



SAA0169

Sistemas de Controle de Aeronaves II

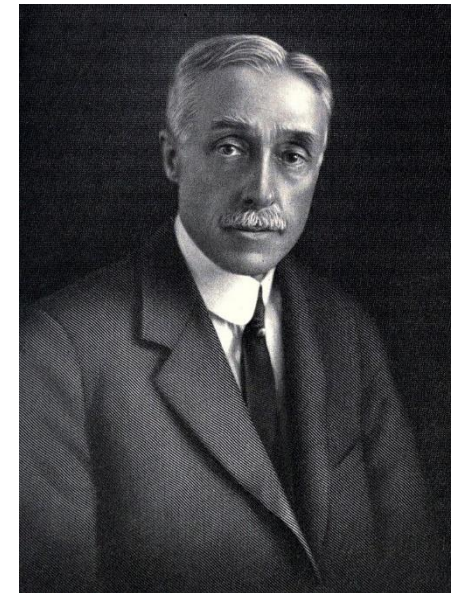
Histórico e contextualização

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

- Histórico
- Sistema de Controle Aeronave-piloto
- Análise de desempenho
- Sistemas Civis
- Desenvolvimentos Militares
- Sistema Automático de Controle Típico

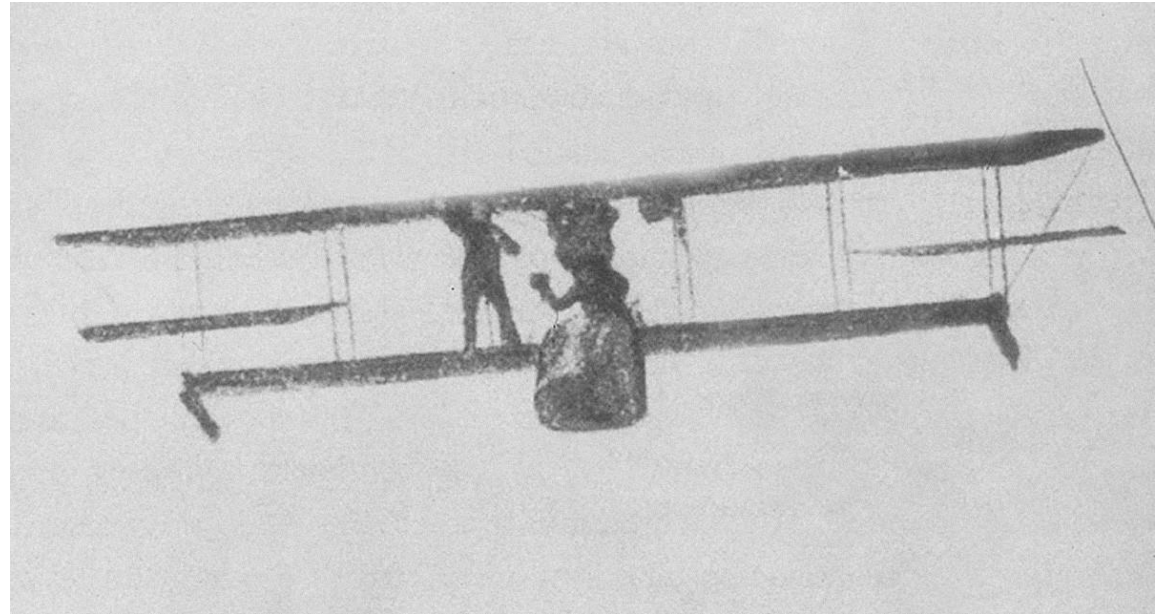
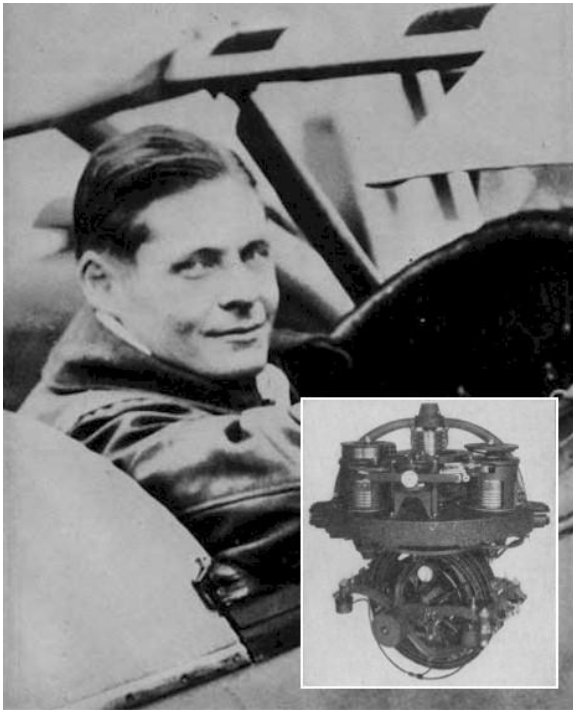
- Histórico
- Sistema de Controle Aeronave-piloto
- Análise de desempenho
- Sistemas Civis
- Desenvolvimentos Militares
- Sistema Automático de Controle Típico

- Os primeiros sistemas automáticos de controle tinham a função de estabilizar a aeronave em uma condição de voo após uma perturbação (rajada de vento, por exemplo)
- O primeiro sistema de que se tem notícia foi desenvolvido pelo Dr. Elmer Ambrose Sperry, em 1910, dono da Sperry Gyroscope Company
- O sistema foi denominado Sperry Aeroplane Stabilizer, e consistia em um grande rotor com o eixo alinhado ao eixo de guinada da aeronave. O rotor era rigidamente preso à estrutura da aeronave e esperava-se que ela resistisse a desvios de arfagem e rolamento. O sistema nunca foi utilizado em voo



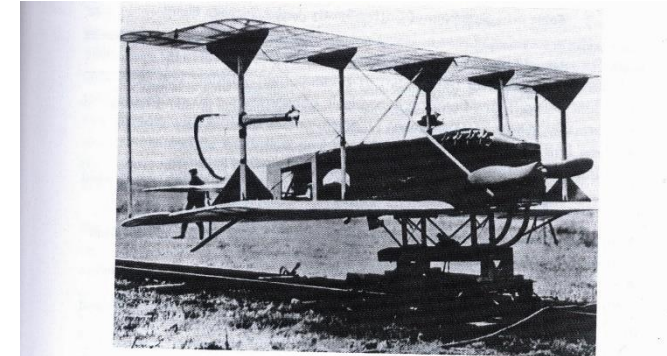
FONTE: Wikipedia

- Entre 1910 e 1912, Sperry desenvolveu um estabilizador giroscópico que possuía giroscópios nos eixos de rolamento e arfagem, que detectavam desvios e servomotores atuavam nos ailerons e profundores de forma a manter o voo nivelado



FONTE: <https://aviation.stackexchange.com/>

- Este sistema voou em 1914 com o piloto Lawrence Sperry (filho de Dr. Sperry) em um hidroavião Curtiss e se mostrou bastante eficaz
- A I Guerra Mundial (1914-1918) foi um incentivo para que sistemas desse tipo fossem desenvolvidos, mas ainda assim eles eram grandes, pesados e com estabilidade muito marginal, o que os tornavam pouco atrativos
- A partir de 1920, o desempenho e o alcance das aeronaves aumentou, fazendo com que a fadiga dos pilotos fosse um fator determinante, obrigando novos desenvolvimentos na área



Curtiss Sperry Aerial Torpedo.

After the first four unsuccessful flight attempts, Lawrence Sperry modified two of the aircraft for manned flight, then test flew them himself, nearly killing himself twice in an attempt to characterize their flying properties. The autopilot that had worked so consistently on the N-9 trials proved incapable

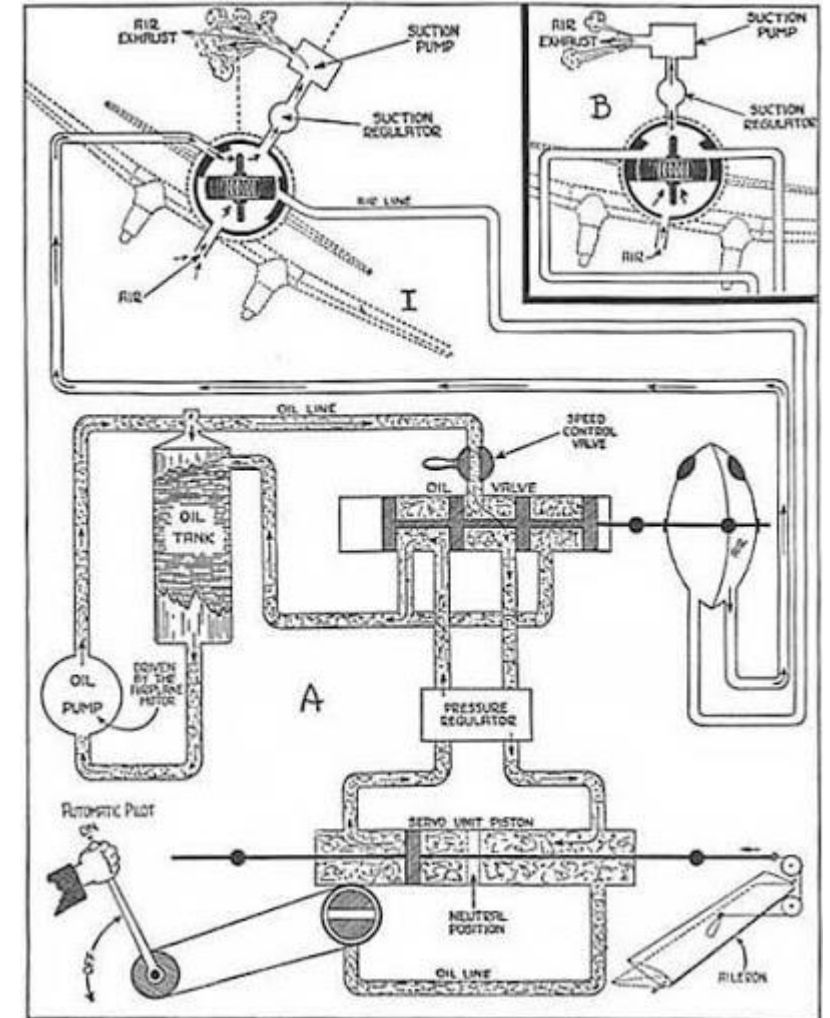
FONTE: alchetron.com

- O primeiro voo que testou um sistema automático de controle foi em 1933, com um sistema construído pela Sperry Gyroscope Company. Esta mesma aeronave, pilotada por Wiley Post, deu a volta ao mundo em menos de 8 dias, o que seria impossível em um voo totalmente manual
- Este fato fez o United States Commerce Department, até então responsável pela legislação aérea, permitir sistemas automáticos de controle em aeronaves de passageiros
- O primeiro voo deste tipo foi em 1934, com um Boeing 247



FONTE: 1000aircraftphotos.com

- Em meados da década de 1930, foram iniciados os estudos em teoria do controle clássico
- Nessa época os pilotos automáticos era basicamente modificações do sistema de Sperry, que consistia em:
 - Giroscópios acionados pneumáticamente, que operavam válvulas
 - O sinal destas válvulas operava uma válvula piloto, que comandava um cilindro hidráulico
 - Este cilindro comandava a superfície de comando



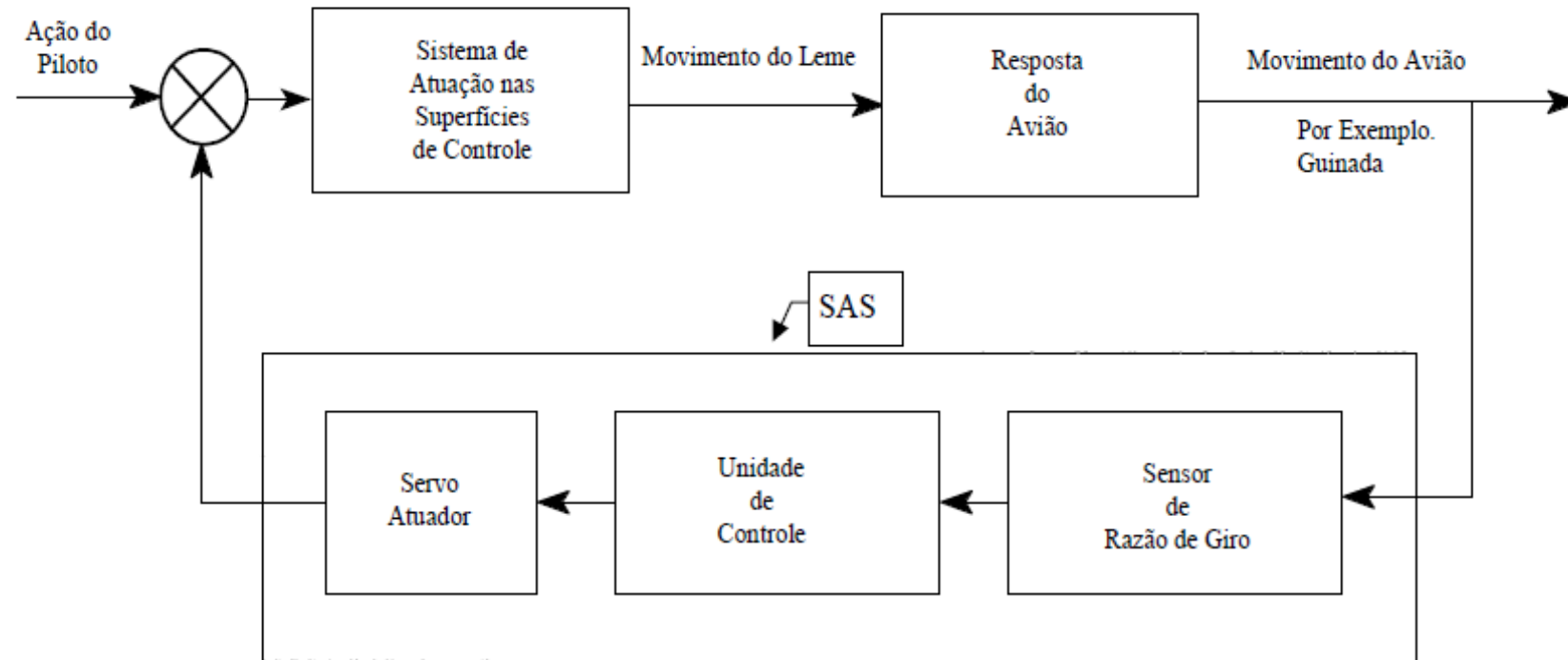
FONTE: pantonov.com

- As teorias de controle e estabilidade ainda não eram aplicadas a aeronaves, devido a complicações matemáticas
- A partir da II Guerra Mundial, as aeronaves tiveram o desempenho muito aumentado, obrigando teorias de controle mais efetivas
- Isso, em conjunto com os computadores analógicos, cada vez mais acessíveis, tornou possível o uso de sistemas de controle automáticos utilizando Lugar das Raízes, por exemplo
- Na década de 40 houve um grande desenvolvimento nos sistemas automáticos de controle. O primeiro foi um sistema utilizado em Bombardeiros, que permitia controle da aeronave durante o lançamento de bombas (1941)

- Ao final desta década já eram utilizados os primeiros sistemas de aproximação por instrumentos
- Com exceção de refinamentos, os sistemas atuais são compostos basicamente dos mesmos componentes da década de 1940
- Com aeronaves de desempenho cada vez maior, surgiram os comandos com auxílio hidráulico. Este sistema diminuía a força aplicada pelo piloto, mas também reduzia a sensibilidade do mesmo, deteriorando a estabilidade devido a fatores humanos

- Aliado a isso, outros fatores de projeto contribuíram para a diminuição a estabilidade das aeronaves:
 - Aumento da velocidade das aeronaves
 - Aumento das altitudes de voo
 - Asas menores (cargas alares maiores)
 - Redução do alongamento e redistribuição do peso (aumentando a importância dos fatores de inércia)
 - Voo transsônico
 - Materiais mais flexíveis
 - Diminuição do amortecimento estrutural
- Todos esses fatores tornaram o voo manual cada vez mais difícil, aumentando a necessidade de um sistema automático para aumento da estabilidade

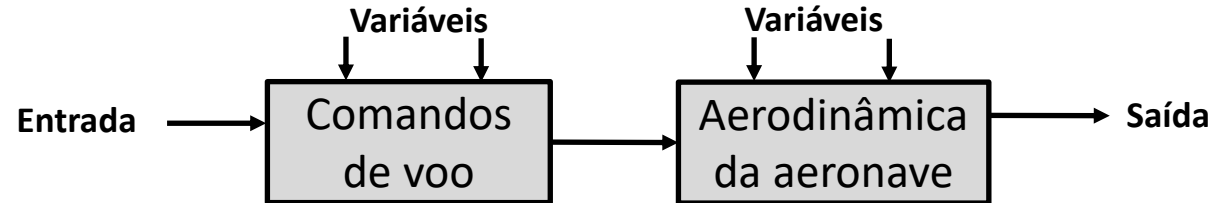
- Um dos principais sistemas de aumento de estabilidade (SAS – Stability Augmentation System) é o de supressão de Dutch Roll



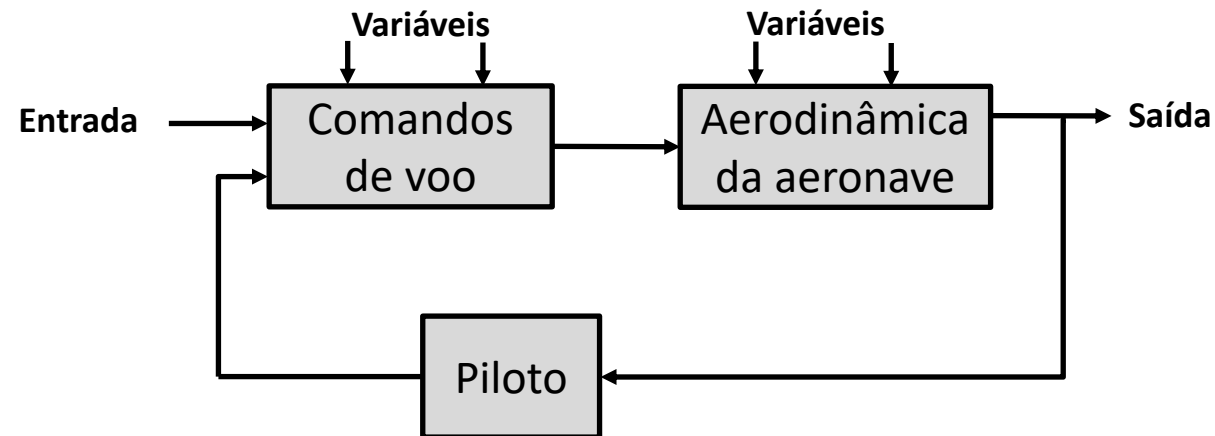
FONTE: Belo, E. M. (2014)

- Histórico
- Sistema de Controle Aeronave-piloto
- Análise de desempenho
- Sistemas Civis
- Desenvolvimentos Militares
- Sistema Automático de Controle Típico

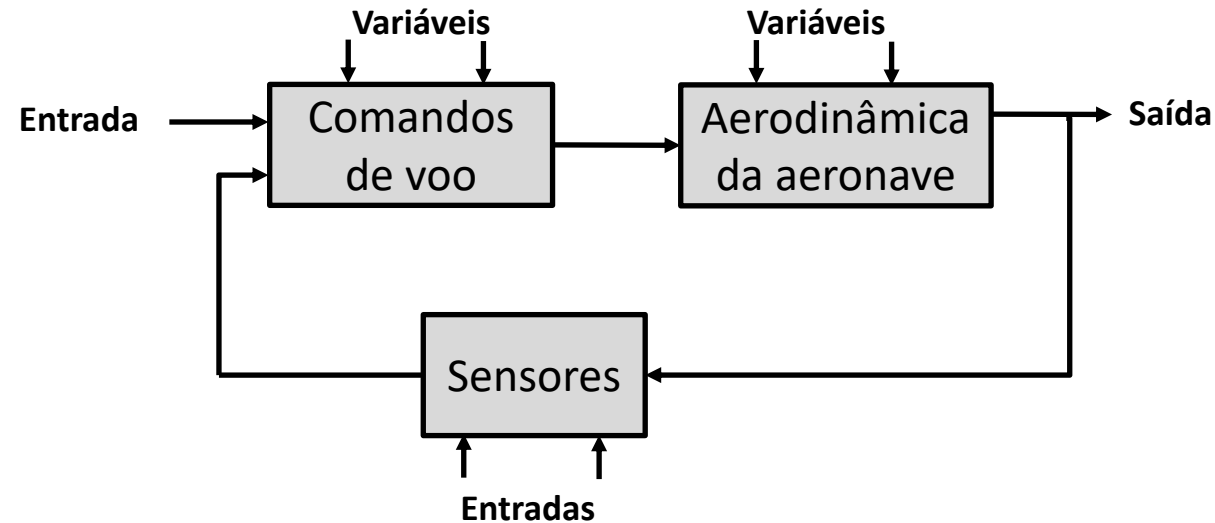
- De forma a se analisar uma aeronave como um sistema de controle, pode-se considerá-la um sistema de malha aberta



- O piloto humano atua como um sistema de controle e sua percepção do comportamento faz com que o sistema seja realimentado, portanto de malha fechada



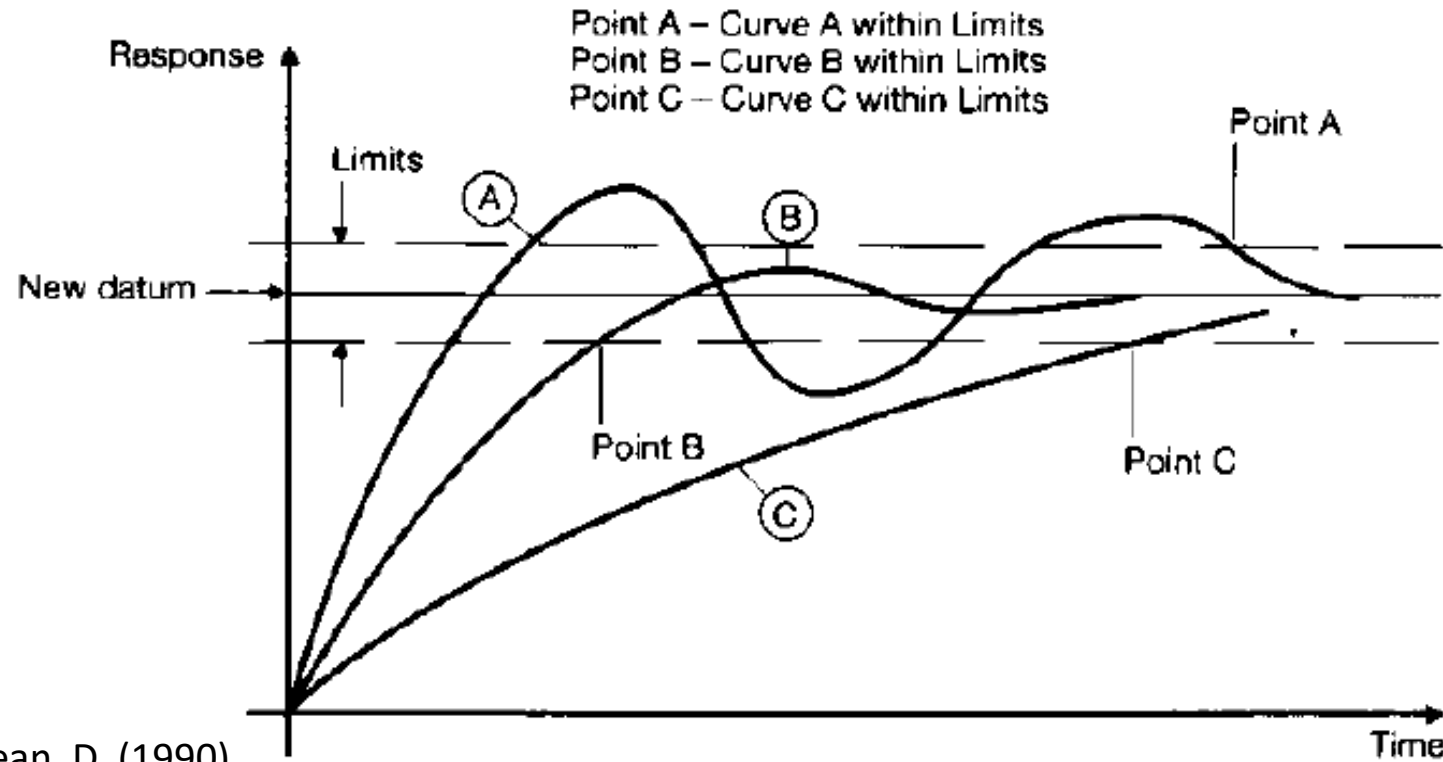
- Com aeronaves cada vez mais complexas e com estabilidade cada vez mais marginal, torna-se necessário o auxílio do piloto vindo de sensores



- Um exemplo destes sensores são o sistema pitot-estática, que fornece dados para diversos sistemas de controle, como o de velocidade, de altitude, de trajetória, etc.
- Outro exemplo são os giroscópios, que fornecem acelerações nas diferentes direções

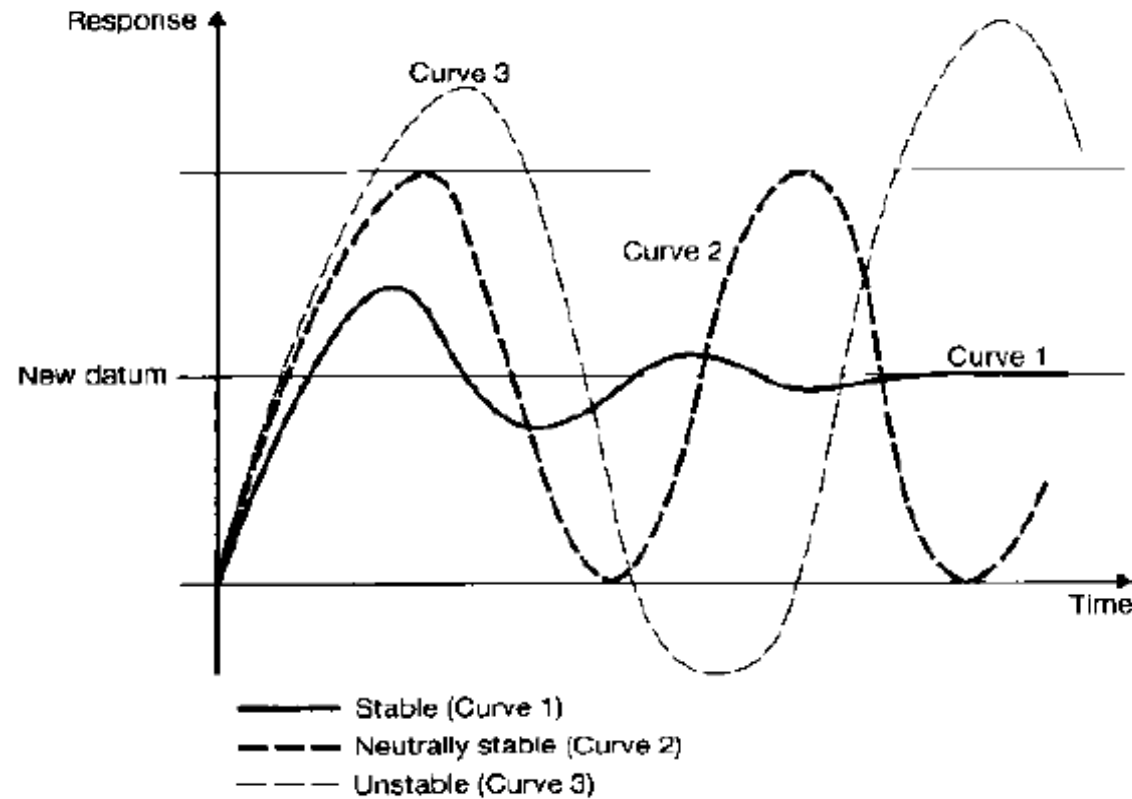
- Histórico
- Sistema de Controle Aeronave-piloto
- **Análise de desempenho**
- Sistemas Civis
- Desenvolvimentos Militares
- Sistema Automático de Controle Típico

- Algumas formas de se analisar o desempenho são: acurácia, tempo de acomodação, sobressinal máximo, entre outras. Essas grandezas podem determinar um requisito básico do projeto do controlador



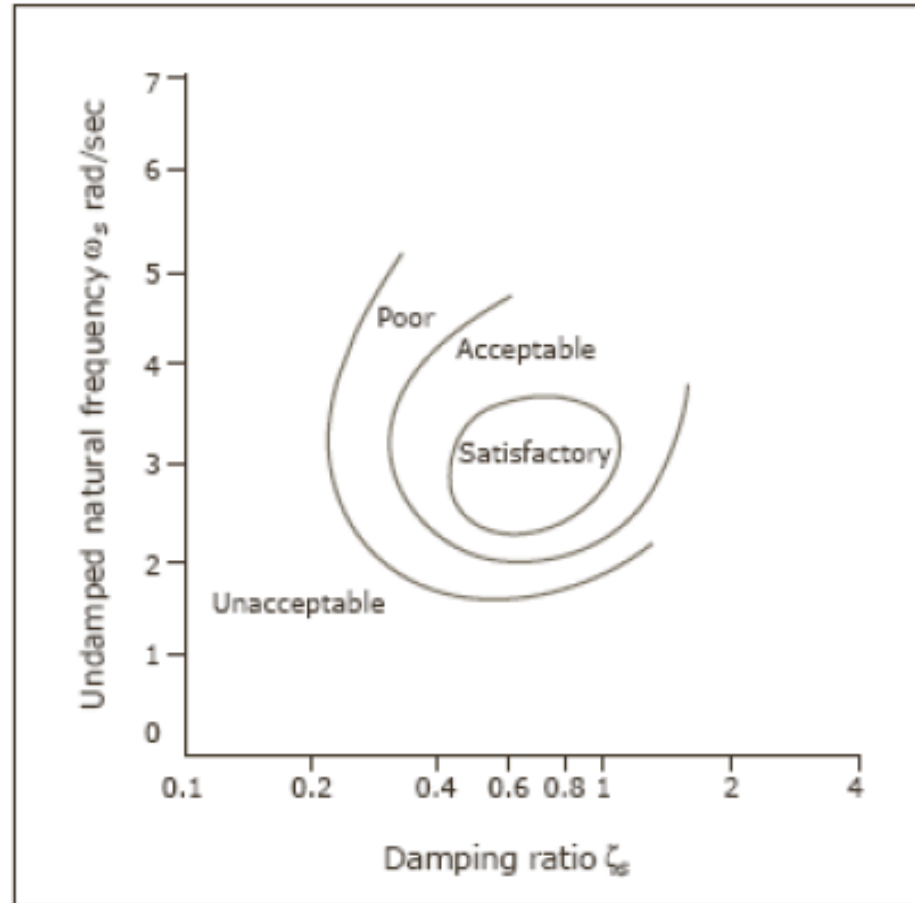
FONTE: McLean, D. (1990)

- Outra forma de se analisar o controlador é através de sua estabilidade



FONTE: McLean, D. (1990)

- Considerando fatores humanos



FONTE: Cook, M. V. (2007)

- Histórico
- Sistema de Controle Aeronave-piloto
- Análise de desempenho
- **Sistemas Civis**
- Desenvolvimentos Militares
- Sistema Automático de Controle Típico

- Dos vários sistemas existentes hoje em dia, serão analisados dois deles:
 - O da aeronave BAe 146
 - O da aeronave Airbus 320



FONTE: airliners.net

- **British Aerospace 146**
- Sistema fabricado pela indústria Smiths, conhecido como SEP 10 (Smiths Electric Pilot 10)

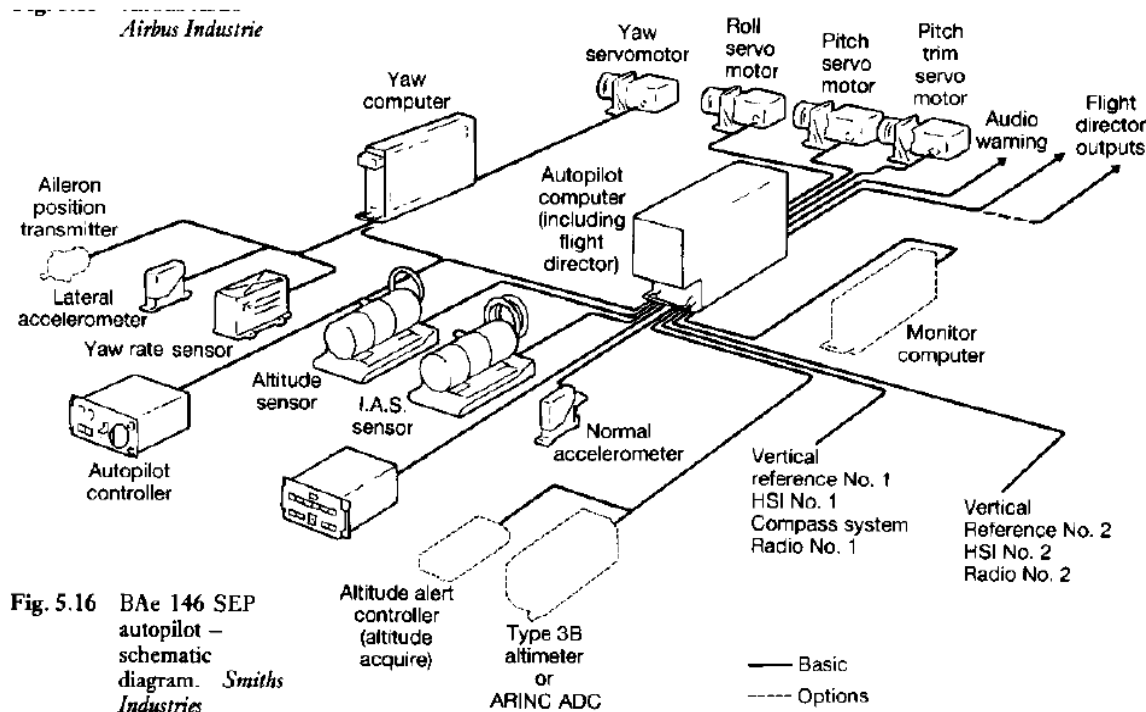


Fig. 5.16 BAe 146 SEP autopilot – schematic diagram. Smiths Industries

Controles do Piloto:

- Controlador do piloto automático;
- Seletor de modo;
- Controlador de altitude

Computador:

- computador de guinada;
- computador do piloto automático;
- computador monitor (somente para operação do tipo categoria 2)

Sensores:

- Acelerômetro lateral
- Sensor de razão de guinada
- Sensor de altitude
- Sensor de velocidade do ar indicada
- Acelerômetro vertical

Atuadores:

- Servomotores de guinada, rolagem e arfagem
- Servomotor de trimagem de arfagem

FONTE: Belo, E. M. (2014)

- **British Aerospace 146**

Os modos básicos fornecidos pelo piloto automático incluem:

- fixação de atitude de arfagem com ajuste de dados
- fixação de atitude de rolagem com ajuste de dados
- fixação de altitude
- pré-ajuste de altitude
- fixação de velocidade do ar
- fixação de número de Mach
- fixação de velocidade vertical
- captura e seguimento da rampa de descida
- vôo em curva dirigido
- pré-selecionamento de direção
- captura e seguimento de qualquer ângulo de localizador VOR/ILS
- acoplamento de feixe traseiro

- **Airbus A320**
- O primeiro sistema totalmente fly-by-wire utilizado na aviação civil
- Foi também o primeiro sistema a utilizar um sidestick no lugar de manche

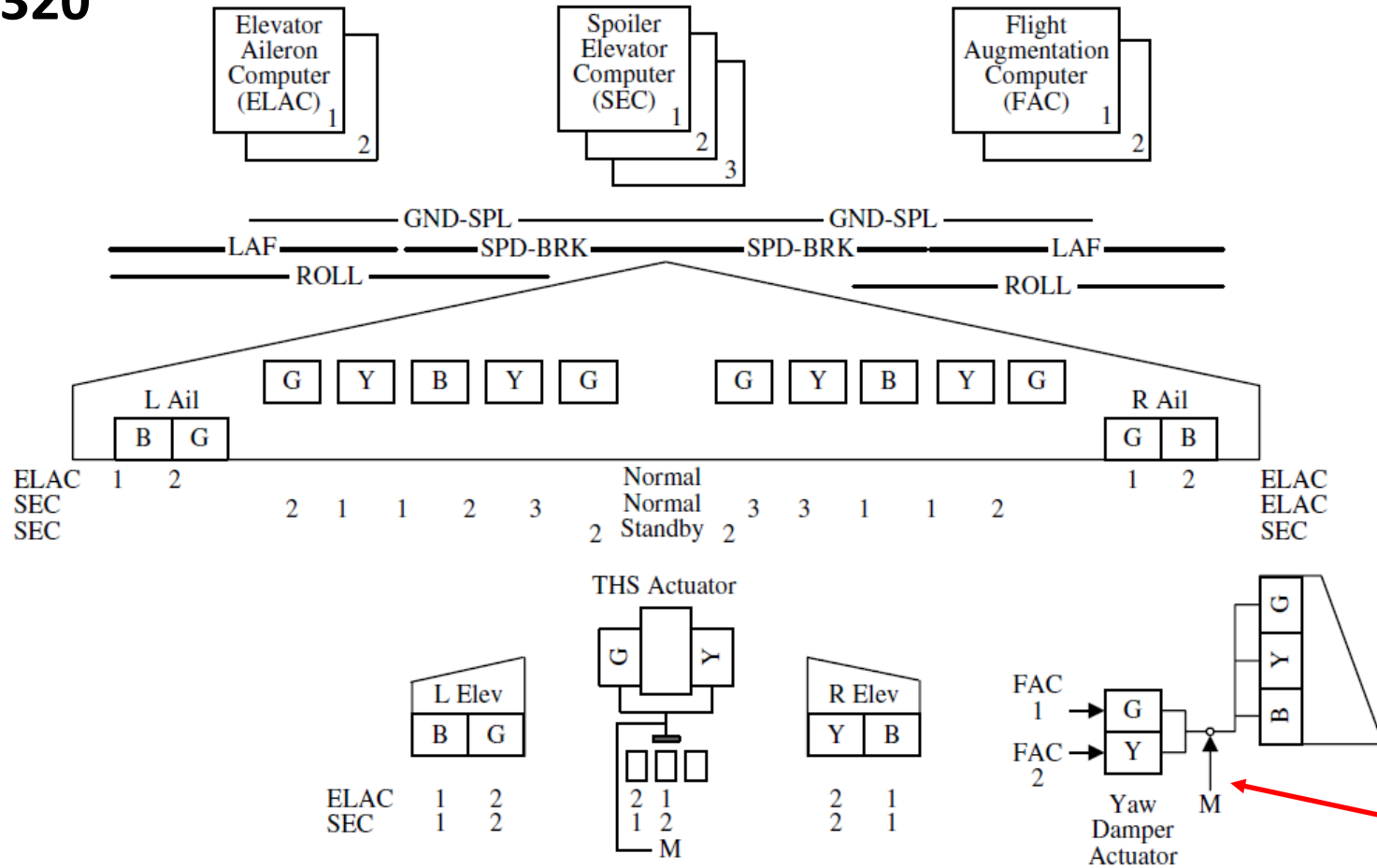


FONTE: airliners.net

- **Airbus A320**
- O sistema possui 3 sistemas hidráulicos distintos:
- Sistema Azul (B)
- Sistema Amarelo (Y)
- Sistema Verde (G)

- Possui ainda 7 computadores:
- 2 computadores de Ailerons e Profundores (ELACs)
- 3 computadores de Spoilers e Profundores (SECs)
- 2 computadores de Aumento de estabilidade em voo (FACs), que fornecem amortecimento e direção de guinada

- Airbus A320



Junção mecânica, para o caso de perda total de energia elétrica

FONTE: Moir, I.; Seabridge, A.; Jukes, M. (2013)

- Atualmente os sistemas Fly-by-Wire são uma grande tendência também na aviação civil
- A família Embraer 170/190, no início dos anos 2000 contava com o leme Fly-by-Wire, o que foi um grande aprendizado para os futuros desafios da indústria nacional



FONTE: airliners.net



FONTE: revistaflap.com.br

- As aeronaves Legacy 450 e Legacy 500 foram as primeiras aeronaves nacionais com sistema Full Fly-by-Wire



FONTE: aeroin.net

FONTE: aeromagazine.uol.com.br



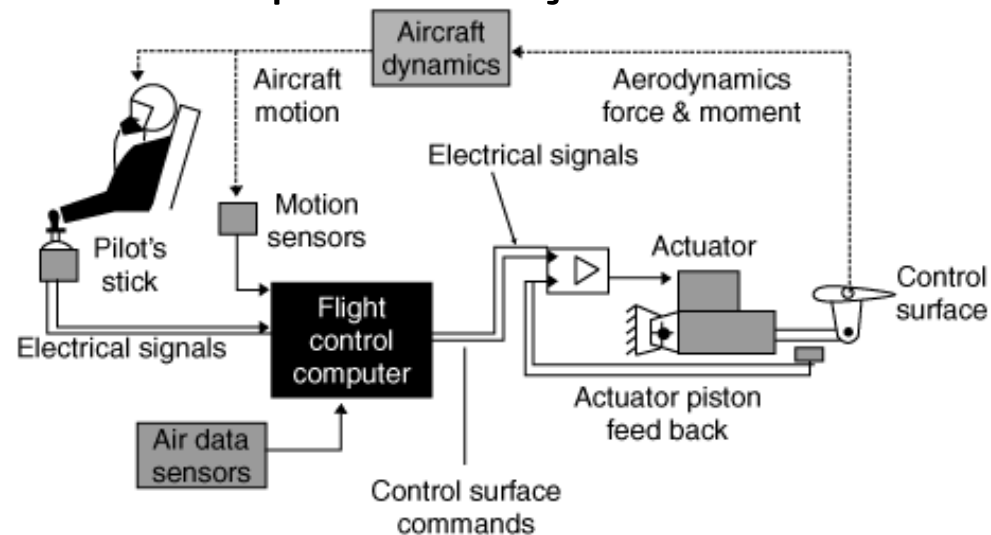
- Mais recentemente o cargueiro KC-390 e a família Embraer E2 também contam com essa tecnologia



FONTE: airliners.net

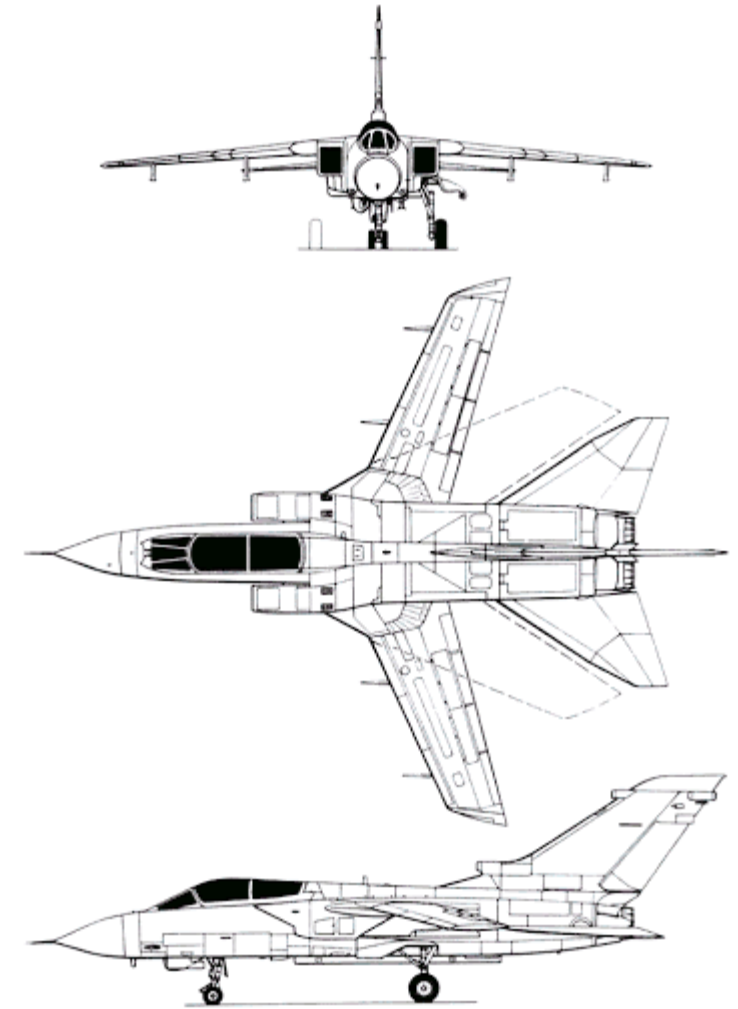
- Histórico
- Sistema de Controle Aeronave-piloto
- Análise de desempenho
- Sistemas Civis
- **Desenvolvimentos Militares**
- Sistema Automático de Controle Típico

- Após a 2.a Guerra Mundial, o crescente desempenho das aeronaves fez com que sua estabilidade fosse diminuída
- Para se evitar efeitos de Dutch–Roll, criou-se o sistema de Yaw Damper, hoje muito utilizado também em aeronaves civis
- Esse sistema foi o grande incentivo para a criação dos sistemas Fly-by-Wire (FBW)



FONTE: airguardian.net

- A primeira aeronave com sistema Fly-by-Wire foi o Tornado (1974)
- O Tornado é um caça estável, mas sua variação de enflechamento das asas altera muito a dinâmica da aeronave
- Por esse motivo, foi necessário um sistema que pudesse deixar a aeronave sempre com a mesma resposta aos comandos



FONTE: aviastar.org

- Tornado (1974)



FONTE: dailymail.co.uk



FONTE: defbrief.com

- Em 1977, a BAe (British Aerospace) assinou um contrato para desenvolvimento de controle ativo em FBW (ACT – Active Control Technology) em conjunto com outras empresas da Europa
- Para tal, utilizou um caça Jaguar (já utilizado há bastante tempo) e fez nele modificações: levou o CG para trás em 10% CMA e com o uso de aletas aerodinâmicas, transportou seu centro aerodinâmico pra frente, tornando-a instável



FONTE: india.com



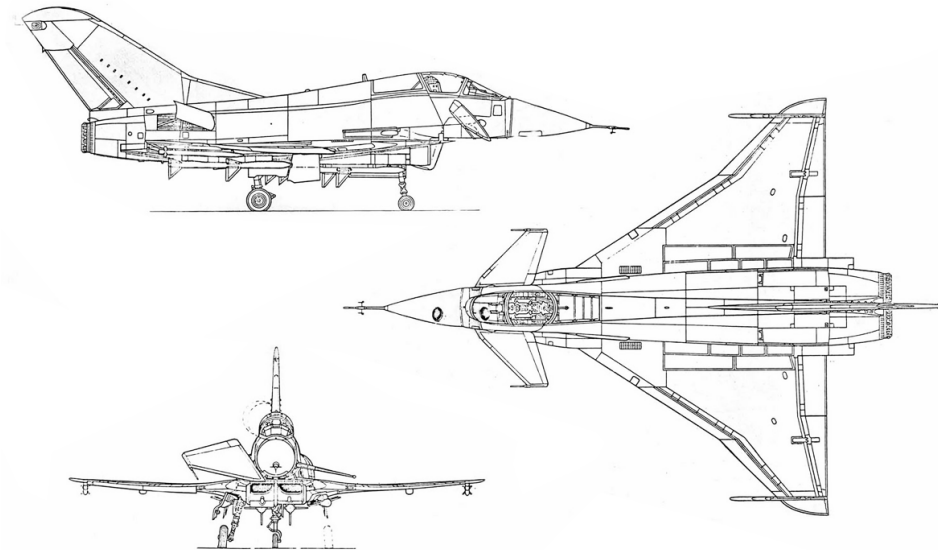
FONTE: designer.home.xs4all.nl

- O sistema foi capaz de estabilizar a aeronave em qualquer situação, mas para isso os comandos passaram por diversas modificações para que a redundância aumentasse e a possibilidade de falhas fosse muito diminuída
- Para tal, alguns dos canais eram duplamente triplexados
- Esta aeronave foi testada entre 1981 e 1984
- Devido a problemas administrativos e de orçamento, o programa ACT foi descontinuado, dando lugar ao projeto EAP, da British Aerospace

- O EAP (Experimental Aircraft Programme) foi o projeto de uma nova aeronave com o uso das tecnologias então desenvolvidas
- A aeronave era um caça em configuração cannard



FONTE: baesystems.com

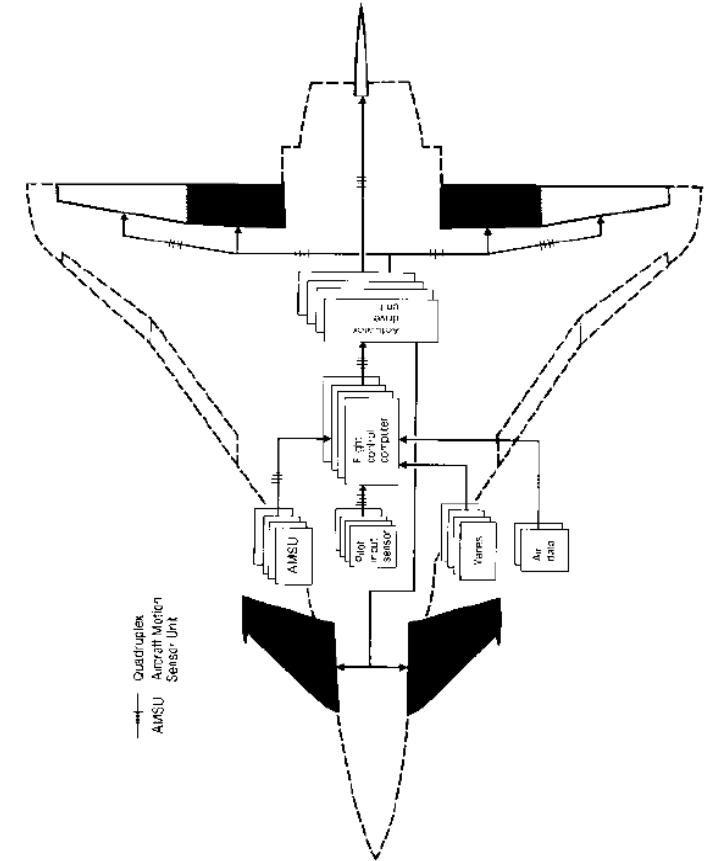


FONTE: alchetron.com

- O controle dessa aeronave era feito da seguinte forma:
 - asas à frente para controle de rolagem e arfagem;
 - flaperons de bordo de fuga para controle de arfagem e trimagem;
 - leme para o controle direcional;
 - flapes de bordo de ataque, primariamente para otimizar o controle em arfagem

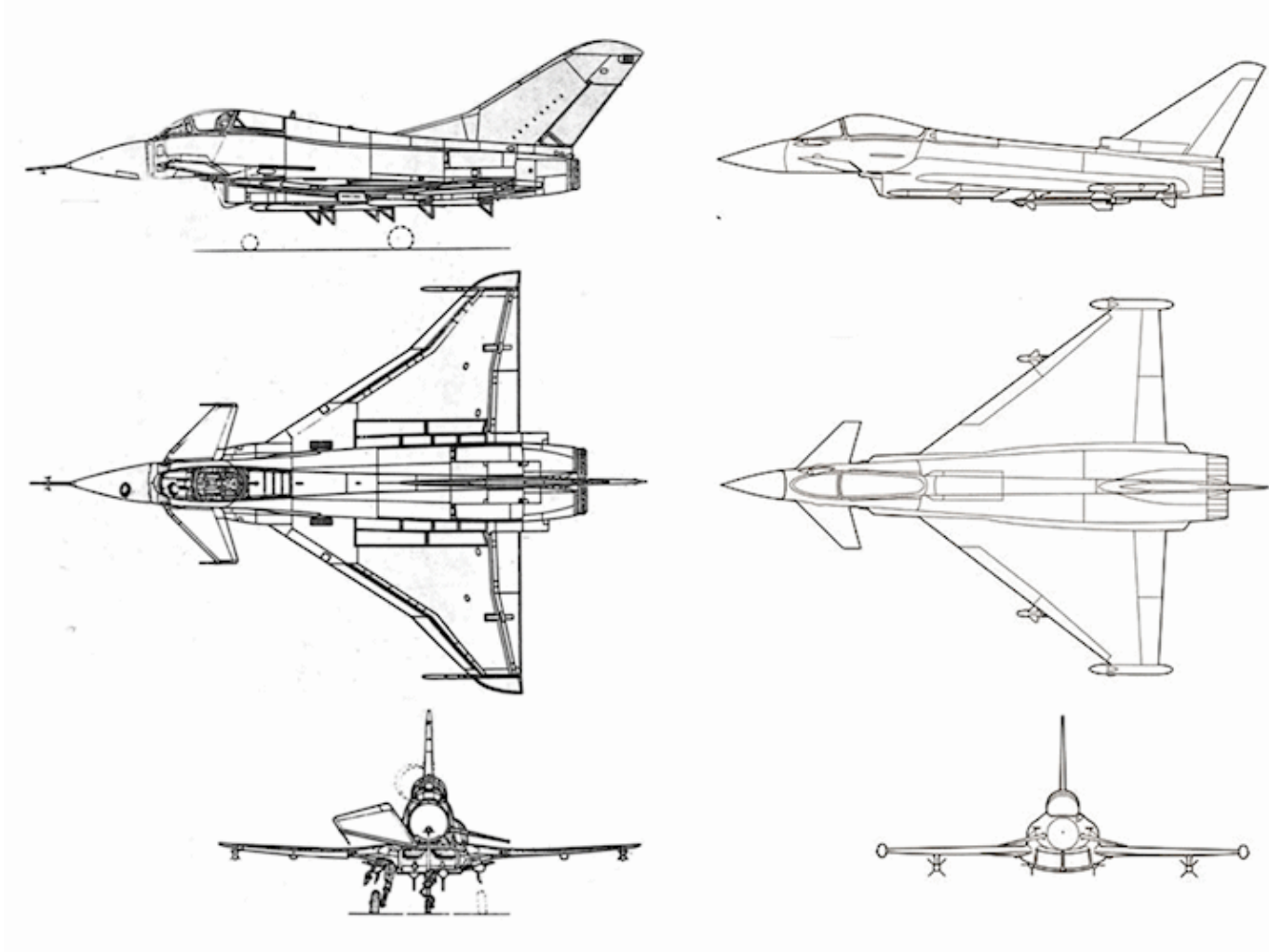


FONTE: airliners.net



FONTE: Belo, E. M. (2014)

- Esta aeronave voou entre 1986 e 1991
- Devido à sua configuração aerodinâmica, ela era totalmente instável, com margem de manobra em torno de -12,5%, portanto era impossível de ser voada sem um sistema de controle automático
- O projeto contou apenas com uma aeronave protótipo, mas foi o precursor do projeto Eurofighter Typhoon



EAP

Typhoon

FONTE: globalsecurity.org

- Apenas com o uso de sistemas automáticos de controle foi possível o voo de aeronaves instáveis, mas com alta manobrabilidade, como o X29, que possui margem de manobra de -35%



FONTE: nasa.gov

- Outra aeronave com essas características de estabilidade é o SAAB Gripen, que em breve começará a ser operado pela Força Aérea Brasileira



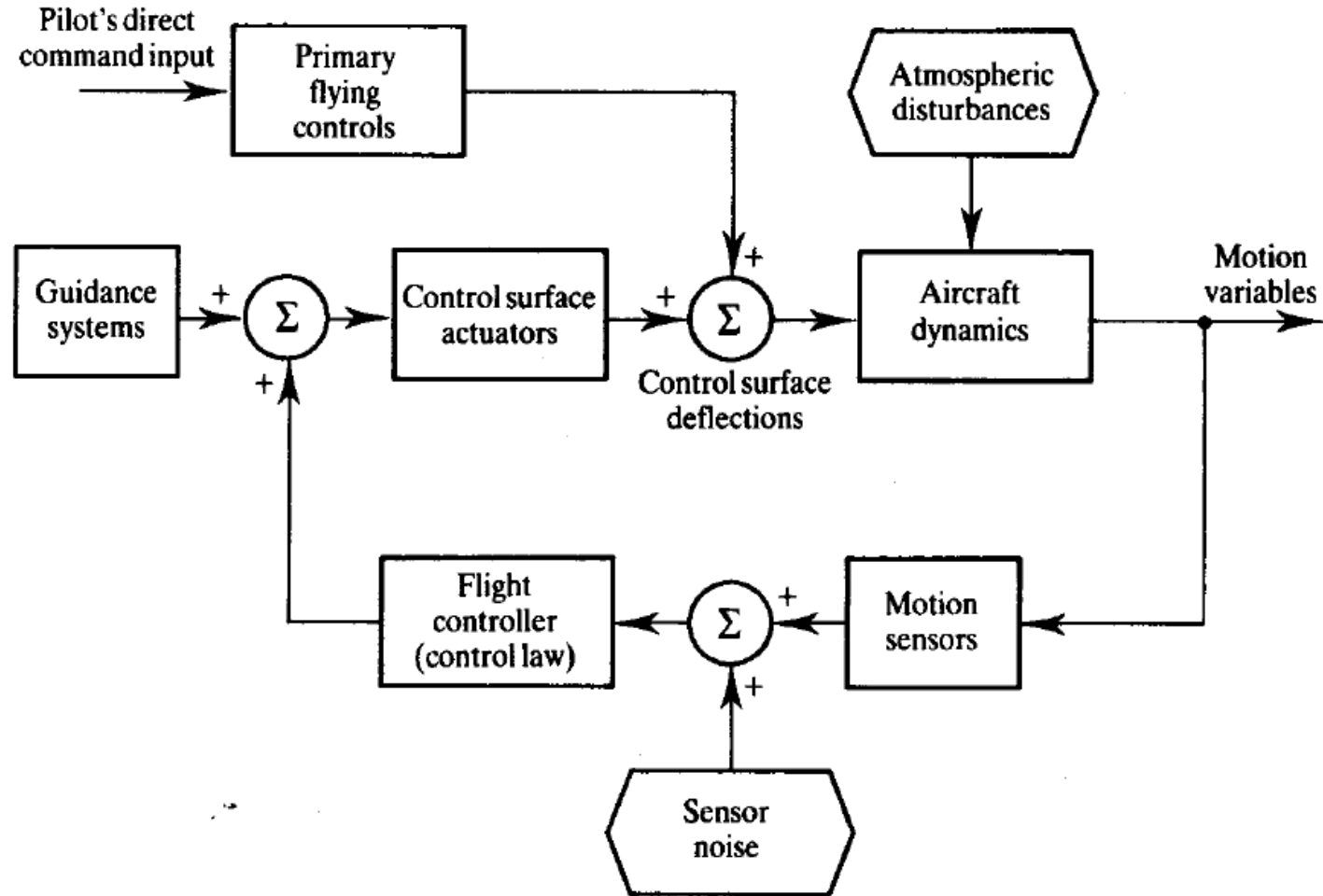
FONTE: airway.com.br



FONTE: aeromagazine.uol.com.br

- Histórico
- Sistema de Controle Aeronave-piloto
- Análise de desempenho
- Sistemas Civis
- Desenvolvimentos Militares
- Sistema Automático de Controle Típico

- Em geral, qualquer sistema de controle automático (Piloto Automático, Sistema de Aumento de Estabilidade ou Sistema Fly-by-Wire) é tratado com a terminologia AFCS (Automatic Flight Control System)
- Um exemplo típico de AFCS em diagrama de blocos é mostrado a seguir



FONTE: McLean, D. (1990)