

Introdução ao Controle Automático de Aeronaves

Aulas Iniciais

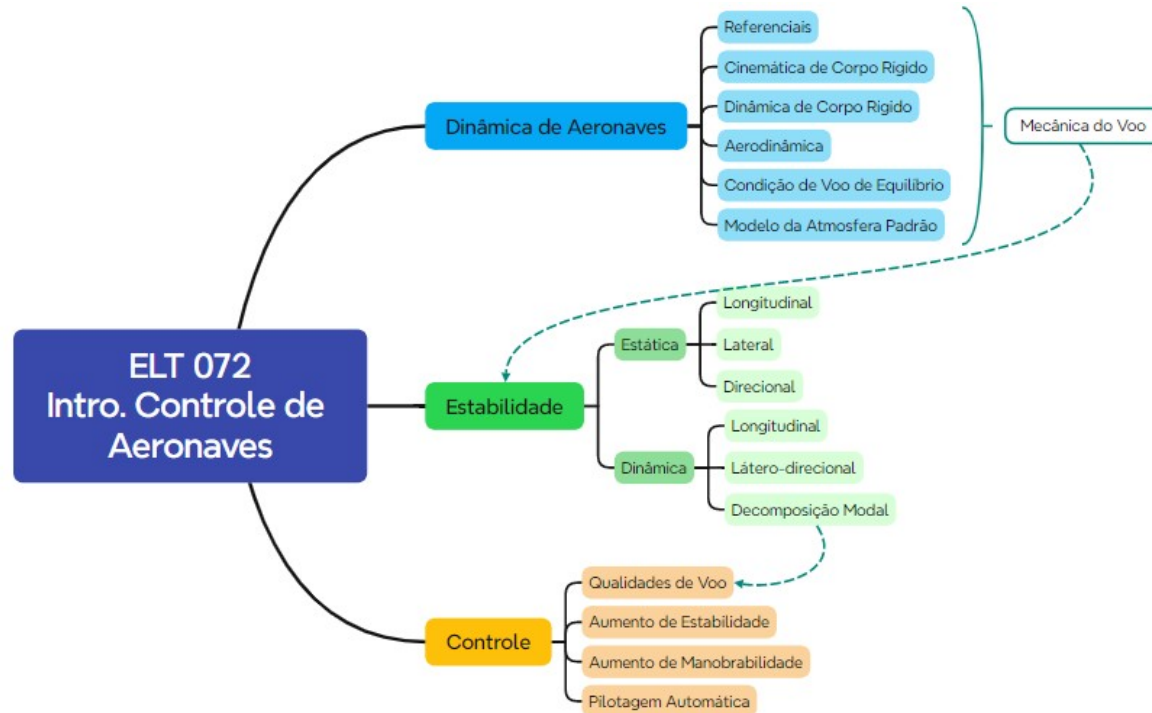


Visão Geral do Curso

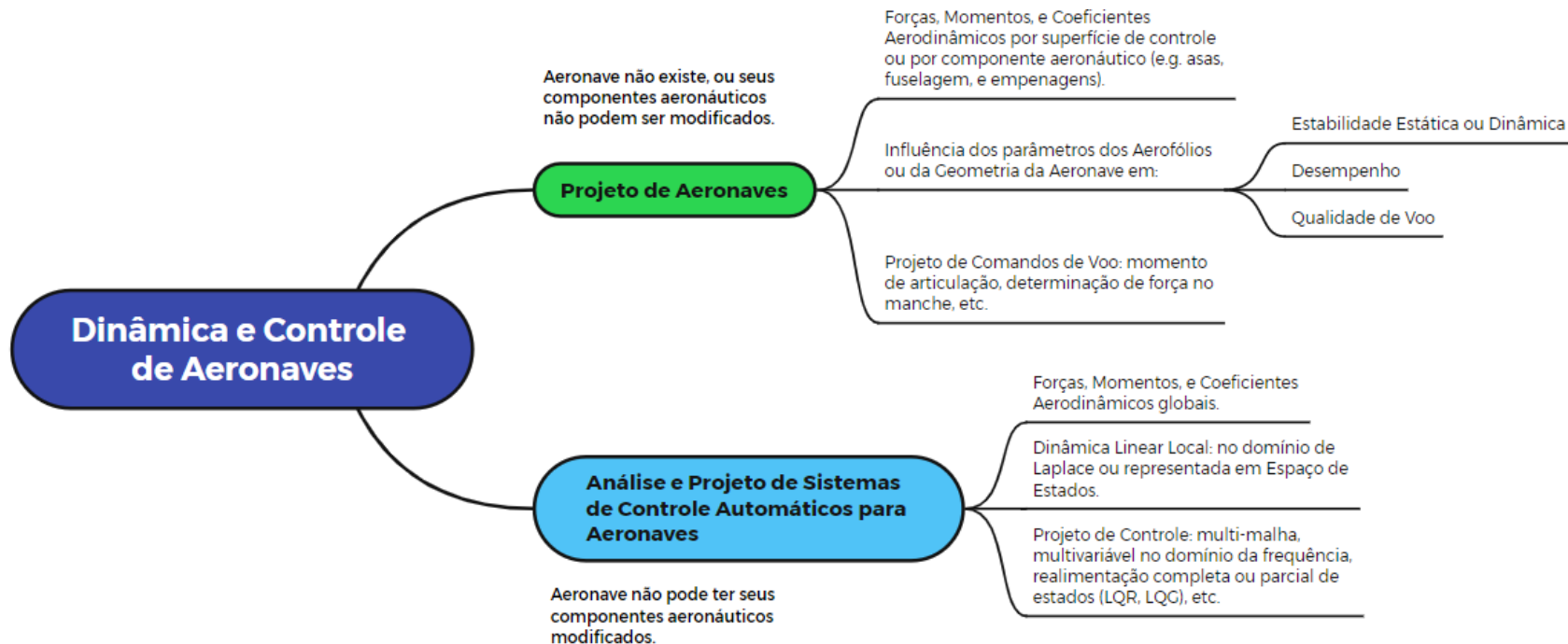
Principais Tópicos:

- Dinâmica de Aeronaves (Mecânica de Voo e Modelagem Matemática): dinâmica de corpo rígido com 6 graus de liberdade, dinâmica longitudinal e latero-direcional.
- Estabilidade de Aeronaves: estática e dinâmica.
- Controle de Aeronaves: requisitos de qualidade de voo e topologias básicas de controle.

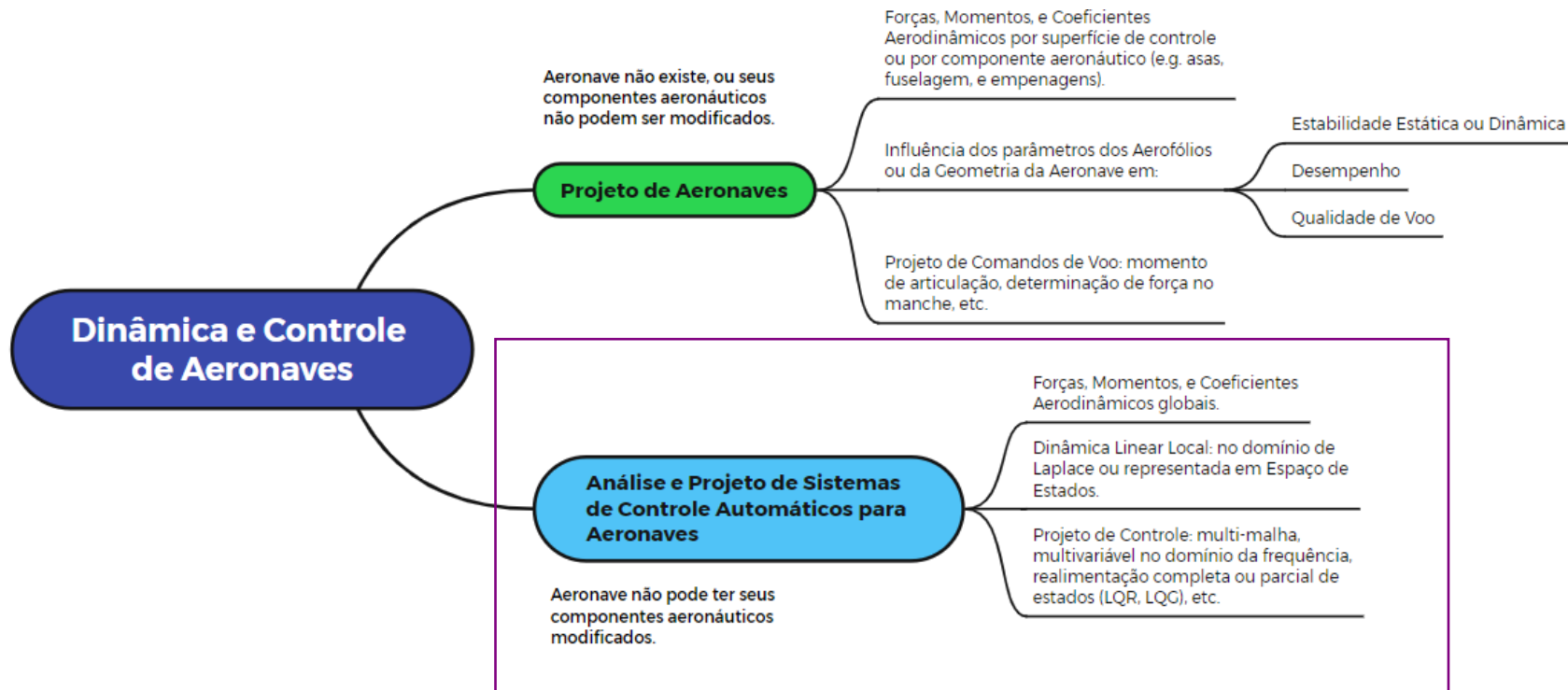
Visão Geral do Curso



Visão Geral do Curso



Visão Geral do Curso



Objetivos de Aprendizado

Ao final do curso espera-se que você seja capaz de:

- 1) Programar uma simulação computacional usando equações que representam a dinâmica de voo de uma aeronave como um corpo rígido sujeito a interações com a atmosfera.
- 2) Avaliar a estabilidade estática e dinâmica de uma aeronave em torno de uma condição de equilíbrio de voo.
- 3) Explicar a separação entre dinâmica longitudinal e dinâmica látero-direcional, e mostrar as decomposições modais correspondentes.

Objetivos de Aprendizado

Ao final do curso espera-se que você seja capaz de:

- 4) Descrever os requisitos de pilotagem e qualidade de voo com base na decomposição modal das dinâmicas longitudinal e látero-direcional.
- 5) Listar e classificar as principais topologias de controle para aumento de estabilidade, melhoria de manobrabilidade, e pilotagem automática.

Principais Referências Bibliográficas

Livro-texto:

- Aircraft Control and Simulation : Dynamics, Controls Design, and Autonomous Systems, by Brian L. Stevens, Frank L. Lewis, and Eric N. Johnson
(2016). Vamos cobrir os capítulos de 1 a 4, e talvez o capítulo 5, se houver tempo.

Um outra referência importante (dentre várias):

- Flight Stability and Automatic Control, by Robert C. Nelson
(1998). Um livro que podemos usar para fazer a ponte entre “Projeto de Aeronaves” e “Controle Automático de Aeronaves”.

Projeto de Simulação

Projeto de Simulação



Visualização e
“Ensaio em Voo”

Parâmetros da Aeronave
em arquivos XML



MATLAB/Simulink
Ambiente de Simulação

Projeto de Simulação

Software:

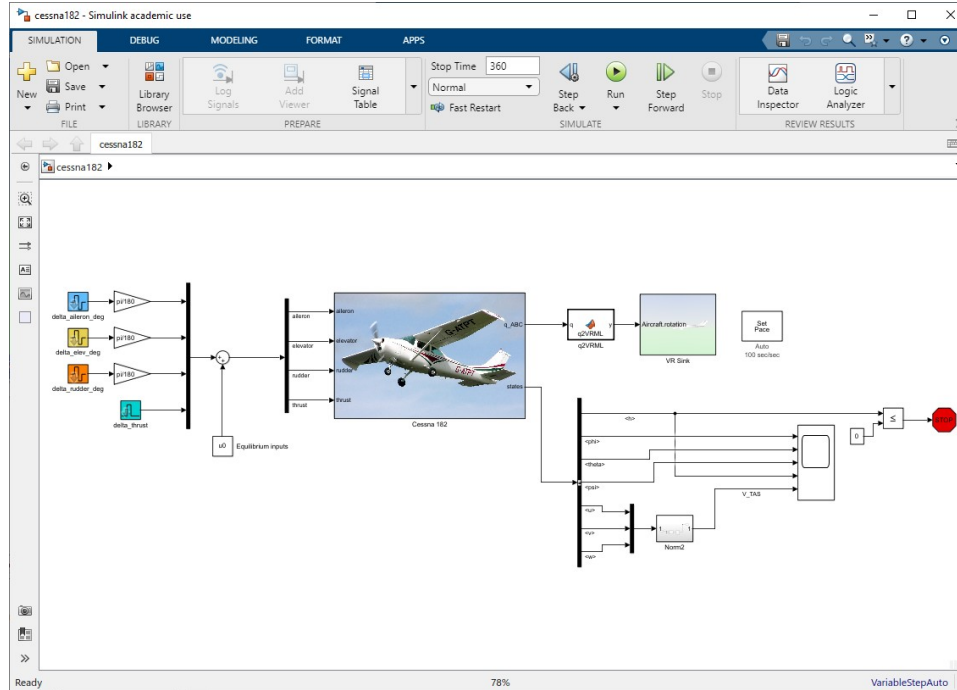
- **Necessário:**

1. MATLAB com Simulink (existe uma licença válida para todos os estudantes e professores da UFMG).
2. O arquivo Zipado da Aeronave do seu Grupo. Disponível em: <http://mirrors.ibiblio.org/flightgear/ftp/Aircraft/>

- **Recomendado:**

1. FlightGear Flight Simulator (somente para visualização). Precisa de um computador com uma boa placa gráfica.
2. Notepad++ Editor de texto com .
3. Simulink On-Ramp Course (if you are not familiar with MATLAB Simulink).

Projeto de Simulação



Modificar o diagrama de Simulação do Cessna 182 para a aeronave do seu Grupo.

Trabalho em Grupo (Simulação)

Aeronave:

- **Grupo 1:** Airbus A320-231



Trabalho em Grupo (Simulação)

Aeronave:

- **Grupo 2:** Cirrus SR22T



Trabalho em Grupo (Simulação)

Aeronave:

- **Grupo 3:** Northrop T-38 Talon



Trabalho em Grupo (Simulação)

Aeronave:

- **Grupo 4:** Piper Seneca II



Trabalho em Grupo (Simulação)

Aeronave:

- **Grupo 5:** Lockheed 1049H Super Constellation



Trabalho em Grupo (Simulação)

Aeronave:

- **Grupo 6:** Cessna T-37



Trabalho em Grupo (Simulação)

Aeronave:

- **Grupo 7:** Fokker 100



Mecanismos de Controle de Voo: Introdução

Nomenclatura

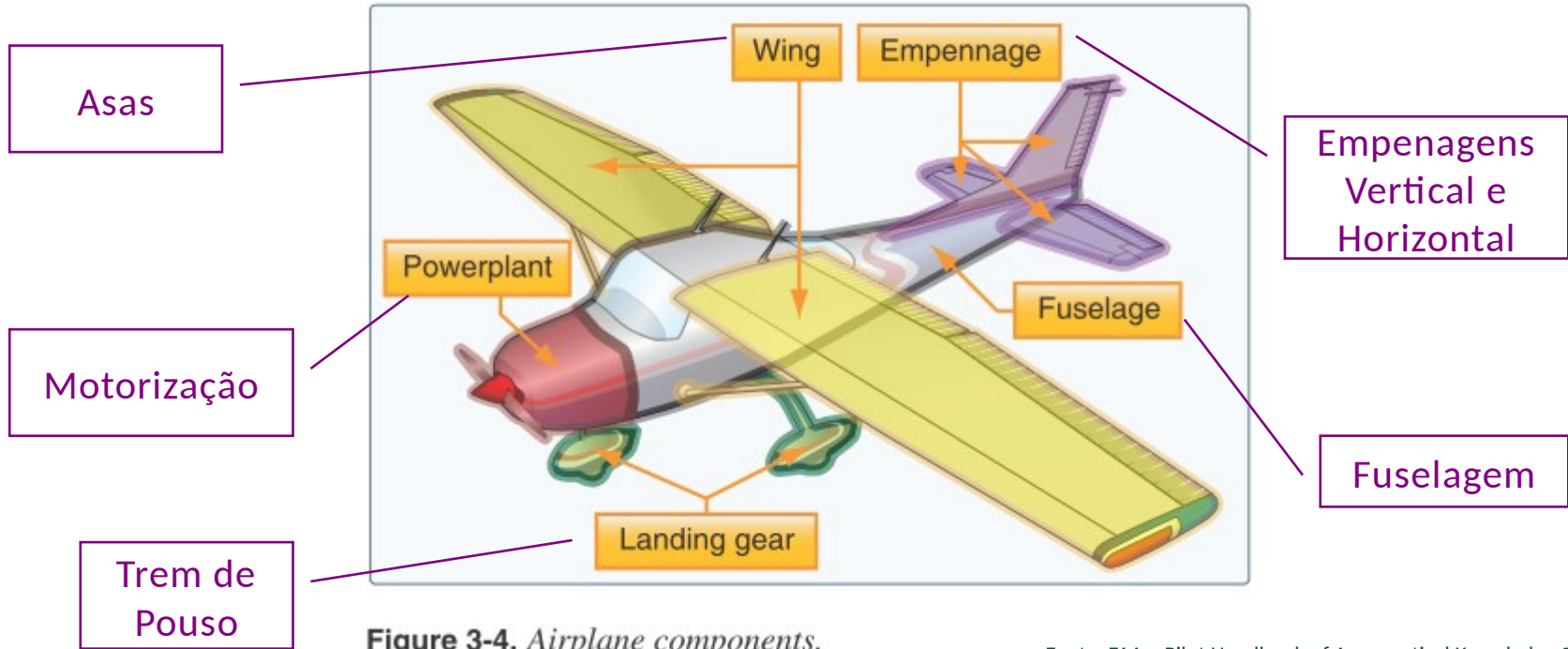
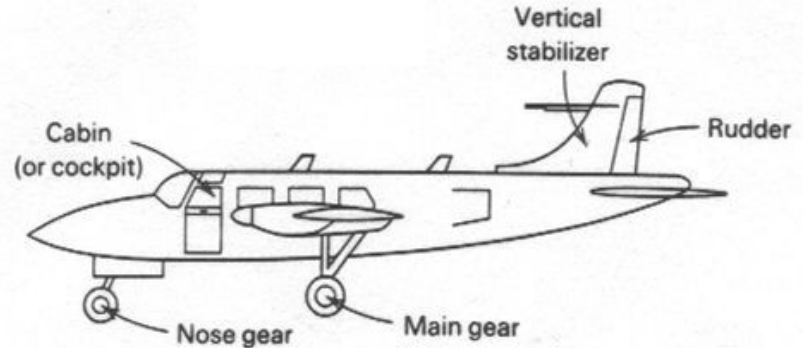
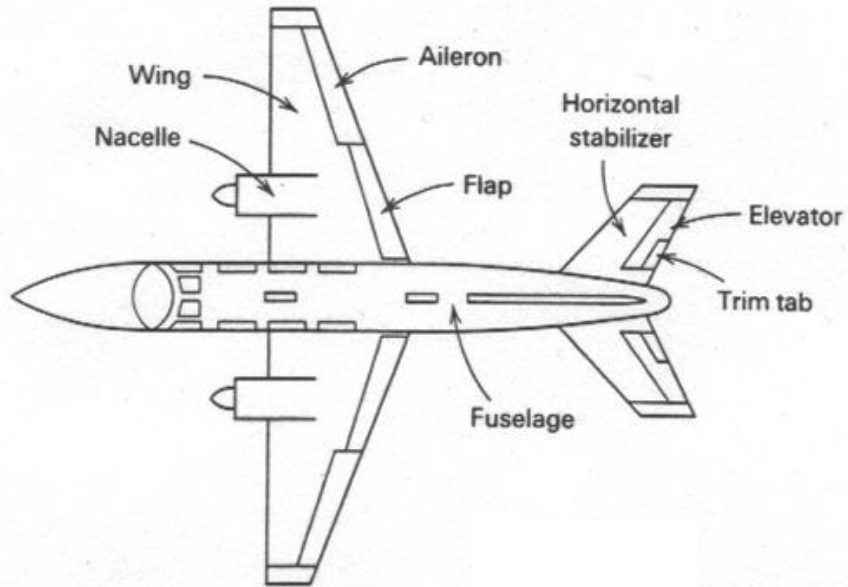


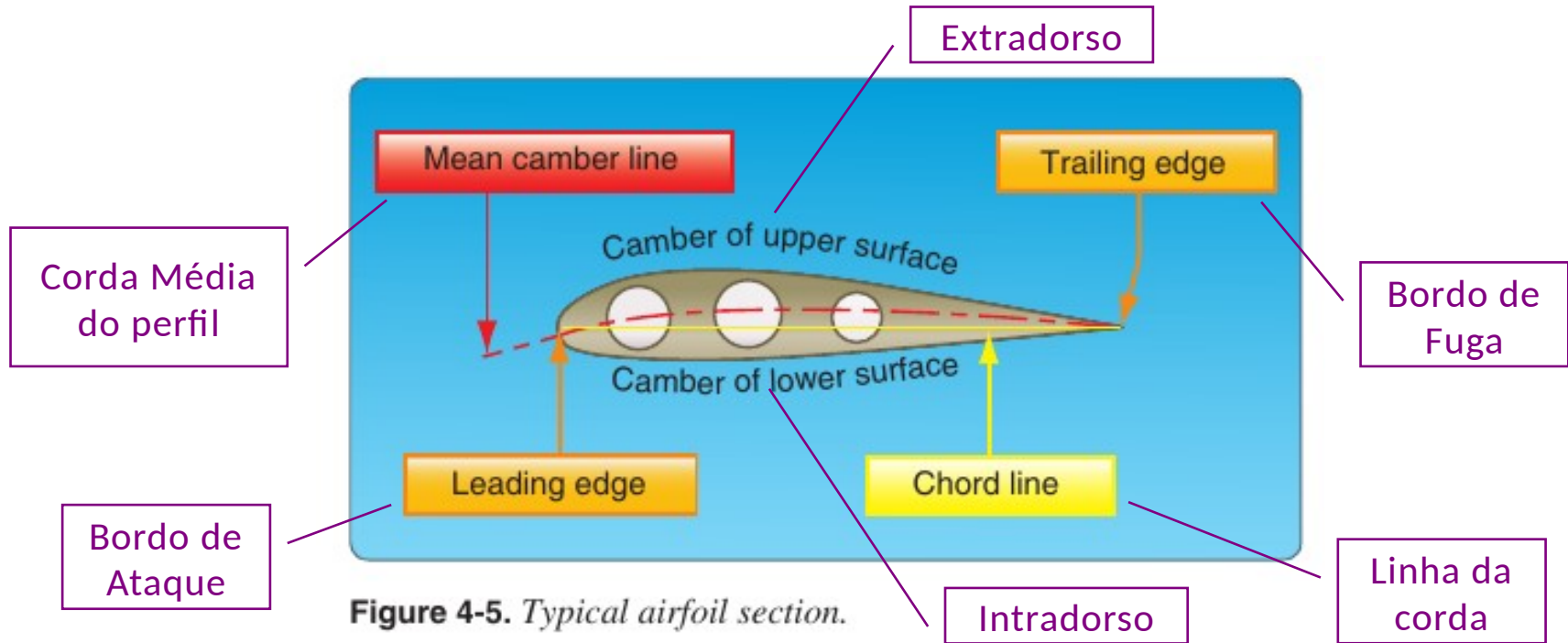
Figure 3-4. *Airplane components.*

Fonte: FAA – Pilot Handbook of Aeronautical Knowledge 2016

Nomenclatura



Aerofólios: Elementos Básicos



Fonte: FAA – Pilot Handbook of Aeronautical Knowledge 2016

Eixos de Movimentação

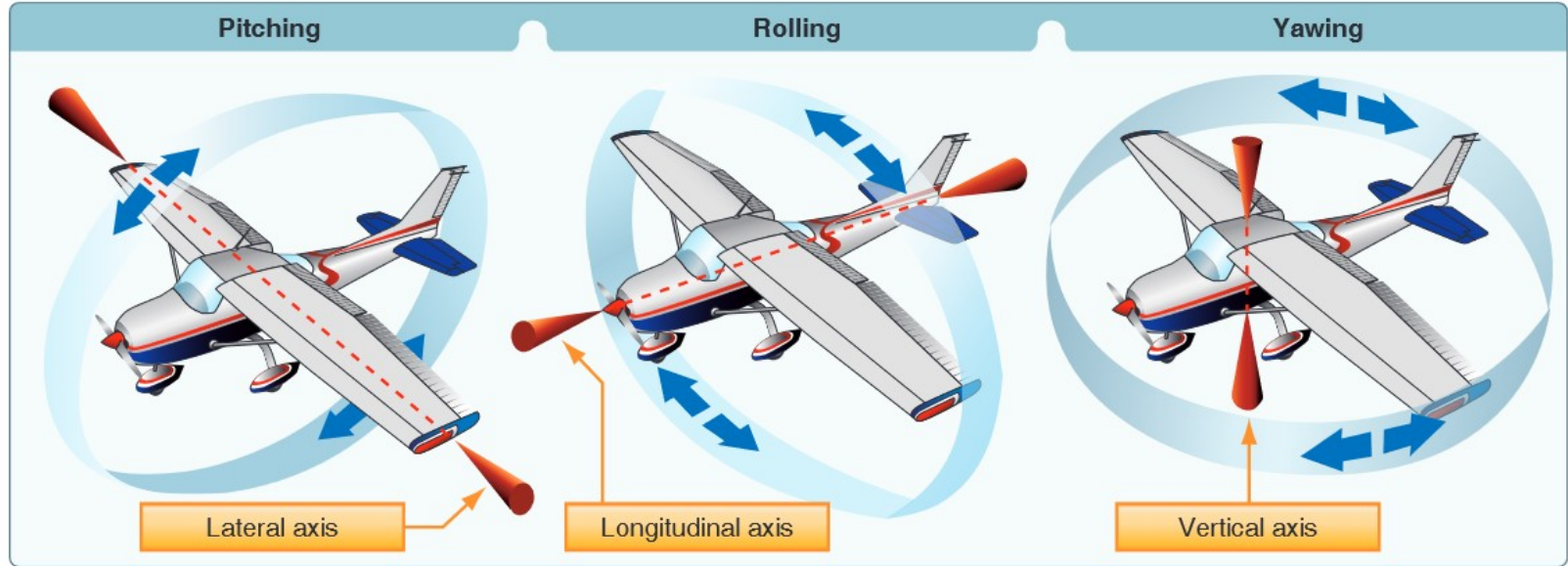
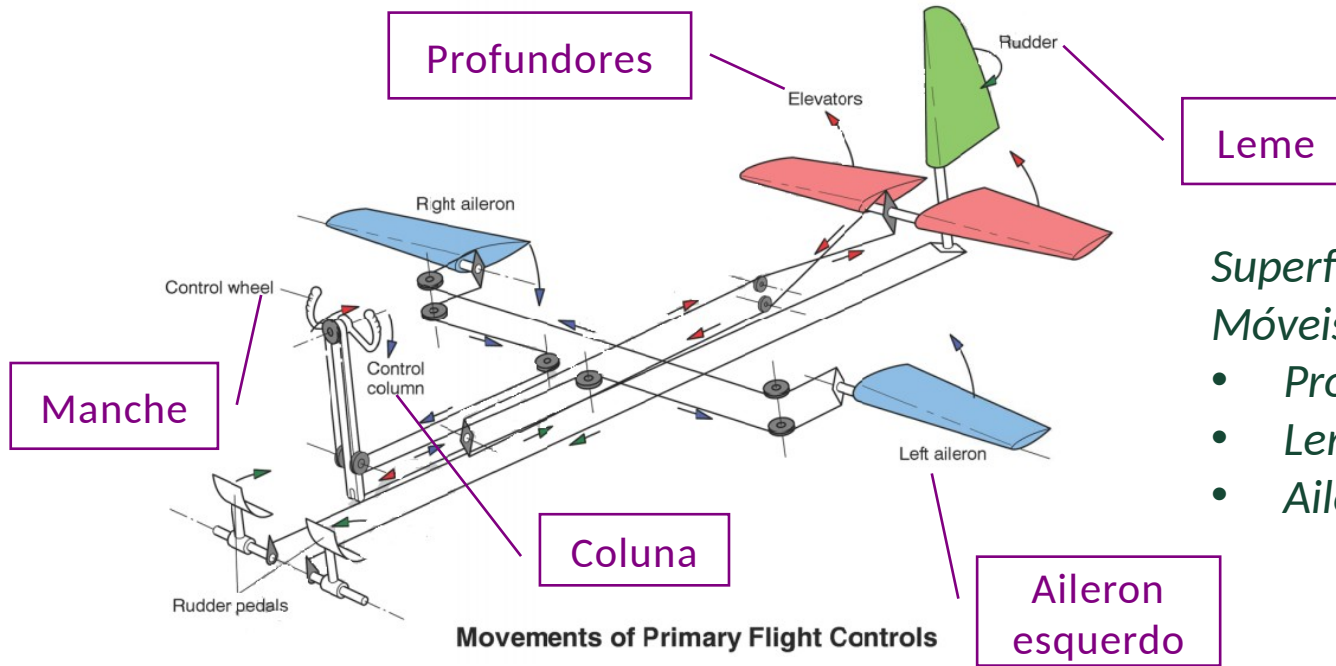


Figure 5-18. Axes of an airplane.

Fonte: FAA – Pilot Handbook of Aeronautical Knowledge 2016

Superfícies de Controle Primárias



Movements of Primary Flight Controls

Superfícies de Aerofólios Móveis:

- Profundores (Elevators),
- Leme (Rudder),
- Ailerons.

Superfícies de Controle Secundárias

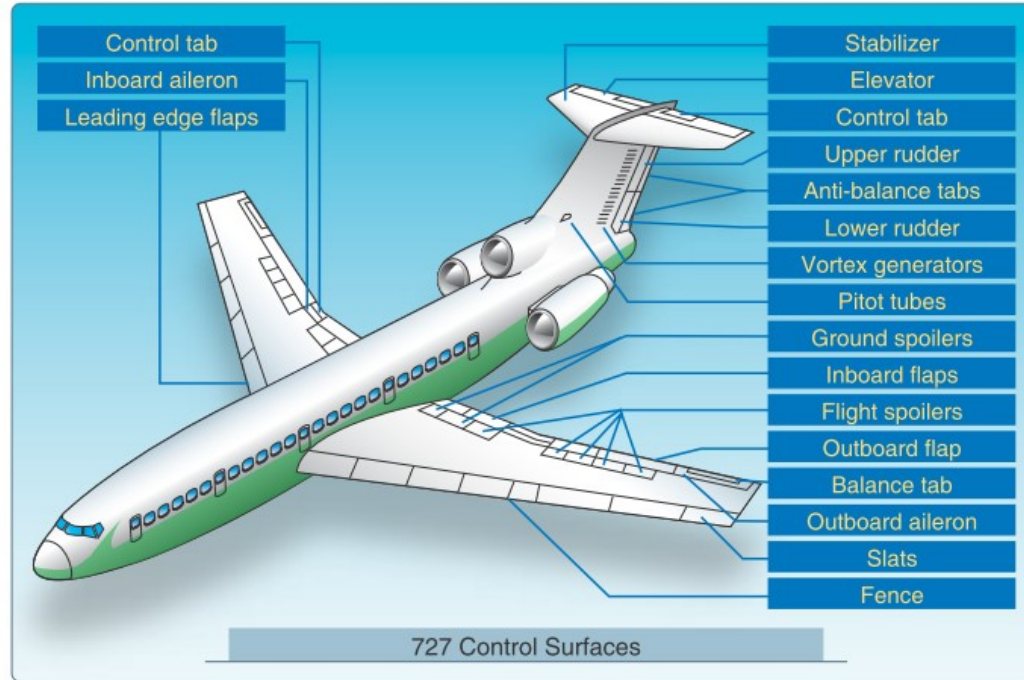


Figure 5-71. Control surfaces.

Fonte: FAA – Pilot Handbook of Aeronautical Knowledge 2016

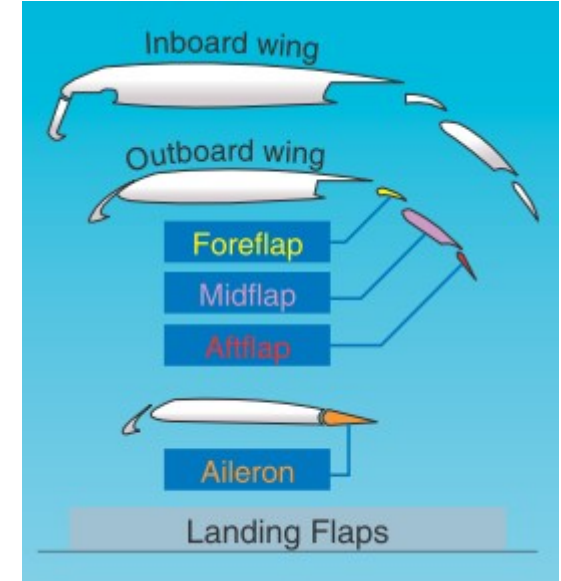
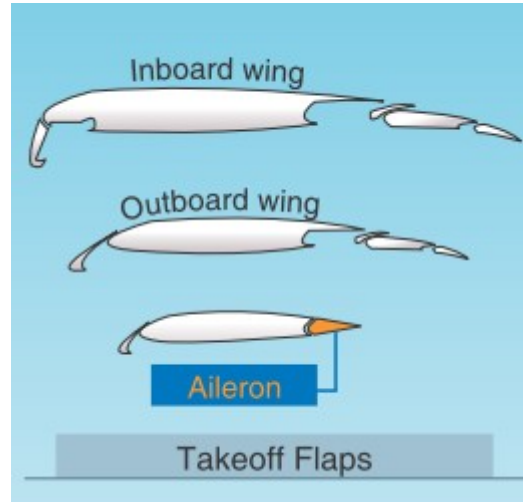
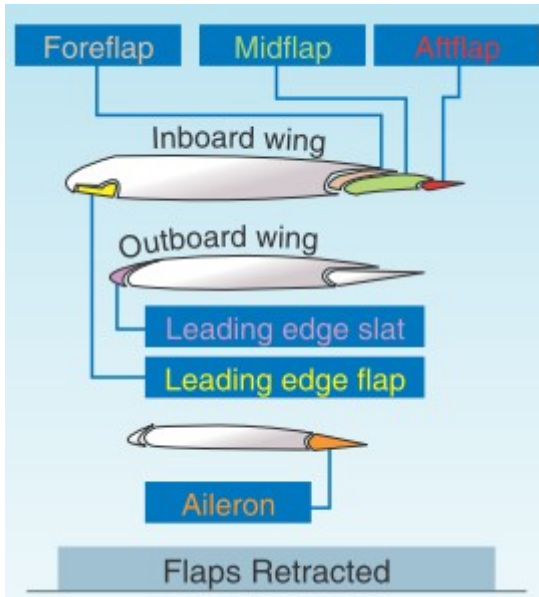
Superfícies de Controle Secundárias

Secondary/Auxiliary Flight Control Surfaces		
Name	Location	Function
Flaps	Inboard trailing edge of wings	Extends the camber of the wing for greater lift and slower flight. Allows control at low speeds for short field takeoffs and landings.
Trim tabs	Trailing edge of primary flight control surfaces	Reduces the force needed to move a primary control surface.
Balance tabs	Trailing edge of primary flight control surfaces	Reduces the force needed to move a primary control surface.
Anti-balance tabs	Trailing edge of primary flight control surfaces	Increases feel and effectiveness of primary control surface.
Servo tabs	Trailing edge of primary flight control surfaces	Assists or provides the force for moving a primary flight control.
Spoilers	Upper and/or trailing edge of wing	Decreases (spoils) lift. Can augment aileron function.
Slats	Mid to outboard leading edge of wing	Extends the camber of the wing for greater lift and slower flight. Allows control at low speeds for short field takeoffs and landings.
Slots	Outer leading edge of wing forward of ailerons	Directs air over upper surface of wing during high angle of attack. Lowers stall speed and provides control during slow flight.
Leading edge flap	Inboard leading edge of wing	Extends the camber of the wing for greater lift and slower flight. Allows control at low speeds for short field takeoffs and landings.
NOTE: An aircraft may possess none, one, or a combination of the above control surfaces.		

Figure 1-61. Secondary or auxiliary control surfaces and respective locations for larger aircraft.

Fonte: FAA-H-8083-31A, Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe Volume 1

Flaps e Slats: Configuração das Asas



Fonte: FAA – Pilot Handbook of Aeronautical Knowledge 2016

Compensadores (*Trim Tabs*)

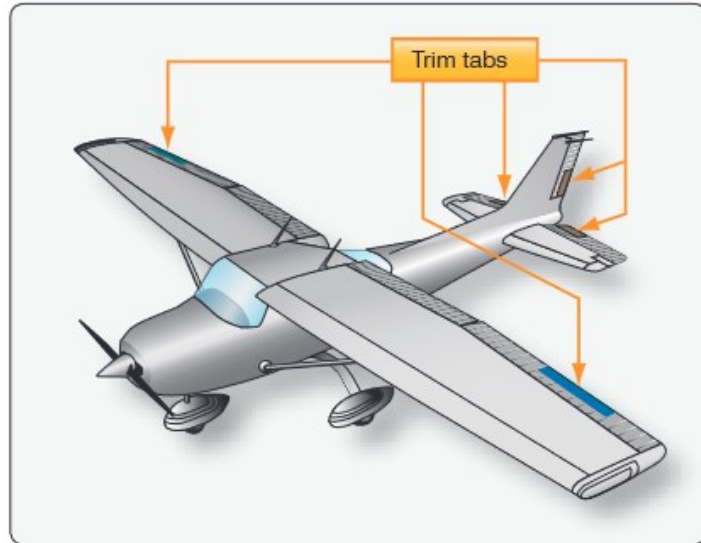


Figure 2-12. *Trim tabs.*

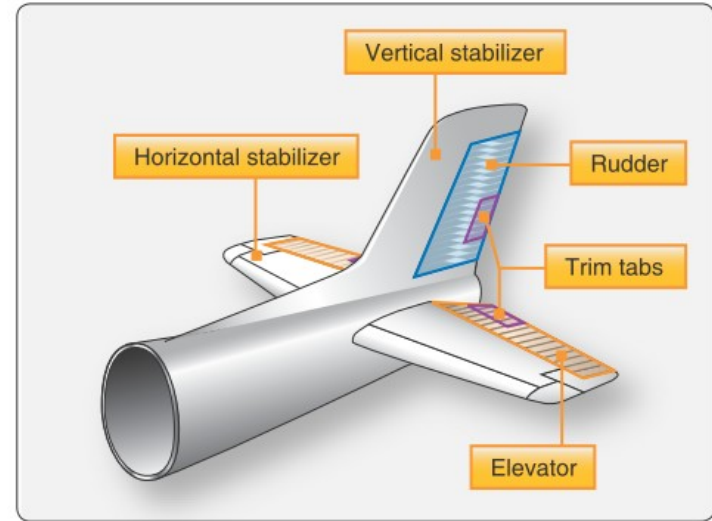


Figure 1-47. *Components of a typical empennage.*

Fonte: FAA-H-8083-31A, Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe Volume 1

Compensadores Automáticos (*Balance Tab*)

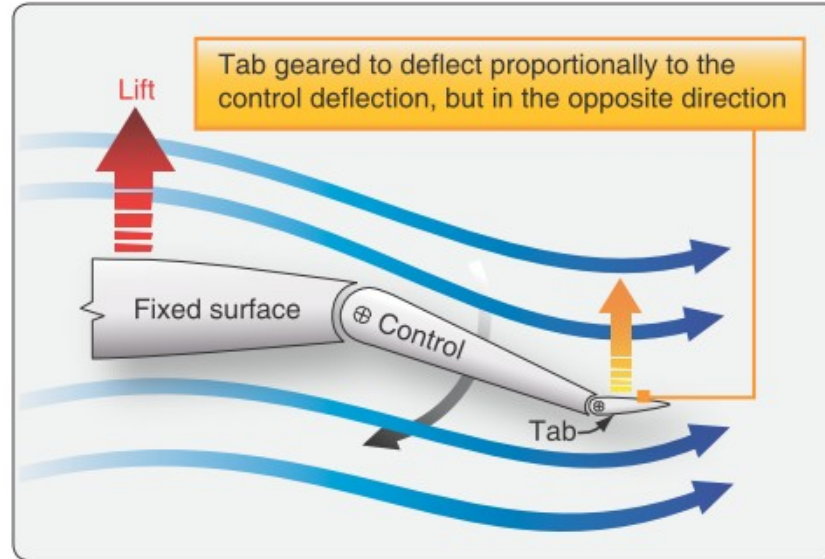
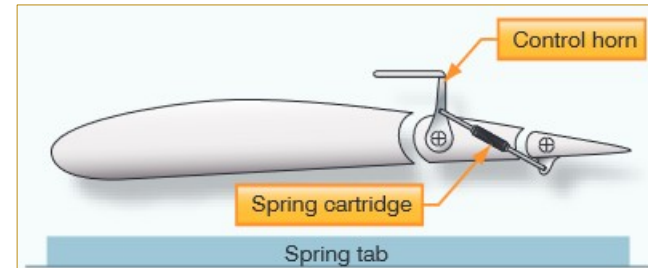
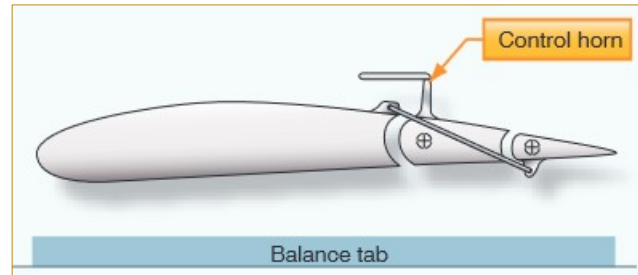
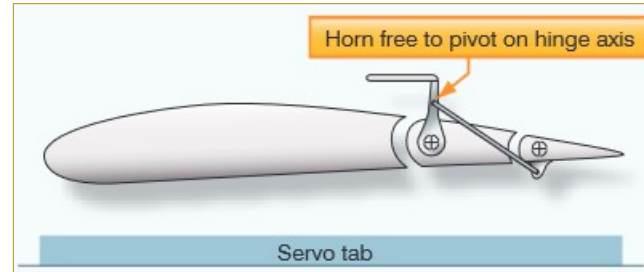
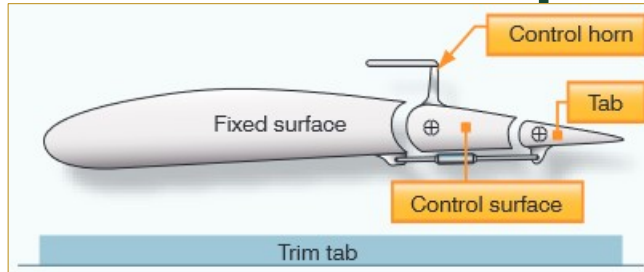


Figure 1-71. *Balance tabs assist with forces needed to position control surfaces.*

Fonte: FAA-H-8083-31A, Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe Volume 1

Diferentes Compensadores



Fonte: FAA-H-8083-31A, Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe Volume 1

Spoilers

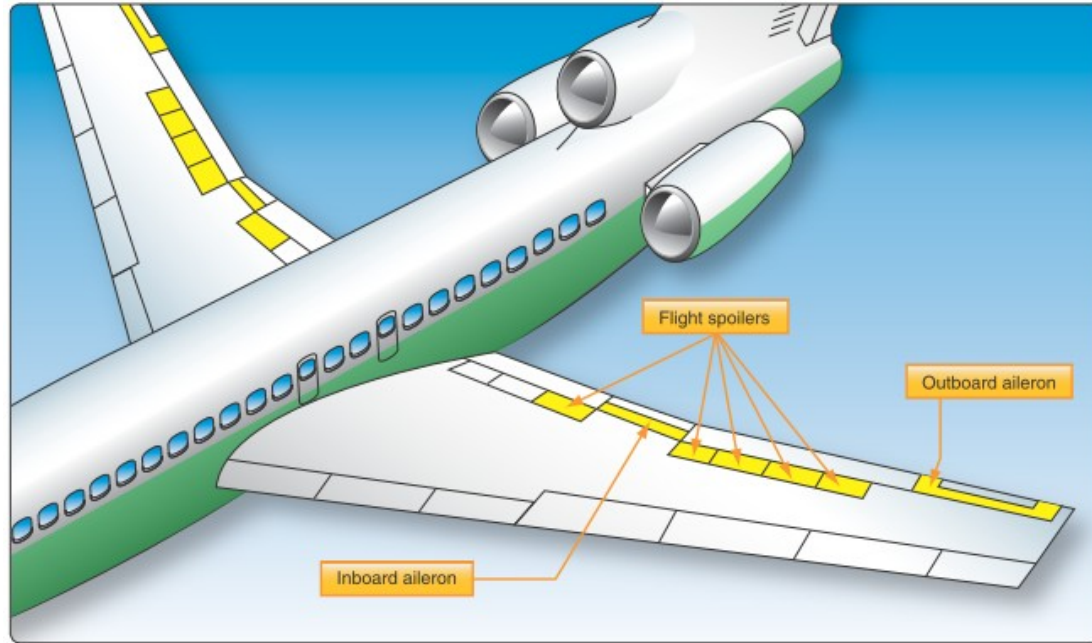
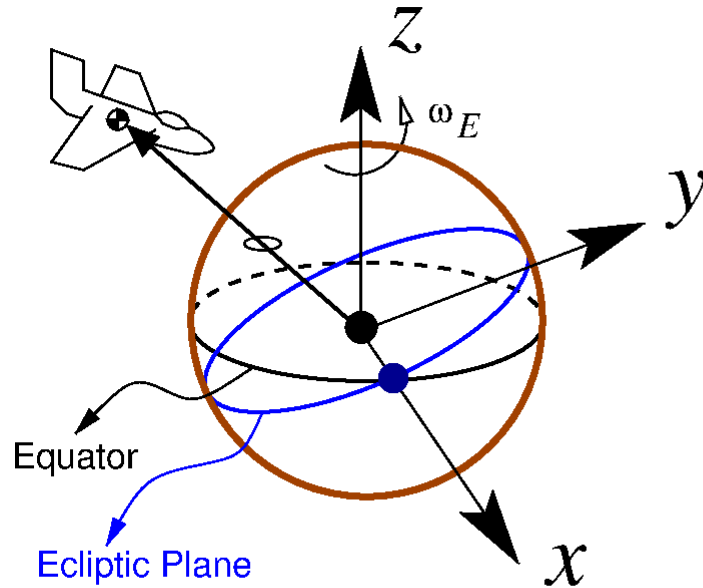


Figure 1-56. Typical flight control surfaces on a transport category aircraft.

Fonte: FAA-H-8083-31A, Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe Volume 1

Referenciais em Engenharia Aeronáutica

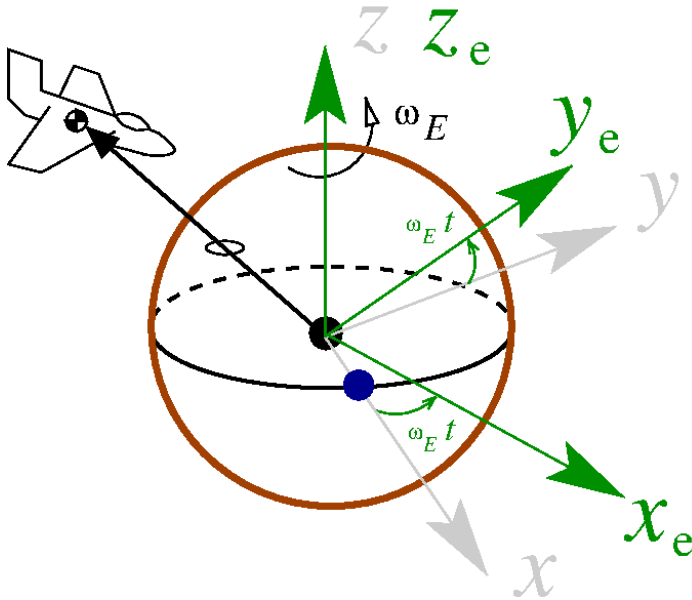
Earth-Centered Inertial (ECI)



(Earth-Sun direction at the Northern Vernal Equinox
in J2000 epoch at Noon)

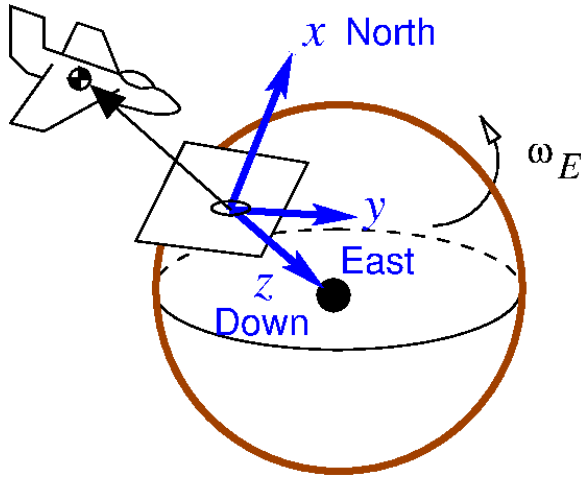
- Origem: centro da Terra.
- Translada com a Terra.
- Eixo Z coincide com o eixo de rotação da Terra em uma época específica.
- O eixo X aponta da Terra para o Sol ao longo da interseção entre o plano equatorial e o plano eclíptico no Equinócio de Outono (hemisfério sul) em uma época específica.
- O eixo Y completa o triedro direito.
- Os eixos não giram com a Terra, e sua orientação permanece fixa em relação às estrelas distantes.

Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF)



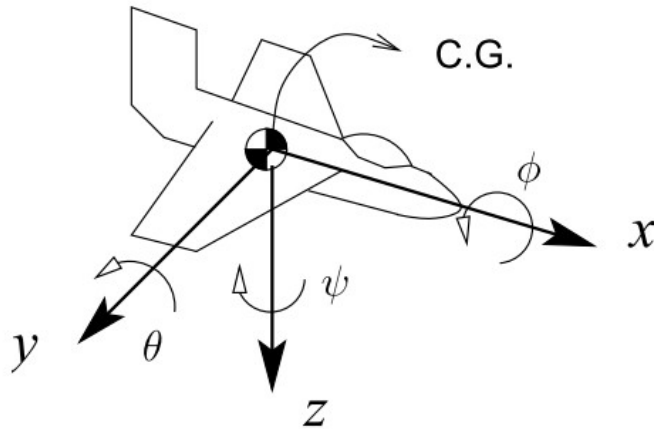
- Origem: centro da Terra.
- Translada com a Terra.
- O eixo Z coincide com o eixo de rotação da Terra.
- O eixo X no Plano Equatorial passado pelo Meridiano de Greenwich.
- O eixo Y axis completa o triedro direito.
- Eixos giram com a Terra.

North-East-Down (NED) e Plano Tangente (tp)



- Origem: interseção do vetor posição do c.g. da aeronave em relação ao centro da terra e a superfície de referência (geóide) da terra. Portanto, a origem do referencial NED muda ao longo do tempo.
- O eixo Z coincide com a direção do vetor gravidade local.
- O eixo X aponta para o Norte.
- O eixo Y completa o triedro e aponta para o Leste.
- **Vamos usar um referencial relacionado a este: o Referencial do Plano Tangente (tp). A origem é fixa, e o referencial coincide com o referencial NED no início da análise.**

Body-Fixed (bf) ou Forward-Right-Down (frd)



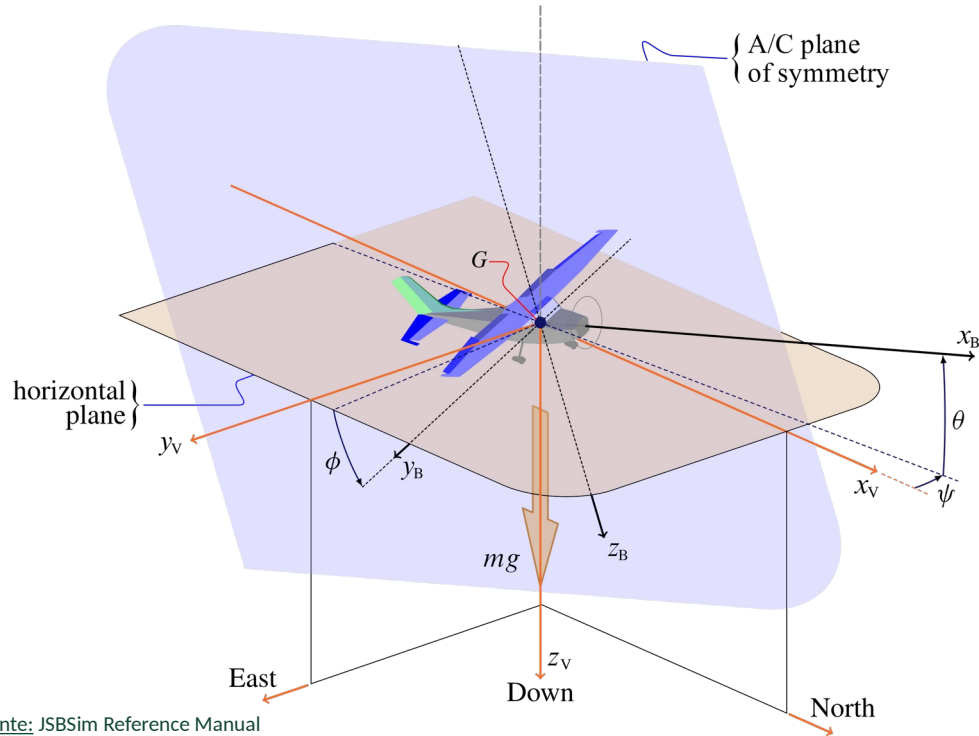
- Origem: centro de massa da aeronave (igual ao c.g.).
- O eixo X axis aponta para o nariz e está no plano de simetria (para a maioria das aeronaves).
- O eixo Z aponta para baixo, contido no plano de simetria.
- O eixo Y completa o triedro direito, apontando para a asa direita.
- Os eixos estão fixos ao corpo da aeronave e, portanto, giram com ela.

$tp \rightarrow frd: \psi \rightarrow \theta \rightarrow \phi$

Yaw	Pitch	Roll
(Guinada)	(Arfagem)	(Rolamento)
em torno do eixo Z	em torno do eixo Y	em torno do eixo X

A **Atitude da Aeronave** é determinada pela sequência 3-2-1 de rotações necessárias para alinhar o referencial *tp* com o referencial *bf* usando os três ângulos de Euler.

Body-Fixed (*bf*) ou Forward-Right-Down (*frd*)



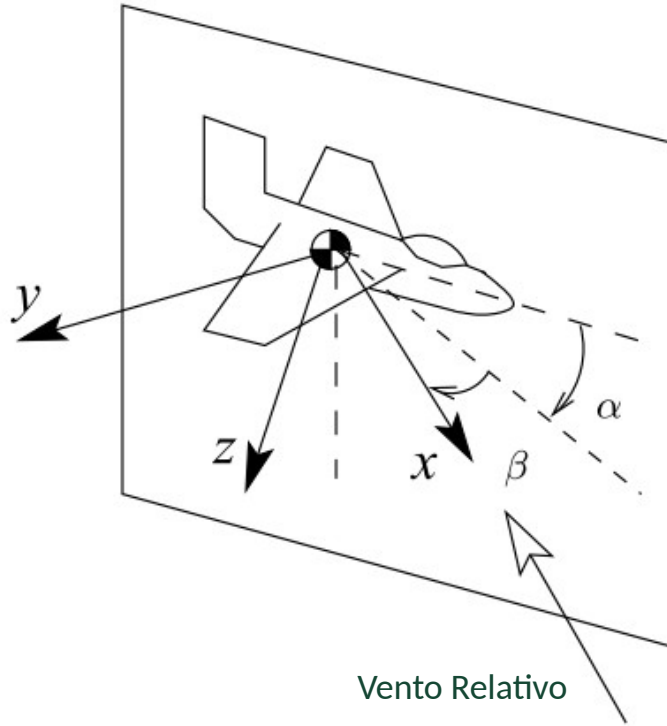
A Atitude da Aeronave é determinada pela sequência 3-2-1 de rotações necessárias para alinhar o **referencial *tp*** com o **referencial *frd*** usando os três ângulos de Euler.

$tp \rightarrow frd: \quad \psi \rightarrow \theta \rightarrow \phi$

Yaw	Pitch	Roll
(Guinada)	(Arfagem)	(Rolamento)
em torno do eixo Z	em torno do eixo Y	em torno do eixo X

Fonte: JSBSim Reference Manual

Wind Axes (w)



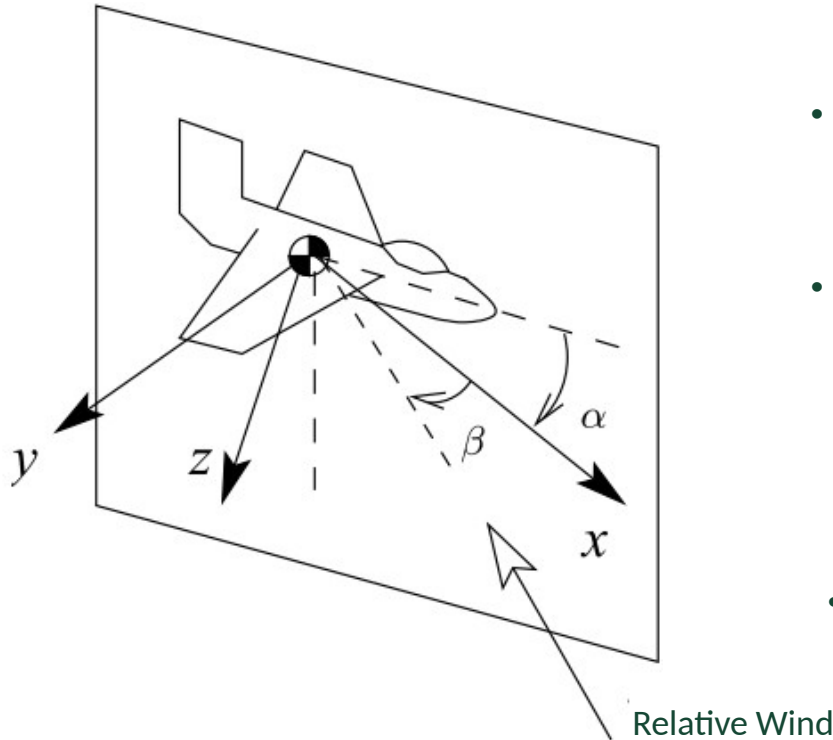
- Origem: centro de massa da aeronave.
- O eixo X aponta na direção do vento relativo.
- Este é obtido girando o referencial **frd** em torno de seu eixo y por um ângulo $(-\alpha)$, em que α é o ângulo de ataque, seguida da rotação em torno do novo eixo z por um ângulo de derrapagem β .

$$\text{frd} \rightarrow \text{w}: \quad (-\alpha) \rightarrow \beta$$

Em torno do eixo Y Em torno do eixo Z

- α = ângulo de ataque em relação à linha de referência da fuselagem (fuselage reference line - *frl*).
- β = ângulo de derrapagem (sideslip).

Body-Fixed: Stability Axes (s)

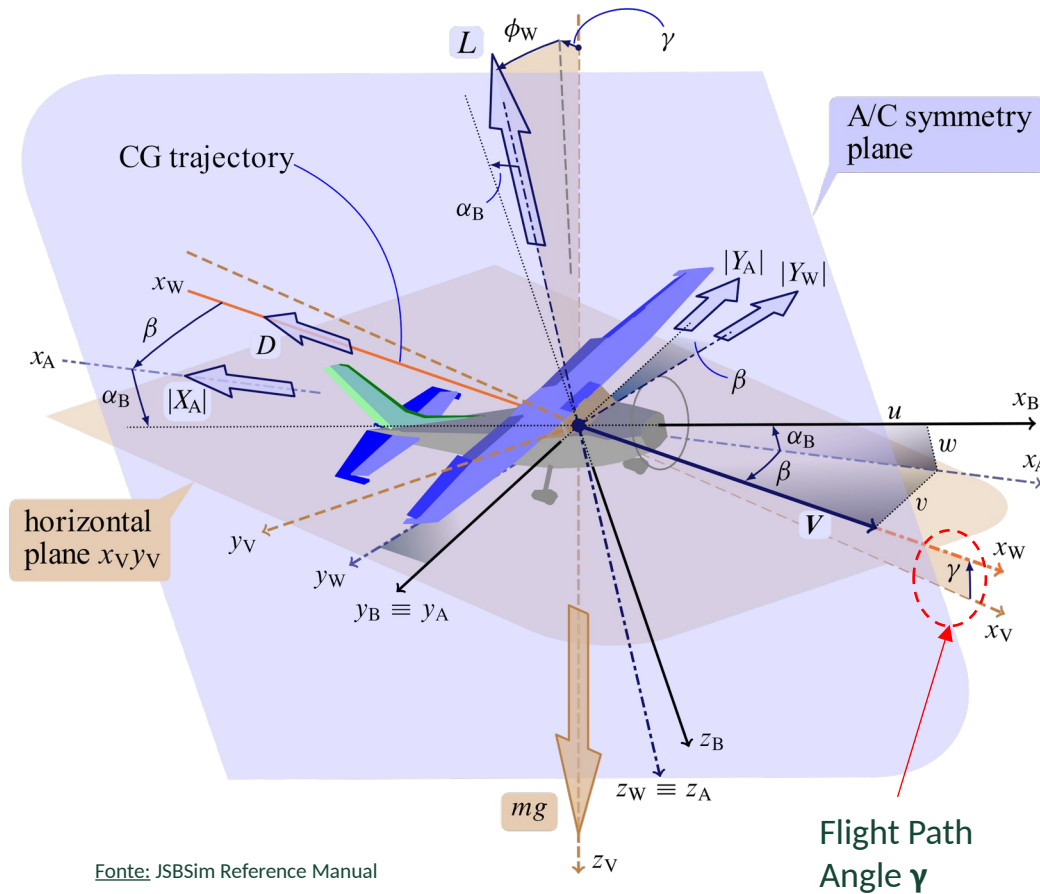


- Os Referencial de Estabilidade é igual ao referencial Wind (w), mas ignorando a rotação de β em torno do novo eixo Z, de modo que o eixo X permanece no plano de simetria da aeronave.
- Esse referencial tem importância teórica, pois é comum analisar-se a estabilidade de aeronaves em seu movimento longitudinal, quando $\beta = 0$.

$$bf \rightarrow s: \quad (-\alpha)$$

Em torno
do eixo Y

- α = ângulo de ataque em relação à linha de referência da fuselagem (fuselage reference line - *frl*).

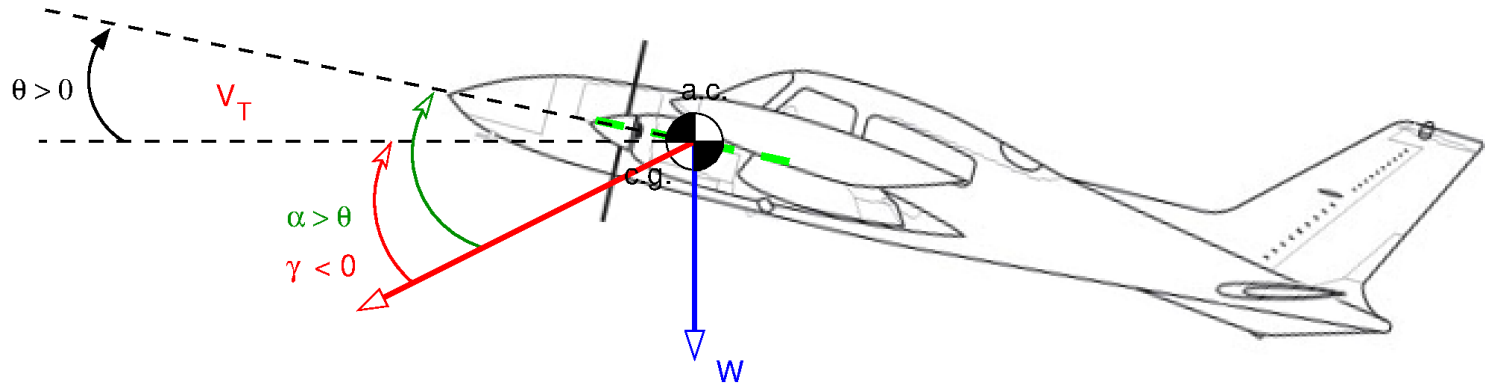


Forward-Right-Down (frd), Wind (w), and Stability Axes (s)

- Nesta imagem, V é um referencial conhecido como *Local Vertical Local Horizontal (LVLH) frame* que é alinhado com o referencial tp , mas sua origem é no centro de massa da aeronave, W é o referencial do vento relativo, A denota o referencial de estabilidade, e B é o referencial *frd*.
- Note que o ângulo entre a direção do vetor velocidade do centro de massa da aeronave e o plano horizontal (plano xy do referencial alinhado com o referencial tp) é o **ângulo de trajetória de voo (flight path angle)**.

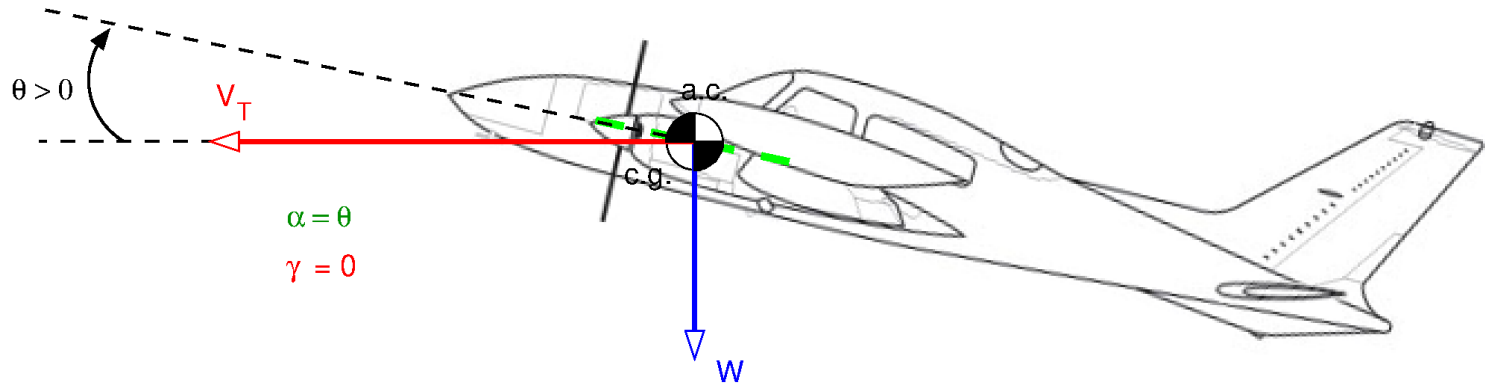
Fonte: JSBSim Reference Manual

Ângulo de Trajetória de Voo(γ)
Ângulo de Arfagem(θ)
Ângulo de Ataque(α)



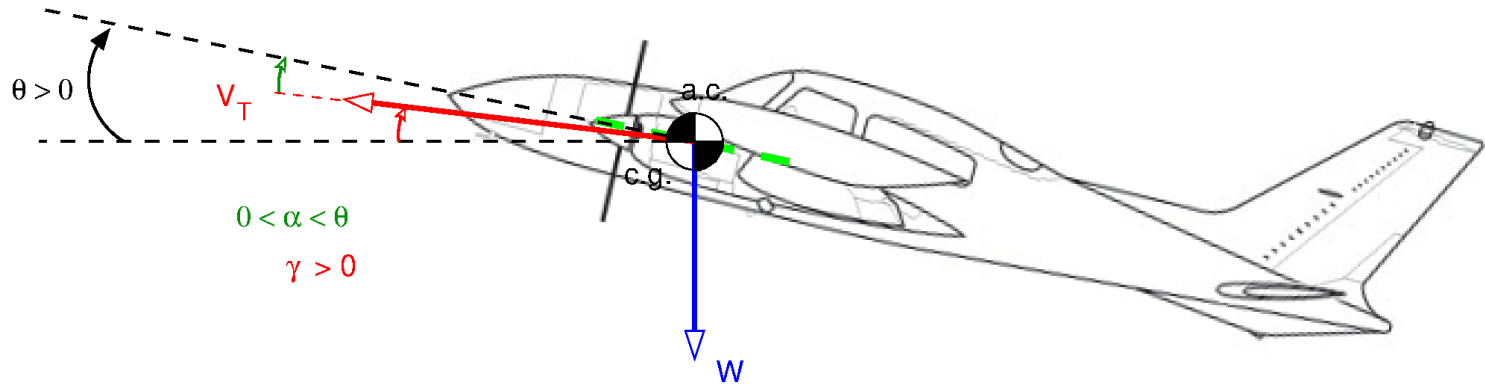
$$\gamma = \theta - \alpha$$

Ângulo de Trajetória de Voo(γ)
Ângulo de Arfagem(θ)
Ângulo de Ataque(α)



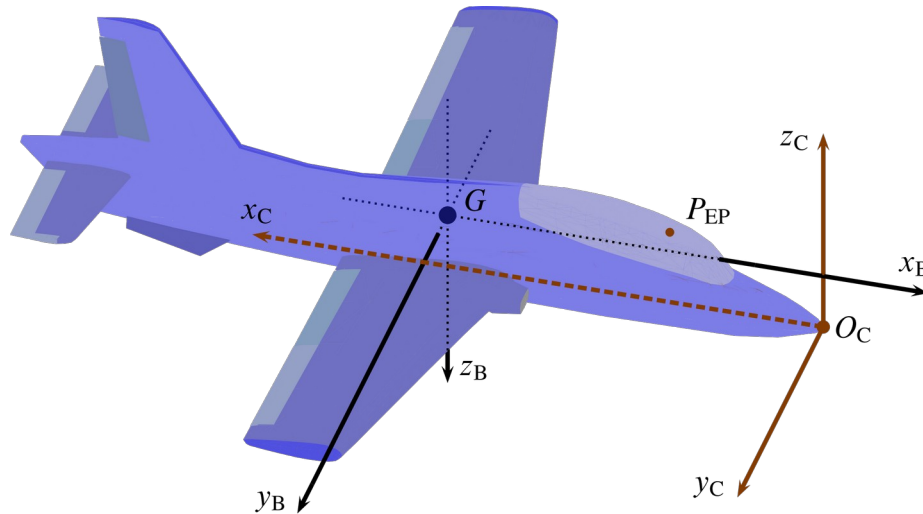
$$\gamma = \theta - \alpha$$

Ângulo de Trajetória de Voo(γ)
Ângulo de Arfagem(θ)
Ângulo de Ataque(α)



$$\gamma = \theta - \alpha$$

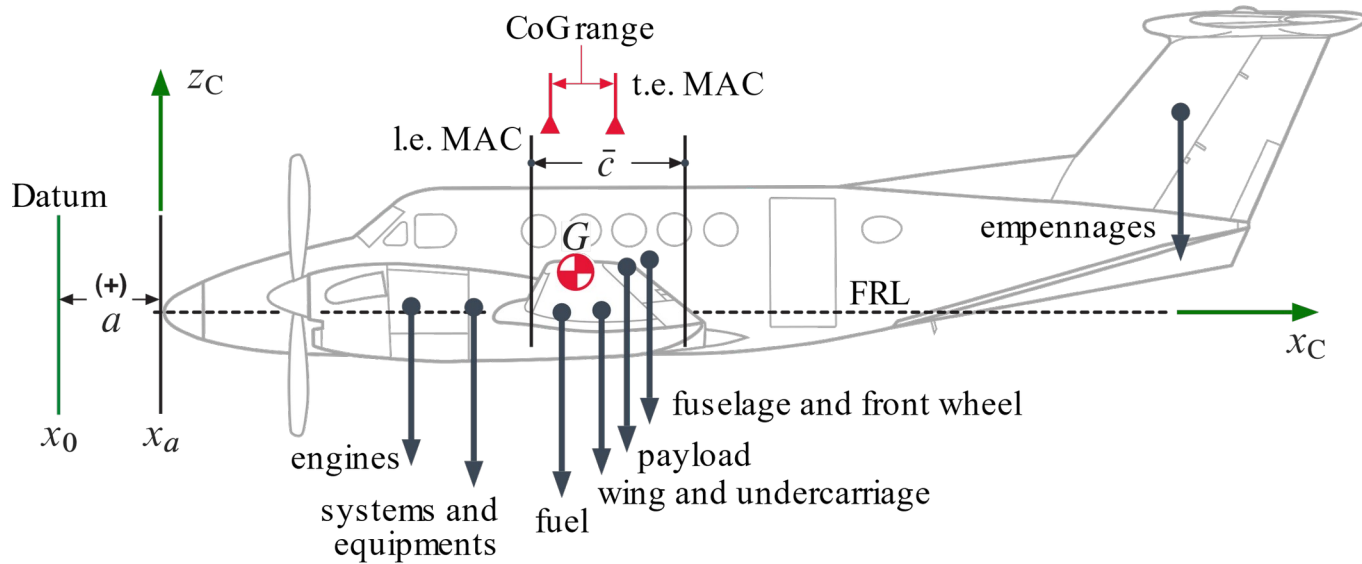
Referencial Estrutural



Fonte: JSBSim Reference Manual

- Também conhecido como “referencial do fabricante”. Sua origem é, em geral, na ponta do nariz, ou próximo a ele, com os eixos X e Z contidos no plano de simetria da aeronave.
- O eixo X vai da origem em direção à cauda, o eixo Y aponta da fuselagem para a asa direita, e o eixo Z aponta para cima.
- É utilizado para localizar partes da aeronave (e.g. motores, propulsores, trens de pouso, etc) e outros pontos relevantes tais como o Centro de Referência Aerodinâmico e o Centro de Gravidade (c.g.).

Referencial Estrutural



Fonte: JSBSim Reference Manual