

Módulo

1

CURSO DE VÔO SIMULADO

Forum de Simulações Aéreas - FSA



Noções de Física Aplicada a Vôo Simulado

FORUM DE SIMULAÇÕES AÉREAS - FSA

Noções de Física Aplicada a Voo Simulado

© Forum de Simulações Aéreas - FSA
<http://www.fsa.com.br>

ÍNDICE ANALÍTICO

FORUM DE SIMULAÇÕES AÉREAS - FSA.....	1
INTRODUÇÃO	1
A AERONAVE.....	2
SISTEMAS MÉTRICOS.....	5
DIREÇÃO E SENTIDO	7
FORÇAS EM AÇÃO.....	9
AS LEIS DE NEWTON	14
VELOCIDADES DA AERONAVE	17
MOVIMENTO CIRCULAR E UNIFORME.....	19
ENERGIA, TRABALHO E POTÊNCIA.....	24
MOVIMENTOS DE SUBIDA E DE DESCIDA	30
BIBLIOGRAFIA	41

OBJETIVO

Considerando as condições sociais e culturais do brasileiro, podemos supor que aqueles que têm acesso a um computador e, entre esses, os que se dedicam ao voo simulado, têm nível de escolaridade igual ou superior ao segundo grau do Ensino Médio.

Tendo em mente esta premissa, abordaremos em nosso trabalho alguns tópicos de Física relacionados com as forças que agem nas aeronaves e os seus efeitos. Embora essa abstração possa justificar uma abordagem simplificada da matéria, é nosso mister tentar ser o mais claro possível. Aos que tiverem alguma dificuldade em compreender nossas explicações, sugerimos a consulta a um livro-texto de física, bem como debater em grupos, com outros colegas, os temas mais difíceis.

Espera-se que o piloto de voo simulado veja a física teórica como uma ferramenta para ajudar a compreender como e por que um objeto mais pesado do que o ar pode voar e, também, que o texto possa servir para eventuais consultas ou referências, porquanto procuramos agregar variados elementos de física, aplicados especificamente ao voo simulado, embora resumidamente.

Não há originalidade de nossa parte, na apresentação dos conceitos de física. Originais foram Galileu, quando fez as primeiras observações sobre os movimentos, Newton, quando escreveu suas leis, aperfeiçoando o trabalho de Galileu, e Einstein, ao estabelecer os limites para essas leis, quanto às altas velocidades. Quanto a nós, sentimo-nos honrados em sermos tão-somente os convidados para esse banquete de tão seleta audiência.

Eventuais erros deverão ser compreendidos e tolerados nesta primeira divulgação deste documento. Sugestões e correções serão bem-vindas ao **Forum de Simulações Aéreas - FSA**, para o aperfeiçoamento e uma maior abrangência deste curso numa próxima revisão.

*Talvez você não faça pousos perfeitos depois deste curso,
mas pelo menos saberá por que.*

Autor: José Francisco **Lôbo**

Controlador de Voo - Escola de Especialistas de Aeronáutica – EEAer - Guaratinguetá – SP, 1962/70

Engenheiro Mecânico – UFC-CE, 1970

jflobo@yahoo.com

Rua José Villar, 1187/103C – Aldeota

60125-000 – Fortaleza – CE (Brasil)

Introdução

É inegável o fascínio que o desafio da gravidade tem sobre os homens. Desde a **Lenda de Ícaro**, muitos tentaram se igualar aos pássaros, sem ter um completo entendimento das habilidades que a natureza deu a esses animais para poderem se movimentar na terra, na água e no espaço. Por que o homem, o mais inteligente dos animais, não poderia também movimentar-se com tanta liberdade? Muitos pagaram com a vida tentando responder a essa pergunta. Versões modernas desse constante desafio são em forma de asas-deltas, bung-jump, balões, paragliders, trikes, etc.

O esforço tecnológico feito durante a **Segunda Guerra Mundial** resultou em inúmeros aperfeiçoamentos, tanto de **aeronaves** como de meios de comunicação e navegação. Os vencedores incorporam o que havia de melhor na tecnologia dos vencidos e o mundo moderno ganhou bastante com isso: **aeronaves** mais velozes, seguras e confortáveis, para transporte de passageiros, cargas, combate, passeio e até mesmo viagens interplanetárias, a custos acessíveis.

A utilização de materiais mais leves e uma verdadeira parafernália de equipamentos eletrônicos para navegação e comunicação agregam mais poder às **aeronaves**. Em troca, exigem daqueles que se propõem a conduzi-las, um conhecimento básico de várias ciências, como **Geografia, Cartografia, Matemática, Computação** e nossa querida **Física**, objeto deste pequeno trabalho.

Nossa intenção é o **vôo simulado**, não resta aqui a menor dúvida. Mas, será realmente preciso estudar **Física** para utilizar-se o **simulador de vôo** como diversão? A resposta é NÃO, obviamente.

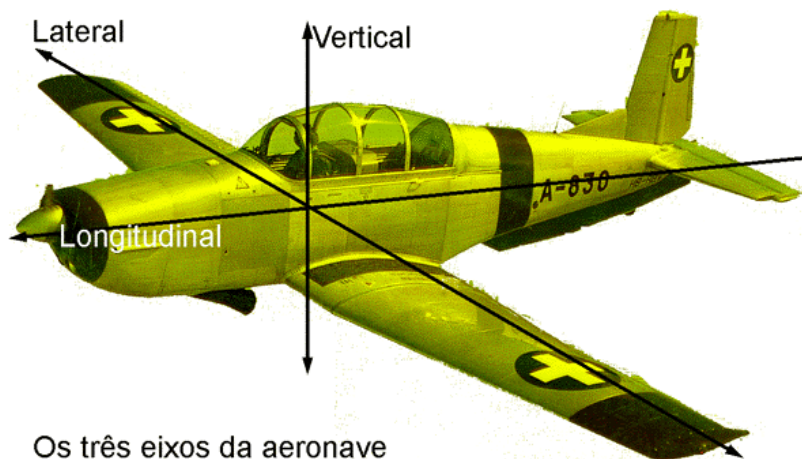
Todavia, os programas de simulação de vôo procuram se aproximar da **realidade** e oferecem aos seus usuários a oportunidade de “sentir” o comportamento da **aeronave** em vôo e o acesso a modelos funcionais dos mais atualizados equipamentos eletrônicos. A mínima compreensão e domínio de todos esses complexos dispositivos requerem um pouco de esforço intelectual. Explorar os recursos de uma aeronave no vôo simulado requer um conhecimento básico das especificações, capacidades e limitações dessas aeronaves e do ambiente onde elas se movimentam, não desafiando, mas sim, obedecendo as leis dos homens e da Natureza.

A Aeronave

2.1 Eixos da Aeronave

Observemos com atenção a Fig. 2.1, que representa uma **aeronave** em vôo, destacando os seus três eixos de movimento.

Observação: três palavras parecidas na sua grafia, mas de significados próprios, que serão utilizados no presente texto, conforme abaixo:



Os três eixos da aeronave

Atitude – é a posição da **aeronave** em relação aos seus eixos.

Altitude – é uma medida que depende de determinada referência barométrica.

Altura – é uma medida sobre a linha vertical ligando dois pontos determinados.

Fig. 2.1 **Aeronave** e seus eixos

Eixo longitudinal - é o principal eixo, passando ao longo da **aeronave**, desde o nariz até a extremidade do cone de cauda. Um plano vertical contendo esse eixo divide a **aeronave** em duas partes simétricas, direita e esquerda. No vôo nivelado, com **velocidade** constante e sem vento lateral,

o movimento principal se processa somente ao longo desse eixo. O comprimento da **aeronave** é medido ao longo deste eixo.

Eixo lateral – vai de uma ponta à outra das asas e cruza com o eixo longitudinal, formando um plano horizontal, como uma superfície de um lago, contendo os dois eixos. O movimento ao longo deste eixo é sentido durante as curvas e também sob a ação de vento de través. A medida da **aeronave** neste eixo é chamada de envergadura.

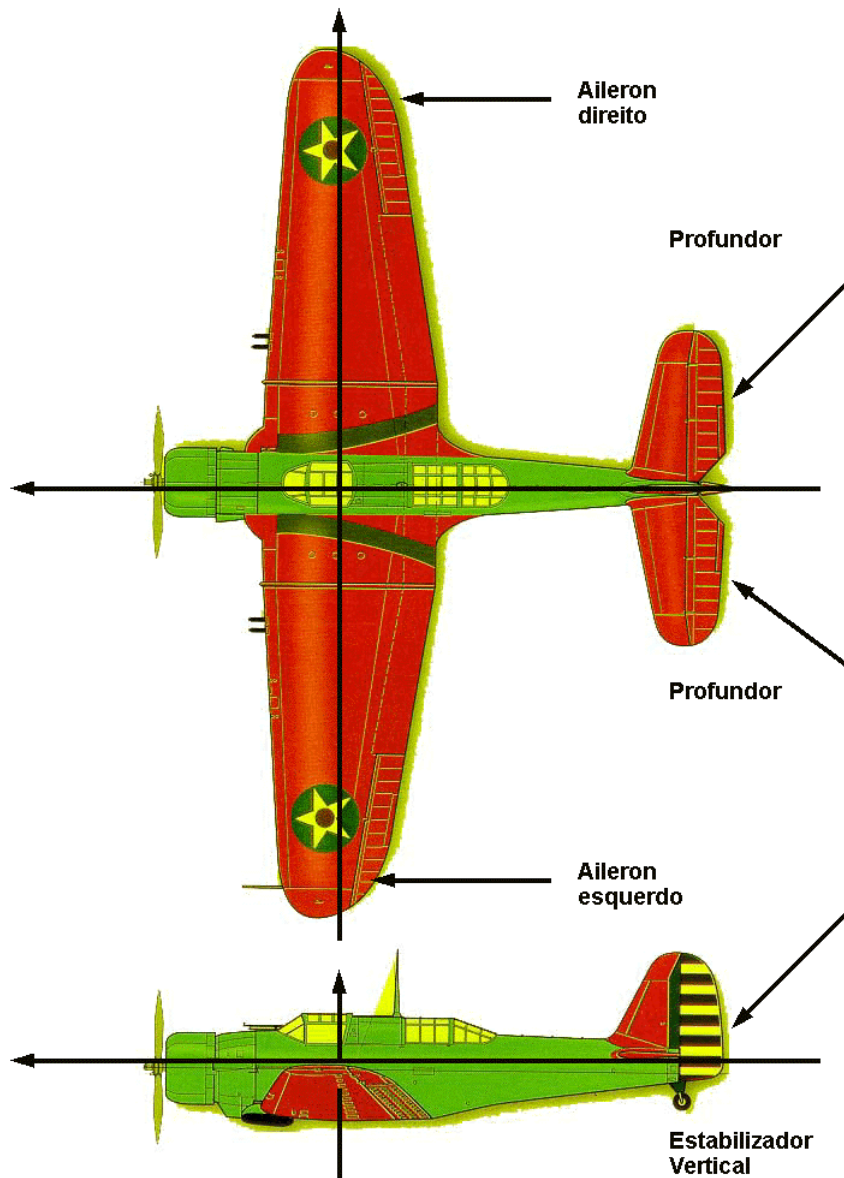


Fig. 2.2 – Principais Superfícies Móveis de Comando

Eixo vertical - é perpendicular ao plano formado pelos outros dois eixos e concorre na interseção dos mesmos. A altura da **aeronave** é medida sobre esse eixo.

Os três eixos são perpendiculares entre si, dois a dois, e encontram-se no centro de massa da aeronave. O movimento ao longo ou em torno de qualquer um dos eixos independe dos movimentos que possam estar acontecendo nos demais eixos.

Portanto, a **aeronave** em vôo pode movimentar-se tanto **ao longo** dos eixos como **em torno** deles. São três movimentos de translação e três de rotação, que podem acontecer simultânea e independentemente.

2.2 Principais Superfícies Móveis de Comando

As **superfícies móveis de comando** (ver Fig. 2.2) alteram o sistema de forças agindo sobre a **aeronave**, provocando os movimentos **em torno** dos seus eixos e são responsáveis pelas mudanças de **atitudes**. As principais superfícies de comando são: **ailerons** direito e esquerdo, **profundor** ou leme horizontal e **estabilizador** ou leme vertical.

Sobre o **eixo longitudinal**, ao longo do qual a **aeronave** se desloca, ela pode girar, executando um movimento chamado de **rolagem** (roll, em inglês). Sobre o **eixo lateral**, ela gira, subindo ou descendo o nariz (ou a cauda), num movimento chamado de **arfagem** (pitch up ou pitch down, em inglês) e sobre o **eixo vertical** a **aeronave** gira para a direita ou para a esquerda, num movimento chamado de **direcional** ou de **guinada** (yaw, em inglês).

Nem sempre a **aeronave** está indo para onde seu nariz aponta. Movimentos de derrapagens no ar (skidding e slipping), comandados pelo piloto ou involuntários são comuns.

Na realidade, excetuando-se o vôo estabilizado e em linha reta deslocando-se ao longo do eixo longitudinal, todos os demais movimentos da **aeronave** são combinações de movimentos independentes, tanto de translação como de rotação, acontecendo simultaneamente nos demais eixos.

2.3 Acionamento das Superfícies de Comando

Existem outras superfícies de comando, móveis ou fixas, cuja abordagem foge ao escopo deste trabalho: flap, quilha ventral ou dorsal, compensador (Trim Tab) fixo e móvel, spoiler, flap de mergulho (air brake), canard, etc. O piloto deve identificar essas superfícies em sua aeronave, conhecer suas funções e saber como e quando pode e deve acioná-las.

O movimento de **rolagem**, executado em torno do **eixo longitudinal** é provocado pelas superfícies de comando localizadas nas extremidades das asas, direita e esquerda, nos bordos de fuga das mesmas, denominadas **aileron direito** e **aileron esquerdo**. Esse movimento é comandado girando o manche para a direita ou para a esquerda, na direção do eixo lateral

O movimento de **arfagem**, executado em torno do **eixo lateral**, é provocado pela superfície de comando localizada na extremidade posterior da **aeronave** (empenagem ou cone de cauda) denominada **leme horizontal** ou **profundor**. O acionamento do **profundor** é feito movendo o manche na direção do **eixo longitudinal**, para a frente ou para trás.

O movimento de **guinada** ou **direcional**, executado em torno do **eixo vertical** é provocado pela superfície de comando localizada na extremidade posterior da **aeronave** (empenagem ou cone de cauda) denominada **leme vertical** ou **estabilizador**. O **estabilizador** é acionado pressionando-se os pedais.

Quando a **aeronave** encontra-se no solo, os pedais tem a função de freio e de direção da bequilha, essenciais durante as manobras de taxi.

Sistemas Métricos

3.1 Sistema Métrico

Qualquer sistema métrico é fundamentado em três unidades independentes:

M - **massa**;

L - **comprimento** (Length, em inglês); e

T - **tempo**.

Todas as demais unidades são definidas em função dessas unidades básicas. A **massa** é uma propriedade da matéria, o **comprimento** é uma grandeza física de um corpo, que representa suas dimensões e posição em relação a um referencial dado, e o **tempo** é a variável independente em relação à qual todos os fenômenos são referenciados.

Na aviação, predomina o uso do sistema de medidas do sistema métrico inglês, adotado em parte pelos Estados Unidos. Resta-nos conviver com algumas medidas nesse sistema e o equivalente no nosso **Sistema Métrico Decimal**, mais intuitivo e fácil de compreender.

As medidas de comprimento são dadas em:

- **Milha náutica** [NM] - igual a 1.852 metros;
- **Polegada - inch** [in] - igual a 2,54 cm.
- **Pé - Foot** - [ft] - igual a 0,3048 metro (1 ft igual a 12 in).
- **Milha terrestre ou milha** [m] (Statute mile) - igual a 1.609 metros.

- **Galão - gallon** – [gl] = 3,784 litros (medida de líquidos)

Os valores maiores, como as distâncias, são expressos em milhas náuticas, os valores médios, como as alturas, são expressos em pés e os pequenos valores, como a pressão atmosférica, expressos em polegadas. No sistema métrico, utilizaríamos: quilômetro, metro e centímetro, respectivamente.

Para indicar **velocidade** utilizamos a **milha náutica por hora** que tem o nome especial de **nó** (*knot*) e abrevia-se: **kt, kts, KTS**. Uma **milha náutica** equivale a 6.076 **pés** ou 1.852 **metros**. Essa medida foi escolhida por corresponder ao arco de circunferência de um minuto, medido sobre um grande círculo da terra, cuja circunferência mede 40.000 km.

Um nó equivale a 1,15 milha terrestre, ou seja, 100 kts = 115 mph ou 100 kts = 185 km/h.

Outras unidades úteis (para consulta):

{PRIVATE}Multiplique	Por	Para obter
Atmospheres	14.696	PSI
Barrels	0.15898	Cubic Meters
Barrels Per Day	0.15625	Metric Tons a Day
Centigrade	$(C \times 9/5) + 32$	Fahrenheit
Centimeters	0.032808	Feet
Centimeters	0.3937	Inches
Cubic Feet	0.02832	Cubic Meters
Cubic Meters	6.289	Barrels
Fahrenheit	$(F \times 5/9) - 32$	Centigrade
Feet	0.3048	Meters
Gallons	0.02381	Barrels
Gallons	0.003785	Cubic Meters
Gallons	3.785	Liters
Gallons per minute	34.296	Barrels Per Day
Inches	2.54	Centimeters
Inches	0.0254	Meters
Kilograms	35.2739	Ounces
Kilograms	2.20462	Pounds
Kilograms Per Sq. Centimeter	14.223	Pounds Per Sq. Inch
Lb. / Ft	1.486	kg / m
Liters Per Hour	0.0044	GPM
Liters	0.2642	Feet
Liters	0.03531	Cubic Feet (CF)
Liters Per Second	2.1189	CFM
Liters Per Second	15.8507	GPM
Meters	3.2808	Feet
Millimeters	0.03937	Inches
Pounds	0.4536	Kilograms
PSI	0.07031	k/sq./c
PSI	6.895	kPa

Direção e Sentido

4.1 Introdução

Se estivermos numa cidade A e quisermos ir para a cidade B precisamos conhecer as posições relativas dessas cidades. Se nossa viagem for por terra, por uma estrada definida, uma só medida é suficiente: A DISTÂNCIA ENTRE AS DUAS CIDADES.

Se a nossa viagem for de avião, além da distância entre as cidades, precisamos saber a direção e o sentido do nosso percurso e a que altura voaremos, para não colidir com obstáculos no solo.

Referencial é um corpo em relação ao qual são definidas as posições de outros corpos.

Direção é uma noção que se associa a uma reta. Desse modo, uma reta r tem uma direção e qualquer reta paralela a ela tem a mesma direção. A uma direção podemos associar dois **sentidos**. Por exemplo: direita ou esquerda; para cima ou para baixo; positivo ou negativo; Norte ou Sul; Leste ou Oeste, etc.

4.2 Graus de Liberdade

Vamos conceituar **grau de liberdade** como sendo a possibilidade que um corpo tem de se mover em uma dada direção. No espaço físico, tridimensional, estas possibilidades são três. Portanto temos um número máximo de três graus de liberdade para os movimentos, conforme segue:

Linha: permite o movimento em uma só direção e dois sentidos. Por exemplo: um trem viajando entre as cidades A e B pode estar indo no sentido de A para B ou vice-versa. Nenhuma outra direção ou sentido poderá existir.

O movimento ao longo de uma linha necessita de um único eixo para defini-lo. Estabelecido um **referencial**, podemos localizar o ponto móvel com uma única medida de distância ou deslocamento, em um determinado momento.

Plano: permite um grau de liberdade mais amplo. Por exemplo: um barco em um lago pode deslocar-se numa infinidade de direções no plano da água desse lago, limitado somente pelas suas margens.

Com um par de eixos coordenados entre si, os movimentos realizado sobre o plano podem ser representados, através de suas projeções sobre esses eixos, o que é suficiente para a localização desse móvel. Para plotar uma posição utilizando uma carta geográfica, seja um guia turístico de uma cidade, um mapa rodoviário ou uma carta de navegação, fazemos referência a dois eixos perpendiculares entre si: eixo Norte-Sul e eixo Leste-Oeste.

Espacial: permite o máximo de liberdade. O melhor exemplo é o voo de um pássaro.

Uma **aeronave** se movimenta no espaço tridimensional, em grandes **velocidades**, requerendo um terceiro eixo para definir sua posição. Esse terceiro eixo é a linha que permite conhecer sua altura sobre o terreno que está sendo sobrevoado, fundamental para evitar colisões com outras **aeronaves**, obstáculos e acidentes geográficos da região.

Forças em Ação

Para voar é preciso: 1 piloto, 2 asas, 3 eixos, 4 forças e 5 letras (avião)

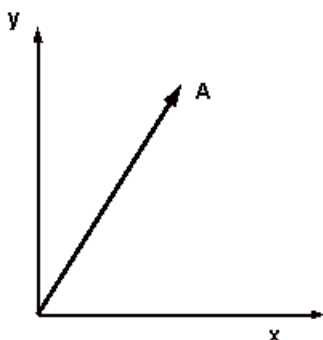
5.1 Grandezas escalares e vetoriais

As grandezas podem ser **escalares** ou **vetoriais**.

Uma grandeza escalar fica definida apenas por sua intensidade. São exemplos de grandezas escalares: massa, temperatura, trabalho, tempo, potência, dimensões físicas, etc.

Uma grandeza vetorial, além da intensidade, possui uma direção. São exemplos de grandezas vetoriais: **força, aceleração, velocidade**. É representada matematicamente por um **vetor**.

Neste texto representaremos as grandezas vetoriais em **negrito**, tal como **F**, e sua intensidade por **|A|**, quando for preciso estabelecer uma distinção entre elas.



O **vetor** tem uma representação gráfica, dada por um **segmento de reta orientado**, cujo comprimento representa sua **intensidade** e o ângulo que faz com o eixo de referência é a **direção**.

Fig. 5.1 – Representação gráfica do vetor

O **vetor** pode ser decomposto em suas componentes, nas direções de dois eixos coordenados x e y , coplanares.

As componentes de um vetor decomposto, conforme a figura 1.2 abaixo, vale:

$$A_x = |A| \cos \theta = A \cos \theta$$

$$A_y = |A| \sin \theta = A \sin \theta.$$

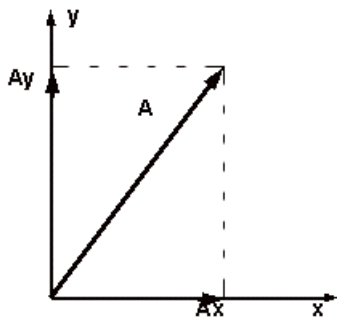
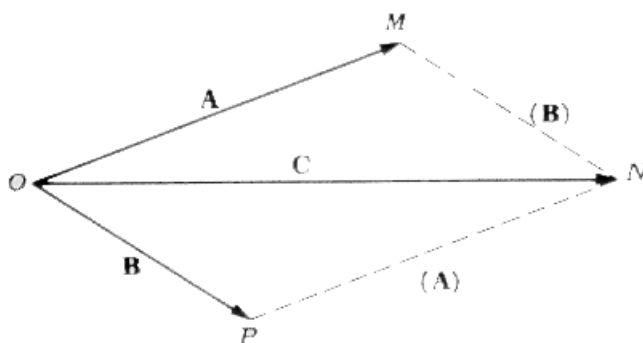


Fig. 5.2 – Decomposição de um vetor em duas componentes

5.2 Soma de dois vetores



Para somar dois vetores graficamente construímos um paralelogramo cujos lados são retas paralelas às direções dos vetores dados e de comprimentos proporcionais às suas intensidades. A diagonal do paralelogramo assim formado representa o **vetor soma** ou **resultante (R)** dos vetores A e B , dados.

Fig. 5.3 – Regra do paralelogramo para soma de dois vetores.

A ação do vetor soma é a mesma dos vetores componentes agindo em conjunto. Isto permite que a **sustentação (S)** da **aeronave** seja representada por um único vetor. Do mesmo modo, o **peso (P)**, embora distribuído por toda a **aeronave**, é representado por um só vetor.

5.3 Momento de uma força

O **momento de uma força** é o produto da intensidade da força pela distância entre a reta suporte da força e o ponto de aplicação do momento.

Na **aeronave** temos a aplicação de momentos de forças nos seguintes exemplos:

a) Quando o piloto aciona o manche (ou o joystick) da **aeronave**, girando-o nas direções dos eixos longitudinal ou lateral;

b) O acionamento do **profundor** provoca uma força, para cima ou para baixo, cujo momento é igual à intensidade da força vezes a distância ao eixo lateral da **aeronave**. Seu efeito é a tendência de baixar ou elevar o nariz da **aeronave**.

c) O acionamento do **estabilizador vertical** provoca uma força, para a direita ou esquerda, cujo momento é igual à intensidade da força vezes a distância ao eixo vertical da **aeronave**. Seu efeito é a tendência de girar o nariz da **aeronave** para a esquerda ou direita.

5.4 O binário

Binário é um conjunto de duas forças iguais, paralelas e de sentidos contrários. O único efeito do binário é provocar um movimento de rotação. Na **aeronave**, são exemplos de binário as forças que giram a hélice (Fig. 5.4) e o movimento de rolagem, resultante da aplicação dos ailerons (Fig. 5.5).



Fig. 5.4 – Binário aplicado à hélice.

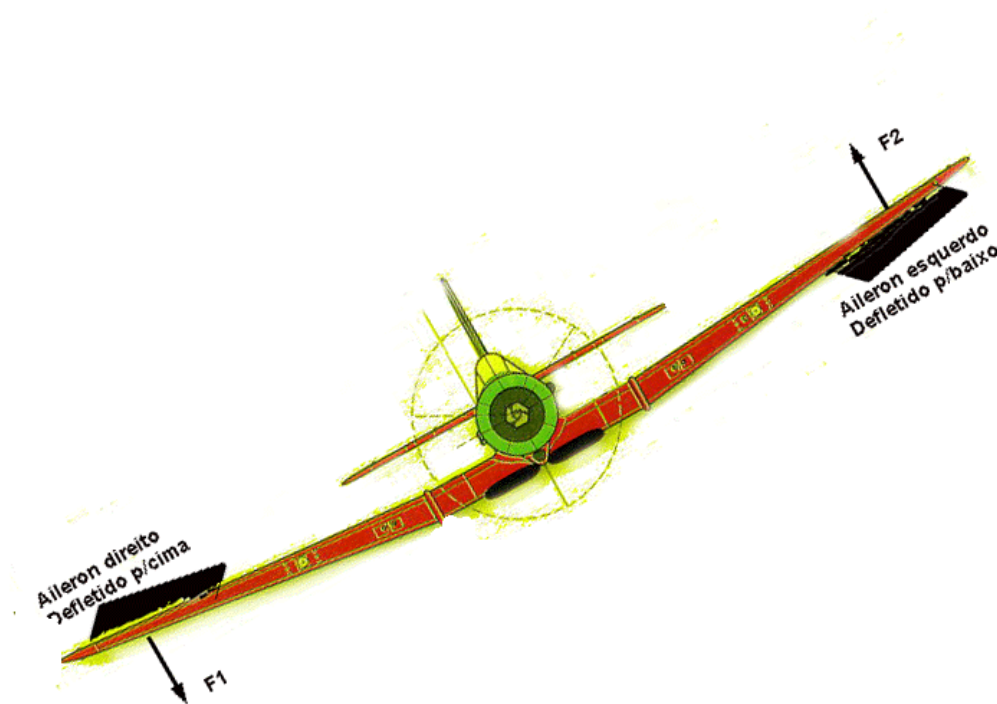


Fig. 5.5 – Binário criado pelo acionamento dos ailerons.

5.5 Forças agindo sobre a aeronave em vôo

Vamos definir algumas forças que agem sobre a **aeronave** quando ela se encontra voando. Algumas dessas forças também existem mesmo com a **aeronave** em repouso.

Peso (P) - é a força de atração gravitacional que a Terra exerce sobre a massa da **aeronave**.

Tração ou **empuxo do motor (T)** - é a força produzida pelo motor da **aeronave**, através do movimento da hélice. Sua direção é a do eixo do motor, que é mais ou menos paralelo ao eixo longitudinal da **aeronave**.

Sustentação (S) - é a componente da força aerodinâmica gerada quando a **aeronave** se desloca através de uma massa de ar. Sua direção é perpendicular ao vento relativo.

Arrasto (R) - é a componente da força aerodinâmica gerada quando a **aeronave** se desloca através de uma massa de ar. É a **resistência ao avanço**. Sua direção é paralela ao vento relativo. O arrasto não é causado somente pelo atrito da **aeronave** com o ar, mas é também resultante das forças aerodinâmicas de **sustentação** provocadas pelo movimento da **aeronave** em relação à massa de ar.

Neste trabalho não será abordado em detalhes como as forças aerodinâmicas são geradas. Aceitaremos sem demonstração. Entretanto, essas forças dependem, entre outros fatores, da **velocidade** da **aeronave** relativamente à massa de ar.

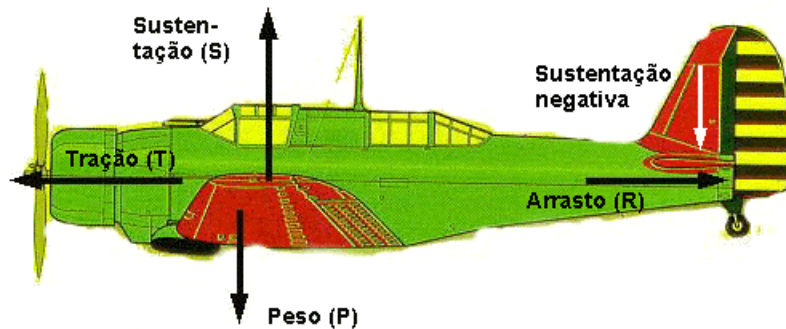
5.6 As quatro forças

Centro de Gravidade ou **C.G.** - é o ponto por onde passa a linha de ação do peso total da **aeronave**. Pode ser também chamado de **Centro de Massa**.

Centro de sustentação - é o ponto por onde passa a linha de ação da força de **sustentação**, a qual, por sua vez, é perpendicular ao plano das asas.

A importância desta força não é apenas para o vôo estabilizado, mas também e principalmente para todas as manobras de mudanças de atitude e de direção da **aeronave**.

Vamos observar a Fig. 5.6, abaixo, representando a vista lateral de uma **aeronave** em vôo



nivelado, em linha reta e com **velocidade** constante, portanto em equilíbrio dinâmico, realizando um movimento retilíneo uniforme, em relação a um determinado observador. Pela Primeira Lei de Newton (princípio da inércia) essa **aeronave** permanecerá assim até que alguma outra força aja sobre ela.

Fig. 5.6 - As quatro forças

Observe com atenção na Fig. 5.6 a existência de uma **outra força vertical** (indicada sobre o **estabilizador**). A **aeronave** tem capacidade de transportar uma carga, limitada a um determinado **peso máximo**. Essa carga inclui o combustível colocado em seus tanques, a tripulação e passageiros e todos os demais objetos levados a bordo e que dela não fazem parte. A distribuição dessa carga tem o efeito de determinar o **centro de gravidade (C.G.)**.

O **equilíbrio estável** do vôo, no **eixo lateral**, é obtido pela posição do **C.G.**, o qual deve estar **sempre** à frente do **centro de sustentação**, criando a tendência de baixar o nariz da **aeronave**, se o manche não estiver sendo puxado, e estabilizando o vôo para o ângulo de ataque compatível.

Entretanto, se não colocarmos mais uma força vertical, o binário **peso-sustentação** continuará a girar o nariz da **aeronave** para baixo. Essa outra força é uma **sustentação negativa** criada através do **profundor**. O acionamento do **profundor** aumenta ou diminui esse **peso artificial**, permitindo o controle da **aeronave** quanto ao seu movimento de **arfagem**.

Os três eixos da **aeronave** se encontram no **centro de massa**. Isto significa que os movimentos em torno do eixos não dependem de aceleração do seu centro de massa. Durante um movimento de rotação em torno de qualquer um dos eixos, a parte da **aeronave** mais distante do **centro de massa** sofre maior variação desse movimento. Exemplificando: numa **aeronave** de dois lugares, em tandem, o assento do piloto localiza-se muito próximo ao **centro de massa** enquanto o segundo assento, logo atrás, fica mais distante. Quem estiver ocupando esse segundo assento recebe mais fortemente os efeitos de uma rotação.

O alinhamento do eixo de tração não coincide necessariamente com o eixo longitudinal. Na realidade, em alguns modelos de **aeronaves**, o eixo de tração fica um pouco acima do eixo longitudinal, de modo a criar um momento de giro da força de tração em relação ao centro de massa, no mesmo sentido daquele criado pelo profundor.

As Leis de Newton

6.1 Conceitos básicos

Os primeiros estudos dos movimentos focalizaram os corpos celestes, na tentativa que o homem tinha e tem de compreender a obra de **Deus**. Vários cientistas se preocuparam com os movimentos planetários, entre eles **Galileo Galilei** (1564-1642), que lançou as bases da dinâmica, com o seu estudo dos corpos em queda livre. Coube, no entanto, a **sir Isaac Newton** (1642-1727), apoiado nos trabalhos de Galileo, através do seu livro “**Princípios Matemáticos**” (título original: “**Philosophiae Naturalis Principia Mathematica**”), publicado em 1687, a formulação dos conceitos da física que hoje é estudada nos primeiros anos dos colégios.

Newton teve de criar conceitos como massa (medida da matéria bruta de um objeto), peso (medida que uma massa responde à aceleração da gravidade), quantidade de movimento e de inércia.

Esses conceitos foram utilizados na formulação de três leis, que ficaram conhecidas como as Leis de Newton.

A **Primeira Lei de Newton** está relacionada com a inércia dos corpos, ou seja, com a dificuldade oferecida pelos corpos para mudanças de suas **velocidades** ou de seus estados de repouso. O seu enunciado original é o seguinte:

“Todo corpo permanece em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, a menos que seja obrigado a mudar seu estado por forças impressas nele”.

A massa é uma propriedade de toda matéria e é ela a responsável pela maior ou menor inércia de um corpo. A unidade de medida de massa é o quilograma-massa, abreviadamente kg. Muitas vezes usamos a massa como sinônimo de peso, o que não é correto. A massa de um corpo é a mesma em qualquer lugar, na Terra, na Lua, no espaço sideral, enquanto o peso é o resultado da atração dessa massa pela aceleração da gravidade (g), cujo valor médio, na Terra, é:

$$g = 9,80 \text{ m/s}^2.$$

Na Lua, onde a aceleração da gravidade é de 1/6 desse valor, o peso de uma massa ficaria reduzido na mesma proporção.

Entretanto a inércia relaciona-se com a massa do corpo e independe de onde o corpo esteja. Um astronauta, correndo na superfície da Lua, chocando-se com uma pedra, recebe o mesmo impacto que receberia na Terra.

A **Segunda Lei de Newton** é formulada matematicamente como:

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a}$$

onde: F é uma força, m é a massa do corpo e a é uma aceleração.

O conceito de força é bastante intuitivo e a mais conhecida delas é a força gravitacional conhecida como **peso**. As forças são medidas em **quilograma-força** (kgf) ou em **newton** (N). 1 kgf é o peso de uma massa de 1 kg, sujeita à aceleração da gravidade, e vale 9,80 N. No caso da força-peso, a aceleração é a da gravidade e temos a seguinte relação:

$$\mathbf{P} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{g}$$

onde: P é o peso do corpo, m é a sua massa e g é a aceleração da gravidade.

O enunciado da 2ª Lei é o seguinte:

“A mudança do movimento é proporcional à força motriz impressa; e se faz segundo a linha reta pela qual se imprime essa força”.

6.2 Aumento de Velocidade: Aceleração Positiva

Na seção anterior vimos as quatro forças que agem sobre a **aeronave**. Quando a **aeronave** está alinhada com a pista, pronta para decolar, o piloto pisa no freio e gradualmente “acelera” o motor, ou seja, permite que o motor receba mais combustível, transferindo à hélice o máximo de rotação. Neste instante, temos uma força de tração (T) aplicada à **aeronave**, que inicia seu movimento de corrida na pista, tão logo o freio seja liberado.

A **velocidade** da **aeronave** relativamente à massa de ar cria tanto a força de **sustentação** (S) como a força de arrasto (R), que crescem, ambas, com a **velocidade ao quadrado**. A massa da **aeronave** (m) está portanto sujeita a várias forças, que não estão em equilíbrio, surgindo uma **aceleração** (a).

$$\mathbf{T} - \mathbf{R} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a}$$

A **aeronave** decola, atinge a altitude e a **velocidade** desejadas e o piloto, gradualmente, reduz a potência do motor para um ponto em que a tração da hélice apenas se iguale ao arrasto.

6.3 Redução de Velocidade: Aceleração Negativa

Consideremos um automóvel de massa igual a 700 kg e uma pequena **aeronave** de mesma massa, ambos deslocando-se a 120 km/h. Se o motorista do veículo desejar reduzir sua **velocidade** para 80 km/h é bastante retirar o pé do acelerador e pisar gradualmente no freio. Em poucos segundos ele obtém o efeito desejado.

Poderia o piloto fazer o mesmo com sua **aeronave**? Certamente, não.

O automóvel e a **aeronave** têm a mesma massa e mesma **velocidade**, portanto, a mesma inércia. Ambas precisam da mesma força para uma igual redução de **velocidade**. O veículo obtém essa força através do atrito dos pneus com a estrada.

A **aeronave** não tem como criar uma força desse intensidade simplesmente pelo atrito com o ar. A redução da **velocidade** se dará, portanto, em um tempo maior, através de comandos mais complexos e mais demorados de acionamento, como os FLAPS.

Isto posto, significa o seguinte: O piloto tem de planejar seus movimentos, como num jogo de xadrez ele precisa ter em mente pelo menos o movimento seguinte, qualquer que seja o movimento do adversário: o “Imprevisto”

6.4 Ação e Reação

A Terceira Lei de Newton tem por enunciado:

“A uma ação sempre se opõe uma reação igual, ou seja, as ações de dois corpos um sobre o outro sempre são iguais e se dirigem a partes contrárias”.

Esta lei diz que não há força isolada, ou seja, as forças só existem aos pares. Por exemplo: quando a hélice do motor da **aeronave** impulsiona o ar para trás, esse reage impulsionando a hélice para a frente. Outro exemplo: para a hélice girar o motor aplica uma força sobre o eixo da hélice o qual reage tentando girar o eixo em sentido contrário, numa reação conhecida como torque.

Pessoalmente, eu chamaria de “A lei do Mais Forte”. Embora ação e reação sejam iguais e contrárias, no choque do maior navio do mundo com um iceberg, o “Titanic” foi, e sempre será, a montanha de gelo. Se o piloto não pousar sua **aeronave** suavemente, mas “atracá-la”, a pista sofre uns arranhões, quanto à **aeronave**...

Portanto, o piloto no comando de uma **aeronave** não pode esquecer que sua máquina foi projetada e construída em estrita obediência as Leis da Natureza e deve ser conduzida em estrita obediência a elas, sob pena de perda de controle do seu aparelho e, quiçá, danos a sua saúde e de seus passageiros.

Para nós, que pretendemos simular um voo com todas as suas características de desempenho, relembrar esses conceitos, aplicados aos movimentos da **aeronave**, possibilitará entender melhor o comportamento da **aeronave** em voo e suas limitações.

Velocidades da Aeronave

7.1 Velocidade Escalar Média

Se num instante **t1** um corpo está numa posição **x1** e, decorrido um intervalo de tempo, no instante **t2** o corpo está na posição **x2**, define-se sua **velocidade** como sendo o espaço ou o comprimento da trajetória, dividido pelo intervalo de tempo decorrido para percorrê-la. Assim:

$$v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

Velocidade, portanto é uma unidade derivada de duas das unidades fundamentais, estudadas na **seção 3**, e sua unidade é **m/s**.

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

Da mesma forma, para conceituar a **aceleração** podemos dizer que é a variação da **velocidade** no intervalo de tempo, ou matematicamente:

A unidade para medir a **aceleração** é m/s dividido por s ou m/s.s ou m/s². Portanto, seguindo esse raciocínio podemos definir várias outras grandezas. A unidade para avaliar uma **força** é unidade de massa vezes unidade de aceleração, no caso da **energia**, a unidade é dada pelo produto de uma unidade de força vezes uma unidade de distância, e assim por diante para unidades elétricas, acústicas e todas as demais.

Desses três elementos principais, sabemos que o tempo é apenas um referencial, enquanto a distância representa a posição relativa entre duas massas, ou seja, também é um referencial. Resta somente a massa, a matéria, nada mais, e seus referenciais no tempo e no espaço.

As crianças gostam de brincar com massa de modelar, criando formas que existem em sua imaginação. Seríamos a massa de modelar de alguma Criança, que chamamos Deus? No final de tudo, vale lembrar a Bíblia: **“És pó e ao pó voltarás”**. Isto nos torna, todos, iguais.

7.2 Especificações de Velocidade

O homem está sempre buscando máquinas mais velozes, que percorram grandes distâncias em pequenos intervalos de tempo e sonha com máquinas de ficção científica que possam teletransportar pessoas e objetos, ou deslocar-se como discos voadores, com acelerações e **velocidades** impressionantes, desafiando a gravidade. Enquanto essa tecnologia não chega ao nosso alcance, a Física Newtoniana vai resolvendo nossos problemas.

Definimos **velocidade** como sendo a razão entre uma distância e o tempo gasto para percorrê-la. Entretanto, quando pensamos em uma máquina, a **velocidade** vem à nossa imaginação como uma característica própria daquele modelo. É nesse contexto que vamos falar sobre **velocidade**: como os limites em que uma determinada **aeronave** pode voar.

7.3 Velocidade no Eixo Longitudinal

Uma **aeronave** obtém sua **sustentação** para voar a partir de uma **velocidade** mínima, medida em relação à massa de ar em que ela se desloca. Observemos que a **velocidade** em relação ao solo não é levada em consideração, nessa avaliação. Por essa razão, as decolagens e os pousos são sempre feitos na pista cuja direção é contrária à dos ventos predominantes, no momento do pouso.

Assim como existe uma **velocidade** mínima, também existe um limite superior de **velocidade** que não pode ser excedido pela **aeronave**, sob pena de perda de controle (stol de alta **velocidade**) e mesmo de danos estruturais irreversíveis.

Aqui cabe uma pequena observação: a direção do vento informada pela Meteorologia é aquela “de onde” o vento sopra, e não “para onde” o vento sopra, como seria de se esperar. Portanto muita atenção: vento de 90 graus significa vento vindo do Leste e indo para o Oeste. Na escolha da pista 13/31 para pouso ou decolagem, com vento de 120 graus, pouse e decole na pista 13.

Tratando-se de um deslocamento do ponto A para o ponto B, a **velocidade** em relação ao solo (Ground Speed - GS) é a mais importante pois é ela que dará a estimativa de tempo de voo, em função do qual será verificada se a **aeronave** pode alcançar o ponto B, sem precisar de reabastecimentos. Durante o voo em rota, a direção do vento de altitude e o rumo da **aeronave** poderão fazer um ângulo qualquer, ou seja a **aeronave** receberá vento de proa, vento de cauda ou vento de través. É da responsabilidade do piloto obter informações meteorológicas para programar com segurança o seu voo.

O tempo máximo que a **aeronave** pode permanecer em voo, limitado em função da capacidade de transportar combustível em seus tanques, chama-se **autonomia**.

As definições de **Velocidade Verdadeira** (Knots of True Airspeed - KTAS) e **velocidade indicada** (Knots of Indicated Airspeed - KIAS) serão dadas no Curso de Instrumentos de Voo.

7.4 Velocidade no Eixo Vertical

Evidentemente, uma **aeronave** não se desloca no eixo vertical como um helicóptero. A **velocidade** vertical, ou seja a variação de altura ou altitude da **aeronave** pode ser nula (voo nivelado), positiva (**velocidade** de subida) ou negativa (**velocidade** de descida) e coexiste com a **velocidade** no eixo longitudinal. Abordaremos com maiores detalhes esse movimento na **Seção 10** deste texto.

Movimento Circular e Uniforme

8.1 Curvas e Retas

O movimento controlado de uma **aeronave** é composto de segmentos de trajetórias retas e circulares. O treinamento de voo inclui a prática de execução de curvas coordenadas, ou seja curvas em que a bolinha do inclinômetro permanece centralizada: o piloto aplica os comandos de ailerons e estabilizador vertical, na proporção exata para que a **aeronave** não “derrape” na curva.

Quando essas curvas são realizadas corretamente, a **aeronave** descreve uma trajetória circular perfeita e com velocidade angular constante, no sentido para o qual o nariz (proa) aponta. Isto parece natural, mas você pode estar fazendo uma curva, apontando o nariz da **aeronave** numa direção e a trajetória ser diferente daquela que você pretende seguir.

Se você utilizar a opção de voo coordenado no seu Simulador de Voo e, naturalmente, não utilizar pedais, esse efeito não é sentido. O computador se encarrega de coordenar a curva.

8.2 Força Centrípeta

Pela primeira lei de Newton, há necessidade de uma força para alterar o sentido do movimento. No movimento circular e uniforme uma força será aplicada sobre o móvel, na direção e sentido do centro da curva que se pretende fazer. É a chamada força centrípeta.

Mas como “gerar” essa força sobre a **aeronave** em voo? O peso P é sempre vertical, a tração T é aplicada segundo o eixo longitudinal da **aeronave** e o arrasto R normalmente é oposto à força de tração. Resta a força de **Sustentação** S , perpendicular ao plano das asas. Inclinando-se as asas a **sustentação** passa a ter uma componente vertical para equilibrar o peso e uma componente horizontal, voltada para o centro da curva que pretendemos realizar. Veja a Fig. 7.1, abaixo:

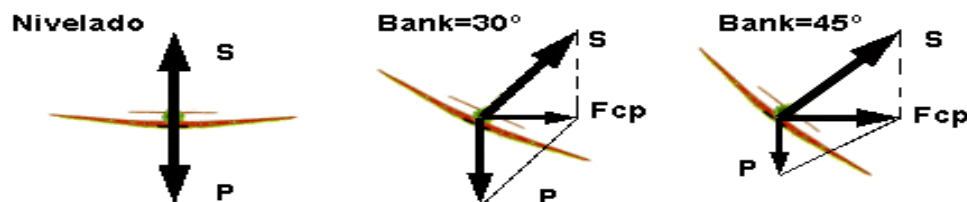


Fig.8.1 Força Centrípeta

A componente horizontal da **sustentação** é a força centrípeta, a qual é responsável pela mudança de direção da trajetória. Por ser perpendicular à trajetória essa força não produz trabalho, ou seja, não aumenta a energia da **aeronave**. Nivelando as asas, a componente torna-se nula e a trajetória assume a direção retilínea outra vez.

Do ponto de vista aerodinâmico, não é bastante inclinar as asas da **aeronave** para que ela mude de direção. É necessário aumentar a força de **sustentação** (S), através de uma das duas opções:

- aumentar a **velocidade** da **aeronave** (a **sustentação** é proporcional ao quadrado da **velocidade**);
- aumentar o ângulo de ataque

Se a componente vertical da força de **sustentação** (S) não for suficiente para equilibrar o peso da **aeronave** (P), essa iniciará um movimento vertical, que pode ser corrigido tanto nivelando as asas como fornecendo mais potência do motor.

Observe que no voo estabilizado, inclusive nas subidas e descidas com **velocidades** constantes e, portanto, com aceleração nula, toda a **sustentação** é utilizada para equilibrar o peso da **aeronave**.

A componente horizontal da **sustentação**, ou seja a força centrípeta, obedece à seguinte relação, onde:

$$F_{cp} = \frac{m \cdot v^2}{R}$$

m = massa da **aeronave** (inclusive combustível, passageiros e carga)
 v = **velocidade** escalar da **aeronave**

R = raio de curvatura da trajetória.

Pela equação acima, a força centrípeta é diretamente proporcional à massa e ao quadrado da **velocidade** e inversamente proporcional ao raio de curvatura da trajetória.

8.3 Planejamento de Curvas

Ao planejar uma curva para interceptar uma trajetória, por exemplo, a reta final para pouso ou um rumo de aproximação ILS, o planejamento da curva deve ser feito de modo que as trajetórias curva-reta-curva sejam concordantes.

Se você girar a uma **velocidade** de 60 kts e fizer uma curva de 180 metros de raio, mantendo a mesma inclinação e aumentando a **velocidade** para 180 kts, a mesma curva terá um raio 9 vezes maior (3 elevado ao quadrado).

8.4 Quadros de Valores para Curvas

Apresentaremos três quadros com valores de **velocidades** variando entre 60 e 185 KTS, ou seja, entre 110 e 330 km/h, tabulando, para cada **velocidade**, a **velocidade** de rotação ou **velocidade** angular, a inclinação das asas necessária para fazer a curva, o **fator de carga** resultante da inclinação das asas e o raio da curva.

A diferença entre os quadros é em relação aos parâmetros tomados como constantes e variáveis. No Quadro I fixaremos a inclinação das asas em 30° e, consequentemente, o **fator de carga**, que resultará em 1,15.

Inclinação = 30º e Fator de Carga = 1,15 (constantes)						
Velocidades			Inclinação das asas (bank), em graus	Fator de Carga	Raio da Curva	
Escarlar		Angular			Milha náutica	metro
KTS	Km/h					
60	111,1	10,6	30,0	1,15	0,09	166
75	138,9	8,5	30,0	1,15	0,14	259
90	166,7	7,1	30,0	1,15	0,20	373
105	194,5	6,1	30,0	1,15	0,27	507
120	222,2	5,3	30,0	1,15	0,36	663
135	250,0	4,7	30,0	1,15	0,45	839
150	277,8	4,3	30,0	1,15	0,56	1.036
165	305,6	3,9	30,0	1,15	0,68	1.253
180	333,4	3,6	30,0	1,15	0,81	1.491

Quadro I – Dados de **velocidade** e Raio de Curva, para inclinação de 30°

8.4 Fator de Carga

Vimos que para fazer curvas a **aeronave** precisa de uma componente da força de **sustentação**.

O módulo da força de **sustentação** passa a ser maior do que a força peso.

$$S = \sqrt{P^2 + F_{cp}^2}$$

Chamamos de **Fator de carga** a razão: $n = \frac{S}{P}$

Dependendo do projeto da **aeronave** (passeio, transporte, acrobacia, combate, etc.) ela suporta um maior ou menor **fator de carga**, que não deve jamais ser excedido, sob pena de causar danos irreparáveis à sua estrutura.

8.5 Exemplo de Cálculo para o Quadro I

Vamos construir um quadro de valores relacionando as variáveis envolvidas numa curva, fixando em 30° a inclinação das asas (bank) da **aeronave**.

Pela Fig. 5.6, vemos que o peso da **aeronave** será equilibrado pela componente vertical da **sustentação**:

$$P = S \cdot \cos \theta$$

Para o ângulo de 30°, temos que o $\cos 30^\circ = 0,866$ e o $\sin 30^\circ = 0,5$.

Nas orbitas de aproximação e espera o piloto deverá fazer curvas padronizadas, realizando uma curva fechada no tempo de 2 minutos, isto é, girando à razão de 3 graus por segundo.

$$P = S \cdot \cos 30^\circ \therefore \frac{S}{P} = \frac{1}{\cos 30^\circ}$$

Resultando num **fator de carga**: $n = 1,15$.

Quer dizer, a força de **sustentação** é de 1,15 vezes o peso da **aeronave**.

A força centrípeta será:

Na primeira linha da nossa tabela, consideraremos a **velocidade** de 60 kts, ou seja, de 30,87 m/s.

O raio de curvatura será dado por:

$$R = \frac{m \cdot v^2}{F_{cp}}$$

R = 0,09 milhas náuticas

A trajetória completa será de 1.061 metros e será percorrida em 34 segundos, girando a uma razão de 10,5 graus por segundo.

$$R = \frac{m \cdot 30,87^2}{1,15 \cdot m \cdot 9,8 \cdot 0,5} \therefore R = 169 \text{ m/s}$$

Observamos que a massa não influi no valor do raio de curvatura.

Vamos preencher a tabela com outros valores para a **velocidade**.

Velocidade angular (Razão de Giro) = 3 graus/seg (constante)						
Velocidades			Inclinação das asas (bank), em graus	Fator de Carga	Raio da Curva	
Escalar		Angular			Milha náutica	metro
KTS	Km/h					
60	111,1	3º	9	1,01	0,32	593
75	138,9	3º	12	1,01	0,40	741
90	166,7	3º	14	1,03	0,48	889
105	194,5	3º	16	1,04	0,56	1.037
120	222,2	3º	18	1,05	0,64	1.185
135	250,0	3º	20	1,07	0,72	1.333
150	277,8	3º	22	1,08	0,80	1.482
165	305,6	3º	24	1,10	0,88	1.630
180	333,4	3º	26	1,12	0,95	1.759

Quadro II - Dados de **velocidade** e Raio de Curva, para razão de giro constante e de 3°/s.

Raio de Curvatura = 610 metros (constante)						
Velocidades			Inclinação das asas (bank), em graus	Fator de Carga	Raio da Curva	
Escalar		Angular °/s			Milha náutica	metro
KTS	Km/h					
60	111,12	2,9	9	1,00	0,33	610
75	138,90	3,6	14	1,00	0,33	610
90	166,68	4,3	19	1,10	0,33	610
105	194,46	5,0	26	1,10	0,33	610
120	222,24	5,7	32	1,20	0,33	610
135	250,02	6,4	39	1,30	0,33	610
150	277,80	7,2	45	1,40	0,33	610
165	305,58	7,9	50	1,60	0,33	610
180	333,36	8,6	55	1,70	0,33	610

Quadro III - Dados de **velocidade** e Raio de Curva, para um Raio constante e de 610m.

Por depender do quadrado da **velocidade**, o planejamento de uma curva deve ser cuidadoso, principalmente em recuperação de mergulhos.

Energia, Trabalho e Potência

9.1 introdução

A energia é a alma de tudo, é a própria vida! Não há exagero em dizer isto. O homem compreendeu esse significado desde o princípio dos tempos e buscou dominar, armazenar e aplicar a energia, em suas diversas formas, em suas atividades de sobrevivência. Quer fosse um pequeno curso d'água para mover uma roda, o produto de sua incipiente agricultura, a força de seus animais de carga, a energia química da queima dos combustíveis ou da pólvora, enfim, os recursos energéticos garantiam a sobrevivência e tinham o seu preço. De vez em quando, a natureza surpreendia ao liberar seus excedentes de energia em forma de vulcões, terremotos, furacões ou descargas elétricas, e ainda hoje o homem não sabe o que fazer com eles.

9.2 Formas de Energia

A energia está presente na natureza sob diversas formas: elétrica, nuclear, química, acústica, luminosa, térmica, mecânica. Diariamente utilizamos essas formas de energia e temos de pagar por elas proporcionalmente à quantidade utilizada. As únicas formas de energia democratizadas ainda são o oxigênio que respiramos e o sol que, dizem, “nasceu prá todos”.

9.3 Trabalho

O primeiro significado da palavra **trabalho** que nos vem à mente é relacionado ao esforço físico ou intelectual para executar alguma coisa. Na Física, o termo “**trabalho**” tem um significado especial.

Define-se o **Trabalho (T)** como o produto de uma **força (F)** pela **distância (d)** que ela desloca um corpo, medida no sentido dessa força. Assim:

$$T = F \times d$$

Sendo a **força (F)** dada em Newton (N) e a **distância (d)** dada em metro (m), o trabalho tem a seguinte unidade:

$$1 \text{ Unidade de Trabalho} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m}$$

Essa unidade tem o nome de **Joule**.

Da mesma forma que o **trabalho**, a **energia** também pode ser definida em termos das grandezas força e comprimento e tem a mesma unidade que o trabalho. Pode-se dizer que o **trabalho é a energia em transformação**.

9.4 Conversão de Energia

A energia pode passar de uma forma para outra. A energia química de uma pilha voltaica converte-se em eletricidade que pode ser convertida em luz ou calor. O combustível é queimado no motor da **aeronave** gerando energia do movimento da hélice e calor.

De uma maneira geral, todas as conversões de energia em trabalho resultam em uma parcela de energia calorífica, quase sempre resultante do atrito. Esta é a forma de degradação da energia, pois sua reconversão é a mais difícil.

9.5 Conceito de Potência

Um mesmo trabalho pode ser feito por dois dispositivos ou máquinas, mas em diferentes intervalos de tempo.

Por exemplo: uma determinada **aeronave** pode elevar-se a 1.000 metros com 4 pessoas a bordo, em 5 minutos, enquanto que uma **aeronave** semelhante, dotada, porém, de um motor turbinado, mais potente, elevaria essas mesmas pessoas, à mesma altura, num intervalo de tempo menor. Define-se, então, a capacidade de realizar trabalho na unidade de tempo como potência.

$$\text{Potência(P)} = \frac{\text{Trabalho (T) realizado}}{\text{Tempo (t) gasto}}$$

Dada a mesma quantidade de trabalho, o dispositivo que pode realizar no menor tempo tem mais potência. Vê-se, portanto, que a **potência** de uma máquina é uma capacidade, é uma reserva, que pode ser utilizada no todo ou em parte.

A unidade de **Potência (P)** é a unidade de Trabalho (T), **Joule (J)** dividido pela unidade de **Tempo (t)**, segundo (s):

$$1 \text{ Unidade de Potência} = 1 \text{ J} / 1 \text{ s}$$

Essa unidade tem o nome de **Watt**.

A potência de máquinas costuma ser dada em outras unidades como:

Cavalo-vapor (CV) 1 CV = 735 W

Horse-power (HP) 1 HP = 746 W

9.6 Energia Mecânica

O estudo da energia mecânica é importante porque ela está associada ao movimento e a posição do corpo. Ela tem a forma cinética, dependente da **velocidade** do corpo e a forma potencial, dependente da posição (altura) do corpo, relativamente a um dado referencial.

A energia potencial gravitacional é a energia relacionada com a posição do corpo acima de um nível de referência. Seja, por exemplo, um corpo de massa m , localizado a uma altura h , acima de um certo nível de referência.

Sua energia potencial é igual ao trabalho que foi feito para elevá-lo até esse nível:

$T = F \cdot d$, onde F = peso do corpo ($m \cdot g$) e distância é a própria altura de referência a que o corpo foi elevado (h):

Energia Potencial Gravitacional = $m \cdot g \cdot h$

A dedução da energia cinética (E_c) também leva em consideração um referencial a partir do qual a **velocidade** é medida, e seu valor é dado por:

$$E_c = \frac{m V^2}{2}$$

M = massa do corpo, em kg

V = **velocidade**, em m/s

A energia mecânica total do corpo é dada pela soma das parcelas de energia cinética e energia potencial.

9.7 Reservas de Energia da Aeronave

A figura abaixo mostra em três passos um exemplo de conversão de energia.

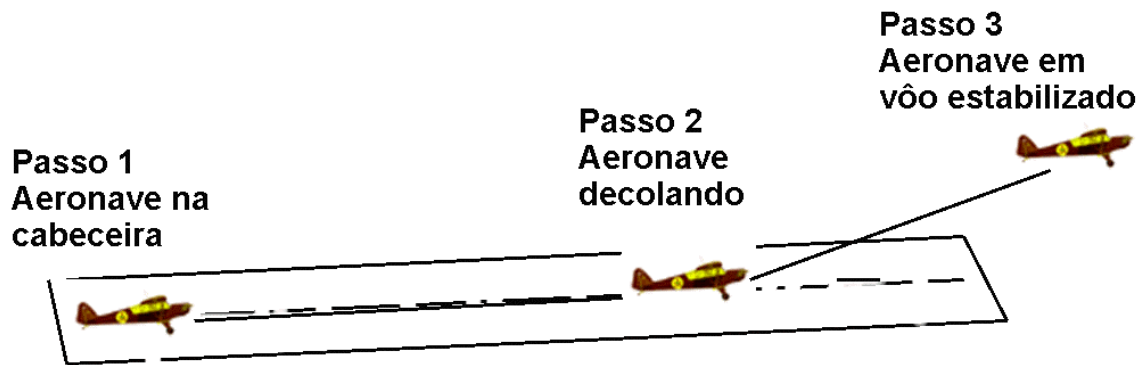


Fig. 9.1 Conversão de Energia Química em Energia Mecânica

Passo 1 - Uma **aeronave** está na cabeceira da pista, pronta para decolar. Sua **velocidade** é nula. O aeroporto está localizado num terreno plano. Seu tanque armazena bastante combustível, suficiente para um bom e longo voo. Esta é a sua reserva de energia. Seu motor pode converter energia do combustível em força de tração na hélice.

Passo 2 - O piloto libera os freios e a **aeronave** inicia a corrida de decolagem. No ponto em que adquire a **velocidade** de decolagem, ainda no solo, a **aeronave** tem energia cinética, adquirida pela conversão da energia química do combustível de seus tanques, através do conjunto motor-hélice.

Passo 3 - A **aeronave** decola. Sobe ao mesmo tempo que aumenta sua **velocidade**, até atingir o ponto previsto. O piloto reduz a potência do motor até o limite suficiente para um voo reto, nivelado e estabilizado, compensando somente a resistência que o ar oferece ao avanço da **aeronave**. Nesse instante, temos uma reserva de energia mecânica, composta de energia cinética (função de sua **velocidade**) e energia potencial gravitacional (função de sua altura sobre o terreno).

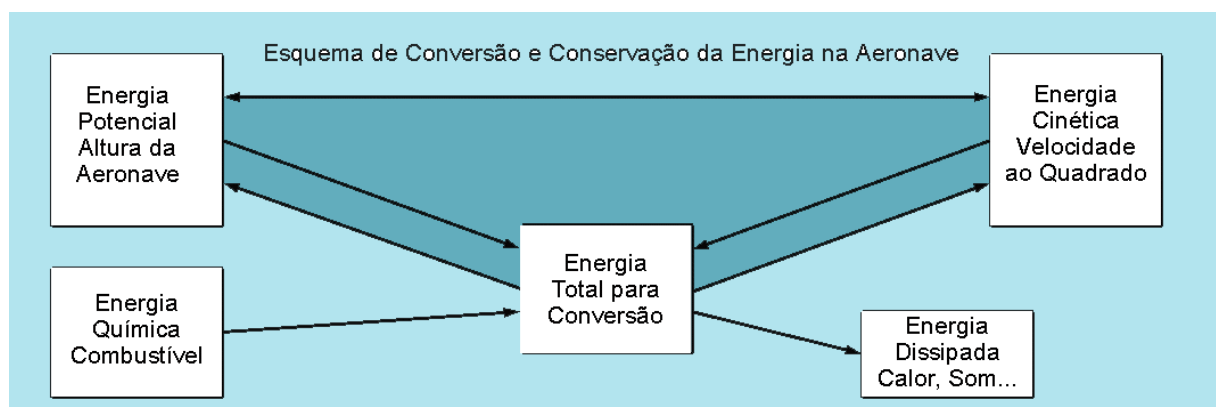


Fig. 9.2 Conservação da Energia

9.8 Conservação de Energia

Sob o efeito de forças conservativas, a energia se conserva, ou seja, em um sistema fechado a quantidade inicial e final de energia deverá ser a mesma. No caso da **aeronave** isso não se dá em função de duas grandes dificuldades ou impossibilidades:

1. O arrasto ou a resistência ao avanço de uma **aeronave** movendo-se na camada atmosférica é uma força não conservativa, de intensidade proporcional ao quadrado da **velocidade**.

2. A reconversão da energia mecânica em outra forma de energia que pudesse ser reaproveitada, o que hoje já se faz em alguns meios de transporte, necessita de máquinas de dimensões e peso incompatíveis.

Entretanto, a conversão de energia potencial (relativa à altura) em energia cinética (relativa ao quadrado da **velocidade**) e vice-versa é feita com relativa facilidade. O piloto deve praticar pousos de emergência simulados e também longos vôos de planeio, utilizando somente a energia potencial da **aeronave**, ou seja, com a potência do motor reduzida, para se familiarizar com o comportamento da **aeronave**. Isto serve para dar ao piloto a confiança necessária para administrar situações de emergência, quando o combustível é inútil e transforma-se em peso morto e de alto risco de explosão, sendo comumente aliado, antes de pousos de emergência de **aeronaves** de grande porte.

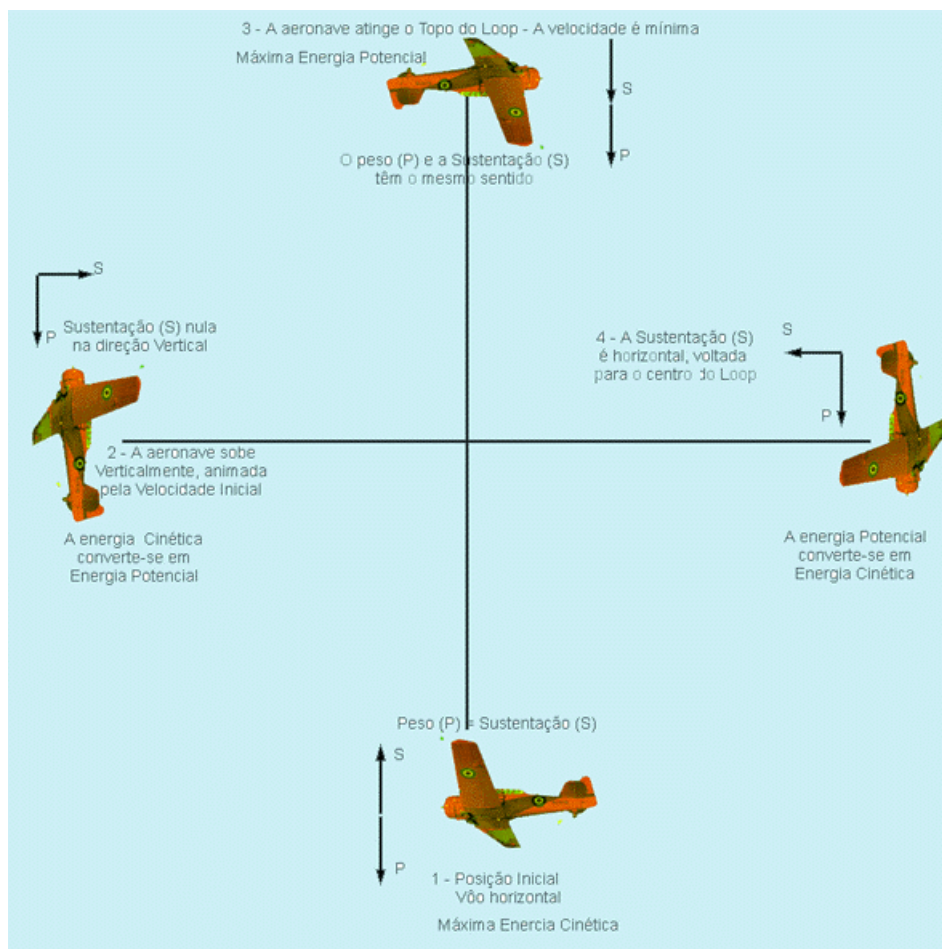


Fig. 9.3 O loop

Compramos energia sob várias formas, para nosso uso diário. Gás de cozinha, combustível, energia elétrica, pilhas e baterias e (por que não?) alimentos. Economizar energia, portanto, é economizar dinheiro. Economizar significa consumir racionalmente, com parcimônia.

9.9 A Manobras acrobáticas

Considera-se acrobacia qualquer manobra que envolva mudanças bruscas de **velocidade**, altitude ou atitude da **aeronave**. São manobras que requerem condições especiais do piloto e da **aeronave** e portanto são feitas parte da formação do piloto privado.

O treinamento de manobras consideradas acrobáticas faz parte da formação do piloto militar, pois as manobras de ataque ou evasivas, em combate real ou simulado exigem a aplicação prática desse conhecimento.

Uma curva de 60 graus de inclinação acarreta um **fator de carga** igual a 2, isto funciona como se cada parte da **aeronave** pesasse o dobro. Existem outras manobras que podem gerar números maiores de **fator de carga**. Todo o corpo do piloto, pernas, braços, cabeça e o seu próprio sangue tem o peso aumentado na mesma proporção, causando ao piloto escurecimento da visão, tonturas e até desmaios.

Neste texto, a abordagem de manobras acrobáticas é tão-somente do ponto de vista das forças envolvidas e da conservação da energia, não cabendo aqui descrever suas técnicas. Vamos analisar uma dessas manobras: o loop. Trata-se de um círculo descrito pela **aeronave**, num plano vertical. O piloto visualiza no solo uma estrada reta para servir de referência e inicia e fecha o loop sobre o mesmo ponto. Com a ponta da asa, nivelada, descreve um círculo imaginário sobre a linha do horizonte. A Fig. 9.3 mostra 4 posições da **aeronave** na execução dessa manobra.

Seção 10

Movimentos de Subida e de Descida

10.1 Introdução

Como vimos anteriormente, o centro de massa de uma **aeronave** pode movimentar-se “ao longo” e “em torno” de seus três eixos, cada movimento se processando independentemente dos outros, conforme as leis de independência dos movimentos estabelecidas por Galileu.

O principal movimento, sem dúvida, é “ao longo” do eixo longitudinal. É o seu movimento natural, indo para onde seu nariz aponta. Entretanto, o movimento ao longo do eixo vertical, de subidas e de descidas é também importante, por que a **aeronave** precisa variar sua altitude, em várias fases do voo.

Logo após a decolagem, quando a aeronave ainda está com pequena velocidade e o arrasto é também relativamente pequeno, e também o rendimento do motor é maior, o piloto procura subir o mais rápido possível para o nível programado de voo. Nessa fase, o gradiente de subida pode atingir valores maiores, nos limites da capacidade da aeronave. O eixo da aeronave realmente faz um acentuado ângulo com a horizontal.

Na fase de descida, o piloto reduz a potência do motor a um valor mínimo, desce a um gradiente razoável, procurando aproveitar o máximo sua energia potencial. O ângulo da trajetória da aeronave não é o mesmo que o seu eixo longitudinal faz com a horizontal. Um pequeno ângulo de 2 a 3 graus é suficiente. Grandes aeronaves, providas de Spoilers, podem perder altitude mantendo um ângulo horizontal, pela quebra de sua sustentação. Entretanto, esse não é o processo apropriado para a transformação útil de sua energia potencial.

10.2 Movimento Vertical

A rigor, o movimento vertical é uma projeção do movimento principal da **aeronave**, sobre o eixo vertical. Quer dizer: para subir ou descer, a **aeronave** inclina, em relação à linha do horizonte, sua direção de vôo, de modo que ao mesmo tempo que descreve uma trajetória horizontal, também descreve uma trajetória vertical. Não se tratando de vôos acrobáticos, essa componente vertical pode ser da ordem de até de 15% da velocidade da **aeronave**, sem causar desconforto aos seus ocupantes.

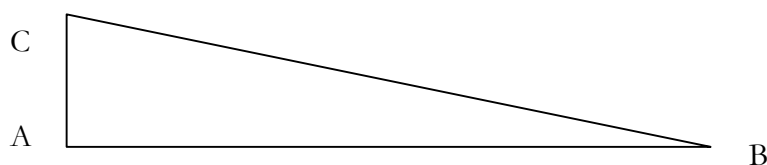


Fig. 10.1 Gradiente

Vamos conceituar gradiente de subida, dado em percentual, como sendo a razão entre os catetos AC e AB (AC/AB), mostrado na Fig. 10.1. Sendo assim, um gradiente de subida de 5% equivale a um triângulo de catetos iguais a 5 unidades (vertical) e 100 unidades (horizontal). Para gradientes até cerca de 15%, a hipotenusa pode ser considerada igual ao cateto maior, com erro inferior a 1 por cento.

Tabela 10.1 – Relação entre gradiente e ângulo de inclinação, em graus (aproximadamente)

Gradiente	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	15%
Ângulo(graus)	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5

Nesse caso, temos um ângulo de planeio ou um gradiente de subida (ou de descida), já que se trata de uma relação entre **velocidades** e não propriamente de **velocidade**, no sentido estrito de sua definição.

Sendo a **velocidade** vertical relativamente pequena, comparada com a **velocidade** horizontal, utiliza-se uma unidade menor para sua indicação: pé por minuto (ft/min). Para uma **aeronave** deslocando-se a 100 KTS, 500 ft/min de subida ou de descida, é obtido com um gradiente de 5%. É comum chamar a **velocidade** vertical de “razão de subida” ou de descida, embora esse nome fosse mais apropriado para referir-se ao gradiente ou ao ângulo de planeio.

10.3 Tabela de Parâmetros de Descida/Subida

Na tabela abaixo, apresentamos dados sobre velocidade (em KTS), de razão de subida/descida e distância voada por minuto, para gradientes de planeio entre 3% e 10% e velocidades entre 60 e 250 KTS. Veja um exemplo (**em negrito, na tabela**): para um gradiente de **5%** e velocidade de **100KTS** (**dados iniciais para entrada na tabela**), a aeronave desce/sobe **500 pés** em um minuto (**informação obtida da tabela**) enquanto percorre, sobre o solo, a distância de **1,67 milhas náuticas** (segunda coluna da tabela). Para descer/subir 1.000 ft, o tempo é de **2 minutos**.

Tabela 10.1 – Gradientes de Planeio (%) e Razão de Subida (ft/min) contra Velocidade (KTS)

Velocidade (KTS)	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%
60	180	240	300	360	420	480	540	600
70	210	280	350	420	490	560	630	700
80	240	320	400	480	560	640	720	810
90	270	360	450	540	630	720	820	910
100	300	400	500	600	700	810	910	1.010
110	330	440	550	660	770	890	1.000	1.110
120	360	480	600	720	850	970	1.090	1.210
130	390	520	650	780	920	1.050	1.180	1.310
140	420	560	700	850	990	1.130	1.270	1.410
150	450	600	750	910	1.060	1.210	1.360	1.510
160	480	640	810	970	1.130	1.290	1.450	1.620
170	510	680	860	1.030	1.200	1.370	1.540	1.720
180	540	720	910	1.090	1.270	1.450	1.640	1.820
190	570	760	960	1.150	1.340	1.530	1.730	1.920
200	600	810	1.010	1.210	1.410	1.620	1.820	2.020
210	630	850	1.060	1.270	1.480	1.700	1.910	2.120
220	660	890	1.110	1.330	1.550	1.780	2.000	2.220
230	690	930	1.160	1.390	1.630	1.860	2.090	2.320
240	720	970	1.210	1.450	1.700	1.940	2.180	2.430
250	750	1.010	1.260	1.510	1.770	2.020	2.270	2.530

10.4 Cálculo de Mudanças de Níveis de Vôo

As mudanças de níveis de vôo são feitas em diversas circunstâncias e pelos mais variados motivos:

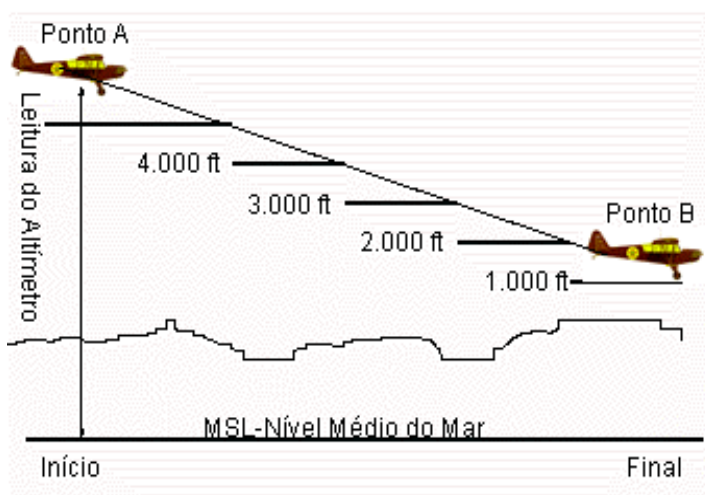


Fig. 10.2 Descida da Aeronave

Após a decolagem, a aeronave precisa ganhar altura, obedecendo a um procedimento de subida padronizado, obedecendo instruções do Controle de Tráfego Aéreo ou a critério do piloto, quando estiver sob Regras de Vôo Visual (Visual Flight Rules - VFR);

Nas aproximações e procedimentos de descidas, orientados ou não por órgão de controle de tráfego aéreo.

Durante o vôo em rota, podem tornar-se necessárias mudanças de nível padronizadas ou ocasionais, determinadas, entre outras razões, por:

1. obediência às regras de tráfego, nos cruzamentos de aerovias ou de Área de Controle de Tráfego ou mesmo mudanças programadas no Plano de Vôo, por modificação de destino para o

aeródromo de alternativa, quando o destino estiver fechado por condições técnicas ou meteorológicas imprevistas;

2. turbulências de grandes aeronaves, tempestades ou nuvens do tipo Cumulus Nimbus (CB), desconforto térmico, temperatura do ar, etc.;
3. natureza técnica como: defeitos de pressurização ou oxigenação da cabina da aeronave, defeitos em motores ou outras situações de emergência;
4. instruções do Controle de Tráfego de Aerovias, para aumentar separações verticais e horizontais com outras aeronaves ou por proibição de sobrevôo de áreas, abaixo de determinadas altitudes.

10.5 Parâmetros de Descida/Subida

Qualquer que seja a causa determinante de uma mudança de nível de voo, o procedimento deverá atender tanto aos critérios da aeronave quanto aos do tráfego aéreo, haja vista que o cruzamento, em rota, de níveis de voo de outras aeronaves acarreta situações de conflito de tráfego que precisam ser corretamente administradas pelo Controle.

Da parte da aeronave existem os critérios técnicos e econômicos determinantes das velocidades e das razões de descida/subida otimizadas, ou seja, que dão maior rendimento por galão de combustível. Com relação às descidas, a questão é de grande importância, tendo em vista a energia mecânica da aeronave, provenientes de sua altitude e do quadrado de sua velocidade, a qual deve ser utilizada convenientemente durante o procedimento de descida.

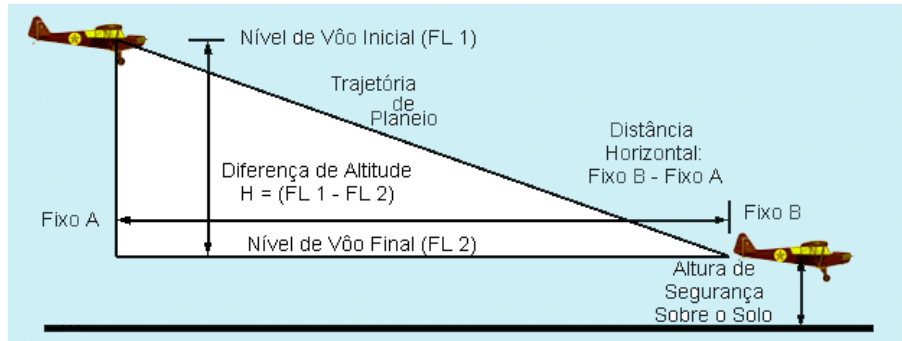
Os seguintes parâmetros da aeronave serão considerados:

- a) (Flight Level - FL) - nível de voo inicial (FL1), em ft (pé);
- b) nível de voo a ser atingido (FL2), em ft (pé);
- c) velocidade da aeronave, em KTS (nós);
- d) razão de descida/subida (velocidade vertical), em ft/min (pé por minuto);
- e) distância entre os fixos de início (A) e término (B) do procedimento, em MN (milhas náuticas);
- f) tempo estimado do procedimento, em minutos.
- g) altitude mínima de segurança, em ft (pé).

As altitudes dos itens a, b e g são todas em relação ao nível médio do mar (MSL - Mean Sea Level), ou seja, são níveis barométricos com referência ao ajuste do altímetro de 1.013,2mb - milibares ou 29,92in/Hg - polegadas de mercúrio, por conseguinte, variáveis em função da pressão atmosférica local.

10.6 Exemplo Numérico

Sob o aspecto matemático, a operação é bastante simples. Suponhamos uma aeronave execu-



tando um procedimento de mudança de nível de voo (DESCIDA), conforme mostrado na Fig. 10.3, onde destacam-se os pontos considerados em nossa análise.

Fig. 10.3 Exemplo de descida

O piloto deseja mudar do FL1 para o FL2 (uma descida, neste exemplo). Durante o procedimento, a aeronave descreverá a trajetória CA, cuja projeção sobre o solo é o segmento AB de comprimento igual à distância d entre os dois pontos. Iniciando a descida, o piloto aciona um cronômetro, cuja leitura ao final da operação será o tempo t . A aeronave manterá a velocidade constante $V1$, durante todo o procedimento. Temos, portanto:

- a) velocidade da aeronave - $V1$, em KTS;
- b) distância horizontal AB, em NM;
- c) tempo decorrido (t) no percurso AB, em min;
- d) diferença entre os níveis FL1 e FL2 (H), em ft.

O vetor velocidade da aeronave na direção CB pode ser decomposto em duas componentes perpendiculares, nas direções CA e AB, de acordo com a regra da soma de vetores ou da composição de dois movimentos. Tudo se passa como se a aeronave voasse de A para B, com a componente da velocidade no sentido AB, $V1$, ao mesmo tempo em que descesse de C para A, com a componente da velocidade no sentido CA, $V2$. A contagem do tempo é igual para os dois movimentos (tempo = t).

Podemos escrever as duas equações seguintes:

$$t = \frac{H}{V_h} \text{ em min, (I) e } t = \frac{S}{V_s} \text{ em hora(= 60 min) (II)}$$

Igualando as equações (I) e (II), e ajustando o tempo para minutos em ambas equações, temos:

$$\frac{H}{V_h} = \frac{60 \cdot S}{V_s} \quad S = \frac{H \cdot V_s}{60 \cdot V_h}$$

Para solucionar um problema, deveremos conhecer 3 parâmetros e a partir destes determinar o valor desconhecido. Vejamos um exemplo numérico, sempre lembrando que:

$$1 \text{ NM} = 6.076 \text{ ft}$$

$$1 \text{ KTS} = 6.076 \text{ ft}/60\text{min} \dots 1 \text{ KTS} = 101,3 \text{ ft}/\text{min}.$$

“O piloto no comando de uma aeronave em **vôo simulado**, que desenvolve a velocidade de 100 KTS, deseja descer do FL60 para atingir um certo ponto B, nivelado no FL30. Sua razão de descida será de 500 ft/min. Pergunta-se: a que distância do ponto B ele deverá iniciar a descida? Quanto tempo durará o procedimento?”

Temos os seguintes dados:

$$H = \text{FL60} - \text{FL30} = 6.000 - 3.000 = 3.000 \text{ ft}$$

$$V_s = 100 \text{ KTS}$$

$$V_h = 500 \text{ ft}/\text{min}.$$

CÁLCULO DA DISTÂNCIA ENTRE OS PONTOS A e B

$$S = \frac{H \cdot V_s}{60 \cdot V_h}$$

$$S = 3000 \bullet 101,3 \bullet 100/500$$

$$S = 60.780 \text{ ft} \quad \text{OU} \quad S = 60.780/6.076 \quad \text{OU} \quad S = 10 \text{ NM}.$$

b) CÁLCULO DO TEMPO DE DESCIDA

$$t = \frac{S}{V_s}$$

O tempo corresponde a 1/10 da hora ou 6 minutos.

10.7 Utilização dos gráficos e tabelas anexos

Tabela – A finalidade da tabela é dar ao piloto uma grandeza do gradiente de descida/subida utilizado e a razão de descida/subida, em função da velocidade da aeronave.

Gráfico – Apresentamos dois gráficos, com os dados da tabela 10.1, relacionando a diferença de altitude a descer/subir com a distância percorrida sobre o solo, para gradientes variando de 3 a 6%, em um desenho e de 7 a 10% em outro desenho.

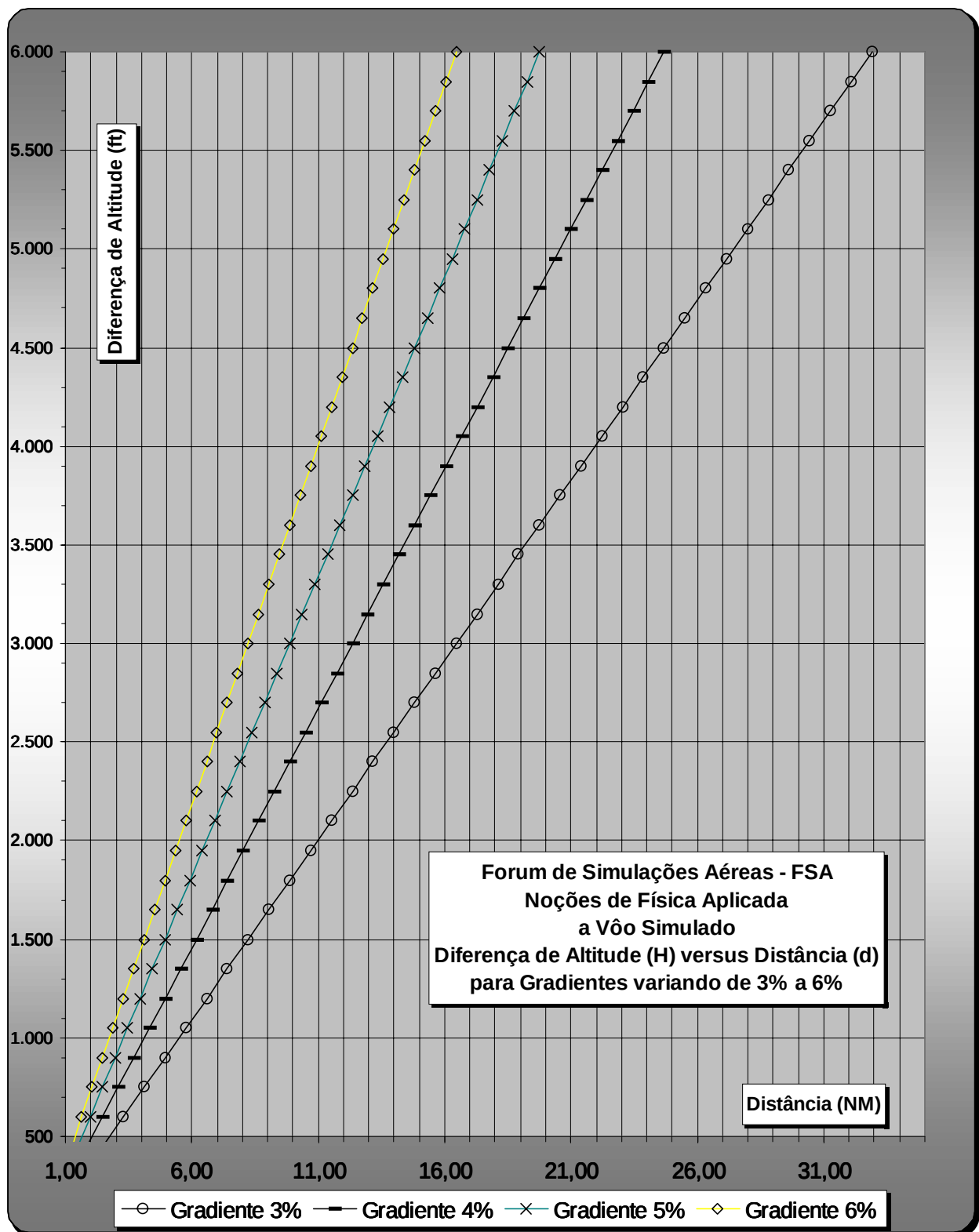
Conhecendo a diferença de altitude, o ângulo de planeio ou o gradiente, relacionados com as velocidades vertical e horizontal, procura-se no gráfico uma linha que representa o gradiente. Traça-se um linha horizontal desde o valor da diferença de altitude até a curva do gradiente e deste ponto baixa-se uma linha até o eixo das distâncias.

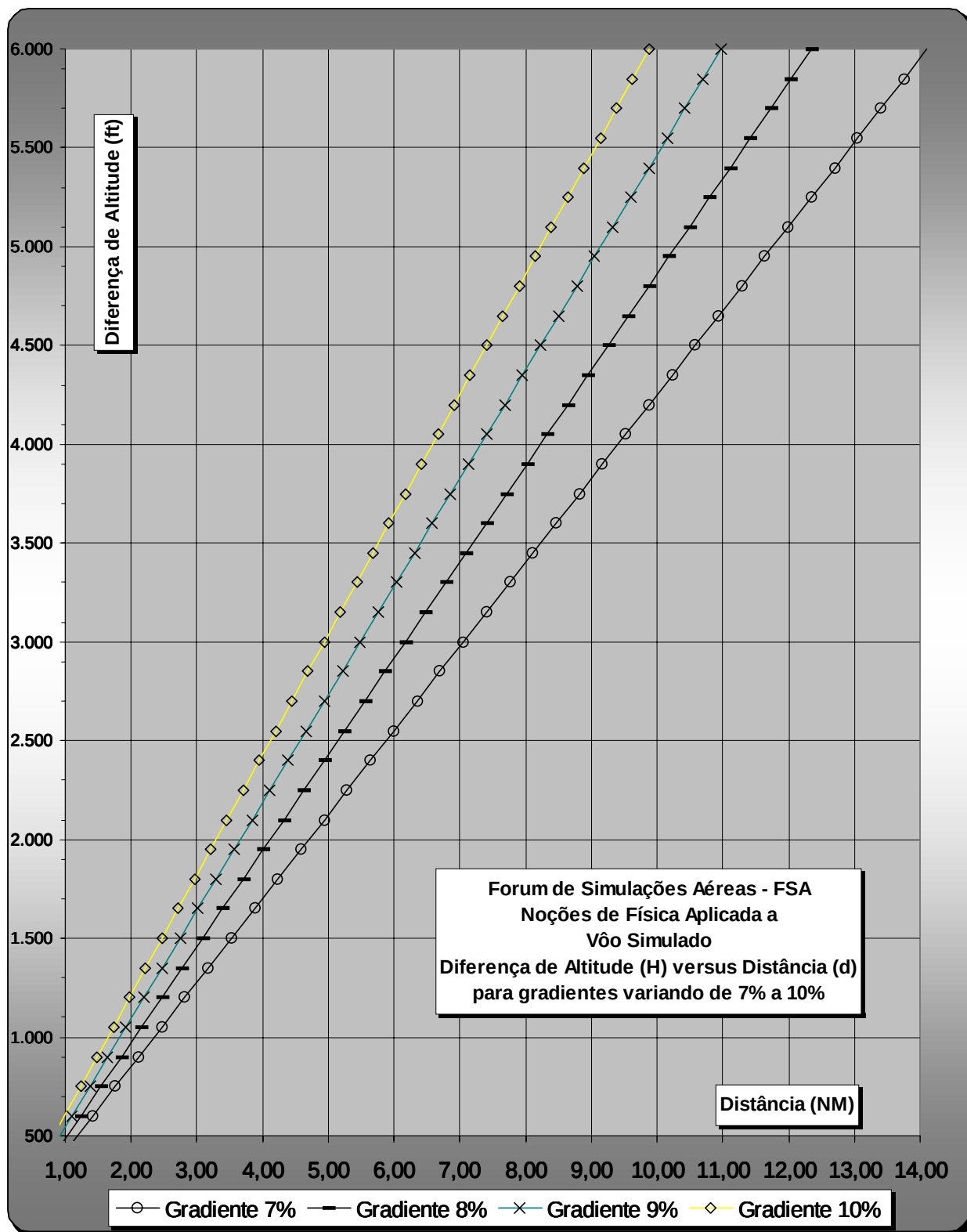
Nomógrafo – É um método para solucionar graficamente uma equação, proporcionando soluções rápidas e precisas. Estamos apresentando um nomógrafo baseado nas equações do movimento de descida, apresentadas em 10.6. São duas equações independentes e que podem ser utilizadas simultaneamente ou não, isto é podemos formar um sistema de duas equações e duas incógnitas ou resolvermos apenas uma das equações, se não tivermos interessados nos demais parâmetros.

Desenhamos um nomógrafo com 5 eixos, sendo um eixo para cada parâmetro, para facilitar a visualização e a prática inicial. O mesmo nomógrafo está desenhado com apenas 3 eixos, sendo que no primeiro eixo estão desenhadas duas escalas: a escala das diferenças de altitudes (H) e a escala das distâncias (S). No segundo eixo estão desenhadas as escalas da razão de subida/descida (V_h) e a da velocidade relativa ao Solo (V_s). A escala do tempo (t) continua isolada, num único eixo.

Quem não sentir-se à vontade para utilizar o nomógrafo de 3 eixos (cinco escalas!), pode utilizar o de 5 eixos. O modo de calcular é o mesmo.

Sendo duas equações independentes, resolvemos a primeira delas utilizando os 3 primeiros eixos. Para solucionar a segunda equação, utilizamos o eixo intermediário em conjunto com os dois últimos eixos. O eixo intermediário, que é o eixo dos tempos, é comum na solução das duas equações, pois os movimentos vertical e horizontal são processados ao mesmo tempo, isto é, a aeronave desce (ou sobe) ao mesmo tempo em que percorre sobre o solo uma trajetória.





Instruções de Uso

(Somente para **Vôo Simulado**)

O nomógrafo foi calculado e desenhado por José Francisco **Lôbo**, baseado na relação abaixo:

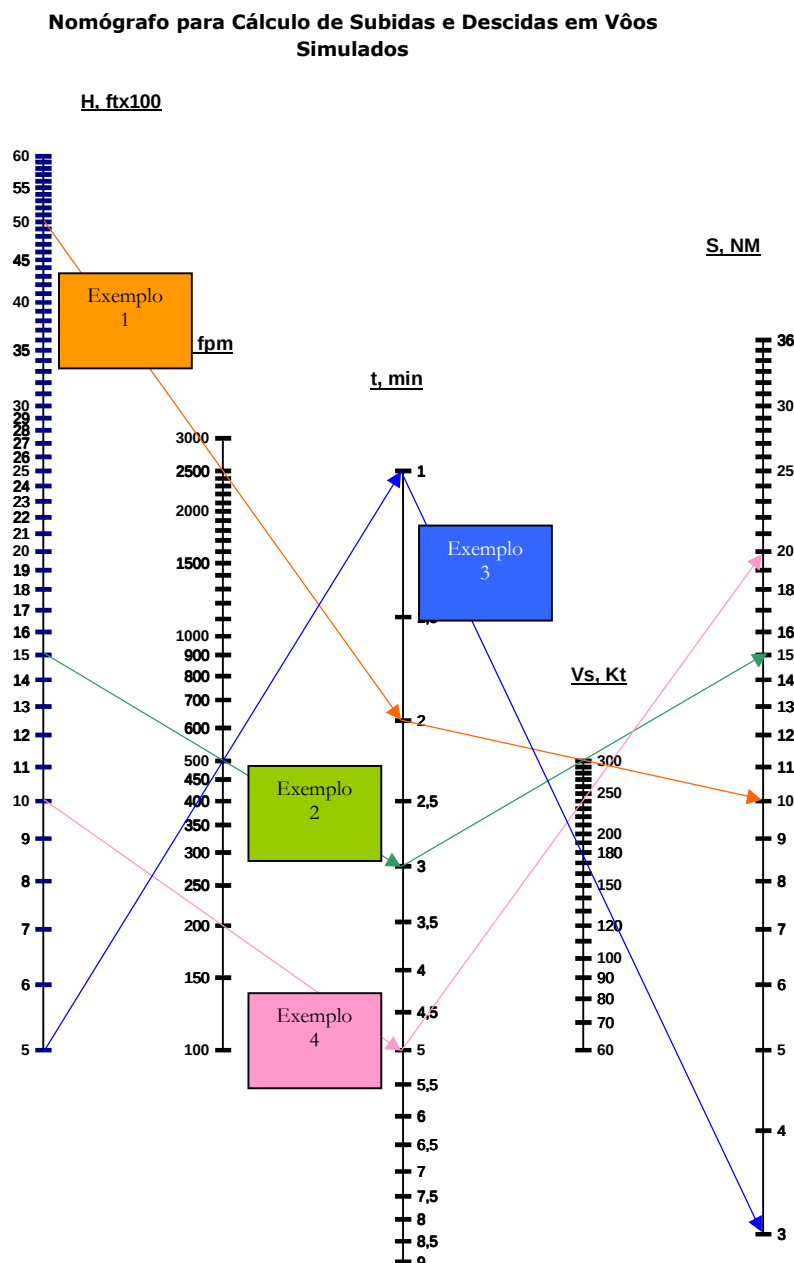
$$S = \frac{H \cdot V_s}{60 \cdot V_h}$$

Onde:

S = distância, em milha náutica (NM);
H = diferença de altitude, em pé (ft);
Vs = velocidade relativa ao solo, em nó (KT);
Vh = razão de subida/descida, em pé por minuto (fpm);

A variável t (tempo, em minuto) é uma decorrência do cálculo.

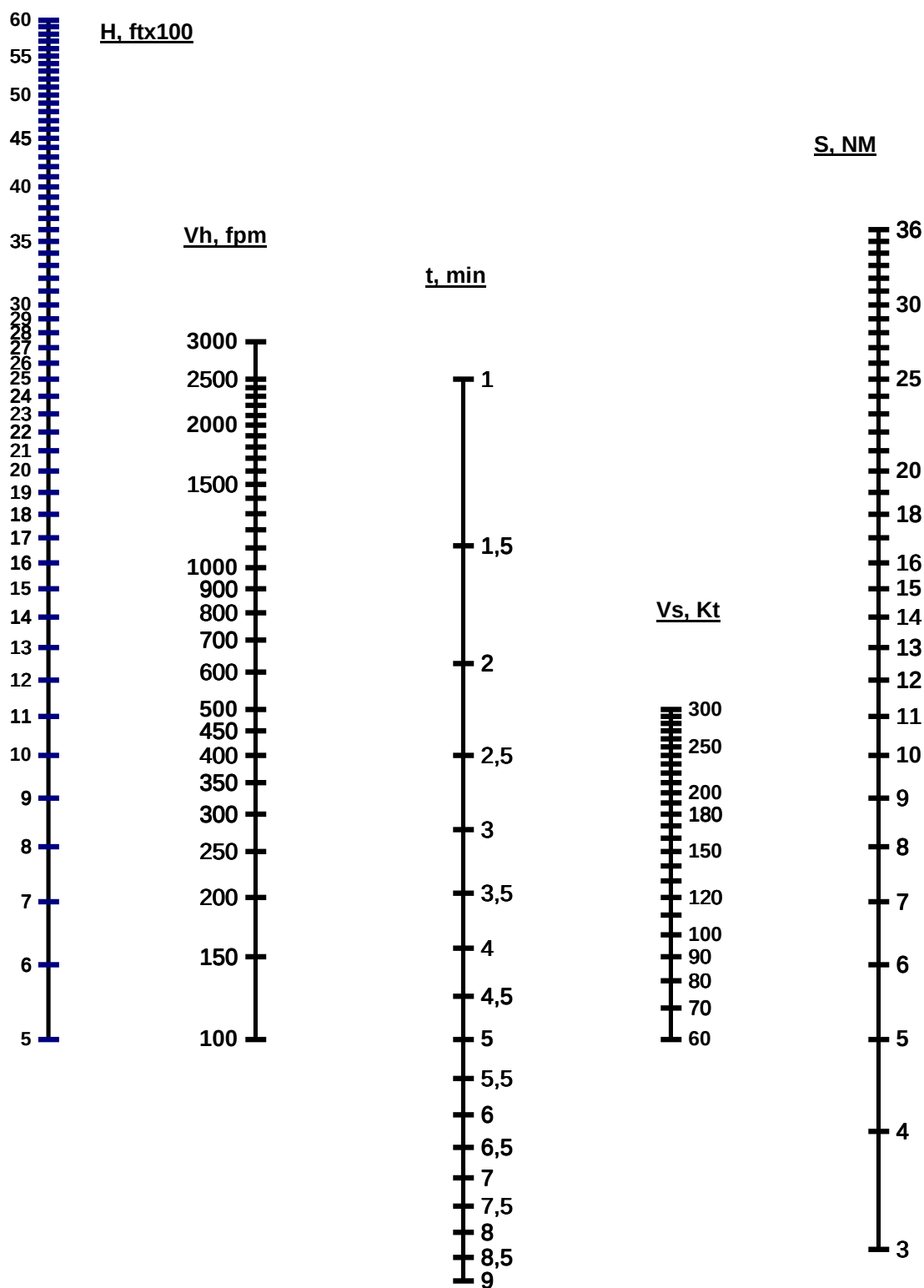
Observe os quatro exemplos dados no modelo ao lado e proponha outros tipos de problemas, conhecendo três parâmetros e encontrando os outros.



Exemplo 1	5.000	2.500	2	300	10
Exemplo 2	1.500	500	3	300	15
Exemplo 3	500	500	1	180	3
Exemplo 4	1.000	200	5	240	20

1. Marque no eixo **H** a diferença de altitude;
2. Marque no eixo **Vh** a razão de Subida/Descida;
3. Prolongue a linha que une os pontos **1** e **2**, acima, até o eixo **t**;
4. Marque no eixo **Vs** a velocidade Relativa ao solo;
5. Trace uma linha reta unindo os pontos **3** e **4**, até o eixo **S**, obtendo a **distância horizontal** percorrida no procedimento.

Nomógrafo para Cálculo de Subidas e Descidas em Vôos Simulados



BIBLIOGRAFIA

GLEISER, MARCELO. A DANÇA DO UNIVERSO. SÃO PAULO: COMPANHIA DAS LETRAS, 1997.

BRANSON, LANE K. ENGINEERING MECHANICS. RIO DE JANEIRO: LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS, 1974.

DOCA, RICARDO HELOU ET ALI. TÓPICOS DE FÍSICA, VOLUME 1, 10ª EDIÇÃO REFORMULADA. SÃO PAULO: EDITORA SARAIVA, 1992.

DENKER, JOHN S. SEE HOW IT FLIES.INTERNET:

[HTTP://WWW.MONMOUTH.COM/~JSD/HOW](http://WWW.MONMOUTH.COM/~JSD/HOW)