

INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
SÃO PAULO

Introdução ao Projeto de Aeronaves

Aula 15 – Influência da Variação da
Altitude e Cálculo do Desempenho de
Subida.

TAPERÁ

Aerodesign



Tópicos Abordados

- Efeitos da Altitude nas Curvas de Tração e Potência.
- Efeitos da Altitude nas Velocidades de Máximo Alcance e Máxima Autonomia.
- Desempenho de Subida.
- Cálculo da Razão de Subida e do Ângulo de Subida.

Desempenho com a Variação da Altitude

- O desempenho de uma aeronave é influenciado significativamente com o aumento da altitude de vôo, pois uma vez que o aumento da altitude proporciona uma redução na densidade do ar, tanto a tração disponível como a requerida e suas respectivas potências sofrem importantes variações que reduzem a capacidade de desempenho da aeronave.

Tração Disponível na Altitude

- Em relação à tração disponível, considera-se que com a redução da densidade do ar a hélice produzirá um empuxo menor que o gerado ao nível do mar.
- A equação relaciona a tração disponível ao nível do mar com as densidades do ar em altitude e ao nível do mar, assim, como a densidade do ar diminui com o aumento da altitude, percebe-se que a relação ρ_h/ρ_0 sempre será um número menor que 1, portanto, quanto maior for a altitude de vôo menor será a tração disponível para uma determinada situação de vôo.

$$T_{dh} = T_{d0} \cdot \frac{\rho_h}{\rho_0}$$

Tração Requerida na Altitude

- Para o caso da curva de tração requerida, esta também sofre significativas mudanças, pois como visto, a tração requerida representa a força necessária para vencer o arrasto total da aeronave.
- A análise das equações permite observar que com o aumento da altitude e a conseqüente diminuição da densidade do ar o coeficiente de sustentação requerido para um determinado peso e velocidade da aeronave deve ser aumentado, ou seja, existe a necessidade de se voar com um maior ângulo de ataque.
- O aumento do C_L requerido também propicia um aumento no coeficiente de arrasto total da aeronave, pois como visto, este é calculado a partir da polar de arrasto.
- Portanto, o aumento da altitude proporciona um impacto direto na eficiência aerodinâmica da aeronave para uma determinada condição de peso e velocidade. Efetivamente na presença da altitude, a relação (C_L/C_D) para uma determinada velocidade de vôo é menor que ao nível do mar, assim, pode-se observar que mantendo-se o peso da aeronave, a redução da eficiência aerodinâmica na presença da altitude propicia um aumento na tração requerida.

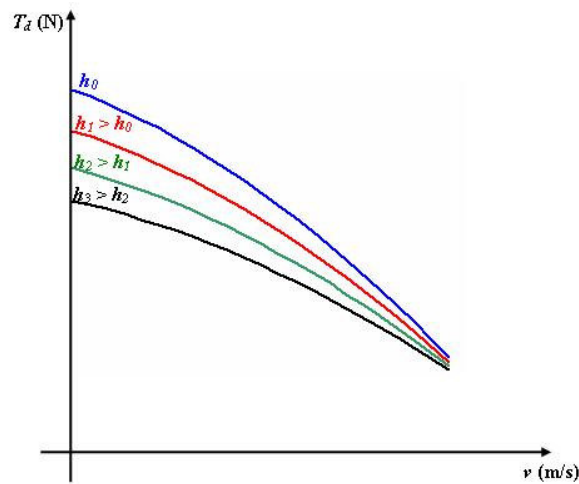
$$T_r = \frac{W}{(C_L / C_D)}$$

$$C_{Lh} = \frac{2 \cdot W}{\rho_h \cdot S \cdot v^2}$$

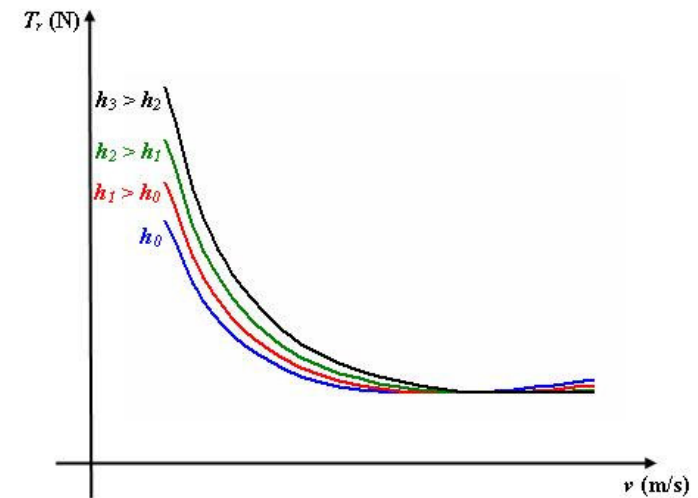
$$C_{Dh} = C_{D0} + K \cdot C_{Lh}^2$$

Curvas Características

Tração Disponível

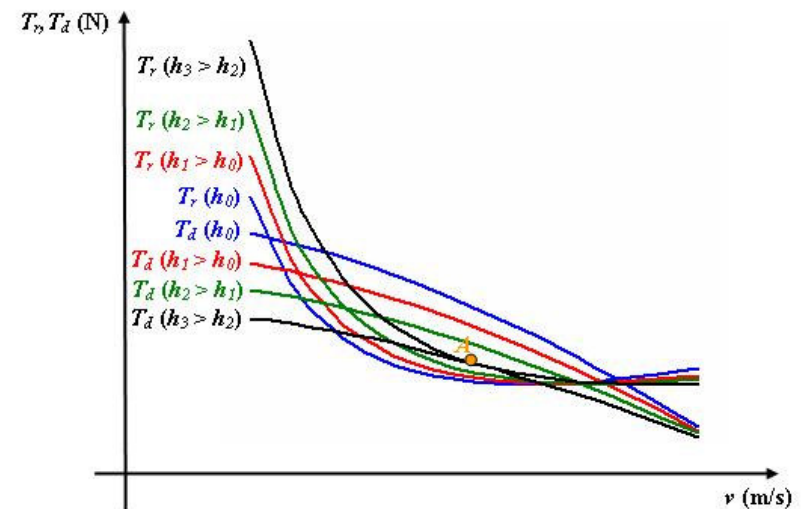


Tração Requerida



Variação da Tração com a Altitude

- Para se avaliar a real capacidade de desempenho de uma aeronave na altitude é conveniente representar as curvas de tração disponível e requerida em um único gráfico considerando diversas condições de altitude.
- É importante observar que o aumento da altitude proporciona uma redução na sobra de tração além de propiciar o aumento da velocidade mínima e a redução da velocidade máxima da aeronave. Também pode-se notar que para um determinado valor de altitude a curva de tração disponível é tangente a curva de tração requerida, esta situação está representada pelo ponto **A**.
- A altitude que proporciona a tangencia entre as curvas de tração determina o teto absoluto de vôo da aeronave e nesta condição existe uma única velocidade que permite manter uma situação de vôo reto e nivelado com velocidade constante.

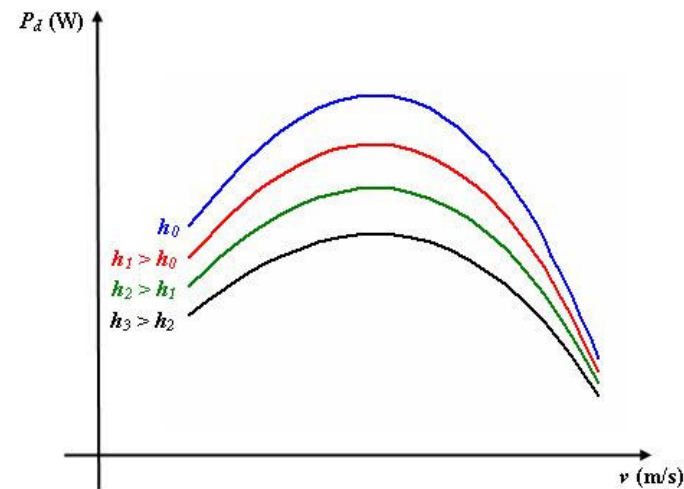


Potência Disponível na Altitude

- Com relação à potência disponível, esta também é influenciada pelo aumento da altitude, onde uma significativa redução é observada conforme a densidade do ar diminui. Uma aproximação válida para o cálculo da potência disponível em altitude é a partir da relação existente entre a tração disponível e a velocidade de vôo, assim:

$$P_{dh} = T_{dh} \cdot v$$

$$P_{dh} = T_{d0} \cdot \frac{\rho_h}{\rho_0} \cdot v$$

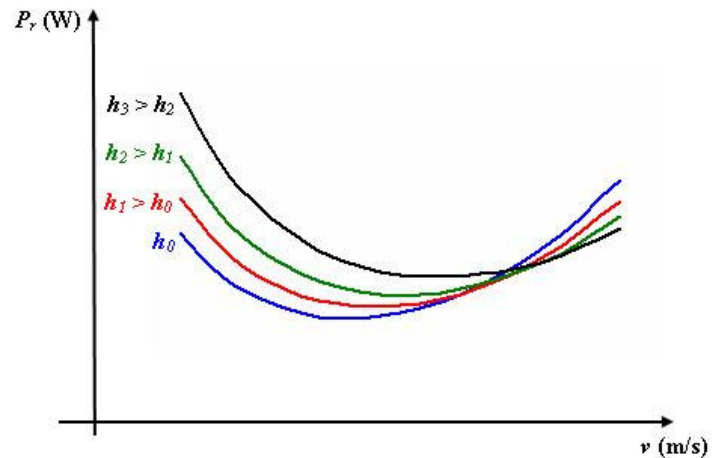


Potência Requerida na Altitude

- No caso da potência requerida, a sua variação em função da altitude pode ser calculada por um processo simples que relaciona as equações utilizadas para o cálculo ao nível do mar com a condição de altitude desejada

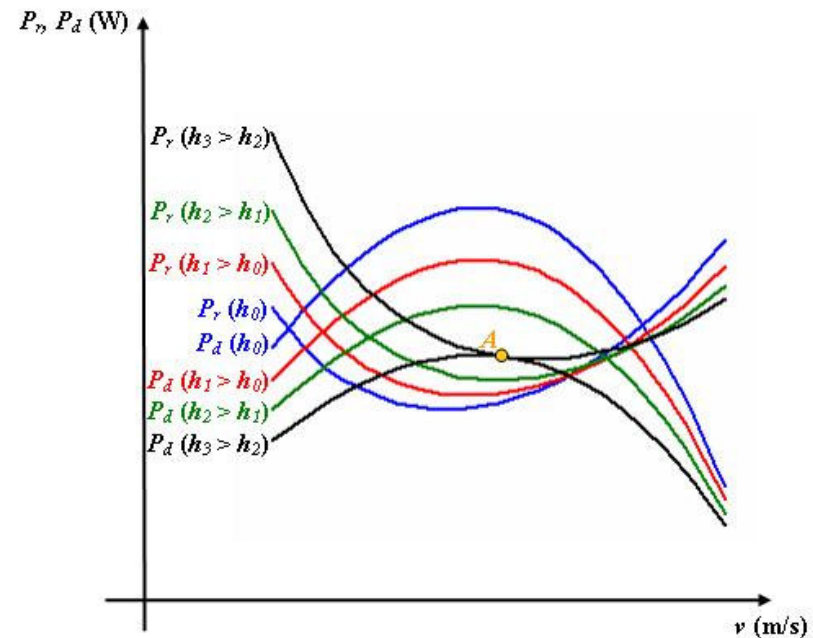
$$P_{rh} = T_{rh} \cdot v$$

$$P_{rh} = \sqrt{\frac{2 \cdot W \cdot C_{Dh}^2}{\rho_h \cdot S \cdot C_{Lh}^3}}$$



Variação da Potência com a Altitude

- Da mesma forma que é realizado para as curvas de tração disponível e requerida, as curvas de potência disponível e requerida em função da altitude devem ser traçadas em um único gráfico, pois assim será possível obter um panorama geral que propicie uma análise apurada das condições de desempenho de subida e velocidade de máxima autonomia para qualquer altitude de vôo avaliada.
- A figura mostra os efeitos da variação da altitude nas curvas de potência disponível e requerida.



Análise das Curvas de Potência

- A análise da variação da altitude nas curvas de potência permite observar que quanto maior for a altitude, menor é a sobra de potência existente, e, isto proporciona um forte impacto no desempenho de subida da aeronave, ou seja, o aumento da altitude de vôo provoca uma redução significativa na razão de subida da aeronave, pois com a manutenção do peso, uma redução na sobra de potência acarreta em uma diminuição na capacidade do avião ganhar altura.
- O ponto **A** representado no gráfico, tal como nas curvas de tração representa o teto absoluto de vôo da aeronave e pela análise das curvas de potência, é possível verificar que para uma determinada altitude, a sobra de potência é nula, e como será apresentado, nesta condição a aeronave não possui mais condições de ganhar altura.
- Com relação à velocidade de máxima autonomia, a variação da altitude também contribui para o aumento dessa velocidade tal como ocorre para a velocidade de máximo alcance obtida pela análise das curvas de tração.

Considerações Importantes sobre a Variação da Altitude de Vôo

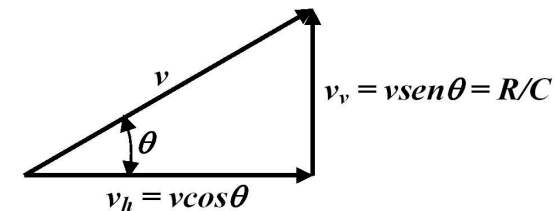
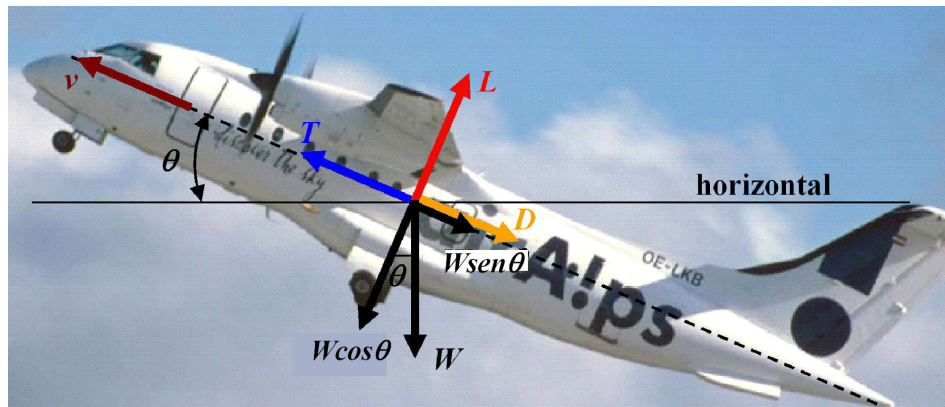
- Para o propósito da competição AeroDesign a análise apresentada é muito importante pois permite à equipe ter uma visão global do desempenho da aeronave em diversas condições de altitude e assim poder durante a competição prever com acuracidade qual será a carga máxima que pode ser transportada nas condições locais de altitude densidade no momento do vôo.
- É muito importante comentar que geralmente os erros de projeto são fundamentalmente gerados pelo fato de muitas equipes desconsiderarem os efeitos da altitude nos cálculos de desempenho da aeronave.
- O aumento da altitude proporciona o aumento das velocidades de máximo alcance e máxima autonomia da aeronave.

Análise do Desempenho de Subida

- A análise do vôo de subida representa um parâmetro muito importante para aeronaves que participam da competição AeroDesign, pois como os vôos são realizados em condições limites de operação do avião, o piloto deve possuir muita experiência e sensibilidade para evitar o estol da aeronave nos instantes iniciais que sucedem a decolagem.
- A razão de subida de uma aeronave representa a velocidade vertical da mesma, e, como será mostrado nesta seção, pode ser obtida de maneira simples a partir de um modelo aproximado que utiliza como referência as curvas de potência disponível e requerida obtidas para o vôo reto e nivelado.

Forças Atuantes na Aeronave Durante um Vôo de Subida

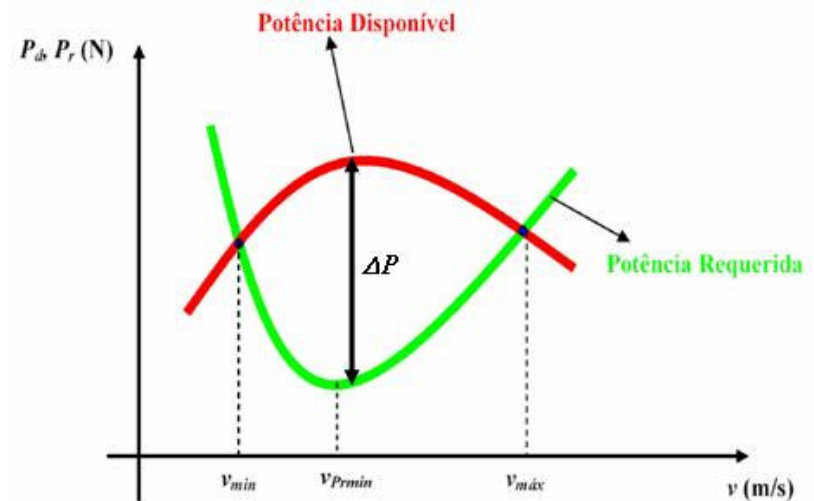
- Em vôo de subida, a velocidade da aeronave está alinhada com a direção do vento relativo e forma um ângulo de incidência θ com relação a uma referência horizontal. Dessa forma, um triângulo de vetores para indicar a velocidade pode ser representado.



Equação para o Cálculo da Razão de Subida

- Considerando que a subida seja realizada para uma condição de velocidade constante, as equações de equilíbrio da estática também podem ser utilizadas.
- A razão de subida pode ser calculada a partir da sobra de potência existente em uma determinada condição de voo.
- Pela análise das curvas de potência disponível e requerida, é possível observar que enquanto houver sobra de potência, a aeronave é capaz de subir.

$$\frac{P_d - P_r}{W} = R / C = v \operatorname{sen} \theta$$



Máxima Razão de Subida

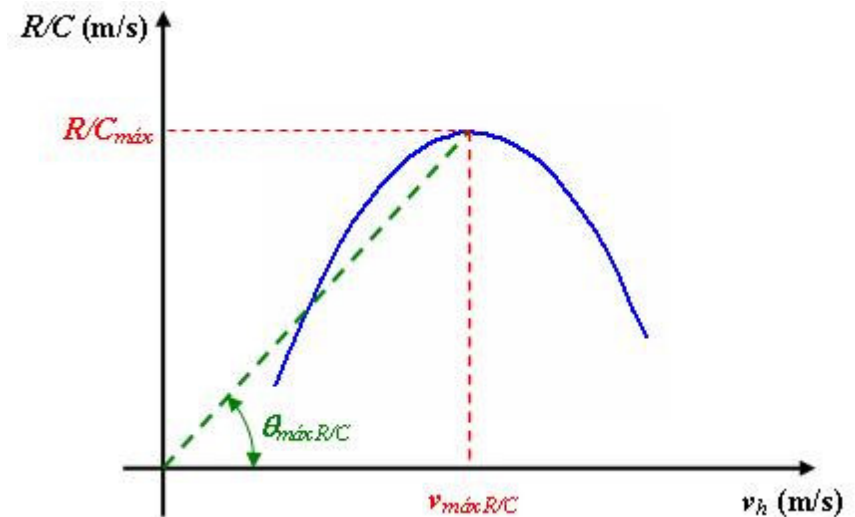
- É importante observar que ao longo da faixa de velocidades, existe um ponto no qual a sobra de potência é máxima, para esta velocidade consegue-se obter a máxima razão de subida da aeronave e o ângulo de subida que proporciona esta condição.

$$R / C_{m\acute{a}x} = \frac{(P_d - P_r)_{m\acute{a}x}}{W}$$

$$\theta_{R / C_{m\acute{a}x}} = \arcsen\left(\frac{R / C_{m\acute{a}x}}{v}\right)$$

Representação Gráfica da Razão de Subida

- É muito comum representar a razão de subida em um gráfico que relacione esta com a velocidade horizontal.
- A figura mostra a curva genérica da razão de subida em função da velocidade horizontal para uma aeronave com propulsão à hélice.
- A representação gráfica da razão de subida em função da velocidade horizontal também é citada na bibliografia aeronáutica com o nome de polar de velocidades, pois tal como a polar de arrasto, representa a velocidade resultante em coordenadas polares, portanto, um gráfico representado em uma escala conveniente permite se obter a velocidade resultante ao longo da trajetória de vôo e ao mesmo tempo o correspondente ângulo de subida para qualquer condição desejada.



Análise da Razão de Subida

- A análise da figura permite observar que para uma determinada velocidade é possível se obter a máxima razão de subida correspondente a um determinado peso e altitude. Esta velocidade é denominada velocidade de máxima razão de subida e para esta situação existe um ângulo de incidência que proporciona a máxima razão de subida denotado por $\theta_{R/Cmáx}$.
- Outro ponto importante relativo à razão de subida é quando se deseja ganhar altura rapidamente para se livrar de um obstáculo. Nesta situação, a subida deve ser realizada para uma condição de máximo ângulo de subida $\theta_{máx}$. Este ângulo corresponde a uma menor velocidade horizontal e uma menor razão de subida, porém proporciona uma subida mais íngreme da aeronave.
- Para o caso de aeronaves que participam da competição AeroDesign, como a mesma opera em condições limites de peso e normalmente a sobra de potência é muito pequena, é essencial que a subida seja realizada com uma velocidade horizontal maior e com uma pequena razão de subida e conseqüentemente um pequeno ângulo de subida, pois dessa forma, a maior velocidade horizontal é utilizada como forma de aumentar a força de sustentação necessária para vencer o peso da aeronave e assim, permitir uma condição segura de subida logo após a decolagem.

Tema da Próxima Aula

- Vôo de Planeio (descida não tracionada).
- Desempenho na Decolagem.
- Desempenho no Pouso.