)$$

Esta é a lei do seno-quadrado de

Newton. Adaptando este resultado para uma asa na forma de uma placa plana, como a pipa ilustrada na Fig. 1, e decompondo a força aerodinâmica em suas componentes temos que (Fig. 5)

$$S = F_r \cos\theta = \rho v^2 A \sin^2\theta \cos\theta, \quad (13)$$

$$R = F_r \sin\theta = \rho v^2 A \sin^3\theta, \quad (14)$$

e, finalmente,

$$\frac{S}{R} = \cotg\theta. \quad (15)$$

Estes cálculos de Newton levaram a previsões muito pessimistas com relação à possibilidade de vôo do mais-pesado-que-o-ar porque elas previam uma força de sustentação muito pequena, para pequenos ângulos de ataque, por causa da dependência do tipo seno-quadrado. Se a opção fosse aumentar o ângulo de ataque  $\theta$ , a razão  $S/R$  decresceria bastante. A outra opção seria aumentar a área da asa. Neste caso seriam necessárias asas gigantescas que tornariam impraticáveis as máquinas voadoras. O modelo do Newton não descreve de modo adequado um fluido e, portanto, felizmente suas previsões estavam erradas. Mas, mesmo assim, estes argumentos foram utilizados pelos físicos ao final do século XIX para descartar a possibilidade concreta de vôo do mais pesado-que-o-ar.

**Atenção!** O modelo de Newton de um fluido constituído de uma coleção de partículas colidindo com paredes na forma exposta acima está errado. Alguns textos ainda incorrem no erro de explicar sustentação através dos choques das moléculas do ar incidindo sobre as asas. Um fluido é corretamente descrito através de um modelo descrito em termos de funções contínuas como velocidades, densidades e campos de tensão. As equações

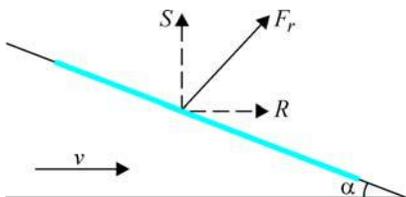


Figura 5. Decomposição da força aerodinâmica atuando sobre uma placa plana para ilustrar a lei do seno-quadrado de Newton.

equivalentes às equações do movimento de Newton para partículas são as equações de Euler referentes à conservação da massa, do momento e da energia.

### Fator de carga g

Outra situação que merece discussão em sala de aula é o movimento do avião durante uma curva [3]. Quando as asas se inclinam de um ângulo  $\phi$ , como mostrado na Fig. 6, uma componente da força de sustentação aponta na direção do centro da curva originando uma força centrípeta  $F_c = mv^2/r$ , em que  $m$  é a massa do avião,  $v$  a sua velocidade e  $r$  o raio da trajetória circular.

Do equilíbrio das forças temos que

$$m \frac{v^2}{r} = S \sin\phi, \quad (16)$$

$$P = mg = S \cos\phi, \quad (17)$$

de forma que

$$tg\phi = \frac{v^2}{rg}. \quad (18)$$

O ângulo de inclinação é, portanto, determinado de maneira única para uma determinada curva. Outra conclusão muito interessante pode ser obtida substituindo a velocidade na Eq. (16) pelo seu valor na Eq. (18). O resultado é

$$S = mg \sec\phi = mg', \quad (19)$$

tal que

$$g' = g \sec\phi. \quad (20)$$

Este é o valor efetivo para a aceleração da gravidade em um avião realizando uma curva que é maior que a aceleração da gravidade por um fator de  $\sec\phi$ . Para uma curva com ângulo de inclinação de  $60^\circ$  corresponde a  $2g$ . Este fator de carga (no jargão aeronáutico que a estrutura do avião deve suportar e os pilotos (assim como os passageiros) “sentem” tem considerável importân-

cia prática. Os aviões de caça (F16, por exemplo) chegam a atingir inacreditáveis  $9g$ .

### Sustentação

Das quatro forças, a mais fundamental para o vôo é a força da sustentação. E a explicação, em termos simples, de como ela pode ser entendida tem sido alvo de inúmeras controvérsias na literatura e conceitos errôneos têm sido empregados [9]. Eis a questão: Princípio de Bernoulli ou leis de Newton para explicar como as asas de um aeroplano “realmente” funcionam? Na verdade, Newton e Bernoulli não se contradizem e tanto as leis de Newton quanto o “princípio” de Bernoulli são perfeitamente compatíveis. Aliás a equação de Bernoulli é facilmente obtida como uma equação de conservação de energia a partir das leis de Newton. A raiz da discórdia é que cada lado da disputa exige que apenas a sua interpretação deva ser ensinada, posto que seria “a correta”. Ambas as descrições podem e devem ser usadas. O ar, ao ser defletido pela asa, é acelerado para baixo exercendo força sobre a asa (2ª lei de Newton). Esta por sua vez, exerce uma força de reação (3ª lei de Newton) que origina a sustentação. Por outro lado, as linhas de corrente acima da asa estão mais comprimidas que as linhas abaixo da asa. Como consequência, a velocidade do ar acima da asa é maior do que a de baixo da asa. É como apertar a saída de uma mangueira: a água jorra com mais velocidade [5]. Pela

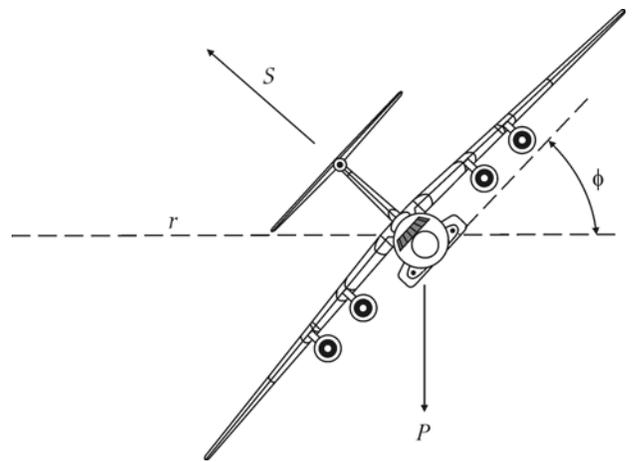


Figura 6. Avião em uma curva de raio  $r$  inclinado lateralmente (movimento conhecido como rolamento).

equação de Bernoulli  $P + (1/2)\rho v^2 =$  constante, onde  $P$  é a pressão e  $\rho$  a densidade do ar, há uma diferença de pressão que causa a força de sustentação.

Dois graves erros carecem ser realçados. O primeiro que aparece em vários livros didáticos (talvez a explicação mais popular) usa a hipótese de que os tempos de trânsito do ar, por cima e por baixo da asa, são iguais. Daí, como a superfície superior da asa é, em geral, mais longa, a velocidade do ar acima é maior do que a velocidade abaixo. A solução numérica das equações da aerodinâmica e a experiência demonstram que esta hipótese, embora plausível, é falsa. A Fig. 7

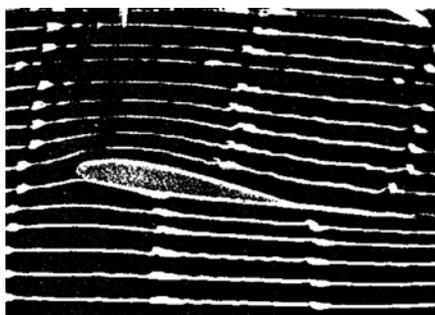


Figura 7. Linhas de corrente do ar através de uma asa em túnel de vento.

mostra as linhas de corrente sobre um aerofólio em um túnel de vento em que o fluxo torna-se visível devido à introdução de fumaça. Evidencia-se claramente que a concepção de “tempos iguais” ou “distância percorrida maior por cima da asa” é uma falácia. Na verdade o ar que flui pelo *extradorso* (a parte superior) da asa chega ao bordo de fuga antes que o ar que flui ao longo do *intradorso* (a parte inferior).

É muito comum encontrar-se em livros didáticos e sítios na Internet uma explicação baseada na descrição de uma força sobre a asa que não causa nenhuma perturbação na corrente de ar. Observe a Fig. 8. A ilustração mostra que as linhas de corrente após o bordo de fuga, são paralelas às linhas do fluxo incidente. Se, sobre a asa, age uma força para cima para compensar o peso do avião, o ar deve ser acelerado para baixo de modo a produzir a força de reação (a sustentação). Assim, o fluxo após a saída da asa nunca pode estar na direção paralela ao fluxo incidente. Uma simples aplicação das leis de Newton.

A discussão da Fig. 8 na sala de aula pode possibilitar uma aprendizagem mais significativa das leis de

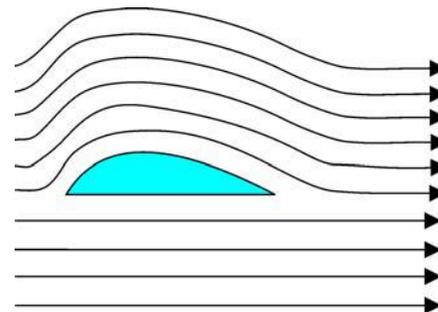


Figura 8. Distribuição esquemática das linhas de corrente através de uma asa. **ERRADO!**

Newton.

O cenário correto é mostrado na Fig. 9 em que as linhas de fluxo acompanham a superfície superior e seguem para baixo após deixarem o bordo de fuga. A Fig. 9 ainda exhibe claramente o fato de que o espaçamento entre as linhas na parte superior é menor do que na parte inferior, que é essencial para o emprego correto do princípio de Bernoulli na explicação da sustentação das asas.

### Movimento relativo

Outra aplicação interessante do vôo para fins didáticos concerne ao movimento relativo. É um tema pouco abordado no ensino da mecâ-

## Sustentação e arrasto em asas reais

Embora a discussão a seguir esteja um pouco acima do nível de alunos do Ensino Médio, é importante que façamos alguns comentários a respeito dos coeficientes de arrasto e sustentação em situações práticas (o projeto de aviões) por uma questão de completeza. Na vida real as Eqs. 10 e 11 são normalmente usadas como as definições dos coeficientes de sustentação  $C_L$  e de arrasto  $C_R$ , que podem então ser determinados experimentalmente, uma vez que seu cálculo teórico pressupõe uma série de idealizações e nos dá resultados que podem diferir sobremaneira quando tratamos de aviões reais. A maioria dos livros-texto de mecânica de fluidos que trazem um capítulo sobre “aerofólios” normalmente introduzem para tanto o famoso teorema de Kutta-Joukowski

que relaciona  $l$ , a sustentação por unidade de comprimento da asa (sua envergadura) com a chamada circulação  $\Gamma$  do ar em torno da asa, mais especificamente,

$$l = \rho v \Gamma \quad (B1)$$

em que  $v$  é a velocidade do vento relativo. Esta circulação é definida de maneira semelhante à circulação do campo elétrico ou magnético em eletromagnetismo, com a diferença que a integral da circulação é sobre a velocidade do ar ao longo de uma curva fechada. Com este teorema é possível calcular  $C_L$ . Porém a teoria de aerofólios (e o teorema acima) parte do pressuposto que a asa tem envergadura infinita pelo simples motivo que neste caso o perfil das linhas de corrente de ar são iguais ao longo da envergadura da asa - em aviões de verdade o perfil

de correntes varia à medida que nos deslocamos sobre a asa, da fuselagem até a sua ponta, o que torna assim o cálculo da circulação de certo modo pouco útil. Esta variação da circulação é inclusive um dos motivos pelos quais aviões modernos possuem uma extensão vertical na ponta das asas (as chamadas *winglets*) que contribuem para um aumento efetivo da área das asas e têm um papel importante na minimização de vórtices que normalmente se formam na ponta de asas normais e afetam a sustentação. Como dissemos, podemos “definir” o coeficiente de arrasto da Eq. (11) como

$$C_R = \frac{R}{\frac{\rho A v^2}{2}} \quad (B2)$$

O termo  $\rho v^2/2$  é conhecido como pressão dinâmica e por definição podemos dizer que o coeficiente de arrasto é assim a razão entre o arrasto e a força resultante do produto da pressão dinâmica pela área (a pressão dinâmica quando multiplicada pela área de nosso corpo é a força que sentimos nos voltando contra o vento). A área  $A$  nesta equação é a chamada “área de referência” que pode ser tanto a área real da superfície da asa como a chamada “área frontal do avião”, que seria a área que o avião ocupa quando o olhamos de frente. Para aviões reais costuma-se separar a Eq. B2 em dois termos

$$C_R = C_{R0} + \frac{C_s^2}{\pi A_r e} \quad (B3)$$

em que o termo  $C_{R0}$  é a parte do coeficiente que depende da viscosidade do ar e da forma da asa. O segundo termo é o chamado “arrasto induzido” e surge nas asas devido à sustentação. Como ele surge? Bem, com

a diferença de pressão do ar que flui pelo extradorso e o intradorso, na ponta da asa, onde estas duas “lâminas” de ar se encontram, o ar de baixo (pressão maior) é empurrado para cima (onde a pressão é menor), o que acaba provocando um redemoinho (turbulência) que contribui para o arrasto - e agora fica claro o porquê dos aviões modernos utilizarem *winglets*, cuja função é eliminar esse efeito na ponta da asa. As outras grandezas no segundo termo da Eq. (B3) são a *razão de aspecto* da asa e o *fator de eficiência de envergadura*. A razão de aspecto é a razão entre o quadrado da envergadura  $s^2$  e a área da asa  $A$ , ou seja,  $A_r = s^2/A$ . Deste modo, se quisermos diminuir o arrasto induzido, temos que aumentar a razão de aspecto (aumentar a envergadura e diminuir a área). Por isso planadores têm uma asa longa e delgada, pois uma vez que não possuem motor, eles têm que tentar diminuir ao máximo o arrasto induzido produzido pela sustentação. O fator

de eficiência  $e$  depende de como a sustentação varia ao longo do comprimento da asa. A maioria dos aviões atuais possui  $e < 1$ . Porém, o grande pioneiro da aerodinâmica, Ludwig Prandtl, mostrou que se a corda de uma asa variasse elípticamente da fuselagem à ponta, então  $e = 1$  e neste caso era possível diminuir o arrasto induzido. Ou seja, olhando a asa de baixo ela tem o perfil de uma elipse. Uma forma aproximada de “asa elíptica” foi usada durante a II Guerra Mundial nos famosos caças *Spitfire* ingleses e nos bombardeiros *Heinkel 111* alemães. Embora vantajosa do ponto de vista de eficiência, estas asas apresentam um problema: sendo a sustentação praticamente constante ao longo do comprimento da asa, quando o avião entra em condições de estol (termo técnico para designar a perda de sustentação) ele o faz simultaneamente em todo ponto da asa, o que pode levar a uma perda súbita do controle da aeronave.

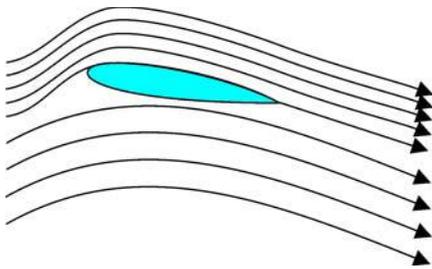


Figura 9. Distribuição esquemática das linhas de corrente através de uma asa. **CERTO!**

nica do Ensino Médio, mas de fundamental importância para a discussão do princípio da relatividade de Galileu, mais conhecido como a lei da inércia. A velocidade de um corpo depende do sistema de referência. A composição das velocidades leva à conhecida lei da adição de velocidades de Galileu (que vai ser modificada por Einstein na teoria da relatividade especial). Na aerodinâmica a velocidade relativa é um conceito-chave, pois, como vimos, a força aerodinâmica depende do quadrado da velocidade relativa do objeto em relação ao ar.

Na Fig. 10 o sistema de referência

é o solo e, portanto temos que

$$v_{\text{avião-ar}} = v_{\text{avião-solo}} - v_{\text{vento}} \quad (21)$$

No caso em que o sistema de referência é o avião não podemos medir diretamente a velocidade do vento, mas podemos calculá-la a partir da relação entre as velocidades do avião como

$$v_{\text{vento}} = v_{\text{avião-ar}} - v_{\text{avião-solo}} \quad (22)$$

A importância da velocidade relativa explica por que os aviões decolam e aterrissam em diferentes pistas de pouso em diferentes dias. Os aviões visam a fazer a decolagem e aterrissagem contra o vento que exige uma menor velocidade em relação ao solo para ser transportado no ar. Isto significa uma distância mais curta a ser percorrida ao longo da pista. Como as pistas têm comprimento fixo, é conveniente que o

avião esteja no ar tão rápido quanto possível na decolagem e consiga parar tão cedo quanto possível na aterrissagem. No caso da aterrissagem ele tem que, uma vez em solo, desacelerar e isto é possível com um forte vento contra (maior arrasto). Também os aviões modernos utilizam os “controles de superfície de asa”, que são partes móveis que no pouso servem como breques aerodinâmicos.

Peça a seus alunos também que, se um dia tiverem a oportunidade de voar, que olhem as informações de

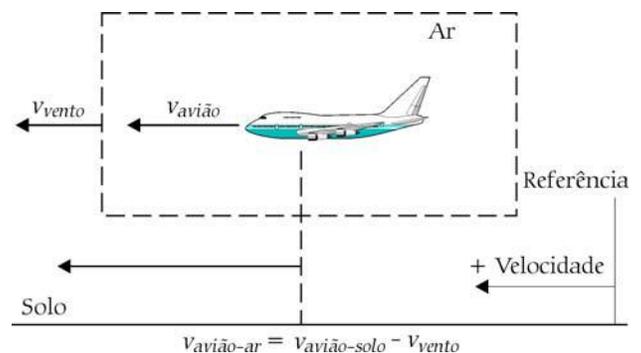


Figura 10. Composição de velocidades no referencial do solo.

vôo normalmente fornecidas nos monitores de bordo ou transmitidas pelo comandante. A referência é sempre à “velocidade em relação ao solo”, porque para um passageiro na verdade esta é a que importa, pois determina quando ele chegará ao objetivo desejado. Esta velocidade pode ser muito diferente da velocidade do avião em relação ao ar em função da presença dos chamados *ventos de proa* ou *ventos de popa*. Para viagens de longa distância, estes ventos podem aumentar ou diminuir a duração da viagem em horas.

Observe que as velocidades consideradas são grandezas vetoriais. Deste modo, o material aqui discutido pode então ser estendido para tratar problemas de navegação aeronáutica que envolvem composição vetorial de

acordo com os objetivos do programa estabelecido para a série escolar.

## Conclusões

Discutimos neste artigo como a Física do vôo pode ser usada para ilustrar alguns conceitos como composição de forças, forças dependentes da velocidade e sistemas de referência em um exemplo bastante prático e interessante [6,7]. Procuramos chamar também a atenção para alguns conceitos errôneos comumente propagados em livros didáticos, como o chamado “princípio dos tempos de trânsito iguais”. Embora alguns dos assuntos aqui discutidos, em particular a questão do coeficiente de arrasto e sustentação, possam estar um pouco além da compreensão de alunos do nível médio, é importante que os professores tenham estes conceitos em mente uma vez que as teorias de aerofólios encontradas nos livros-texto servem de pontos de referência e são desenvolvidas a partir de idealizações de casos reais. Por fim, este artigo não constitui uma contribuição original ao ensino de Física, no sentido

em que os temas já foram abordados nas referências aqui citadas.

## Notas e Referências

- [1] G.J. Flynn, *The Physics Teacher* **25**, setembro, 368 (1987).
- [2] Pilotos profissionais costumam dizer, jocosamente, que um pouso nada mais é que uma queda controlada - o que não deixa de ser uma verdade! Obviamente, como as equações acima nos indicam, trata-se de uma queda a velocidade constante.
- [3] N.H. Fletcher, *Physics Education* **10**, julho, 385 (1975).
- [4] Sobre a sustentação das asas, veja os artigos de Anderson e Eberhardt (p. 43) e Eastlake (p. 53) bem como o de Klaus Weltner, Martin Ingelman-Sundberg, Antonio Sergio Esperidião e Paulo Miranda na *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**, 429 (2001). Deve-se mencionar que o Prof. Weltner tem sido um dos mais insistentes críticos do uso da equação de Bernoulli para a explicação do fenômeno da sustentação aerodinâmica. Na Ref. 6, você encontrará uma lista de suas publicações sobre o tema.
- [5] Ver artigo de Eastlake neste número, p. 53.
- [6] O sítio <http://www.physics.umd.edu/lecsem/services/refs/refsf.htm> apresenta uma lista exaustiva de artigos e sítios sobre a física do vôo.
- [7] O sítio da Nasa <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/> contém material de excelente qualidade para todos os níveis escolares. Os *applets* podem ser baixados gratuitamente.

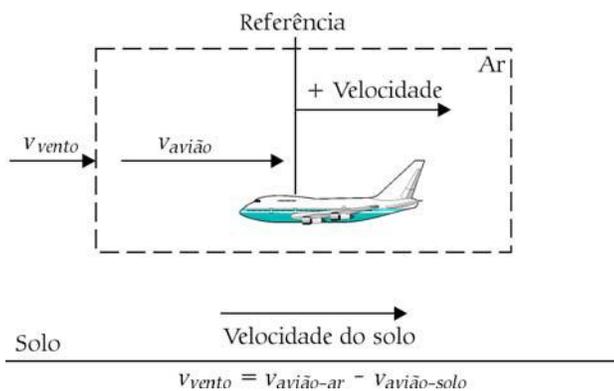


Figura 11. Composição de velocidades no referencial do avião.





## Como os Aviões Voam: Uma Descrição Física do Vôo

**H**oje em dia muita gente já andou de avião e muitos se perguntaram como é que um avião voa. A resposta que normalmente se obtém ou é enganosa ou simplesmente errada. Esperamos que as respostas encontradas neste artigo ajudem a dirimir concepções alternativas acerca da sustentação de aviões bem como sejam adotadas como argumento quando se tiver que explicar aos outros o porquê dos aviões voarem. Mostraremos aqui que é mais fácil explicar a sustentação se partirmos das leis de Newton ao invés do princípio de Bernoulli. Mostraremos também que a explicação que mais comumente nos é ensinada é, no mínimo, enganosa e que a sustentação é devido ao fato que a asa desvia o ar para baixo. A maior parte deste ar desviado é puxada da parte de cima da asa.

Começamos por três descrições da sustentação de asas que são normalmente apresentadas em livros-texto e manuais de treinamento.

Chamaremos a primeira de *descrição aerodinâmica matemática* da sustentação, usada por engenheiros aeronáuticos. Esta abordagem usa uma matemática complexa e/ou simulações computacionais para calcular a sustentação de uma asa. Ela usualmente faz uso de um conceito matemático chamado *circulação* para com ele calcular a aceleração do ar sobre a asa. A circulação é uma medida da rotação aparente do ar em torno da asa. Embora prático na hora de calcular a sustentação, esta descrição não nos fornece uma compre-

ensão intuitiva sobre o vôo.

A segunda descrição possível será por nós chamada de *descrição popular* e é baseada no princípio de Bernoulli. A vantagem maior desta descrição é que ela é fácil de ser entendida e tem sido ensinada há anos. Devido a sua simplicidade, ela é usada na maioria dos manuais de treinamento de vôo para explicar a sustentação de uma asa. Sua principal desvantagem é o fato de estar baseada no princípio dos *tempos de trânsito iguais*, ou ao menos na hipótese de que uma vez que o ar tem um caminho maior para percorrer por cima da asa, ele tem que fazê-lo mais rapidamente. Esta abordagem é focada no formato da asa e impede que se entendam vários fenômenos importantes como o vôo invertido, a potência, o efeito-solo e a dependência da sustentação com o ângulo de ataque da asa.

A terceira maneira de descrever a sustentação, reivindicada neste artigo, é o que chamaremos

de *descrição física*. Ela é baseada essencialmente nas três leis de Newton e em um fenômeno chamado de efeito Coanda. Esta descrição é a única capaz de explicar os fenômenos associados ao vôo, permitindo que sejam entendidos. Ela é útil para uma compreensão precisa de certas relações entre parâmetros de vôo, como o modo pelo qual a potência aumenta com a carga ou a velocidade de estol aumenta com a altitude<sup>1</sup>. Ela também serve para fazer cálculos simples (com lápis e papel) da sustentação. A descrição física da sustentação também é de grande valia para

**Muitos se perguntam como é que um avião voa. Ao perguntar sobre isso, a resposta que normalmente se obtém ou é enganosa ou simplesmente errada**

.....  
**David Anderson**

Fermi National Accelerator  
Laboratory, Batavia  
e-mail: dfa@fnal.gov

.....  
**Scott Eberhardt**

Boeing Company, Seattle  
Foi professor por longo tempo do  
Departamento de Aeronáutica e  
Astronáutica da Universidade de  
Washington  
e-mail: Scott.Eberhardt@boeing.com

.....  
Tradução e resumo: **S.R. Dahmen**  
.....

---

Há uma controvérsia sobre a causa da sustentação que permite a aviões se manterem no ar. A explicação usualmente encontrada nos livros texto é aquela baseada no Princípio de Bernoulli e no princípio dos tempos de trânsito iguais. Neste artigo, D. Anderson e S. Eberhardt, além de mostrarem que este último é incorreto, defendem que a sustentação pode ser entendida apenas em se considerando as leis de Newton aplicadas ao movimento do ar entorno da asa. No artigo seguinte, C.N. Eastlake argumenta que tanto as explicações baseadas em Newton e Bernoulli estão corretas, e seu uso é uma questão de conveniência em função dos dados disponíveis.

pilotos que precisam de uma intuição a respeito da razão dos aviões voarem.

## A descrição popular da sustentação

Aos estudantes de Física e aerodinâmica é ensinado que o avião voa por causa do princípio de Bernoulli, que estabelece que se a velocidade do ar aumenta, sua pressão diminui (na verdade isto nem sempre é correto. O ar flui muito rapidamente ao lado do orifício da fuselagem onde fica o altímetro, mas mesmo assim este faz uma leitura correta da altitude da aeronave). O argumento é que a asa se sustenta porque o ar sobre ela flui mais rapidamente, criando uma região de baixa pressão. Esta explicação satisfaz os curiosos e poucos questionam as conclusões. Alguns podem ficar imaginando o que faria o ar andar mais rapidamente por cima da asa, e é justamente aí que a explicação popular desmorona.

Para poder explicar o porquê do ar fluir com maior velocidade por cima da asa, muitos recorrem a um argumento geométrico segundo o qual a distância que o ar tem que vencer está diretamente relacionada com a sua velocidade. A afirmação costumeira é que quando o ar se separa no bordo de ataque, a parte que vai por cima da asa tem que chegar ao bordo de fuga no mesmo tempo que a parte do ar que foi por baixo. Isto é o chamado princípio dos tempos de trânsito iguais.

A pergunta que fica é se os números que são obtidos com a descrição realmente fazem sentido. Tomemos um exemplo de um Cessna 172, que é um avião muito popular de quatro lugares e asa superior. As asas precisam levantar uma carga máxima de vôo de 1.045 kg. O caminho percorrido pelo ar que passa por cima da asa é aproximadamente 1,5% maior que o do caminho de baixo. Usando a descrição popular, a asa criaria apenas algo no entorno de 2% da sustentação exigida a uma velocidade de 104 km/h, um “vôo lento” para este tipo de avião. Na verdade, os cálculos mostram que seria necessária uma velocidade de no mínimo 640 km/h para se conseguir sustentação sufi-

ciente. Pode-se inverter a questão e perguntar qual deveria ser a diferença mínima de caminhos para que se conseguisse a sustentação necessária em vôo lento? A resposta é 50%, o que daria uma espessura de asa quase tão grande quanto o comprimento de sua corda.

Mas quem disse que o ar que vai por cima tem que chegar ao bordo de fuga ao mesmo tempo em que o ar que vai por baixo? A Fig. 1 mostra o fluxo de ar no entorno de uma asa em uma simulação de túnel de vento. Neste tipo de simulação, fumaça é periodicamente introduzida no túnel. O que se pode ver é que o ar que passa por cima da asa chega ao bordo de fuga consideravelmente antes que o ar que vai por baixo. Isto quer dizer que o ar de cima tem uma aceleração muito maior do que aquela prevista pelo princípio dos tempos de trânsito iguais. Além disso, como uma análise mais detalhada nos mostra, o ar que passa pela parte de baixo da asa tem uma velocidade reduzida em relação àquela do ar que flui livremente (longe das asas). O princípio dos tempos de trânsito iguais funciona apenas para asas com sustentação zero.

Decorre também da explicação popular o fato de que vôos invertidos são impossíveis. Ela certamente não considera aviões de acrobacia, que têm asas simétricas (a parte superior e a parte inferior da asa tem o mesmo perfil) e muito menos como uma asa se ajusta às grandes variações de carga quando sai de um mergulho ou faz uma curva acentuada.

A pergunta então é: por qual motivo a explicação popular dominou por tanto tempo? Uma resposta é que o princípio de Bernoulli é de fácil entendimento. Não há nada errado com o princípio ou com a afirmação de que o ar flui mais rapidamente pela parte superior da asa. Porém, como a discussão acima sugere, não se pode compreender inteiramente a susten-

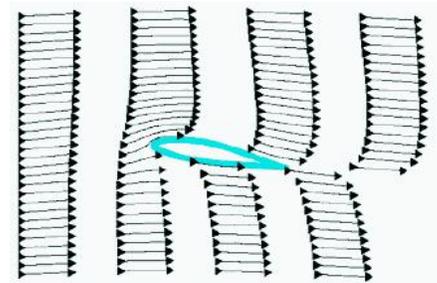


Figura 1. Simulação do fluxo de ar por uma asa em um túnel de vento com fumaça.

tação com esta explicação<sup>2</sup>. O problema é que falta um ponto crucial quando aplicamos o princípio de Bernoulli. Podemos calcular as pressões no lado de cima e de baixo da asa se soubermos a velocidade do ar nestas regiões, mas como medir a velocidade? Como veremos em breve, o ar é acelerado sobre a asa porque a pressão é menor, e não o contrário.

Um outro problema fundamental da descrição popular é que ela ignora o trabalho realizado. Sustentação requer potência (trabalho por unidade de tempo). Como veremos, a potência é uma das chaves para se compreender muitos dos interessantes fenômenos associados à sustentação.

## As leis de Newton e a sustentação

Então, como é que uma asa gera sustentação? Para entender isto a primeira e terceira leis de Newton (sobre a segunda falaremos mais tarde)

devem ser lembradas. A primeira lei de Newton afirma que um corpo em repouso permanece em repouso, ou um corpo em movimento continuará em movimento retilíneo uniforme a menos que uma força externa atue sobre ele. Ou seja, se vemos o escoamen-

**O argumento de que a asa se sustenta porque o ar sobre ela flui mais rapidamente, criando uma região de baixa pressão, satisfaz os curiosos pouco atentos. Mas se tentarmos imaginar o que faria o ar andar mais rapidamente por cima da asa, bem, não encontraremos uma boa explicação...**

to se curvar ou se o ar, a princípio parado, for repentinamente acelerado, significa que há uma força atuando sobre ele. A terceira lei de Newton afirma que para cada ação há uma reação igual em magnitude, mas no sentido



Figura 2. Representação muito comum do fluxo de ar por uma asa. A asa não tem qualquer sustentação.

contrário. Por exemplo, um objeto sobre uma mesa exerce uma força sobre ela, e a mesa exerce uma força contrária que o mantém no lugar. A fim de criar sustentação, a asa precisa fazer algo com o ar. Aquilo que a asa faz com o ar é a ação, enquanto a sustentação representa a reação.

Comparemos duas figuras para ver as linhas de corrente de ar pela asa. Na Fig. 2 o ar vem direto em direção à asa, a contorna e sai direto pela parte de trás da mesma. Todos já vimos figuras semelhantes a esta. Porém o ar atrás que sai da asa está exatamente igual a quando ele estava na frente da asa. Não há uma ação resultante sobre o ar e, portanto não pode haver sustentação!

A Fig. 3 mostra as linhas de corrente como elas realmente deveriam ser desenhadas. O ar passa pela asa e é encurvado para baixo. A primeira lei de Newton diz que deve haver uma força sobre o ar para encurvá-lo (a ação). A terceira lei de Newton diz que deve haver uma força igual, mas em sentido contrário (para cima) sobre a asa (reação). Para poder criar uma sustentação, a asa precisa desviar uma grande quantidade de ar para baixo.

A sustentação de uma asa é igual à variação do momento do ar que ela está desviando para baixo. O momento é o produto da massa pela velocidade ( $m\mathbf{v}$ ). A forma mais comum de expressar a segunda lei de Newton é  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ , ou seja, força é igual à massa vezes aceleração. Nesta formulação a lei nos diz qual a força necessária para acelerar um objeto com uma certa



Figura 3. Fluxo de ar verdadeiro pela asa, mostrando o upwash e o downwash.

massa. Uma outra maneira de expressar a lei de Newton é dizendo: a sustentação de uma asa é proporcional à quantidade de ar sendo desviado para baixo multiplicado pela velocidade vertical da mesma<sup>3</sup>. Simples assim. Para conseguir um empuxo maior, a asa ou tem que deslocar mais ar para baixo (massa) ou aumentar a velocidade vertical. A componente vertical da velocidade do ar atrás da asa é a componente vertical do *downwash*. A Fig. 4 mostra como o piloto vê o *downwash* (ou como o vemos em um túnel de vento). A figura mostra também como uma pessoa no chão vê o *downwash* à medida que a asa passa por ela. Para o piloto, o ar sai pelo bordo de fuga da asa com um ângulo aproximadamente igual ao ângulo de ataque e com uma velocidade aproximadamente igual à velocidade da aeronave. Para um observador no solo, se ela ou ele pudessem ver o ar, o veriam saindo do bordo de fuga quase que na vertical com uma velocidade relativamente baixa. Quanto

**A sustentação de uma asa é igual à variação do momento do ar que ela está desviando para baixo. De outra maneira, podemos dizer que ela é proporcional à quantidade de ar sendo desviado para baixo multiplicado pela velocidade vertical da mesma**

maior o ângulo de ataque da asa maior a velocidade vertical do ar. Do mesmo modo, para um ângulo de ataque fixo, quando maior a velocidade da aeronave maior a velocidade vertical do ar. Tanto o aumento do ângulo de ataque quanto o aumento da velocidade do avião fazem aumentar o comprimento da componente vertical para baixo da velocidade. É esta velocidade vertical que dá à asa sua sustentação.

Como já dito, um observador em terra veria o ar atrás da asa saindo quase que diretamente para baixo. Isto pode ser visto quando se observa

a estreita coluna de ar atrás de uma hélice, um ventilador caseiro ou sob os rotores de um helicóptero. Todos são exemplos de asas giratórias. Se o ar saísse das pás com certo ângulo, ele produziria mais um cone de vento do que uma coluna estreita. A asa desenvolve a sustentação transferindo momento para o ar. Para um vôo nivelado em linha reta, este momento eventualmente acaba atingindo o chão. Se um avião pudesse voar sobre uma balança gigante, a balança conseguiria pesá-lo.

Façamos agora um cálculo simples para ver quanto de ar uma asa pode separar. Tomemos por exemplo o Cessna 172 com uma massa de aproximadamente 1.045 kg. Com uma velocidade de cruzeiro de 220 km/h e supondo um ângulo de

ataque efetivo de 5°, obtemos uma velocidade vertical do ar de aproximadamente 18 km/h à direita da asa. Se supusermos que a velocidade vertical média do ar desviado é metade deste valor, podemos calcular da segunda lei

de Newton que a quantidade de ar desviado é da ordem de 5 ton/s. Assim, um Cessna 172 em velocidade de cruzeiro está desviando aproximadamente uma quantidade de massa de ar 5 vezes maior que a sua própria massa a fim de produzir uma sustentação. Imagine quanto de ar é desviado por um Boeing 777 de 250 toneladas durante a decolagem.

Desviar tanto ar assim para baixo é um forte argumento contra a idéia de que a sustentação é apenas um efeito da superfície da asa (quer dizer, apenas uma pequena quantidade de ar no entorno da asa contribui para a

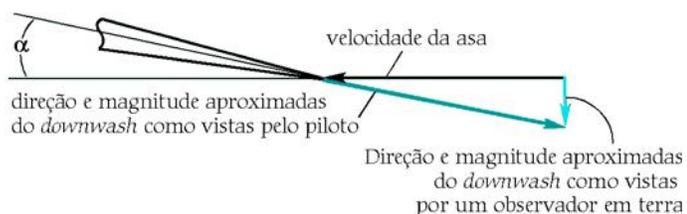


Figura 4. Como o downwash é visto pelo piloto e por um observador em terra.

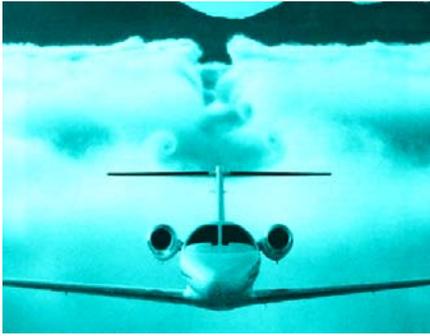


Figura 5. *Downwash* e vórtices de asas na neblina. (Paul Bowen, cortesia da Cessna Aircraft Co.).

sustentação), como se deduz da explicação popular. Pois, para poder desviar 5 ton/s, a asa do Cessna 172 teria que acelerar todo o ar dentro de uma distância de 7,3 m acima da asa. Não nos esqueçamos de que a densidade do ar no nível do mar é de aproximadamente 1 kg/m<sup>3</sup>. A Fig. 5 mostra o efeito do ar sendo jogado para baixo pela asa. Surge um enorme buraco na neblina causado pelo *downwash* de um avião que acabou de sobrevoá-la.

Como, então, a asa desvia tanto ar? Quando o ar se curva ao redor do topo da asa, ele puxa o ar acima dele acelerando-o para baixo. Caso contrário haveria lacunas no ar acima da

asa. O ar é puxado de cima. Isto faz com que a pressão do ar acima da asa se torne menor. A aceleração do ar acima da asa para baixo é que cria a sustentação (na próxima seção discutiremos a razão pela qual a asa puxa o ar com força suficiente para gerar sustentação).

Como podemos ver na Fig. 3, algo que complica esta imagem é o efeito do *upwash* no bordo de ataque da asa. À medida que ela se desloca, o ar não apenas é empurrado para baixo na parte de trás da asa como é também empurrado para cima no bordo de ataque. Este *upwash*, na verdade, provoca uma sustentação negativa e mais ar precisa ser jogado para baixo para compensar este efeito. Discutiremos isso mais para frente quando falarmos do efeito solo.

Como podemos ver na Fig. 3, algo que complica esta imagem é o efeito do *upwash* no bordo de ataque da asa. À medida que ela se desloca, o ar não apenas é empurrado para baixo na parte de trás da asa como é também empurrado para cima no bordo de ataque. Este *upwash*, na verdade, provoca uma sustentação negativa e mais ar precisa ser jogado para baixo para compensar este efeito. Discutiremos isso mais para frente quando falarmos do efeito solo.

**A parte superior da asa faz muito mais para mover o ar do que a parte de baixo. Por este motivo, aviões podem carregar compartimentos sob as asas, mas não em seu topo, onde elas interfeririam na sustentação**

Costuma-se olhar para o fluxo de ar do ponto de vista do referencial da asa. Em outras palavras, para um piloto, é o ar que se move e a asa que está parada. Já afirmamos que uma pessoa em terra veria o ar saindo do bordo de fuga da asa quase na vertical. Mas o que faz o ar embaixo da asa? Na Fig. 6 mostramos uma foto instantânea de como as moléculas do ar se deslocam à medida que a asa passa pelo observador. Lembre-se que nesta figura o ar está inicialmente em repouso e a asa é que se move. A seta 1 vira a seta 2 e assim por diante. À frente do bordo de ataque o ar se move para cima (*upwash*). No bordo de fuga, o ar desloca-se para baixo (*downwash*). Sobre a asa o ar é acelerado em direção ao bordo de fuga. Embaixo, o ar é levemente acelerado para frente.

Porque o ar acompanha este padrão? Primeiro nos lembremos que o ar é considerado um fluido incompressível para vôos de baixa velocidade. Isto significa que ele não pode mudar seu volume e há uma resistência ao surgimento de espaços vazios. Bem, mas o ar foi acelerado no topo da asa pela redução da pressão. Isto faz com que o ar seja sugado da parte da frente

da asa e seja expelido para trás e para baixo da asa. É preciso compensar este deslocamento de ar e, portanto, o ar se move no entorno da asa para suprir esta falta. Isto é análogo ao escoamento de

água em torno do remo de uma canoa. Esta circulação do ar em torno da asa não é a força motriz que produz sustentação tanto quanto a circulação da água em torno do remo não é responsável pelo movimento deste, embora seja verdade que se for possível calcular a circulação do ar ao redor da asa, então a sustentação pode ser calculada. A sustentação é proporcional à circulação.

Uma observação que podemos fazer, a partir da Fig. 6, é que a parte superior da asa faz muito mais para mover o ar do que a parte de baixo. A superfície superior é, deste modo,

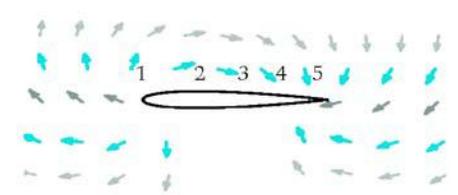


Figura 6. Direção do movimento do ar em torno de uma asa como vista por um observador em terra.

mais importante. Por este motivo, aviões podem carregar coisas sob as asas, como tanques descartáveis ou compartimentos de armazenamento, mas não em seu topo, onde elas interfeririam na sustentação. É por isso que *struts*<sup>4</sup> sob as asas são comuns, mas as mesmas sobre as asas são historicamente raras. Um *strut* ou qualquer obstrução sobre o topo da asa interferiria na sustentação da mesma.

## Efeito Coanda

Uma questão que surge naturalmente é como a asa desvia o ar para baixo. Quando um fluido que escoar encontra uma superfície curva pela frente, ele tentará acompanhar o perfil daquela superfície. Para ver este efeito, segure um copo debaixo de um filete de água de uma torneira de modo a fazer com que a água toque levemente o lado do copo. Ao invés de continuar fluindo na vertical, a presença do copo faz a água grudar-se nele e escorrer pela sua superfície, como mostra a Fig. 7. Esta tendência dos fluidos de acompanharem uma superfície curva é conhecida como efeito Coanda. Sabemos, porém, da primeira lei de Newton, que se o líquido se encurva é porque deve haver uma força atuando sobre ele, e a terceira lei de Newton nos diz que o fluido exerce uma

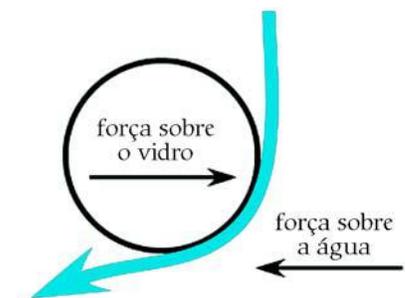


Figura 7. O efeito Coanda.

força de reação igual, mas em sentido oposto sobre o copo.

Então por que o fluido acompanha o perfil da superfície? A resposta é a viscosidade, a resistência ao escoamento que também faz com que o ar tenha certa “aderência”. A viscosidade do ar é pequena, mas o suficiente para fazê-lo querer se grudar na superfície. Imediatamente sobre a superfície, a velocidade relativa entre esta e as moléculas do ar é zero (razão pela qual não se consegue tirar a poeira de um carro jogando água sobre ele). Um pouco acima da superfície o fluido tem uma pequena velocidade e quanto mais longe nos afastamos da superfície, mais aumenta a velocidade do fluido

**Há vários tipos de asa: convencionais, simétricas, convencionais em vôo invertido, etc. O que todas elas têm em comum é um ângulo de ataque em relação ao ar que contra elas sopra...**

até que ela atinja o valor do fluxo livre. Uma vez que o fluido na superfície muda de velocidade, seu fluxo é encurvado em direção à superfície por forças de cisalhamento. A menos que a curvatura da superfície seja muito abrupta, o fluido seguirá o perfil da mesma. O volume de ar ao redor da asa que parece estar parcialmente grudado a ela é chamado de “camada limite” e tem menos de 2,5 cm de espessura mesmo em asas grandes.

Olhe novamente para a Fig. 3. As magnitudes das forças sobre o ar (e sobre a asa) dependem de quão “fechadas” são as curvas que o ar faz. Quanto mais a curva for fechada, maiores as forças atuantes. Note que a maior parte da sustentação ocorre na parte dianteira da asa. Na verdade, metade da sustentação total de uma asa surge na região dianteira que corresponde a 1/4 do comprimento da corda.

### Sustentação como função do ângulo de ataque

Há vários tipos de asa: convencionais, simétricas, convencionais em vôo invertido, as asas dos biplanos antigos que pareciam pranchas curvas e a famosa “porta de celeiro” (*barn door*). Em todos estes casos a asa está jogando ar para baixo, ou mais precisamente, puxando o ar sobre ela para baixo (embora as primeiras asas usassem

uma contribuição significativa da parte de baixo). O que todas estas asas têm em comum é um ângulo de ataque em relação ao ar que contra elas sopra. O ângulo de ataque é o parâmetro mais importante que determina a sustentação da asa.

Para melhor entender o papel do ângulo de ataque, é útil introduzirmos o conceito de ângulo de ataque “efetivo”, cujo valor zero é definido como o ângulo entre a asa e o ar para o qual a sustentação é nula. Ao se mudar o ângulo de ataque para

cima ou para baixo, descobre-se que a sustentação é proporcional ao ângulo. A Fig. 8 ilustra como a sustentação de uma asa típica varia com o ângulo de ataque. Uma

relação semelhante a esta existe para todo tipo de asa, independentemente de sua forma - isto vale para a asa de um 747, para uma asa invertida ou para a sua mão do lado de fora da janela do carro. A asa invertida pode ser explicada em termos de seu ângulo de ataque, não obstante sua aparente contradição com a explicação popular da sustentação. Um piloto ajusta o ângulo de ataque para assim conseguir ajustar a sustentação à velocidade e à carga da aeronave. Para se entender a sustentação, o ângulo de ataque desempenha papel mais importante do que detalhes da

**...e o ângulo de ataque é o parâmetro mais importante que determina a sustentação da asa**

forma das asas. O formato da asa aparece quando queremos entender as características do estol ou do arrasto a grandes velocidades.

A sustentação diminui tipicamente a partir de um “ângulo crítico” de 15°. As forças necessárias para encurvar o fluxo de ar em ângulos tão íngremes são maiores que a viscosidade do ar pode suportar, e o ar começa a se desprender da asa. Esta separação entre o fluxo de ar e a parte superior da asa é o chamado estol.

### A asa enquanto “concha” de ar

Gostaríamos agora de introduzir uma nova imagem mental da asa.

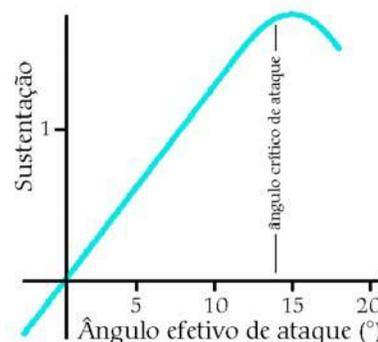


Figura 8. Sustentação vs. ângulo de ataque.

Costumamos imaginar a asa como sendo uma lâmina delgada que vai cortando o ar e de alguma maneira mágica gera uma sustentação. A nova idéia que gostaríamos de adotar aqui é aquela da asa como uma concha que desvia certa quantidade de ar da direção horizontal para uma direção aproximadamente igual ao ângulo de ataque, como mostra a Fig. 9. Para asas de aviões típicos, podemos falar com uma boa medida de aproximação que a área da concha é proporcional à área da asa. O formato da concha é aproximadamente elíptico para todas as asas, como ilustrado na figura. Uma vez que a sustentação é proporcional ao volume de ar desviado, ela é, portanto, também proporcional à área da asa.

Como dito anteriormente, a sustentação gerada por uma asa é proporcional à quantidade de ar deslocado para baixo multiplicado pela sua compo-

nente vertical de velocidade. À medida que um avião aumenta sua velocidade, a concha desvia maior quantidade de ar. Como a carga sobre as asas não aumenta, a velocidade vertical do ar deve diminuir na mesma proporção. Assim o ângulo de ataque precisa diminuir para manter constante a sustentação. Quanto mais alto sobe o avião, menos

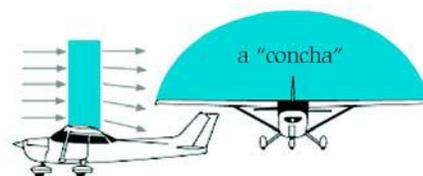


Figura 9. A asa enquanto “concha”.

denso se torna o ar e a concha desvia uma quantidade menor de ar para uma mesma velocidade. Assim, para compensar, é preciso aumentar o ângulo de ataque. Os conceitos desta seção serão utilizados para explicarmos a sustentação de uma maneira que seria impossível com a explicação popular.

### Sustentação requer potência

Quando um avião passa por sobre algum lugar, o ar que estava parado anteriormente adquire uma velocidade para baixo, ou seja, o ar passa a se movimentar após a passagem do avião. Ao ar foi dada energia. Potência é energia, ou trabalho por unidade de tempo e, portanto, sustentação requer potência. Esta vem dos motores do avião (ou da gravidade e das correntes térmicas no caso de planadores).

Quanta potência é necessária para voar? Se dermos um tiro com uma bala de massa  $m$  e velocidade  $v$  a energia dela será  $1/2mv^2$ . Do mesmo modo, a energia do ar que foi movido para baixo é proporcional à quantidade do mesmo e ao quadrado da velocidade por ele adquirida. Mas já mencionamos o fato de que a sustentação de uma asa também é proporcional à quantidade de ar desviado multiplicado pela componente vertical da velocidade adquirida. Assim, a potência necessária para levantar um avião é proporcional à carga (ou peso) multiplicado pela velocidade vertical do ar. Se a velocidade do avião dobra, dobra a quantidade de ar desviado para baixo. Assim, para manter uma sustentação constante, o ângulo de ataque tem que diminuir para que assim a velocidade vertical caia pela metade de seu valor inicial. A potência necessária para a sustentação se reduz à metade. Isto mostra que a potência necessária para manter um avião no ar se torna menor com o aumento da velocidade do avião. Na verdade, mostramos que a potência necessária para gerar sustentação é inversamente proporcional à velocidade do avião.

Porém, todos nós sabemos que para nos deslocarmos mais rápido (em velocidade de cruzeiro) precisamos aplicar mais potência. Disto concluímos que há algo mais por trás da

potência do que simplesmente a potência necessária para manter a sustentação. A potência associada à sustentação é chamada de potência "induzida". Potência também se faz necessária para vencer o que chamamos de arrasto "parasitário", que é o arrasto associado com o movimento das rodas, das antenas e dos *struts* sustentadores de asas através do ar. A energia que um avião fornece às moléculas de ar em função do impacto é proporcional ao quadrado da velocidade ( $1/2mv^2$ ). O número de moléculas com as quais o avião se choca por unidade de tempo é proporcional à velocidade. Quanto mais rápido se voa, maior a taxa de impacto. Assim a potência parasitária necessária para se superar o arrasto parasitário aumenta proporcionalmente à velocidade.

A Fig. 10 mostra as "curvas de potência" para a potência induzida, parasitária e total (a soma das duas primeiras). De novo, a induzida varia com  $1/v$  e a segunda com  $v$ . Para velocidades baixas, a potência necessária é dominada pela potência induzida. Quanto mais devagar se voa, menor o ar deslocado e, portanto, o ângulo de ataque deve aumentar para aumentar a velocidade vertical do ar. Pilotos aprendem a voar no "lado de trás" da curva de potência para assim aprender a reconhecer que o ângulo de ataque e a potência necessária para permanecer em vôo são consideráveis.

Em vôo de cruzeiro, a necessidade de potência é dominada pela potência parasitária. Uma vez que ela aumenta com o cubo da velocidade ( $v^3$ ), um aumento no tamanho do motor do aeroplano contribui apenas para que ele ascenda mais rapidamente (maior taxa de ascensão), mas pouco faz

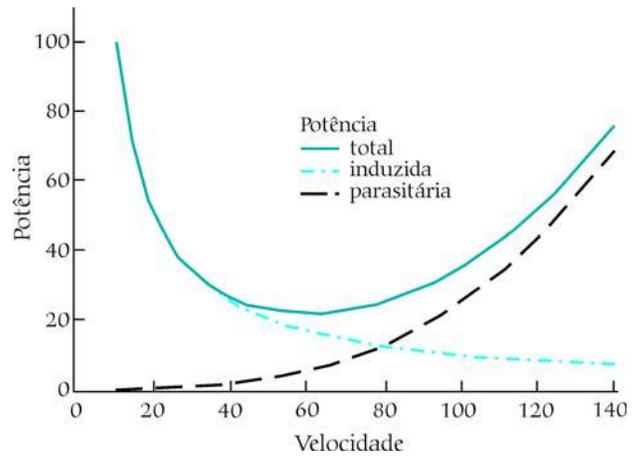


Figura 10. Necessidade de potência vs. velocidade.

para aumentar a velocidade de cruzeiro. Caso o tamanho do motor seja duplicado, obtém-se apenas um aumento de aproximadamente 25% na velocidade de cruzeiro.

Uma vez que agora sabemos como a potência necessária varia com a velocidade, podemos entender o arrasto, que é também uma força. Arrasto é simplesmente potência dividida pela velocidade. A Fig. 11 ilustra o arrasto induzido, o arrasto parasitário e o arrasto total como função da velocidade. O induzido varia como  $1/v^2$  e o parasitário como  $v^2$ . Olhando para estas figuras, podemos tirar algumas conclusões sobre como aviões são projetados. Aviões mais lentos, como planadores, são projetados visando a diminuir a potência induzida que domina em velocidades baixas. Aviões a hélice mais velozes têm que se preocupar mais com a potência parasitária, e aviões a jato com o arrasto

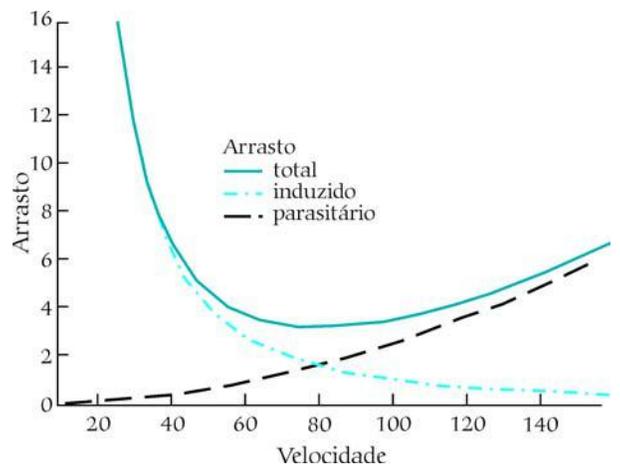


Figura 11. Arrasto vs. velocidade.

parasitário (a diferença entre estes está além da abrangência deste artigo).

## Eficiência da asa

Em vôo de cruzeiro, uma quantidade não desprezível do arrasto de uma asa moderna é o arrasto induzido. O arrasto parasitário de uma asa de um Boeing 747 é equivalente àquela de um cabo de 1/2 polegada de espessura do mesmo comprimento. A pergunta então é o que afeta a eficiência de uma asa. Vimos que a potência induzida de uma asa é proporcional à velocidade vertical do ar. Se aumentássemos a área da asa, o tamanho de nossa concha também aumentaria, desviando mais ar. Deste modo, para uma mesma sustentação, a velocidade vertical (e, portanto o ângulo de ataque) teria que ser reduzida. Uma vez que a potência induzida é proporcional à velocidade vertical do ar, ela também é reduzida. Assim, a eficiência da sustentação de uma asa aumenta com a área da mesma. Quanto maior a asa, menor a potência induzida necessária para produzir uma mesma quantidade de sustentação, embora isto seja obtido com um aumento do arrasto parasitário.

Como discutiremos brevemente na seção sobre o efeito solo, a carga adicional sobre a asa em vôo reto e nivelado devido ao *upwash* é igual ao peso do avião vezes  $2/AR$ , onde  $AR$  (iniciais de *aspect ratio*) é a razão de aspecto definida como a razão entre a envergadura da asa e a corda média. Assim, quando temos que decidir entre duas asas de mesma área mas  $AR$  diferentes, a asa com maior  $AR$  é mais eficiente.

Algumas pessoas cometem a falácia de achar que sustentação não requer potência. Este erro vem do estudo de casos ideais da teoria de seções de asas (aerofólios) em aeronáutica. Quando nestes textos se lida com aerofólios, na verdade estão tratando do caso de um com envergadura infinita. Como vimos que a potência necessária para sustentação cai com

o aumento da área, um aerofólio de tamanho infinito não requer potência alguma para se sustentar no ar. Se para a sustentação não fosse necessária qualquer potência, aviões carregados teriam o mesmo alcance que quando vazios, e helicópteros poderiam voar em qualquer altitude e com qualquer carga. Melhor ainda, hélices (que são asas em rotação) não necessitariam de potência alguma para produzir tração. Infelizmente vivemos no mundo real, onde tanto sustentação quanto propulsão requerem potência.

## Potência e carga sobre a asa

Vejam agora a relação entre potência e carga sobre a asa. Se a carga sobre uma asa é aumentada à velocidade constante da aeronave, a velocidade vertical do ar deslocado deve ser aumentada para compensar o aumento da carga. Isto se obtém aumentando o ângulo de ataque. Se o peso total de um avião do-

brar (como por exemplo em uma curva com  $2g$ )<sup>5</sup>, e a velocidade não variar, a velocidade do ar tem que dobrar para compensar o aumento da carga sobre as asas. A potência induzida, sendo proporcional ao produto da carga pela velocidade do ar desviado, deve ser quadruplicada, uma vez que ambos os fatores dobraram de valor. Ou seja, a potência induzida é proporcional ao quadrado da carga.

Uma maneira de medir a potência total é olhar para a taxa de consumo de combustível. A Fig. 12 mostra esta taxa em função do peso bruto de um avião de carga de grandes proporções viajando a uma velocidade constante (este gráfico foi

obtido de dados reais). Uma vez que a velocidade é constante, a mudança na taxa de consumo de combustível é devida à mudança da potência induzida. Os dados são ajustados por uma constante (potência parasitária) e um termo proporcional ao quadrado da carga. Este segundo termo é exatamente aquele que havíamos previsto na nossa discussão baseada nas leis de Newton sobre o efeito da carga sobre a potência induzida.

O aumento do ângulo de ataque com aumento de carga tem um lado negativo além daquele do aumento da potência necessária. Como mostrado na Fig. 8, uma asa eventualmente entrará em estol sempre que o ar não mais puder acompanhar o formato da superfície superior da asa, ou seja, quando o ângulo crítico é atingido. A Fig. 13 mostra o ângulo de ataque como função da velocidade do ar para o caso de uma carga fixa e uma curva de  $2g$ . O ângulo de ataque crítico no qual o avião entra em estol é constante e não depende da carga sobre a asa. O ângulo de ataque aumenta com a carga e a velocidade de estol aumenta com a raiz quadrada da carga. Assim, se dobrarmos a carga em uma curva com  $2g$ , a velocidade no qual o avião entra em estol aumenta em 40%. Um

**Algumas pessoas cometem a falácia de achar que sustentação não requer potência. Este erro vem do estudo de casos ideais da teoria de seções de asas (aerofólios) em aeronáutica**

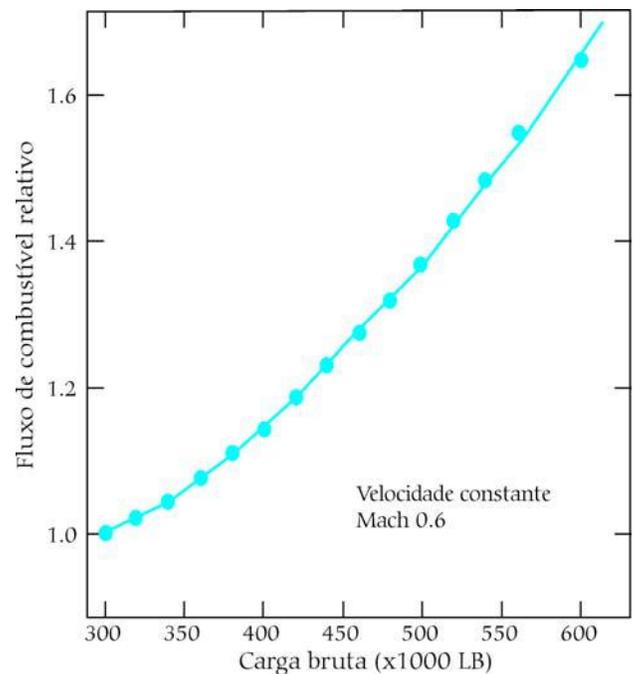


Figura 12. Consumo de combustível vs. carga bruta para um grande avião de transporte voando a uma velocidade constante.

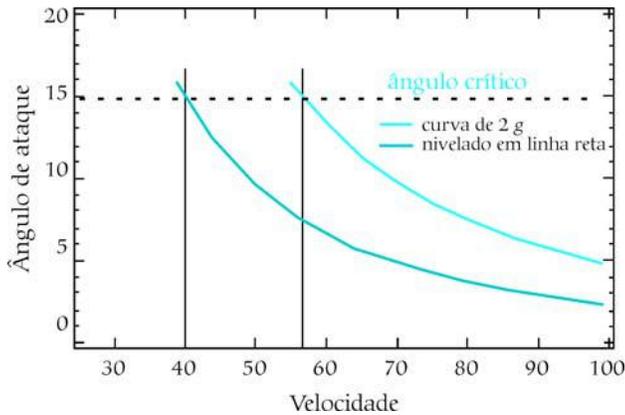


Figura 13. Ângulo de ataque vs. velocidade para um vôo plano e em linha reta e para uma curva de 2 g.

aumento na altitude aumentará ainda mais o ângulo de ataque em uma curva de 2 g. É por este motivo que pilotos treinam “estol acelerado”, que mostra que um avião pode entrar em estol em qualquer velocidade, uma vez que para cada velocidade sempre haverá uma carga que induzirá uma perda de sustentação.

### Vórtices de asa

Podemos nos perguntar qual a aparência do *downwash* de uma asa. O *downwash* sai da asa como uma lâmina de ar e depende dos detalhes da distribuição de carga sobre a mesma. A Fig. 14 ilustra, por meio da condensação, a distribuição de sustentação em um avião durante uma manobra com um alto g. A partir desta figura podemos ver como a distribuição de carga muda da parte da asa junto à fuselagem até a sua ponta, o que significa que a quantidade de *downwash* deve ser diferente em diferentes pontos da asa. A parte da asa junto à fuselagem está “puxando” muito mais ar do que a parte da ponta. Por estar desviando uma quanti-



Figura 14. Condensação mostrando a distribuição de sustentação ao longo da asa (extraído de *Patterns in the Sky*, J.F. Campbell e J.R. Chambers, NASA, SP-514).

dade tão maior de ar, o efeito resultante é que a lâmina do *downwash* começará a enrolar-se sobre si própria para longe da fuselagem, da mesma maneira que o ar se curva sobre a parte superior da asa devido à mudança de sua velocidade. Isto é o que se chama de vórtice de asa. O quão fechados estes vórtices são depende da taxa de mudança da sustentação

ao longo da asa, ou seja são diretamente proporcionais à taxa de mudança. Na ponta da asa a sustentação deve cair rapidamente para zero, razão pela qual aí os vórtices são mais fechados. Este vórtice, chamado de vórtice de ponta da asa, é apenas uma pequena fração do vórtice total da asa, embora geralmente seja o mais visível. Voltando à Fig. 5, podemos claramente ver o surgimento dos vórtices de asa bem como dos de ponta da asa.

*Winglets* (aquelas pequenas extensões verticais na ponta de algumas asas) são empregadas para melhorar a eficiência das asas aumentando-as em comprimento efetivo e, portanto, em área. A sustentação da asa vai a zero na ponta porque ali o ar do topo e da parte de baixo se encontram. As *winglets* impedem que isso ocorra, de modo que a sustentação se estende para mais longe na asa. Uma vez que a eficiência aumenta com a área da

asa, isto causa um aumento de eficiência. O problema é que o projeto de *winglets* não é simples e elas podem, na verdade, piorar o desempenho se não forem projetadas corretamente.

### O efeito solo

Um outro fenômeno comum e freqüentemente incompreendido é o efeito solo, que é o aumento de eficiência da asa quando um avião voa a uma altitude igual ao comprimento da asa. Um avião com asa inferior sente uma redução de 50% no arrasto pouco antes de pousar. Este fenômeno é usado por grandes aves, que às vezes podem ser observadas voando pouco acima da superfície da água. Pilotos que decolam de pistas de grama alta ou pistas de decolagem macias também utilizam o efeito solo. Muitos pilotos erroneamente acreditam que este efeito é devido ao ar ser comprimido entre a asa e o chão.

Para entender este efeito, temos que olhar novamente para o *upwash*. Note, na Fig. 15, que o ar se desvia de seu fluxo horizontal para formar o *upwash*. A primeira lei de Newton diz que deve haver uma força sobre ele para que isto ocorra, e esta deve estar dirigida para cima. A terceira lei de Newton diz que deve haver uma força igual e oposta em sentido sobre a asa, ou seja, para baixo. O resultado é que um *upwash* aumenta a carga sobre a asa. Para compensar este aumento, a asa precisa voar com um ângulo de ataque maior e, portanto, com uma maior potência induzida. À medida

**Winglets (aquelas pequenas extensões verticais na ponta de algumas asas) são empregadas para melhorar a eficiência das asas aumentando-as em comprimento efetivo e, portanto, em área**



Figura 15. Asa no efeito solo.

que a asa se aproxima do chão, a circulação sob ela fica impedida de ocorrer. Como consequência, como se vê na Fig. 16, há uma redução no *upwash* e na carga adicional sobre a asa a ele devida. Como compensação, o ângulo de ataque diminui e com ela a potência induzida. A asa se torna mais eficiente.

A carga adicional devida ao *upwash* é igual ao peso da aeronave multiplicada por  $2/AR$ . A maioria dos aviões pequenos que tem um  $AR$  igual a 8 pode sentir uma redução de até 25% na carga sobre a asa devido ao efeito solo. Uma vez que a potência induzida é proporcional ao quadrado da carga, isto representa uma redução de 50% na potência. Estimamos anteriormente que um Cessna 172 voando a 220 km/h precisa deslocar aproximadamente 5 ton/s de ar para gerar sustentação. Em nossos cálculos desprezamos a contribuição do *upwash*. A quantidade de ar desviada é provavelmente próxima de 6 ton/s.

## Conclusões

Façamos uma breve revisão do que aprendemos para que tenhamos uma idéia de como a descrição física nos permite melhor entender o voo. Primeiro aquilo que aprendemos:

- A quantidade de ar desviada pela asa é proporcional à velocidade da asa e à densidade do ar.
- A velocidade vertical do ar desviado é proporcional à velocidade da asa e ao ângulo de ataque.
- A sustentação é proporcional à quantidade de ar desviado multiplicado pela velocidade vertical do ar.
- A potência necessária à sustentação é proporcional à sustentação multiplicada pela velocidade vertical



Figura 16. Redução do *upwash* devido à proximidade do solo

do ar.

Vejam agora algumas situações do ponto de vista físico e do ponto de vista da explicação popular.

- A velocidade do avião diminui. Neste caso a abordagem física diz que a quantidade de ar desviada diminui e, portanto o ângulo de ataque tem que aumentar para compensar a diminuição. A potência necessária para sustentação também tem que aumentar. A abordagem popular não consegue explicar estes fatos.

- A carga aumenta. A abordagem física diz que a quantidade de ar desviada continua a mesma, mas o ângulo de ataque tem que aumentar para produzir sustentação adicional. A potência necessária para sustentação também aumenta. Aqui também a abordagem popular não consegue dar conta destes fatos.

- Um avião faz um voo invertido. Para a abordagem física não há qualquer contradição nisto. O avião simplesmente ajusta o ângulo de ataque da asa invertida para conseguir a sustentação necessária. Na abordagem popular, o voo invertido é impossível.

Como vemos, a explicação popular, que se atém ao formato da asa,

pode ser satisfatória para muitos, mas ela não nos fornece as ferramentas necessárias para realmente entendermos o voo. A abordagem física é fácil de entender e muito mais poderosa.

## Notas

<sup>1</sup>A velocidade de estol é aquela abaixo da qual o avião não é mais capaz de se manter no ar (N.T.).

<sup>2</sup>Ver o artigo de Eastlake neste número.

<sup>3</sup>  $F = m \left( \frac{\Delta v_d}{\Delta t} \right) + \left( \frac{\Delta m}{\Delta t} \right) v_i = \left( \frac{\Delta m}{\Delta t} \right) v_a$ , se a velocidade do ar é constante. Para a sustentação, somente a componente vertical da aceleração é relevante (N.T.).

<sup>4</sup>*Struts* vem do inglês *structures* e é utilizado em aviação para se referir a quaisquer estruturas sob as asas que servem para lhe dar estabilidade estrutural. São normalmente usadas entre as asas de biplanos (N.T.).

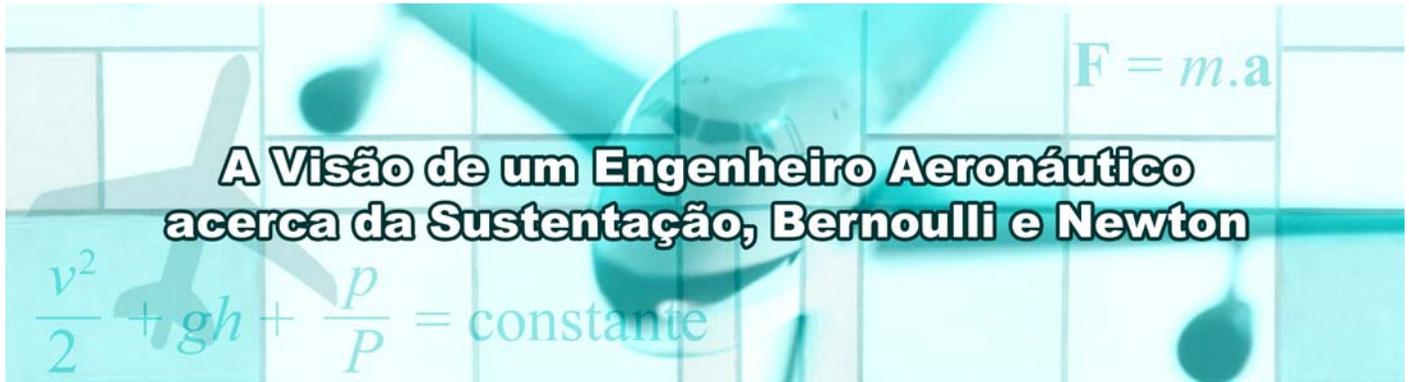
<sup>5</sup>As asas devem gerar alguma sustentação extra para puxar o avião durante a curva (força centrípeta). Esta sustentação extra é usualmente medida em unidades da aceleração da gravidade  $g$ , de modo que uma curva moderadamente íngreme de 2  $g$  equivale a duas vezes a força exercida pela gravidade (N.T.).

*As coisas são mais belas quando vistas de cima*

*As invenções são, sobretudo, resultado de um trabalho teimoso*

*O meu primeiro balão, o menor, o mais lindo, o único que teve um nome: Brasil*

Alberto Santos Dumont



## A Visão de um Engenheiro Aeronáutico acerca da Sustentação, Bernoulli e Newton

.....  
**Charles N. Eastlake**

Department of Aerospace Engineering,  
Embry-Riddle Aeronautical University,  
Daytona Beach  
e-mail: eastlacc@erau.edu.

.....  
Tradução e resumo: **S.R. Dahmen**  
.....

**P**egue um lápis, por favor. Aqui vai um teste curto de múltipla escolha. A geração de sustentação em um aerofólio é descrita correta e precisamente por:

- A. Lei de Bernoulli.
- B. Lei(s) de Newton.
- C. Este artigo.
- D. Todas as respostas acima.

Acredito que a resposta correta é D. A e B são certamente verdadeiras.

Quanto a C, cabe a você julgar.

Como engenheiro aeronáutico por profissão, fico feliz em ver máquinas voadoras discutidas em aulas de Física. Seu poder em cativar a imaginação e motivar estudantes é bastante significativo. Porém, enquanto leitor e contribuinte

ocasional da *The Physics Teacher* [1], sinto-me perplexo ao ler artigos que tratam dos detalhes de por que motivo a lei de Bernoulli não funciona para explicar como uma asa gera sustentação e a razão pela qual as leis de Newton devem ser usadas em seu lugar. A aerodinâmica como ensinada para engenheiros aeronáuticos não vê nisso qualquer controvérsia. Ambas as abordagens são corretas em todas as situações. Qual abordagem usar é apenas uma questão de conveniência em função do tipo de informação que se dispõe para a caracterização do particular padrão de fluxo do ar. A inabilidade deste ou daquele modelo em explicar a geração de sustentação

é na verdade um problema de uso de versões destas leis que são demasiadamente simplificadas. Em outras palavras, a mensagem que vale a pena enfatizar é que um número exagerado de hipóteses simplificadoras pode estragar a precisão de um modelo teórico que é, em seus fundamentos, uma escolha correta e deveria funcionar muito bem.

Antes de olharmos mais precisa-

mente como um aerofólio gera sustentação, temos que mergulhar em algumas definições de conceitos básicos e de terminologia. Por favor não se esqueçam que este é o ponto de vista de um engenheiro aerodinâmico. Outras áreas técnicas que se envolvem fortemente com o escoamento

**Sinto-me perplexo ao ler artigos que tratam dos detalhes de por que motivo a lei de Bernoulli não funciona para explicar como uma asa gera sustentação e a razão pela qual as leis de Newton devem ser usadas em seu lugar. A aerodinâmica como ensinada para engenheiros aeronáuticos não vê nisso qualquer controvérsia**

de fluidos geralmente têm certas tradições na terminologia que são um pouco diferentes, em particular naquelas relacionadas ao bombeamento de fluidos através de canos.

### Terminologia de aerofólios

Olhando para a Fig. 1 vamos começar pela terminologia de aerofólios. O ponto mais distante na frente do aerofólio é chamado de *bordo de ataque*, enquanto o ponto mais afastado na parte traseira é chamado de *bordo de fuga*. A reta que liga o bordo de ataque ao de fuga é chamada de *corda*<sup>1</sup>. A curva que define a metade superior do aerofólio chama-se *extradorso*, e a que define a parte de baixo,

.....  
Neste artigo C.N. Eastlake defende que tanto as Leis de Newton quando o Princípio de Bernoulli podem ser corretamente utilizados para explicar a sustentação gerada pelas asas de um avião. Ele chama a atenção para algumas idéias errôneas (como a igualdade dos tempos de trânsito) e o perigo que corremos ao fazermos um número excessivo de simplificações nos modelos teóricos. Com isto ele conclui que uma vez aplicados corretamente, a conveniência das duas abordagens depende apenas dos tipos de dados que se dispõe para fazer os cálculos.. Publicado originalmente em *The Physics Teacher* **40**, 166 (2002).

*intradorso*. A curva na metade entre o extradorso e o intradorso é chamada de *linha média* e se refere à média aritmética das coordenadas da posição vertical do extradorso e intradorso (medida perpendicularmente à corda). Alguns textos a chamam de *linha de curvatura média*, mas me parece que “linha média” é um termo mais preciso. A maior distância entre a corda e a linha média é chamada de *curvatura* (*camber*, em inglês) e normalmente representa alguns pontos percentuais do comprimento da corda. A posição do nariz para cima ou para baixo da asa é o chamado ângulo de ataque, que é o ângulo entre a corda e a direção do movimento do ar relativa ao aerofólio (vetor velocidade relativa).

A definição da força de sustentação e arrasto envolve um ponto sutil no que tange à direção da força, ponto este que pode passar despercebido em uma discussão, mas que se torna crucial na hora de resolver equações. Há uma só força resultante atuando em um aerofólio. Contudo, ela pode ser decomposta em componentes em qualquer sistema de coordenadas mais conveniente. Engenheiros aeronáuticos normalmente estão interessados naquilo que é conhecido como *eixos de vento*, que são eixos orientados com relação ao vetor velocidade relativa, também chamados de vento relativo. *Sustentação* é a componente da força perpendicular ao vento relativo, enquanto *arrasto* é a componente paralela a ele. Os vetores de sustentação e arrasto normalmente são desenhados como perpendicular e paralelo à corda do aerofólio, o que geralmente não é muito correto. E é mais comum

ainda desenharem estas duas forças como sendo perpendicular e paralela ao chão, o que é correto apenas se o avião estiver voando na direção paralela à superfície, mas não quando está subindo ou descendo.

### Escoamento de fluido

Com a terminologia fixada, movamo-nos agora para os princípios físicos básicos que governam o escoamento de um fluido. Geralmente o aluno de Engenharia é apresentado ao escoamento de fluidos com base em três princípios fundamentais: conservação da massa, conservação do momento e conservação da energia. O nome de Newton raramente aparece, e muitas vezes apenas para encorajar os estudantes a não se esquecerem dos mesmos, lembrando-os que certas partes deles, em particular a conservação do momento, são aquelas leis que eles provavelmente chamavam de leis de Newton nas aulas de Física.

As equações que representam estes princípios podem ser expressas de duas maneiras. Estudantes do Ensino Médio provavelmente não estão ainda preparados para entender este ponto, mas estudantes universitários talvez possam achá-lo interessante. As três leis podem ser escritas como um conjunto de equações diferenciais simultâneas ou equações integrais. A abordagem diferencial é mais útil quando queremos descrever o comportamento de um fluido em um local específico, ou em muitos locais durante o processo de mapeamento dos detalhes do campo de escoamento. É aí que a equação de Bernoulli é mais frequentemente usada. Esta também é a base sobre a qual a maioria dos programas de com-

putador, como o FoilSim, está fundamentada [2]. A abordagem integral, que às vezes pode ser reconhecida como as leis de Newton está focada nos fenômenos em grande escala acerca do que acontece com o momento e a energia na região do escoamento, ou quais forças têm que ser exercidas sobre o escoamento do fluido para que estas mudanças possam ocorrer. Este modelo é incrivelmente mais simples para certos tipos de problemas como o empuxo de turbinas a jato, uma vez que detalhes complexos, sobre como o escoamento se comporta dentro da turbina, não aparecem nas equações. Ambas as abordagens são igualmente válidas e corretas, e este ponto é fundamental para a conclusão deste artigo.

### Conservação da energia

Consideremos primeiro a conservação da energia, uma vez que é aí que a equação de Bernoulli aparece (talvez aqui esteja um ponto interessante para um estudo interdisciplinar/histórico. Peça a seus estudantes que procurem saber mais sobre Bernoulli, que na verdade não era uma mas três pessoas diferentes, uma verdadeira questão de família). Uma linha de corrente é o caminho que uma partícula segue quando se move por um campo de escoamento. Imagine uma foto de longa exposição dos faróis de um carro que se move à noite por uma estrada. Os traços de

luz da foto são as linhas de corrente. A energia total de uma partícula do fluido, ou de um pequeno volume do mesmo, é constante quando ela viaja ao longo de uma linha de corrente se nenhum trabalho externo for exercido sobre ela. Isto geralmente se aplica para fluxos externos como o do ar escoando em volta de um aerofólio. Por outro lado, para fluxos internos dentro de canos ou da turbina de um avião a jato, a energia pode não ser constante. Em qualquer um dos casos a energia pode ficar indo e voltando entre a energia cinética e a energia potencial, à medida que a partícula se move.

**Engenheiros aeronáuticos normalmente estão interessados naquilo que é conhecido como eixos de vento, que são eixos orientados com relação ao vetor velocidade relativa, também chamados de vento relativo...**

**... assim, sustentação é a componente da força perpendicular ao vento relativo, enquanto arrasto é a componente paralela a ele**

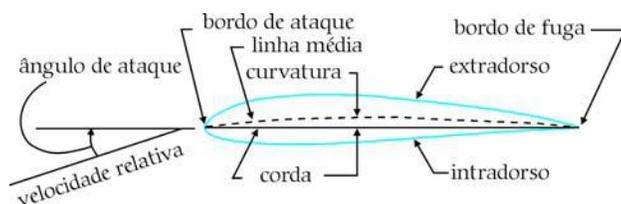


Figura 1. Terminologia do aerofólio.

A característica mensurável que quantifica a energia total é chamada de *pressão total*,  $P_T$ , que é medida com um tubo de Pitot, também conhecido pelo nome de tubo de pressão total. Este tipo de manômetro nada mais é que um tubo com a ponta aberta voltada diretamente para o fluxo de ar, de modo a “capturar” o ar em movimento (um outro ponto interessante para um estudo interdisciplinar/histórico: peça aos estudantes que procurem algo sobre Henri Pitot para ver o que ele estava fazendo quando inventou seu instrumento. Ele estava medindo o fluxo de água em torno dos pilares de pontes no rio Sena, em Paris, e provou que a teoria de escoamento de fluidos que era aceita na época tinha sérias falhas). Se você realizar trabalho externo no fluido, tipo colocá-lo em uma bomba, você aumenta sua pressão total. Se você permitir que o fluido exerça trabalho, como mover uma roda d’água em um moinho, a pressão total diminui.

A energia potencial é quantificada em termos da *pressão estática*,  $P_S$ . Esta é a componente da pressão que não é afetada pela direção do movimento. Algumas referências afirmam que se você disser simplesmente “pressão”, é a pressão estática que está implícita. Eu já pude perceber que usar essa abreviação causa confusão e por isso eu nunca a uso. Idealmente ela é medida fazendo-se um pequeno buraco de medida em uma superfície que é paralela ao vetor velocidade. Em um túnel de vento isto é trivial: é só fazer um buraco na parede do túnel. Para um avião em voo a coisa é cheia de armadilhas devido à

**Henri Pitot mediu o fluxo de água em torno dos pilares de pontes no rio Sena e provou que a teoria de escoamento de fluidos que era aceita na época tinha sérias falhas**

interferência do escoamento de ar ao redor de várias partes adjacentes do avião, mas ainda um furo do lado da fuselagem é a solução usual.

Uma questão de terminologia alternativa pode ocorrer também aqui. Como dito anteriormente, uma bomba aumenta a pressão total de um fluido. Em escoamentos por entre paredes, como em um cano, a adição de energia também aumenta a pressão

estática e esta é mais fácil de ser medida em um cano do que a pressão total. Por isso existe uma tradição que consiste em descrever o trabalho feito sobre o fluido como correspondendo a um aumento da pressão estática. Para escoamentos externos como o de ar sobre aerofólios, o processo de adição de energia é fundamentalmente diferente. O trabalho realizado sobre este fluido geralmente aparece na forma de um aumento de velocidade, como você percebe ao ficar parado na frente de um ventilador. Portanto a pressão estática não é representativa do trabalho externo realizado. De novo,

**Ao realizarmos trabalho externo em um fluido, colocando-o em uma bomba, aumentamos sua pressão total. Permitindo que o fluido exerça trabalho, como mover uma roda d’água, a pressão total diminui**

este artigo é escrito do ponto de vista de um engenheiro aeronáutico.

A energia cinética é quantificada pela pressão dinâmica, que é o produto da densidade do fluido pelo quadrado da velocidade,  $1/2 \rho v^2$ . Se compararmos com  $1/2 mv^2$ , vemos claramente que a pressão dinâmica é a definição familiar de energia cinética dividida pelo volume do fluido. Uma vez que ela aparece toda hora em discussões aerodinâmicas, costumava-se abreviá-la com a letra  $q$ .

Em escoamentos de baixa velocidade, entre 480 e 560 km/h, a equação que corresponde ao princípio da conservação de energia é conhecida como lei de Bernoulli. Talvez os leitores tenham visto esta equação escrita com um terceiro termo do lado direito da igualdade, ter-

mo este que contém a altura do fluido. Porém no escoamento de gases este termo é desprezível. Assim, chegamos à lei de Bernoulli para o escoamento de um gás incompressível e a baixa velocidade:

$$P_T = \text{constante} = P_S + (1/2)\rho v^2 = P_S + q.$$

À medida que um avião voa através da atmosfera, a pressão atmosférica representa a pressão estática, e a

pressão total é maior que a atmosférica por um fator igual à pressão dinâmica. Este aumento de pressão é o que a comunidade de corridas de carros/motos/barcos comumente chama de “pressão de compressão”. Quando um modelo está sendo testado em um túnel de vento, a situação é fundamentalmente diferente. A pressão atmosférica nos arredores do túnel é normalmente igual àquela dentro do mesmo e à medida que o ar sopra para dentro da seção de teste do túnel, a pressão estática diminui para um valor abaixo da pressão atmosférica, de tal modo que a diferença é igual à pressão dinâmica.

Em ambos os casos, à medida que as linhas de corrente se desviam para contornar um corpo com forma de asa, a pressão total é constante à medida que o fluido move-se ao longo de uma linha de corrente e sua pressão estática varia à medida que a velocidade local muda. Esta pressão estática local se torna a pressão superficial sobre o corpo, gerando forças sobre o mesmo. Note que a pressão estática local não é mais a mesma que a pressão estática do escoamento livre a uma pequena distância da superfície do corpo, onde o fluxo não foi desviado pela forma do corpo.

### Conservação do momento

Olhemos agora para a conservação de momento: a força exercida sobre o fluido corresponde à variação temporal (a derivada com relação ao tempo) de seu momento linear. Ao aplicar uma força sobre um objeto, mudamos seu momento. Não exercendo uma força sobre um objeto, seu momento não muda ou é conservado. Esta é a lei de Newton, caso queiramos chamá-la pelo nome. Quanto um aerofólio gera sustentação, esta força realmente muda a componente vertical do momento linear do fluxo de ar, enquanto a força de arrasto muda a componente horizontal do momento linear. Se o ar se move lentamente, mas o bastante para que sua densi-

dade não mude de maneira apreciável, a palavra-chave para isto é *escoamento incompressível*, em cujo caso as variações do momento são mensuráveis em termos de mudanças locais da velocidade de escoamento. Medir o arrasto pela perda de velocidade dentro da região de turbulência posterior a asa é algo simples, pois é feito em uma região relativamente pequena do campo de escoamento. Trata-se de uma medida padrão em túneis de vento que meus alunos realizam todo semestre. Medir a sustentação por meio de uma medida do aumento da velocidade vertical para baixo do fluido saindo do bordo de fuga do aerofólio é teoricamente possível. Esta velocidade dirigida para baixo existe realmente e é conhecida como *downwash*. Nunca ouvi dizer de alguém que a tenha medido com precisão suficiente para calcular a sustentação, e isso não porque seja algo fisicamente incorreto, apenas por ser algo pouco prático. Não é prático pelo fato de que o *downwash* está distribuído por todo o campo de escoamento dirigido para baixo que sai do bordo de fuga, e seria extremamente difícil medir um número de pontos suficientes para integrar a distribuição com precisão (uma foto fantástica deste fenômeno causado por um jato voando através de uma camada de nuvens pode ser obtida pela internet [3]). Contudo, o ângulo de deflexão do fluxo para baixo, chamado de ângulo de *downwash*,  $\epsilon$ , é um cálculo de rotina em textos sobre aerodinâmica porque tem

um efeito significativo sobre o fluxo na traseira do avião. O ângulo de *downwash* é facilmente estimado como sendo aproximadamente metade do ângulo de ataque. Ele foi desenhado

um pouco exagerado nas Figs. 2, 4 e 5 para tornar sua visualização mais fácil.

Por questões de generalização, é apropriado reconhecer que uma asa isoladamente não é a única componente da geometria do campo de escoamento. Quando há outras su-

perfícies nas imediações, tais como paredes para escoamentos em dutos ou o solo, estas superfícies podem e realmente alteram o momento do escoamento. Pense em casos semelhantes nos quais a baixa pressão pode fazer o teto de um carro conversível encurvar-se para cima ou a baixa pressão no telhado de uma casa durante um furacão pode arrancá-lo em um único pedaço. Certamente há sustentação sendo criada nestas situações, mas sem a presença de *downwash* resultante. Como isso pode ocorrer? Um em-

puxo vertical no teto provoca uma mudança de momento dirigida para baixo, mas ela é quase que imediatamente cancelada pela mudança de momento para cima associada a força exercida para baixo sobre o chão. Isto ocorre porque uma vez que o ar passou pelo obstáculo e as variações locais nos padrões de escoamento se estabilizam, o fluxo não pode parar exceto paralelo ao chão. Ou seja, o fluxo estabilizado não pode penetrar no chão, de modo que não pode restar qualquer componente de velocidade vertical ao chão.

### Conservação da massa

Por último, mas não menos importante: a conservação de massa. A quantidade de massa por segundo que flui entre linhas de corrente permanece constante. O efeito de espremer linhas de corrente juntas à medida que elas se desviam na frente do aerofólio é que a

velocidade tem que aumentar para manter o fluxo de massa constante, uma vez que a área entre as linhas de corrente diminuiu. Depois que o escoamento passou pela parte mais grossa do aerofólio e as linhas de corrente começam a se separar uma das outras à medida que elas se apro-

ximam do bordo de fuga, a velocidade diminui. Quando você aperta com o dedo o bico de uma mangueira para fazer a água esguichar mais rapidamente você não está fazendo nada mais do que exercitar o princípio da conservação de massa. Áreas menores implicam velocidades maiores. Isto

**tem que ser incluído** à lei de Bernoulli quando se quer explicar a sustentação de asas para que a coisa faça sentido.

Podemos agora finalmente expor em detalhes como a sustentação é gerada. Primeiro façamos uma pausa para

mostrar como um furo em uma explicação antiga que ainda é muitas vezes usada, o conceito de “tempos iguais de trânsito”. Neste conceito a relação entre a velocidade do ar e a pressão estática, expressa pela lei de Bernoulli, é normalmente colocada de maneira correta. Mas você se lembra de ter ouvido a respeito daquele negócio problemático acerca de partículas movendo-se sobre o extradorso terem que ser mais rápidas do que aquelas que se movem por baixo, porque elas teriam um caminho maior a percorrer e ainda assim teriam que chegar ao mesmo tempo do outro lado? Isto simplesmente não é verdade. Isto não acontece. O fato é que as partículas que vão pela parte de cima da asa o fazem mais rapidamente devido à compressão das linhas de corrente e chegam ao bordo de fuga antes das que tomaram o atalho embaixo. Já demonstrei inúmeras vezes em túneis de água onde usei bolhas de hidrogênio intermitentemente pulsadas de modo a fazer o escoamento visível. E o programa *FoilSim* pode ser facilmente programado para mostrar os resultados teóricos que comprovam a mesma coisa.

### Sustentação

A explicação apropriada de como uma sustentação é gerada é algo mais complexa, mas temos agora os fundamentos necessários para poder apreciá-la.

**A quantidade de massa por segundo que flui entre linhas de corrente permanece constante. O efeito de espremer linhas de corrente juntas à medida que elas se desviam na frente do aerofólio é que a velocidade tem que aumentar para manter o fluxo de massa constante**

**As partículas que vão pela parte de cima da asa o fazem mais rapidamente devido à compressão das linhas de corrente e chegam ao bordo de fuga antes das que tomaram o atalho embaixo**

Na Fig. 2 vemos o desenho de um aerofólio com um intradorso praticamente plano, o aerofólio NACA2412. A maioria dos monomotores Cessna tem usado este aerofólio desde os anos 40, o que o torna muito provavelmente o aerofólio mais usado no mundo. A representação de tempo-de-trânsitos-iguais do padrão de fluxo gerador de sustentação nos leva à conclusão aparentemente lógica, mas incorreta que com este aerofólio não se conseguiria um empuxo para cima quando em vôo invertido. Eu próprio tenho um aerofólio NACA4412 com uma superfície inferior plana muito parecida em meu avião de acrobacias e rotineiramente vôo de cabeça para baixo. Posso garantir aos leitores que sustentação de uma asa invertida funciona. A questão então é: qual o ponto-chave que foi deixado de lado na visão simplificada? O item que falta é o chamado *ponto de estagnação*, que é uma região pequena próxima ao bordo de ataque onde a velocidade local fica estagnada ou, em outras palavras, pára com relação à superfície do aerofólio. Literalmente é o ponto onde o campo de escoamento se separa. O escoamento acima do ponto de estagnação se dá ao longo do extradorso enquanto que o escoamento abaixo do ponto de estagnação segue ao longo do intradorso. Fundamental nesta visão é que o ponto de estagnação não se encontra exatamente no bordo de ataque para um aerofólio com curvatura, mas um pouco abaixo dele, deslocado uma pequena fração do comprimento da corda à ré do bordo de ataque sobre o intradorso. Como resultado, o campo de escoamento dividido interage com uma forma de superfície efetiva que não é nem um pouco simples como a forma do aerofólio representada com ângulo de ataque nulo.

A posição precisa do ponto de estag-

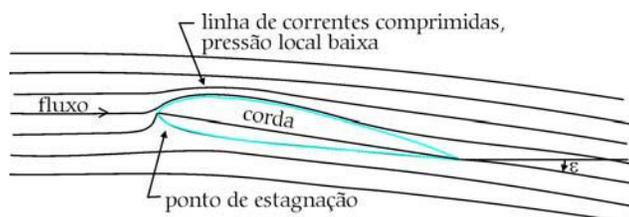


Figura 2. Linhas de corrente em torno do aerofólio NACA 2412.

nação é determinada pela magnitude da circulação. O conceito de circulação, que aparece como uma terceira maneira de se calcular a sustentação é o seguinte: ele é um padrão de escoamento aproximadamente elíptico que circula o aerofólio no sentido horário (para os fluxos com as direções desenhadas neste artigo) e que se obtém subtraindo a velocidade do fluxo livre uniformemente distribuído daquele fluxo ao redor de um aerofólio. Este escoamento rotatório é chamado de circulação. Sua existência é intuitivamente difícil de aceitar, mas eu já pude vê-lo em uma bela fotografia feita com uma câmera que se movia com o fluxo livre. A intensidade da circulação é diretamente proporcional à magnitude da força de sustentação, em um resultado conhecido como lei de Kutta-Joukowski. Este fato é a base da teoria de sustentação de Prandtl, a outra maneira de se calcular a sustentação há pouco mencionada. Há também uma condição de contorno chamada de condição de Kutta, que diz que deve existir um ponto de estagnação exatamente no bordo de fuga do aerofólio. Estes dois fatos juntos representam a condição física que faz com que o ponto frontal de estagnação se mova cada vez mais em direção ao bordo de fuga a medida que o ângulo de ataque aumenta.

As linhas de corrente são espremidas umas contra as outras à medida que o fluxo se divide no bordo de ataque, causando um aumento da velocidade local de acordo com o princípio de conservação de massa. O aumento de velocidade diminui a pressão estática local, que é também a pressão sobre a superfície do aerofólio, de acordo com a lei de Bernoulli que, se você se recor-

dar, é a lei de conservação de energia. Então na parte posterior da região mais grossa da asa as linhas de corrente se espalham novamente. O fluxo é reduzido, e a pressão estática local aumenta. Isto acontece em boa medida no extradorso e intradorso da asa, mas é muito mais pronunciado na parte anterior do extradorso, de modo que o extradorso acaba levando os créditos como sendo o principal gerador de sustentação.

Uma vez que este conceito fica claro, se torna claro também

**Ponto de estagnação, que é uma região pequena próxima ao bordo de ataque onde a velocidade local fica estagnada ou, em outras palavras, pára com relação à superfície do aerofólio**

que a distribuição de pressões varia ao longo do comprimento da corda do aerofólio, como ilustrado na Fig. 3. Observe que o programa FoilSim mostra ou a distribuição de pressão ou de velocidade local de modo bastante ilustrativo. Esta distribuição de pressão também muda dramaticamente com a mudança do ângulo de ataque. Mesmo assim a discussão dos tempos-iguais-de-trânsito sobre como a lei de Bernoulli está relacionada com a sustentação ignora a variação de pressão ao longo da corda. Muitos leitores concluem daí que a pressão é constante, uma outra razão pela qual a abordagem muito simplificada falha ao tentar explicar logicamente alguns detalhes aerodinâmicos. A força resultante é obtida ao se integrar a distribuição de pressão sobre a superfície de todo o aerofólio. O processo de integração talvez seja um pouco mais detalhado para que uma classe de Ensino Médio seja capaz de compreender. No entanto, medir e integrar a distribuição de pressão é um outro experimento padrão no meu curso de testes em túnel de vento, composto primordialmente de alunos de

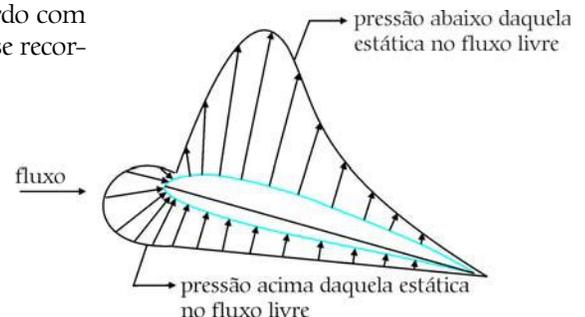


Figura 3. Pressão na superfície.

gradação do terceiro ano da faculdade. E as respostas obtidas são precisas.

Devido ao ponto de estagnação, os aerofólios curvos típicos têm que estar orientados em torno de  $2^\circ$  ou  $3^\circ$  com o nariz para baixo, ou seja, com um ângulo de ataque negativo se quisermos conseguir sustentação zero. O ponto de estagnação também não se encontra exatamente no bordo de ataque de um aerofólio simétrico, ou seja, um sem *curvatura*, quando seu ângulo de ataque é diferente de zero e ele está produzindo sustentação. Isto pode ser visto na Fig. 4. Isto responde ao mistério aparente de como um aerofólio simétrico é capaz de voar. Do ponto de vista das moléculas de ar, o aerofólio não é simétrico. O mesmo vale para um aerofólio plano com um ângulo de ataque diferente de zero. Para estas geometrias, o ângulo de ataque também se move cada vez mais para o bordo de fuga ao longo do intradorso à medida que o ângulo de ataque aumenta.

E imagine também o mesmo fenômeno quando a asa está invertida. Como você poderá ver facilmente na Fig. 5, as linhas de corrente mostram que o fluxo sobre a superfície de baixo original, que agora está em cima, com certeza não parecem estar encontrando uma superfície plana pela frente se o aerofólio for posicionado com um pequeno ângulo de ataque. Há bastante curvatura perto do bordo de ataque daquilo que agora é a superfície de cima, fazendo com que o aerofólio invertido produza empuxo para cima. A desvantagem de usar este aerofólio nesta orientação é que a forma agora é ruim para geração de sustentação, de modo que o ângulo de ataque deve ser significativamente maior que aquele necessário para produzir a mesma sustentação quando em posição normal. O resultado é que o arrasto é grande e a eficiência aerodinâmica

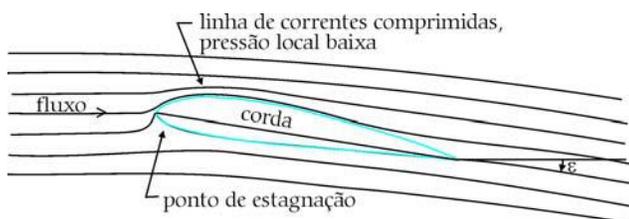


Figura 4. Aerofólio simétrico com ângulo de ataque positivo.

(geralmente expressa como a razão do empuxo pelo arrasto) é baixa. Mas a geração de sustentação está definitivamente presente.

### Bernoulli e/ou Newton

Então, para onde esta viagem verbal pouco complexa nos levou? Aqui vai o que imagino. Duas coisas acontecem simultaneamente quando um aerofólio está gerando sustentação. Se adotarmos a perspectiva minuciosa do campo de escoamento, usamos a conservação de massa e a conservação de energia, a lei de Bernoulli, para descrever o padrão de linhas de corrente espremidas que gera assim uma pressão menor no extradorso do aerofólio e conseqüentemente uma força para cima sobre o mesmo. Do ponto de vista de uma escala maior, desde que não haja geometrias por perto que alterem o fluxo, as forças sobre o aerofólio estão atuando sobre o fluido em movimento, alterando seu momento de acordo com a lei de conservação de momento linear, ou leis de Newton. Ambas as representações podem ser colocadas em termos de modelos matemáticos que corretamente reproduzem as forças que estão sendo geradas. Qual dos métodos é preferível depende de qual é mais simples para o conjunto de dados de que dispomos. Nenhum deles é inerentemente mais correto ou preciso.

Gostaria de terminar fazendo um pedido aos professores: enfatizem qualquer modelo que funcionar mais convenientemente nos cenários que estão usando, sem dizer ou mesmo insinuar que o outro está errado. Sempre expliquei a sustentação em termos da lei de Bernoulli e me sinto confortável, pois ela faz sentido para públicos de diferentes níveis. Revisei várias fontes na literatura de ensino de Física frequentemente citadas e tenho a sensação de que nenhuma delas descreve limitações na lei de Bernoulli que sejam tecnicamente corretas [4–7]. Além do mais, a lei de

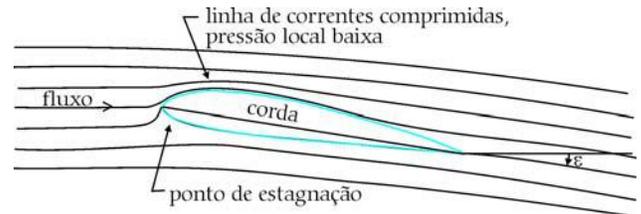


Figura 5. Aerofólio invertido NACA 2412.

Bernoulli é um dos fundamentos da mecânica de fluidos e é a fonte de algumas de minhas demonstrações favoritas em aerodinâmica. Contudo, concordo que talvez as leis de Newton constituam uma descrição mais simples desde que não se tenha que avaliar os detalhes do escoamento. Tiro meu chapéu para aqueles entre vocês que aceitaram o desafio hercúleo de achar maneiras de descrever fenômenos complexos em termos simples e atingir estudantes cuja capacidade de atenção possa ser pequena e que talvez não estejam preparados para acompanhar uma explicação usando cálculo diferencial e integral. Mas Bernoulli é um ídolo da aerodinâmica, e com mérito. Não há razão para controvérsia.

### Nota

<sup>1</sup>A corda é também chamada, no jargão dos pilotos, de linha de cabo (N.T.).

### Referências

- [1] G. Gerhab and C. Eastlake, *Boundary Layer Control on Airfoils*, Physics Teacher **29**, 150 (1991).
- [2] FoilSim é um programa para PC's, de fácil uso e que calcula e mostra o fluxo de ar em torno de aerofólios. Usado extensivamente na Ref. 3 e pode ser obtida grátis na sua página da internet.
- [3] *Beginner's guide to aerodynamics*, uma publicação da Nasa Lewis (atualmente Nasa Glen) disponível em <http://www.grc.nasa.gov/www/K-12/airplane/bga.html>. Uma fonte incrível de material de ensino, até mesmo de slides para ilustração de aulas. Examinei também as três explicações incorretas mais comuns sobre sustentação.
- [4] Norman Smith, *Bernoulli and Newton in Fluid Mechanics*, Physics Teacher **10**, 451 (1972).
- [5] Jef Raskin, *Foiled by the Coanda Effect*, Quantum **5**, 5 (1994). Disponível em [http://jef.raskincenter.org/published.coanda\\_effect.html](http://jef.raskincenter.org/published.coanda_effect.html).
- [6] Klaus Weltner, *A comparison of explanations of the aerodynamic lifting force*, Am. J. Phys. **55**, 50 (1987).
- [7] Chris Waltham, *Flight without Bernoulli*, Physics Teacher **36**, 457 (1998).

# Experiências com a Braquistócrona

.....  
**Graciliano da Silveira Batista,**  
**Cleuton Freire e José Evangelista**  
**Moreira**  
 Seara da Ciência, Universidade Federal  
 do Ceará, Fortaleza  
 .....

## Introdução

**E**m Julho de 1696, na revista *Acta Eruditorium*, fundada e mantida por Gottfried Wilhelm Leibniz, o matemático suíço Jean Bernouilli apresentou um problema que logo despertou o interesse de seus colegas. Tratava-se de achar qual deveria ser a forma de uma rampa para que uma partícula, deslizando por ela a partir do repouso e sob a ação da gravidade, gaste o menor tempo possível para atingir outro ponto mais baixo da trajetória.

Leibniz espalhou o problema enviando-o por carta aos maiores matemáticos da época. A solução foi rapidamente encontrada por vários deles, inclusive o próprio Leibniz, além de Isaac Newton e os irmãos Jacques e Jean Bernouilli. Todos indicaram que a curva mais rápida, ou braquistócrona (*brakhisto* = mais ligeiro, *chronos* = tempo), deveria ser uma cicloide.

A cicloide é uma curva muito interessante e já foi até chamada de Helena da Geometria, em alusão à famosa beldade que levou Tróia a seu trágico destino.

No século 16, vários matemáticos, dentre eles Galileu, estudaram a cicloide, que é a curva traçada por um ponto qualquer da borda de uma roda que rola sem deslizar por um plano horizontal (Fig. 1).

Sendo  $R$  o raio da roda, a cicloide

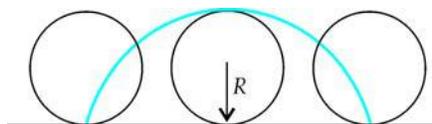


Figura 1. Traçado de uma cicloide.

é descrita pelas equações paramétricas:

$$\begin{aligned} x &= R [t - \text{sen}(t)] \\ y &= R [1 - \text{cos}(t)], \end{aligned} \quad (1)$$

ou, eliminando o parâmetro  $t$ ,

$$x = R \arccos \frac{R-y}{R} - \sqrt{2Ry-y^2}. \quad (2)$$

Portanto, a forma da rampa correspondente a uma braquistócrona deve ser um trecho da cicloide invertida tendo o ponto mais alto  $A$  com tangente vertical, como mostra a Fig. 2. Para qualquer outra forma de rampa entre os mesmos pontos inicial e final, o tempo gasto deve ser maior do que o tempo gasto através da cicloide.

Christiaan Huygens, patrono dos relojoeiros e contemporâneo dos matemáticos já citados, mostrou que a cicloide também é uma tautócrona ("curva de mesmo tempo"). Isto é, partículas soltas do repouso a partir de pontos de alturas diversas ( $A_1, A_2,$  etc) chegam ao mesmo tempo no ponto mais baixo,  $B$ , embora com velocidades diferentes. Portanto, a cicloide ainda merece outra denominação, pois é uma isócrona, já que partículas soltas de qualquer ponto oscilam em torno do ponto mais baixo com o mesmo período. Um problema

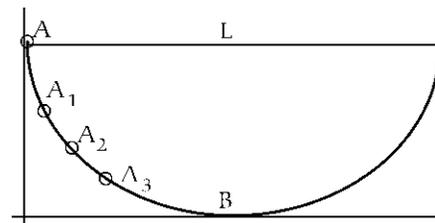


Figura 2. A cicloide invertida é uma tautócrona.

Um objeto deslizando por uma rampa inclinada leva um certo tempo para atingir o ponto mais baixo. Qual deve ser a forma da rampa para que esse tempo seja mínimo? Desde os tempos de Isaac Newton sabe-se que a curva de tempo mínimo, a "braquistócrona", é uma cicloide invertida. Nesse trabalho, descreve-se um experimento interativo simples que ilustra esse fato comparando os tempos de descida por três rampas, uma reta, outra na forma de uma cicloide e uma terceira seguindo uma hipérbole. O experimento pode ser feito sem dificuldade até em sala de aula. O tratamento teórico do problema é discutido e o contexto histórico é mencionado.

interessante consiste em mostrar que esse período comum é dado por:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

onde  $L$  é a “flecha” da cicloide (Fig. 2).

A demonstração formal de que a cicloide é a curva de tempo mínimo é um problema clássico do cálculo das variações e pode ser encontrado nos livros-texto de mecânica teórica [1]. Historicamente, o cálculo das variações foi inventado por Euler e Lagrange exatamente para resolver o problema da tautócrona. Um problema típico de cálculo das variações caracteriza-se pelo fato de buscar uma função (no nosso caso, a forma da rampa) que maximiza ou minimiza uma variável (nesse exemplo, o tempo de trajetória), levando em conta alguns vínculos (aqui, deslizamento sob a ação da gravidade).

Para começar, observamos que a velocidade da partícula em um ponto qualquer da rampa é dada por:

$$v = \frac{ds}{dt} = \sqrt{2gy}. \quad (3)$$

E, como  $(ds)^2 = (dx)^2 + (dy)^2$ , obtemos:

$$t[y(x)] = \frac{1}{\sqrt{2g}} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \frac{dx}{y}. \quad (4)$$

Queremos que esse tempo  $t$  seja mínimo. Observe que a variável, no caso, é toda a curva  $y(x)$ . Resolvendo esse problema com o auxílio do método de Euler e Lagrange, a solução é, como já foi dito, uma cicloide.

É claro que as soluções fornecidas pelos pioneiros citados acima não usavam o cálculo das variações, que ainda não fora inventado. A solução de Jean Bernouilli, o mesmo que lançou o problema, tornou-se um clássico da literatura matemática por sua engenhosidade e por usar um resultado obtido anteriormente por Fermat no estudo da refração da luz.

O problema considerado por Fermat consistia em saber qual o caminho escolhido por um raio de luz entre dois pontos situados em meios de índice de refração diferentes. Como não podia deixar de ser, Fermat veri-

ficou que esse caminho era dado pela conhecida Lei de Snell da refração:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2. \quad (5)$$

Em sua analogia com o problema da refração, Bernouilli considerou uma sucessão de camadas com índices de refração decrescentes,  $n_1 > n_2 > n_3, \dots$ , como visto na Fig. 3. Uma situação análoga é encontrada na explicação usual do fenômeno das miragens. Usando a Lei de Snell e lembrando que  $n = c/v$ , onde  $c$  e  $v$  são a velocidade da luz no vácuo e no meio transparente, respectivamente, obtemos:

$$\frac{v_1}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{\sin \theta_2} = \dots = \frac{v}{\sin \theta} = A = \text{const.} \quad (6)$$

Isso deve ser válido mesmo quando a espessura das camadas tende a zero, com variação contínua do índice de refração. Portanto, para um pequeno trecho qualquer da trajetória, devemos ter:

$$\sin \theta = \frac{dx}{dL} \quad e \quad \frac{v}{\sin \theta} = A = \frac{v dL}{dx}.$$

Logo:

$$v^2 (dL)^2 = A^2 (dx)^2. \quad (7)$$

Usando  $(dL)^2 = (dx)^2 + (dy)^2$ , obtemos:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = \frac{A^2 - v^2}{v^2}. \quad (8)$$

No nosso caso, temos uma partícula que desliza sob a ação da gravidade. Portanto, a velocidade  $v$  em uma posição qualquer  $y$  é dada por:

$$v = \sqrt{2gy}. \quad (9)$$

Usando esse valor de  $v$  na expressão (8), obtemos:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = \frac{A^2 - y}{2g}. \quad (10)$$

Como o lado esquerdo dessa equação deve ser positivo, devemos ter:

$$y_{max} = \frac{A^2}{2g}. \quad (11)$$

Esse valor corresponde ao ponto mais baixo da rampa e, no caso das miragens, é o ponto onde a trajetória da luz passa de descendente a ascendente.

Por fim, Bernouilli mostrou que a solução da Eq. (10) é exatamente uma cicloide. O leitor poderá, com menor trabalho, fazer o caminho inverso e verificar que a função que descreve a cicloide (Eq. 1) satisfaz a equação diferencial (10).

## Experiência

A demonstração experimental de que a cicloide é realmente uma braquistócrona tem os ingredientes requeridos de um bom experimento didático: é surpreendente, simples de montar e rápida de executar. Para uso permanente no Salão de Exposições da Seara da Ciência da UFC, montamos o equipamento visto na Fig. 4.

Consta de três rampas por onde podem rolar pequenas esferas de aço com cerca de 1 centímetro de diâmetro. Uma das rampas é reta, outra tem a forma de uma cicloide invertida e a terceira é uma hipérbole. Um texto colocado ao lado do equipamento convida o visitante a adivinhar, antes de fazer a experiência, qual das três esferas cai mais ligeiro. Ele pode ver que a reta é o caminho mais curto e a hipérbole é a curva mais íngreme. Vê também que a rampa em forma de cicloide tem uma pequena parte que fica abaixo do nível do ponto final. As esferas são colocadas nos pontos mais altos de cada rampa, seguras por



Figura 3. Trajetória de um raio de luz em um meio de índice de refração variável.

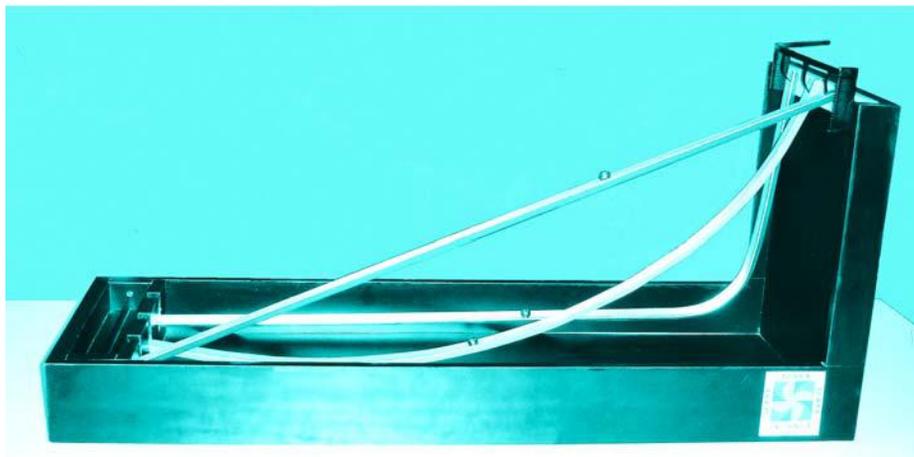


Figura 4. Rampas para demonstração da braquistócrona.

um mecanismo simples de mola e liberadas simultaneamente por uma alavanca. A esfera que desce pela cicloide chega primeiro ao fim da rampa e atinge uma cantoneira de alumínio em forma de L que gira ao ser atingida, separando a esfera mais rápida das outras duas.

O visitante também é convidado a soltar duas esferas de alturas diferentes na rampa em forma de cicloide e comprovar que ambas chegam ao mesmo tempo no ponto mais baixo da rampa, demonstrando que a cicloide é uma tautócrona.

O equipamento colocado no Salão de Exposições é elaborado demais para uso em sala de aula como demonstração. Para atender a essa finalidade, fizemos uma montagem mais simples, barata e portátil, vista na Fig. 5. Em uma prancha de madeira são fixados três trilhos de alumínio, do tipo usado em molduras. Cada um é

dobrado na forma de uma das três curvas, reta, hipérbole e cicloide. As pequenas esferas são mantidas por um dispositivo de mola nos pontos mais altos das curvas e liberadas ao mesmo tempo. Com o plano da prancha na vertical, o tempo de queda é muito curto e fica difícil observar qual das esferas chega primeiro. Pode-se, então, repetir a experiência com a prancha inclinada, diluindo a aceleração e facilitando a observação. Essa variação possibilita que o professor chame a atenção para o fato de que o resultado independe do valor da aceleração da gravidade. O experimento, se feito na Lua, teria o mesmo desfecho.

Usando a expressão (4), podemos calcular o tempo de descida da esfera em qualquer curva. No nosso equipamento, mostrado na Fig. 4, a altura das rampas é de 32 cm e o comprimento na horizontal é de 87 cm. Os tempos teóricos de queda para as três curvas foram obtidos integrando numericamente a expressão (4) para as funções respectivas. Os tempos experimentais foram medidos com o uso de sensores no início e no fim de cada curva, ligados a um cronômetro eletrônico. Esses valores estão listados na Tabela 1. Essa comparação numérica entre a teoria e a experiência é apenas ilus-

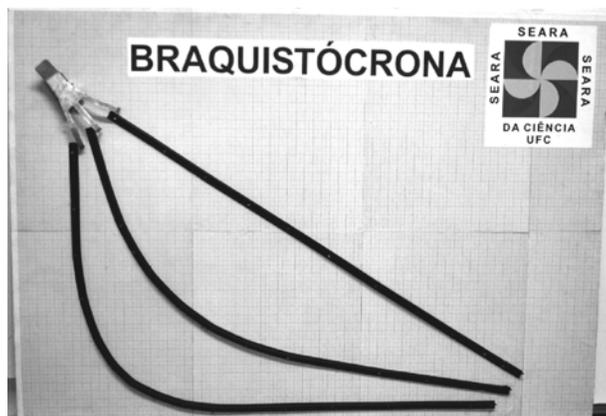


Figura 5. Prancha portátil para demonstração em sala de aula.

Tabela 1. Tempos (em segundos) de descida de uma esfera em diversas curvas.

Forma da rampa	Teórico	Experimental
Reta	0,690	0,82
Hipérbole	0,650	0,74
Cicloide	0,544	0,64

trativa, pois o cálculo pressupõe o deslizamento de uma partícula puntiforme na ausência de atrito. Na nossa experiência, usamos esferas rolantes e o atrito é inevitável. A diferença entre a previsão teórica e a medida experimental, em torno de 15%, é perfeitamente justificável.

## Conclusão

Embora trate de um problema antigo e bem conhecido [2, 3], a demonstração experimental da braquistócrona ainda surpreende as pessoas que a vêem pela primeira vez. O professor pode, com facilidade, fazer essa demonstração em sala de aula e chamar a atenção de seus estudantes para as várias e curiosas propriedades da cicloide. Uma discussão detalhada da solução de Jean Bernoulli remete a uma interessante comparação com um problema clássico da óptica geométrica e seu tratamento dado por Fermat.

Para alunos com gosto pela Matemática, o problema serve muito bem para apresentar o cálculo das variações e o método de Euler-Lagrange. Por fim, deve ser salientada a importância histórica do problema e a forma como foi solucionado pelos grandes matemáticos do século 17, aproveitando para comentar como a forma de propor e solucionar questões de Ciência naquela época era bastante diverso da prática nos dias atuais.

## Referências

- [1] Herbert Goldstein, *Classical Mechanics* (Addison-Wesley Co, Cambridge, 1951).
- [2] J. Supplee and F.W. Schmidt, *American J. of Physics* **59**, 402 (1991).
- [3] M. Desaix, D. Anderson e M. Lisak, *European J. of Physics* **26**, 857 (2005).



## Aerodescobertas

### Aerobalança

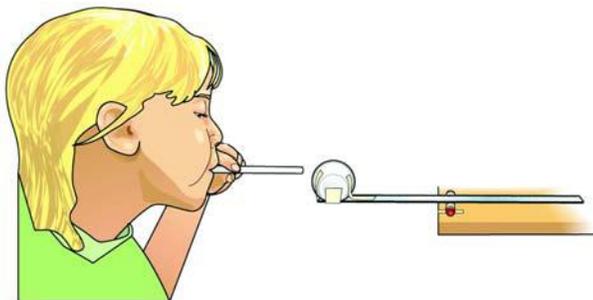
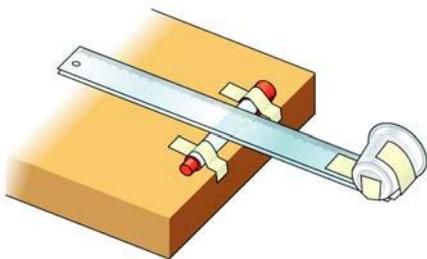
Um simples sopro pode desequilibrar uma balança. E um vendaval pode destelhar uma casa! Descubra como isso é possível e muito mais.

#### Material

- régua
- caneta marcadora
- copinho descartável
- fita crepe
- canudinho
- secador (ar frio)

#### Passo a passo

Fixe com fita crepe a caneta na extremidade de uma mesa e o copinho na régua como indicado. Ajuste a régua de modo que ela fique equilibrada na horizontal. Posicione o canudinho pouco abaixo do topo do copinho e sopra. O que acontece com a régua?



### Explorando novas possibilidades

1) Coloque a régua sobre a mesa. O que você sente quando coloca o dedo atrás do copinho?

2) Construa uma casinha de papelão e utilize como telhado um pedaço de folha de papel dobrada ou um pedaço de cartolina formando um arco. Posicione o secador de cabelos na horizontal abaixo da cumeeira e acione o secador (ar frio). O que acontece com o telhado? Você acaba de demonstrar porque os vendavais são tão perigosos.

### Aerofatos

O fluxo de ar que sai do canudinho ou do secador de cabelos tem uma velocidade praticamente na horizontal. Se não houvesse nenhum obstáculo, o ar tenderia a se mover em linha reta devido à sua inércia. Ao encontrar uma superfície o fluxo de ar tende a contorná-la formando uma camada de ar em movimento próxima à superfície, desde que a velocidade do ar não seja muito grande. Esta tendência é chamada efeito Coanda. O ar em movimento não pode ser visto simplesmente como uma coleção de bolinhas independentes que defletem quando se chocam contra a superfície. As moléculas do ar interagem entre si e com a superfície. Para contornar o obstáculo, o fluxo de ar precisa mudar de direção - o que requer uma força. Essa força está associada a uma menor pressão no topo do copinho e no "telhado" em relação à pressão atmosférica. No caso da aerobalança, a menor pressão no topo do copinho em relação à parte

.....  
**Eduardo de Campos Valadares**

Departamento de Física, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte  
 e-mail: [divertida@cienciajovem.org.br](mailto:divertida@cienciajovem.org.br)

.....  
**Alfredo Luis Mateus**

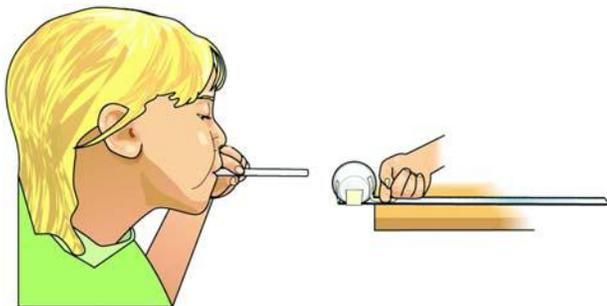
Departamento de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte  
 e-mail: [almateus@cienciajovem.org.br](mailto:almateus@cienciajovem.org.br)

.....  
**Juares Dutra da Silva**

Departamento de Física, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte  
 e-mail: [juares@cienciajovem.org.br](mailto:juares@cienciajovem.org.br)

---

São apresentados quatro experimentos de aerodinâmica que permitem visualizar o efeito Coanda, o princípio de Bernoulli e a sustentação de perfis aerodinâmicos. Esses experimentos fazem parte do livro "Aerodescobertas - Explorando novas possibilidades", recentemente lançado pela Fundação Ciência Jovem ([www.cienciajovem.org.br](http://www.cienciajovem.org.br)), que apresenta vários outros projetos e experimentos de aerodinâmica de baixo custo, como elicópteros de balão e de elástico, aviões de papel, bumerangues, apitos de garrafa PET e oboés de canudinho.



debaixo do mesmo, onde o ar está parado, gera o desequilíbrio observado. No interior da casa, a pressão é maior do que a pressão externa que atua no telhado exposto à “ventania”. Observe qual dos telhados “destelha” mais facilmente. Se o ar tende a contornar o telha-

do, qual deveria ser a reação do telhado ao vento? Você já observou que as lonas dos caminhões tendem a “inchar”? Observe outros efeitos do ar em movimento sobre obstáculos parados ou do ar parado sobre obstáculos móveis, como aviões (veja *Asas para voar*) e carros de corrida (note que eles têm asinhas inclinadas para baixo, ao contrário dos aviões, cuja função é aumentar a adesão dos pneus à pista).

## Asas Para Voar

Teste várias asas antes de arriscar um vôo!

### Material

- tira de papel 3 x 9 cm
- 2 pedaços de canudinho
- arame fino
- prego pouco mais fino que o canudinho
- cola branca
- fita adesiva ou fita crepe
- secador de cabelos (ar frio)

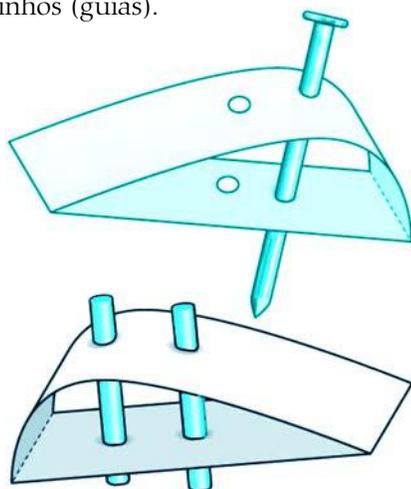
### Passo a passo

1) Dobre a tira na linha tracejada

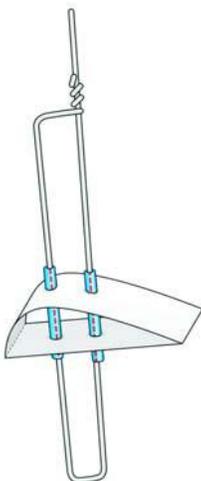


e cole as extremidades da tira para obter a asa.

2) Molhe a ponta do prego para fazer os furos para encaixe dos canudinhos (guias).



3) Com o arame faça uma estrutura de suporte para a asa que a permita deslizar facilmente na vertical.

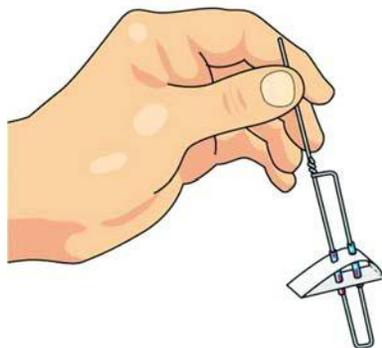


4) Posicione o secador de cabelos como indicado e ligue-o (ar frio). Incline a asa aos poucos e observe o que acontece quando o ângulo de inclinação (“ângulo de ataque”) aumenta.

### Explorando novas possibilidades

1) Coloque pequenos pesos dentro da asa e incline-a gradualmente. Você consegue manter o conjunto suspenso?

2) Interrompa por alguns instantes o fluxo de ar que incide na asa



colocando a mão na frente da saída de ar e retirando-a rapidamente para simular efeitos de turbulência no avião. O que acontece quando você aumenta muito o ângulo de inclinação da asa? Teste asas com diferentes perfis antes de construir seu avião!

### Aerofatos

A velocidade do ar que sai do secador de cabelos tem praticamente apenas uma componente horizontal. Para o ar poder contornar a asa é preciso que nele atue uma força perpendicular à sua velocidade. O mesmo ocorre com uma borracha girando em círculos presa à ponta de um barbante. A asa é um obstáculo para o ar em movimento semelhante ao copinho da *Aerobalança*. O ar ao incidir na dianteira da asa é desacelerado, gerando ali uma região de sobre-pressão. Em torno da asa a pressão é predominantemente negativa em cima dela e predominantemente positiva debaixo dela, tomando-se a pressão atmosférica como referência. Essa diferença de pressão em cima e em baixo da asa é responsável pela sustentação dos aviões. A inclinação da asa é fundamental para a sua sustentação, já que o ar ao ser forçado a contorná-la tem de “descer” tanto na parte de cima quanto na parte de baixo da asa, ou seja, ele é acelerado para baixo em ambos os casos. A asa, por reação, tende a ser acelerada para cima, contrabalançando assim o peso do avião. Para realizar acrobacias aéreas, os pilotos, mesmo com a aeronave “de cabeça para baixo”, têm de garantir a

inclinação das asas para manter a sustentação do avião. Quando o ângulo de inclinação da asa ultrapassa um valor crítico, surge turbulência e o ar que contorna a parte de cima das asas se “descola” delas formando bolsões de ar turbulento que geram instabilidade e menor sustentação. No modelo de asa sugerido, a sua parte de baixo é plana e a de cima curva. Existem diversos outros tipos de perfis de asas que proporcionam

sustentação. Testes realizados em túneis de vento demonstram que a velocidade do ar na parte de cima da asa é maior do que na parte de baixo. Contudo, ao contrário de explicações correntes sobre a sustentação de aeronaves, o ar que se divide em uma extremidade da asa não chega ao mesmo tempo na outra extremidade. A força de sustentação depende da densidade do ar (quanto maior a altitude, menos denso é o ar), da inclinação e formato

da asa e da velocidade do avião (o efeito conjugado de duas asas também deve ser levado em conta). A componente horizontal da força de sustentação é responsável pelo efeito de arraste (resistência do ar ao avanço do avião). Os projetistas de aviões procuram conceber perfis aerodinâmicos para as asas e para o avião como um todo que minimizem a força de arraste, de modo a gerar economia de combustível.

## Rotor

Que tal construir um rotor de papel que gira e voa ao mesmo tempo?

### Material

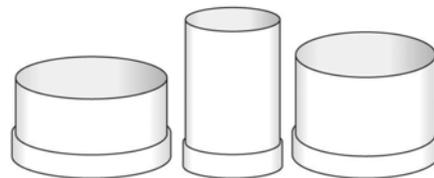
- folhas de papel A4
- fita adesiva

### Passo a passo

Dobre o papel como indicado, tomando como referência uma tira de 2 a 2,5 cm de largura. Forme uma aba com 7 ou mais dobras. Para obter um cilindro de papel fixe as suas extremidades com fita adesiva.

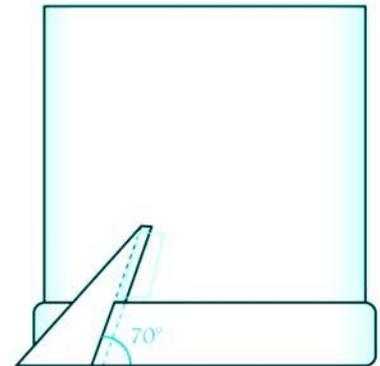
É possível dobrar o papel a partir do lado mais largo. Variando a direção

de dobradura e o número de dobras, você pode obter rotores dos mais diferentes tamanhos.



### Como usar

Para testar o desempenho do seu rotor, segure-o pela aba e faça-o girar com a mão arremessando-o ao mesmo tempo. Descubra qual rotor tem o maior alcance horizontal ou o maior tempo de voo. Como o número de dobras e o raio do rotor afetam o seu desempenho?



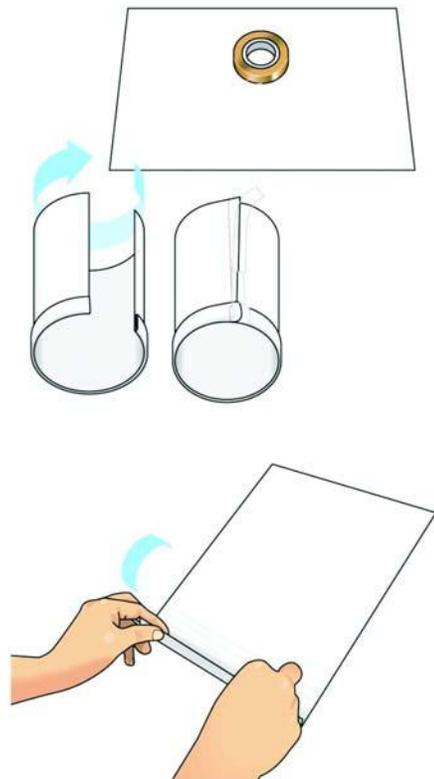
tor que ele passa a girar (veja a figura). Aletas distribuídas regularmente em torno da aba e inclinadas em relação ao eixo do rotor permitem que ele gire automaticamente tão logo seja arremessado. Siga as instruções abaixo para obtê-las e fixá-las no corpo do rotor.

### Como obter 3 aletas

Recorte no papel um retângulo 2,5 x 4,5 cm. Recorte a linha contínua para encaixar as aletas debaixo das dobras de papel (aba do rotor) e dobre a extremidade dos triângulos indicada pela linha tracejada para fixação na parede externa do rotor. Recorte um triângulo adicional para obter uma terceira aleta. Use cola, fita adesiva ou fita crepe para fixar as aletas no rotor como indicado, mantendo-as igualmente espaçadas em torno da aba.

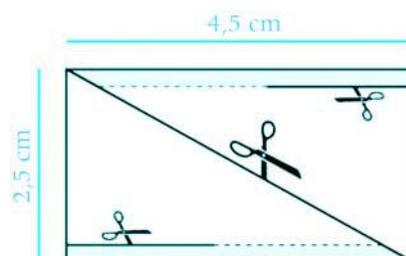
### Aletas de fita crepe

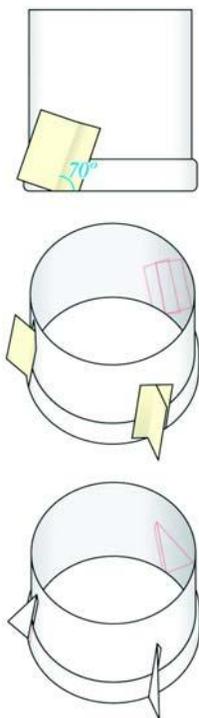
Existe uma forma bem simples de se obter aletas. Basta dobrar pedaços iguais de fita crepe e fixá-los no corpo do rotor, na mesma posição das aletas de papel, conforme indicado.



### Explorando novas possibilidades

Você pode simplificar a operação do seu rotor. Se usar aletas, não precisará girá-lo. Basta arremessar o ro-





### Aerofatos e desafios

Ao dobrar o papel, você controla a distribuição de massa do rotor, concentrando-a na aba. Fixe um pedaço de linha na parede do rotor, próximo à aba, e mantenha o rotor suspenso segurando a outra extremidade da linha. Mude o ponto de fixação da linha até que o rotor fique na horizontal (o ponto correspondente no eixo do rotor coincide aproximadamente com o seu centro de massa). Descubra se existe uma relação entre a posição do centro de massa do rotor (tente versões com mais e menos dobras) e o seu desempenho (maior tempo de vôo ou maior alcance horizontal). O giro do rotor lhe confere uma grande estabilidade. O mesmo ocorre quando você anda de



bicicleta. Enquanto pedalar, você não cai! Tente arremessar o rotor (sem aletas) evitando girá-lo e compare o seu desempenho combinando giro e arremesso. Descubra também como a disposição das aletas é fundamental para fazer o rotor girar. Quando o rotor gira, ele também faz o ar em torno dele girar formando vórtices. O que aconteceria se as aletas fossem fixadas dentro do rotor? Como seria o seu desempenho? Nesta posição elas ajudam ou atrapalham? Por que? Explore à vontade o seu novo invento.

### Ventoinha que Levita

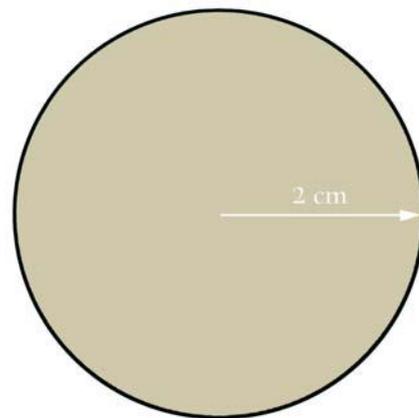
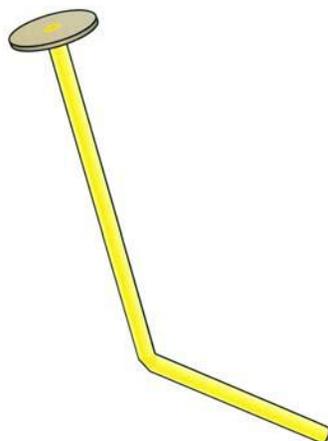
Segure pela extremidade uma folha de papel de frente para você e sopre. O que acontece? Segure agora duas folhas de papel, de modo que elas fiquem paralelas, e sopre no espaço entre elas. Algo surpreendente acontece! Aproveite esta descoberta para fazer uma ventoinha muito especial.

#### Material

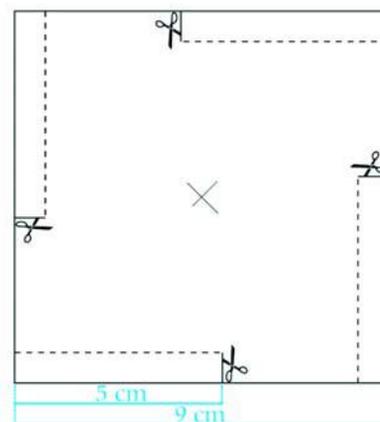
- cartolina
- papelão
- percevejo
- fio fino encapado (capa do fio)
- canudinho flexível
- tesoura, régua, caneta, transferidor e/ou compasso (opcional)

#### Passo a passo

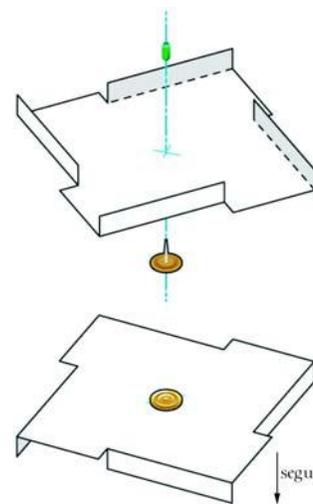
1) Recorte no papelão um disco com 1,5 a 2 cm de raio. Fure o centro do disco com a ponta de um lápis ou caneta (ou prego) e aumente o tamanho do furo para encaixe justo do canudinho, cuja extremidade deve ficar rente à face mais lisa do papelão.

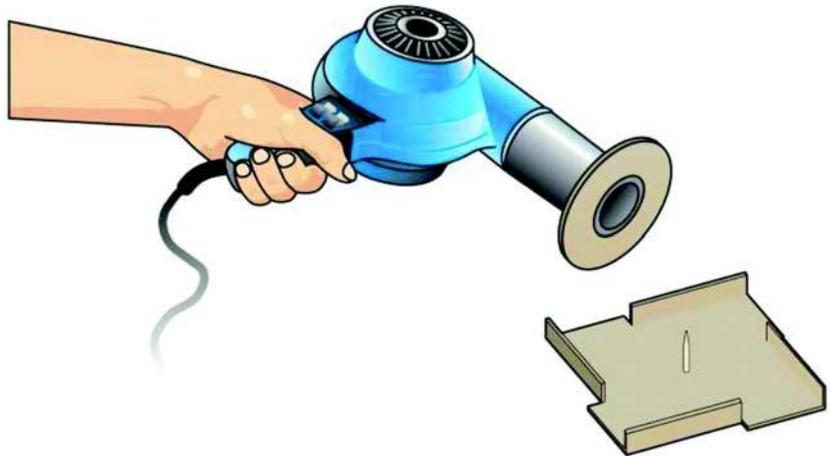


2) Recorte na cartolina um quadrado e marque o seu centro. Utilize o molde ao lado. Faça um corte na linha contínua (entre 0,5 cm a 1 cm) e dobre a cartolina na linha pontilhada.



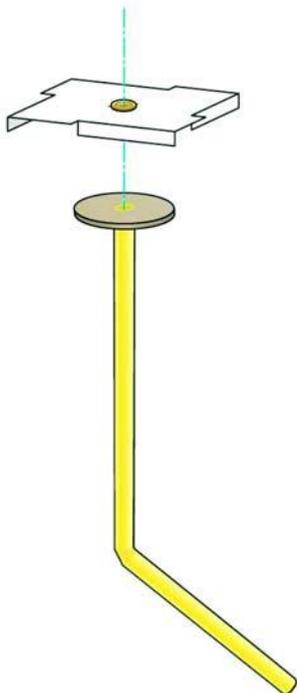
3) Fure o lado oposto da cartolina (centro) com o percevejo. Para fixá-lo utilize a capa do fio e "encape" o percevejo ("eixo" da ventoinha).





### Como funciona

Encaixe o eixo da ventoinha (percevejo encapado) na extremidade do canudinho, de modo que a cartolina fique em contato com o papelão. Com o dedo mantenha a ventoinha suspensa e sopre no canudinho (não pressione a ventoinha!). Assim que a ventoinha começar a girar, retire o dedo. Você consegue levitá-la com o seu sopro? Se soprar mais forte, o que acontece? O truque funciona quando você pára de soprar?



### Por que funciona?

Por que a ventoinha não gruda no papelão quando ela levita? (Dica: inverta a ventoinha como mostrado na figura.) Descubra também porque ela gira. (Dica: se você não dobrar a

cartolina e colocar apenas o “eixo” no centro do quadrado, o que acontece quando você sopra no canudinho?) Tente fazer ventoinhas menores (recorte na cartolina quadrados com lados entre 6 e 9 cm). Diminua também o diâmetro do disco de papelão para que a ventoinha possa girar. Qual delas gira mais rápido? Por que?

### Novos modelos

Tente fazer ventoinhas diferentes. Que tal uma ventoinha triangular? Basta recortar na cartolina um triângulo equilátero (3 lados iguais). Ache o centro do triângulo para fixar o “eixo” da ventoinha. Tente também materiais diferentes (papel, papel plastificado, isopor liso, embalagens, etc). Você também pode decorar sua ventoinha com um “disco de Newton” – trace linhas radiais a partir do centro da ventoinha e utilize lápis de cor para colorir o espaço entre duas linhas com uma cor diferente. Veja o que acontece com as cores quando a ventoinha gira. Dê asas à imaginação e divirta-se!

### Ventoinha com secador de cabelos

Se você está sem fôlego, eis uma boa alternativa!

### Material

- papelão
- palito de dentes
- secador de cabelos (ar frio)
- fita crepe

### Passo a passo

Recorte um quadrado no papelão para fazer a ventoinha (veja a figura) e um disco menor com um furo no

centro para encaixe justo do secador (se necessário, passe fita crepe em torno do secador). Fixe no centro da ventoinha o palito de dentes (guia). Agora é só colocar a ventoinha em contato com o disco de papelão fixado no secador e ligá-lo (ar frio). Com esse modelo fica mais fácil de ver a separação entre o disco e a ventoinha.

### Aerofatos

O ar que sai do canudinho ou do secador encontra uma área de vazão menor entre as superfícies de cartolina ou de papelão. O mesmo acontece quando você tampa com o dedo a saída de água de uma mangueira ou de uma torneira. O ar, assim como a água, aumenta a sua velocidade e a pressão do ar entre as superfícies diminui (o aumento da velocidade se dá às custas da diminuição de pressão). Este é o chamado princípio de Bernoulli, que também explica a aproximação das duas folhas de papel, quando você sopra entre elas. Como a pressão em baixo da ventoinha (a pressão atmosférica) é maior, a ventoinha levita. Por que então as duas superfícies não colam uma na outra? Lembre-se: a ventoinha tem peso e o jato de ar que sai do canudinho ou do secador exerce uma certa pressão contrária. Além disso, o ar precisa de espaço para passar! Tente aumentar o peso da ventoinha (use uma cartolina mais grossa ou duas ou mais cartolinas coladas para fazer a sua ventoinha). O que acontece quando você aumenta a potência do secador? Sinta-se à vontade para fazer novas descobertas!

# A Ilusão Sobre o Tamanho da Lua no Horizonte

**T**odos nós vemos a Lua Cheia nascendo muito maior do que quando a olhamos elevada no céu. Em uma sondagem recente conversamos brevemente com cinquenta e dois professores de Física, parte deles recém formados e em início de carreira, outros com muitos anos de docência. As conversas foram em sua maioria por telefone e envolveram tanto professores de Ensino Médio quanto vários colegas de diversas universidades. O diálogo girava sobre as suas opiniões a respeito de uma possível explicação para o fenômeno de a Lua parecer com o seu tamanho ampliado quando é observada

no horizonte. Quase todos responderam inicialmente de forma prudente que não conheciam a explicação para aquele intrigante evento, mas uma vez instigados se eles acreditavam na existência ou não de uma explicação física para o fenômeno, foram unânimes em afirmar que sim. Quarenta e quatro professores apontaram a refração da luz na atmosfera como responsável pelo referido fenômeno, ainda que tenham articulado as suas respostas com base em distintos aprofundamentos. Alguns deles, entre os mais experientes, chegaram a lembrar que a luz percorre um caminho maior quando a vemos no horizonte e que nesta situação a atmosfera se comporta como uma lente. Deixando de lado as pequenas diferenças nas diversas explicações, o que nos pareceu um consenso absoluto entre os entrevistados foi o fato de que para eles o disco lunar, quando observado da super-

fície da Terra, objetivamente diminui de tamanho durante a elevação e que isso merecia uma explicação física. Mesmo com alguns dos colegas afirmando ser o tal fenômeno uma simples *ilusão de óptica*, as suas explicações para ela residiam invariavelmente na refração da luz.

O forte apelo dessa explicação pode ser o motivo pelo qual um físico, quando questionado sobre o tamanho

**Aristóteles, em *De coelo*, já atribuía à atmosfera a causa da ampliação do tamanho da Lua no horizonte, embora não falasse ainda no fenômeno da refração da luz. Tal proposta apareceu apenas com Ptolomeu**

ampliado da Lua nascente, afirmou há pouco tempo em um programa de televisão que tal se devia à refração da luz na atmosfera, isto é, a um “efeito de lente” que aumentaria o tamanho do disco lu-

nar, assim como uma lupa faz com os objetos observados através dela.

Aristóteles (384–322AC), em sua obra *De coelo*, já atribuía à atmosfera a causa da ampliação do tamanho da Lua no horizonte, embora não falasse ainda no fenômeno da refração da luz. Foi o astrônomo Cláudio Ptolomeu (87–150), estudioso dos fenômenos de refração, o primeiro a ir além de Aristóteles e explicar que a variação aparente do tamanho da Lua se devia à existência de refração da luz na atmosfera. A explicação de Ptolomeu foi fielmente repetida em vários textos medievais e mesmo posteriores.

A quase totalidade dos nossos professores entrevistados desconhece que as dimensões do disco lunar objetivamente quase não variam enquanto a Lua se eleva no céu, permanecendo sempre com o tamanho angular de aproximadamente  $0,5^\circ$  e que, portanto,

.....  
**Fernando Lang da Silveira**

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

e-mail: lang@if.ufrgs.br

.....  
**Alexandre Medeiros**

SCIENCO, PE

e-mail: alexandre@scienco.com.br

Quando olhamos a Lua Cheia próxima do horizonte, avaliamos ilusoriamente que o seu tamanho é muito maior do que quando ela se encontra elevada no céu. Entretanto o diâmetro do disco lunar, ao invés de diminuir, aumenta um pouco durante a ascensão da Lua. A explicação para a ilusão sobre o tamanho da Lua no horizonte nada tem a ver com a refração da luz na atmosfera e é um problema ainda não completamente esclarecido pela psicologia da percepção. Descrevemos aqui uma parte relevante da história e da tentativa de desvendar este mistério.

a diferença de tamanho que observamos de um momento para o outro é uma *ilusão de óptica* que nada tem a ver com possíveis efeitos de refração na atmosfera. Na verdade o esclarecimento dessa *ilusão* é um instigante problema para a psicologia da percepção [1].

Na Idade Média, o estudioso árabe Ibn Al-Haitham (965-1040) – que deu importantes contribuições à óptica e é mais conhecido pelo seu nome latinizado de Alhazen – foi o primeiro a afirmar que as variações no tamanho da Lua que se eleva é uma *ilusão*. Depois, no século XVII, outros cientistas acabaram por confirmar que temos uma *ilusão* ao avaliar a Lua Cheia no horizonte como muito maior do que a mesma Lua elevada.

Que se trata de uma *ilusão visual* podemos facilmente testar interpondo uma pequena moeda entre o nosso olho e a Lua Cheia nascente. Constataremos que a distância da moeda ao nosso olho, quando encobre perfeitamente o disco lunar, não se altera à medida que a Lua se eleva. Desta forma estamos demonstrando que a imagem que temos na retina tem aproximadamente o mesmo tamanho, independentemente da posição da Lua no céu. Uma maneira mais acurada de verificar que o tamanho do disco lunar permanece quase inalterado consiste em fotografar a Lua em momentos distintos nas mesmas condições de amplificação da câmara fotográfica. A Fig. 1 mostra duas dessas fotos obtidas na Lua Cheia de 13 de maio de 2006 em Porto Alegre. A primeira delas ocorreu com a Lua quase no horizonte e a outra algumas horas depois. Como se pode observar, não há mudanças importantes nas dimensões do disco lunar.

Outras formas mais sofisticadas de medir o tamanho do disco lunar confirmam a sua quase invariância ao se elevar. A rigor, e ao contrário do que vemos, a Lua elevada se apresenta um pouco maior do que a Lua nascente ou poente. De fato a Lua nascente ou poente se encontra mais afastada de um observador na Terra do que a Lua elevada no céu. A Fig. 2 representa as distâncias que separam a Lua do observador nos dois momentos.

Na Fig. 2 as dimensões da Terra e da Lua, bem como as distâncias, não

estão representadas em escala. A distância do centro da Terra ao centro da Lua, enquanto a Lua se eleva no céu, permanece quase inalterada e corresponde a cerca de 60 raios terrestres<sup>1</sup>. Decorre da representação feita na Fig. 2 que verdadeiramente a Lua em elevação máxima está um pouco mais próxima de nós do que quando a vemos no horizonte. A máxima mudança na distância entre ela e o observador não excede um raio terrestre e, portanto, o diâmetro do disco lunar aumenta em até uma parte em 60 enquanto a Lua sobe no céu<sup>2</sup>. Assim, se levarmos em consideração essa variação na distância concluiremos que, surpreendentemente, o disco lunar é um pouco menor no nascente do que quando a Lua está elevada no céu.

Os “efeitos de lente” atribuídos à atmosfera, isto é, o poder da atmosfera de variar o tamanho angular do disco lunar para quem o observa da superfície da Terra, são muito pequenos, pois o índice de refração do ar em relação ao vácuo difere da unidade apenas no quinto algarismo significativo. Se modelarmos a atmosfera como um dioptra esférico, o raio de curvatura desse dioptra é um pouco maior do que o próprio raio da Terra<sup>3</sup>. Na verdade, os efeitos de refração no horizonte determinariam um pequeno achatamento do disco lunar e uma mudança na posição aparente da Lua<sup>4</sup>. Desta forma, seja devido ao achatamento por refração, seja porque a Lua está efetivamente mais distante do observador do que quando se encontra elevada, a sua figura possui um tamanho menor no horizonte do que quando está alta no céu. Os experimentos com a moeda e mesmo com a máquina fotográfica não são suficientemente precisos a fim de mostrar que o disco lunar aumenta, ao invés de diminuir de tamanho, durante sua ascensão no céu. Portanto não há dúvida de que a nossa avaliação, intersubjetivamente validada, de que a Lua no horizonte nos parece muito maior do que quando está elevada no céu é uma *ilusão*. Essa *ilusão* não ocorre apenas



Figura 1. Fotografias da Lua próxima ao horizonte e depois quando se encontra elevada no céu.

com a Lua, mas igualmente com o Sol e outros objetos que passam por diferentes elevações no céu.

Encontramos também no árabe Alhazen a primeira tentativa de explicação para a *ilusão sobre o tamanho da Lua* (conforme destacado anteriormente neste texto, ele já havia notado no século X que o tamanho do disco lunar não variava). Alhazen desenvolveu idéias que são ainda hoje relevantes nas mais modernas teorias sobre o assunto. Ele foi o primeiro a descrever a *ilusão sobre o achatamento da abóbada celeste* (discutida mais adiante) e a relação

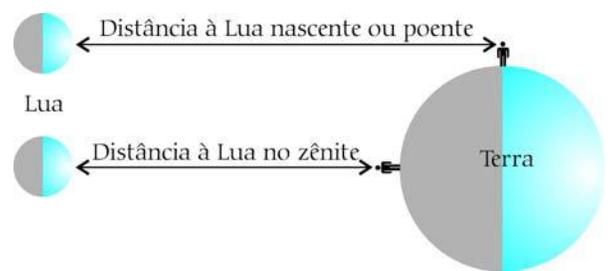


Figura 2. Distâncias entre a Lua e um observador na Terra quando a Lua nasce ou se põe e quando está no zênite.

desta com a *ilusão sobre o tamanho da Lua no horizonte*.

As nossas avaliações sobre as dimensões das coisas percebidas visualmente não dependem apenas do tamanho da imagem que temos na retina. Por exemplo, na Fig. 3, avaliamos o carretel de linha de cima como sendo maior do que o do meio que, por sua vez, nos parece maior do que o de baixo. Verdadeiramente os três carretéis são idênticos, conforme se pode comprovar com auxílio de uma régua. Esta é a conhecida *ilusão de Ponzo*. Nosso cérebro subconscientemente decide que os carretéis estão postados a diferentes distâncias sobre o piso de ladrilhos e conclui que os seus tamanhos são diferentes.

Segundo uma teoria bem aceita, a *ilusão sobre o tamanho da Lua* depende também da *ilusão sobre o achatamento da abóbada celeste* [2]. Para a maior parte das pessoas, a abóbada celeste não parece ser um hemisfério, se apresentando achatada, mais extensa na direção do horizonte do que para cima. Quando temos uma formação de nuvens elevadas, distribuídas sempre à mesma altura do solo, nitidamente percebemos que elas estão mais distantes na direção do horizonte do que para cima, reforçando assim a concepção de que o horizonte se encontra mais afastado do que as partes altas da abóbada.

A conjugação da *ilusão de Ponzo* com a *ilusão sobre o achatamento da abóbada celeste* se constitui em uma explicação plausível para a *ilusão sobre*

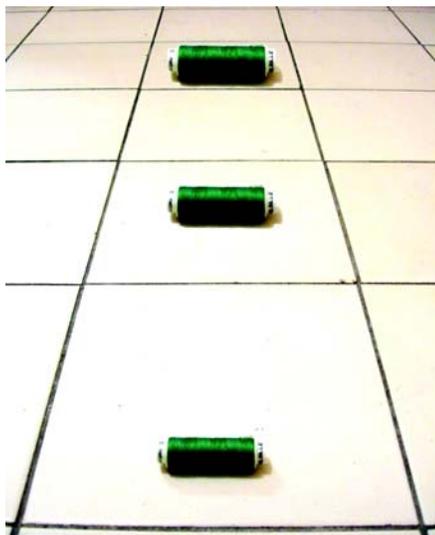


Figura 3. A ilusão de Ponzo para os três carretéis de linha.

o tamanho da Lua [3]. A Fig. 4 representa a trajetória real da Lua, praticamente equidistante do observador, enquanto ela transita pelo céu. A trajetória subconscientemente presumida por nós é achatada.

Apesar de sempre termos na retina uma imagem da Lua com o mesmo tamanho, julgamos que ela seja maior quando está mais afastada de nós, isto é, no horizonte. A projeção do disco lunar feita sobre a trajetória presumida nos dá uma idéia do modo como varia a nossa avaliação do tamanho da Lua de um momento para outro. Destaque-se que esta explicação independe das eventuais referências situadas perto do horizonte<sup>5</sup> (edifícios, montanhas, etc.).

Mesmo sendo esta uma “boa” explicação para a *ilusão sobre o tamanho da Lua*, ela não está isenta de críticas. Verdadeiramente o problema ainda continua em aberto. Sabe-se que a *ilusão* se desvanece quando observamos a Lua através de um tubo. A Lua nascente parece diminuir de tamanho quando,

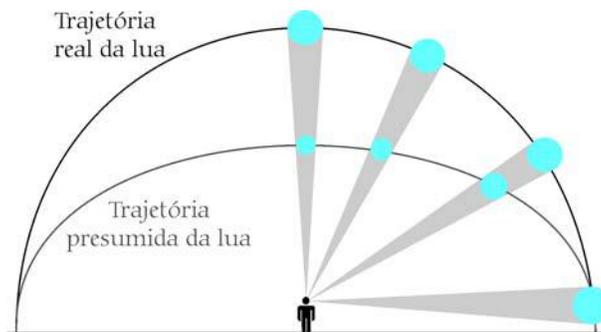


Figura 4 - Trajetórias real e presumida para a Lua.

de costas para ela, curvando-nos a observamos por entre nossas pernas [4].

Finalmente, é digno de nota que a *ilusão* não se desfaz mesmo quando sabemos tratar-se de uma *ilusão*. A beleza do espetáculo da Lua Cheia nascendo, começando enorme e depois parecendo diminuir de tamanho ao ascender no céu, maravilhou mais uma vez o fotógrafo durante a tomada das imagens que ilustram objetivamente na Fig. 1 a invariância do tamanho do disco lunar.

## Agradecimento

Agradecemos ao Prof. Rolando Axt pela leitura crítica deste artigo e pelas sugestões apresentadas.

## Notas

<sup>1</sup>Essa distância varia sensivelmente durante o período em que Lua completa uma revolução em torno da Terra, isto é, em aproximadamente quatro semanas. A distância de perigeu - máxima aproximação do centro da Lua ao centro da Terra - é cerca de 56 raios terrestres e a distância do apogeu - máximo afastamento do centro da Lua ao centro da Terra - é cerca de 64 raios terrestres. Entretanto, durante o intervalo de tempo de algumas horas em que vemos a Lua se elevando no céu, essa distância quase não se modifica.

<sup>2</sup>A ampliação do diâmetro do disco lunar enquanto a Lua se eleva é imperceptível a menos que sejam efetuadas medidas precisas.

<sup>3</sup>Vale lembrar que o poder de vergência de um dioptra - isto é, de tornar os raios luminosos paralelos em raios não paralelos - cresce com o aumento do índice de refração do dioptra em relação ao que o cerca e decresce com o aumento do raio de curvatura do dioptra. Assim, a atmosfera, por ter índice de refração quase idêntico à unidade e por ter um grande raio de curvatura, possui um baixíssimo poder de vergência.

<sup>4</sup>A refração da luz na atmosfera, quando ve-

mos a Lua exatamente no horizonte, determina que efetivamente neste momento ela esteja abaixo do horizonte. Assim os raios luminosos que vêm da Lua são todos quase que igualmente desviados por um pequeno ângulo, mudando a posição aparente da Lua no céu sem, no entanto, modificar significativamente o tamanho angular do disco lunar.

<sup>5</sup>Uma outra explicação dada para o problema do tamanho do disco lunar recorre às referências terrestres, afirmando que subconscientemente comparamos as dimensões da Lua no horizonte com o tamanho dos prédios ou acidentes geográficos e que por não termos tais referências quando a Lua está elevada, a avaliamos menor. Essa explicação é refutada quando se verifica a permanência da ilusão mesmo na falta de referências no solo, como se acontecer em alto mar ou em litorais planos.

## Bibliografia

- [1] Helen Ross e Cornelius Plug, *The Mystery of The Moon Illusion* (Oxford University Press, Oxford, 2002).
- [2] L. Kaufman e J. Kaufman, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **97**, 500 (2000).
- [3] P. Plait, *NightSky* May-June, 56 (2004).
- [4] R.R.F. Mourão, *Scientia* **2**, 23 (1991).



## O que é uma "Raia" Espectral?

.....  
**Francisco Catelli**

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre e  
Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul  
e-mail: fcatelli@ucs.br

.....  
**Jane Herber, José Carlos Menegotto e Sérgio Luis Kessler**

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre  
.....

**D**ecompor a luz branca em suas cores componentes: esta é uma incrível ferramenta para físicos, químicos e engenheiros das mais diversas áreas. Newton<sup>1</sup>, em sua obra *Óptica*, dedicou-se a estudá-la com o recurso de prismas. Dentre os diversos fatos da história da ciência ligados à decomposição da luz, ou seja, à espectroscopia, talvez um dos mais curiosos seja o da descoberta do hélio. Um astrônomo francês, P. Janssen, em 1868, ao observar a coroa solar durante um eclipse, encontrou uma raia amarela, que não correspondia a nenhum elemento conhecido. Apenas em 1895 Ramsay isolou-o, aqui na Terra, a partir de um mineral<sup>2</sup>. A idéia da espectroscopia é levada então aos alunos a partir desta história, na qual um novo elemento é descoberto fora da Terra, exclusivamente a partir da luz emitida por outro astro.

No decorrer de uma aula, na qual era estudado o espectro do mercúrio, ocorreu uma pequena "descoberta" que se revelou muito útil na compreensão do que é uma "raia espectral". O experimento era montado com uma lâmpada germicida montada em um suporte, como mostra a Fig. 1. Um aluno, ao efetuar observações (importante: leia a nota 3!) através de um CD gravável sem sua película protetora<sup>4</sup>, exclamou: *Olhem só: estou vendo várias cópias da mão do professor!* (Fig. 2). Percebemos imediatamente que havia aí uma excelente oportunidade para explicar o que era uma "raia espectral".

Não entraremos aqui nos detalhes de como uma rede de difração decompõe a luz visível; há vários excelentes

textos a respeito<sup>6</sup>. Para que os estudantes pudessem compreender o que é uma raia (ou linha) espectral, procedemos da seguinte maneira:

Em primeiro lugar, foi pedido aos estudantes que observassem, através da rede de difração, um anteparo branco, iluminado pela lâmpada de mercúrio. O resultado, que pode ser visto na Fig. 3, mostra algo com



Figura 1. Lâmpada germicida (Ecolume ZW15W), montada em um suporte de madeira. Apesar de ser uma lâmpada certificada para uso corrente, o fabricante alerta para evitar olhar diretamente para sua luz. A lâmina de acrílico transparente que aparece na foto elimina praticamente toda a radiação UV de comprimentos de onda inferiores a 400 nm, tornando o uso da lâmpada bastante seguro<sup>3</sup>. De qualquer maneira, todos os experimentos descritos aqui envolvem apenas observações de objetos por ela iluminados, e nunca a observação direta desta.

---

Ao observar, através de uma rede de difração, "cópias" da mão do professor que ajustava um equipamento, um estudante abre o caminho para que sejam desenvolvidas estratégias didáticas poderosas que levem à compreensão do que é uma raia espectral. A reprodução das etapas descritas neste trabalho envolve apenas a adaptação de uma lâmpada germicida, de fácil obtenção, e o uso de redes de difração, que podem ser improvisadas sem nenhuma dificuldade com CDs graváveis. Esta incursão ao mundo da espectroscopia permite "visitas" a vários campos do conhecimento. A Física, é claro, é um deles, mas estarão aí presentes a Química e mesmo a Biologia.

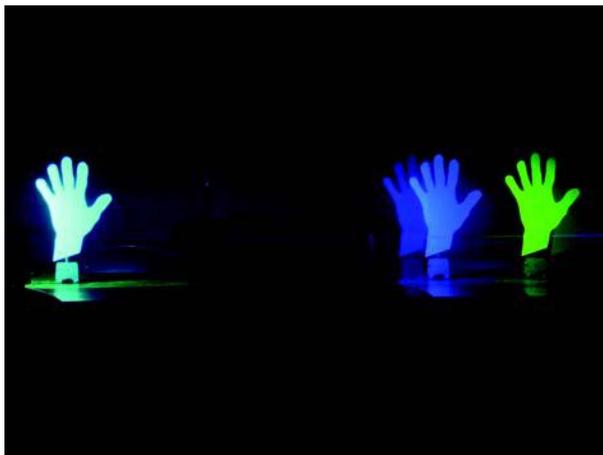


Figura 2. A mão, à esquerda, iluminada pela lâmpada da Fig. 1, e suas "cópias". A foto foi realizada com uma câmara digital e em frente à objetiva desta foi colocada uma rede de difração<sup>5</sup> de 600 linhas por mm. Na foto pode-se ver claramente duas cópias, e outras duas, mais apagadas; estas cópias aparecem nitidamente em uma observação visual com uma rede ou mesmo um CD gravável sem a película protetora (ver nota 4).

vários anteparos confundidos.

Em seguida, foi sugerida aos estudantes a mesma observação, porém desta vez o objeto iluminado era uma espécie de bastão branco, como pode ser visto na Fig. 4. Assim, "cópias" separadas do bastão podem ser identificadas no espectro de primeira ordem; com o anteparo mais largo, estas cópias se superpõem, e fica mais difícil distinguí-las, ou "resolvê-las".

Chega-se então à resposta da pergunta que é o título deste trabalho: uma raia (ou linha) espectral é uma "cópia" de uma "linha": a fonte de luz. Esta deve ser a mais estreita possível;

assim, duas cópias que eventualmente estejam muito próximas uma da outra não se confundirão. É claro que a separação entre as cópias depende do número de linhas da rede de difração e de outros fatores geométricos, mas depende também (e depende bastante) da largura da fenda que em geral é colocada em frente ao objeto que emite luz.

Entretanto, a maior parte das fontes de luz (incluindo aí a luz do Sol) emitem praticamente todas as cores do espectro visível. Neste caso, por mais estreita que seja a fonte de luz, não será possível identificar nenhuma cópia, já que todas ficam "coladas" umas às outras. Trata-se aí de um

"espectro contínuo", em oposição ao espectro discreto, o da lâmpada de mercúrio, por exemplo, descrito neste trabalho. A lâmpada da Fig. 1 só "sabe" emitir algumas cores na faixa do visível, daí o efeito interessante aqui descrito.

A visualização de um espectro contínuo é bastante simples: basta projetar em uma parede clara ou tela, com o auxílio de um retroprojetor, a imagem de uma fenda estreita, de aproximadamente 20 cm de comprimento por 0,5 cm de largura. Esta pode ser recortada com um estilete, centralizada em uma lâmina de papelão de 30 cm por 30 cm. Ao observar esta imagem da fenda com uma rede de difração ou um CD preparado

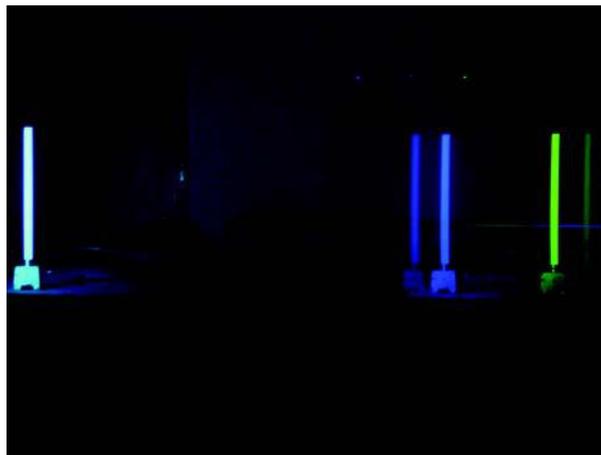


Figura 4. Pode-se perceber na foto superior quatro "cópias" do anteparo estreito (à esquerda), quando iluminado pela lâmpada descrita na nota 3. Estas "cópias" já começam a se parecer com raios (ou linhas) espectrais.

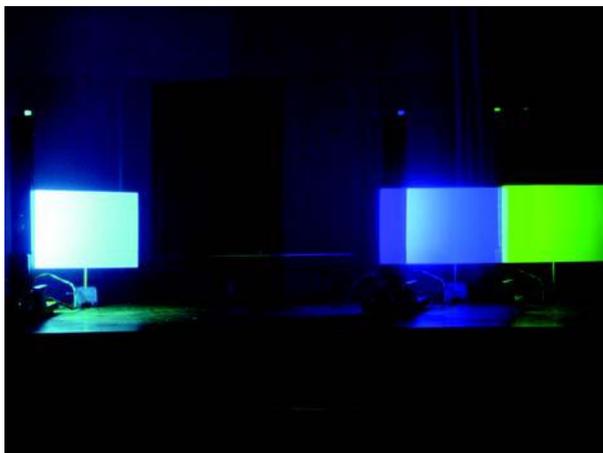


Figura 3. Um anteparo branco (à esquerda), iluminado pela lâmpada de mercúrio e visto através de uma rede de difração. A luz direta da lâmpada fica obstruída pelo próprio suporte desta.



Figura 5. As raios espectrais do mercúrio, fotografadas com uma câmara digital (sem nenhum ajuste especial). Em frente à objetiva foi novamente colocada uma rede de difração de 600 linhas por mm.

como descrito na nota 4, pode-se ver um belo espectro contínuo.

Por fim, uma fenda é colocada em frente à lâmpada, e desta vez pode-se observar realmente as linhas espectrais do mercúrio (Fig. 5). Não é possível ver claramente na foto, mas a olho nu é possível identificar que a linha laranja (mais à esquerda) consiste na verdade de duas “cópias”, muito próximas uma da outra.

## Conclusão

São vários os “dividendos” que podem ser extraídos de um episódio como este. O primeiro deles: as aulas “abertas”, propensas à investigação,

invariavelmente levam a pequenas (por vezes nem tão pequenas...) descobertas, ou re-descobertas. Estas re-descobertas certamente têm um papel importante na motivação dos jovens estudantes.

Outro aspecto relevante na formação de jovens que ainda não optaram por nenhuma carreira específica no curso superior, é o da possibilidade de interpretar um mesmo evento à luz de diversas disciplinas. No caso do trabalho aqui apresentado, o foco parece ser (e é) a Física. Mas a menção à descoberta de um novo elemento, ou a possibilidade de realizar identificações de elementos tendo acesso

apenas à luz que eles emitem, parece muito mais do domínio da Química. Já o estudo das bandas de absorção da clorofila<sup>7</sup> - por exemplo - poderia nos levar ao mundo da Biologia.

Finalmente, a “entrada em cena” de objetos do cotidiano que pareceriam não ter nenhuma relação com a Física, a Química ou a Biologia, como é o caso do CD gravável, certamente dá uma dimensão mais ampla ao ensino de qualquer um destes campos do conhecimento. Certamente, há aí alguma chance de os estudantes se convencerem de que, afinal de contas, a Física e a Química são “deste mundo”.

## Notas

<sup>1</sup>A decomposição da luz por um prisma é detalhada por Newton em seu livro *Óptica* (Livro I, parte I, prop. 2, teorema 2: “A luz do sol consiste de raios de diferentes refrangibilidades”).

<sup>2</sup>Ver, por exemplo, <http://em.wikipedia.org/wiki/Helium#Discoveries>. (Acessado em 9 de maio, 2006).

<sup>3</sup>Verificamos esta absorção por meio de um espectrofotômetro Beckman DU 530; o espectro de absorção não mostrou praticamente nenhuma transmitância na lâmina de acrílico de 3 mm de espessura, abaixo dos 400 nanômetros, justamente a faixa onde as lâmpadas de mercúrio emitem os UV mais perigosos. De qualquer maneira, como medida de segurança (talvez até um pouco exage-

rada), evitamos situações nas quais a lâmpada possa ser visualizada diretamente. Na foto da Fig. 5, por exemplo, os estudantes são alertados para olhar através da rede apenas para o espectro de primeira ordem, e nunca para o máximo central, apesar de a lâmpada estar protegida pela lâmina de acrílico acima referida.

<sup>4</sup>Para preparar um CD gravável como rede de difração por transmissão, proceda da seguinte forma: cole, junto à borda externa deste, e sobre a superfície da etiqueta, um pedaço de fita isolante de aproximadamente 1,5 cm por 1,5 cm. Aperte bem a fita contra o CD; risque, por meio da ponta de um estilete, o contorno da fita isolante. Retire a fita com cuidado: a etiqueta sai colada na fita. A “janela” assim obtida é uma excelente rede de difração por transmissão. Os melhores resultados

são obtidos com CDs graváveis cuja superfície de gravação tem tonalidade mais clara.

<sup>5</sup>Excelentes réplicas de redes de difração podem ser obtidas no mercado nacional, por exemplo, <http://www.cidepe.com.br> ou no mercado internacional, <http://www.pasco.com>, sob número de catálogo SE 9361.

<sup>6</sup>Ver, por exemplo, D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física, Volume 4* (Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1996) 4ª ed. Um tratamento mais fenomenológico pode ser encontrado em P. Hewitt, *Física Conceitual* (Bookman, Porto Alegre, 2002), 9ª ed, cap. 29.

<sup>7</sup>Catálogo de experimentos da Leybold Heraeus: Absorption spectra of liquids, in *Physics Leaflets* (Leybold Heraeus, Colônia, 1959).



Caricatura de Santos-Dumont feita por seu amigo "Sem", para o Jornal Le Cri de Paris, 11 de agosto de 1901.



**L**aser, acrônimo para Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação), é uma fonte de radiação que se destaca entre as demais não só pelo fascínio que exerce, razão que a faz figurar em filmes de ficção científica, como também por suas características: ser coerente, monocromática e apresentar alto grau de paralelismo são particularidades que lhe atribuíram várias funções. Quer seja na indústria, em aplicações médicas ou na opto-eletrônica, o laser – “a solução em busca de problemas” – encontrou na era moderna o seu lugar.

Como resultado de um processo de produção sofisticado e com a difusão de suas aplicações, o laser tem obrigado estudantes, quer sejam de nível superior ou médio, a defrontar-se com aspectos da física quântica para compreender sua produção e os processos dos quais participa.

As informações disponíveis em livros didáticos apresentam o fenômeno da emissão estimulada e da inversão de população, mas mostram discrepâncias quanto ao laser ser ou não uma fonte de luz intrinsecamente polarizada. Diferentemente de outros fenômenos ondulatórios, o fato da polarização ser exclusiva às ondas transversais a torna especial e a luz, enquanto onda transversal torna-se principal objeto de constatação desse fenômeno. Existiria uma fonte de luz naturalmente polarizada? Haveria uma fonte capaz de produzir naturalmente ondas eletromagnéticas com um plano de vibração privilegiado? O laser, dotado de características tão especiais, seria o mais forte candidato.

Entretanto, as contradições constatadas nos livros didáticos a respeito de sua polarização são muitas e ao invés de conduzir ao esclarecimento, semeiam mais dúvidas. Um outro exemplo que suscita dúvidas consiste nos manuais técnicos que acompanham os lasers de He-Ne. Estes recomendam que para operarem no modo polarizado, é necessário que fiquem ligados por cerca de uma hora antes de sua utilização.

A simples submissão da radiação laser a uma lâmina polarizadora não leva a nenhum resultado conclusivo e faz-se necessária uma investigação mais profunda.

Por exemplo, a luz proveniente do polarizador pode incidir em um fototransistor e a partir da medida da tensão no resistor  $R_2$  da Fig. 1 é possível avaliar a variação da intensidade de luz em função do giro do polarizador. Mas essa medida fica dependente da construção de um bom amplificador linear, já que os valores de tensão são muito baixos.

Surge, então, a necessidade de um recurso que realize a aquisição de dados de maneira simples e precisa, de forma que tais medidas possam ser armazenadas e posteriormente avalia-

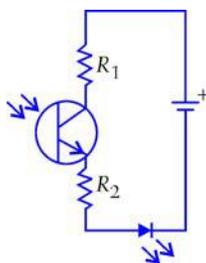


Figura 1. Esquema elétrico do sistema de detecção do laser.

.....  
**Marisa Almeida Cavalcante**  
 e-mail: marisac@pucsp.br

**Cristiane R.C. Tavoraro**  
 e-mail: cris@pucsp.br

**Daniele Guimarães**  
 e-mail: daniele@voicetechnology.com.br

Departamento de Física, Pontifícia  
 Universidade Católica, São Paulo

---

Graças às suas propriedades bem características, o laser tem ampla aplicação na indústria e no desenvolvimento de novas tecnologias. Este artigo busca mostrar como pode-se analisar em sala de aula, de maneira simples, uma das propriedades da luz laser: sua polarização.

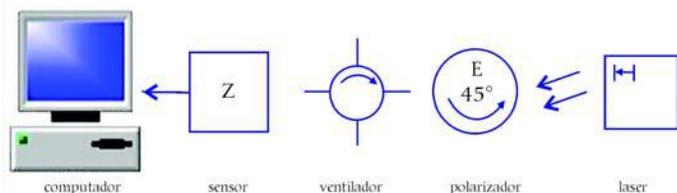


Figura 2. Diagrama de blocos do sistema utilizado.

das. Com base em trabalhos apresentados no Simpósio Nacional de Ensino de Física de 2003, passamos a utilizar a placa de som do computador para realizar a aquisição de dados.

Na entrada da placa de som existe um capacitor e para que o sinal elétrico produzido pela luz no sensor (fototransistor) possa ser captado, é necessário que seja um sinal alternado. Utilizou-se um ventilador (cooler) para pulsar a luz do laser, como mostra a Fig. 2.

Buscando tornar a montagem

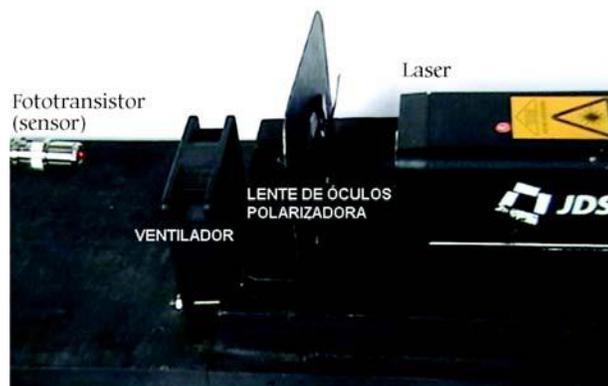


Figura 3a. Alinhamento do laser, polarizador, ventilador para pulsar a luz e o sensor óptico.

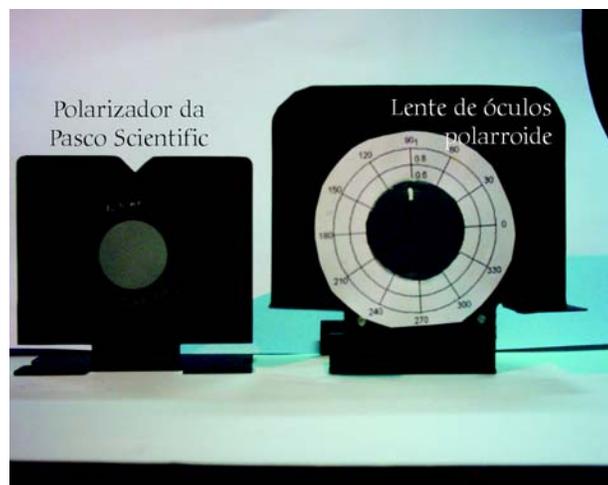


Figura 3b. O polarizador do banco óptico didático foi substituído pela lente polarizadora.

economicamente viável, utilizamos lentes de óculos polarizadoras como alternativa em relação aos polarizadores de kits didáticos. Chegamos assim à montagem

atual otimizada (Figs. 3a e 3b), a qual permite iniciar as medidas em alguns minutos, com qualidade e custo reduzido.

O software utilizado para aquisição de dados, Audacity, disponível na internet em versão shareware, possui interface amigável e oferece a opção de gravação do sinal e de análise em formatos diversificados tais como wave ou mp3, através de seleção de trechos do sinal adquirido para determinação de períodos de variação da intensidade da luz, atendendo às nossas necessidades.

Fizemos medidas com dois tipos de lasers comumente utilizados em laboratórios didáticos: o laser de gás He-Ne e o laser semiconductor (ponteira laser). Fixamos um polarizador diante do laser He-Ne e iniciamos a medida. O resultado que obtivemos mostra que a intensidade do laser varia em função do tempo e os períodos

da variação não se mantêm constantes, como podemos observar em detalhes na Fig. 4, correspondente à tela do software de análise Audacity.

A variação da intensidade do laser que emerge do polarizador pode ser interpretada como uma rotação de seu eixo de polarização em função do tempo. Uma onda pode apresentar polarização linear, circular ou elíptica. Esta descrição é dada em função do traçado que o vetor campo elétrico descreve. Se a amplitude da onda e a direção de vibração do vetor campo elétrico se mantêm constantes, ela é linearmente polarizada. Se a amplitude da onda se mantém constante, mas a direção do vetor campo elétrico varia, ela é circularmente polarizada e finalmente se a amplitude e direção da onda variam, a onda apresenta polarização elíptica, como mostra a Fig. 5.

Matematicamente, como podemos representar uma luz circularmente polarizada? Imagine duas ondas plano-polarizadas, uma x-polarizada e outra y-polarizada, defasadas por  $90^\circ$ . O campo elétrico resultante gira no espaço e ao atravessar um polarizador fixo terá sua intensidade variando desde um mínimo até um máximo. Nossos resultados ainda mostram que o período de rotação do vetor campo elétrico varia com o tempo (Fig. 6).

O gráfico da Fig. 6 exhibe o comportamento exponencial do período de rotação do eixo de polarização. De

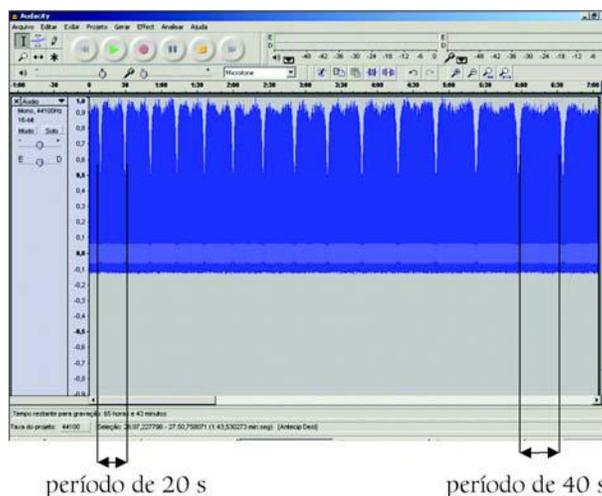


Figura 4. Variação da intensidade do laser que atinge o sensor, captada pelo software Audacity.

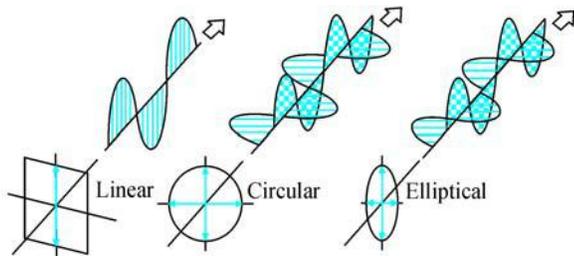


Figura 5. Tipos de polarização.

acordo com esse comportamento, após um longo tempo de operação do laser verifica-se que a velocidade de rotação da polarização diminui consideravelmente, isto é, o feixe apresenta uma polarização estável após um longo período de tempo. Esse resultado está de acordo com observações que encontramos em referências técnicas sobre a utilização do laser. Nessas observações há a recomendação de que o laser permaneça ligado por uma hora para que possa ser considerado estável, isto é, polarizado.

Para o laser semiconductor, seguimos um procedimento diferente, pois mantendo o polarizador fixo, não foram registradas variações de intensidade. Girando o polarizador em um único sentido diante do laser semiconductor foram registrados os ângulos que propiciavam máxima e mínima tensão medida no resistor (Fig. 2), correspondentes à intensidade de luz que atinge o fotosensor. A Fig. 7 exibe a variação na intensidade captada pelo sensor e mostra que foram obtidas intensidades máximas para dois ângulos de posicionamento do polarizador, defasados de 180°. A largura dos picos observados é decorrente da maior ou menor velocidade na rotação do polarizador. Este resultado indica que o laser semiconductor é polarizado linearmente, pois ao girar o polarizador encontramos a direção fixa de vibração do vetor campo elétrico correspondente à intensidade máxima.

Os primeiros estudos sobre a polarização visavam investigar a natureza da luz, mos-

trando que a mesma apresenta natureza ondulatória transversal. Atualmente o laser possui um papel fundamental e está presente em leitores ópticos, microscópios, sensores, aplicações na medicina e odontologia, em telecomunicações, em transmissões através de fibras ópticas, em espectroscopia no estudo da composição dos materiais, etc. Em algumas dessas aplicações, um plano privilegiado de vibração é necessário, especialmente para cortes. Um outro exemplo: é possível obter informações sobre a estrutura de um corpo a partir do estado de polarização da luz emitida ou refletida por ele. Isso torna a polarização uma técnica de pesquisa útil ao estudo dos mais variados tipos de estruturas, tratando-se então de um aspecto altamente relevante como característica de um laser. Por outro lado, em face da confusão existente na literatura, principalmente didática, os cursos de Física necessitam de

material específico que estabeleça critérios de estudo e análise do fenômeno da polarização do laser.

Dessa forma, a experiência proposta não tem como pretensão substituir um experimento tradicional de polarização no qual se pode verificar a Lei de Malus ou o ângulo de Brewster, bem como polarização por birrefringência. Mas em caráter complementar, o trabalho descrito reflete a importância deste novo método de medição na tentativa de estabelecer o grau de polarização dos feixes de laser He-Ne e também o de feixes de lasers semicondutores de baixo custo (ponteira laser comumente utilizada em experimentos no Ensino Médio). Dessa forma estaremos aprimorando um sistema de medidas e análise simples, barato, mas muito eficiente, permitindo aprofundar os conhecimentos sobre as características do feixe de laser bem como do fenômeno da polarização.

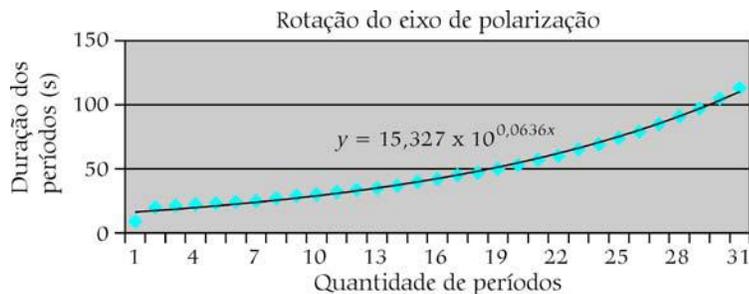


Figura 6. Variação do período de rotação do eixo de polarização do laser He-Ne da Uniphase.

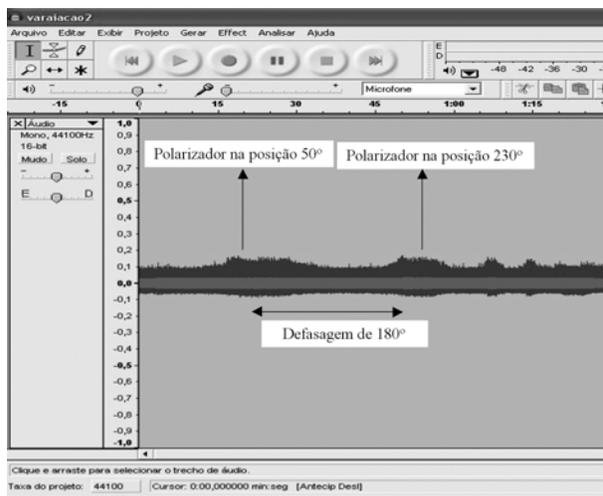


Figura 7. Efeito obtido ao girar o polarizador diante do laser semiconductor.

## Referências

- [1] T. Catunda, A. Pataia, A. Romero, J. Sartori e L. Nunes, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **20**, 230 (1998).
- [2] Paulo E.M.F. Mendonça, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **20**, 88 (1998).
- [3] E. Montarroyos e W.C. Magno, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**, 57 (2001).
- [4] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física* v. 4 (Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1995) 4ª edição, p. 215.
- [5] Vanderlei S. Bagnato, *A Física na Escola* **2**(2), 9 (2001).
- [6] R. Haag, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**, 176 (2001).
- [7] M.A. Cavalcante, E. Silva, R. Haag e R. Prado, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **24**, 150 (2002).
- [8] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavorolo. *Física na Escola* **4**(1), 29 (2003).
- [9] <http://audacity.sourceforge.net/>, acessado em 22/3/2006.

# Um Sistema Simples para a Verificação da Lei de Ohm

Adenilson J. Chiquito,  
Reginaldo da Silva, Kleber Bettini e  
Rodrigo P. Macedo  
Laboratório de Semicondutores,  
Departamento de Física, Universidade  
Federal de São Carlos, São Carlos

## Introdução

Via de regra, os estudantes do Ensino Médio somente conseguem verificar experimentalmente algumas leis físicas básicas quando ingressam na universidade ou se fazem parte de um colégio/curso técnico. Por exemplo, é familiar à maioria dos estudantes das últimas séries do Ensino Médio a expressão  $U = RI$ , a famosa Lei de Ohm. Mas quantos deles já verificaram a existência desta proporcionalidade entre corrente e voltagem para sistemas ditos ôhmicos ou lineares?

Existem conjuntos experimentais que se prestam a tais procedimentos, mas na maioria das vezes estão fora do alcance das verbas destinadas ao material didático. Exatamente por isso uma saída é recorrer à imaginação, usando-se materiais do dia-a-dia para construir sistemas de baixo custo mas com resultados comparáveis aos kits comerciais. Além disso, os sistemas construídos

**É familiar à maioria dos estudantes do Ensino Médio a expressão  $U = RI$ . Mas quantos deles já verificaram a existência desta proporcionalidade entre corrente e voltagem para sistemas ditos ôhmicos ou lineares?**

apresentam uma flexibilidade enorme e propiciam uma outra atividade, fundamental para os estudantes, que é a participação na construção e desenvolvimento dos sistemas. Sugerimos que o sistema aqui proposto seja desenvolvido como uma atividade em classe, a qual pode mesclar conceitos teóricos relacionados aos componentes usados e sua função no circuito a ser mon-

tado.

## O sistema: componentes e montagem

### Componentes

Para a construção do sistema, alguns itens devem ser adquiridos em lojas especializadas, ou, dependendo do caso, podem ser obtidos em sucatas de materiais e aparelhos eletrônicos. Basicamente, para a verificação experimental da Lei de Ohm precisamos de um voltímetro (para medida da voltagem), um amperímetro (para medida da corrente), uma fonte de voltagem (para alimentar o circuito) e o “elemento” a ser caracterizado, o qual pode ou não seguir a Lei de Ohm.

Vamos agora descrever cada componente e como usá-lo. O voltímetro e amperímetro podem ser adquiridos em lojas especializadas em material eletro-eletrônico ou até mesmo em lojas populares de “1,99”. Pode-se dizer que estas devem ser as preferidas pelo custo final do sistema. Normalmente, nestas lojas são vendidos multímetros muito

simples mas que incorporam as funções de amperímetro, voltímetro e ohmímetro, com custo variando entre R\$ 5,00 e R\$ 20,00. A utilização de um multímetro pode ser vantajosa, pois permite a utilização da função ohmímetro para confirmação dos dados obtidos pelas medidas de corrente e voltagem.

A fonte de voltagem é bastante simples e é composta de uma bateria

Este trabalho apresenta de maneira simples a construção de um sistema para medidas experimentais de corrente e voltagem para a comprovação e verificação da Lei de Ohm.

de 9 V e um potenciômetro (ou resistor variável) que também podem ser adquiridos em lojas de material eletrônico. Na verdade, o potenciômetro pode ser retirado de equipamentos eletrônicos antigos ou fora de uso: normalmente, estes resistores variáveis são usados em controles de volume ou de graves e agudos em equipamentos de som, por exemplo. Potenciômetros com valores entre  $1000\ \Omega$  a  $10.000\ \Omega$  podem ser usados. Não são recomendados potenciômetros com valores menores de resistência, pois eles podem descarregar a bateria muito rapidamente.

Finalmente, precisamos dos “elementos resistivos” a serem testados: podem ser usados resistores comerciais encontrados em lojas especializadas ou em equipamentos antigos, pedaços de madeira, de plástico ou uma solução salina (água + sal de cozinha), dentre muito outros.

### Montagem e experimentos

Na Fig. 1 pode-se ver o diagrama esquemático do nosso circuito com os dois multímetros (A e V), a fonte e um resistor de teste ( $R_x$ ). A fonte variável de voltagem é constituída de uma bateria de 9 V em série com o potenciômetro, como mostra a região destacada na Fig. 1.

Com a fonte, o voltímetro e o amperímetro prontos, falta apenas construir um suporte para a fixação dos elementos a serem testados. Para isso, dois percevejos e dois cliques serão suficientes, como pode ser visto na Fig. 2: qualquer componente a ser testado pode ser facilmente preso aos

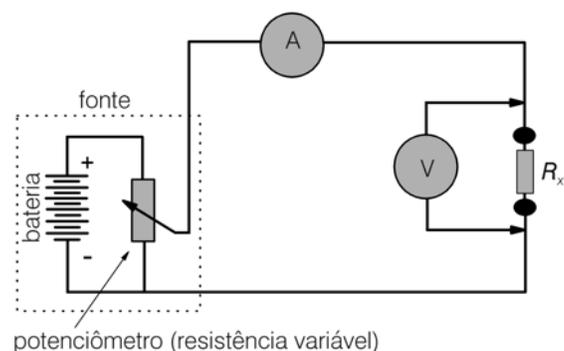


Figura 1. Diagrama esquemático do circuito com os dois multímetros (A, amperímetro e V, voltímetro), a fonte (bateria + potenciômetro) e um resistor de teste ( $R_x$ ).

clipes como se fosse uma folha de papel.

A critério dos professores, todo o conjunto pode ser deixado à vista para que os estudantes tenham a oportunidade de “ver” como o circuito funciona, ou acondicionar o sistema em uma caixa (de sapatos, por exemplo), deixando somente os mostradores dos multímetros, os cliques e o botão do potenciômetro à mostra. No primeiro caso, aconselhamos que cada componente seja ilustrado com um pequeno desenho como visto na Fig. 3, para que haja a imediata associação entre o dispositivo em si e sua representação em um esquema que descreve o circuito.

### Experimentos

Com o circuito montado, devemos colocar um “elemento” a ser testado entre os cliques de papel e verificar o que acontece com a voltagem e a corrente medidas sobre ele quando o potenciômetro é variado, alterando a voltagem aplicada. Aqui sugere-se ao professor usar resistores diferentes, por exemplo de  $1000\ \Omega$  e  $470\ \Omega$  e as associações entre eles, série e paralelo, um pedaço de plástico como um canudinho de refrigerante e um diodo (sistema não-ôhmico). Deve-se pedir aos estudantes que variem a voltagem para

cada um destes elementos, anotando a voltagem e a corrente em uma tabela. A partir desta tabela pode-se verificar a proporcionalidade entre  $I$  e  $U$  (que é a própria resistência  $R = U/I$ ) ponto a ponto, ou a não-linearidade no caso do plástico e do diodo. Melhor ainda é colocar os dados em uma folha de papel milimetrado com eixos de corrente e voltagem e verificar que  $U = RI$  é uma função linear ou de primeiro grau [1].

Fazendo um gráfico como o sugerido acima, pode-se extrair o valor da resistência da inclinação das curvas, as quais devem ser linhas retas. Ainda mais, se colocados em um mesmo gráfico as medidas experimentais para várias resistências, pode-se observar diretamente a relação entre a inclinação das curvas e o valor das

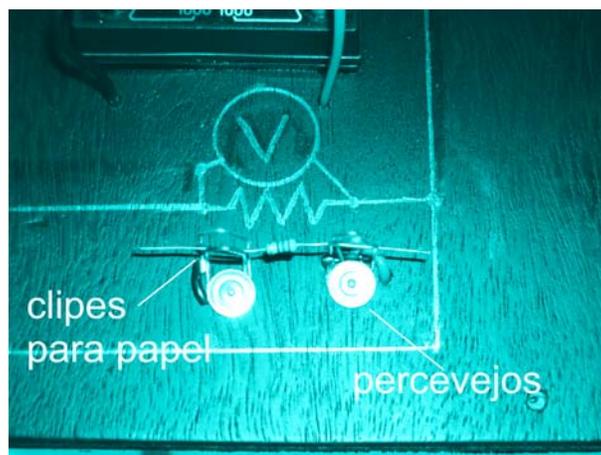


Figura 2. Fixação dos elementos a serem testados: dois percevejos e dois cliques.



Figura 3. Conjunto completo com desenhos ilustrativos de cada componente para que haja a imediata associação entre o dispositivo em si e sua representação em um esquema que descreve o circuito. Nosso protótipo foi montado em uma base de madeira de  $30 \times 15$  cm, mas nada impede que seja usado outro tipo de material.

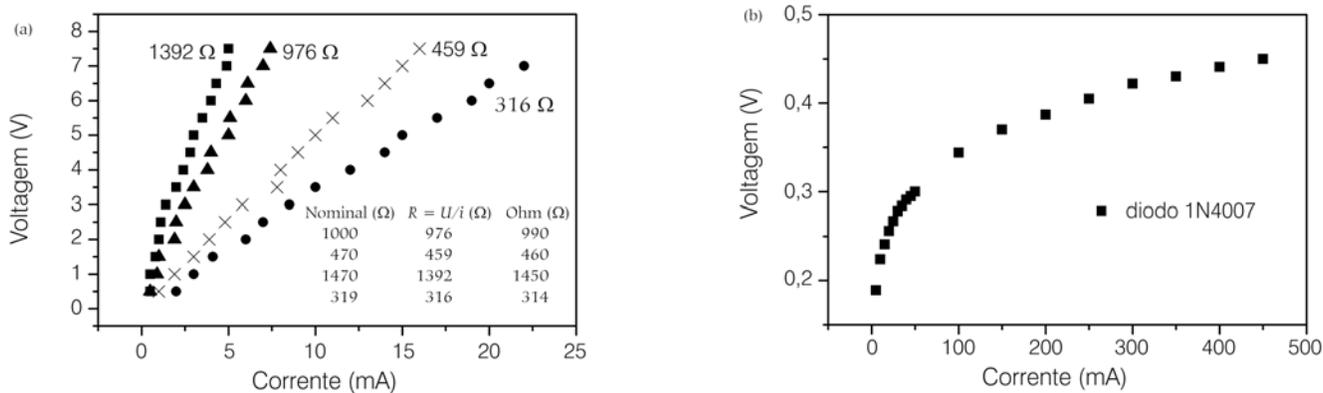


Figura 4. Curvas obtidas para resistores de 1000 Ω e 470 Ω e para associações em paralelo e em série entre estes resistores são mostradas no painel (a). Na tabela está uma comparação entre os valores nominais, medidos através das curvas e medidos pelo ohmímetro. Em (b) temos a curva obtida para um diodo do tipo 1N4007.

resistências. Como os multímetros usados têm possibilidade de medir a resistência diretamente através de sua função ohmímetro pode-se comparar os resultados das medidas de corrente e voltagem com a medida direta da resistência dos elementos usados. Na Fig. 4 estão as curvas correspondentes aos resistores de 1000 Ω e 470 Ω e às associações em paralelo e em série entre eles. Usando-se mais resistores,

**Como muitos multímetros de baixo custo são também de baixa qualidade, a abordagem da influência dos equipamentos de medida nos resultados obtidos pode consistir em um bom argumento para estudos mais avançados sobre o tema**

podemos ter várias combinações possíveis com associações em paralelo e/ou série, alterando a resistência final. Todos os experimentos devem ser acompanhados de exercícios nos quais são calculadas as resistências finais de cada associação usada.

Um experimento interessante e que pode animar os estudantes a procurar a solução do efeito por conta própria consiste na utilização de um diodo como elemento a ser testado. A dependência da corrente que circula no diodo em função da voltagem aplicada não é linear, apresentando uma dependência proporcional a um logaritmo natural [ $V = V_0 \ln(I)$ ]. Esta pode ser uma porta para introduzir aos estudantes a idéia de que a resistência/resistividade é uma propriedade que depende do material usado e, no caso do diodo, pode até mesmo ser controlada<sup>1</sup>.

A diferença entre os valores no-

minais e os obtidos para os valores das resistências reflete a qualidade dos multímetros (isso é facilmente verificado quando usamos o próprio multímetro na função ohmímetro, como na Fig. 4) e o fato de não usarmos uma fonte de voltagem de boa qualidade na qual seria possível o controle da corrente independentemente da voltagem. Um fator importante que deve ser conside-

rado é a escolha de valores de resistores que não sejam muito menores que o valor nominal do potenciômetro.

É importante destacar que devido à grande variedade de multímetros de baixo custo mas infelizmente de baixa qualidade que pode ser encontrada no mercado, certos cuidados devem ser tomados com o intuito de evitar um outro problema: normalmente, sem um elemento a ser testado entre os cliques de papel, a corrente deve permanecer nula quando a voltagem da bateria é variada. Entretanto, alguns multímetros não têm a necessária resistência de entrada muito alta (idealmente deveria ser infinita) para evitar que o próprio circuito interno do voltímetro influencie os resultados [1]. Na maioria das vezes pode-se corrigir este problema escolhendo-se uma escala de correntes que

seja maior que a de 5 mA. A abordagem da influência dos equipamentos de medida nos resultados obtidos pode consistir em um bom argumento para estudos mais avançados sobre o tema.

## Conclusão

Através de um sistema simples e de baixo custo, mostramos como montar um circuito para medidas experimentais de corrente e voltagem e através delas mostrar a validade da Lei de Ohm para elementos lineares. Através do circuito, podem ser explorados os conceitos de isolantes, condutores, condutores não-lineares e de associações de resistências. Ainda, pode-se usar os dados colhidos pelos estudantes para exercitar a representação de grandezas físicas em gráficos e analisá-los em busca de informações relevantes sobre o sistema estudado.

## Nota

<sup>1</sup>Um diodo é um dispositivo largamente usado em equipamentos eletrônicos para muitas funções, sendo a mais conhecida e simples a retificação de corrente alternada. O diodo tem a propriedade de conduzir corrente em um sentido e bloqueá-la no sentido inverso.

## Bibliografia

- [1] F. Ramalho Jr., N.G. Ferraro e P.A.T. Soares, *Os Fundamentos da Física - Eletricidade* (Editora Moderna, São Paulo, 1994).

# Aprendendo Física com o Homem-Aranha: Utilizando Cenas do Filme para Discutir Conceitos de Física no Ensino Médio

*Grandes poderes trazem grandes responsabilidades.*

Peter Parker

.....  
**Luciano Denardin de Oliveira**  
Colégio Monteiro Lobato e Anglo  
vestibulares, Porto Alegre  
e-mail: denardin@cpovo.net  
.....

## Introdução

Através da análise de livros didáticos e observação de aulas, sabe-se que são três as atividades que predominam no ensino da Física: aulas expositivas, resolução de exercícios e problemas e, com menor incidência, atividades experimentais de roteiro fechado, estilo *receita de bolo*. Verifica-se que o conteúdo trabalhado pelo professor dificilmente é relacionado com o cotidiano do aluno [1].

Em alerta para um ensino *cada vez mais pobre*, Menezes e Vaz [2] mostram a necessidade do professor em inovar na sua prática pedagógica. Discutem que muitas instituições de ensino acreditam na eficiência de

**A maneira como a Física é trabalhada atualmente está muito distante dos interesses e do dia-a-dia do aluno; inovar, com atividades que possam atingir alunos que não são motivados pelo formato tradicional de ensino é um novo desafio que se impõe ao professor**

uma educação tradicional e que inúmeros alunos não gostam e não têm motivação em aprender Física por não a entenderem, uma vez que são levados a decorar fórmulas e resolver repetidas vezes problemas que não lhes fazem o menor sentido. A maneira como a Física é trabalhada atualmente está muito distante dos interesses e do dia-a-dia do aluno.

Os exemplos acima são uma pequena amostra da necessidade do professor em inovar, em apresentar atividades que possam atingir alunos que não são motivados pelo formato

tradicional de ensino, enfim, práticas não usuais que permitam ao aluno a construção do conhecimento com propriedade.

Alguns exemplos de práticas inovadoras são: a realização de atividades de investigação por parte dos alunos em um museu interativo de Ciências e Tecnologia [3], a inserção de jogos em aulas de Física [4], a utilização de laudos periciais de acidentes de trânsito para a abordagem de conceitos de Física [5], a manipulação

de “tirinhas” no ensino da Física [6], o uso de livros de ficção científica para desenvolver conceitos em ciências [7] e a análise dos poderes dos super-heróis sob a ótica da Física [8].

O uso de filmes, sejam eles didáticos ou não, tem se mos-

trado uma ferramenta útil e versátil para o ensino da Física. Confeção de vídeos didáticos e sua utilização em sala de aula [9], a criação de um espaço no currículo escolar para a discussão de conceitos físicos via análise de filmes de ficção científica paralelamente ao ensino formal [10], a utilização de cenas de filmes associada a simulações computacionais que discutam conceitos de Física [11] e o uso de cenas como motivador para o ensino de fluidos [12] são exemplos da aplicação dessa ferramenta.

Neste trabalho apresenta-se a

Este trabalho analisa e discute cenas do filme Homem-Aranha e sugere a abordagem de algumas cenas para introduzir conceitos de Física no Ensino Médio.



Figura 1. Em A e B observa-se a distância entre a teia lançada por Peter Parker e o guindaste onde essa é presa e o momento em que ele se prepara para saltar. A seqüência de posições C, D e E ilustram o movimento pendular descrito, correspondendo a 1/4 de uma oscilação completa.

utilização de cenas do filme *Homem-Aranha*<sup>1</sup> com alunos do Ensino Médio, bem como o uso do *timer* do aparelho de vídeo cassete/ DVD como medidor de tempo. Da exibição das cenas decorreram uma discussão e uma análise qualitativa e quantitativa dos conceitos presentes nessas cenas e de situações que vão contra alguns princípios da Física. Não é o objetivo desse trabalho apontar erros que não sejam relativos aos fenômenos físicos (*i.e.* erros de continuidade) do filme. Caso o leitor tenha interesse nesse tipo de erro, poderá consultar a internet [13].

## Análise de Cenas

### Cena 1: Pêndulo

Essa cena ocorre após aproximadamente 27 minutos de filme, quando Peter Parker irá, pela primeira vez, balançar-se utilizando sua teia. O herói encontra-se no topo de um prédio e lança a teia de modo que ela fique presa na haste de um guindaste, onde abaixo deste existe um painel. A Fig. 1A mostra Peter Parker mirando a teia no guindaste. Nessa imagem pode-se ter uma noção da distância entre Peter e o painel. A Fig. 1B apresenta Peter se preparando para pular, onde se vê ao fundo o painel e na extremidade inferior direita o pé de Peter Parker. As Figs. 1C e 1D apresentam uma seqüência das posições de Peter nos diferentes instantes de tempo. A Fig. 1E mostra o momento no qual Peter colide com o painel.

Observando a Fig. 2, pode-se estimar o comprimento da teia lançada por Peter, uma vez que se tem conhecimento dos pontos onde ela foi presa e da colisão dele com o painel. Para poder aplicar essa situação no Ensino Médio, consideraremos que o sistema *teia-Peter Parker* constitui um pêndulo simples de pequena amplitude<sup>2</sup>.

Pelo fato do painel encontrar-se abaixo do ponto de fixação da teia, pode-se concluir que o pêndulo oscila em um intervalo de tempo que corresponde a um quarto de um período. Utilizando o cronômetro do vídeo cassete ou DVD que reproduz o filme, verifica-se que esse intervalo de tempo é de aproximadamente 10 s. Como Peter tenta reduzir sua rapidez<sup>3</sup> colocando os pés no chão antes de colidir com o painel, pode-se estimar em 7 s o intervalo de tempo necessário para percorrer tal arco (essa é uma boa estimativa, uma vez que passam 6 s até Peter colocar os pés no chão, tentando uma frenagem). Esse intervalo de tempo corresponde a apenas 1/4 do período, logo o período do pêndulo para esse caso é de 28 s. Aplicando a equação do período do pêndulo verifica-se que o comprimento do fio é aproximadamente de 200 m, que corresponde a um valor elevado frente às dimensões observadas nas imagens! Essa cena pode ser utilizada para exemplificar uma aplicação da equação do período do pêndulo (que a propósito é muito mais interessante do que resolver um exercício numérico qualquer). Pode-se ainda discutir os motivos pelos quais esse sistema não é considerado um pêndulo simples.

### Cena 2: Uma questão de inércia

Próximo dos 46 minutos de filme tem-se uma seqüência onde o Homem-Aranha persegue o assassino de seu tio. Em determinado momento o herói salta do carro do bandido (que se encontra a uma velocidade significativa, uma vez que está fugindo da polícia) para cima de um caminhão também em movimento. Observando a cena, verifica-se que as velocidades do carro e do caminhão são semelhantes. Ao perceber que uma ponte (ou viaduto)

está em seu caminho, Peter Parker salta por cima desta enquanto o caminhão segue por baixo. Três segundos depois o Homem-Aranha retorna para o caminhão. As Figs. 3A e 3B apresentam o Homem-Aranha sobre o caminhão, preparando-se para saltar por cima da ponte. As Figs. 3C, 3D, 3E e 3F ilustram uma seqüência de imagens mostrando as posições da trajetória descrita pelo herói aracnídeo enquanto ele realiza seu salto. A Fig. 3G mostra o Homem-Aranha caindo novamente sobre o caminhão.

Para um observador em repouso, na rua, por exemplo, a trajetória descrita pelo Homem-Aranha deveria ser uma parábola, o que de fato ocorre. Considerando que o Homem-Aranha

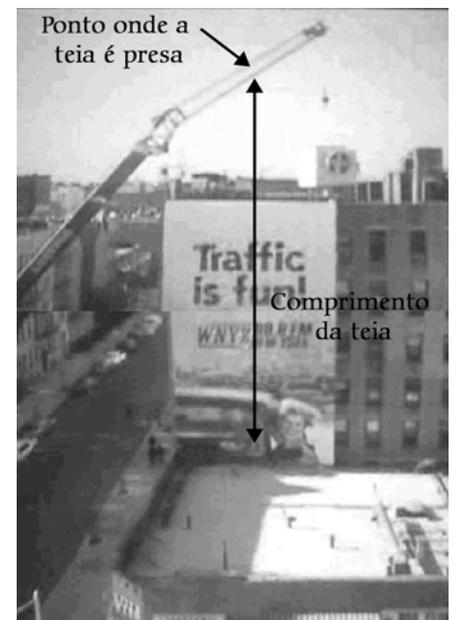


Figura 2. Pode-se observar o ponto onde a teia é fixada. Tendo conhecimento do ponto onde Peter Parker colide com o painel, estima-se o comprimento da teia. Utilizando o *timer* do DVD, é aproximadamente 28 s o tempo para uma oscilação completa, o que corresponderia a um pêndulo de comprimento 200 m, um valor muito maior do que o observado na imagem.

possui a mesma velocidade do veículo, por uma questão de inércia o herói, para retornar ao caminhão após saltar, deveria apenas pular verticalmente para cima, e não se impulsionar diagonalmente para frente, como as Figs. 3C, 3D, 3E e 3F sugerem. Pelas imagens da cena, ele cairia em um ponto à frente do caminhão, podendo até ser atropelado pelo mesmo!

Considerando que o caminhão mantém sua velocidade constante, que a ponte tem uma largura máxima de aproximadamente 25 m (quando o Homem-Aranha salta, verifica-se que a ponte possui 6 pistas para tráfego de veículos, logo esse valor é apropriado) e que o intervalo de tem-

po decorrido para o Homem-Aranha saltar sobre a ponte é de 3 s, pode-se estimar a rapidez do caminhão em 30 km/h. Esse valor é muito pequeno para um caminhão que tinha a mesma velocidade de um veículo que foge rapidamente da polícia! Observe que não é necessário considerar o comprimento do caminhão, uma vez que o Homem-Aranha, ao retornar de seu salto, cai no mesmo ponto de onde partiu.

### Cena 3: Queda-livre

Essa cena ocorre a partir de 1 hora e 4 minutos de filme. Inicialmente observa-se Peter Parker utilizando uma máquina fotográfica. Logo após apa-

recer uma cantora, tem-se uma visão panorâmica de um prédio, onde em sua sacada encontra-se Mary Jane. Em determinado momento da cena, Mary Jane cai da sacada desse arranha-céu. Observando a Fig. 4, pode-se identificar a localização de Mary Jane, bem como estimar a altura entre a sacada e o chão em um valor entre 40 e 60 m.

A Fig. 5 apresenta uma seqüência de imagens da queda de Mary Jane e do resgate desta pelo Homem-Aranha. No canto inferior esquerdo de cada imagem foi colocado um cronômetro que representa o instante de tempo da respectiva imagem em relação ao início da queda de Mary Jane. Da mesma forma que na análise da cena anterior, esta medida de tempo foi obtida utilizando o cronômetro do aparelho que reproduz o filme. A Fig. 5A apresenta o instante em que Mary Jane começa a cair da sacada. Observe que o Homem-Aranha está em um plano superior ao de Mary Jane. As Figs. 5B e 5C ilustram o momento em que o Homem-Aranha salta para salvá-la. Veja que ela não aparece mais nestas imagens, obviamente por se encontrar numa posição mais baixa que o Homem-Aranha. A Fig. 5D dá uma idéia da distância entre o Homem-Aranha e Mary Jane 3 s após ela iniciar a queda. A Fig. 5E apresenta uma tomada do Homem-Aranha após 5 s de queda e para a alegria de todos, em 7 s o intrépido herói consegue alcançar a garota indefesa, virando-se e lançando uma teia para o alto. A teia se fixa em uma sacada, fazendo com que a chegada no chão seja suave.

Essa cena permite uma abordagem qualitativa e outra quantitativa. Considerando que o movimento seja de queda-livre (essa é a abordagem usual no Ensino Médio), o Homem-Aranha jamais poderia alcançar a Mary Jane, uma vez que ambos caem com a mesma aceleração (a aceleração gravitacional). Considerando a resistência do ar e o fato do Homem-Aranha estar em uma posição mais "aerodinâmica" que Mary Jane, pode-se desenvolver junto aos alunos uma frutífera discussão acerca da possibilidade do Homem-Aranha alcançar Mary Jane, bem como se ela atinge a velocidade terminal nessas dezenas de metros de queda.

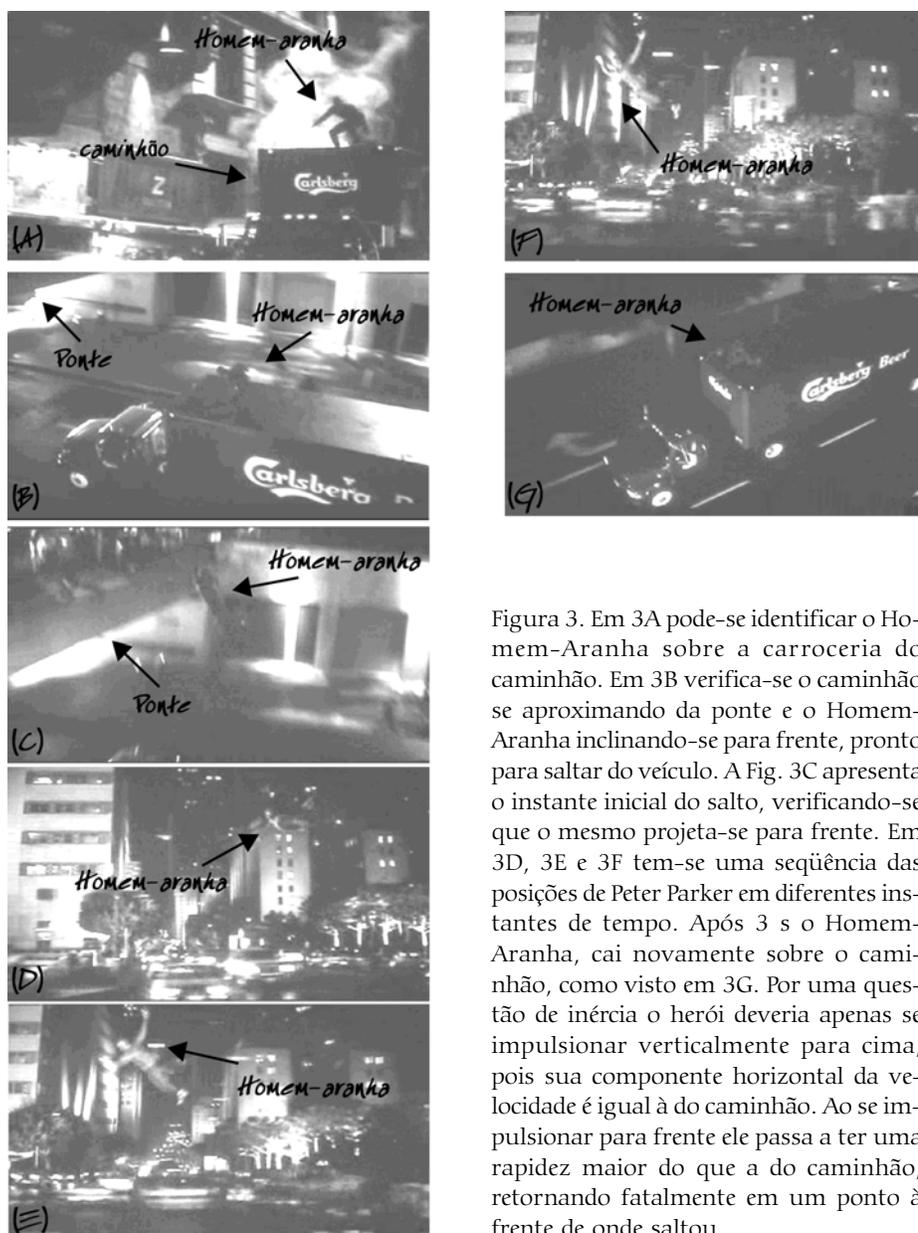


Figura 3. Em 3A pode-se identificar o Homem-Aranha sobre a carroceria do caminhão. Em 3B verifica-se o caminhão se aproximando da ponte e o Homem-Aranha inclinando-se para frente, pronto para saltar do veículo. A Fig. 3C apresenta o instante inicial do salto, verificando-se que o mesmo projeta-se para frente. Em 3D, 3E e 3F tem-se uma seqüência das posições de Peter Parker em diferentes instantes de tempo. Após 3 s o Homem-Aranha, cai novamente sobre o caminhão, como visto em 3G. Por uma questão de inércia o herói deveria apenas se impulsionar verticalmente para cima, pois sua componente horizontal da velocidade é igual à do caminhão. Ao se impulsionar para frente ele passa a ter uma rapidez maior do que a do caminhão, retornando fatalmente em um ponto à frente de onde saltou.

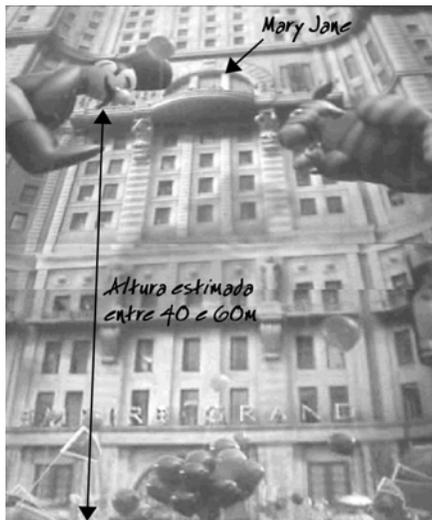


Figura 4. Uma visão panorâmica do prédio onde Mary Jane encontra-se. Nessa imagem pode-se observar a sacada onde está a garota, bem como estimar a altura desta ao chão.

Pode-se determinar a altura da queda de Mary Jane utilizando uma equação típica de queda-livre. Considerando a velocidade inicial nula e o módulo da aceleração gravitacional igual a  $10 \text{ m/s}^2$ , verifica-se que para um intervalo de tempo de  $8 \text{ s}^4$ , a altura de queda é de  $320 \text{ m}$ , um valor muito além do estimado!

### Outras cenas

Como a idéia desse trabalho é sugerir a utilização do filme como elemento motivador no ensino da Física e apresentar a metodologia na abordagem de cenas do filme, principalmente na sugestão do uso do cronômetro do vídeo-cassete ou DVD como instrumento para a medida de intervalos de tempo, permitindo assim análises quantitativas e para não torná-lo demasiadamente extenso, outras cenas úteis para discussão serão apenas citadas, podendo ser exploradas pelo leitor, se assim julgar pertinente.

É possível, durante a análise das cenas, fazer uso de um sistema de escalas. Na tomada da queda de Mary Jane, por exemplo, pode-se estimar o tamanho de uma janela. Utilizando uma régua, verifica-se o comprimento desta e cria-se assim uma escala. Mede-se depois, com a mesma régua, a altura da sacada até o chão, e fazendo uso da escala criada tem-se um

valor aproximado dessa distância.

Em relação às cenas, pode-se, por exemplo, explorar mais a cena do Homem-Aranha pulando do caminhão sobre a ponte. É possível estimar o módulo da componente vertical da velocidade inicial do herói aracnídeo e conseqüentemente a altura máxima que ele atinge. Estimando o ângulo de inclinação no momento do salto, é possível determinar a intensidade da velocidade inicial do Homem-Aranha e o valor da componente horizontal dessa velocidade, utilizando assim as equações do lançamento oblíquo. Através da dinâmica impulsiva, pode-

se estimar a força que o herói exerce sobre o caminhão no instante do salto.

No final do filme (cena da Mary Jane na ponte) o Homem-Aranha encontra-se suspenso à teia e segurando um bonde. Pode-se estimar a massa do bonde (considerando os passageiros) e determinar a tensão na teia e/ou a força realizada pelo braço do herói (segundo a Marvel Comics o Homem-Aranha suporta uma massa de até 10 toneladas!!!).

Em cenas onde o Homem-Aranha passeia pela cidade balançando-se de teia em teia, muitas vezes ele lança uma teia completando meia oscilação

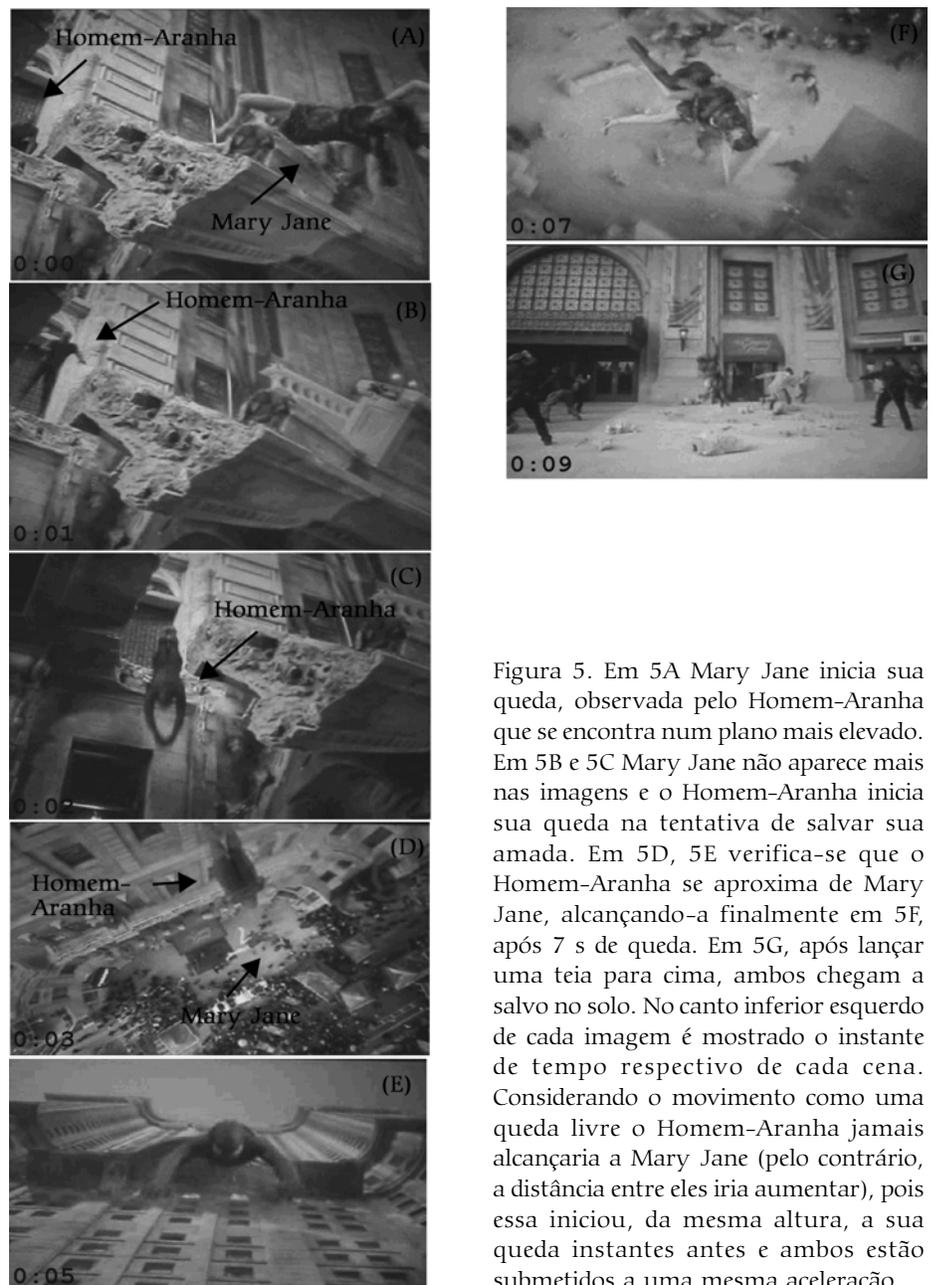


Figura 5. Em 5A Mary Jane inicia sua queda, observada pelo Homem-Aranha que se encontra num plano mais elevado. Em 5B e 5C Mary Jane não aparece mais nas imagens e o Homem-Aranha inicia sua queda na tentativa de salvar sua amada. Em 5D, 5E verifica-se que o Homem-Aranha se aproxima de Mary Jane, alcançando-a finalmente em 5F, após 7 s de queda. Em 5G, após lançar uma teia para cima, ambos chegam a salvo no solo. No canto inferior esquerdo de cada imagem é mostrado o instante de tempo respectivo de cada cena. Considerando o movimento como uma queda livre o Homem-Aranha jamais alcançaria a Mary Jane (pelo contrário, a distância entre eles iria aumentar), pois essa iniciou, da mesma altura, a sua queda instantes antes e ambos estão submetidos a uma mesma aceleração.

em um ponto muito mais alto em relação ao ponto onde partiu, contrariando visivelmente o princípio da conservação da energia.

Esses são apenas alguns exemplos. Se o leitor encontrar outras cenas interessantes o autor desse artigo ficaria feliz em compartilhá-las!

## Conclusão

Milhares de adolescentes assistiram esse filme quando o mesmo foi lançado para o cinema. Por se tratar de um super-herói adolescente, tímido, com espinhas no rosto e um ótimo senso de humor, a identificação dos adolescentes com o Homem-Aranha, desde a época das histórias em quadrinhos até sua versão para o cinema, é um fato marcante. A utilização de filmes em sala de aula também tem se mostrada eficiente ferramenta na prática pedagógica. Por essas e outras razões acredita-se que discutir essas cenas com os alunos do Ensino Médio

terá grande aceitação pelos mesmos. Desde o lançamento do filme em 2002 o autor desse trabalho vem analisando essas cenas junto com seus alunos do Ensino Médio e os resultados sempre são satisfatórios, onde a motivação, o grau de interesse e o nível de discussão dos estudantes são sempre muito elevados. Sendo assim, acreditamos que essa atividade é válida para a abordagem dos tópicos aqui apresentados.

Um fato importante que deve ser discutido é a questão da idealização. Nas abordagens sugeridas, procurou-se sempre um sistema ideal. Evidente que essas situações são utópicas, porém os problemas que constituem as listas de exercícios dos alunos no Ensino Médio também apresentam essa idealização. Sendo assim, acreditamos

**A utilização de filmes em sala de aula é uma eficiente ferramenta na prática pedagógica. Assim, a discussão dessas cenas com os alunos terá grande aceitação pelos mesmos**

ser pertinente realizar essas aproximações, bem como discutir até que ponto elas são válidas. As medidas de altura e de tempo também são variáveis que permitem erros. Destarte, acreditamos que a abordagem quantitativa

contém um erro significativo nos valores obtidos, todavia sua aplicação é útil, pois ilustra, apesar dos erros das medidas, a discrepância das cenas com a realidade, fatos

esses que os alunos adoram. Verifica-se que a abordagem qualitativa permite uma discussão muito mais rica. Pode-se por exemplo, abordar os fatores que levam aos possíveis erros nos cálculos, a questão da idealização de um modelo frente a uma situação real e, é claro, de permitir uma abordagem diferente de temas desenvolvidos no Ensino Médio.

## Notas

<sup>1</sup>Homem-Aranha (Spider-man), EUA, 2002. De Sam Raimi, com Tobey Maguire, Willem Dafoe e Kirsten Dunst. 121 mim, Columbia Pictures. O título é facilmente encontrado em vídeo-locadoras.

<sup>2</sup>O sistema em questão não constitui um pêndulo simples de pequenas amplitudes por alguns motivos: A massa não é pontual e a amplitude não é pequena (o ângulo  $\theta$  entre o fio e a vertical não é aproximadamente igual a  $\text{sen}\theta$ ). Acreditamos que para a aplicação no ensino médio esse exemplo possa ser utilizado até como elemento motivador para a discussão dessa idealização.

<sup>3</sup>Usualmente os livros brasileiros utilizam o termo velocidade escalar média. Velocidade é uma grandeza vetorial, logo, chamá-la de escalar, não tem significado físico, não faz sentido. Usa-se aqui o termo rapidez para expressar o módulo da velocidade, considerando que desta maneira fica mais clara a grandeza que se deseja expressar. Livros de língua inglesa denominam *velocity* para expressar velocidade e *speed* a *intensidade* dessa. A tradução do livro *Conceptual Physics* para o português [14] apresenta pela primeira vez (pelo menos para conhecimento do autor deste artigo) o termo rapidez!

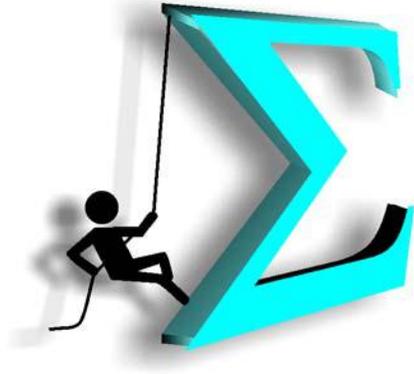
<sup>4</sup>Consideramos 8 s pois na Fig. 4A Mary Jane ainda encontra-se na sacada. Observando a cena do filme, verifica-se claramente que esse intervalo de tempo é próximo de 8 s.

## Referências

- [1] C.L. Hernandes, L. Clement e E.A. Terrazzan, Uma atividade experimental investigativa de roteiro aberto partindo de situações do cotidiano. In: D.M. Vianna, L.O.Q. Peduzzi, O.N. Borges e R. Nardi (orgs.). Atas do VIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. SBF, São Paulo, 2002 (CD-Rom).
- [2] P.H.D. Menezes e A.M. Vaz, Tradição e inovação no ensino de física: a influência da formação e profissionalização docente. In: D.M. Vianna, L.O.Q. Peduzzi, O.N. Borges e R. Nardi (orgs.). Atas do VIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. SBF, São Paulo, 2002 (CD-Rom).
- [3] L.D. Oliveira, C. Galli e L.M. Scolari, Atividades interativas de Física no museu de ciências como parte do currículo escolar. In: D.M. Vianna, L.O.Q. Peduzzi, O.N. Borges e R. Nardi (orgs.). Atas do VIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. SBF, São Paulo, 2002 (CD-Rom).
- [4] M.C. Ferreira e L.M.O. Carvalho, O jogo como avaliação formativa: questões sobre o conceito de pressão. In: D.M. Vianna, L.O.Q. Peduzzi, O.N. Borges e R. Nardi (orgs.). Atas do VIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. SBF, São Paulo, 2002 (CD-Rom).
- [5] C.L. Levada e P.R. Ferrari, Colisões entre veículos – Opção técnica para ensino de mecânica. In: Anais da 52ª Reunião Anual da SBPC, 2000, Brasília.
- [6] F.L.A. Pena, Como trabalhar com ‘tirinhas’ nas Aulas de Física. *Física na Escola* **4**(2), 20 (2003).
- [7] L.P.C. Piassi e M.P.P. Oliveira, *Ficção científica*

no ensino de Física: Utilizando um romance para desenvolver conceitos. Atas do XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física. SBF, São Paulo, 2005.

- [8] L.D. Oliveira, A super-física dos super-heróis: Projetos, física e super-poderes. Atas do XVI Simpósio Nacional de ensino de Física. SBF, São Paulo, 2005.
- [9] D.A. Vergara e B. Buchweitz, Ensinando e aprendendo o fenômeno de reflexão da luz com a ajuda de um vídeo. In: D.M. Vianna, L.O.Q. Peduzzi, O.N. Borges e R. Nardi (orgs.). Atas do VIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. SBF, São Paulo, 2002 (CD-Rom).
- [10] R.A.F. Ferreira, L.F. Silva e C.P. Mendonça, A Física nos filmes de ficção científica: Uma proposta de motivação para o estudo da Física. Atas do XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física. SBF, São Paulo, 2005.
- [11] W. Souza e L.F. Moreira, 007-Permissão para educar: Uma aplicação de recursos de mídia no ensino da Física. Atas do XVI Simpósio Nacional de ensino de Física. SBF, São Paulo, 2005.
- [12] A.B. Clebsch e P.M. Mors, Explorando recursos simples de informática e audiovisuais: Uma experiência no ensino de Fluidos. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **26**, 323 (2005).
- [13] <http://www.falhanossa.com.br/HomemAranha.htm> (acessado em 20/07/2006).
- [14] Hewitt, P.G. *Física Conceitual* 9ª edição (Editora Bookman, Porto Alegre, 2002), 685 p.



# Problemas Olímpicos

## Soluções dos problemas anteriores

1 Uma fonte DC de voltagem  $E_0$  com resistência interna  $r$  conectada a um dispositivo de resistência  $R_L$ .

i) Seja  $I$  a corrente no circuito. A potência total será  $P_T = E_0 I$ . A potência útil é  $P_U = E_0 I - rI^2 = I^2 R_L$ .

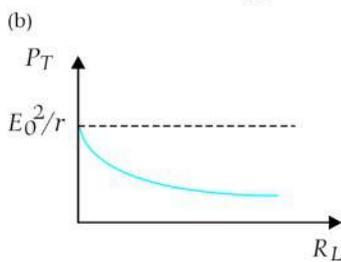
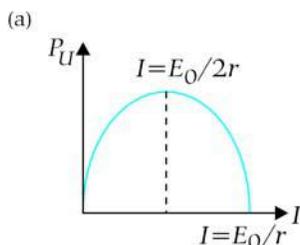
ii) Da lei das malhas,

$$I = \frac{E_0}{R_L + r}.$$

A tensão no resistor será, portanto:

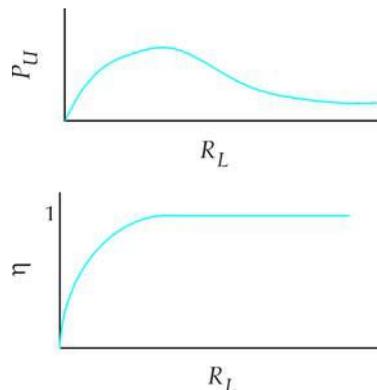
$$r = (E_0 - V_L)/I.$$

iii)



Eficiência:

$$\eta = \frac{P_U}{P_T} = \frac{R_L}{R_L + r}.$$



$$P_U = I^2 R_L = \frac{E_0^2 R_L}{(R_L + r)^2}$$

2 Um líquido de calor específico conhecido e um cristal que não se dissolve no líquido. Determine o ponto de fusão e o calor específico do cristal.

Devemos seguir os seguintes passos:

i) Divida o líquido em duas porções iguais.

ii) Aqueça a primeira porção do líquido usando o aquecedor elétrico. Registre a temperatura como função do tempo. Faça um gráfico da temperatura da primeira porção do líquido como função do tempo.

iii) Derrame o cristal na segunda porção do líquido. Aqueça o líquido como antes.

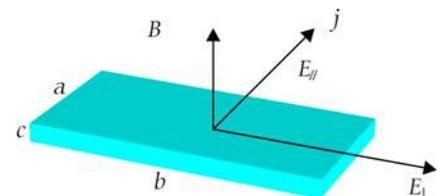
iv) Registre a temperatura como função do tempo, e faça um gráfico

da temperatura contra tempo.

v) Das duas curvas, o ponto de fusão e o calor específico do cristal podem ser determinados.

3 Um paralelepípedo de lados  $a$ ,  $b$  e  $c$  ( $a \gg b$ ,  $b \gg c$ ) feito do semiconductor InSb, percorrido por uma corrente  $I$  ao longo da direção  $a$  e sujeito a um campo magnético externo  $\mathbf{B}$  que é paralelo ao lado  $c$ .

Consideremos o esboço abaixo e lembremo-nos que a direção de movimento dos elétrons é oposta ao da corrente por unidade de área  $j$ .



a) cálculo da velocidade dos elétrons:

$I = j \cdot s$ , sendo  $j$  a densidade de corrente e  $s$  a área normal a corrente aplicada.

$$I = nevbc \rightarrow$$

$$v = \frac{I}{n \cdot e \cdot b \cdot c} = 25 \text{ m/s}.$$

Seja  $E_{\parallel}$  a componente do campo elétrico paralelo à direção de  $v$ . Assim,

$$E_{\parallel} = \frac{v}{\mu} = 3,2 \text{ V/m}.$$

Usando a expressão da força de Lorentz:  $|\mathbf{E}_{\perp}| = |\mathbf{v}| \times |\mathbf{B}| = 2,5 \text{ V/m}$ . Magnitude do campo elétrico:

$$|E| = \sqrt{E_{\parallel}^2 + E_{\perp}^2} = 4.06 \text{ V/m.}$$

A diferença de potencial segue diretamente de  $V_H = E_{\perp} b = 25 \text{ mV}$ .

Sua dependência com o tempo é

$$V_H = E_{\perp} b = v \cdot B \cdot b =$$

$$\frac{I_0 B_0 b}{2 n \cdot e \cdot b \cdot c} (\cos(2\omega t + \delta) + \cos(\delta))$$

A componente DC de  $V_H$  é então

$$V_H = \frac{I_0 B_0 b}{2 n \cdot e \cdot b \cdot c}$$

O Wattômetro deve operar como segue:

1. Conecte um sinal AC ao circuito consistindo de uma carga e uma bobina de indução que produz um campo  $B_0$ . Escolha uma corrente de pico igual a componente DC de  $I_0$  para ser usado no item 2. Meça a voltagem Hall.

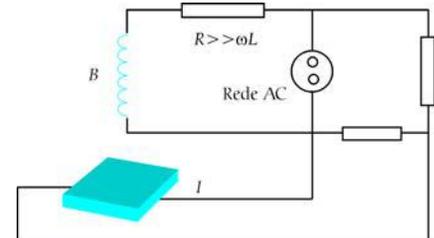
2. Conecte o sinal DC ao circuito consistindo de uma carga e uma bobina de indução que produz um campo magnético  $B_0$ . Use a componente DC igual a corrente de pico  $I_0$ . Meça a voltagem de Hall.

$$\text{De 1: } V_{H-1} = \frac{I_0 B_0 b \cos(\delta)}{2 n \cdot e \cdot c}$$

$$\text{De 2: } V_{H-2} = \frac{I_0 B_0 b}{2 n \cdot e \cdot c}$$

$$\text{Wattagem: } W = VI \cos(\delta).$$

Os valores de  $V$  e  $I$  são medidos pelo voltímetro e amperímetro, enquanto  $\cos(\delta)$  é conhecido do experimento.



## Novos Problemas

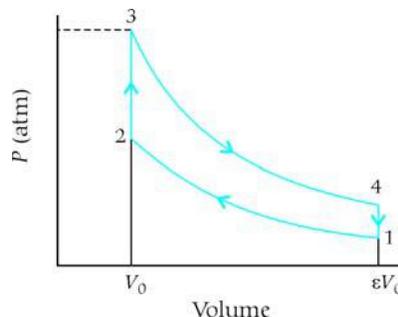
**1** Uma partícula de carga positiva  $Q$  está fixa em um ponto  $P$ . Uma segunda partícula de massa  $m$  e carga negativa  $q$  move-se a velocidade constante em um círculo de raio  $r_1$  centrado em  $P$ . Derive uma expressão para o trabalho  $W$  que deve ser efetuado por um agente externo sobre a segunda partícula, de modo a aumentar até  $r_2$  o raio do círculo de movimento centrado em  $P$ .

(Física 3, D. Halliday e R. Resnick)

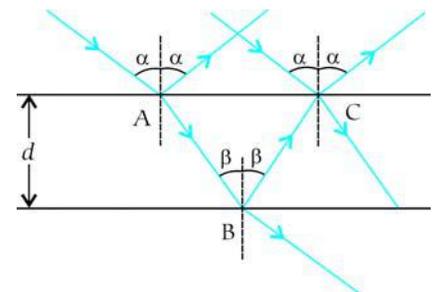
**2** A razão de compressão de um motor de combustão interna de quatro tempos é igual a 9.5. O motor recebe ar e gasolina a uma temperatura de  $27^\circ\text{C}$ , tendo volume  $V_0$  e pressão de 1 atm, ou 100 kPa. O volume é então comprimido adiabaticamente do estado 1 para o estado 2. A mistura de combustível sofre uma ignição causando a explosão que dobra o volume (estados 2-3), movendo então o pistão para a posição no

estado 3. Do estado 3 para o estado 4 a mistura de gases sofre nova expansão adiabática até que o volume torna-se  $9.5V_0$  quando a válvula de exaustão no cilindro é aberta fazendo com que a pressão no cilindro retorne a 1 atm. (Razão de compressão  $\epsilon$  é a razão entre os valores máximo e mínimo do volume do cilindro e  $\gamma = C_p/C_v = 1.4$ ). Determine: a) a pressão e a temperatura da mistura gasosa nos estados 1, 2, 3 e 4, respectivamente. B) A eficiência térmica do ciclo.

(X Olimpíada Internacional de Física - Czechoslovakia - 1977)



**3** Luz branca incide em um filme fino de sabão fazendo um ângulo  $\alpha = 30^\circ$  com a normal. A luz refletida é predominantemente verde de comprimento de onda de  $0.5 \mu\text{m}$ .



i) Qual é o mínimo valor da espessura do filme de sabão para que o fenômeno descrito acima ocorra?

ii) Que cor é vista se o filme for visto da posição vertical?

(X Olimpíada Internacional de Física - Czechoslovakia - 1977)

## Na Prateleira

O leitor mais interessado poderá encontrar uma vasta quantidade de livros a respeito de Santos-Dumont, além de três títulos escritos pelo próprio inventor. Alguns deles certamente estão fora de catálogo, mas fica o desafio àqueles que costumam visitar “sebos”; agradáveis surpresas poderão advir das suas próximas “escavações”.

**Alberto Santos Dumont**, *A Conquista do Ar pelo Aeronauta Brasileiro Santos Dumont* (Aillaud & Cia. Paris, Paris, 1901), fac-símile in Henrique Lins de Barros, 2003.

**Alberto Santos Dumont**, *O Que Eu Vi. O Que Veremos* (Editora Hedra, São Paulo, 2002).

**Alberto Santos Dumont**, *Os Meus Balões* (Fundação Projeto Rondon, Brasília, 1986).

Adriano Batista Dias, *Santos Dumont, O Inovador* (Vieira & Lent, Rio de Janeiro, 2006).

Alcy Cheuiche, *Nos céus de Paris - O Romance da Vida de Santos-Dumont* (L&PM, Porto Alegre, 2001).

Alexandre Brigole, *Santos-Dumont: The Air Pioneer* (Imprensa Nacional, Rio de Janeiro, 1943).

Alexandre Medeiros, *Santos Dumont e a Física do Cotidiano* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006).

Aluizio Napoleão, *Santos-Dumont e a Conquista do Ar* (Itatiaia, Belo Horizonte, 1988).

Antonio Sodré, *Santos Dumont - Um Herói Brasileiro* (Arindiuva, São Paulo, 2006).

Cláudio Blanc, *Santos Dumont: O Brasileiro Deu Asas à Humanidade* (Instituto Brasileiro de Cultura Ltda., São Paulo, 2005).

Claudio Luchesi, *Loucos e Heróis:*

*Fatos e Curiosidades da História da Aviação* (Lemos Editorial e Gráficos, Rio de Janeiro, 1996).

Fernando Hypollito da Costa, *Santos-Dumont: História e Iconografia* (Itatiaia, Belo Horizonte, 1990).

Fernando Jorge, *As Lutas, a Glória e o Martírio de Santos Dumont* (T.A. Queiroz Editor, São Paulo, 2003).

Francisco Pereira Silva, *Santos Dumont* (Editora Três, São Paulo, 2003).

Gondin da Fonseca, *Santos Dumont* (Livraria São José, Rio de Janeiro, 1956).

Henrique Dumont Villares, *Quem Deu Asas ao Homem* (MEC, Rio de Janeiro, 1957).

Henrique Dumont Villares, *Santos Dumont: O Pai da Aviação* (Melhoramentos, São Paulo, 1956).

Henrique Fleiuss, *Santos Dumont (1906-1955): Cinquentenário do Primeiro Vôo em Avião* (Serviço Gráfico IBGE, Rio de Janeiro, 1956).

Henrique Lins de Barros, *Alberto Santos - Dumont* (Index, Associação Promotora da Instrução, Rio de Janeiro, 1986).

Henrique Lins de Barros, *Desafio do Ar: Os Pioneiros Brasileiros da Aeronáutica: 1709-1914* (Metalivros, Rio de Janeiro, 2006).

Henrique Lins de Barros, *Santos Dumont - O Homem Voa!* (Contraponto-Petrobrás, Rio de Janeiro, 2002).

Henrique Lins de Barros, *Santos Dumont e a Invenção do Vôo* (Jorge Zahar Ed., Rio de Janeiro, 2003).

João Musa, Marcelo Mourão e Ricardo Tilkian, *Alberto Santos-Dumont: Eu Naveguei pelo Ar. Da Conquista da Dirigibilidade dos Balões ao Mais Pesado que o Ar* (Editora Nova Fronteira, Rio

de Janeiro, 2003).

João Spacca Oliveira, *Santô e os Pais da Aviação* (Companhia das Letras, São Paulo, 2005).

Lauret Godoy e Guca Domenico, *O Jovem Santos-Dumont* (Nova Alexandria, São Paulo, 2005).

Márcio Souza, *O Brasileiro Voador* (Marco Zero, Rio de Janeiro, 1986).

Marleine Cohen, *Santos Dumont - Sim, Sou Eu, Alberto* (Globo, Rio de Janeiro, 2006).

Nancy Winters, *O Homem Voa! A Vida de Santos Dumont, O Conquistador do Ar* (DBA, São Paulo, 2000).

Orlando Senna, *Santos Dumont* (Editora Brasiliense, São Paulo, 1984).

Paul Hoffman, *Asas da Loucura: A Extraordinária Vida de Santos Dumont* (Objetiva, Rio de Janeiro, 2004).

Paul Karlson, *A Conquista dos Ares* (Editora Globo, Porto Alegre, 1940).

Paulo Urban e Homero Pimentel, *Santos Dumont* (Madrás, Rio de Janeiro, 2006).

Peter Wykeham, *Santos-Dumont - O Retrato de uma Obsessão* (Editora Civilização Brasileira, Rio de Janeiro, 1966).

Renato Fleury, *Santos Dumont* (Melhoramentos, Rio de Janeiro, 1944).

Salvador Nogueira, *Conexão Wright - Santos-Dumont* (Editora Record, São Paulo, 2006).

