



SAA0187

Sistemas Aeronáuticos de Acionamento

Comandos Fly-by-wire

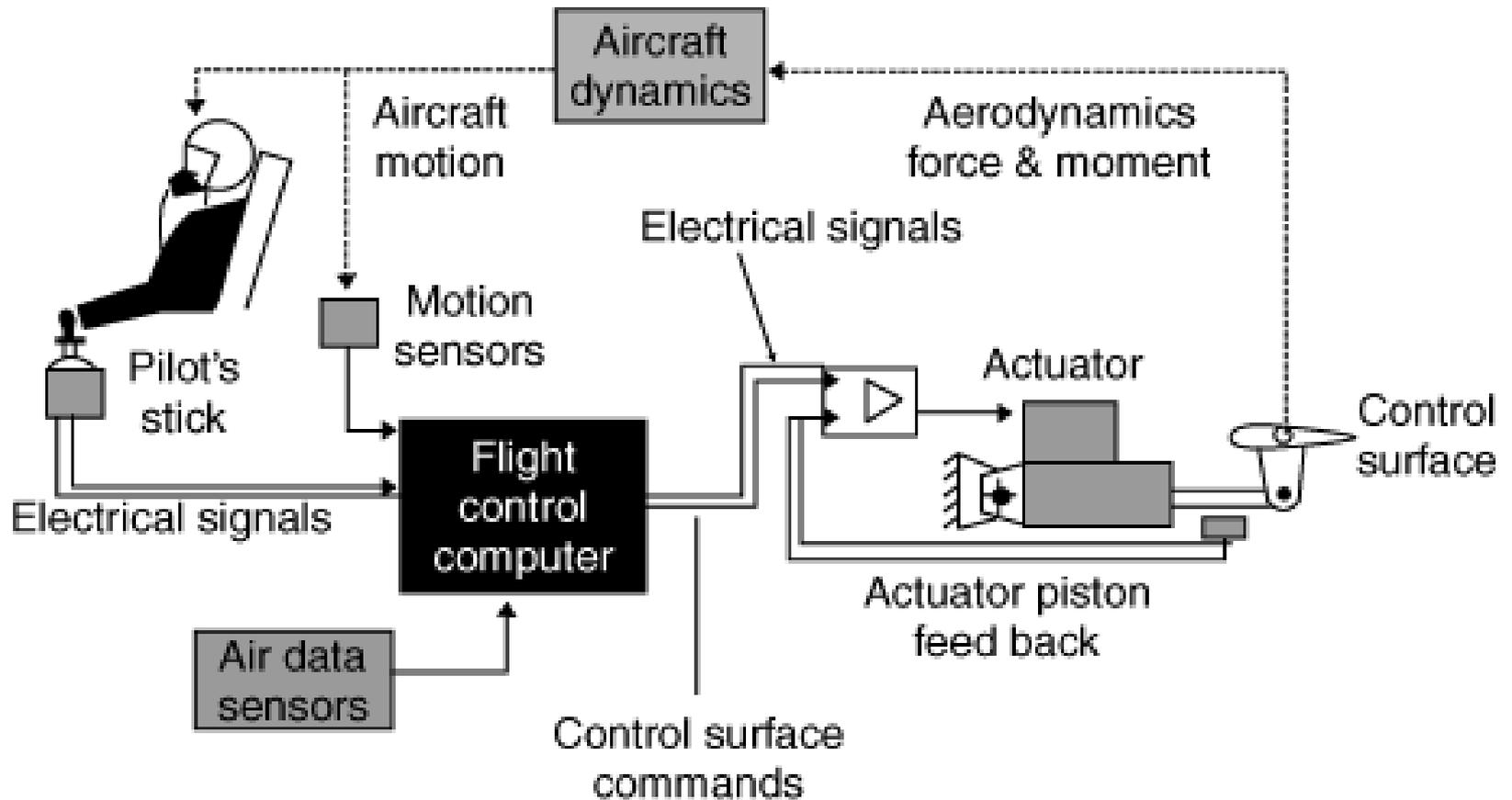
Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto
jhbidi@sc.usp.br

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

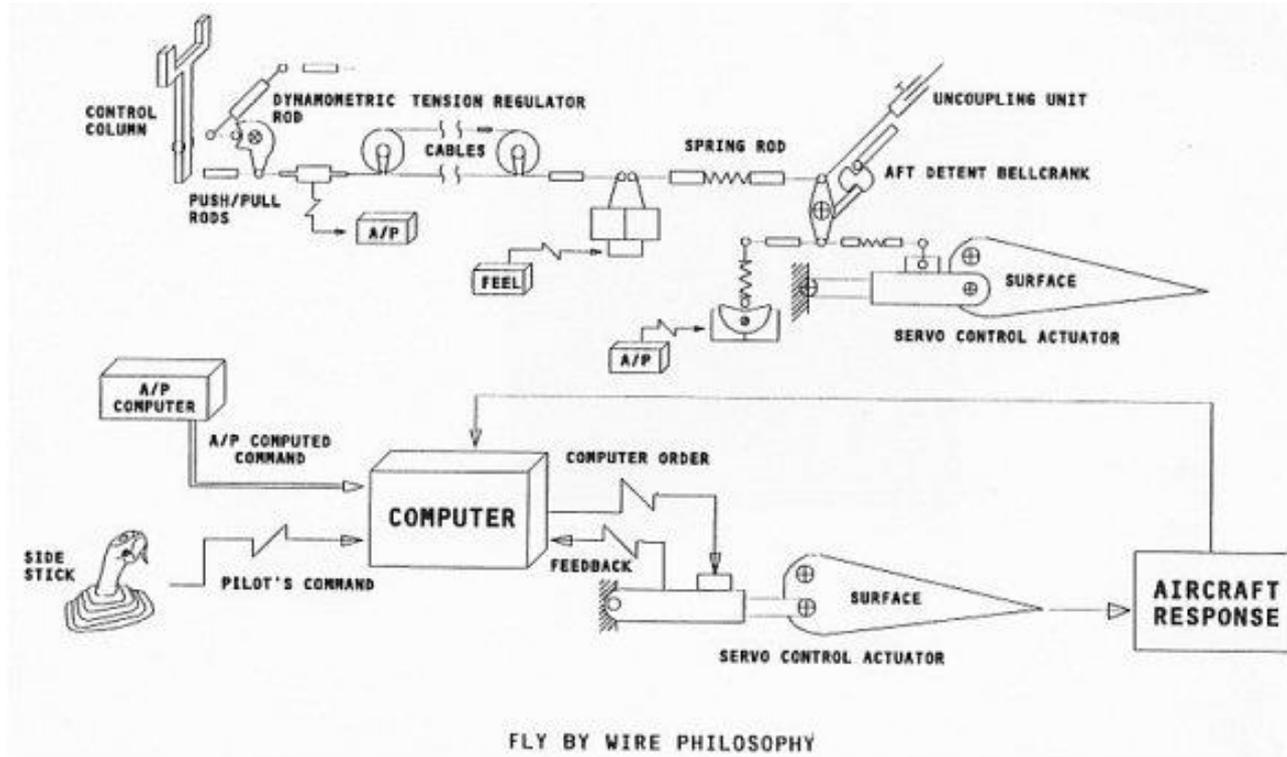
- **Conceito de Fly-by-wire**
- Power-by-wire
- Atuadores
- Control load
- Aplicações em aeronaves civis

- 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



- Comparativo:



- 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!

- Exemplos:
 - Analogic Fly-by-wire



- Exemplos:
 - Digital Fly-by-wire

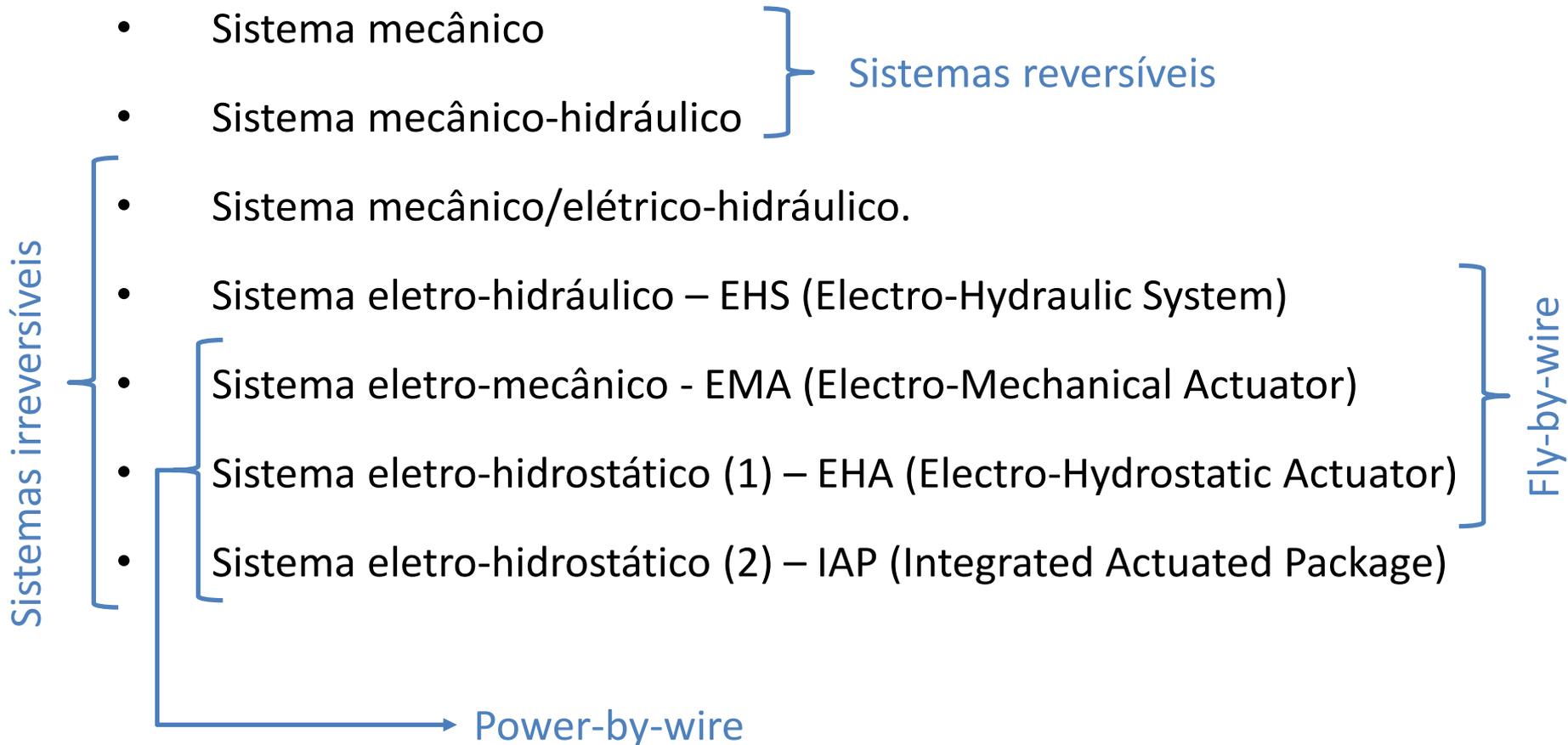


- Conceito de Fly-by-wire
- Power-by-wire
- Atuadores
- Control load
- Aplicações em aeronaves civis

- 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).

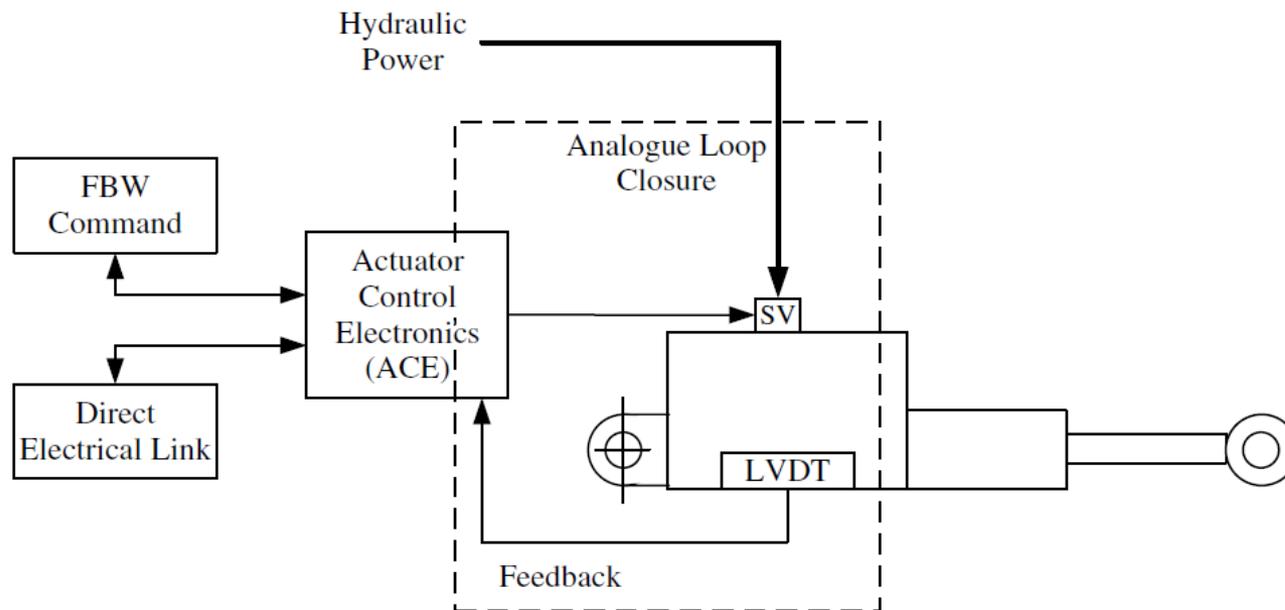
- Conceito de Fly-by-wire
- Power-by-wire
- **Atuadores**
- Control load
- Aplicações em aeronaves civis

Diversas configurações e graus de complexidade:



- **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

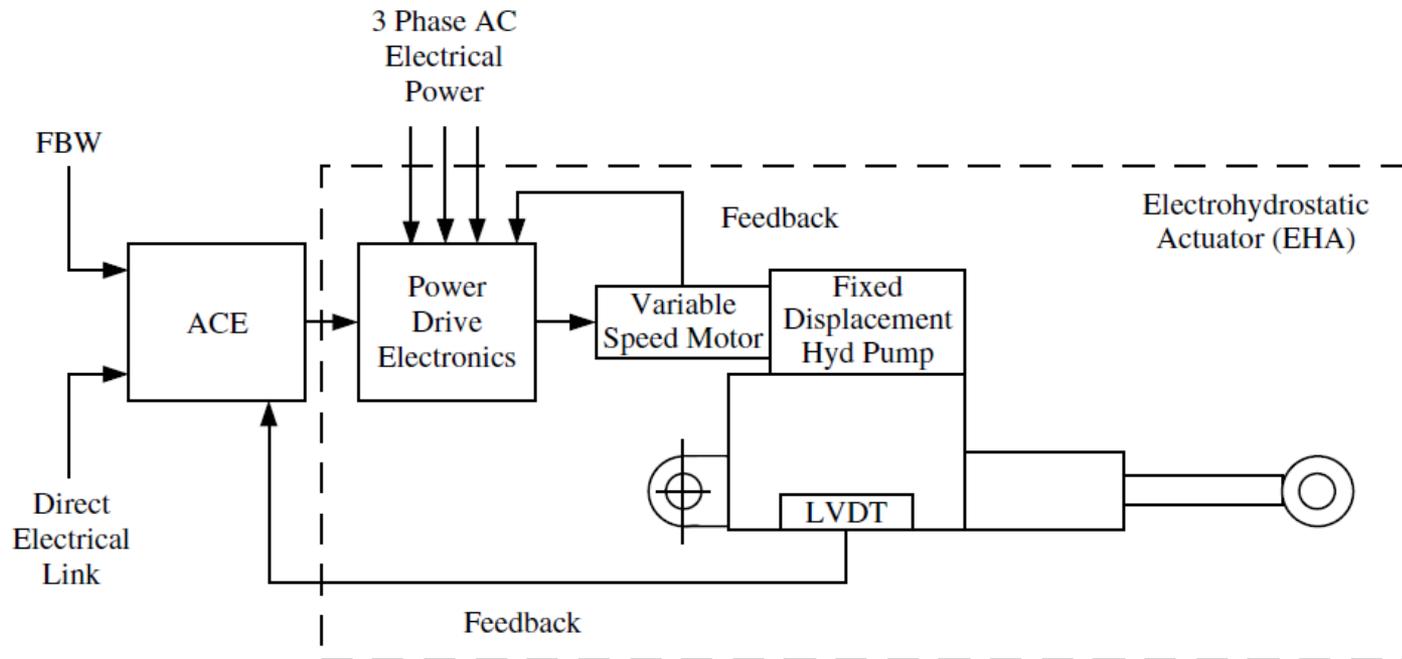


- **Atuador Eletro-hidráulico (EHS)**
 - Integração entre FBW e IAP
 - Estado-da-arte em atuadores
 - Usado para atuadores de aeronaves com grande carga aerodinâmica, como F-35, Airbus A380, etc., além de drones e aeronaves autônomas



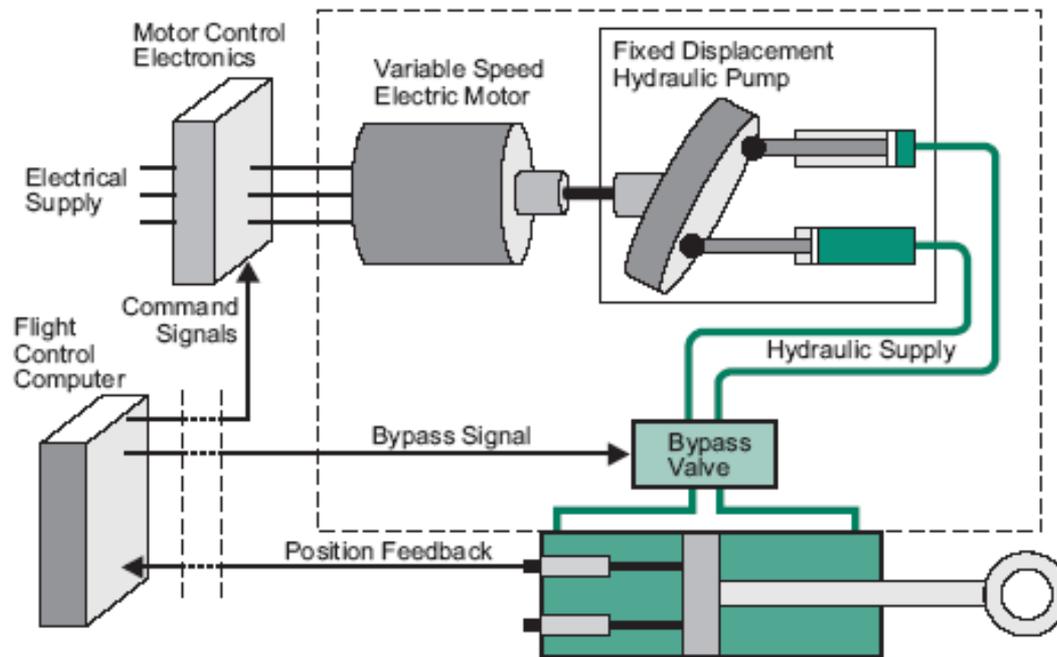
- **Atuador Eletro-hidrostático (EHA)**

- Alimentação em 270 VDC ou 540 VDC
- A integração com sinais elétricos permite sua utilização em sistemas FBW e integração com barramentos aviônicos



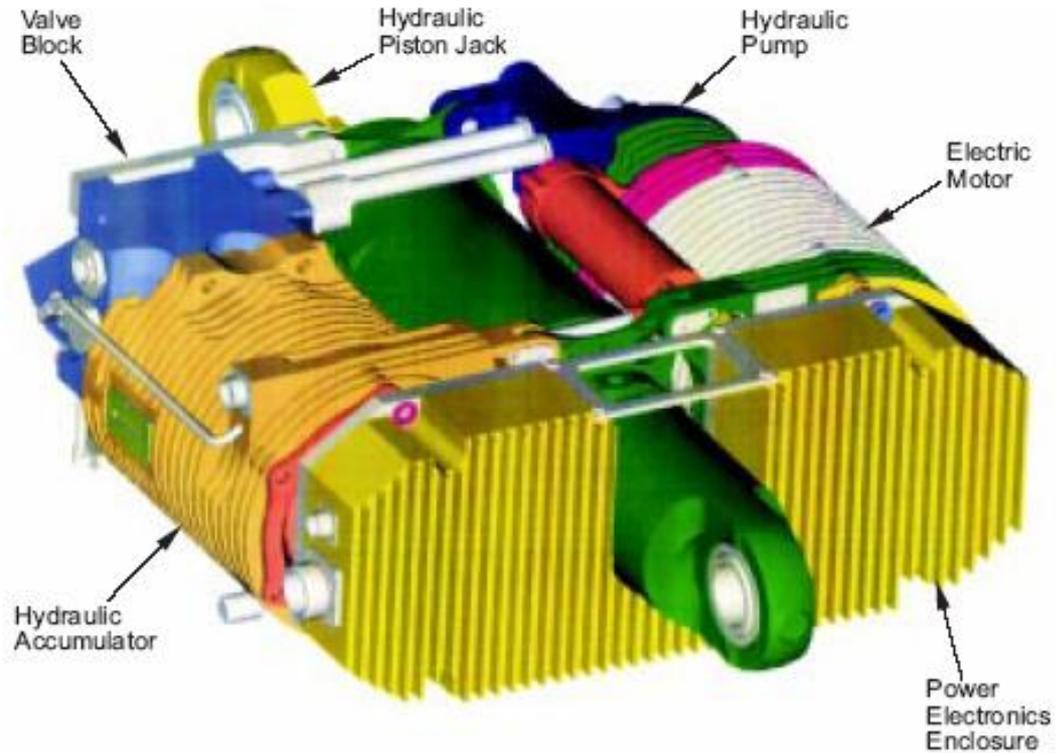
- **Atuador Eletro-hidrostático (EHA)**

- Interpõe um sistema hidráulico em escala reduzida entre o motor elétrico e o atuador.

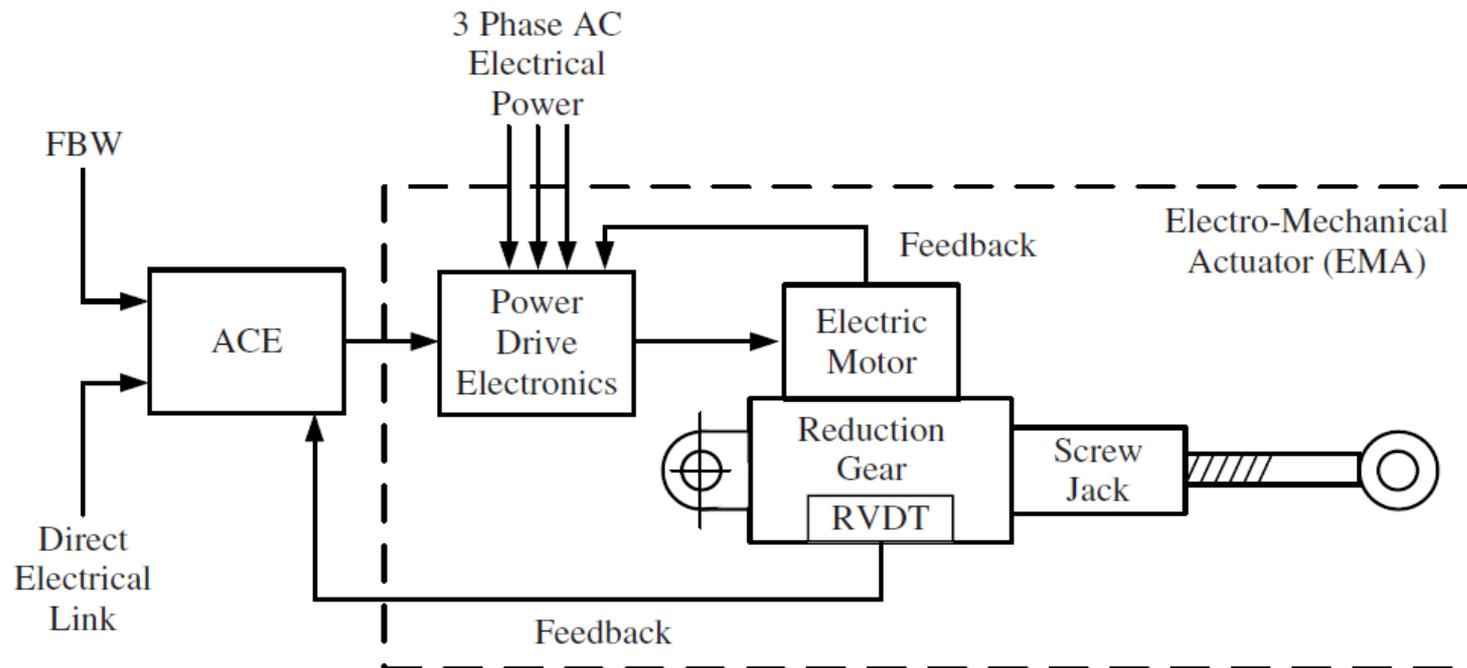


- Motor elétrico do tipo brushless, de velocidade variável e bi-direcional transforma energia elétrica em mecânica.
- A energia mecânica é usada para acionar uma bomba hidráulica de deslocamento fixo.

- Atuador Eletro-hidrostático (EHA)

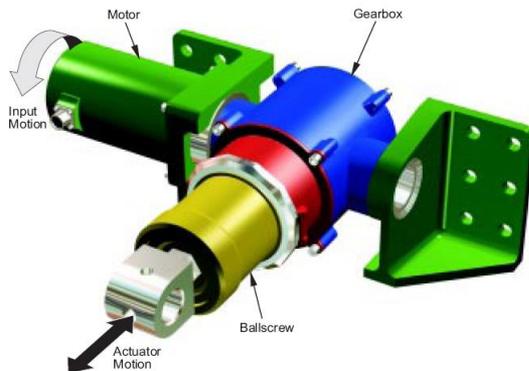
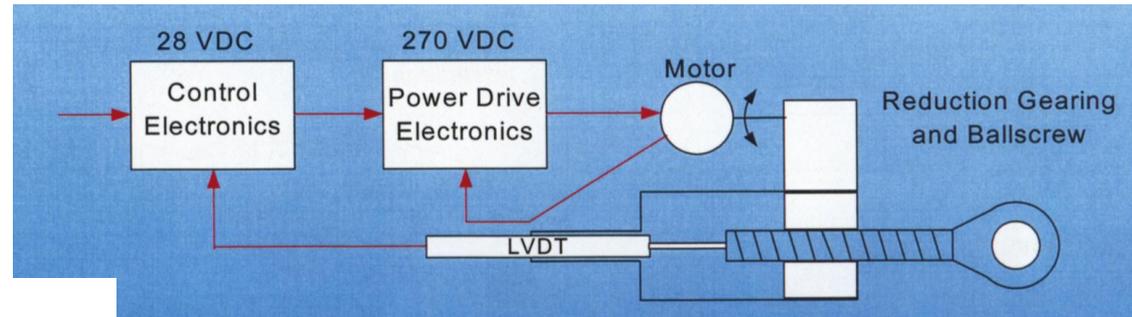


- **Atuador Eletro-mecânico (EMA)**
 - Correspondente EHA para atuadores de parafuso
 - Portanto mais aplicáveis a flapes, slats, etc.



- **Atuador Eletro-mecânico (EMA)**

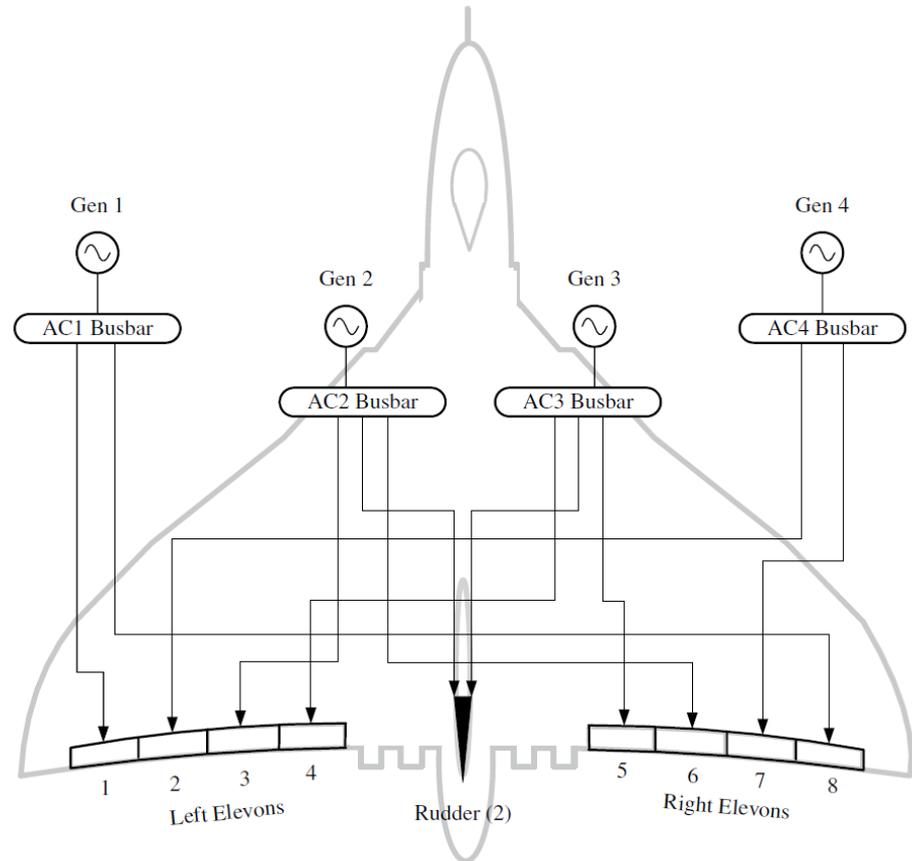
- Utiliza um motor elétrico para fazer o acionamento da superfície de controle.



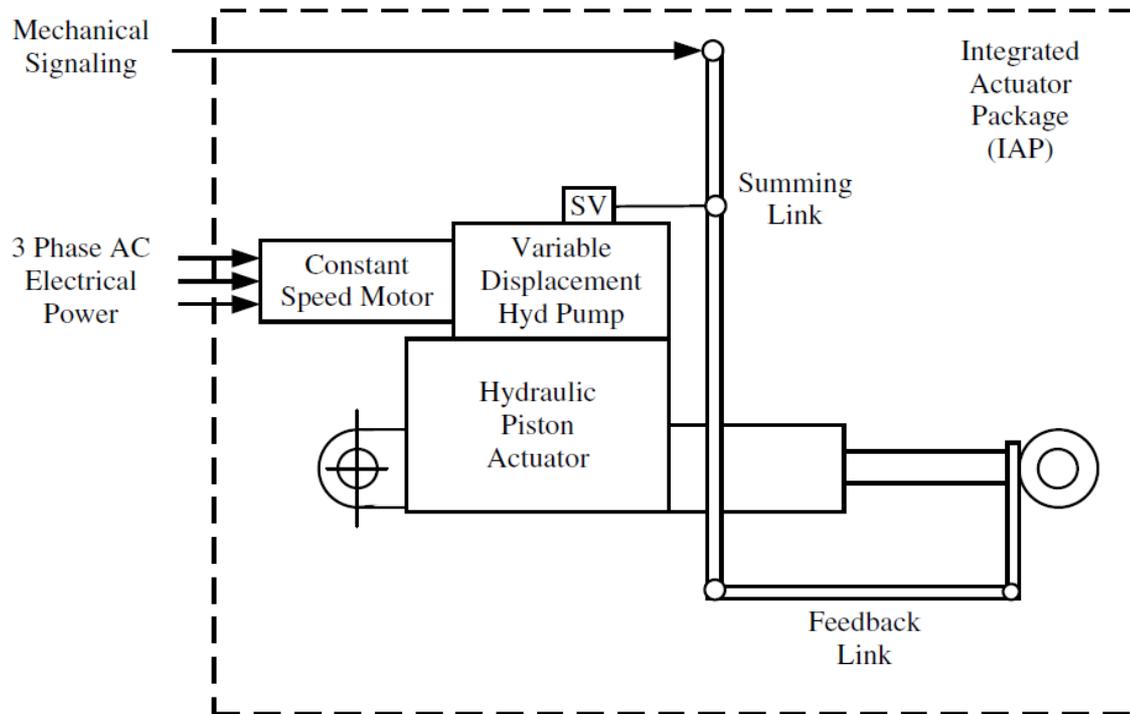
- Acoplamentos de engrenagens realizam a redução da rotação.
- No caso de movimento linear utiliza-se fusos rolamentados.

- **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

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

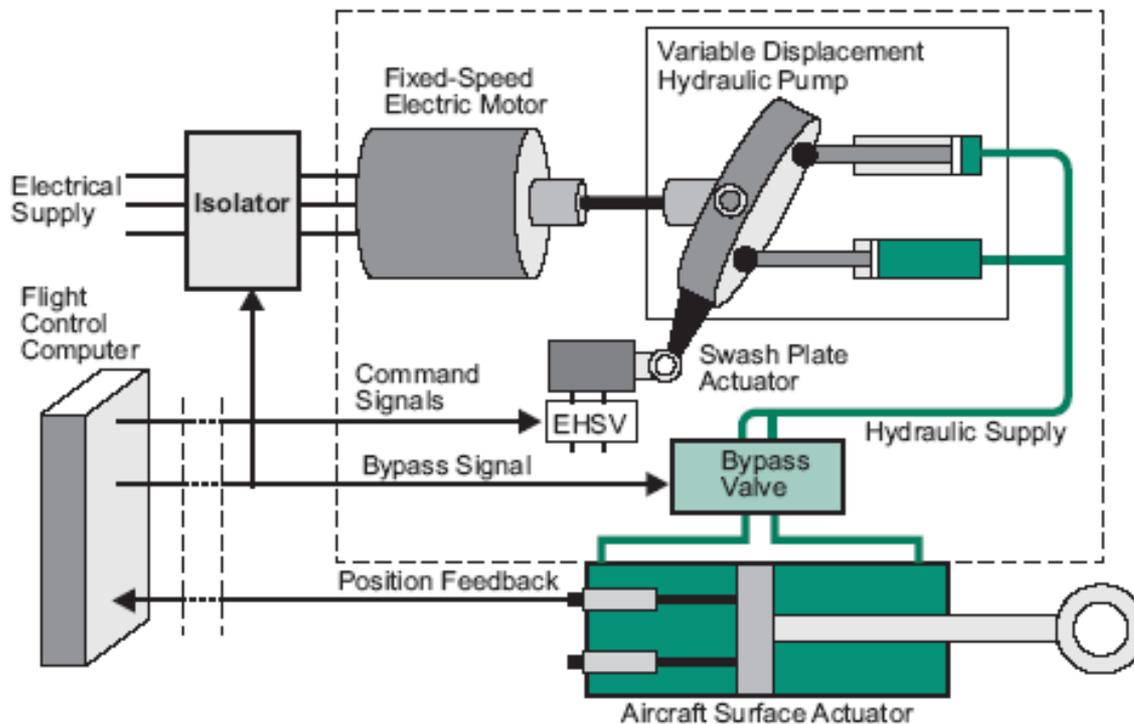


- **Atuador integrado IAP (IAP – Integrated Actuator Package)**
 - O próprio atuador possui seu reservatório hidráulico, e sua bomba, que pressuriza o sistema e gera o movimento



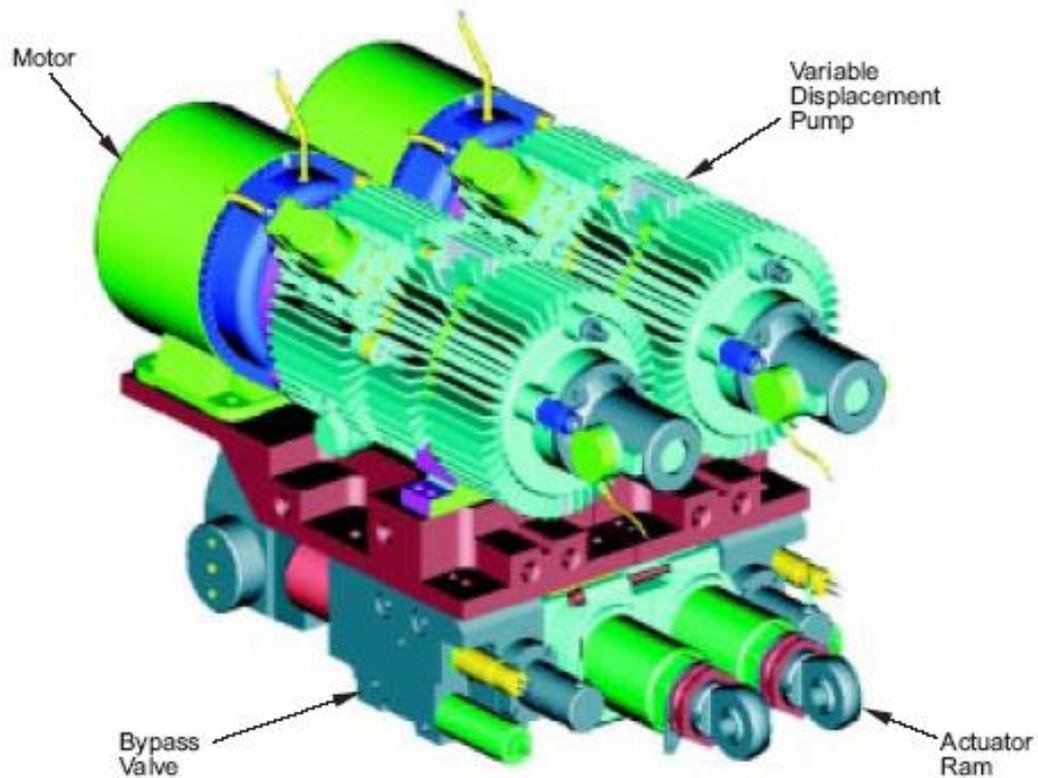
- **Atuador integrado IAP (IAP – Integrated Actuator Package)**

- 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.

- Atuador integrado IAP (IAP – Integrated Actuator Package)

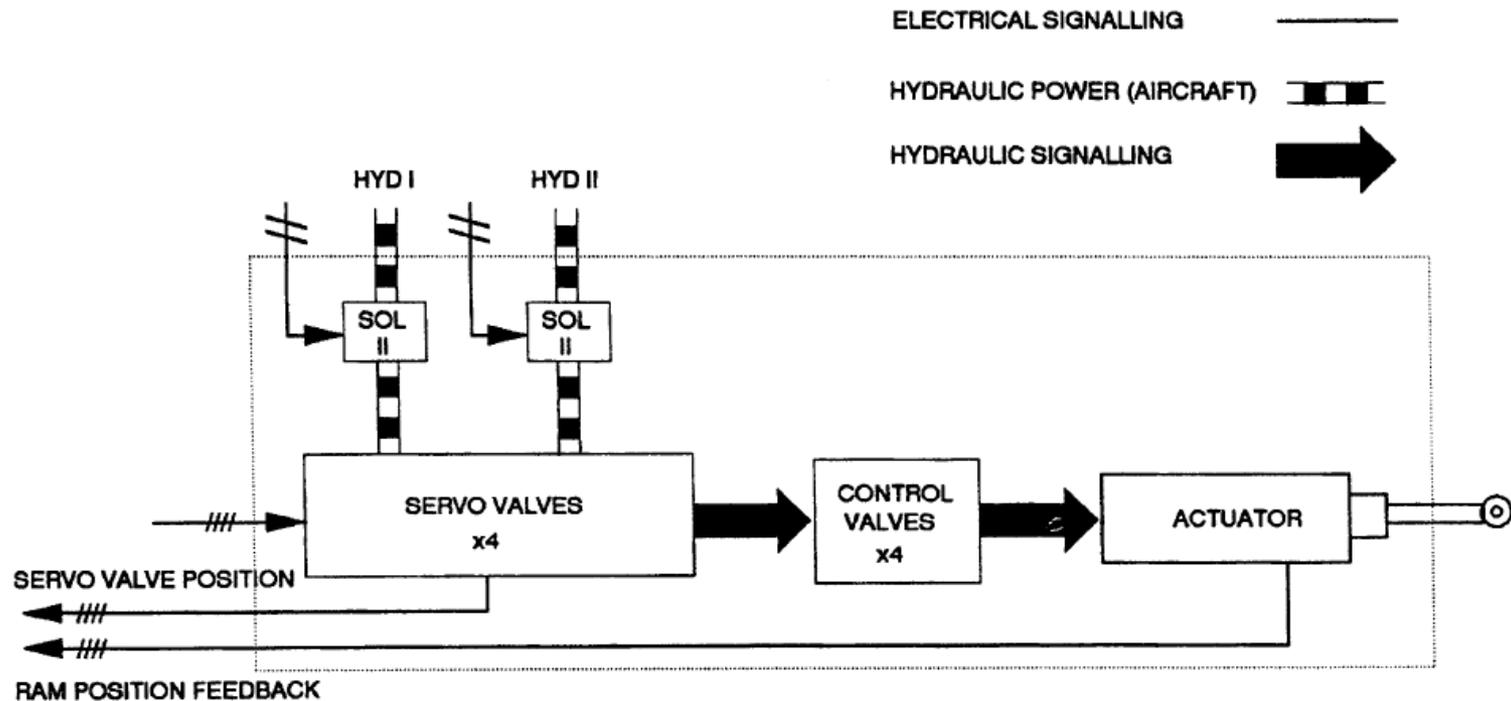


- Aplicações

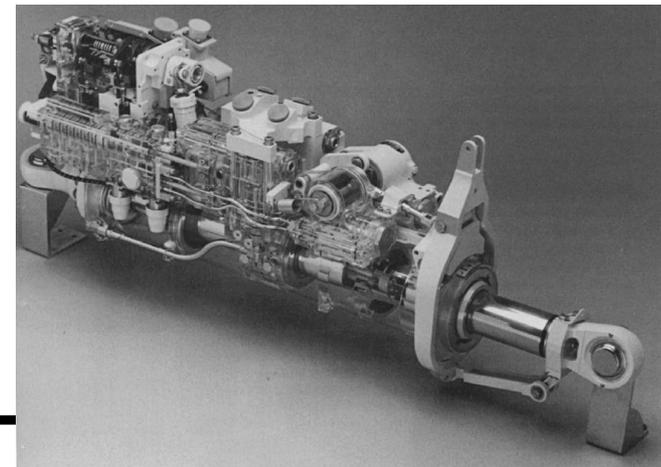
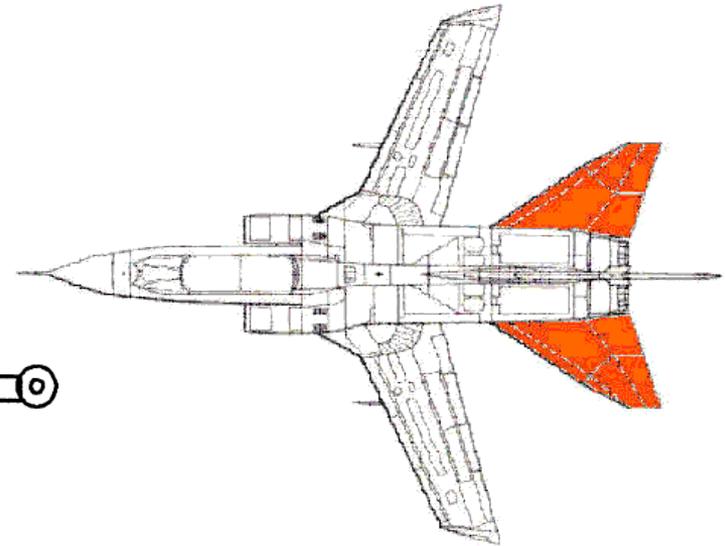
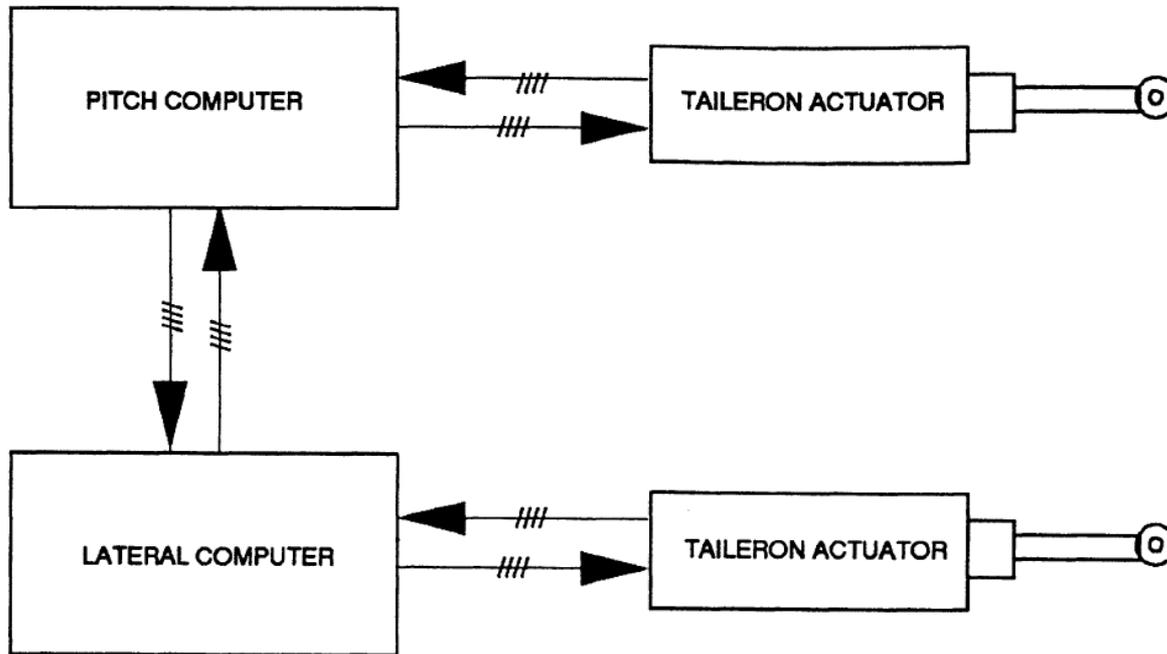
<i>Actuator type</i>	<i>Power source</i>	<i>Primary flight control</i>	<i>Spoilers</i>	<i>Tailplane horizontal stabilator</i>	<i>Flaps and slats</i>
Conventional Linear Actuator	Aircraft Hydraulic Systems: B/Y/G or L/C/R [1]	X	X		
Conventional Screw-jack Actuator	Aircraft Hydraulic or Electrical Systems [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

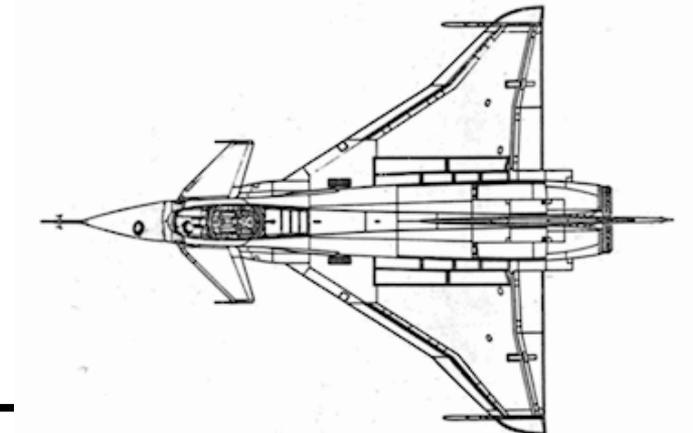
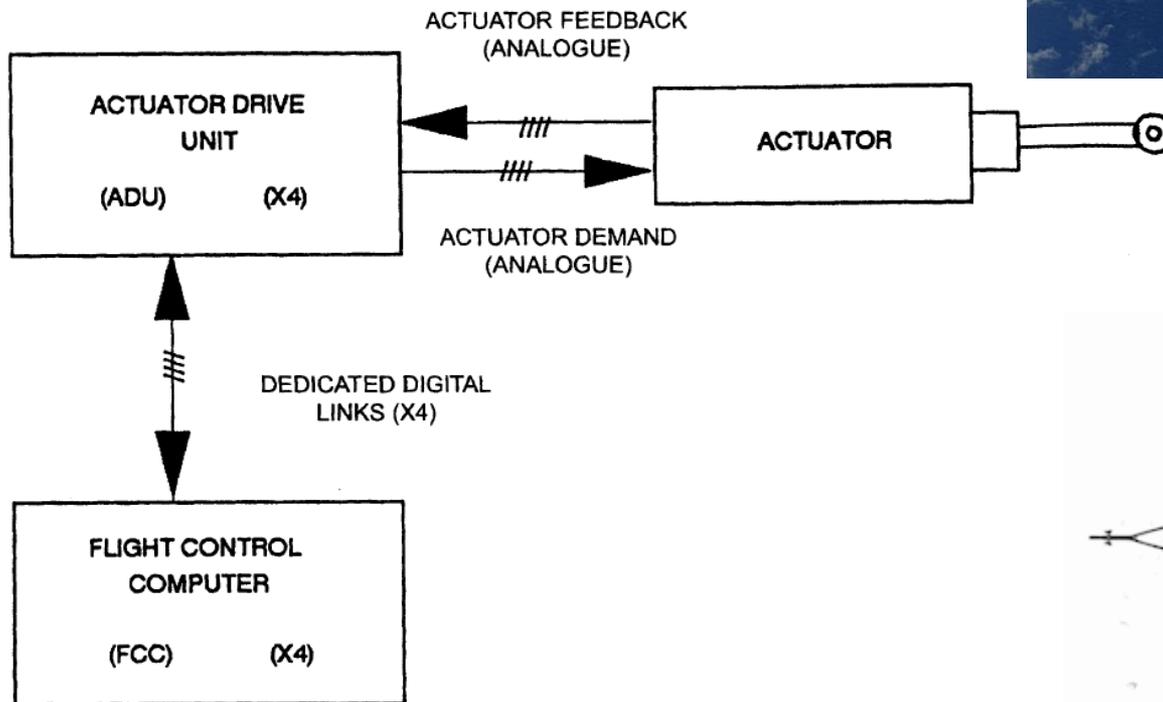
- Redundância



- Redundância
 - Exemplo: Tornado



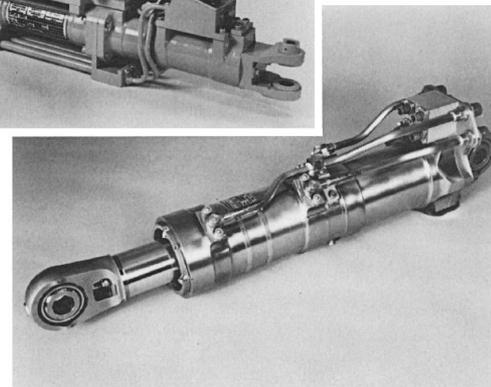
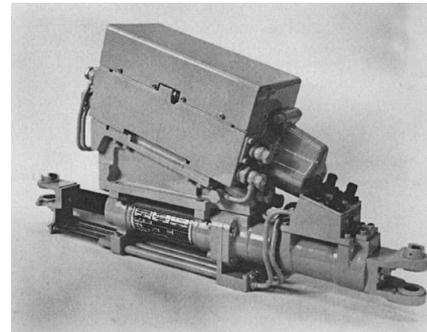
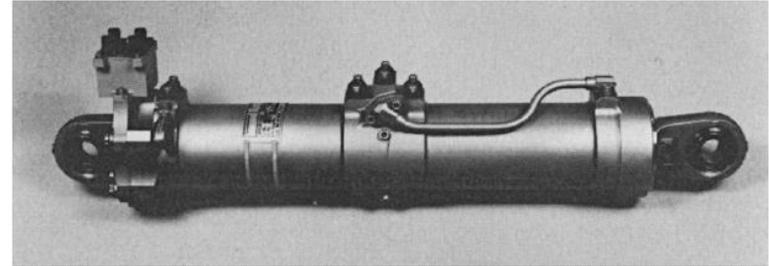
- Redundância
 - Exemplo: EAP



- Redundância

- Exemplo: EAP

- Atuadores quadruplexados
- 2 atuadores para canard
- 2 atuadores para cada flaperon (inboard e outboard)
- 1 atuador para leme

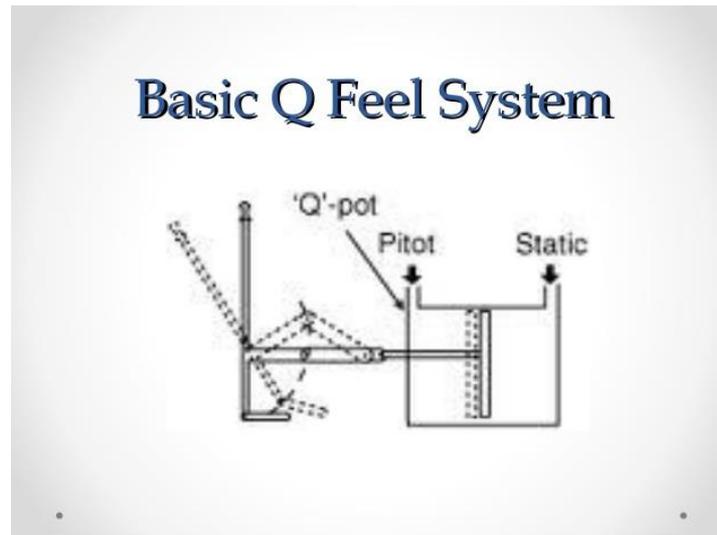


- Conceito de Fly-by-wire
- Power-by-wire
- Atuadores
- **Control load**
- Aplicações em aeronaves civis

- 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

- **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

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



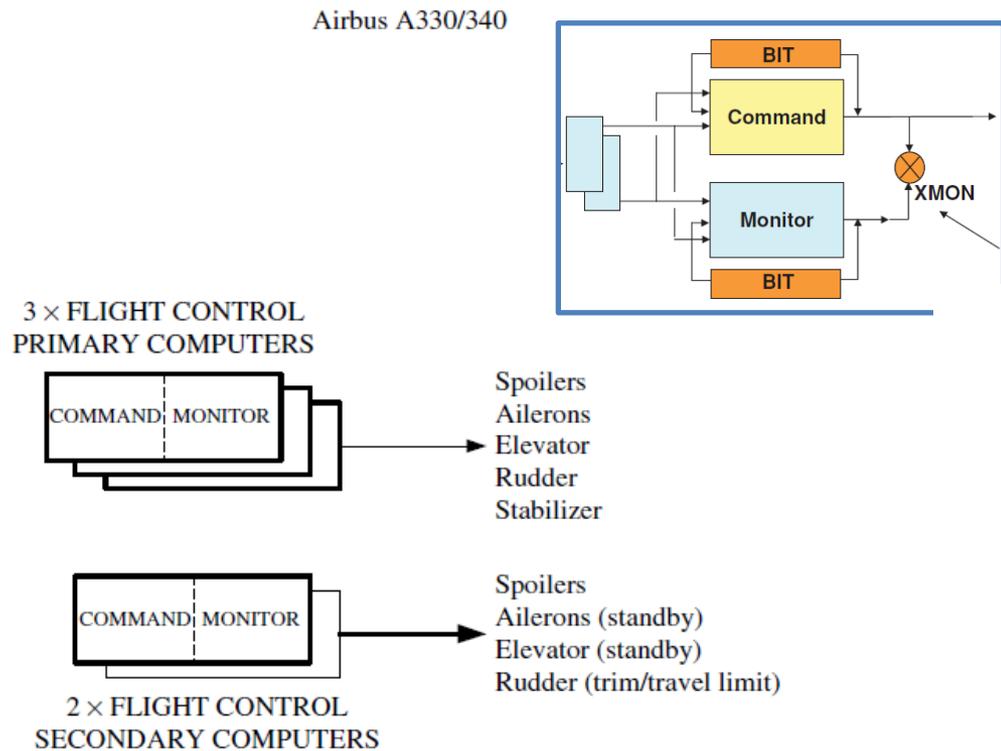
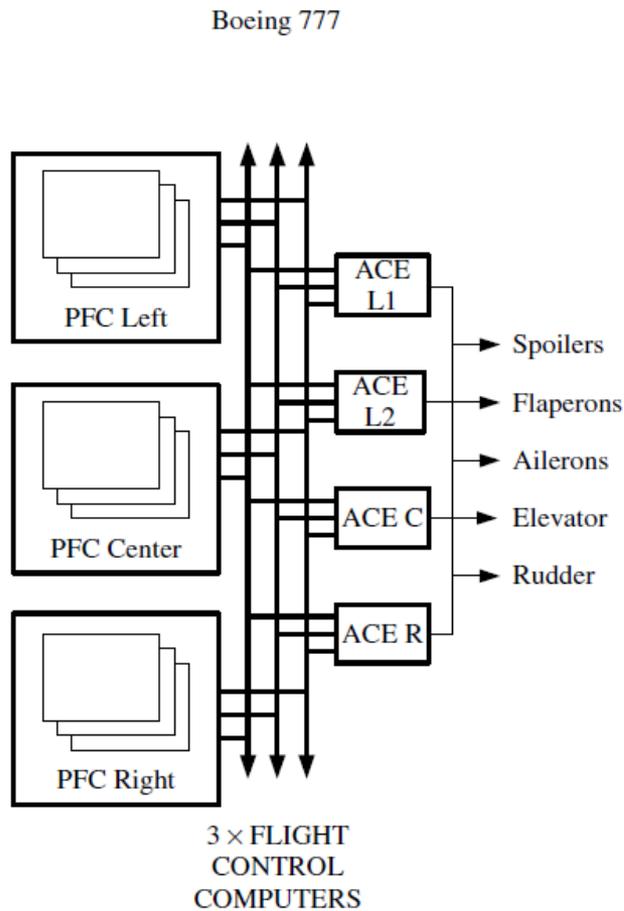
- 'Q' Force System
- Posteriormente surgiram sistemas eletrônicos integrados com os sensores de velocidade e altitude



- **‘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

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

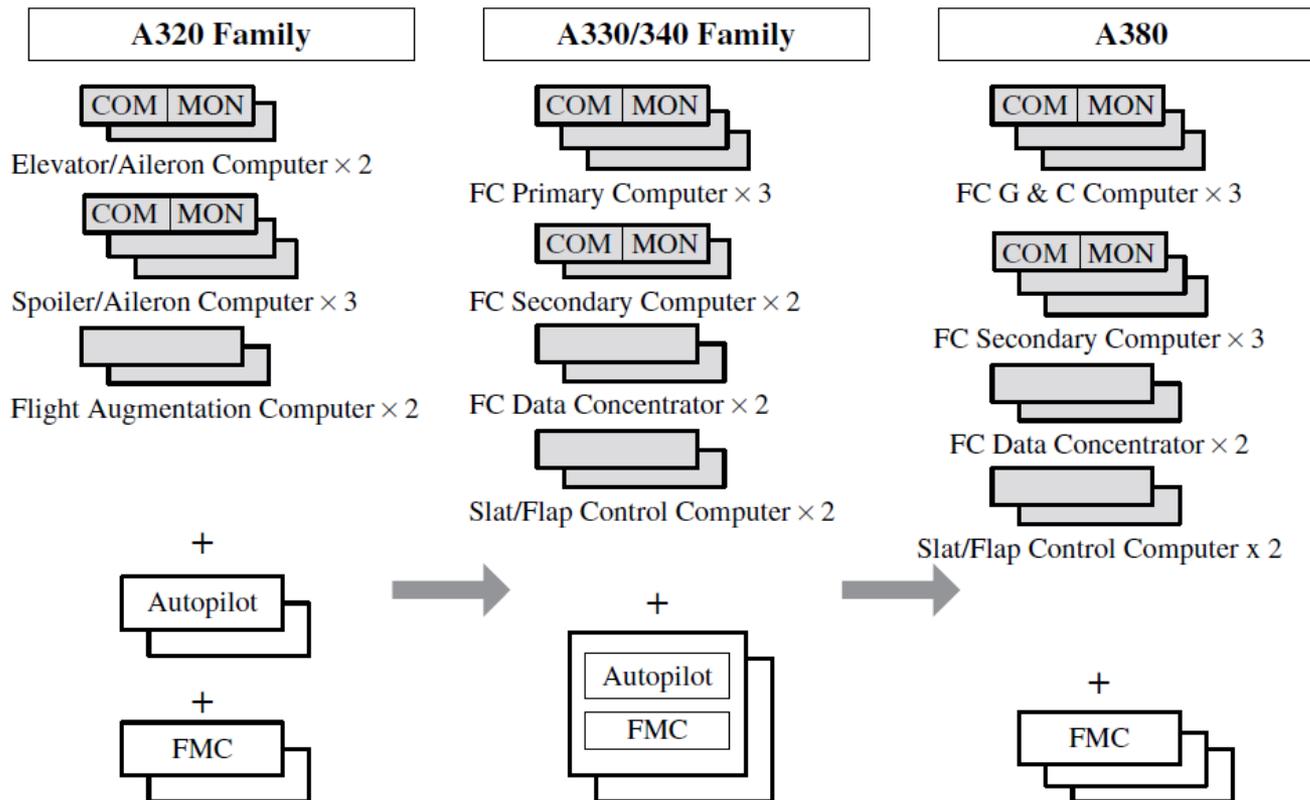
- Comparativo: Filosofias Boeing x Airbus



- **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

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

- 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



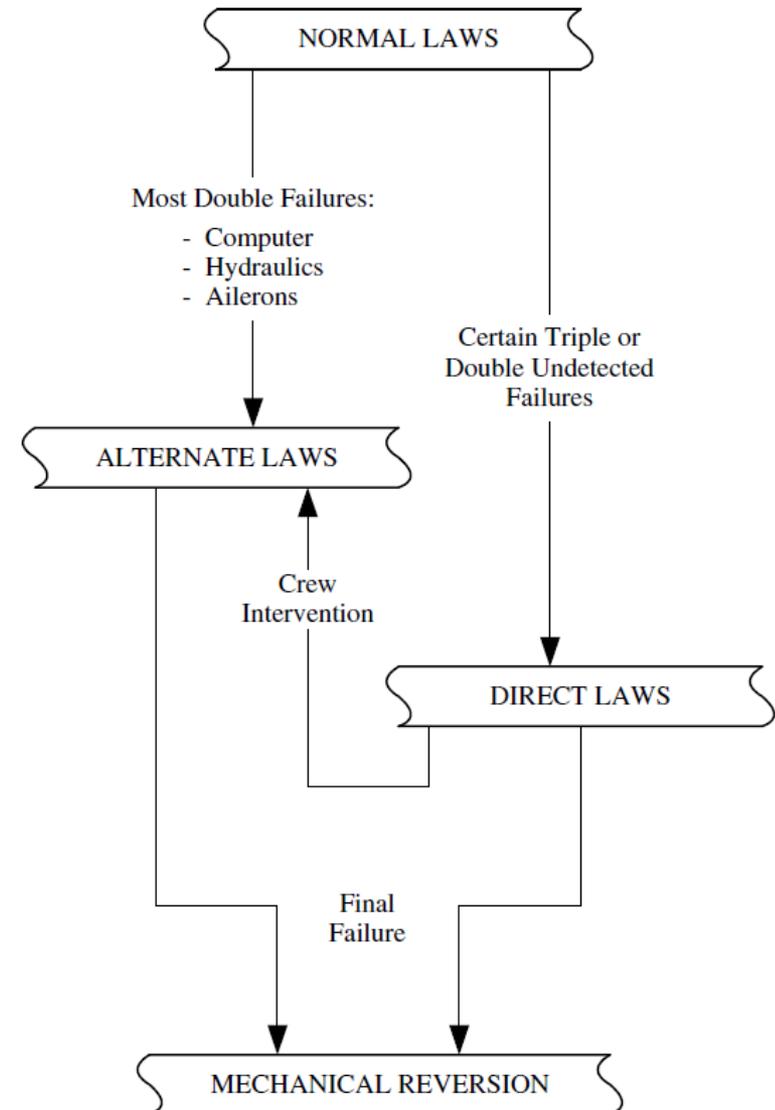
• Leis de Controle FBW

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

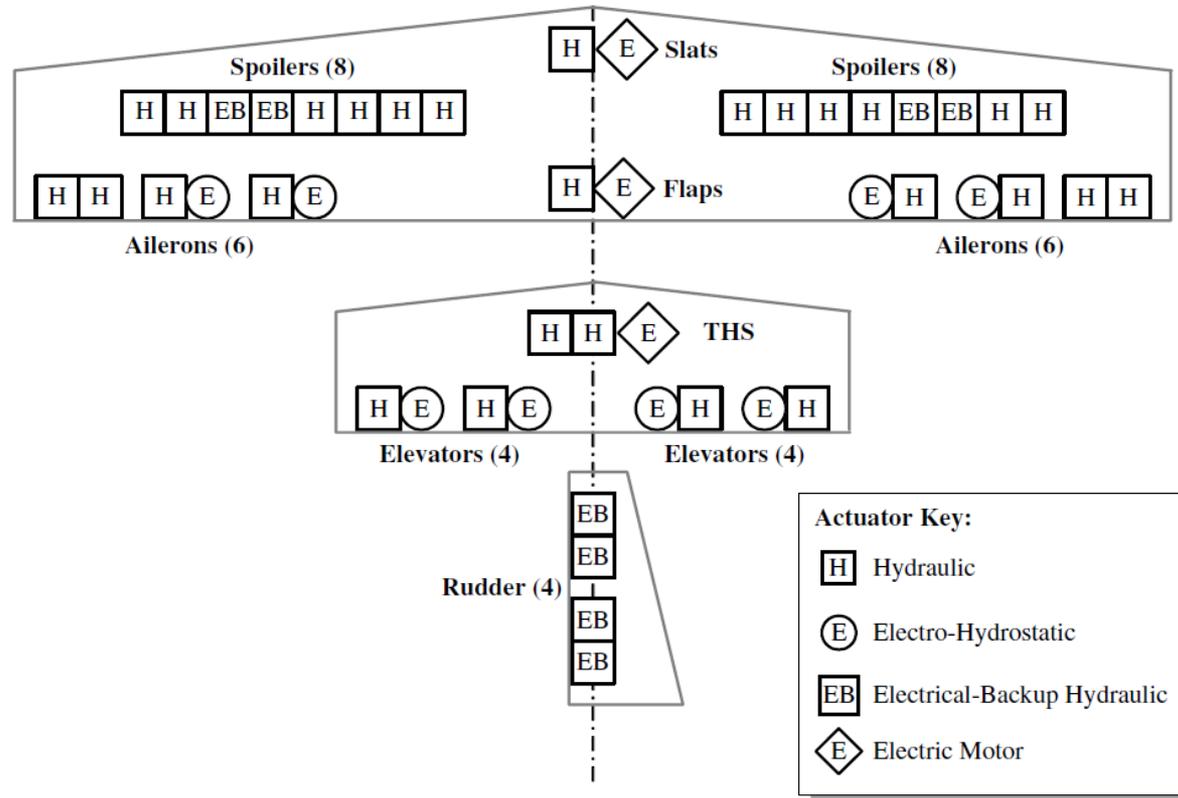
Mechanical reversion: Rudimentary manual control of the aircraft using pitch trim and rudder pedals to facilitate recovery of the aircraft electrical system or land the aircraft as soon as is practicable



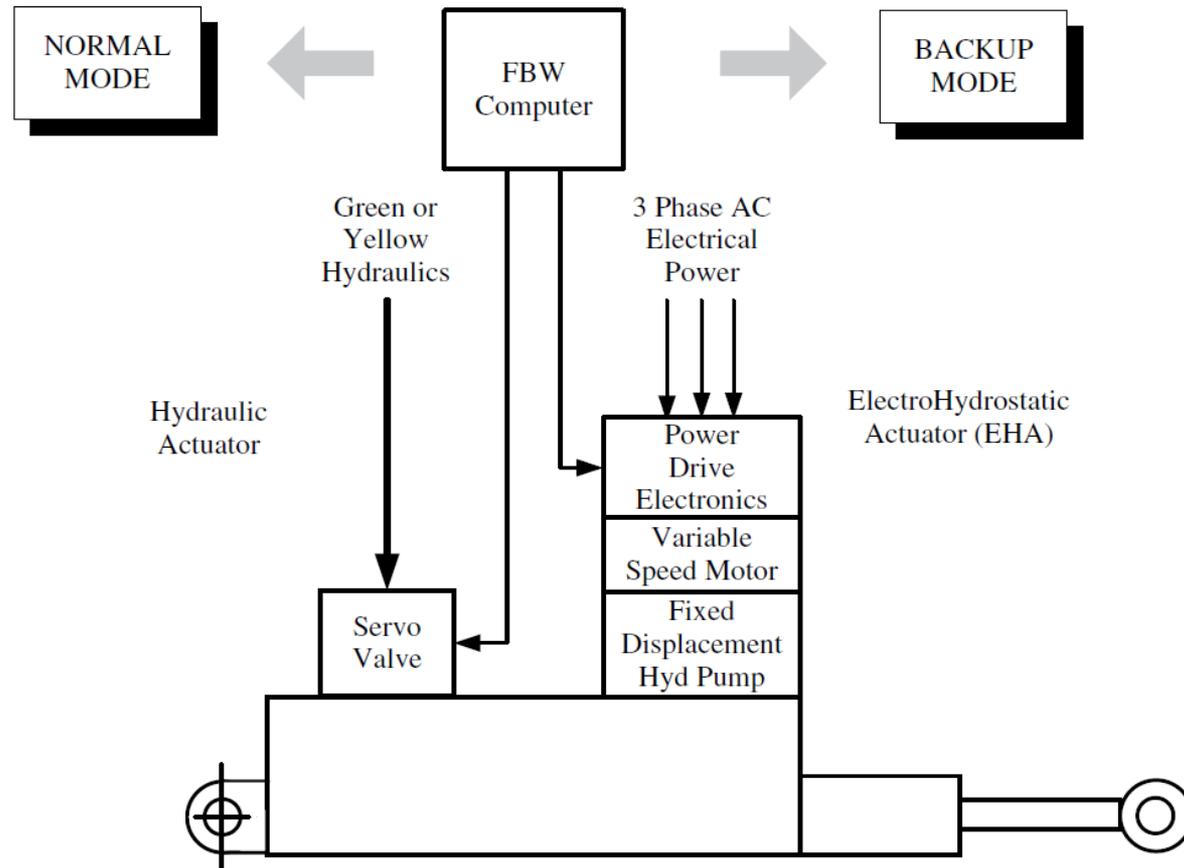
- Airbus A380

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)				

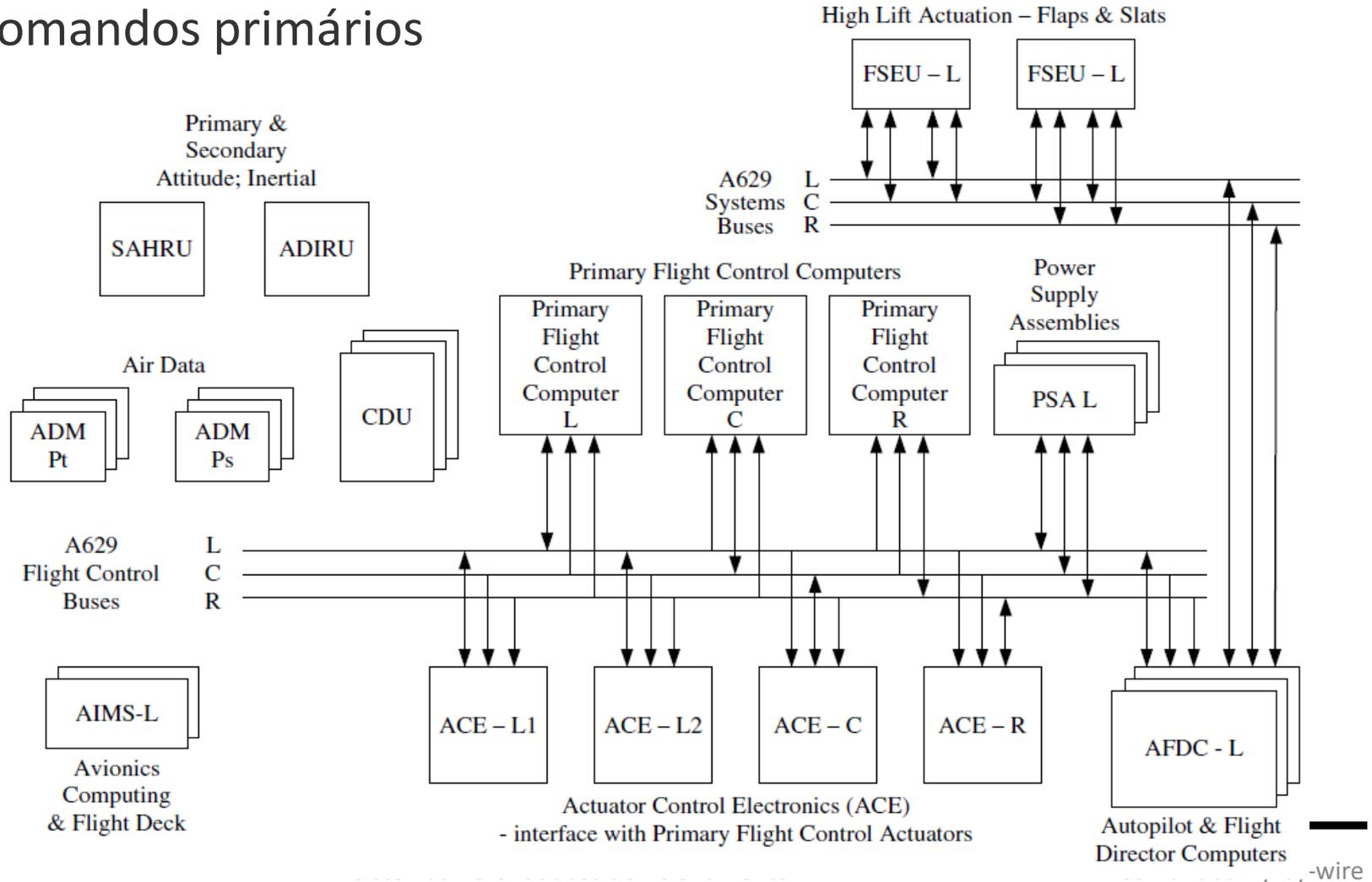
- Airbus A380



- Airbus A380



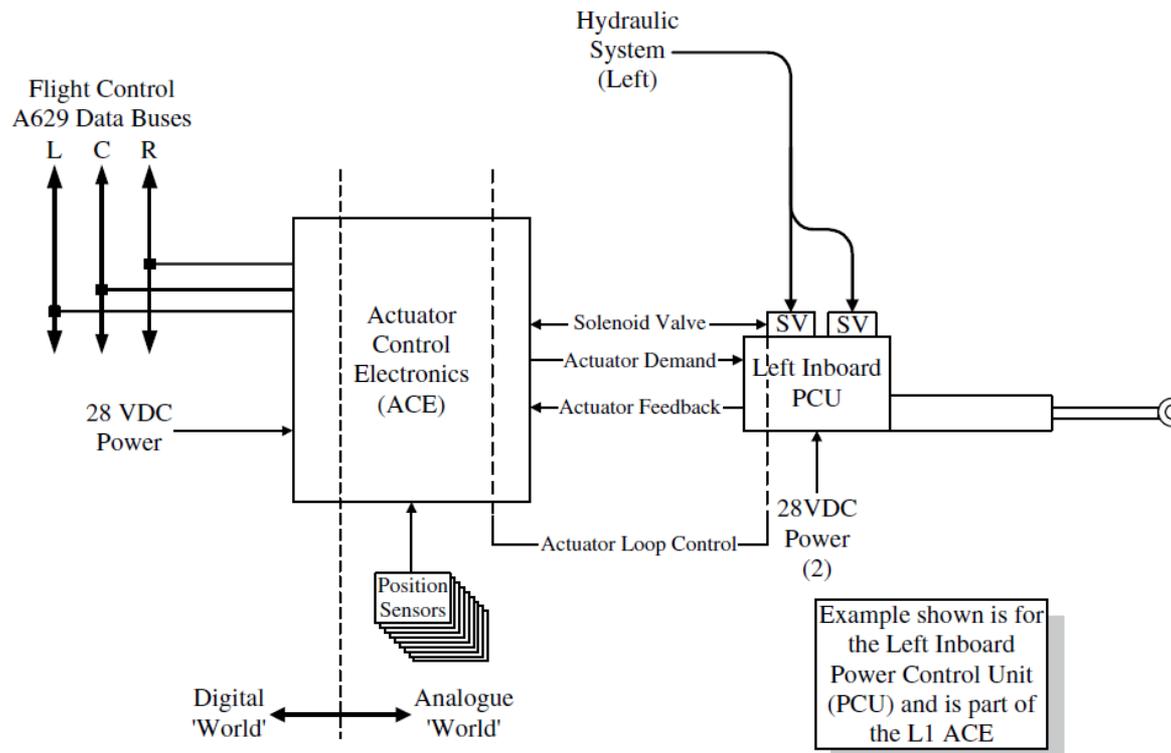
- Boeing 777
- Comandos primários



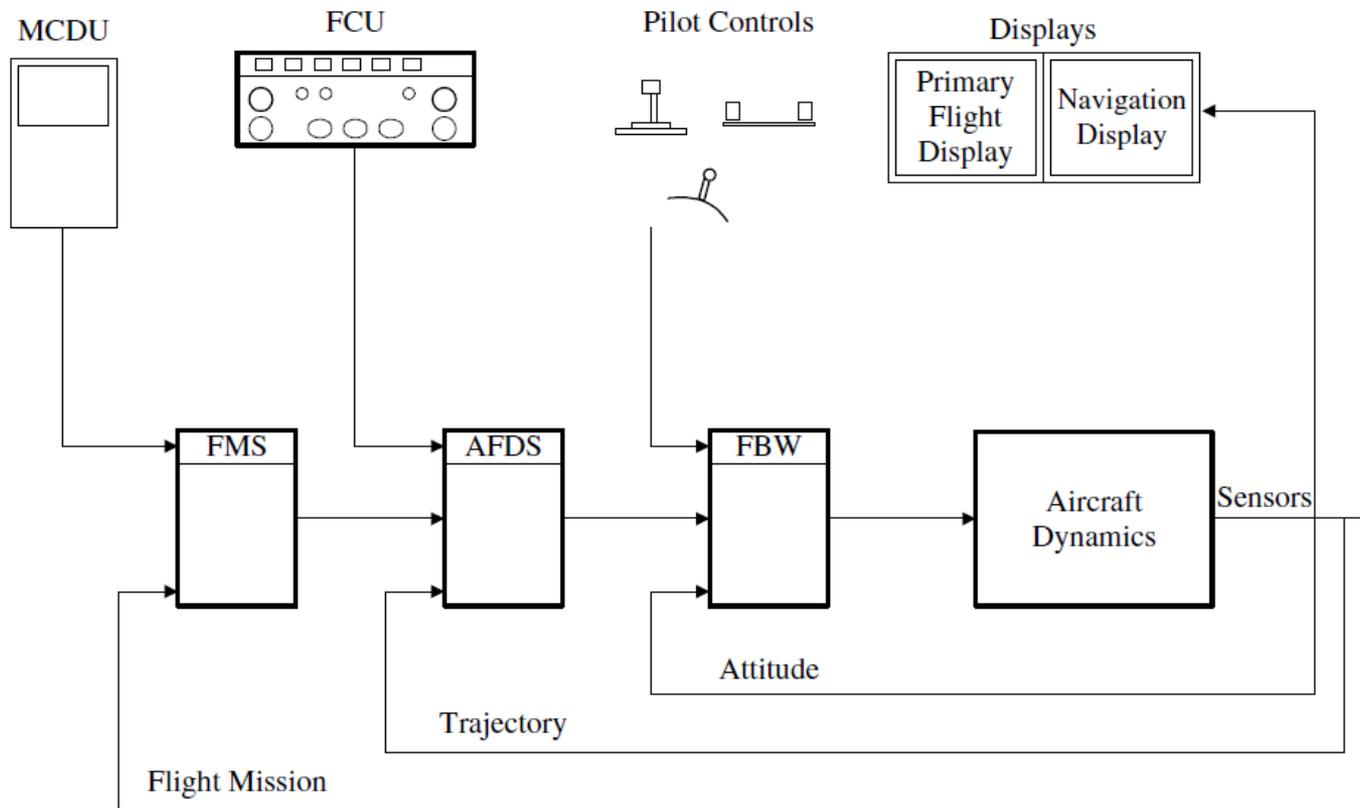
- Boeing 777
- Comandos primários

<i>ACE L1</i>	<i>ACE L2</i>	<i>ACE C</i>	<i>ACE R</i>
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

- Boeing 777
- Controle eletrônico dos atuadores (ACE)



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



- Green – Aircraft Hydraulic Systems, John Wiley, 1985.
- Lewis, Stern – Design of Hydraulic Control Systems, McGraw-Hill, 1962
- Delp, Bent, McKinley – Aircraft Maintenance and Repair, 5th Edition, 1986.
- Merryt, H.E. – Hydraulic Control Systems.
- Lombardo, D. - Advanced Aircraft Systems.
- Moir, I.; Seabridge, A., Aircraft Systems.

FIM