

Revista Eletrônica

AeroDesign

Magazine



Volume 18 - Número 1 – 2026

ISSN - 2177-5907

Estudo da Aceleração Centrípeta em Manobras de Curva de Aeronaves Comerciais

Gustavo Manzano Lopes
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
g.manzano@aluno.ifsp.edu.br

Rafael Eduardo Simão
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
rafael.simao@aluno.ifsp.edu.br

Resumo

O presente artigo analisa a aceleração centrípeta aplicada às manobras de curva de aeronaves comerciais, abordando sua fundamentação física, modelagem matemática, relação com o ângulo de inclinação (bank angle), fator de carga e implicações operacionais. O estudo demonstra como a sustentação inclinada fornece a componente horizontal necessária para manter o movimento curvo, além de discutir impactos estruturais e operacionais.

Palavras-chave

Aceleração centrípeta; Curva coordenada; Dinâmica de voo; Fator de carga; Aeronaves comerciais.

Abstract

This article analyzes the centripetal acceleration applied to turning maneuvers in commercial aircraft, addressing its physical basis, mathematical modeling, relationship with bank angle, load factor, and operational implications. The study demonstrates how banked lift provides the necessary horizontal component to maintain turning motion, and also discusses structural and operational impacts.

Keywords

Centripetal acceleration; Coordinate curve; Flight dynamics; Load factor; Commercial aircraft.

1 - Introdução

O estudo da Dinâmica aplicada à engenharia aeronáutica permite compreender os fenômenos físicos responsáveis pelo comportamento das aeronaves em voo. Entre esses fenômenos, destaca-se o

movimento curvilíneo, particularmente nas manobras de curva coordenadas realizadas por aeronaves comerciais durante procedimentos de navegação, aproximação e mudança de rota.

Diferentemente do movimento retilíneo uniforme, no qual a velocidade vetorial permanece constante, o movimento em curva envolve variação contínua da direção do vetor velocidade, mesmo quando seu módulo permanece constante. Essa variação implica a existência de uma aceleração dirigida para o centro da trajetória, denominada aceleração centrípeta.

Além disso, a compreensão da dinâmica de curvas em aeronaves não se limita apenas ao campo teórico, sendo fundamental para aplicações práticas em engenharia, segurança de voo e desenvolvimento de sistemas de controle automático. Em aeronaves modernas, sistemas como o Autopilot e o Flight Management System (FMS) utilizam modelos matemáticos baseados nesses princípios para garantir trajetórias seguras e eficientes. Dessa forma, o estudo da aceleração centrípeta em curvas coordenadas torna-se essencial não apenas para pilotos, mas também para engenheiros envolvidos no projeto e análise de aeronaves.

2 - Fundamentação Teórica do Movimento Curvilíneo

2.1 - Movimento Circular Uniforme

Em Dinâmica, o movimento circular uniforme (MCU) caracteriza-se por possuir módulo de velocidade constante e direção variável. A aceleração centrípeta é dada por:

$$a_c = \frac{V^2}{R} \quad (1)$$

onde: V é a velocidade tangencial e R é o raio da trajetória.

A força responsável por essa aceleração é:

$$F_c = mV^2/R \quad (2)$$

onde: m é a massa do corpo; V é a velocidade tangencial e R é o raio da trajetória (curva).

Essa força não altera o módulo da velocidade, mas apenas sua direção. É importante destacar que, embora o movimento circular uniforme apresenta velocidade escalar constante, ele é caracterizado como um movimento acelerado devido à variação contínua da direção do vetor. Essa distinção é fundamental

na análise de sistemas dinâmicos, pois evidencia que aceleração não está necessariamente associada à variação do módulo da velocidade, mas sim à mudança de sua direção ou sentido.

2.2 - Aplicação ao Voo de Aeronaves

Durante voo retilíneo nivelado, as forças que atuam sobre uma aeronave são a resultantes horizontais, como tração (T) e arrasto (D), e verticais, sendo sustentação (L) e peso (W). Diante disso, para se ter um sistema equilibrado, este conjunto de forças se “anulam”.

- a) A soma de todos os componentes ascendentes das forças (não apenas de sustentação) é igual à soma de todos os componentes descendentes das forças (não apenas do peso).
- b) A soma de todos os componentes de forças para frente (não apenas de tração) é igual à soma de todos os componentes de forças para trás (não apenas de arrasto).

Para exemplificar as relações de forças descritas, utiliza-se o modelo abaixo:



Figura 1 - Relação de forças atuantes em uma aeronave.

Em condições reais de voo, esse equilíbrio é constantemente ajustado por meio dos comandos do piloto ou de sistemas automáticos, uma vez que perturbações externas, como rajadas de vento e variações de densidade do ar, podem alterar momentaneamente a distribuição dessas forças. Assim, a estabilidade da aeronave depende da capacidade de corrigir rapidamente tais desvios, garantindo a manutenção do regime de voo desejado.

2.3 - Curva Coordenada em Aeronaves

Conforme discutido no capítulo *Accelerated Performance: Turns* (VT Aerodynamics), uma curva coordenada ocorre quando a aeronave inclina suas asas de um ângulo ϕ (ângulo de bank), inclinando também o vetor sustentação.

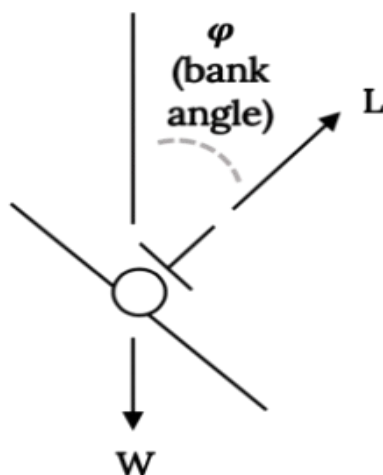


Figura 2 - Vista frontal do ângulo de bank - Fonte - Adaptado do site FAA.

O ângulo formado pelas asas em uma determinada curva, em relação ao equilíbrio, gera uma componente horizontal, apontando ao sentido em que a aeronave se movimentará. Essa força, garante a força de sustentação sendo dividida em duas componentes; uma denominada L_v e L_h (sustentação vertical e horizontal).

Dessa maneira, são geradas duas equações que quando somadas, o sistema gera uma resultante a qual aponta ao centro, sendo um sistema dinâmico em equilíbrio:

$$L_v = L \cdot \cos\phi \quad L_h = L \cdot \sin\phi \quad (3)$$

Sendo L a componente resultante no sistema em MCU e ϕ o ângulo entre as componentes em referência no MCU.

Ademais, para se manter uma aeronave estável em altitude constante, é necessário uma que aconteça a seguinte situação:

$$L \cdot \cos\phi = W \quad (4)$$

Logo, a aeronave irá se manter em “linha reta” sem perda de altitude ao realizar uma curva.

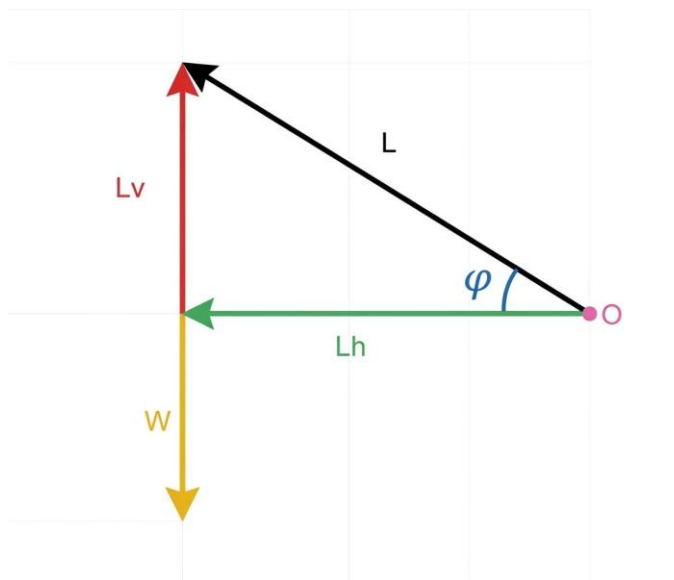


Figura 3 - Demonstração das componentes atuantes no momento de uma curva.

Fonte - Autoria própria.

Sob o ponto de vista matemático, a decomposição da força de sustentação em componentes vertical e horizontal permite modelar a curva como um sistema de equilíbrio dinâmico. A componente vertical da sustentação deve equilibrar o peso da aeronave, enquanto a componente horizontal atua como força centrípeta. Essa análise evidencia que a realização de uma curva coordenada exige um aumento da sustentação total, o que é obtido, na prática, pelo aumento do ângulo de ataque.

2.4 - Curvas Não Coordenadas

Em uma curva coordenada, o peso aparente (resultante da gravidade e da força centrífuga) atua perpendicularmente ao piso da aeronave, mantendo a "bolinha" do coordenador de curva centralizada. Quando esse equilíbrio é rompido, surgem dois fenômenos críticos:

2.4.1 - Glissada (Slipping Turn)

Uma glissada ocorre quando a aeronave está inclinada demais para a taxa de curva que está realizando.

Dinâmica: A componente horizontal da sustentação (L_h) é maior que a força centrípeta (F_c) necessária para aquela trajetória.

Resultado: A aeronave é "puxada" para o interior da curva. No cockpit, o piloto sente que está escorregando para o lado de dentro da inclinação.

Uso Prático: Frequentemente utilizada por pilotos para perder altitude rapidamente sem ganhar velocidade excessiva.

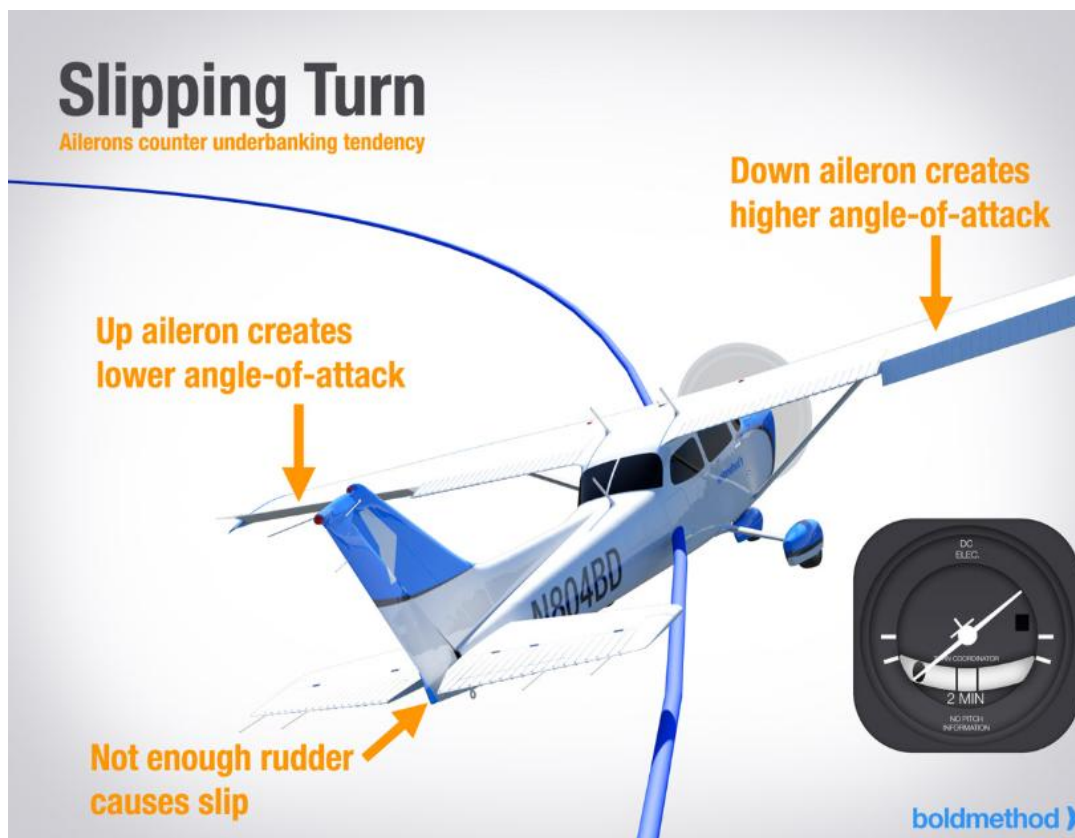


Figura 4 - Exemplo de curva “escorregadia”.

2.4.2 - Derrapagem (Skidding Turn)

A derrapagem é o oposto da glissada e ocorre quando a taxa de curva é excessiva para o ângulo de inclinação (bank angle) aplicado.

Dinâmica: A força centrípeta (F_c) supera a componente horizontal da sustentação (L_h).

Resultado: A aeronave é "jogada" para fora da trajetória curva, de forma análoga a um carro derrapando em uma pista molhada.

Risco: É uma manobra perigosa, especialmente em baixas altitudes, pois pode levar ao estol da asa interna e a um parafuso (spin).

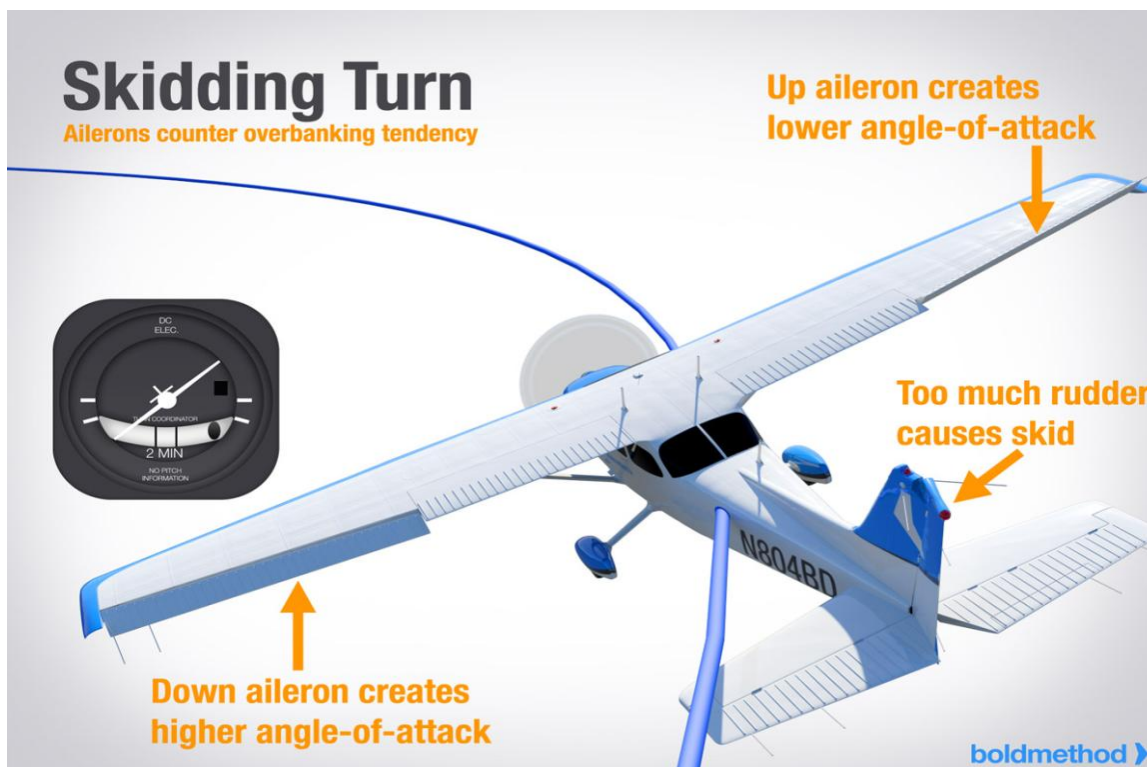


Figura 5 - Exemplo de derrapagem em curva.

A ocorrência de curvas não coordenadas também está diretamente relacionada à atuação inadequada dos comandos de leme (rudder). Em termos de controle, a coordenação ideal da curva exige a atuação simultânea e balanceada entre ailerons e leme, garantindo que não haja forças laterais indesejadas. Esse aspecto é particularmente relevante em aeronaves de grande porte, nas quais pequenas assimetrias podem resultar em esforços estruturais significativos.

3 - Relação Entre Ângulo de Inclinação e Raio de Curva

Para uma aeronave realizar os movimentos curvilíneos de maneira a ter o sistema mostrado anteriormente, é necessário saber o limite do Bank Angle. Para isso, é calculado um raio de curvatura em função deste ângulo através de equações de força centrípeta, assim como mostrado abaixo:

$L \cdot \sin\varphi / L \cdot \cos\varphi = m \cdot V^2/R \div m \cdot g = \tan \varphi = V^2/g \cdot R$ (Essa expressão é fundamental para análise de curvas em aeronaves). Isolando a variável R, obtemos a equação de raio de curvatura:

$$R = V^2/g \cdot \tan\varphi \quad (5)$$

Observa-se que:

Quanto maior a velocidade, maior o raio da curva;

Quanto maior o ângulo de inclinação, menor o raio.

Em aeronaves comerciais de grande porte, operando a 230–260 m/s, os raios de curva são da ordem de quilômetros.

Exemplo:

Para $V=250$ m/s e $\varphi=25^\circ$:

$R \approx 13.500$ m

Essa relação evidencia um compromisso fundamental no projeto e operação de aeronaves: enquanto velocidades elevadas favorecem eficiência aerodinâmica e economia de combustível, elas limitam a capacidade de realizar curvas fechadas. Dessa forma, o planejamento de rotas aéreas leva em consideração não apenas a distância entre pontos, mas também as limitações dinâmicas associadas às manobras de curva.

Isso demonstra que, para curvas que sejam feitas em “velocidades altas”, a depender do porte da aeronave, a curva possui limites operacionais; relacionadas ao “bank angle” e a velocidade do mesmo.

4 - Fator de Carga e Esforços Estruturais

Assim como nas análises do raio de curvatura, o qual exige cálculos para haver o limite de operação da aeronave, é preciso calcular quanto aos esforços estruturais nestas curvas. Diante disso, é levando em consideração uma norma regulamentadora que envolve o fator segurança, denominada FAR-PART 25, este possui como principal lei para aeronaves comerciais, o fator de carga, o qual irá atuar nas manobras de pouso e decolagem.

Para tanto, o fator de carga é definido da seguinte forma:

$$n = L/W \quad (6)$$

Substituindo para uma condição de voo em uma curva (possui atuação das componentes de sustentação) com velocidade de cruzeiro, a equação fica da seguinte maneira:

$$n = 1/\cos\varphi \quad (6)$$

Onde W é proveniente da equação (4).

Admitindo alguns valores de φ , foram encontrados alguns valores de n para uma nave comercial:

Tabela 1 - Autoria própria \ Fonte - FAR-PART 25.

ϕ	n	cos ϕ
15°	1,03528 g	0,96593
30°	1,1547 g	0,86603
45°	1,41421 g	0,70711
60°	2 g	0,5
Fator de carga	n=1/cosϕ	

Do ponto de vista estrutural, o fator de carga está diretamente relacionado aos limites de projeto da aeronave, definidos durante a fase de certificação. Aeronaves comerciais são projetadas para suportar cargas superiores às encontradas em operação normal, incorporando margens de segurança que garantem a integridade estrutural mesmo em situações adversas. No entanto, a operação contínua em regimes de alto fator de carga pode acelerar processos de fadiga estrutural, reduzindo a vida útil dos componentes.

Diante desses dados, conclui-se o seguinte resultado: Quanto maior o aumento do fator de carga implica: maior esforço nas asas; aumento da carga estrutural e aumento da velocidade de estol.

5 - Velocidade de Estol em Curva

A velocidade de estol corresponde à velocidade mínima na qual a aeronave consegue gerar sustentação suficiente para equilibrar seu peso. Quando a velocidade diminui abaixo desse limite, o fluxo de ar sobre as asas se separa e ocorre a perda abrupta de sustentação, caracterizando o estol.

Em voo retilíneo e nivelado, a condição de equilíbrio é dada por:

$$L = W \quad (7)$$

5.1 - Influência na Velocidade de Estol

Para uma aeronave estar em condição dinâmica ideal em uma curva, as asas devem estar projetadas a suportar esforços aerodinâmicos, com isso é necessário calcular a mesma, através da seguinte equação:

$$L = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_L \quad (8)$$

ρ é densidade do ar; V é velocidade; S é área da asa e C_L é o coeficiente de sustentação.

No estol, o coeficiente de sustentação atinge seu valor máximo CL_{max} . Assim, quando o fator de carga aumenta, a aeronave precisa voar a uma velocidade maior para gerar a sustentação necessária. Deste modo, há uma relação entre velocidade de estol e fator de carga sendo:

$$V_{estol,curva} = V_{estol}\sqrt{n} \quad (9)$$

Isso mostra que a velocidade de estol aumenta proporcionalmente à raiz quadrada do fator de carga.

Esse comportamento pode ser interpretado fisicamente pelo fato de que, em uma curva, a aeronave precisa gerar uma sustentação maior do que seu peso para manter a trajetória. Como a sustentação depende do quadrado da velocidade, torna-se necessário aumentar a velocidade para compensar o aumento da carga aerodinâmica. Essa relação reforça a importância do controle rigoroso de velocidade durante manobras, especialmente em fases críticas do voo.

Logo, se pegarmos uma aeronave com voo reto em 100 nós (185,2 km/h) e se esta mesma aeronave faz uma curva a 45° com a mesma velocidade, o fator de carga, seguindo a Tabela 1, será de $\approx 1,41$, com isso, o avião terá que ter uma velocidade de estol de:

$$V_{estol,curva} = 100 \cdot \sqrt{1,41}$$

$$V_{estol,curva} \approx 119 \text{ nós}$$

Esse fenômeno é extremamente importante para a segurança de voo. Durante manobras em baixa velocidade, como aproximações e curvas próximas ao solo, um aumento excessivo do ângulo de inclinação pode levar a aeronave a atingir a velocidade de estol inesperadamente.

Por essa razão, aeronaves comerciais operam com ângulos de inclinação moderados, geralmente entre 20° e 30°, garantindo margem de segurança adequada entre a velocidade de operação e a velocidade de estol. Para exemplificação, foram feitos gráficos de velocidade de estol x ângulo de inclinação (Gráfico 1) e de raio de curvatura x velocidade da aeronave (Gráfico 2), tendo como base o Embraer KC-390 Millennium.

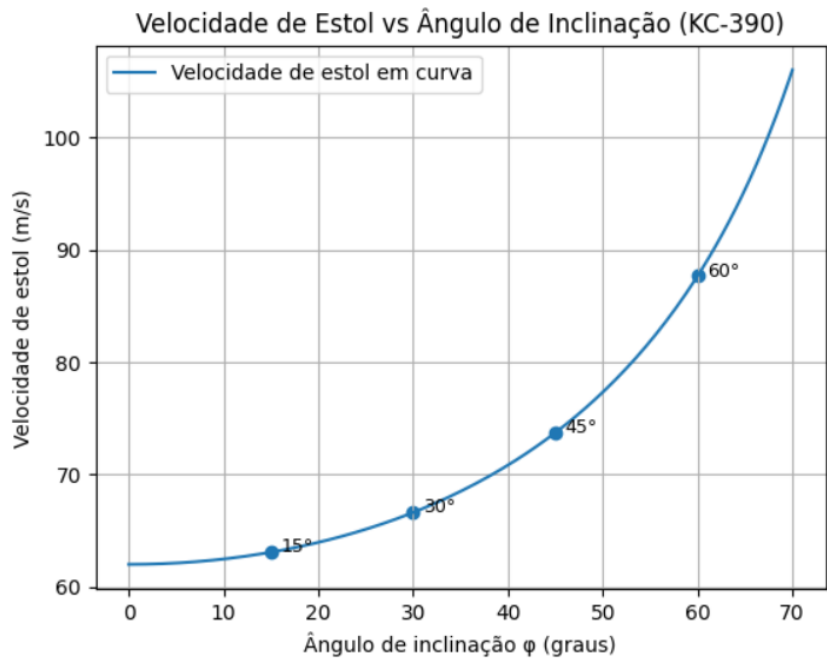


Figura 6 – Velocidade de Estol x Ângulo de Inclinação.

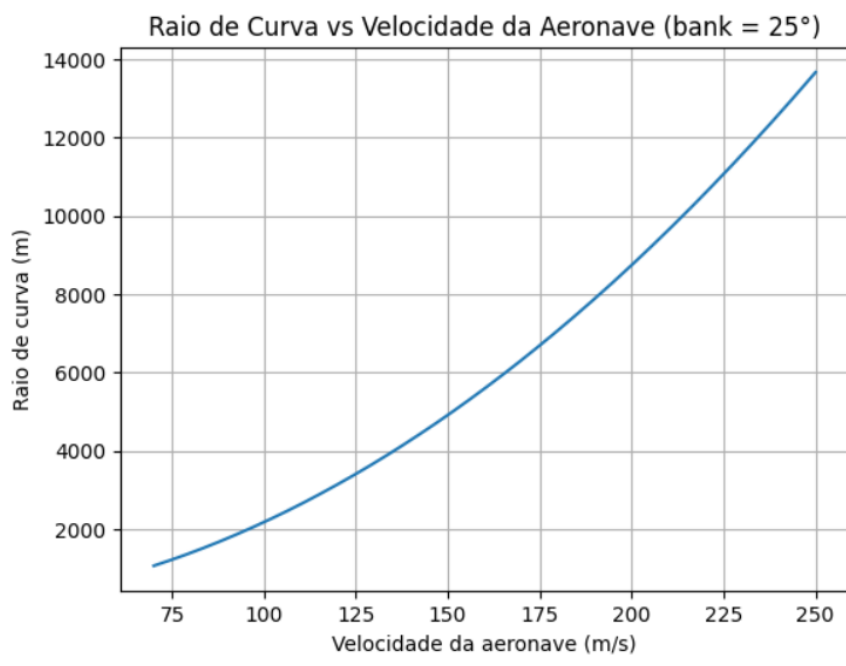


Figura 7 – Raio de Curva x Velocidade da Aeronave.

6 - Aplicação da Dinâmica de Curvas em Procedimentos de Navegação Aérea (SID e STAR)

Assim como dito anteriormente, as aeronaves utilizam cálculos para controle de voos em movimentos curvos e/ou retilíneos; para tanto, se utiliza alguns mecanismos para estarem realizando estas ações, sendo um deles para subida (decolagem) e outro para descida (pouso).

As ferramentas denominadas são, a *Standard Instrument Departure (SID)* que é um procedimento padronizado de saída por instrumentos utilizado por aeronaves logo após a decolagem. E o *Standard Terminal Arrival Route (STAR)* é um procedimento padronizado utilizado durante a fase de aproximação de uma aeronave a um aeroporto.

6.1 - SID

A SID define a sequência de ações desde o fim da pista (DER — *Departure End of Runway*) até um ponto de transição para a navegação em rota. Inclui instruções de subida inicial, restrições de altitude e velocidade, e pontos de navegação (**waypoints**¹, **VOR**², **NDB**³ ou interseções **RNAV**⁴).

O piloto deve manter o gradiente mínimo de subida (geralmente 200 pés por milha náutica) e cumprir todos os limites de trajetória e altitude publicados para assegurar a separação de obstáculos e aeronaves.

Pontos de referência: definidos por latitude e longitude.

Sistema de navegação por rádio: opera em VHF (Very High Frequency).

Sistema de navegação por rádio: mais antigo e opera com sinais em todas as direções, não de forma radial, assim como o VOR.

Sistema de navegação por satélite/computador.

6.2 - STAR.

Uma STAR começa geralmente em um ponto de entrada do espaço aéreo terminal, como um fixo ou interseção, e termina em um ponto que conecta à aproximação final, normalmente o IAF (Initial Approach Fix). Cada rota contém instruções publicadas de altitudes, velocidades e restrições de trajetória, permitindo que pilotos sigam o procedimento com mínima intervenção do controle.

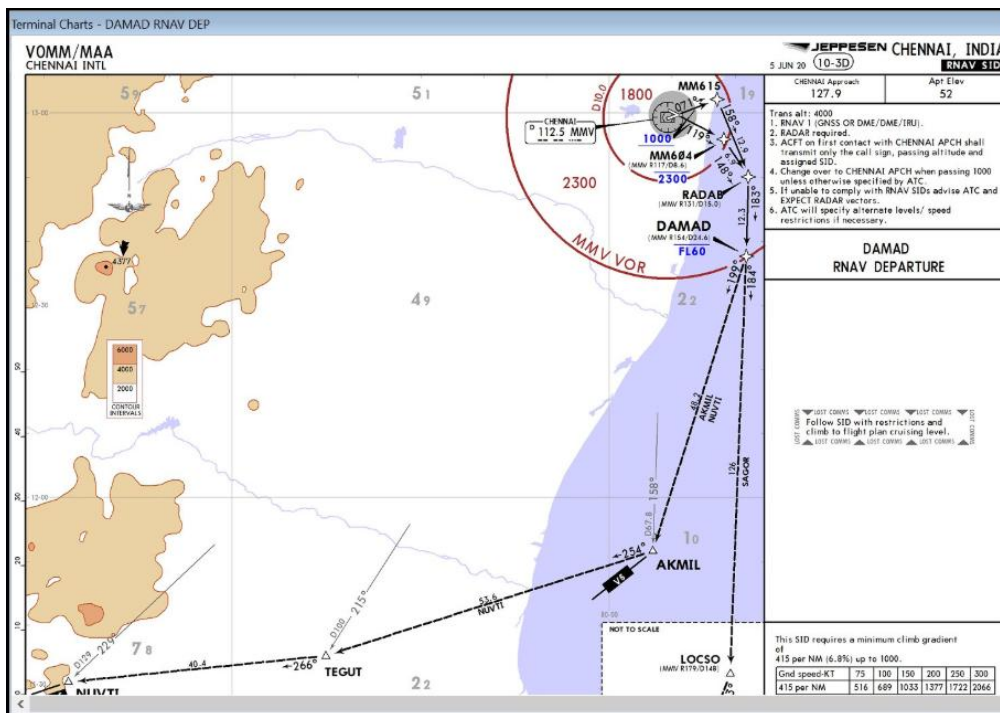


Figura 8 - Exemplo de uma rota de uma aeronave em direção à Índia.

Do ponto de vista da engenharia de controle, os procedimentos SID e STAR podem ser interpretados como trajetórias previamente otimizadas, nas quais variáveis como velocidade, altitude e raio de curva são cuidadosamente definidas para garantir eficiência operacional e segurança. Esses procedimentos são amplamente integrados a sistemas automáticos de navegação, permitindo que a aeronave siga trajetórias complexas com elevada precisão.

7 - Discussão

A análise realizada demonstra que a dinâmica de curvas em aeronaves é um sistema complexo de equilíbrio de forças. Além da relação fundamental entre velocidade, ângulo de inclinação e raio de curva, a coordenação da manobra surge como um fator crítico de estabilidade. Conforme discutido na fundamentação teórica, a harmonia entre a componente horizontal da sustentação (L_h) e a força centrípeta (F_c) define a qualidade da curva.

Quando esse equilíbrio é rompido, a aeronave entra em regimes não coordenados. No caso da glissada (slipping turn), o excesso de inclinação em relação à taxa de curva faz com que a sustentação horizontal supere a necessidade centrípeta, "puxando" a aeronave para o interior da curva. Embora seja uma manobra útil para perda rápida de altitude, ela demonstra uma ausência aerodinâmica momentânea.

Por outro lado, a derrapagem (skidding turn) representa um risco operacional superior: a força centrípeta excede a sustentação horizontal, jogando a aeronave para fora da trajetória e aumentando drasticamente o risco de um estol assimétrico e subsequente parafuso (spin), especialmente perigoso em fases de aproximação (STAR).

Os resultados obtidos nos gráficos do Embraer KC-390 corroboram a necessidade de manter a curva dentro de limites estritos. O aumento do ângulo de inclinação não apenas eleva o fator de carga e a velocidade de estol — conforme a relação $V_{estol,curva} = V_{estol} \cdot \sqrt{n}$ — mas também exige uma coordenação precisa para evitar esforços estruturais laterais indesejados. Assim, a segurança de voo em aeronaves modernas depende de um equilíbrio triplo: integridade estrutural (fator de carga), margem de sustentação (velocidade de estol) e precisão de trajetória (coordenação de curva)

Além disso, a análise evidencia a importância da integração entre teoria e prática, uma vez que os modelos matemáticos utilizados na descrição das curvas devem considerar limitações reais, como restrições estruturais, desempenho dos motores e condições atmosféricas. Dessa forma, o estudo da dinâmica de curvas não apenas valida os princípios da mecânica clássica, mas também demonstra sua aplicabilidade direta em sistemas reais de engenharia.

8 - Conclusões

O presente estudo analisou o comportamento da aceleração centrípeta em manobras de curva de aeronaves, considerando a relação entre velocidade de voo, ângulo de inclinação e raio da trajetória. A partir da aplicação dos princípios da dinâmica do movimento circular, foi possível verificar como essas variáveis influenciam diretamente a forma como uma aeronave executa uma curva em voo.

Os resultados obtidos mostraram que o aumento do ângulo de inclinação eleva o fator de carga atuante sobre a aeronave, o que resulta em um aumento da velocidade de estol durante a manobra. Paralelamente, observou-se que o raio de curva cresce proporcionalmente ao quadrado da velocidade, evidenciando que aeronaves operando em velocidades mais altas realizam curvas mais amplas quando mantêm um mesmo ângulo de inclinação.

A análise conjunta desses fatores demonstrou que a realização de curvas envolve um equilíbrio entre velocidade, inclinação e segurança operacional, uma vez que curvas mais fechadas exigem maiores ângulos de inclinação e aumentam as cargas estruturais sobre a aeronave. Dessa forma, na prática operacional, aeronaves comerciais realizam curvas com ângulos moderados, garantindo margens adequadas em relação à velocidade de estol e ao fator de carga.

Portanto, conclui-se que os resultados obtidos apresentam coerência com os fundamentos da dinâmica clássica e refletem adequadamente o comportamento esperado em aeronaves de transporte modernas, como o Embraer KC-390 Millennium, evidenciando a importância da compreensão dessas relações para o planejamento de rotas, procedimentos de navegação aérea e segurança de voo.

Por fim, destaca-se que o domínio desses conceitos é essencial para o desenvolvimento de tecnologias aeronáuticas mais avançadas, incluindo sistemas de controle autônomo e otimização de trajetórias. Assim, o presente trabalho contribui para a compreensão integrada entre dinâmica clássica e aplicações práticas na engenharia aeronáutica, reforçando a relevância do tema no contexto acadêmico e profissional.

9 - Referências Bibliográficas

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). Airplane Flying Handbook (FAA-H-8083-3C). Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 2021.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física: Mecânica. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 1.

COOK, M. V. *Flight Dynamics Principles: A Linear Systems Approach to Aircraft Stability and Control*. Elsevier, 2011.

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. *Asas do Conhecimento: Aerodinâmica do Voo*.