

# SAA0187

## Sistemas Aeronáuticos de Acionamento

### Introdução aos Sistemas de Acionamento

Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto

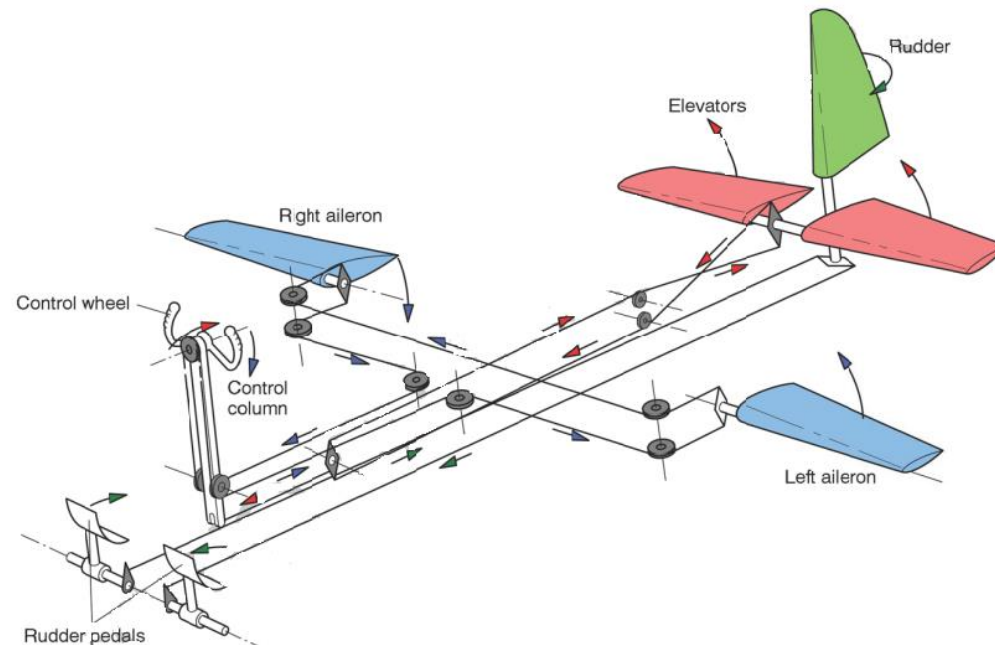
[jhbidi@sc.usp.br](mailto:jhbidi@sc.usp.br)

- Importância dos sistemas de acionamento
- Breve histórico de desenvolvimento
- Comandos de voo
- Classificação dos sistemas comandos de voo
- Evolução dos comandos de voo e a segurança

- Importância dos sistemas de acionamento
- Breve histórico de desenvolvimento
- Comandos de voo
- Classificação dos sistemas comandos de voo
- Evolução dos comandos de voo e a segurança

- O quê acionar??

Comandos de voo (superfícies móveis)



- O quê acionar??

Freios



- O quê acionar??

Trem de pouso e respectivas portas



- O quê acionar??

Comando de motores/reverso



- O quê acionar??

Esterçamento (steering)





- **Como acionar??**

Atuação mecânica

Atuação hidráulica

Atuação elétrica

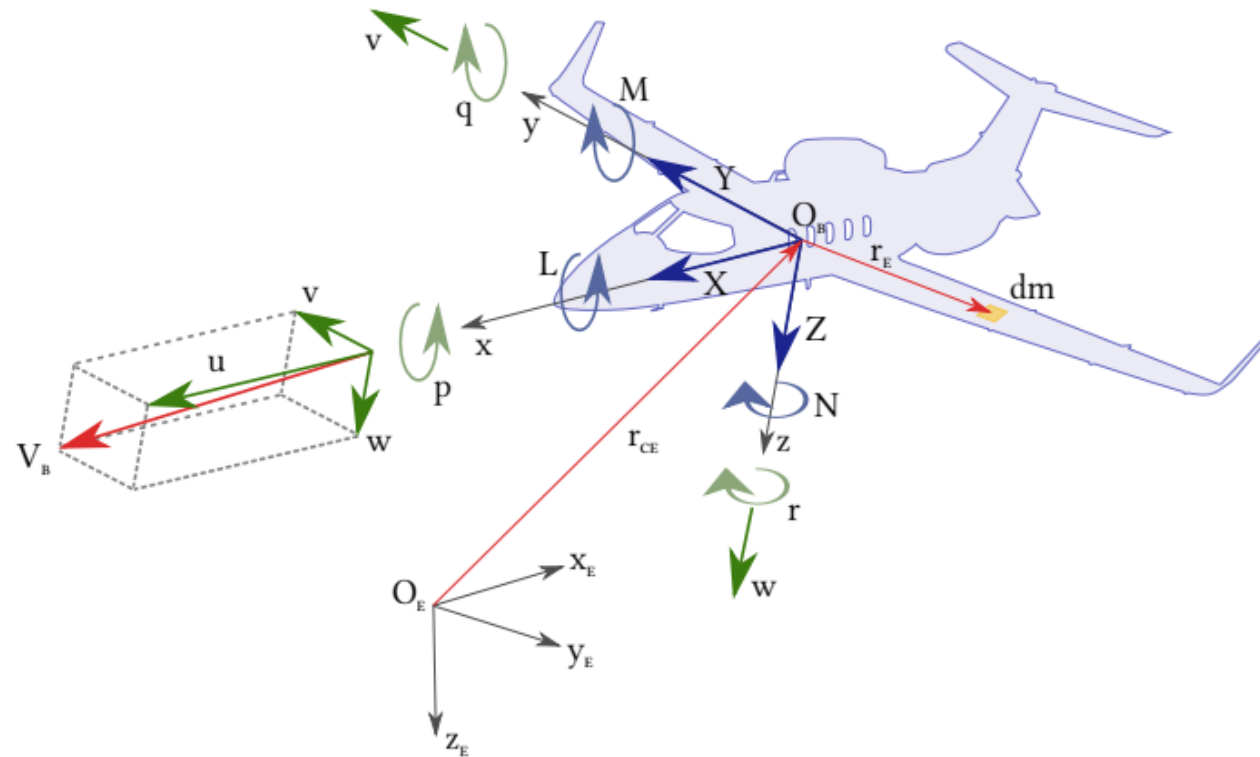
Atuação híbrida

- Importância dos sistemas de acionamento
- Breve histórico de desenvolvimento
- Comandos de voo
- Classificação dos sistemas comandos de voo
- Evolução dos comandos de voo e a segurança

- Surgiram então os sistemas de feedback, melhorando a consciência situacional do piloto
- Começou o surgimento dos primeiros Pilotos Automáticos rudimentares
- Com desempenho ainda maior e aumento na manobrabilidade (menor estabilidade), surgiram os sistemas automáticos de comando (sistema de aumento de estabilidade e Fly-by-wire)

- Importância dos sistemas de acionamento
- Breve histórico de desenvolvimento
- **Comandos de voo**
- Classificação dos sistemas comandos de voo
- Evolução dos comandos de voo e a segurança

- Os comandos apenas rotacionam o CG da aeronave em torno dos 3 eixos (geram acelerações angulares)



- **Comandos Primários**
- Responsáveis pela mudança da aeronave em arfagem (pitch), rolamento (roll) e guinada (yaw)
- Aeronaves convencionais:
- Profundor (elevator)

Arfagem

- Aileron

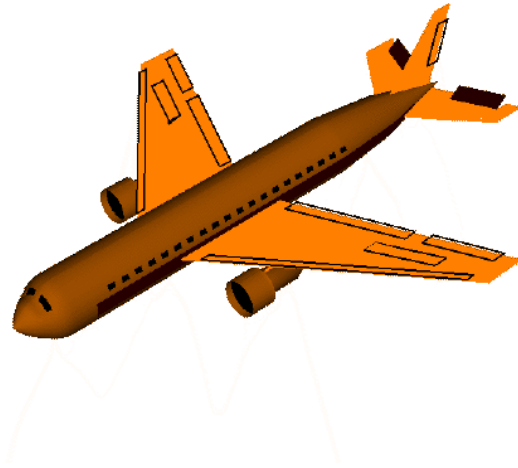
Rolamento

- Leme (rudder)

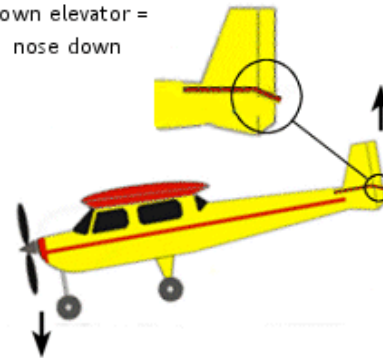
Guinada

- **Comandos Primários**
- Aeronaves convencionais:
- Profundor (elevator)

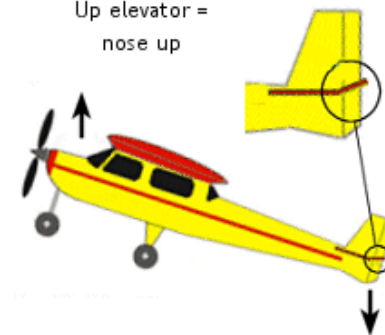
Localizado no estabilizador horizontal



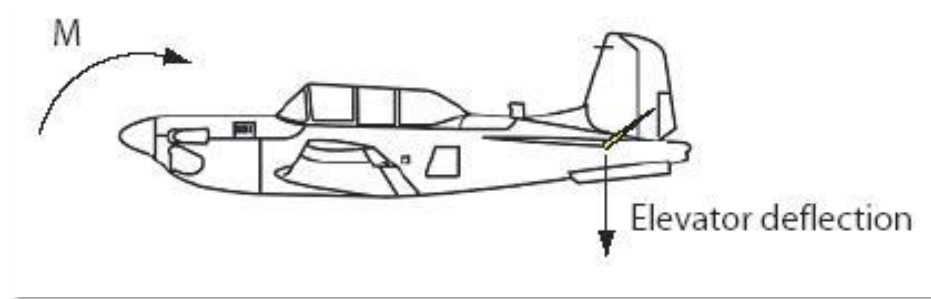
Down elevator =  
nose down



Up elevator =  
nose up



- **Comandos Primários**
- Aeronaves convencionais:
- Profundor (elevator)



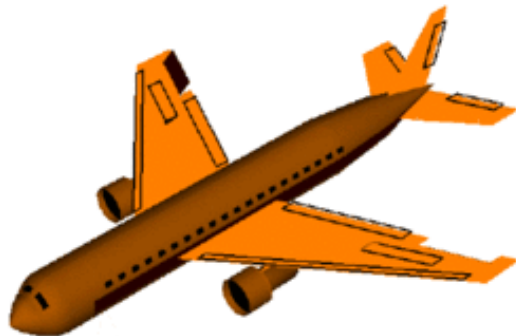
Os profundores são comandados a partir dos movimentos longitudinais do manche.





- **Comandos Primários**
- Aeronaves convencionais:
- Aileron (ailerão)

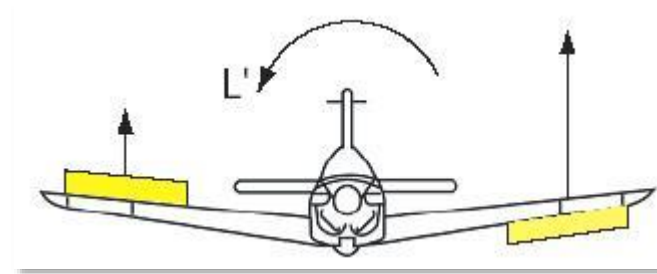
Localizado no bordo de fuga das asas  
(geralmente nas pontas)



Precision Graphics

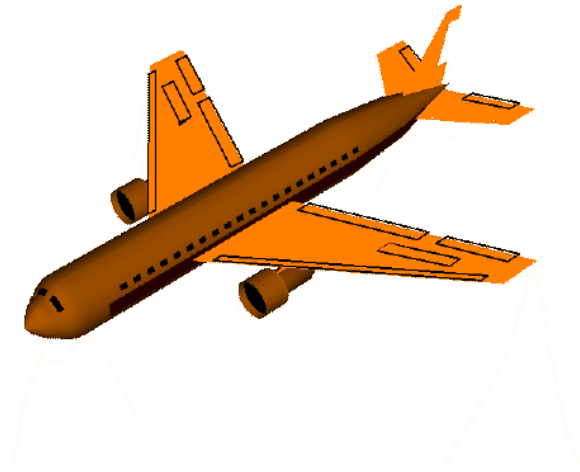
- **Comandos Primários**
- Aeronaves convencionais:
- Aileron (ailerão)

Os ailerons são controlados (ou comandados) a partir de movimentos laterais do manche ou rotação do volante no manche.



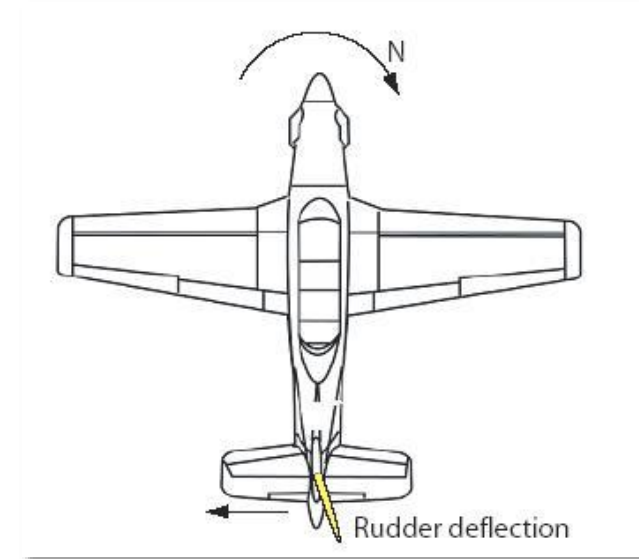
- **Comandos Primários**
- Aeronaves convencionais:
- Leme (rudder)

Localizados no estabilizador vertical



- **Comandos Primários**
- Aeronaves convencionais:
- Leme (rudder)

O leme é comandado a partir dos pedais da aeronave



- **Comandos**

- Atuação do manche longitudinalmente (stick)

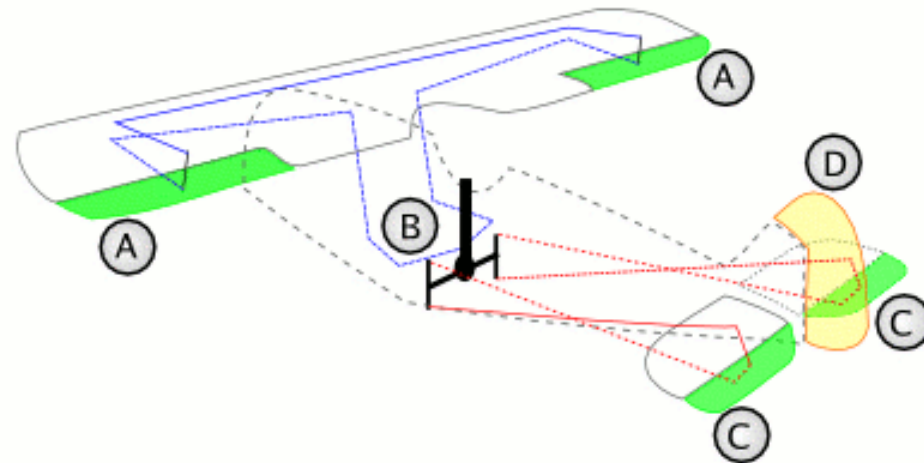
Acionamento do profundor

- Atuação do manche lateralmente (wheel)

Acionamento do aileron

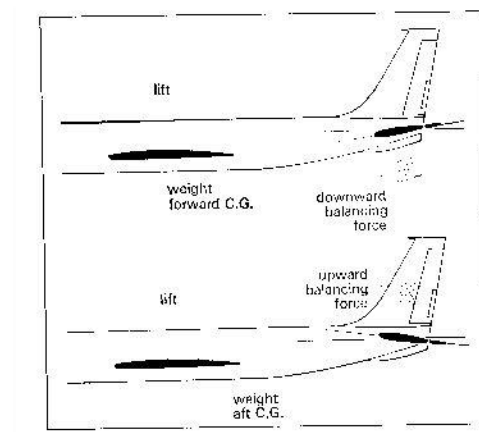
- Pedais

Acionamento do leme



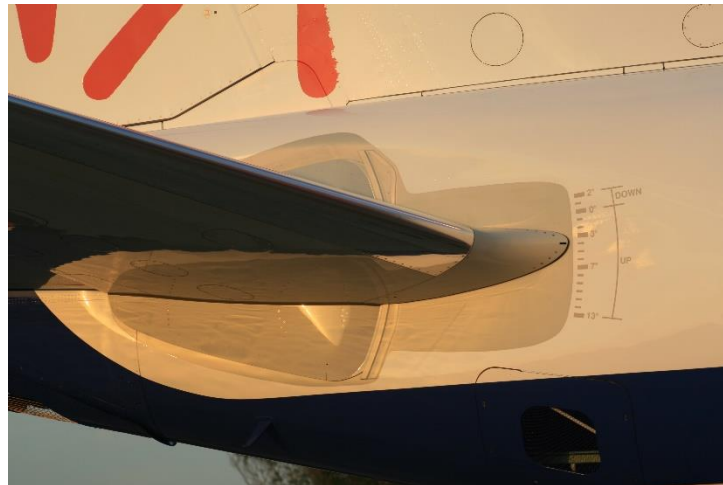
- **Comandos Primários**
- Aeronaves não-convencionais:
- Estabilizador horizontal móvel

Algumas aeronaves (dependendo do envelope de vôo) necessitam mais do que um profundor para o comando em arfagem, utilizando o Estabilizador Horizontal Móvel.



- **Comandos Primários**
- Aeronaves não-convencionais:
- Estabilizador horizontal móvel

Em algumas aeronaves de transporte (EMB-170) e de caça o Estabilizador Horizontal Móvel também é utilizado para proporcionar compensação em arfagem



- **Comandos Primários**
- Aeronaves não-convencionais:
- Cannard

Movimento de arfagem

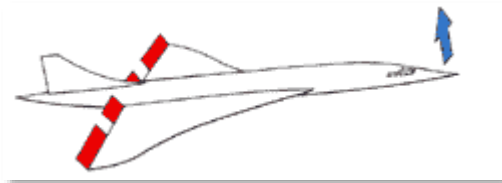




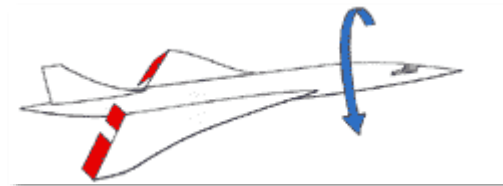
- **Comandos Primários**
- Aeronaves não-convencionais:
- Elevon

Combina funções de profundor (elevador) e aileron

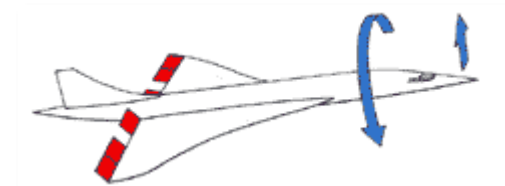
Atua em arfagem e rolamento



simétrico



diferencial



combinado

- **Comandos Primários**
- Aeronaves não-convencionais:
- Flaperon

Combina funções de flape e aileron

Atua em rolamento e como hipersustentador



- **Comandos Primários**
- Aeronaves não-convencionais:
- Leme

Movimento de guinada

Em aeronaves militares, pode assumir formas não-convencionais

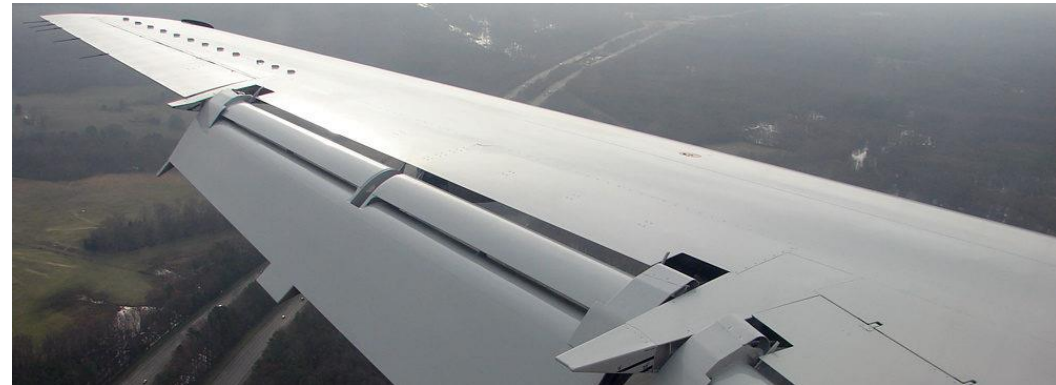


- **Comandos Secundários**

- As superfícies secundárias são utilizadas para para alterar velocidade e distâncias de pouso e de decolagem, além de alterar a velocidade do avião em voo

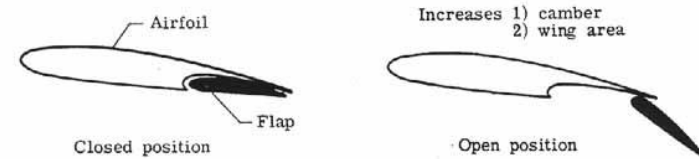
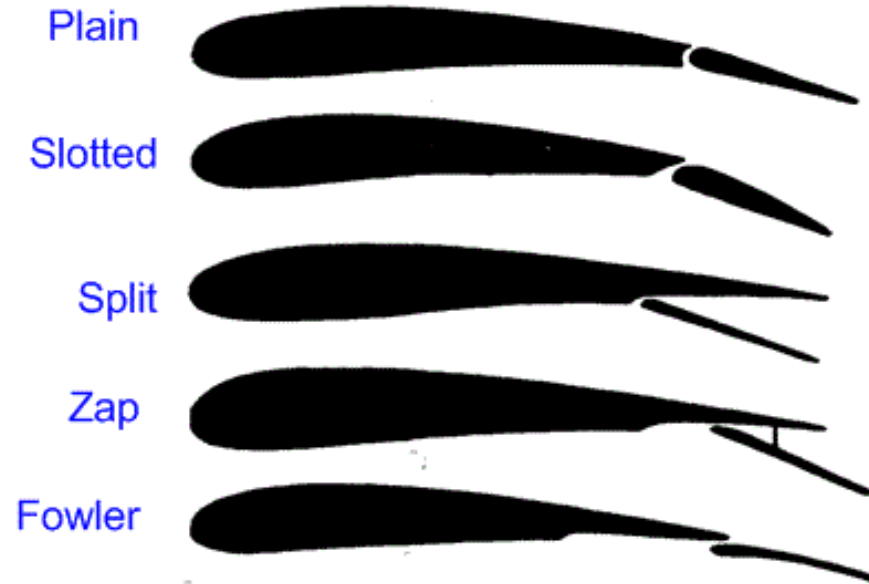
- Flapes
  - Slats
  - Spoilers
  - Speed-brakes
- } Dispositivos hipersustentadores
- } Mesma superfície com diferentes funções

- **Comandos Secundários**
- Flapes
- Aumento da área da asa, aumento do camber
- Diminui velocidade de estol, mas diminui velocidade máxima permitida
- Aumenta sustentação, mas aumenta arrasto

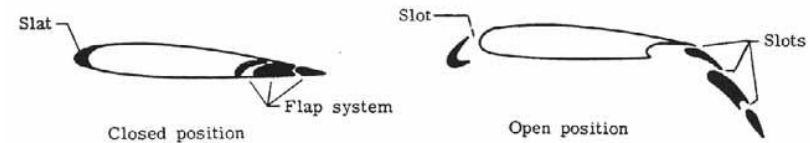


- **Comandos Secundários**
- Flapes
- Os flapes de bordo de fuga (BF) das asas são o tipo de dispositivo hipersustentador mais comum, possuindo boas vantagens mas algumas desvantagens
- O flape no BF aumenta o arqueamento da asa, aumentando e conseqüentemente o valor de CL para um mesmo AOA de voo e o valor do  $CL_{máx}$
- Assim, quando um flape é estendido, o ângulo de ataque requerido para gerar um valor de sustentação diminui (para uma mesma velocidade)

- Comandos Secundários
- Flapes

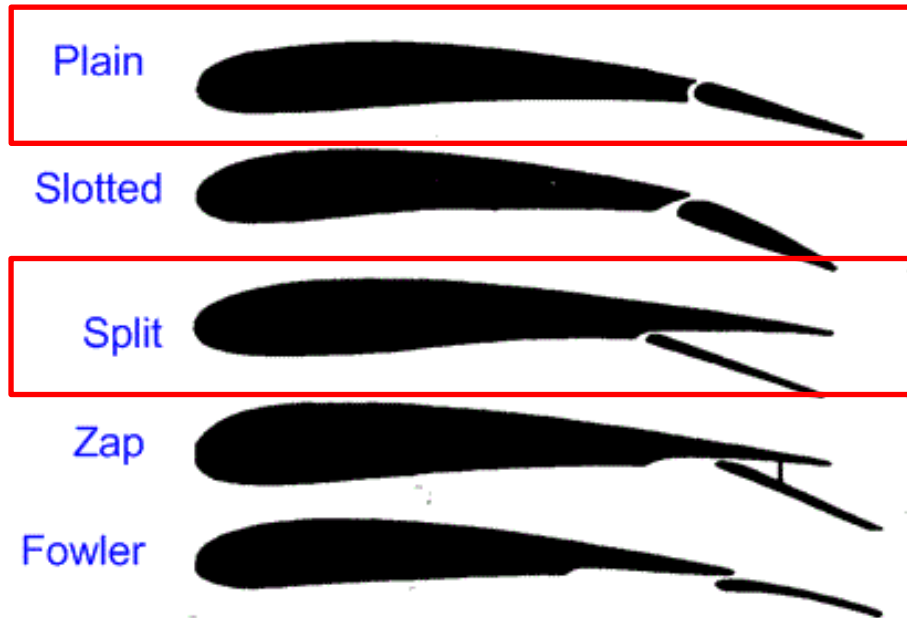


(a) Fowler flap.



(b) Complex slotted flap of Boeing 737.

- Comandos Secundários
- Flapes



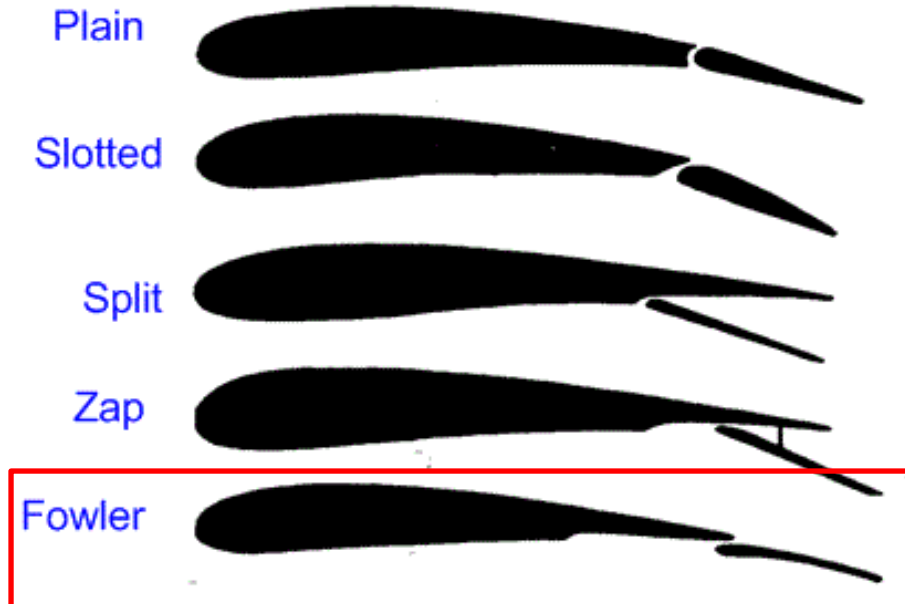
## "Plain-flap" e "Split-flap"

- Simples construção.
- Aumentam o arqueamento do perfil, embora o "split-flap" não desloque tanto o CP (em direção ao BF) quanto o "plain-flap". Além disso, o "split-flap" produz maior arrasto (de pressão), devido à maior esteira gerada.





- Comandos Secundários
- Flapes

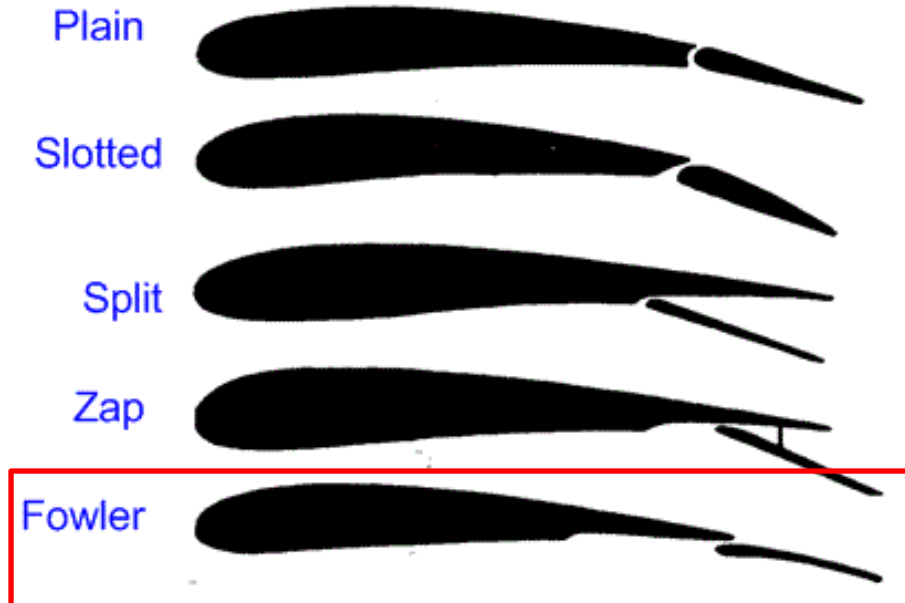


## “Fowler-flap”

- Grandes aeronaves de transporte, que operam em pistas relativamente curtas.
- Move-se tanto para trás quanto para baixo. Isto causa um aumento no  $CL_{máx}$  (aumento do arqueamento), além de aumentar a área da asa. Aerodinamicamente, é o mais eficiente tipo de flape.



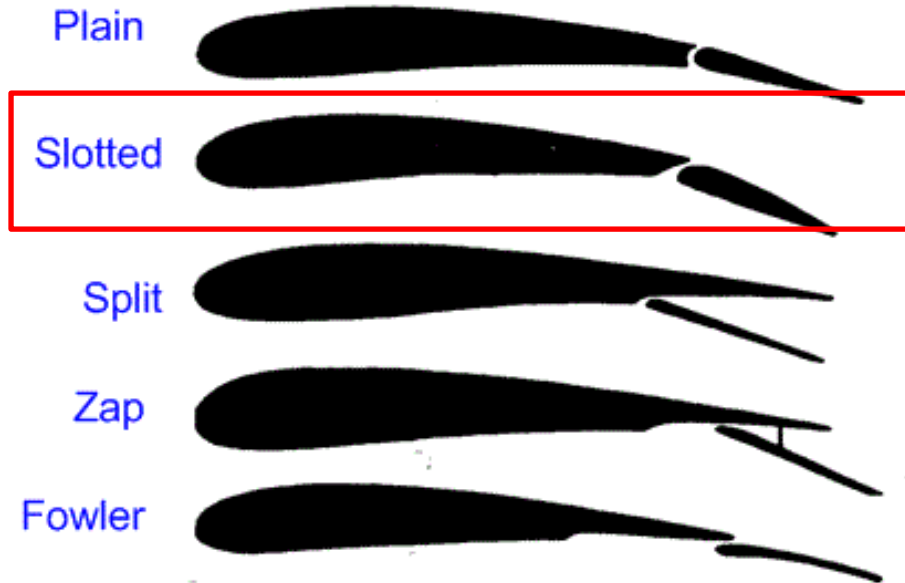
- Comandos Secundários
- Flapes



## “Fowler-flap”

- Desvantagem: deve haver um reforço estrutural para resistir ao momento fletor. Além disso, o volume interno da asa deve ser grande para abrigar o mecanismo de atuação, o que impossibilita o uso deste tipo de flape em aeronaves de alto desempenho (perfis finos).

- Comandos Secundários
- Flapes



## "Slotted-flaps"

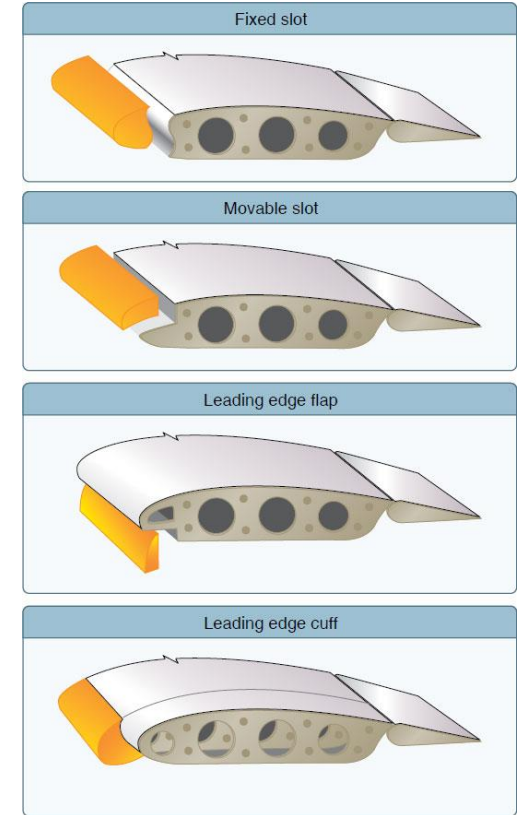
- Os flapes tipo "Plain-flap" e "Fowler-flap" podem possuir slots para aumentar ainda mais a sua eficiência.



- **Comandos Secundários**

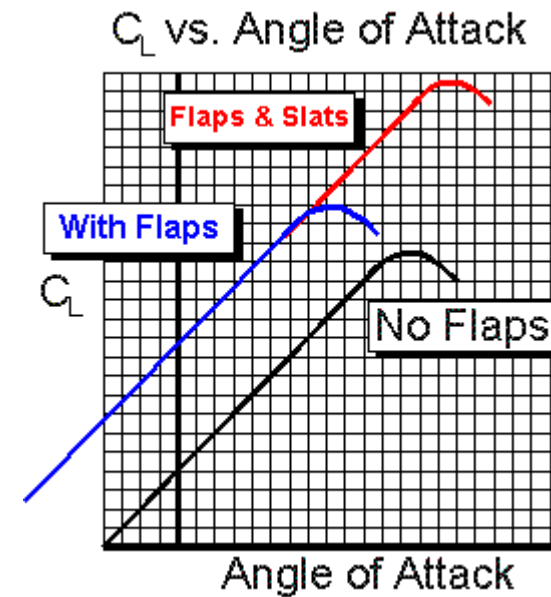
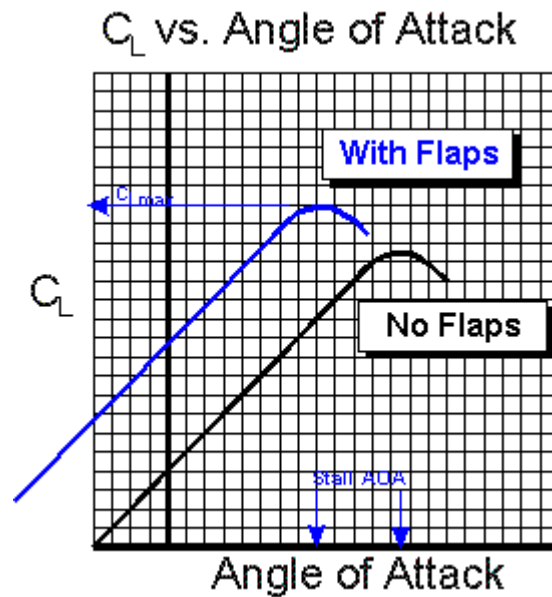
- Slats

Funções semelhantes ao flape. Normalmente são usados em conjunto



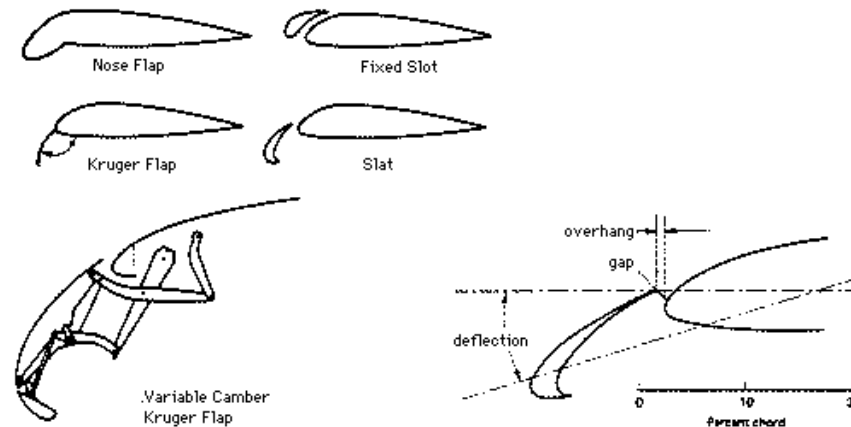
- Comandos Secundários
- Slats

Aumentam a sustentação e atrasam a ocorrência de estol em altos ângulos de ataque



- **Comandos Secundários**
- Slats

Normalmente encontramos slats no BA. No entanto, se a superfície hipersustentadora ali alocada não apresenta passagem para escoamento de ar do intradorso para o extradorso (“slot”), esta é então denominada flape de BA.



- **Comandos Secundários**
- Slats



Slat



Krueger

- **Comandos Secundários**
- Spoilers

Aumenta o arrasto da asa, elevando superfícies na sua parte superior

Pode atuar em conjunto com os ailerons, potencializando seu efeito (roll spoilers)





- **Comandos Secundários**
- Spoilers

Os spoilers são utilizados para o controle lateral. Os spoilers foram concebidos para evitar a reversão de comando (aileron)

Os ailerons (instalados na ponta de asas) quando utilizados geram uma distribuição de carregamento que pode ocasionar a reversão de comando: efeito inverso ao desejado originalmente

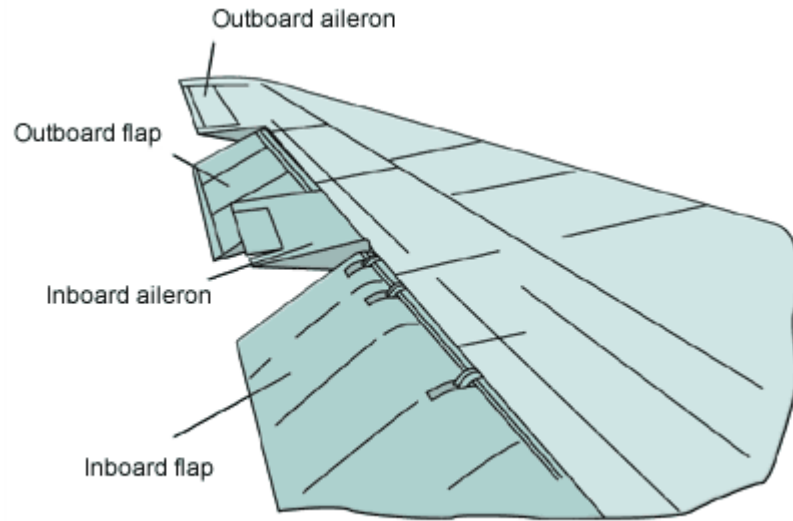
Ao se utilizar a alternativa de se “destruir” a sustentação de uma asa, a aeronave rolará para cima da mesma e será evitado o problema aeroelástico

- **Comandos Secundários**
- Spoilers

Outra alternativa para se evitar o problema aeroelástico de reversão de comando é o uso de mais de um conjunto de ailerons para gerar as razões de rolamento desejadas.

Algumas aeronaves são equipadas com ailerons na parte interna da asa (região da raiz) que são operados em todo o envelope de velocidades e um outro conjunto de ailerons externos (região da ponta) que operam somente em baixas velocidades.

- Comandos Secundários
- Spoilers



- **Comandos Secundários**
- Speed brakes

Uso dos spoilers para redução da velocidade da aeronave, aumentando seu arrasto



- **Comandos Secundários**
- Speed brakes

Painéis mais próximos à raiz da asa só se abrem em solo, sendo chamados “ground spoilers”

Ground spoilers



- **Comandos Secundários**
- Speed brakes

Normalmente se utiliza no intradorso da asa, mas alguns tipos pouco convencionais podem ser colocados no dorso (exemplo: F-15) ou na parte inferior da aeronave

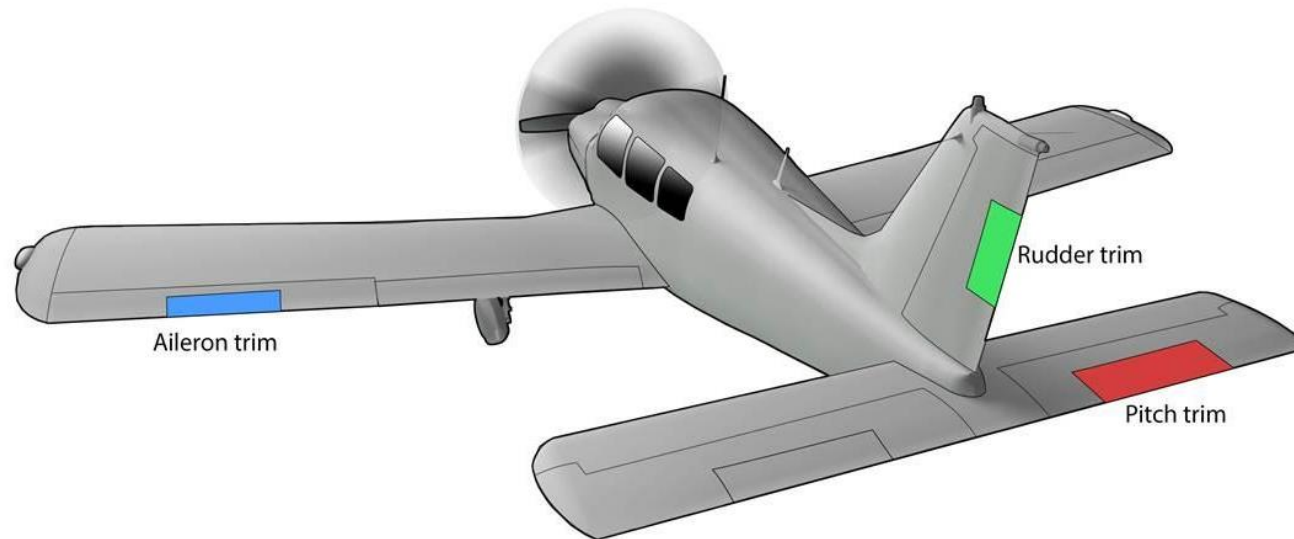


- **Denominações diferentes**

- **Flaperon** – quando uma mesma superfície tem as funções de flape e aileron
- **Elevon** – quando uma mesma superfície faz a função de profundor (elevator) e aileron
- **Taileron** – aileron localizado na região da cauda da aeronave
- **Cannard** – profundor localizado na região frontal da aeronave

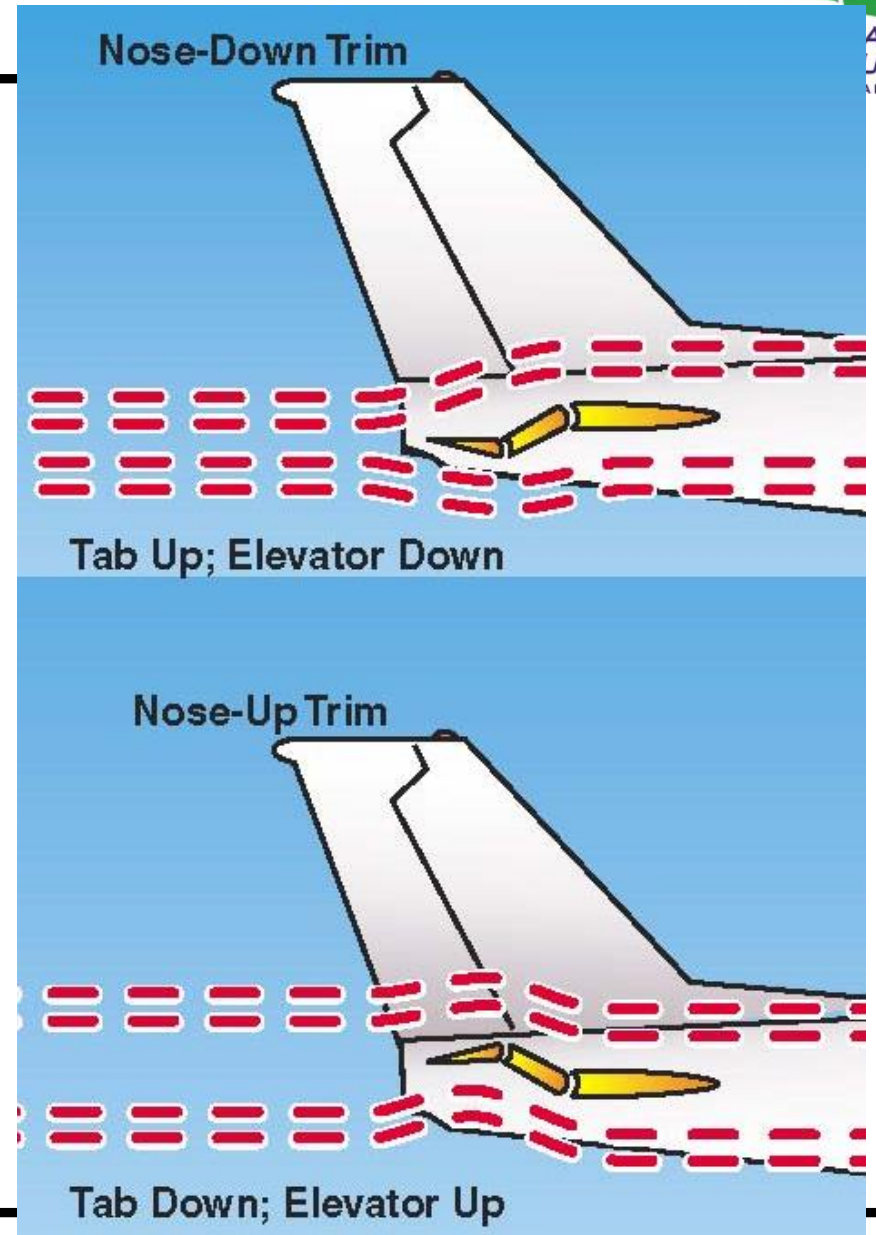


- **Sistema de trimagem**
  - Alivia carga de trabalho do piloto para voos longos
  - Pode movimentar a superfície toda ou apenas os “trim tabs”
  - Acionamento via cabo e polia ou via atuador

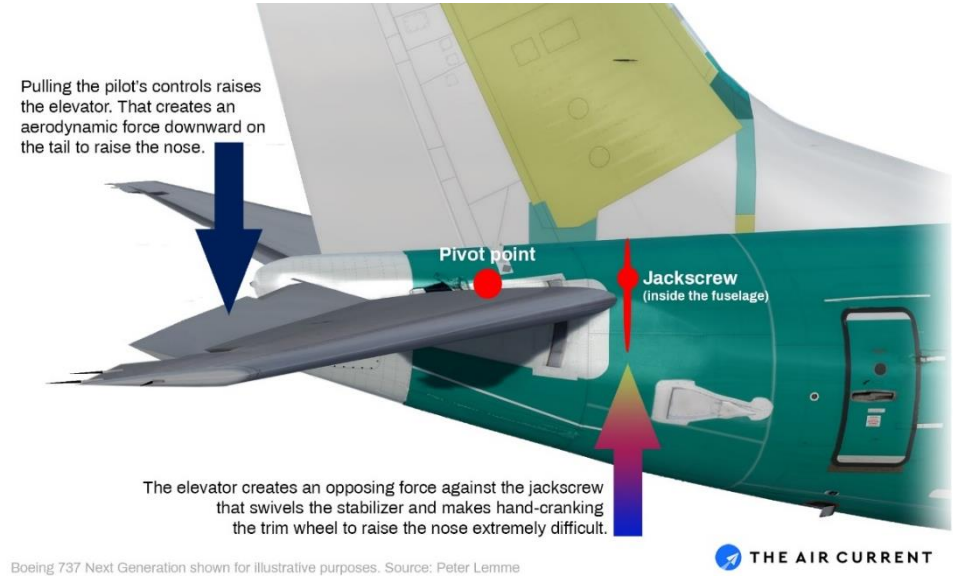




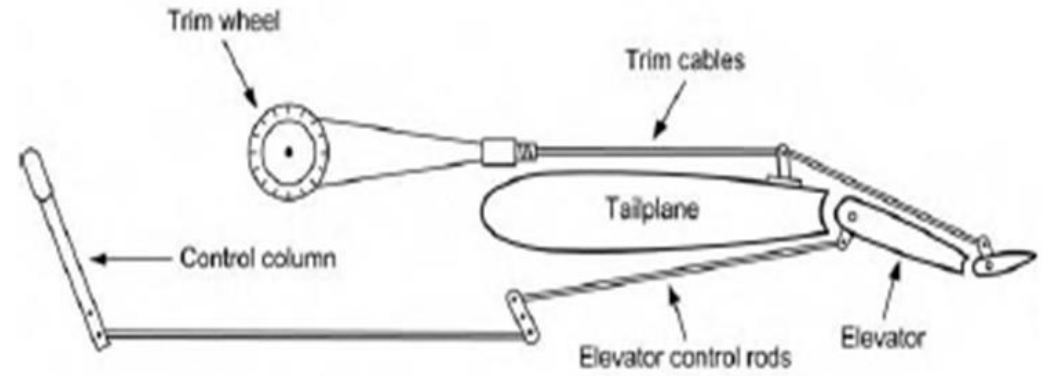
- Sistema de trimagem



- Sistema de trimagem



- Sistema de trimagem
- Trim Wheel

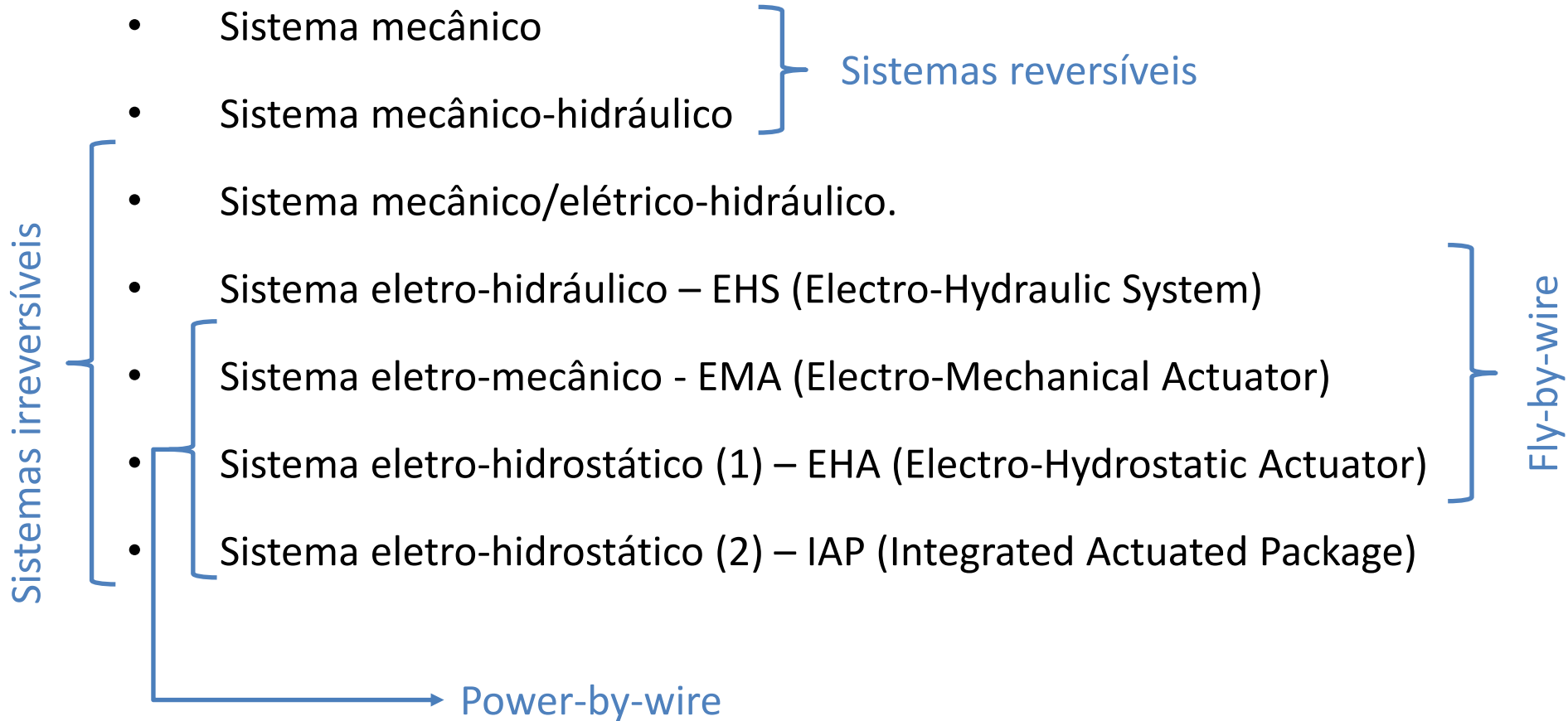


- Sistema de trimagem
- Trim Button



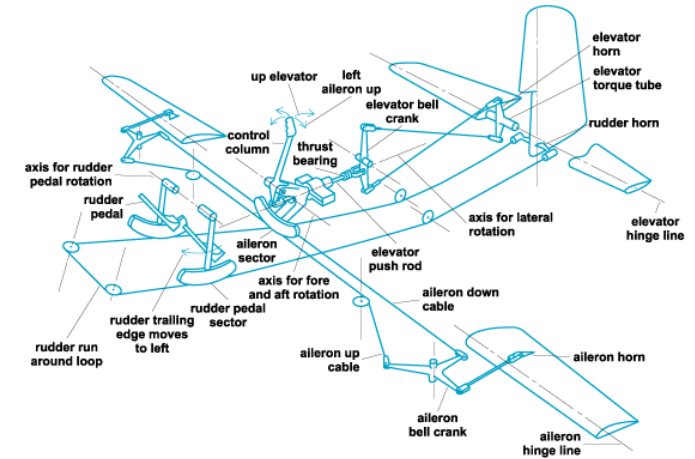
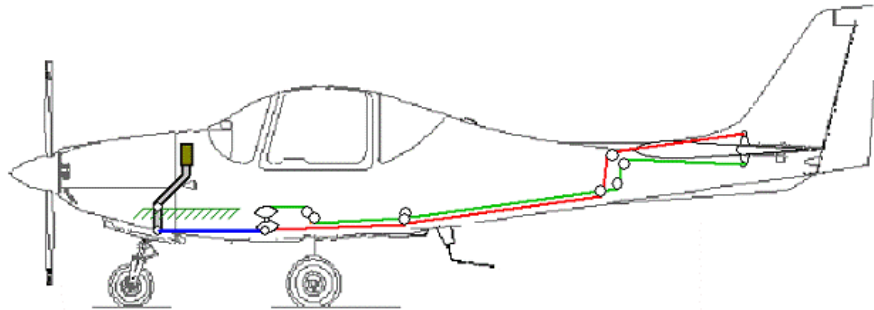
- Importância dos sistemas de acionamento
- Breve histórico de desenvolvimento
- Comandos de voo
- Classificação dos sistemas comandos de voo
- Evolução dos comandos de voo e a segurança

Diversas configurações e graus de complexidade:

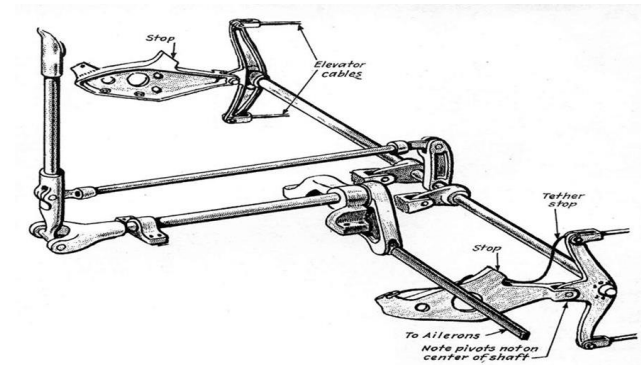
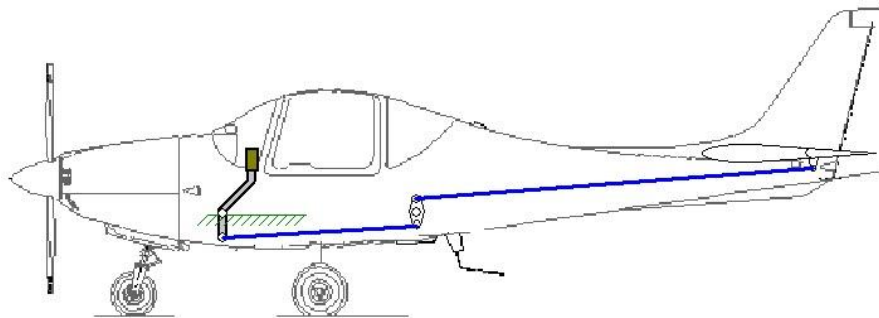


- **Sistema reversíveis**
- Sistemas Reversíveis são sistemas em que as superfícies de comando estão conectadas fisicamente com a cabine de comando
- O movimento ocorre em ambos sentidos, ou seja, se os comandos são acionados as superfícies de controle se movimentam e o oposto também é válido (se a superfície de controle é movimentada os comandos se movimentam na cabine)

- Sistema reversíveis
- Podem ser por cabos e polias



- Ou eixos e hastes





- Sistema reversíveis
- Exemplos de aeronaves com sistemas reversíveis de comando



EMB 120 – Brasília

Profundores  
Ailerons



EMB 202 - Ipanema

Profundores  
Ailerons  
Leme



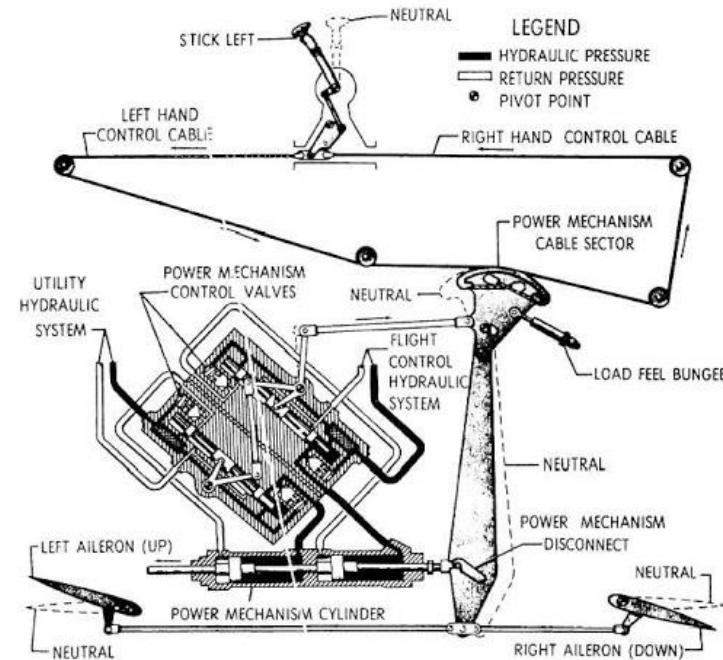
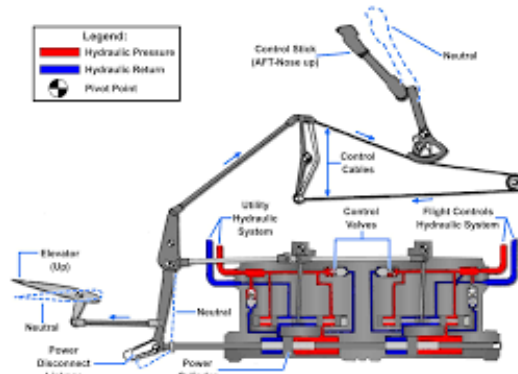
ALX 314 – Super Tucano

Profundores  
Ailerons  
Leme

- Sistema irreversíveis

Nos Sistemas Irreversíveis existem um elemento amplificador (hidráulico, elétrico, etc.) entre os comandos na cabine e as superfícies de controle

Neste caso não é possível a movimentação do comando na cabine a partir do movimento de uma superfície.



- Sistema irreversíveis
- Exemplos de aeronaves com sistemas irreversíveis de comando



737 - 700

Profundores  
Ailerons  
Leme  
Spoilers



EMB 145

Ailerons  
Leme  
Spoilers




AMX

Profundores  
Ailerons

- Importância dos sistemas de acionamento
- Breve histórico de desenvolvimento
- Comandos de voo
- Classificação dos sistemas comandos de voo
- Evolução dos comandos de voo e a segurança


- Gerações de aeronaves divididas por tecnologias

**1 Early commercial jets**  
**From 1952**  
 Dials & gauges in cockpit. Early auto-flight systems  
 Comet, Caravelle, BAC-111, Trident, VC-10, B707, B720, DC-8, Convair 880/990



Caravelle

**2 More integrated auto-flight**  
**From 1964**  
 More elaborate auto-pilot and auto-throttle systems  
 Concorde, A300, Mercure, F28, BAe146, VFW 614, B727, B737-100 & -200, B747-100/200/300/SP, L-1011, DC-9, DC-10



A300B2

**3 Glass cockpits & FMS**  
**From 1980**  
 Electronic cockpit displays, improved navigation performance and Terrain Avoidance Systems, to reduce CFIT accidents  
 A300-600, A310, Avro RJ, F70, F100, B717, B737 Classic & NG/MAX, B757, B767, B747-400/-8, Bombardier CRJ, Embraer ERJ, MD-11, MD-80, MD-90



A300-600

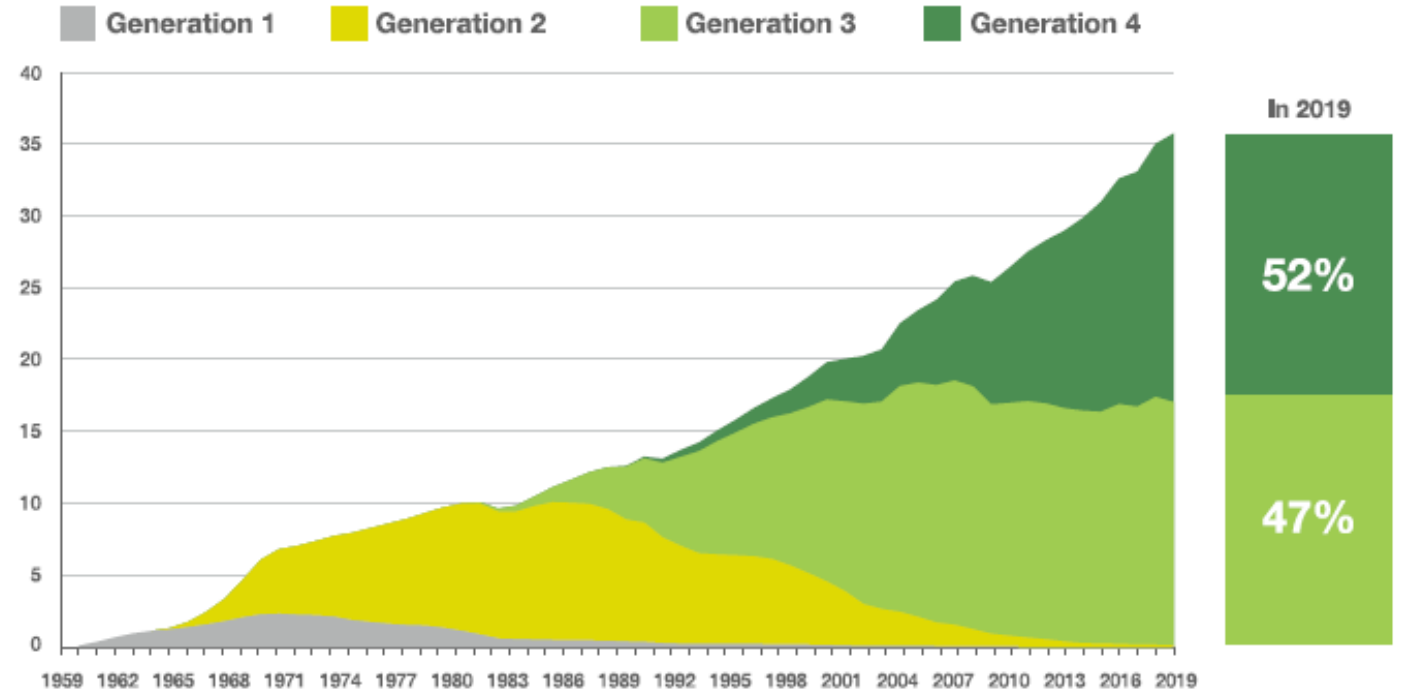
**4 Fly-By-Wire**  
**From 1988**  
 Fly-By-Wire technology enabled flight envelope protection to reduce LOC-I accidents  
 A220, A318/A319/A320/A321, A330, A340, A350, A380, B777, B787, Embraer E-Jets, Sukhoi Superjet



A350 XWB

- Quantidade de voos por geração (2019)

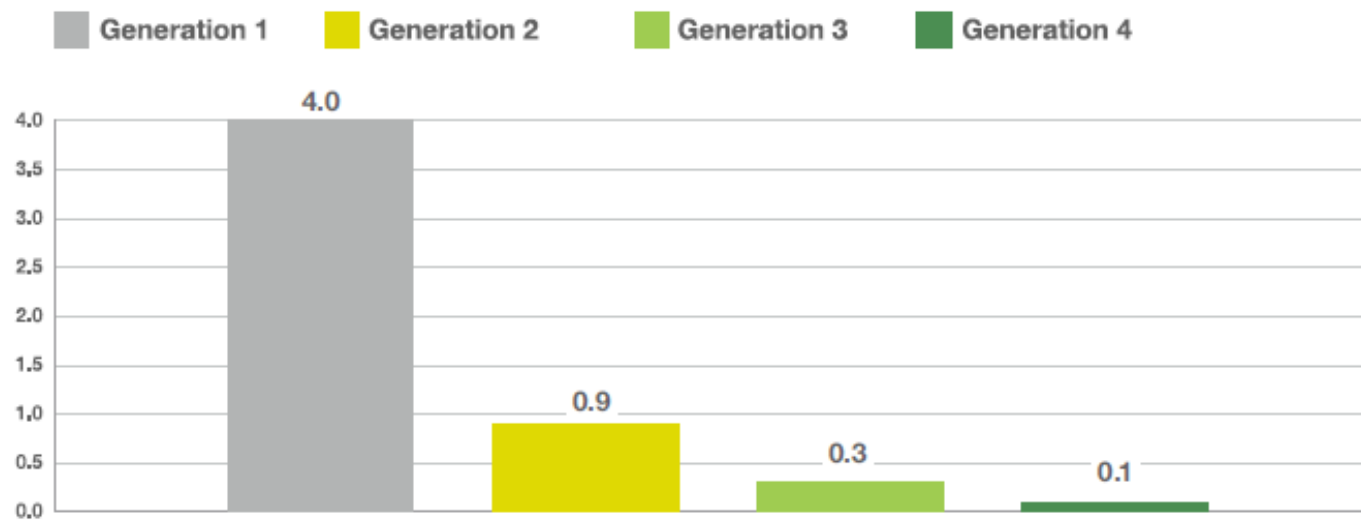
Yearly number of flights per aircraft generation (in millions)



Industry status at end 2019	Generation 1	Generation 2	Generation 3	Generation 4
Aircraft in-service	3	200	12,068	14,405
Total accumulated flight cycles (million)	40.6	254.9	410.9	200.6
Flight cycles in 2019 (million)	0.0	0.2	16.9	18.7

- Acidentes por milhão de horas de voo, por geração (1958 a 2019)

Fatal accident rate (per million flights) per aircraft generation 1958-2019



- Acidentes por milhão de horas de voo, por geração, por ano – média móvel de 10 anos (1958 a 2019)

10 year moving average fatal accident rate (per million flights) per aircraft generation

