

SAA0187
Sistemas Aeronáuticos de Acionamento

Comandos Fly-by-wire

Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto

jhbidi@sc.usp.br

Sumário

- **Conceito de Fly-by-wire**
- **Power-by-wire**
- **Atuadores**
- **Control Load**
- **Aplicações em aeronaves civis**

Sumário

- **Conceito de Fly-by-wire**
- Power-by-wire
- Atuadores
- Control Load
- Aplicações em aeronaves civis

Conceito de Fly-by-wire

- Algumas definições:
  - “Aircraft where the **pilot's control commands** are processed by a **computer** and sent to the **flight control** surface actuators with **electrical rather than mechanical signals**. FBW technology primarily includes Feedback Control Systems and Control Laws.”
  - “System whereby the **movement** of an aircraft's control stick is **sensed and converted into digital electronic signals**.”
  - “Replacement of mechanical operation devices by electrical signals. The necessary force or torque is generated on the spot and is not transferred.”
  - “The use of electrical signals to connect the pilot's control devices with the aircraft control surfaces; or the use of electrical control connections with no mechanical backup linkages and providing the pilot direct control of aircraft motion rather than control surface position.”
  - “Fly-by-wire is a means of computer-aided aircraft control.”

Conceito de Fly-by-wire

- De forma simplificada, ao sistema que realiza eletronicamente essa análise de estado do veículo e atua hidraulicamente nas superfícies de comando, seja por inputs do piloto automático ou do piloto humano, dá-se o nome de Fly-by-Wire

- Dentre as funções desse sistema, transversal a todos os outros sistemas da aeronave, estão a emulação da sensibilidade de comando aos pilotos humanos e, principalmente, as proteções de envelope

Com base no estado total da aeronave, algumas entradas de comando que gerariam movimentos além dos limites de segurança da aeronave podem ser limitados ou mesmo impedidos

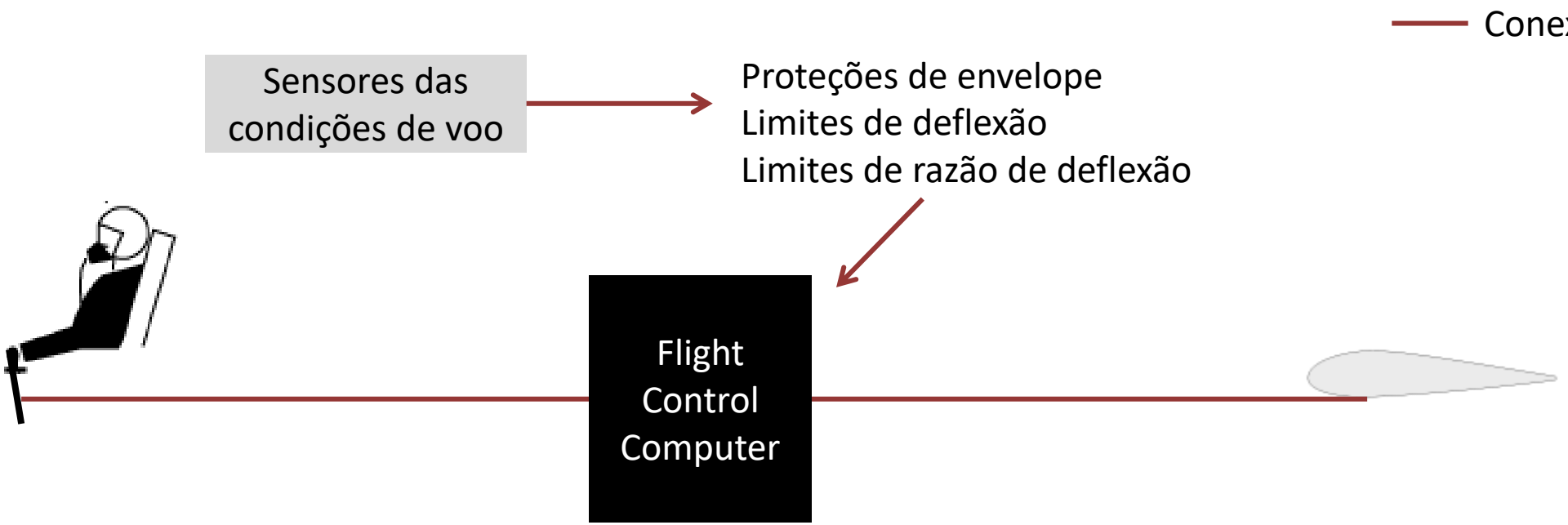
Conceito de Fly-by-wire

- Comando convencional



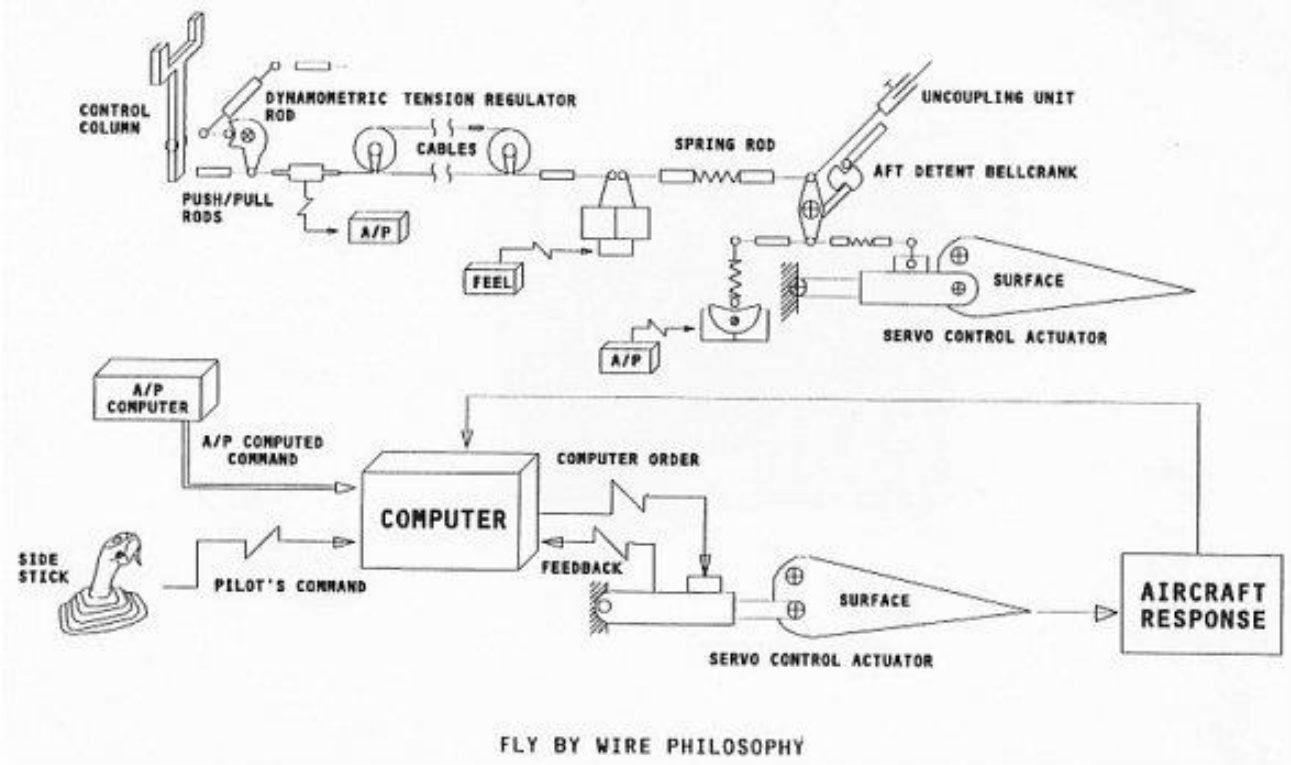
Conceito de Fly-by-wire

- Comando Fly-by-wire (representação MUITO simplificada)



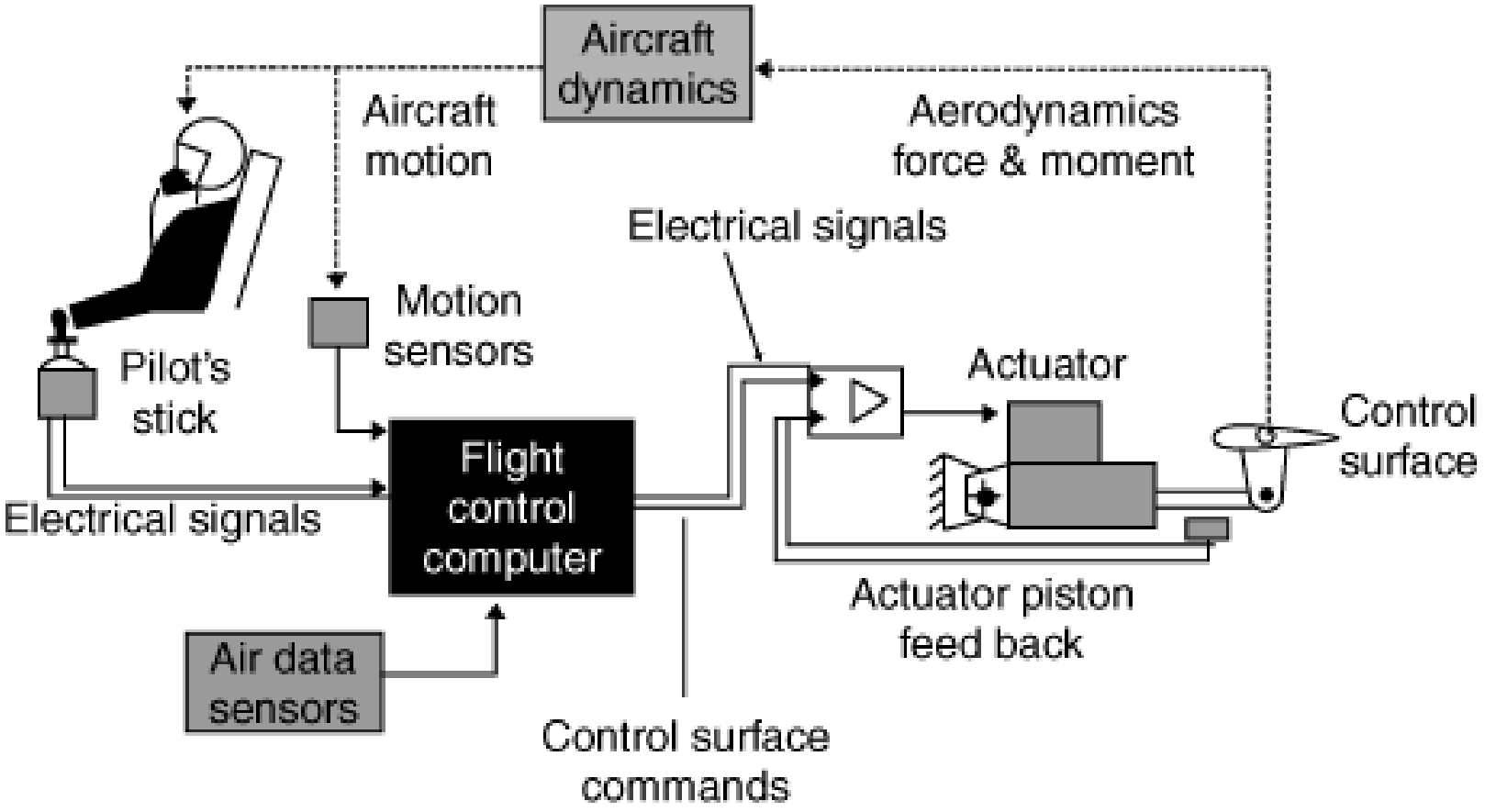
Conceito de Fly-by-wire

- Comparativo:



FLY BY WIRE PHILOSOPHY

Conceito de Fly-by-wire



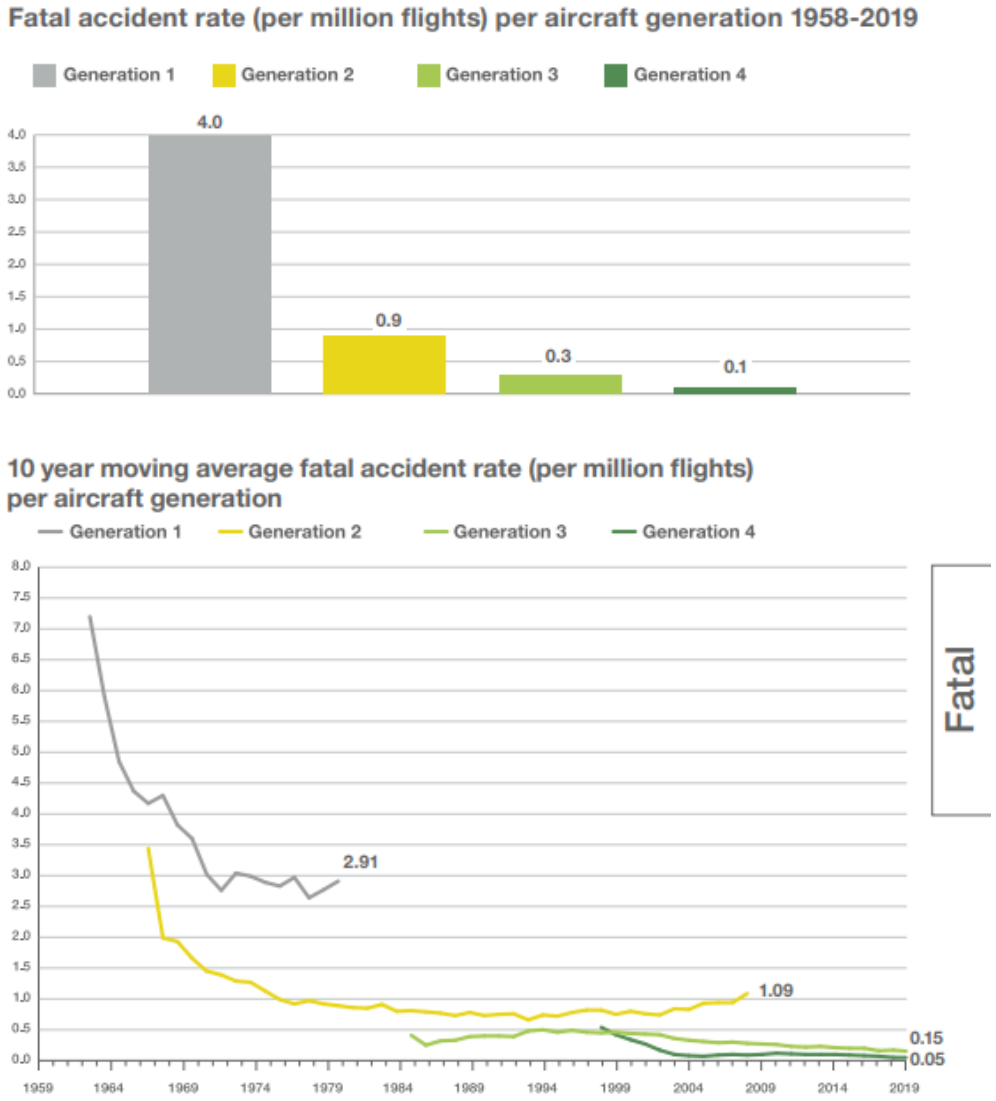
Conceito de Fly-by-wire

- Vantagens:
  - Redução de peso devido a eliminação da conexão mecânica.
  - Controle digital possibilita a utilização de algoritmos complexos como leis de controle.
  - Maior manobrabilidade, resposta mais rápida e precisa.
- Desvantagens:
  - Discretização dos sinais enviados aos atuadores.
  - Discretização dos sinais proveniente dos sensores: problema de aliasing.
  - Introdução de atrasos: amostragem, tempo de processamento, filtros.
  - Necessidade de redundância.
- Vantagens mais significativas que desvantagens!

Conceito de Fly-by-wire

- O FBW afeta mesmo a segurança?





Sumário

- Conceito de Fly-by-wire
- **Power-by-wire**
- Atuadores
- Control Load
- Aplicações em aeronaves civis

Power-by-wire

- Desvantagens do sistema hidráulico:
  - Alto peso, alto custo de manutenção.
  - Possibilidade de vazamentos, falhas em bombas e válvulas
  - Vulnerabilidade (para aeronaves de combate).
- Solução: Power-by-wire
  - Transmissão da potência das turbinas para os atuadores e através de toda aeronave na forma de potência elétrica.
- Configurações:
  - Sistema eletro-mecânico - EMA (Electro-Mechanical Actuator).
  - Sistema eletro-hidrostático – EHA (Electro-Hydrostatic Actuator).
  - Sistema eletro-hidrostático – IAP (Integrated Actuated Package).

Sumário

- Conceito de Fly-by-wire
- Power-by-wire
- **Atuadores**
- Control Load
- Aplicações em aeronaves civis

Atuadores

- Diversas configurações e graus de complexidade:
  - Sistema mecânico
  - Sistema mecânico-hidráulico

  } Sistemas reversíveis

  - Sistema mecânico/elétrico-hidráulico.
  - Sistema eletro-hidráulico – EHS (Electro-Hydraulic System)
  - Sistema eletro-mecânico - EMA (Electro-Mechanical Actuator)
  - Sistema eletro-hidrostático (1) – EHA (Electro-Hydrostatic Actuator)
  - Sistema eletro-hidrostático (2) – IAP (Integrated Actuated Package)

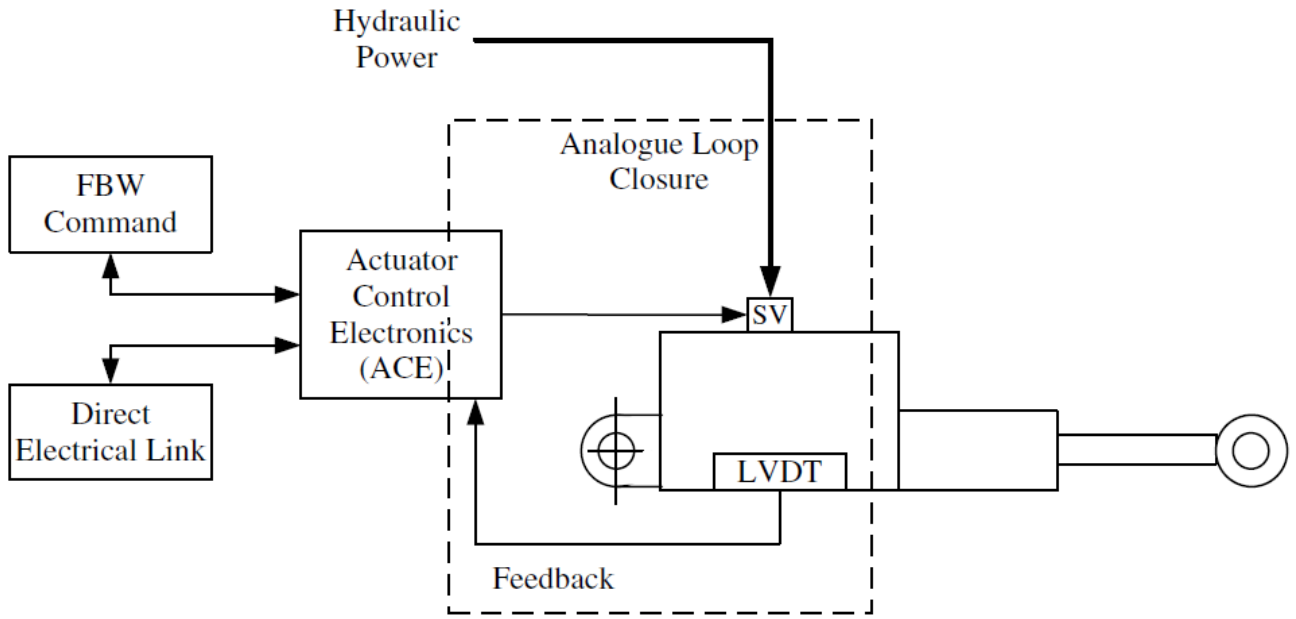
Sistemas irreversíveis

Fly-by-wire

Power-by-wire

Atuadores

- **Atuador Eletro-hidráulico (EHS)**
  - Comandado por sinal elétrico
  - O sinal vem das leis de controle do FBW. Em caso de pane, sua atuação pode ser revertida para modo direto



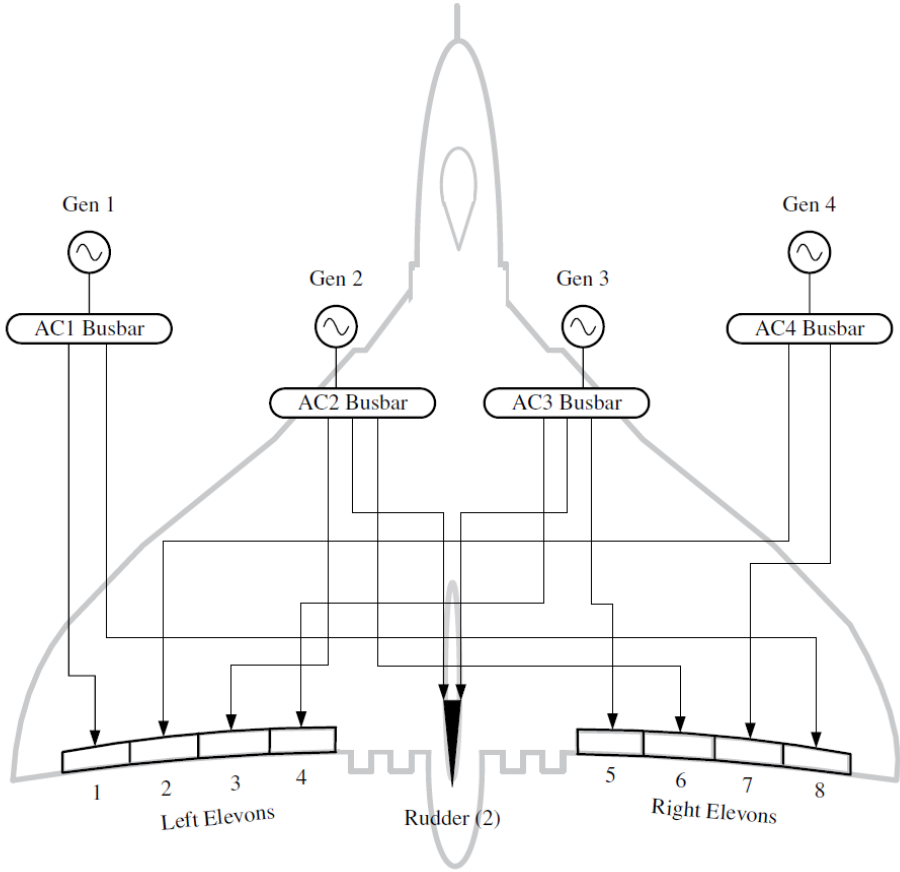
Atuadores

- **Atuador integrado IAP (IAP – Integrated Actuator Package)**
  - O próprio atuador possui seu reservatório hidráulico, e sua bomba, que pressuriza o sistema e gera o movimento
  - Sistema “stand alone”
  - Ativação elétrica
  - Usado para aplicações mais específicas (não-convencionais)
  - Em geral alimentado por barramento elétrico 115 VAC

Atuadores

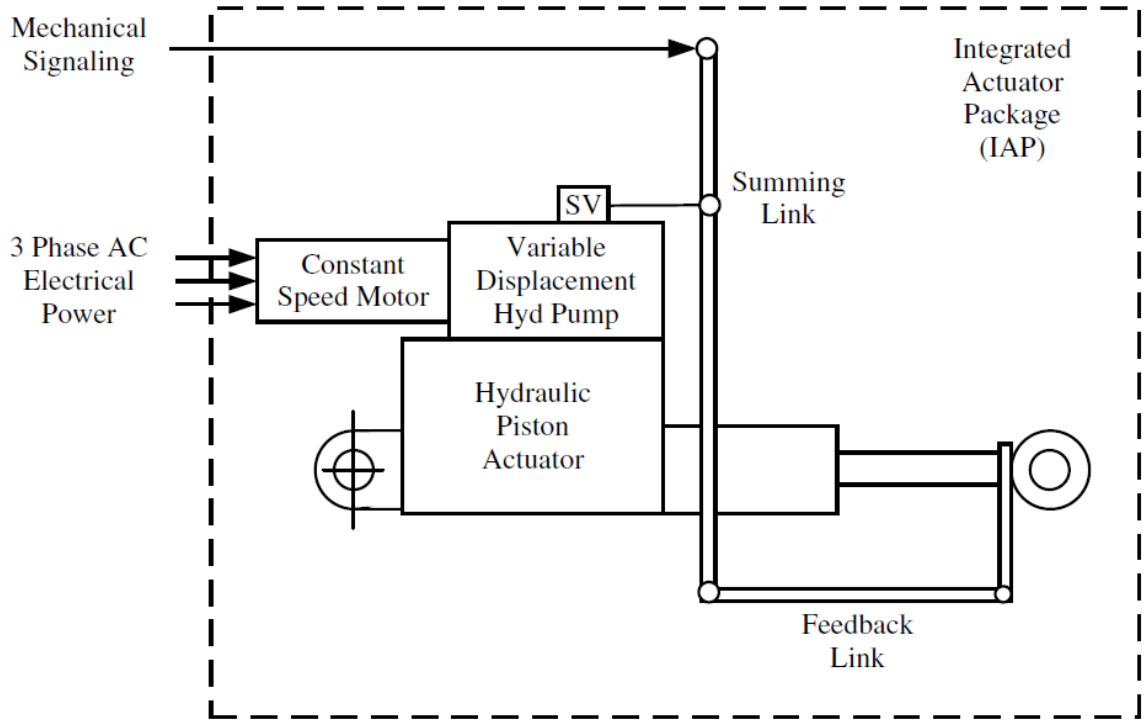
- **Atuador integrado IAP (IAP – Integrated Actuator Package)**
  - Exemplo: Avro Vulcan B-2





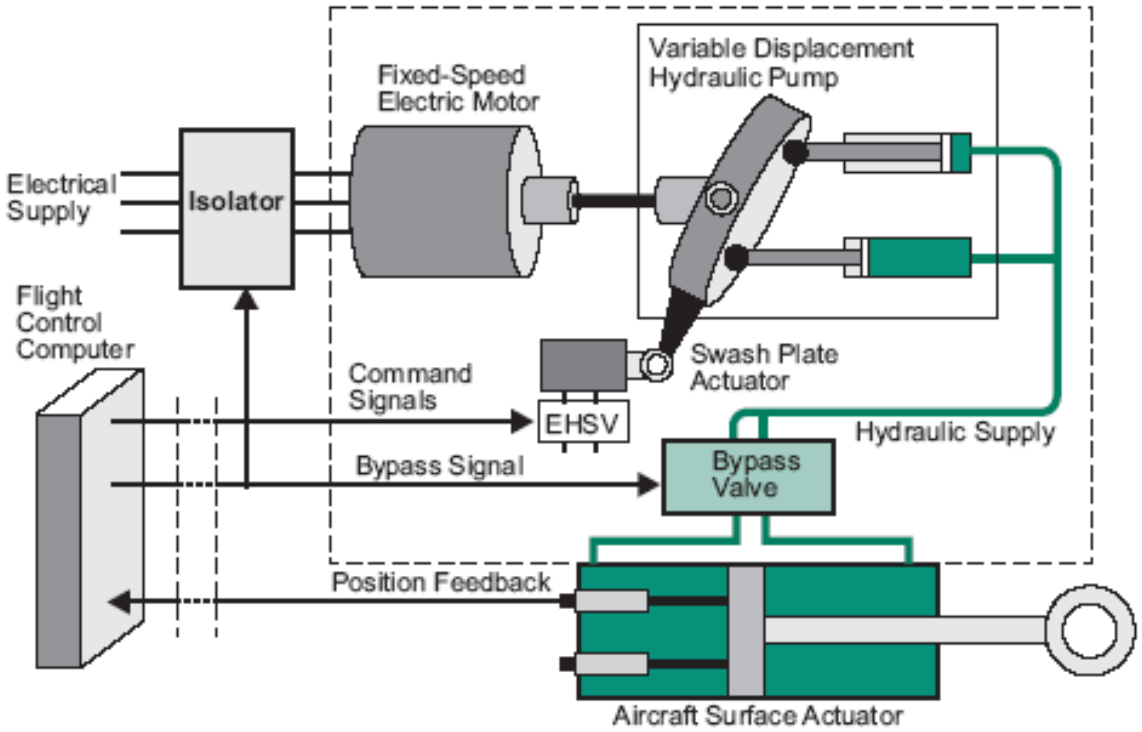
Atuadores

- **Atuador integrado IAP (IAP – Integrated Actuator Package)**
  - O próprio atuador possui seu reservatório hidráulico, e sua bomba, que pressuriza o sistema e gera o movimento



Atuadores

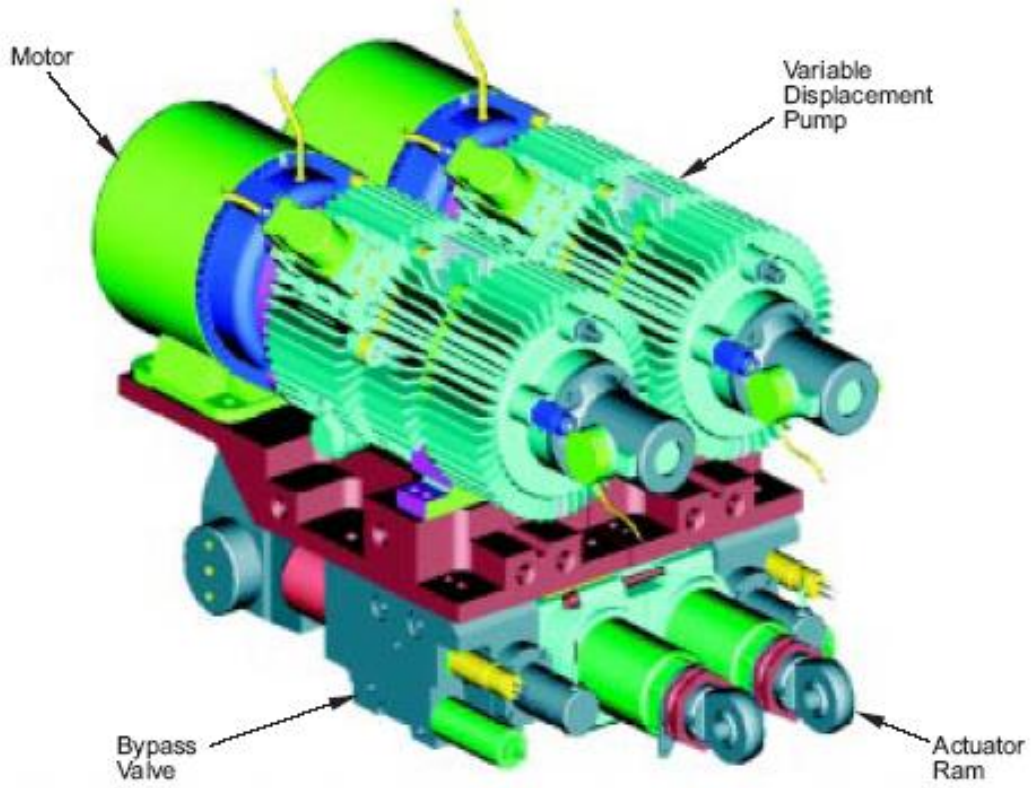
- **Atuador integrado IAP (IAP – Integrated Actuator Package)**
  - Variação construtiva do EHA. Utiliza motor de indução (AC) bi-direcional de velocidade fixa para acionar uma bomba de deslocamento variável.



- Elimina a necessidade de drivers de alta potência para acionamento dos motores.
- Do ponto de vista térmico são menos sensíveis a variações da carga em alta frequência.

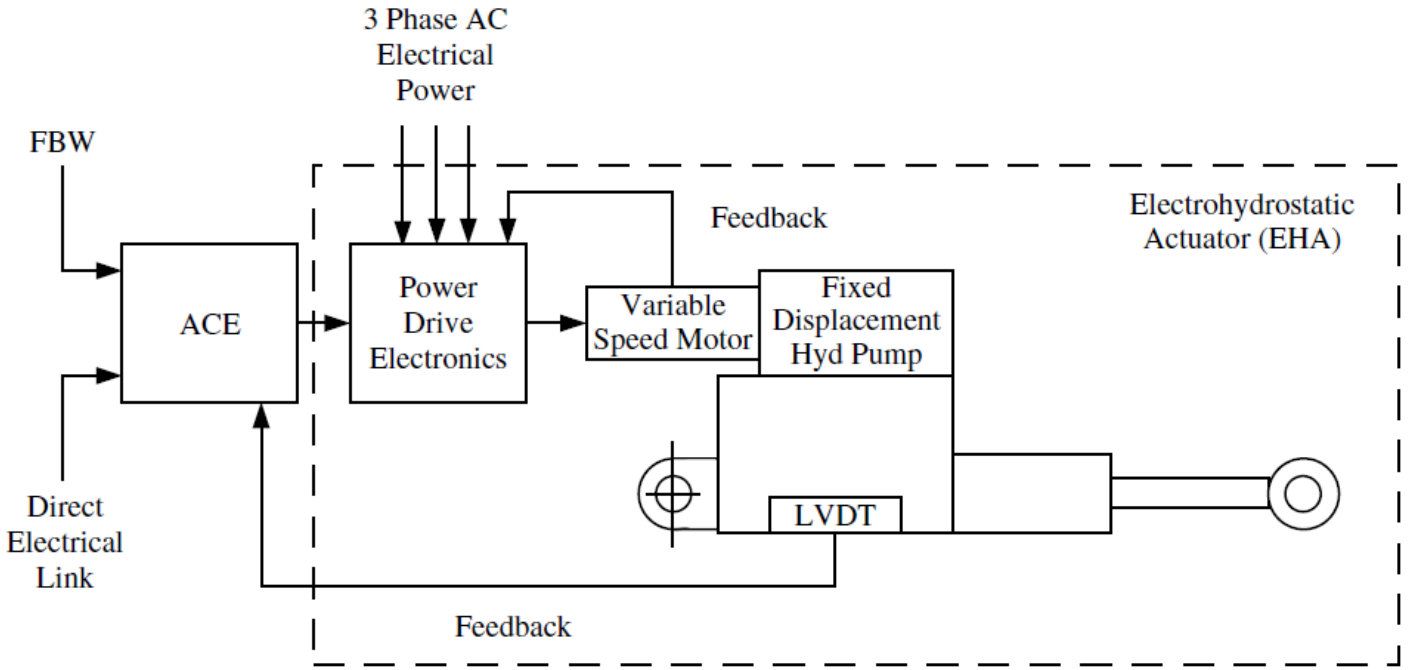
Atuadores

- **Atuador integrado IAP (IAP – Integrated Actuator Package)**



Atuadores

- **Atuador Eletro-hidrostático (EHA)**
  - Alimentação em 270 VDC ou 540 VDC
  - A integração com sinais elétricos permite sua utilização em sistemas FBW e integração com barramentos aviônicos



Atuadores

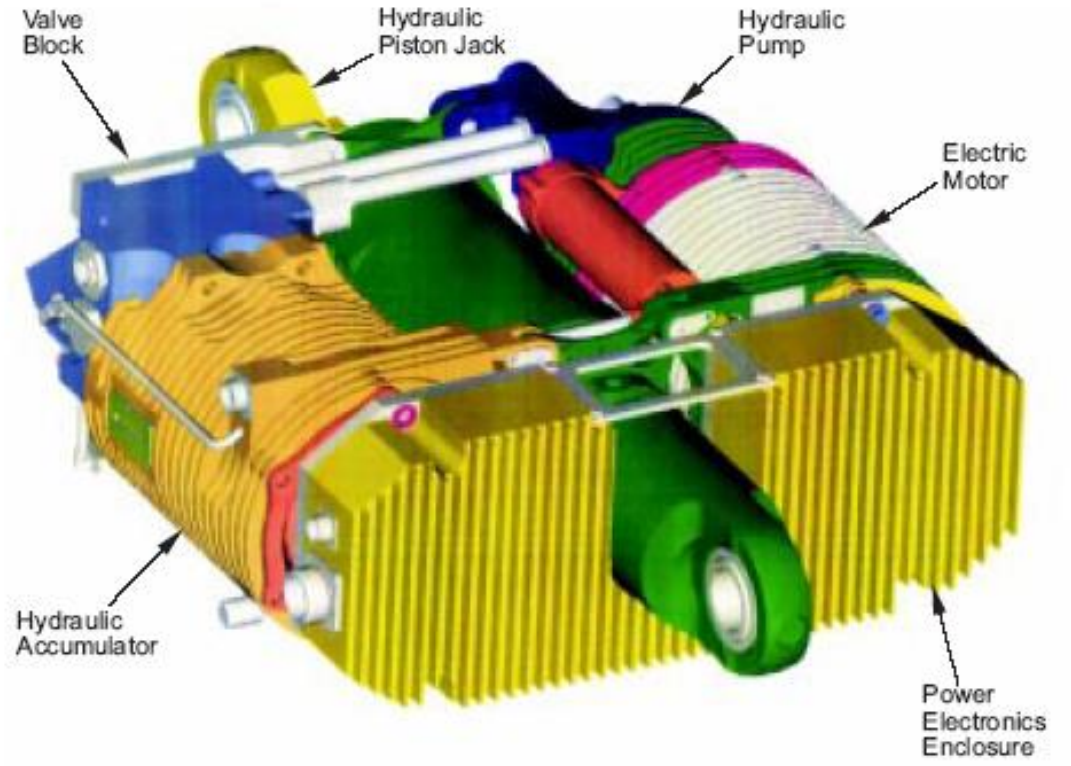
- **Atuador Eletro-hidrostático (EHA)**
  - Integração entre FBW e IAP
  - Estado-da-arte em atuadores
  - Usado para atuadores de aeronaves com grande carga aerodinâmica, como F-35, Airbus A380, etc., além de drones e aeronaves autônomas





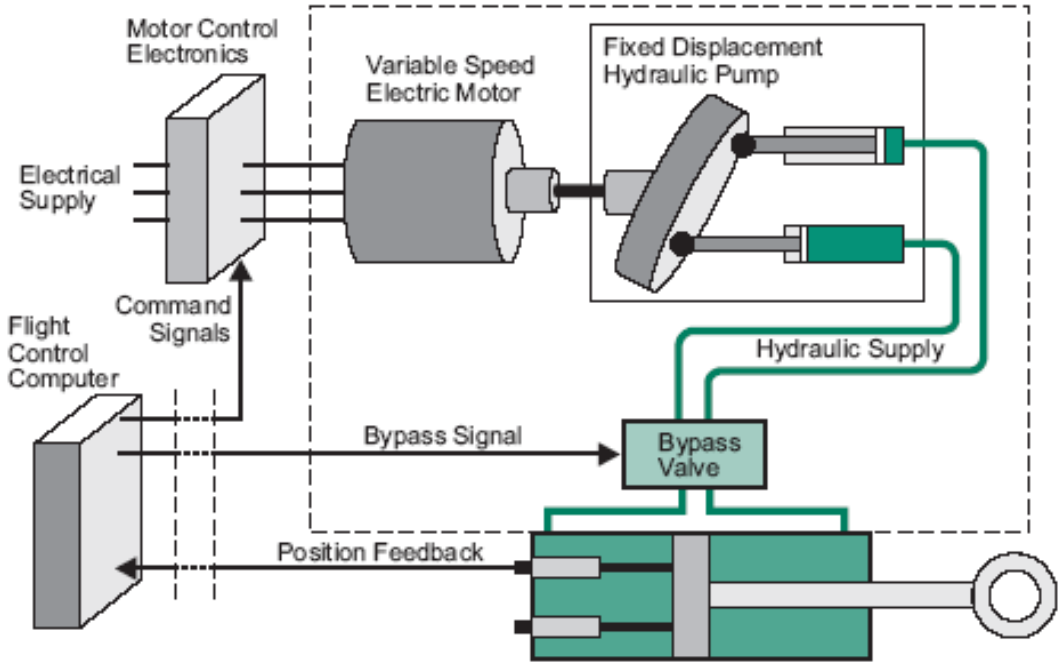
Atuadores

- **Atuador Eletro-hidrostático (EHA)**



Atuadores

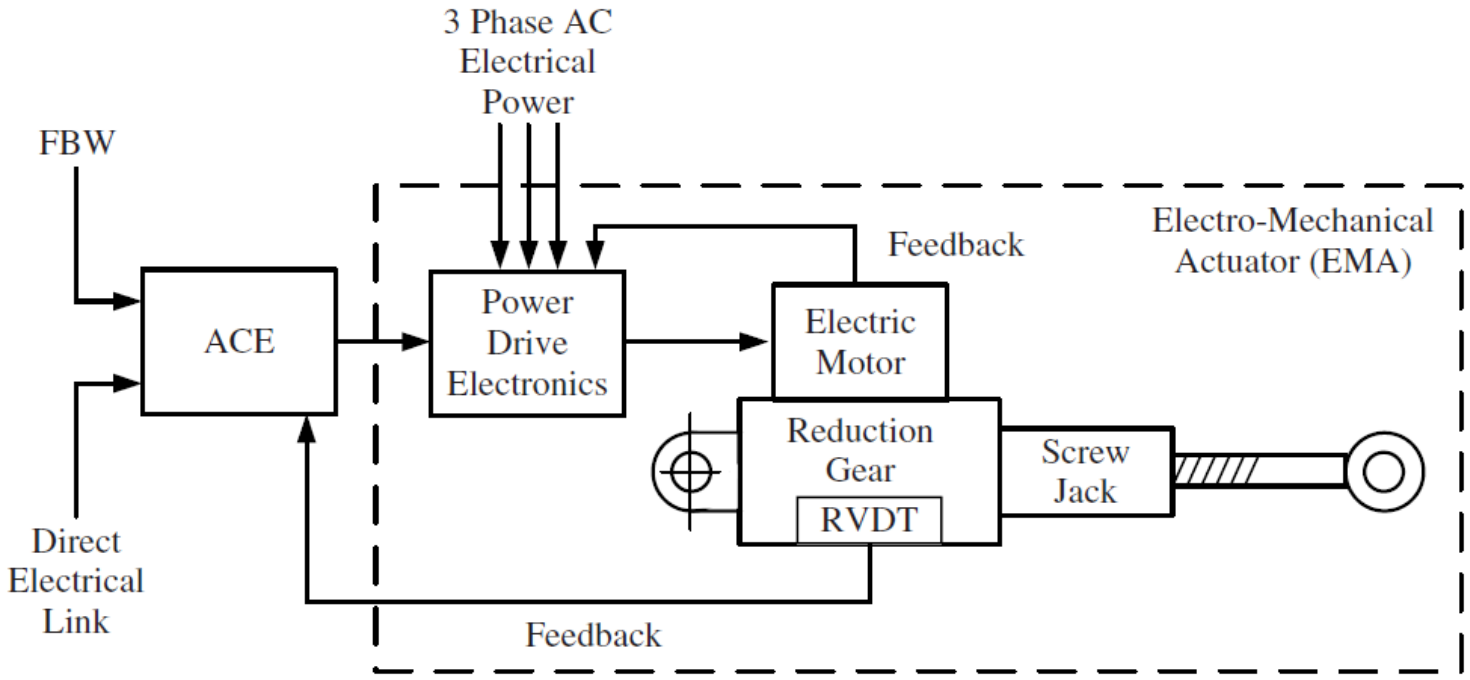
- **Atuador Eletro-hidrostático (EHA)**
  - Interpõe um sistema hidráulico em escala reduzida entre o motor elétrico e o atuador.



- Motor elétrico do tipo brushless, de velocidade variável e bi-direcional transforma energia elétrica em mecânica.
- A energia mecânica é usada para acionar uma bomba hidráulica de deslocamento fixo.

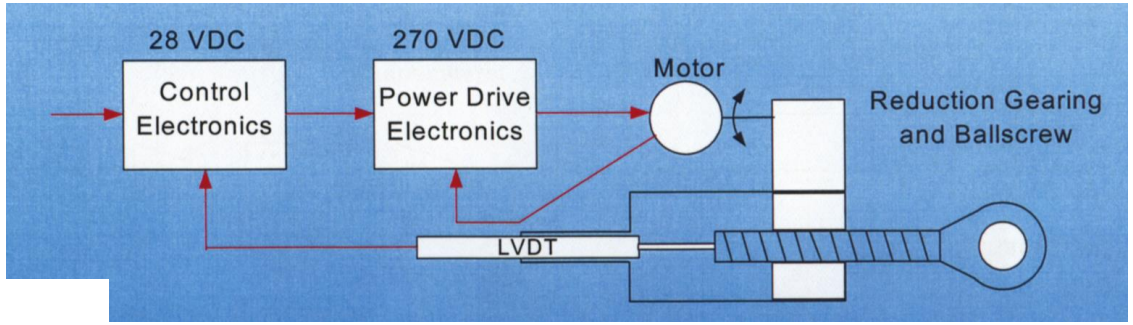
Atuadores

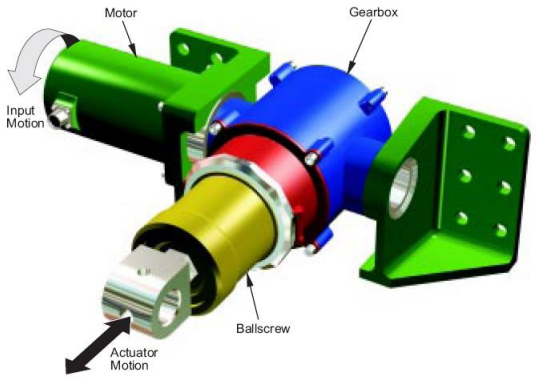
- **Atuador Eletro-mecânico (EMA)**
  - Correspondente EHA para atuadores de parafuso
  - Portanto mais aplicáveis a flapes, slats, etc.



Atuadores

- **Atuador Eletro-mecânico (EMA)**
  - Utiliza um motor elétrico para fazer o acionamento da superfície de controle.





- Acoplamentos de engrenagens realizam a redução da rotação.
-
- No caso de movimento linear utiliza-se fusos rolamentados.

Atuadores

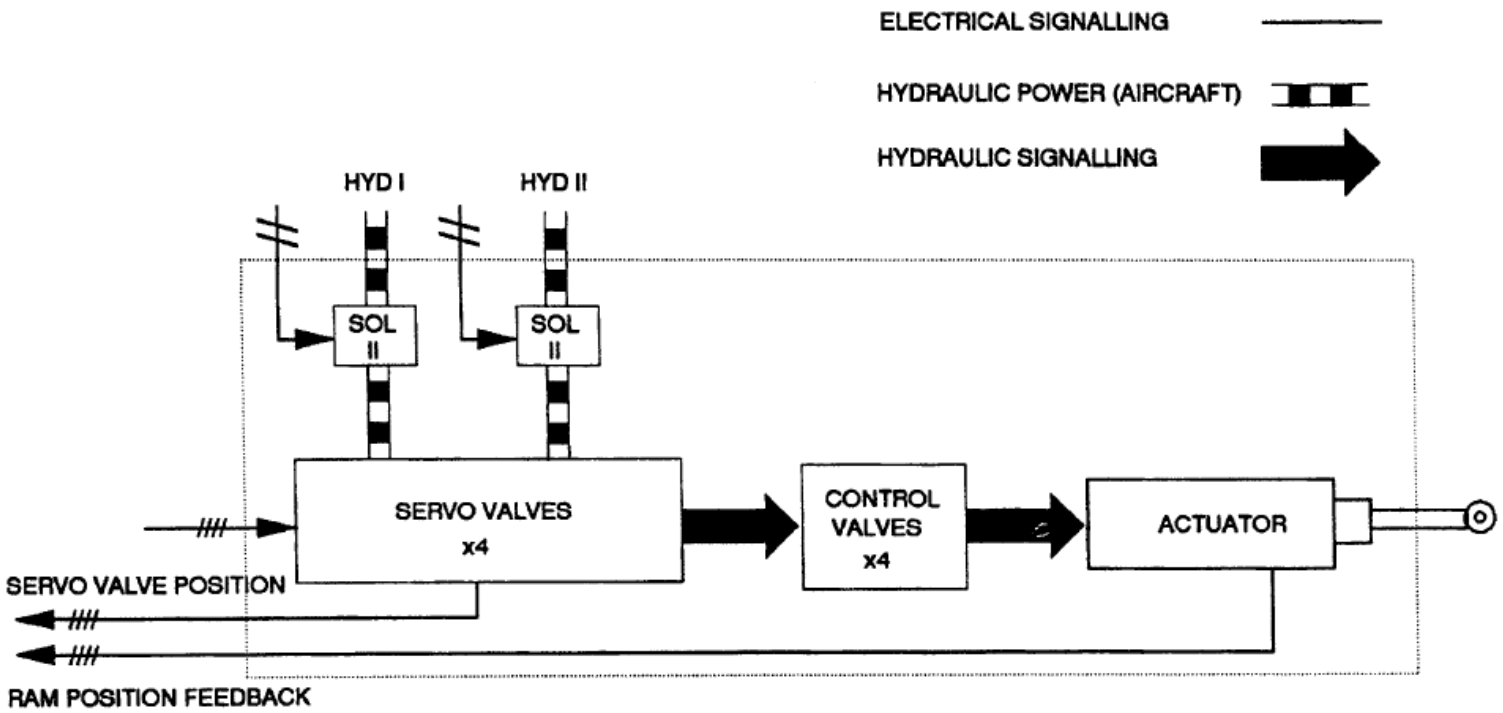
- **Aplicações**

Actuator type	*Power source*	*Primary flight control*	*Spoilers*	*Tailplane horizontal stabilator*	*Flaps and slats*
Conventional Linear Actuator	Aircraft Hydraulic Systems: B/Y/G or L/C/R [1]	X	X		
Conventional Screw-jack Actuator	Aircraft Hydraulic or Electrical Systems [2]			X	X
Integrated Actuator Package (IAP)	Aircraft Electrical System (115VAC)	X	X		
Electrically Signalled Hydraulic Actuator	Aircraft Hydraulic Systems	X	X		
Electro-Hydrostatic Actuator (EHA)	Aircraft Electrical System [3] [4]	X	X		
Electro-Mechanical Actuator (EMA)	Aircraft Electrical System [3]			X	X

Notes: (1) B/Y/G = Blue/Green/Yellow or L/C/R = Left/Centre/Right (Boeing)
(2) For THS and Flaps & Slats both hydraulic and electrical supplies are often used for redundancy
(3) 3-phase VAC to 270 VDC matrix converter used in civil
(4) 270 VDC aircraft electrical system used on F-35/JSF

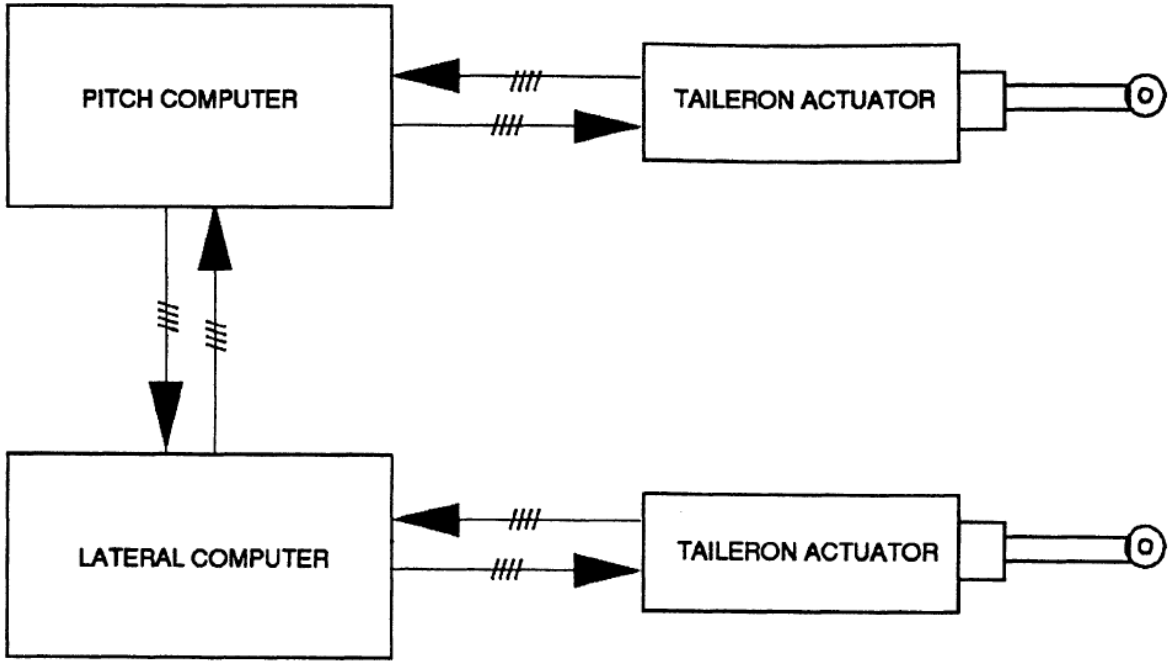
Atuadores

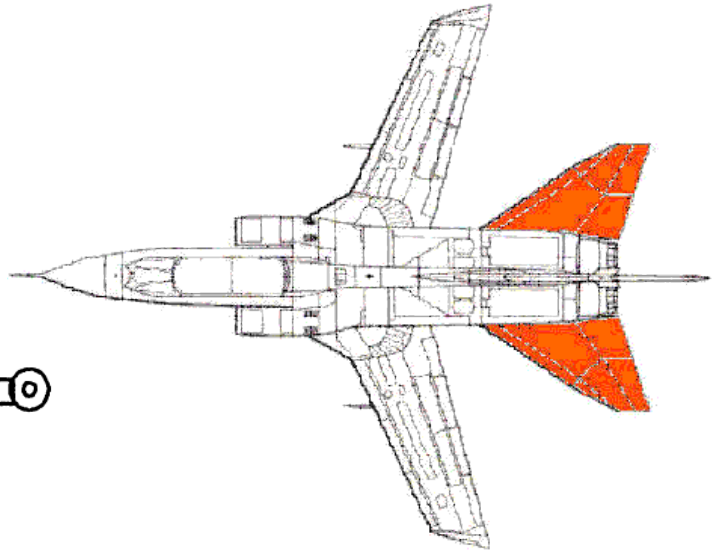
- **Redundância**

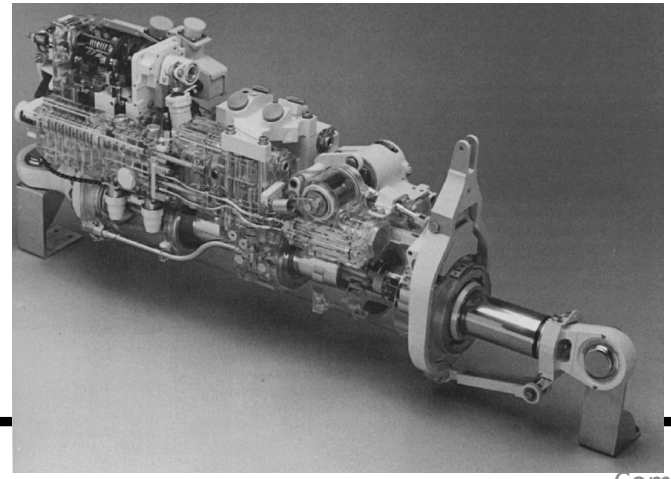


Atuadores

- **Redundância**
  - Exemplo: Tornado



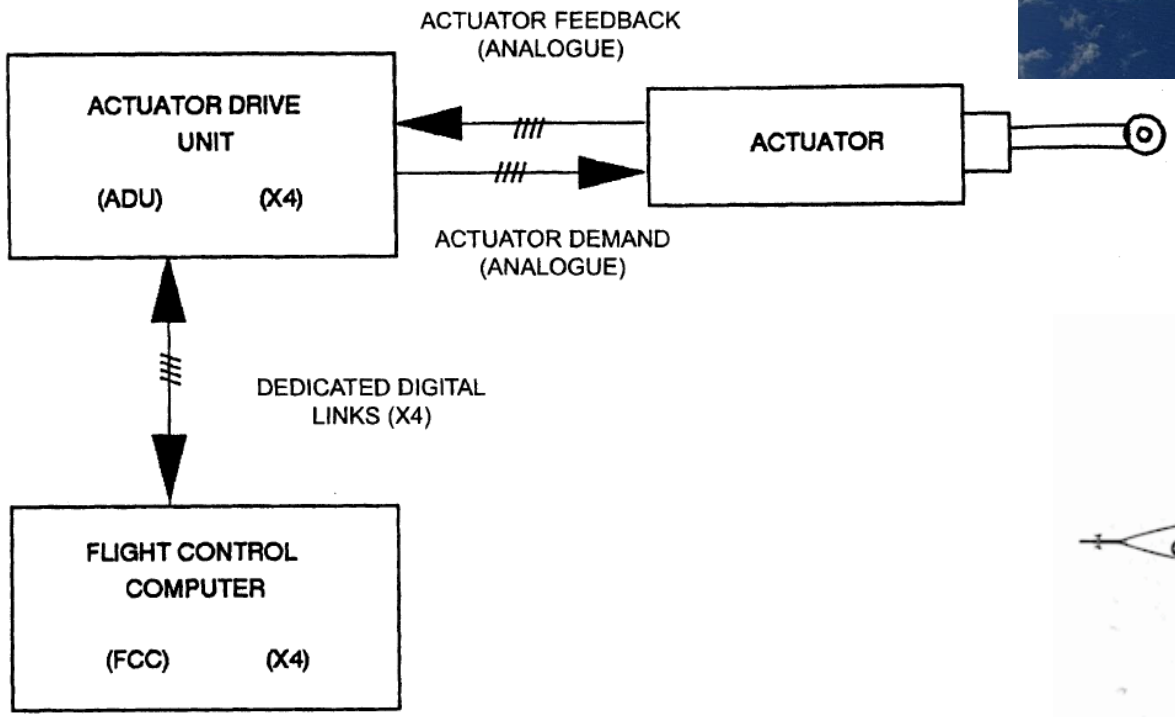


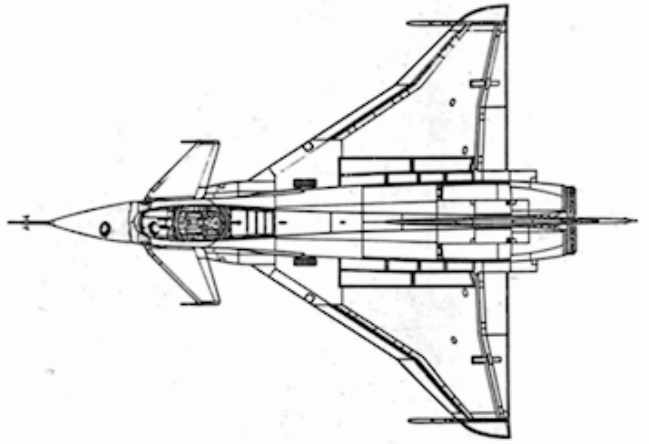


Atuadores

- **Redundância**
  - Exemplo: EAP

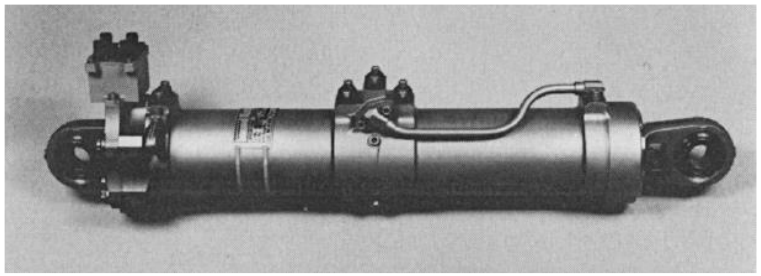


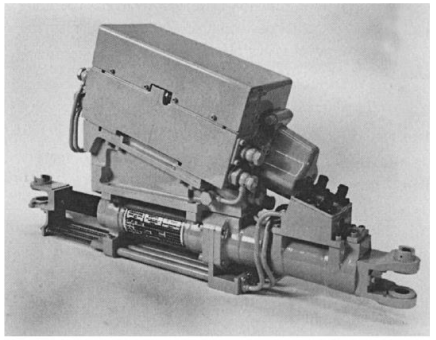


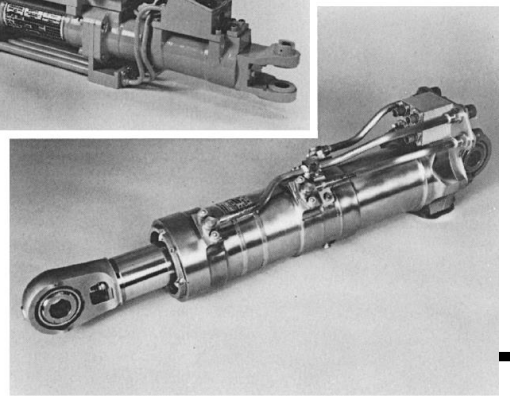


Atuadores

- **Redundância**
  - Exemplo: EAP
    - Atuadores quadruplexados
    - 2 atuadores para canard
    - 2 atuadores para cada flaperon (inborad e outboard)
    - 1 atuador para leme







Sumário

- Conceito de Fly-by-wire
- Power-by-wire
- Atuadores
- **Control Load**
- Aplicações em aeronaves civis

Control Load

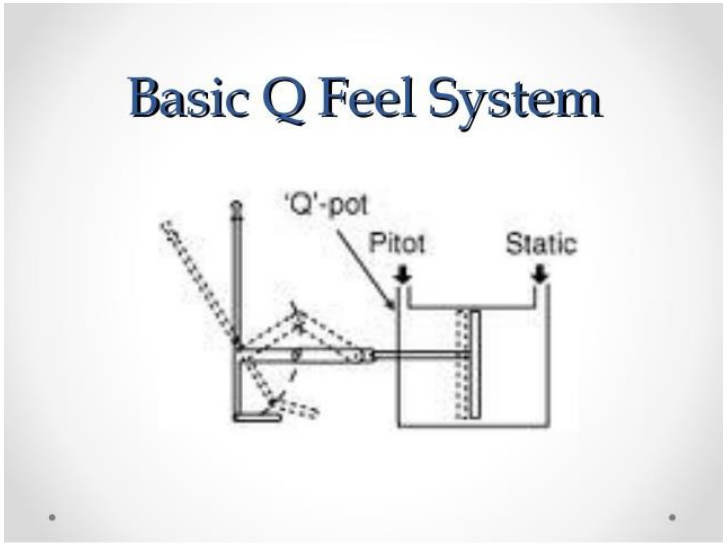
- Fornecem ao piloto a carga no comando de voo durante a pilotagem
- Também conhecido como feedback force ou artificial feel
- Dois tipos principais:
  - Spring load
  - ‘Q’ feel system

Control Load

- **Spring Load**
- Sistema de massas e molas que aumentam a carga do comando conforme aumenta o fator de carga
- Requisito “force per g”
- Cumpre requisito, mas pode não representar bem a força real nos comandos

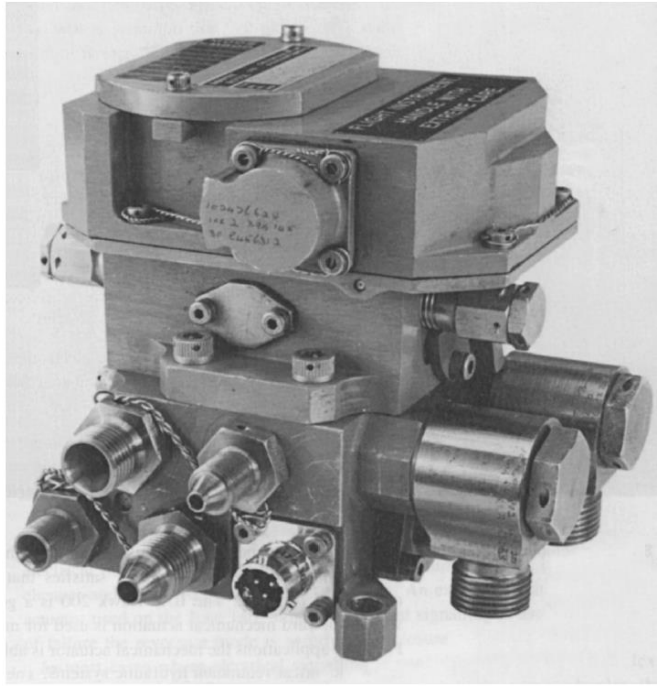
Control Load

- **‘Q’ Force System**
- Sistema que permite que a carga seja proporcional à velocidade da aeronave (carga aerodinâmica)



Control Load

- **‘Q’ Force System**
- Posteriormente surgiram sistemas eletrônicos integrados com os sensores de velocidade e altitude

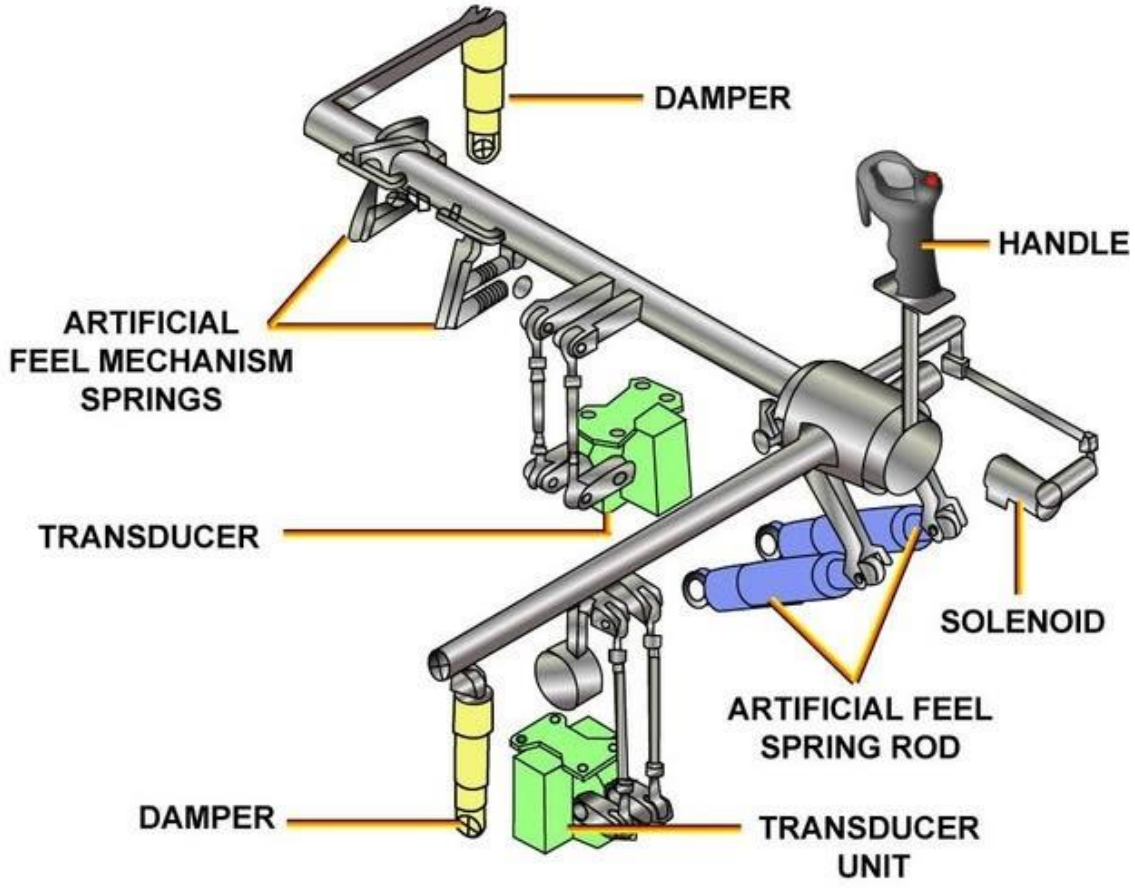


Control Load

- **‘Q’ Force System**
- Inicialmente esse tipo de sistema agregava a carga no comando por sistema hidráulico
- Posteriormente passaram a ser usados motores elétricos para desempenhar essa função, por serem mais baratos, mais leves e com resposta mais rápida

Control Load

- ‘Q’ Force System



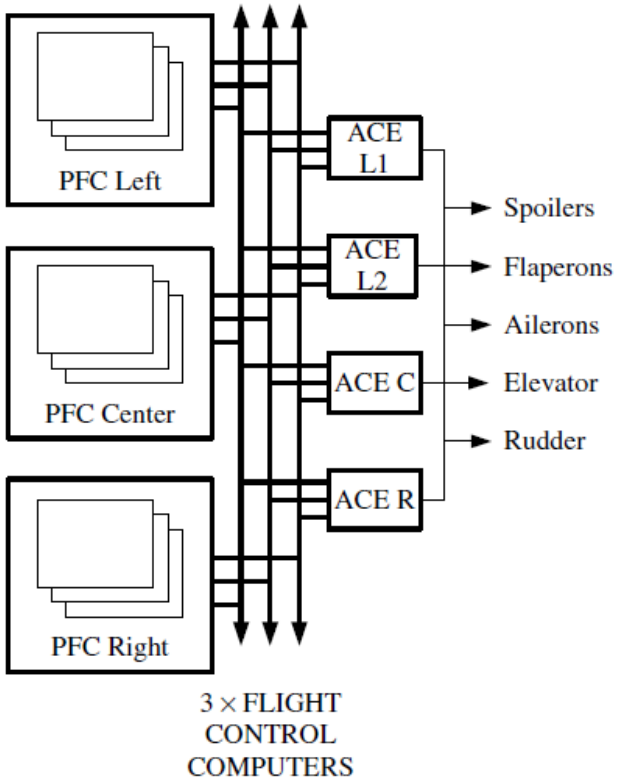
Sumário

- Conceito de Fly-by-wire
- Power-by-wire
- Atuadores
- Control Load
- **Aplicações em aeronaves civis**

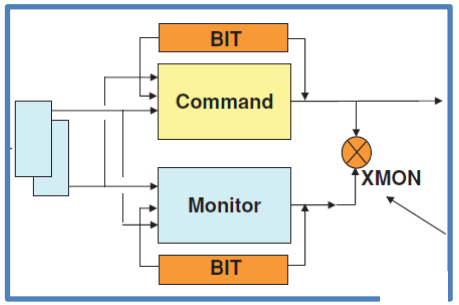
Aplicações em aeronaves civis

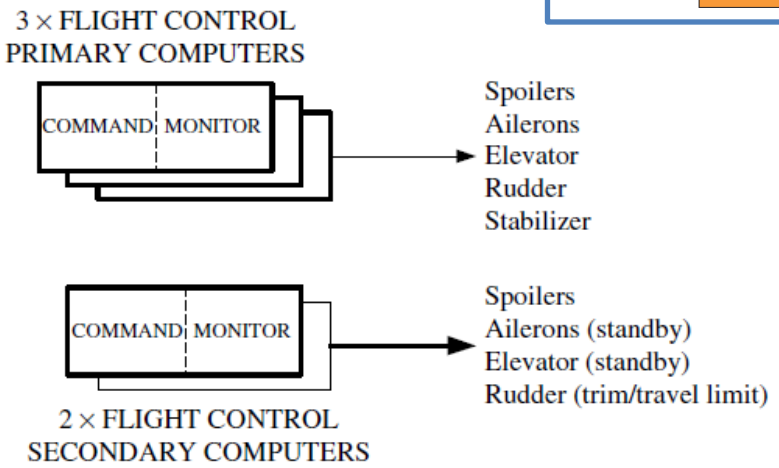
- **Comparativo: Filosofias Boeing x Airbus**

Boeing 777



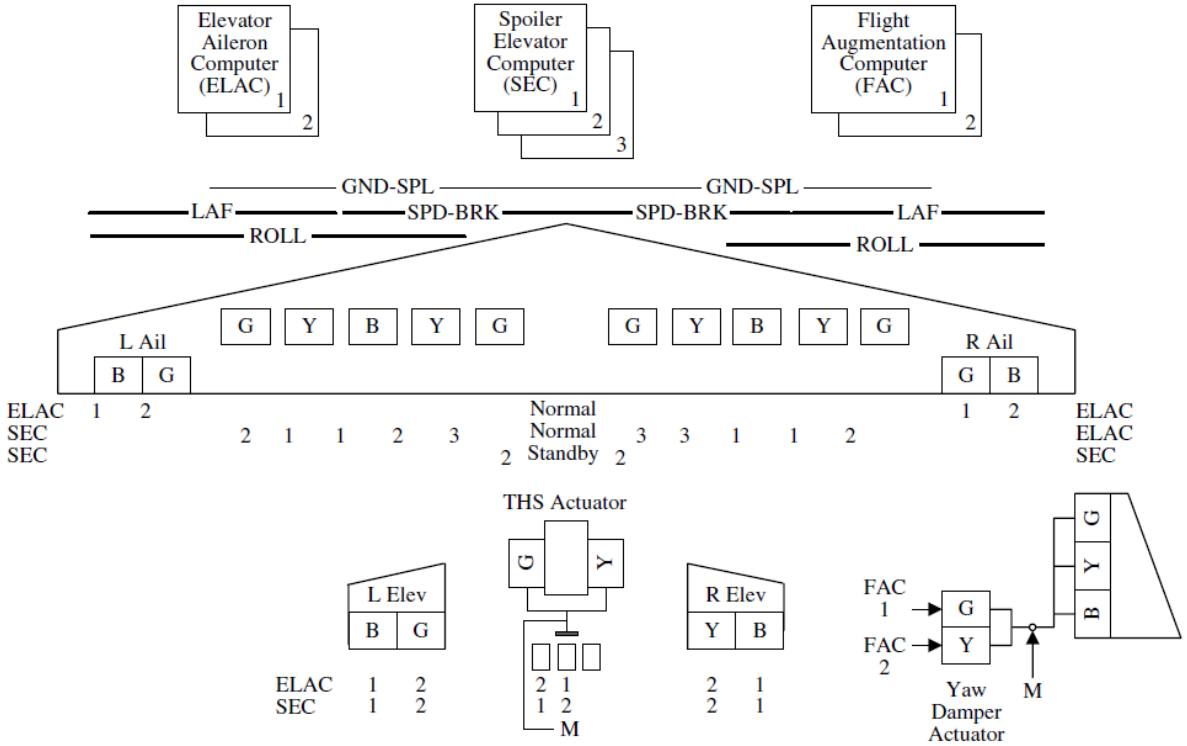
Airbus A330/340





Aplicações em aeronaves civis

- **Sistema FBW Airbus A320**



- *Electrical control:*

Elevators	2
Ailerons	2
Roll spoilers	8
Tailplane trim	1
Slats	10
Flaps	4
Speedbrakes	6
Lift dumpers	10
Trims	

- *Mechanical control*:
  Rudder
  Tailplane trim (reversionary mode)

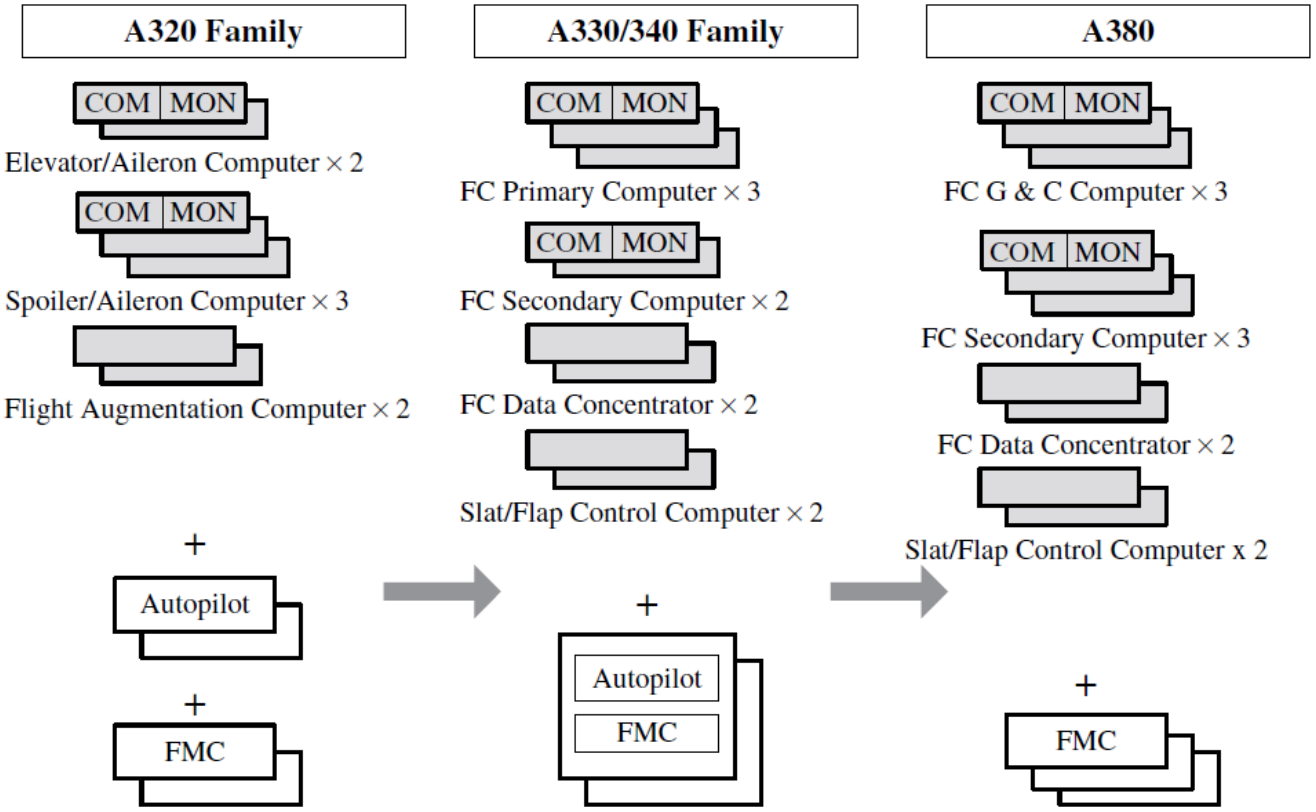
Aplicações em aeronaves civis

- **Evolução do Sistema FBW Airbus A320/330/340/380**
- As aplicações nas aeronaves seguintes da Airbus seguiram filosofia semelhante, porém com uma quantidade de componentes maior

Airbus model	*Spoilers per wing*	*Ailerons/actuators per wing*
A320 family	5	1/2
A330/340 family	6	2/4
A380	8	3/6

Aplicações em aeronaves civis

- **Evolução do Sistema FBW Airbus A320/330/340/380**
- As aplicações nas aeronaves seguintes da Airbus seguiram filosofia semelhante, porém com uma quantidade de componentes maior



Aplicações em aeronaves civis

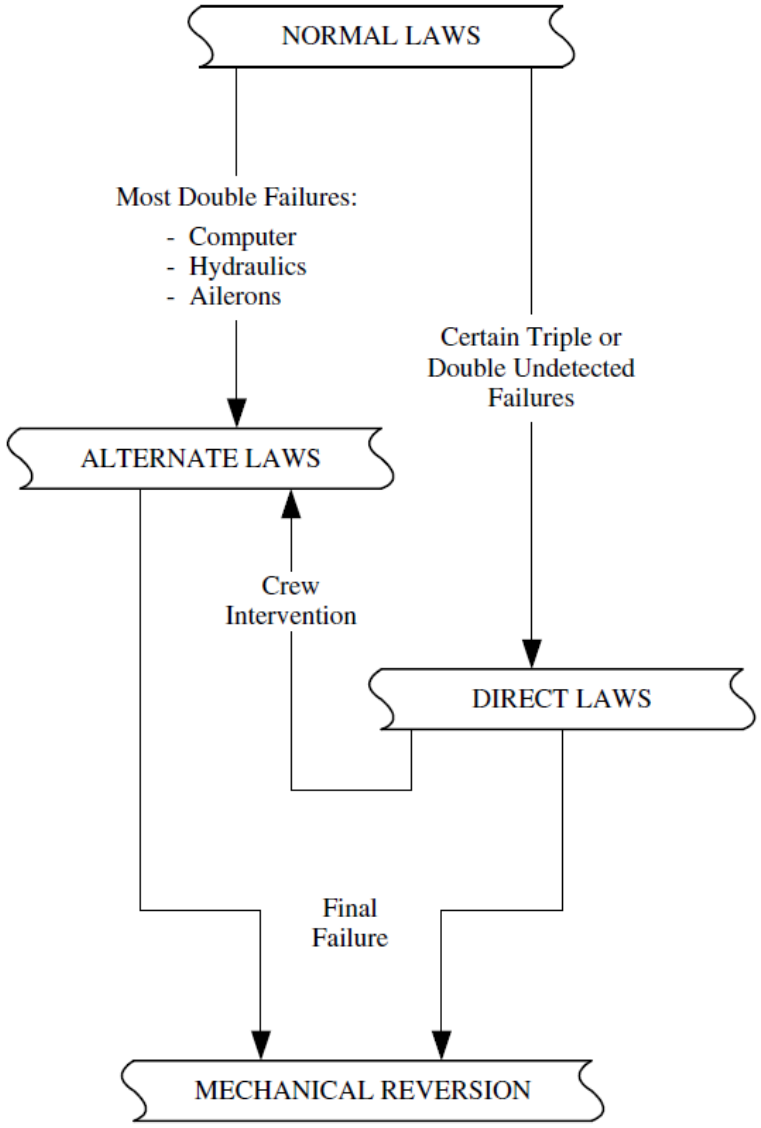
- **Leis de Controle FBW**

Normal laws: Provision of basic control laws with the addition of coordination algorithms to enhance the quality of handling and protection to avoid the exceedance of certain attitudes and attitude rates. Double failures in computing, sensors or actuation power channels will cause reversion to the Alternate mode

Alternate laws: Provision of the basic control laws but without many of the additional handling enhancement features and protection offered by the Normal mode. Further failures cause reversion to the Mechanical mode

Direct laws: Direct relationship from control stick to control surface, manual trimming, certain limitations depending upon aircraft CG and flight control system configuration. In certain specific cases crew intervention may enable re-engagement of the Alternate mode. Further failures result in reversion to Mechanical

Mechanical reversion: Rudimentary manual control of the aircraft using pitch trim and rudder pedals to facilitate recovery of the aircraft electrical system or land the aircraft as soon as is practicable



Aplicações em aeronaves civis

- **Atuação em condição de emergência**

- A grande rede de informações que abastece o piloto automático, em conjunto com as especificidades de sistemas Fly-by-Wire permite que as proteções atuem mesmo em condições fora da normalidade

- Nesses casos, há diversos modos de proteção, sendo que eles não se “desarmam” subitamente, mas gradativamente caem de modos de maneira que algumas das funcionalidades e proteções ainda estejam presentes

Aplicações em aeronaves civis

- **PA – Comparativo Boeing x Airbus**

Exemplos

Airbus

Modo normal: conta com 5 tipos de proteções

- Pitch attitude
- Load factor limitations
- Speed
- Angle of Attack (AoA)
- Bank angle

Aplicações em aeronaves civis

- **PA – Comparativo Boeing x Airbus**

Exemplos

Airbus

Modo normal

↳ Modo alternado: há 2 tipos

ALT 1: ativa-se, por exemplo, com a perda de informações de um dos tubos de pitot

- Pitch attitude
- Load factor limitations
- Speed
- Angle of Attack (AoA)
- Bank angle

ALT 2: ativa-se, por exemplo, na ocasião de falha de todos os motores

- Pitch attitude
- Load factor limitations
- Speed
- Angle of Attack (AoA)
- Bank angle

As funções podem não ser completamente perdidas, mas ficam limitadas

Aplicações em aeronaves civis

- **PA – Comparativo Boeing x Airbus**

Exemplos

Airbus

Modo normal → Modo alternado → Modo direto

- o sidestick e os pedais passam a atuar diretamente nas superficies
- todas as proteções são perdidas *
- ativa-se, por exemplo, na ocasião de falha de todas as unidades de referência inerciais

* Mais precisamente, as superfiícies de controle ainda podem ter suas deflexões máximas limitadas a depender da condição de CG da aeronave

Aplicações em aeronaves civis

- **PA – Comparativo Boeing x Airbus**

Exemplos

Airbus

Modo normal

→ Modo alternado

→ Modo direto

→ Modo mecânico: ligações físicas (cabos e polias) passam a controlar as superficies **

** Algumas aeronaves, como o A350, já não contam com esse modo

Aplicações em aeronaves civis

- **PA – Comparativo Boeing x Airbus**

Exemplos

Boeing

Modo normal: proteções	• Pitch attitude • Speed (low and high) • Angle of Attack (AoA) • Bank angle • Turn compensation • Stability augmentation • Thrust asymmetry compensation

Aplicações em aeronaves civis

- **PA – Comparativo Boeing x Airbus**

Exemplos

Boeing

Modo normal

↳ Modo secundário
- similar ao modo alternate da Airbus
- nem todas as proteções ficam disponíveis
- ocorre, por exemplo, na ocasião de dados inerciais duvidosos

Aplicações em aeronaves civis

- **PA – Comparativo Boeing x Airbus**

Exemplos

Boeing

Modo normal

↳ Modo secundário

↳ Modo direto: os comandos do piloto não são mais processados por computadores, portanto, “o que o piloto comandar, o avião faz”

Aplicações em aeronaves civis

- **PA – Comparativo Boeing x Airbus**

Exemplos

Boeing

Modo normal

↳ Modo secundário

↳ Modo direto

↳ Modo mecânico: ligações físicas entre dispositivos de commando e superfícies de controle

Aplicações em aeronaves civis

- **Airbus A380**

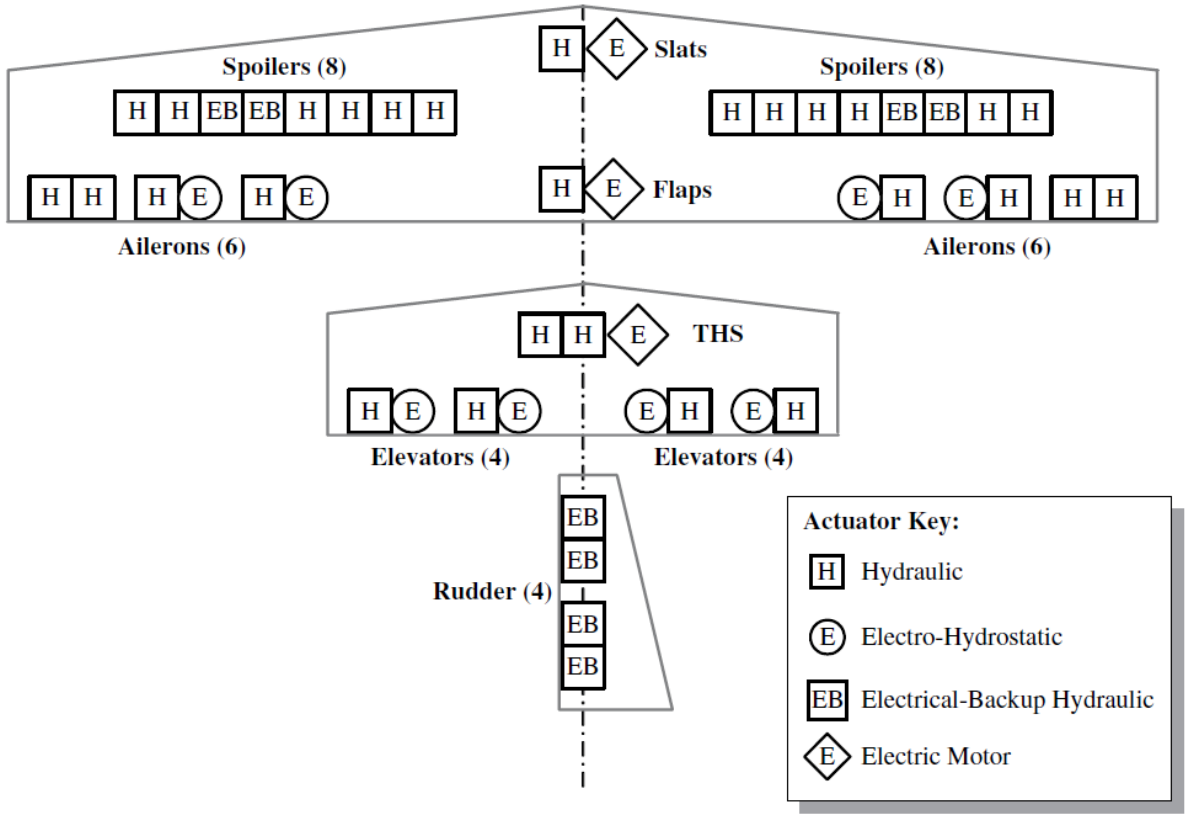
LEFT WING						RIGHT WING			
AILERONS		SPOILERS			SPOILERS		AILERONS	
Inbd	G AC E2	1	Y		Y	1	G AC E2	Inbd
Mid	Y AC E1	2	G		G	2	Y AC E1	Mid
Outbd	Y G	3	Y		Y	3	Y G	Outbd
		4	G		G	4		
		5	Y + AC 2E		Y + AC 2E	5		
		6	G + AC 1E		G + AC 1E	6		
		7	Y		Y	7		
		8	G		G	8		
R ELEVATORS				THS			L ELEVATORS	
Inbd	AC E1 G			G Y AC E2			AC E1 Y	Inbd
Outbd	AC E2 G						AC E2 Y	Outbd
				RUDDER				
				Upper 1 Y + AC E1 2 G + AC E2 Lower 1 G + AC E1 2 Y + AC E3				

KEY:

G	Green Hydraulic System	AC E1	AC 1 Essential Side 1
Y	Yellow Hydraulic System	AC E2	AC 2 Essential Side 2
		AC E3	AC Essential (RAT)

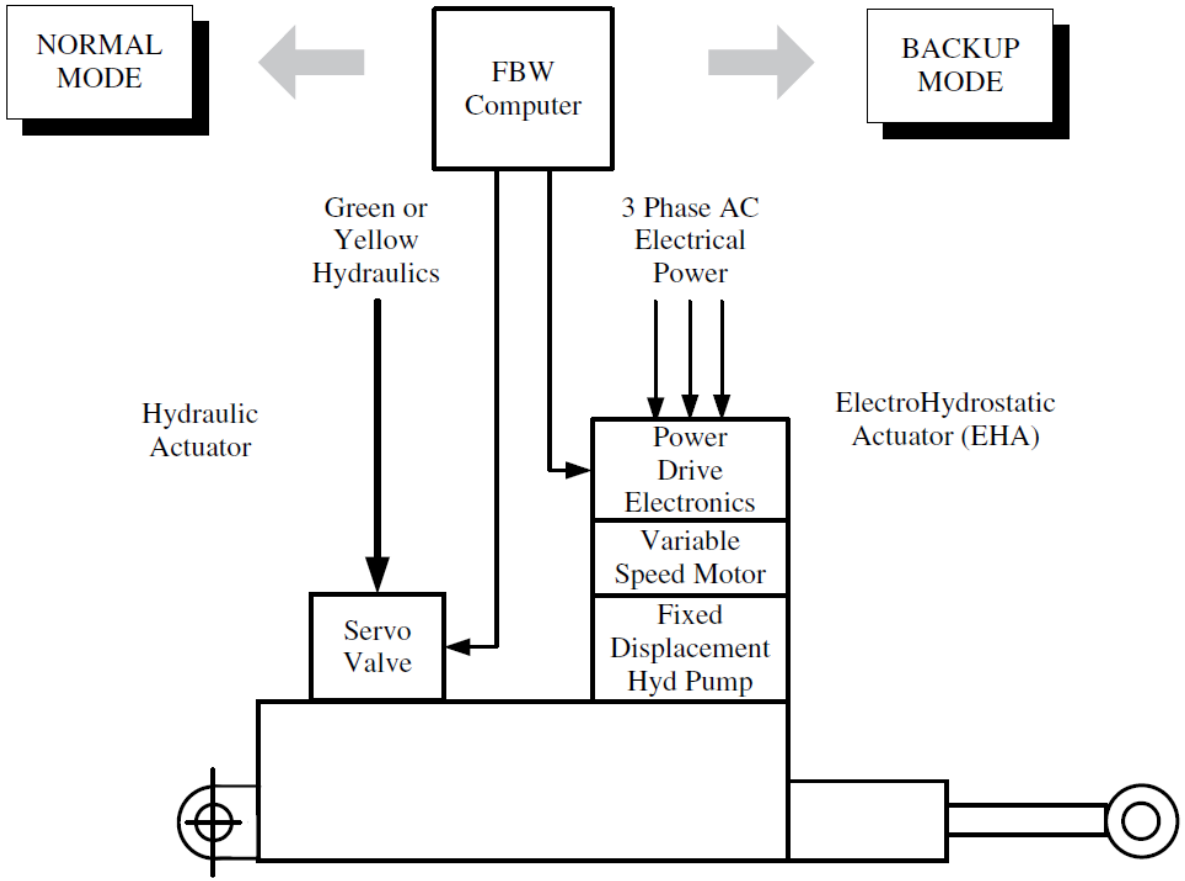
Aplicações em aeronaves civis

- Airbus A380



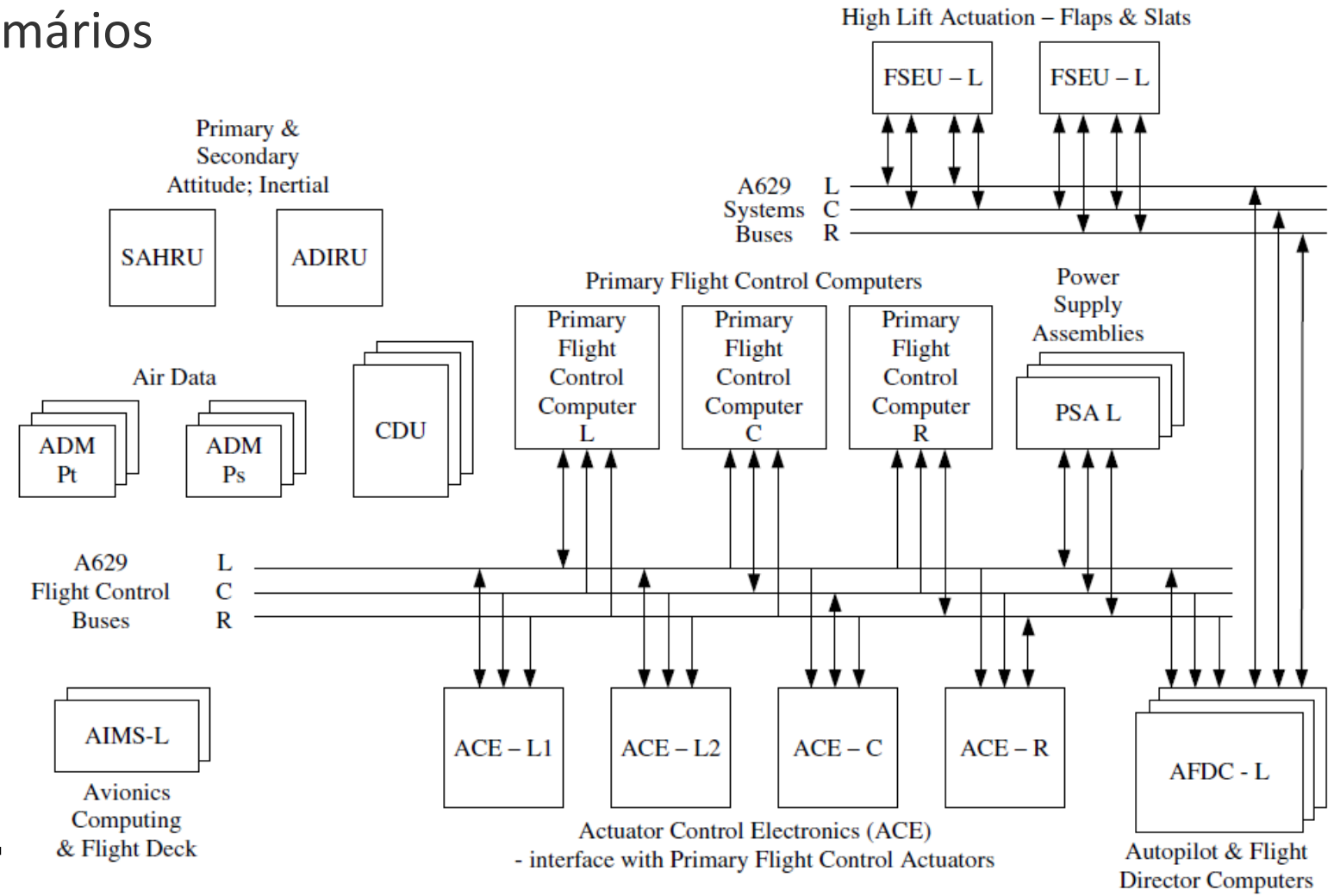
Aplicações em aeronaves civis

- **Airbus A380**



Aplicações em aeronaves civis

- **Boeing 777**
- Comandos primários



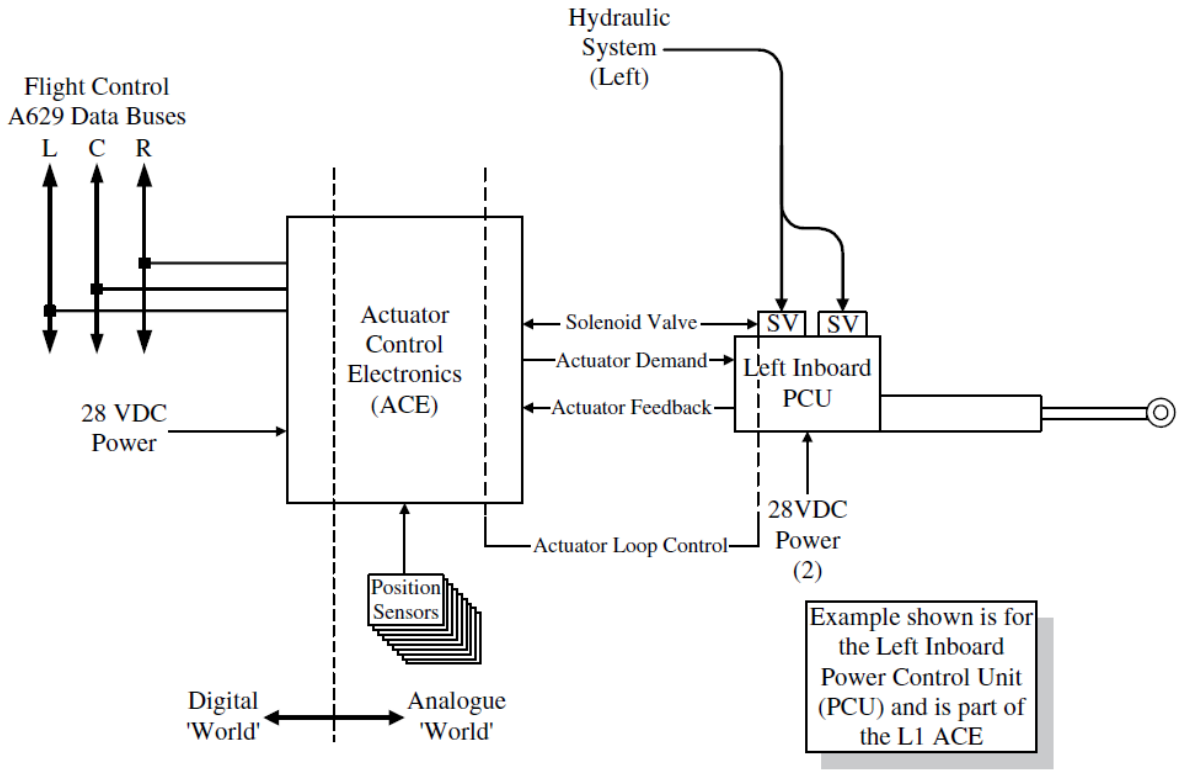
Aplicações em aeronaves civis

- **Boeing 777**
- Comandos primários

ACE L1	*ACE L2*	*ACE C*	*ACE R*
ROB Aileron LOB Aileron	LOB Aileron RIB Aileron	LIB Aileron ROB Aileron Upper Rudder	RIB Aileron LIB Aileron Lower Rudder
LIB Elevator	LOB Elevator L Elevator Feel	ROB Elevator R Elevator Feel	RIB Elevator
Spoiler 2 Spoiler 13	Spoiler 5 Spoiler 4 Spoiler 11 Spoiler 10	Spoiler 1 Spoiler 7 Spoiler 8 Spoiler 14	Spoiler 3 Spoiler 6 Spoiler 9 Spoiler 12

Aplicações em aeronaves civis

- **Boeing 777**
- Controle eletrônico dos atuadores (ACE)



Aplicações em aeronaves civis

- **Segregação**
- Relação entre Comandos de Voo, Guiagem e Gerenciamento de Voo

