

ELT072 – Introdução ao Controle Automático de Aeronaves Simulação de Ventos e Turbulências Atmosféricas

Prof. Leo Torres

Agosto, 2024

Conteúdo

- 1 Incorporação de Ventos à Simulação
- 2 Vento Médio ou em Regime Estacionário
- 3 Rajadas de Vento e Turbulência Atmosférica
- 4 Bibliografia

Section 1

Incorporação de Ventos à Simulação

Objetivos

Em relação a movimentações de massas de ar (Ventos), tentaremos abordar algumas questões relevantes para o controle automático de aeronaves:

- 1 Que tipos de fenômenos são observados?
- 2 Como são matematicamente modelados?
- 3 Como incorporá-los à análise de um sistema de controle?

Ventos – Introdução I

Pontos importantes:

- A atmosfera é, de fato, uma camada gasosa que envolve o planeta terra e se move constantemente.
- Estamos particularmente interessados nos fenômenos de movimentação das massas de ar que ocorrem na troposfera (aprox. até 11 km acima do nível do mar).
- Como vimos anteriormente, tem-se um *Modelo Padrão* para a troposfera em que não se considera Ventos. Esse modelo descreve basicamente as variações de densidade, pressão, temperatura e velocidade do som com a altitude.

Ventos – Introdução II

Dentre as muitas possibilidades de tipos de deslocamentos de massas de ar, iremos considerar somente os seguintes fenômenos:

- Componente em **Regime Estacionário** (cujas mudanças podem ocorrer ao longo do espaço, mas que são constantes ao longo do tempo para uma posição espacial fixa):
 - Vento Médio: variação espacial de magnitude e direção (*wind shear*) dependente da altitude.
- Componentes em **Regime Não-Estacionário** (que mudam ao longo do tempo, mesmo para uma posição espacial fixa):
 - Rajadas de vento (*wind gusts*): descritas usando funções determinísticas do tempo.
 - Turbulência atmosférica: descrita usando sinais estocásticos filtrados apropriadamente.

Essas componentes são especificados em documentos normativos militares norte americanas como a norma MIL-F-8785C [2] e o padrão MIL-STD-1797A [3].

Representação Matemática Geral I

O Vento é representado por um vetor de velocidades de deslocamento da atmosfera em relação ao referencial do plano tangente,

$$\mathbf{w}_{\text{atm}/\text{tp}}^{\text{tp}} = \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix},$$

em cada ponto do espaço, como uma soma de duas componentes:

- 1 Componente de vento médio (ou em regime estacionário), representada no referencial $\vec{\mathcal{F}}_{\text{tp}}$;
- 2 Componente de rajadas de vento e turbulência (*wind gusts*), representada no referencial $\vec{\mathcal{F}}_{\text{frd}}$.

Representação Matemática Geral II

Ou seja

$$\mathbf{w}_{\text{atm}/\text{tp}}^{\text{tp}} = \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} w_N \\ w_E \\ w_D \end{bmatrix}}_{\mathbf{w}_{\text{avg,atm}/\text{tp}}^{\text{tp}}} + C_{\text{tp}/\text{frd}} \begin{bmatrix} u_g \\ v_g \\ w_g \end{bmatrix},$$

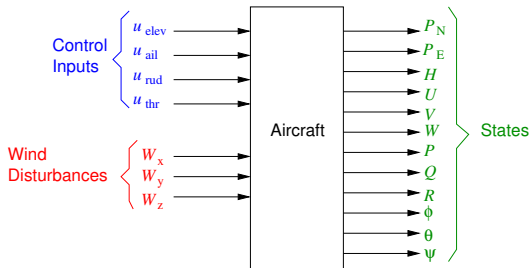
onde

- w_N é a componente média do vento na direção Norte,
- w_E é a componente média do vento na direção Leste,
- w_D é a componente média do vento na direção Para Baixo;
- u_g, v_g, w_g são componentes estocásticas ou determinísticas, mas variantes no tempo, do vento no referencial $\vec{\mathcal{F}}_{\text{frd}}$.

As unidades utilizadas comumente são m/s, ft/s ou knots (lê-se “nós”. 1 knot = 0,5144 m/s = 1,6878 ft/s) para cada componente.

Incorporação do Vento em um Diagrama de Simulação I

- O vetor $w_{atm/tp}^{tp}$ representa 3 (três) **novas entradas** que afetam a dinâmica da aeronave, pois os valores de velocidade de deslocamento da massa de ar em cada direção são, em princípio, arbitrários.



Incorporação do Vento em um Diagrama de Simulação II

- Essas novas entradas devem produzir modificações nas forças e momentos que são dependentes da velocidade da aeronave em relação à massa de ar, como por exemplo:
 - Força de arrasto, força lateral e força de sustentação (forças aerodinâmicas).
 - Força de tração, em modelos de força propulsiva baseados na variação de momento linear da massa de ar empurrada para trás pelo propulsor (do tipo hélice, *turbofan*, *ramjet*, etc).
 - Componentes aerodinâmicas dos momentos de rolamento, arfagem e guinada.

Incorporação do Vento em um Diagrama de Simulação III

Como fazer?

- 1 Crie um único subsistema/bloco/rotina no ambiente de simulação para cálculo das seguintes variáveis, **considerando as entradas de vento**:
 - 1 Velocidade total em relação à atmosfera: V_T' .
 - 2 Pressão dinâmica: $\bar{q}' = \frac{1}{2}\rho (V_T')^2$.
 - 3 Ângulo de ataque: α' .
 - 4 Ângulo de derrapagem: β' .
- 2 Use estas variáveis no cálculo das forças e momentos que dependem da velocidade da aeronave em relação à atmosfera:

$$\mathbf{F}_{\text{aero}}^w = \begin{bmatrix} -D \\ C \\ -L \end{bmatrix} = \bar{q}' S_w \begin{bmatrix} -C_D(\alpha', \beta', \dots) \\ C_C(\alpha', \beta', \dots) \\ -C_L(\alpha', \beta', \dots) \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{M}_{\text{aero}}^{\text{frd}} = \begin{bmatrix} \ell \\ m_a \\ n \end{bmatrix} = \bar{q}' S_w \begin{bmatrix} bC_\ell(\alpha', \beta', \dots) \\ \bar{c}C_m(\alpha', \beta', \dots) \\ bC_n(\alpha', \beta', \dots) \end{bmatrix},$$

Cálculo de V'_T , $\bar{q}'$, α' e β' I

O cálculo dos valores perturbados pelo vento para a velocidade total V'_T da aeronave em relação à atmosfera, e dos ângulos de ataque α' e de derrapagem β' pode ser realizado da seguinte maneira:

- 1 Considerando que estão disponíveis na simulação as componentes U , V e W da velocidade da aeronave em relação ao solo $\mathbf{v}_{\text{cm/tp}}^{\text{frd}}$, representada no referencial $\vec{\mathcal{F}}_{\text{frd}}$, tem-se que a velocidade da aeronave em relação à atmosfera será:

$$\begin{aligned}\mathbf{v}_{\text{cm/atm}}^{\text{frd}} &= \mathbf{v}_{\text{cm/tp}}^{\text{frd}} - \mathbf{w}_{\text{atm/tp}}^{\text{frd}}, \\ \mathbf{v}_{\text{cm/atm}}^{\text{frd}} &= \mathbf{v}_{\text{cm/tp}}^{\text{frd}} - C_{\text{frd/tp}} \mathbf{w}_{\text{atm/tp}}^{\text{tp}}.\end{aligned}$$

$$\mathbf{v}_{\text{cm/atm}}^{\text{frd}} = \begin{bmatrix} U' \\ V' \\ W' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} - C_{\text{frd/tp}} \begin{bmatrix} w_N \\ w_E \\ w_D \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_g \\ v_g \\ w_g \end{bmatrix} \quad (1)$$

Cálculo de V'_T , $\bar{q}'$, α' e β' II

2 Consequentemente:

$$V'_T = \sqrt{(U')^2 + (V')^2 + (W')^2},$$

$$\bar{q}' = \frac{1}{2} \rho (V'_T)^2,$$

$$\alpha' = \text{atan2}(W', U'),$$

$$\beta' = \text{asin}\left(\frac{V'}{V'_T}\right).$$

(2)

Section 2

Vento Médio ou em Regime Estacionário

Vento Médio – Mean Wind

Trata-se da parcela de vento que permanece constante ao longo do tempo ou varia somente com a altitude.

Considere, por exemplo, um vento vindo da direção Noroeste, “soprando” com velocidade média de 10 m/s:

$$\begin{bmatrix} w_N \\ w_E \\ w_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{50} \\ \sqrt{50} \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \left\| \mathbf{w}_{\text{atm}/\text{tp}}^{\text{tp}} \right\| = 10 \text{ m/s}, \quad \forall t \geq 0.$$

Considera-se para fins de análise em Engenharia que a intensidade do vento médio varia apenas com a altitude:

- Portanto, para voos em altitude aproximadamente constante, tem-se um vetor constante de entradas de perturbação durante todo o período de simulação.

Variação Espacial do Vento Médio – Wind Shear/Vector Shear

- Embora se utilize em Língua Portuguesa os termos “Cortante” ou “Tesoura” de vento, usa-se a expressão *Wind Shear*, de acordo com [1], para se descrever a variação da **magnitude** do vento médio ao longo do espaço.
- Similarmente, usa-se a expressão *Vector Shear* para se descrever a variação de **direção** do vento médio ao longo do espaço.

Variação Espacial do Vento Médio – Baixa Altitude I

- A variação da velocidade do vento estacionário ou médio com a altitude está associada à existência de uma “camada limite” da troposfera, na interface entre o solo e a atmosfera.
- Isso é importante quando se está considerando condições de voo próximas ao solo (abaixo de 300 m), ou seja, baixas altitudes.

Variação Espacial do Vento Médio – Baixa Altitude II

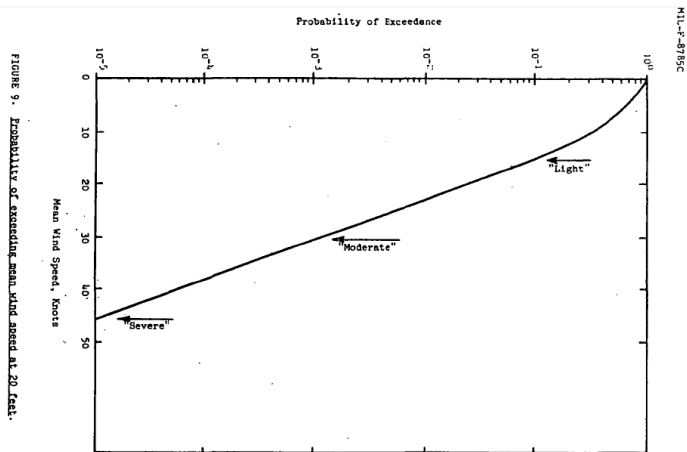
- Neste caso recorre-se a perfis normalizados de variação da intensidade de vento estacionário, como por exemplo aquele descrito na norma militar [2, Seção 3.7.3, *Low-altitude disturbance model*]:

$$\left\| \mathbf{w}_{\text{avg,atm/tp}}^{\text{tp}} \right\| = V_{20} \frac{\ln \left(\frac{h}{z_0} \right)}{\ln \left(\frac{20}{z_0} \right)}, \quad (3)$$

em que h é a altura em relação ao solo em ft; V_{20} é a intensidade de vento em ft/s na altura de 20 ft (≈ 6 m, que é a altura padrão de torres com anemômetros nos EUA); e $z_0 = 0,15$ ft caso se esteja analisando uma fase de voo categoria C (como pouso, decolagem ou aproximação), ou $z_0 = 2$ ft nos outros casos.

- O valor de V_{20} deve ser escolhido entre 0 e aprox. 45 ft/s (13,7 m/s), considerando condições de vento leves, moderadas ou severas, como mostrado no gráfico a seguir.

Variação Espacial do Vento Médio – Baixa Altitude III

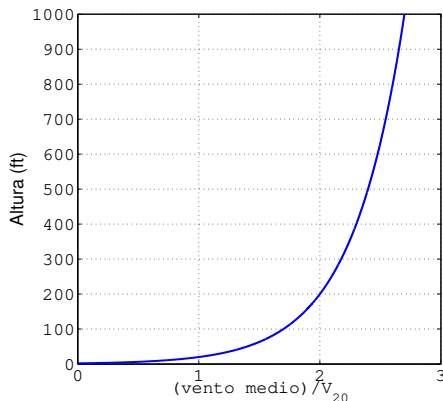


Essa figura mostra, por exemplo, que um vento médio de 30 ft/s (aprox. 9,1 m/s) é considerado uma condição de “vento moderado”.

E a baixa probabilidade ($\approx 10^{-5}$) de exceder o valor de 45 ft/s em condições normais, mostra que um vento dessa magnitude indica uma condição “severa”.

Variação Espacial do Vento Médio – Baixa Altitude IV

O gráfico abaixo mostra a variação da razão entre a velocidade média do vento em baixa altitude e o seu valor na altura de 20 ft, dada pela equação (3):



Variação Espacial do Vento Médio – Baixa Altitude V

Ainda, no caso de baixas altitudes, pode-se considerar a ocorrência de *Vector shear*, que são mudanças abruptas na direção do vento médio. A norma MIL-F-8785C recomenda que:

- 1 Para distúrbios atmosféricos “leves”, tais mudanças abruptas de direção de vento médio não devem ser consideradas;
- 2 Para distúrbios atmosféricos “moderados”, deve-se considerar mudanças abruptas de 90° de rotação em torno do eixo Z, na altura de 600 ft;
- 3 Para distúrbios atmosféricos “severos”, deve-se considerar mudanças abruptas de 90° de rotação em torno do eixo Z, na altura de 300 ft.

Section 3

Rajadas de Vento e Turbulência Atmosférica

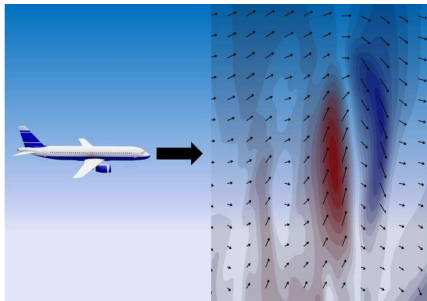
Distribuição Espacial de Velocidades de Vento I

Para as componentes de vento que são variantes no tempo, pode-se considerar principalmente dois tipos de caracterizações:

- Rajadas de vento discretas (*discrete wind gusts*): variações de magnitude **determinísticas** representadas por uma função do tempo; e.g. o perfil “1 - cosseno”;
- Turbulência atmosférica: variações de magnitude **estocásticas** representadas como a saída de filtros apropriados, excitados por sinais de ruído branco de média zero e variância unitária;

Distribuição Espacial de Velocidades de Vento II

Em ambos os casos, a variação das componentes de vento é inicialmente descrita ao longo do espaço, mas se transformam em variações ao longo do tempo devido ao movimento da aeronave no interior desse “campo de velocidades” distribuído espacialmente:



Fonte: phys.org

Essa abordagem para a modelagem dos fenômenos variantes no tempo é conhecida como a hipótese da “atmosfera congelada” (*frozen atmosphere*), em que somente variações espaciais são consideradas.

Rajadas de Vento Discretas I

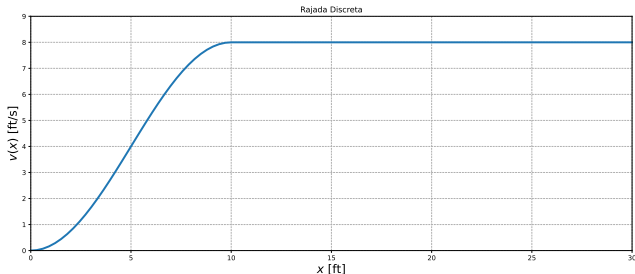
- Na norma MIL-F-8785C [2], rajadas de vento discretas são descritas como a variação da magnitude $v(x)$, para uma ou mais componentes u_g , v_g e w_g , segundo um perfil do tipo “1 - cosseno” [1], que varia ao longo da dimensão espacial $x(t) = \int_{t_0}^{t_0+t} V_T(\tau) d\tau$:

$$v(x(t)) = \begin{cases} 0, & x(t) < 0 \Leftrightarrow t < t_0; \\ \frac{v_m}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi x}{d_m} \right) \right], & 0 \leq x(t) \leq d_m; \\ v_m, & x(t) > d_m, \end{cases}$$

em que d_m é o comprimento da rajada discreta no espaço, e v_m é a intensidade generalizada da rajada de vento.

Rajadas de Vento Discretas II

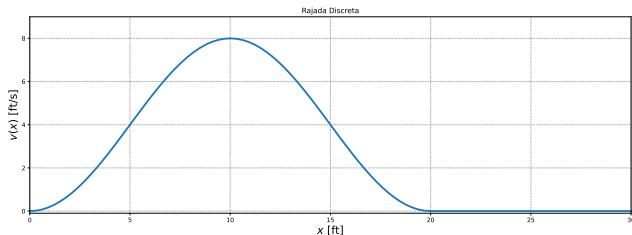
Um perfil da rajada de vento discreta correspondente está mostrado abaixo, em que $v_m = 8$ [ft/s] e $d_m = 10$ [ft]:



Rajadas de Vento Discretas III

- Existem outras possibilidades previstas na norma, como por exemplo:

$$v(x(t)) = \begin{cases} 0, & x(t) < 0 \Leftrightarrow t < t_0; \\ \frac{v_m}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi x}{d_m} \right) \right], & 0 \leq x(t) \leq 2d_m; \\ 0, & x(t) > 2d_m, \end{cases}$$



Rajadas de Vento Discretas IV

- Os parâmetros da rajada discreta de vento devem ser escolhidos da seguinte forma:
 - O comprimento d_m deve produzir um sinal no tempo que excitará ao máximo os modos de resposta da aeronave para uma dada velocidade média V_T ; isto é, o conteúdo espectral do sinal correspondente no tempo deve excitar as frequências de interesse.
 - A intensidade generalizada de vento v_m deve ser selecionada de acordo com os dados na Figura 1, considerando a altitude e a intensidade “leve”, “moderada”, ou “severa”; ou a altitude e a probabilidade de exceder um determinado valor de velocidade de vento.

Rajadas de Vento Discretas V

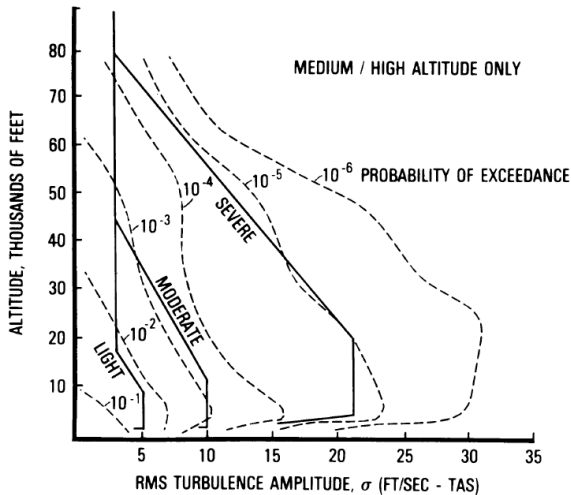


Figura: Intensidades de turbulência versus altitude.

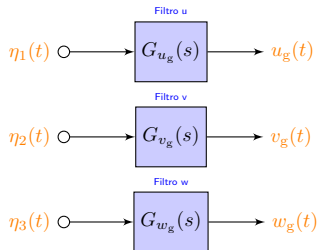
Turbulência Atmosférica I

Considera-se a turbulência de céu claro (*Clear Air Turbulence* – CAT) como um fenômeno estocástico, onde as seguintes suposições são feitas para gerar um modelo razoavelmente acurado do movimento real da atmosfera:

- Apesar de a turbulência estar distribuída espacialmente e temporalmente, considera-se apenas sua distribuição espacial (hipótese da “atmosfera congelada”).
- A turbulência é isotrópica, i.e. suas propriedades estocásticas são as mesmas em qualquer direção do espaço.
- O processo estocástico que representa as variações de intensidade de u_g , v_g , e w_g é estacionário, ergódico, de média zero, Gaussiano, e corresponde à produção de ruído colorido com potência espectral que se aproxima da distribuição de potência espectral descrita por um dos modelos abaixo [2]:
 - 1 Dryden,
 - 2 Von Kármán.

Tubulência – O modelo de Dryden I

- Apesar de se poder usar dois modelos diferentes, somente para o **modelo de Dryden** é possível encontrar funções de transferência rationais exatas, no domínio s , que representam o processo de filtragem do ruído branco:



em que $\eta_1(t)$, $\eta_2(t)$, e $\eta_3(t)$ são sinais aleatórios Gaussianos de média zero e variância unitária. É importante que sejam usados sinais independentes como fontes para os filtros acima, para que a correlação entre os sinais seja nula.

Tubulência – O modelo de Dryden II

- Os filtros têm funções de transferência:

$$\begin{aligned} G_{u_g}(s) &= \sigma_u \sqrt{\frac{2L_u}{\pi V_T}} \left[\frac{1}{1 + \frac{L_u}{V_T} s} \right] \\ G_{v_g}(s) &= \sigma_v \sqrt{\frac{2L_v}{\pi V_T}} \left[\frac{1 + \frac{2\sqrt{3}L_v}{V_T} s}{\left(1 + \frac{2L_v}{V_T} s\right)^2} \right] \\ G_{w_g}(s) &= \sigma_w \sqrt{\frac{2L_w}{\pi V_T}} \left[\frac{1 + \frac{2\sqrt{3}L_w}{V_T} s}{\left(1 + \frac{2L_w}{V_T} s\right)^2} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

em que as escalas de comprimento L_u , L_v , e L_w , e as intensidades σ_u , σ_v , e σ_w dependem da altura h em relação ao solo, e da severidade da turbulência.

Tubulência – O modelo de Dryden III

- É interessante notar que os filtros são, na verdade, Sistemas quase-LPV (Sistemas Lineares a Parâmetros Variantes, em que os parâmetros são funções dos estados do sistema), pois dependem da velocidade V_T , e da altura h em relação ao solo.

Tubulência – O modelo de Dryden IV

- Para **baixas altitudes**, $10 \text{ ft} \leq h \leq 1000 \text{ ft}$, sendo a medida h de altura AGL (*Above Ground Level*):

$$2L_w = h,$$

$$L_u = 2L_v = \frac{h}{(0,177 + 0,000823h)^{1,2}},$$

$$\sigma_w = 0,1V_{20},$$

$$\sigma_u = \sigma_v = \frac{\sigma_w}{(0,177 + 0,000823h)^{0,4}},$$

sendo a velocidade do vento à altura de 20 ft dada por:

- $V_{20} = 15 \text{ kts}$, para turbulência “Leve”.
- $V_{20} = 30 \text{ kts}$, para turbulência “Moderada”.
- $V_{20} = 45 \text{ kts}$, para turbulência “Severa”.

Tubulência – O modelo de Dryden V

- Para **Médias/Altas altitudes**, $h \geq 2000$ ft (AGL):

$$L_u = 2L_v = 2L_w = 1750 \text{ ft},$$

$$\sigma_u = \sigma_v = \sigma_w,$$

sendo que o valor de σ_w é determinado de acordo com a altitude e a severidade da turbulência, ou de acordo com a altitude e a probabilidade de exceder um valor máximo de velocidade de vento em condições normais, como indicado na Figura 1.

- Para valores intermediários $1000 \text{ ft} \leq h \leq 2000 \text{ ft}$ (AGL), as escalas de comprimento L_u , L_v , e L_w , e as intensidades σ_u , σ_v , e σ_w devem ser interpoladas linearmente entre os valores obtidos para baixas altitudes e médias/altas altitudes.

Implementação MATLAB/SIMULINK

No *toolbox* “Aerospace Blockset”, para MATLAB/SIMULINK, encontram-se implementações dos modelos mencionados nestas notas de aula (clique sobre os ícones para ir para a página de documentação):

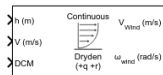
- Rajada de vento discreta:



- Tesoura de vento (*Wind Shear*):



- Turbulência segundo Modelo de Dryden:



Section 4

Bibliografia

Bibliografia I



David J. Moorhouse and Robert J. Woodcock.

Background information and user guide for MIL-F-878SC, military specification: Flying qualities of piloted airplanes.

Technical report, Wright-Patterson Air Force Base, United States Air Force, July 1982.



United States Air Force.

Military Specification MIL-F-8785C: Flying Qualities of Piloted Airplanes, 1980.



United States Air Force, Department of Defense.

Military Standard MIL-STD-1797A: Flying Qualities of Piloted Aircraft, 1990.