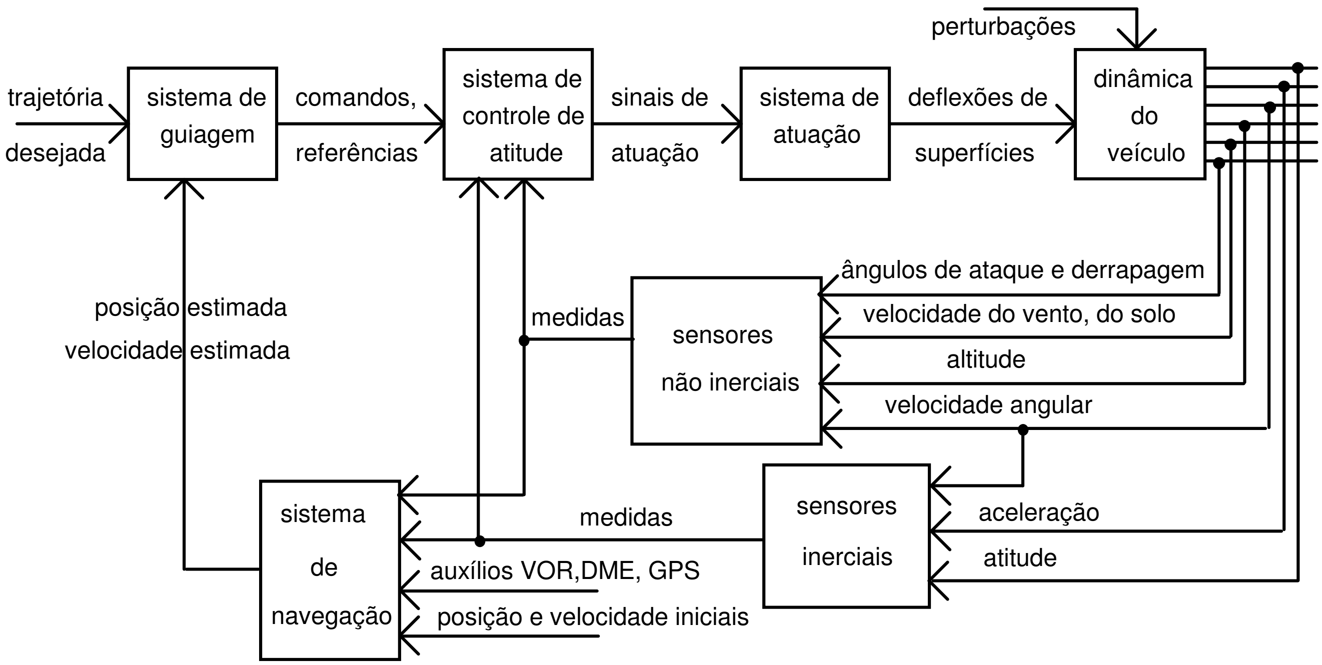
SENSORES INERCIAIS & APLICAÇÕES

Prof. Jacques Waldmann
Dept. Sistemas e Controle
Divisão de Engenharia Eletrônica
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

Julho 2014

INTEGRAÇÃO DE SUBSISTEMAS DE NAVEGAÇAO, GUIAMENTO E PILOTAGEM

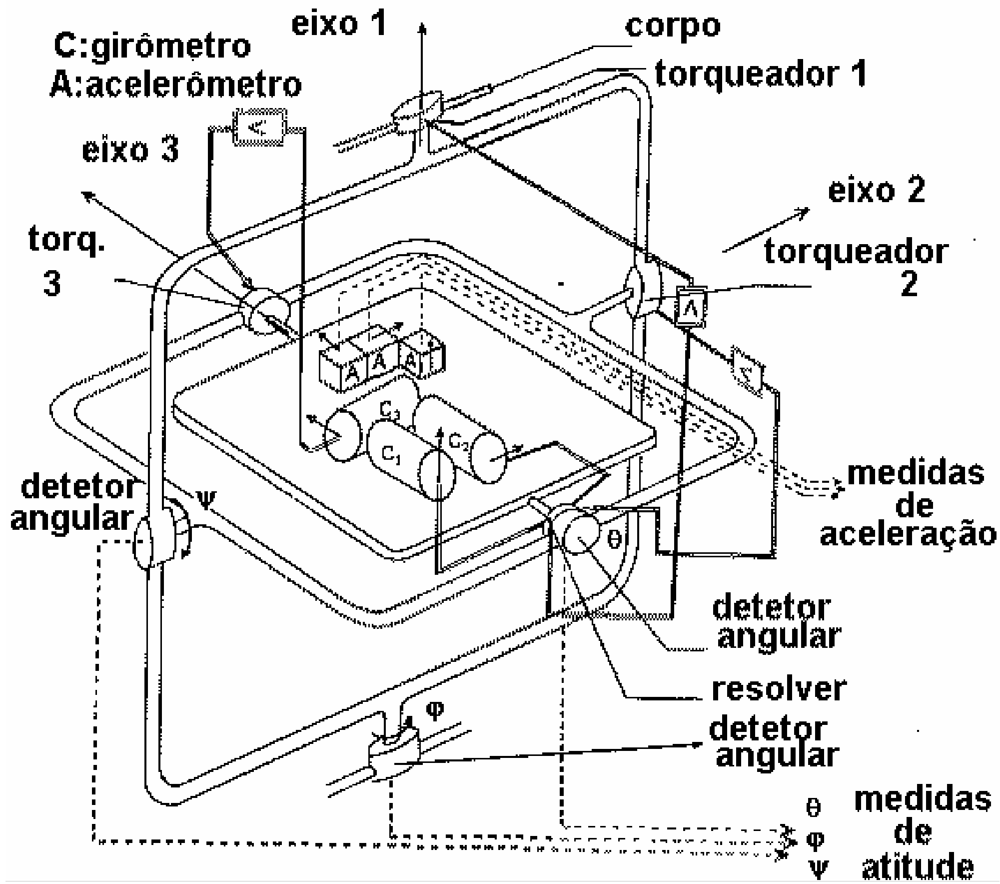


NAV - ESTIMA POSIÇÃO E VELOCIDADE ATUAIS A PARTIR DE MEDIDAS DOS SENSORES

GUI - ESTIMA ACELERAÇÕES, VELOCIDADES REQUERIDAS PARA A REALIZAÇÃO DA MISSÃO

PIL - COMPUTA A DEFLEXÃO DESEJADA DAS SUPERFÍCIES DE ATUAÇÃO
(autopiloto e leis de controle, não só de atitude, mas também de propulsão)

SENSORES INERCIAIS - MEDEM FORÇAS ESPECÍFICAS E VELOCIDADES ANGULARES
(FOG não é sensor inercial, mas mede velocidade angular)



EXEMPLO DE PLATAFORMA ESTABILIZADA MECÂNICAMENTE PARA MEDIDAS INERCIAIS (Como instalar em um navio? Ex.: vide uma possível implementação descrita no material da MB. Funciona nos polos?)

SENSORES INERCIAIS DE FORÇA ESPECÍFICA ACELERÔMETROS

FORÇA ESPECÍFICA:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} = \overset{ii}{\mathbf{R}} - \mathbf{g}_m \qquad [m/s^2]$$

g_m é o vetor gravitação causado pela atração entre massas.

GRANDEZAS MEDIDAS POR OBSERVADOR INERCIAL!

(superscrito "ii" indica segunda derivada temporal observada de referencial inercial)

NÃO É POSSÍVEL DIFERENCIAR OS COMPONENTES DE ACELERAÇÃO INERCIAL DO CORPO E DE ATRAÇÃO GRAVITACIONAL.

(RELATIVISMO)

EXEMPLO 1
OBJETO EM QUEDA LIVRE (não há arrasto; objeto sem girar)

Medida nominal – feita por acelerômetro ideal

$$\ddot{\mathbf{R}} = \mathbf{g_m} \;\; \Rightarrow \mathbf{a} = \mathbf{0}$$

Acelerômetro ideal em queda livre apresenta saída nula.

EXEMPLO 2
OBJETO "APOIADO"

(Veículo translada com velocidade constante – exemplo simplificado: elevador parado, ou subindo/descendo com velocidade constante em prédio de altura "normal" => é razoável considerar g constante)

$$\ddot{\mathbf{R}} = \mathbf{0} \;\; \Rightarrow \mathbf{a} = -\mathbf{g}$$

$$\mathbf{g} = \mathbf{g_m} - \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R})$$

g é o vetor gravidade causado pela combinação vetorial da gravitação com a aceleração centrípeta da rotação da Terra no local do acelerômetro.

Acelerômetro ideal mede o componente da reação à gravidade ao longo de seu eixo sensível.

SENSORES INERCIAIS DE ROTAÇÃO - GIROS ("ANEL" EM GREGO)

1) MASSA GIRANTE - GIRÔMETRO MECÂNICO (CONSERVAÇÃO DE MOMENTUM ANGULAR - PIÃO)

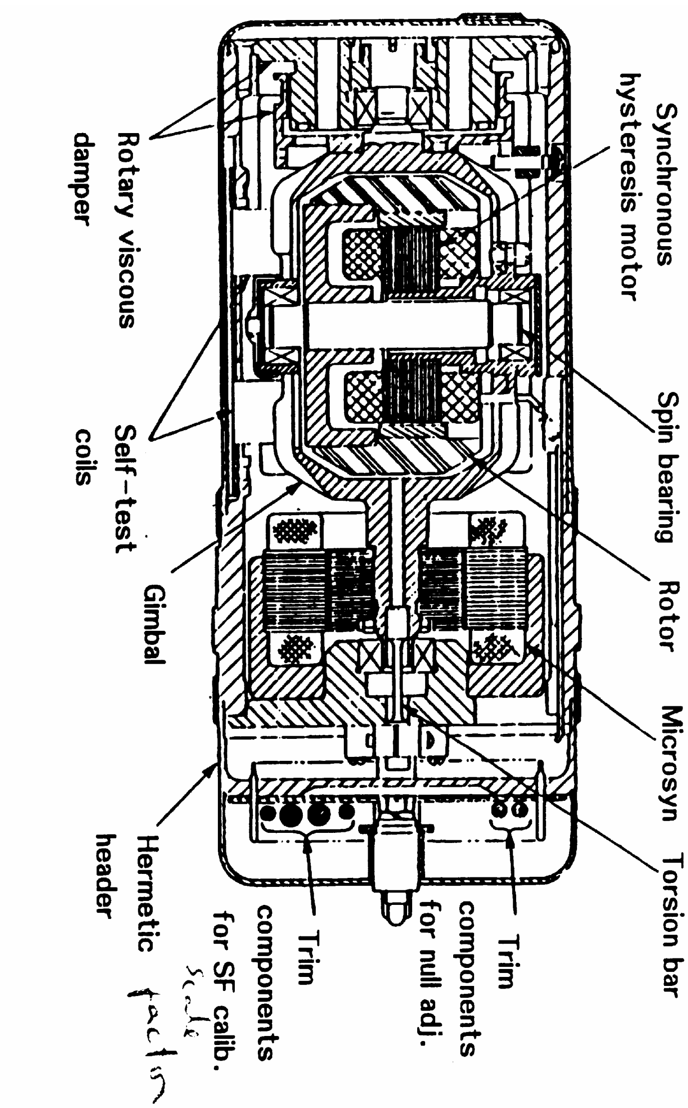


Figure 4.18. Cross section of a conventional single-axis rate gyro RG-1000 (based on Sperry Publication No. 12-1141-01).

2) GIRO À FIBRA ÓPTICA (INVARIÂNCIA DA VELOCIDADE DA LUZ)

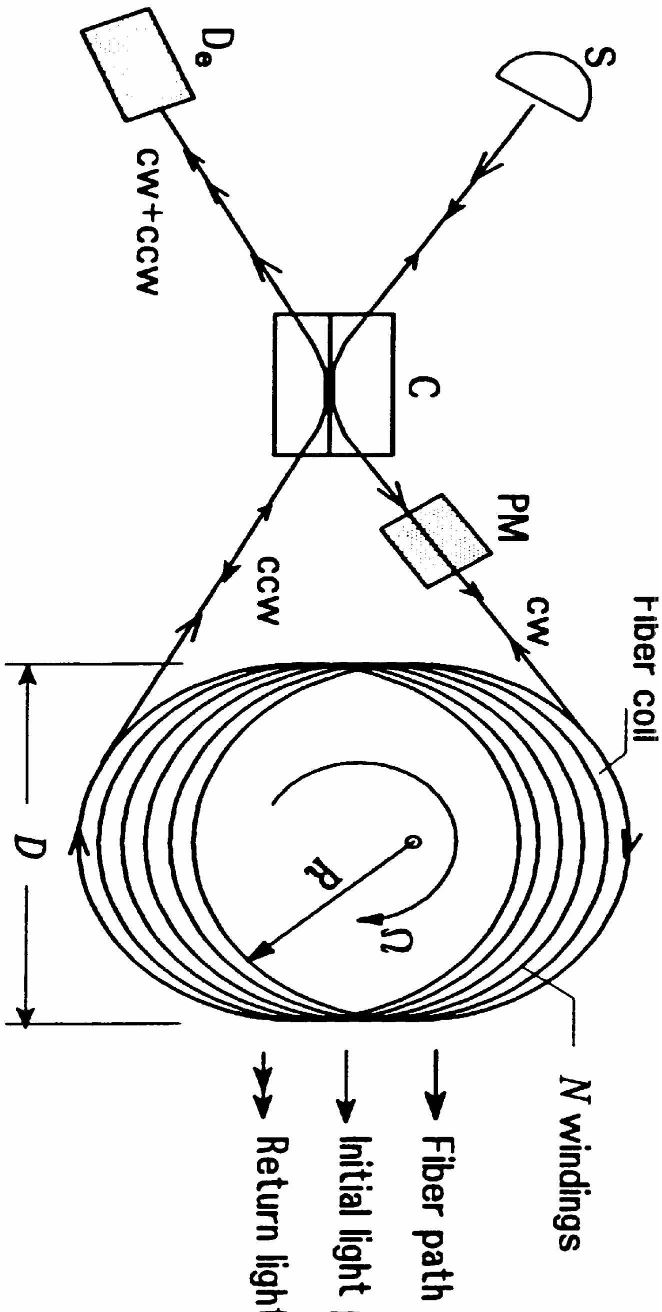


Figure 7.2. Optic fiber realization of the Sagnac interferometer.

SENSORES MEMS
MicroElectroMechanical Systems – fabricado com distintas abordagens, materiais e tecnologias.
Aquisição é fácil
BAIXO CUSTO – BAIXA QUALIDADE
Demanda auxílio externo (GPS, visão, Doppler etc.) para fins de navegação.

Compromissos:

-Banda passante (faixa de passagem, bandwidth):

velocidade de resposta x passagem de ruído de alta frequência

intensidade do ruído x limiar da saída(min|saída|>0)

distorção da resposta dinâmica:

frequência de ressonância deve estar além da faixa de operação.

resposta DC = 0dB

(revisem resposta em frequência de sistema massa-mola-amortecedor).

Faixa de operação - max (|entrada|)

linearidade do fator de escala x distorção de sinal com magnitude elevada.

Faixa dinâmica (dynamic range):

max (|entrada|) / min (|entrada_medida|)

Requerido em aplicações de maior manobrabilidade e que demandam alinhamento inicial acurado em condição estacionária.

Viéses (accelerometer bias, rate-gyro drift) – variam com liga/desliga, tempo de operação e temperatura

Acoplamento cruzado na saída de eixos teoricamente ortogonais entre si

Também:
Resistência às condições de operação: temperatura, vibração, choque

Peso, volume, consumo de potência,

Qualidade da alimentação elétrica,

Interfaces para leitura de sinais de saída e para testes.

MEMS: Vide busca na Internet
Ex.: http://www.sensorsmag.com/sensors/acceleration-vibration/an-overview-mems-inertial-sensing-technology-970

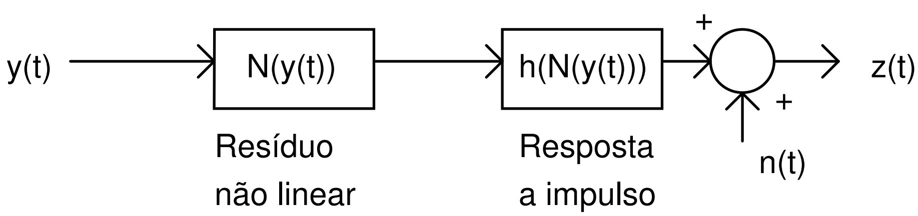
ALGUNS TIPOS DE ERROS

y: GRANDEZA A MEDIR

z: MEDIDA

n: PERTURBAÇÃO

Modelo concentra não linearidade da resposta em N(.) e resposta dinâmica em h(N(.)). Ruído n(t) aditivo.



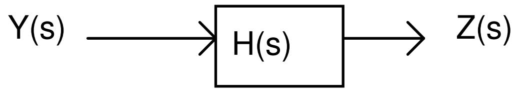
1) ERRO DE NÃO LINEARIDADE (n=0, h(.)=(.))

$$\varepsilon_N = y - z = y - N(y);$$

$$\delta_N = \frac{\varepsilon_N}{y} = 1 - \frac{N(y)}{y}$$

$$\frac{N(y)}{y} \text{ obtido via calibração}$$

2) ERRO DEVIDO À DINÂMICA DO SENSOR
(n=0, N(.)=(.))



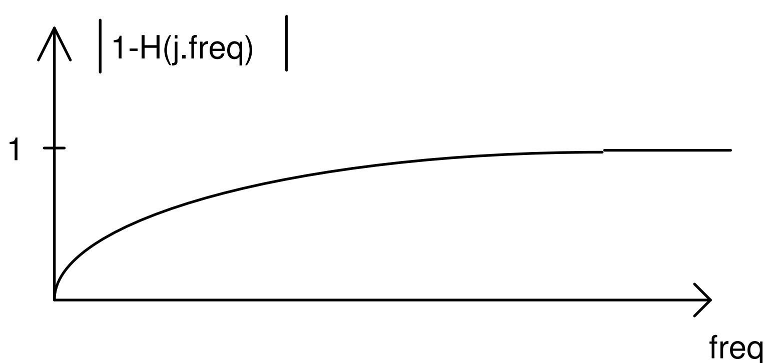
$$\varepsilon_D(t) = y(t) - z(t) = L^{-1}\left[\left(1 - H(s)\right)Y(s)\right]$$

$$L\left[\delta_D(t)\right] = \Delta_D(s) = \frac{L\left[\varepsilon_D(t)\right]}{Y(s)} = 1 - H(s)$$

ERRO RELATIVO LINEAR, INDEPENDE DA AMPLITUDE DA GRANDEZA A MEDIR

EXEMPLO: SENSOR MODELADO COM DINÂMICA LINEAR DE PRIMEIRA ORDEM:

$$H(s) = \frac{1}{1+\tau s} \Rightarrow \Delta_D(s) = 1 - \frac{1}{1+\tau s} = \frac{\tau s}{1+\tau s}$$



PODE IMPACTAR ESTABILIDADE E DESEMPENHO DO SISTEMA DE CONTROLE EM MALHA FECHADA?

3A) ERRO DE RUÍDO ADITIVO

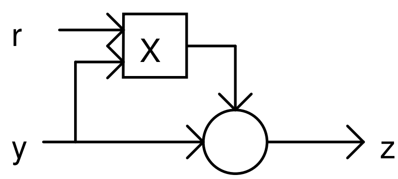
(N(.)=(.), h(.)=(.))

$$\varepsilon_n = y - z = -n; \qquad \delta_n = \frac{-n}{y}$$

Se $E[n] \neq 0 \Rightarrow$ viés a estimar e subtrair $\Rightarrow$ calibrar

$$RMS(\delta_n) = \frac{\sqrt{E[n^2]}}{\sqrt{y^2}}$$

3B) ERRO DE RUÍDO MULTIPLICATIVO



$$\varepsilon_r = y - z = y - (y + ry) = -ry \Rightarrow \delta_r = \frac{-ry}{y} = -r$$

(ERRO DE FATOR DE ESCALA A CALIBRAR)

SENSOR IDEAL:

FAIXA DE OPERAÇÃO INFINITA E LINEAR

FAIXA INFINITA DE VALORES DE SAÍDA

RESOLUÇÃO INFINITA, LIMIAR NULO

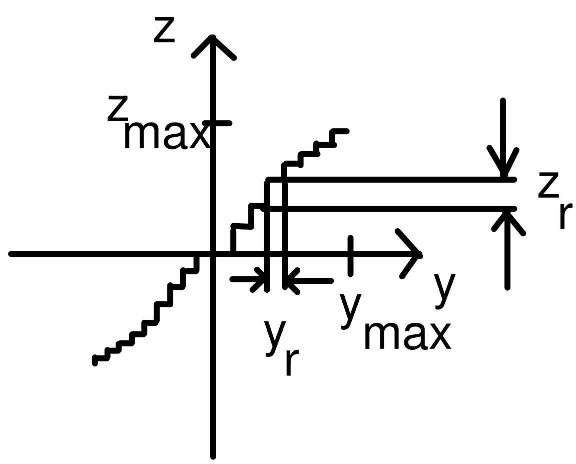
OPERAÇÃO LINEAR: $\lim\limits_{\Delta y \to 0} \frac{\Delta z}{\Delta y} = \text{constante } \forall y$

SENSOR REAL:

FAIXAS FINITAS DE OPERAÇÃO LINEAR E DE VALORES DE SAÍDA

RESOLUÇÃO FINITA

NÃO LINEAR



$$y_r = \text{constante}, \forall\, y \in [\, y_{\min}, y_{\max}] \Rightarrow \text{resolução uniforme}$$

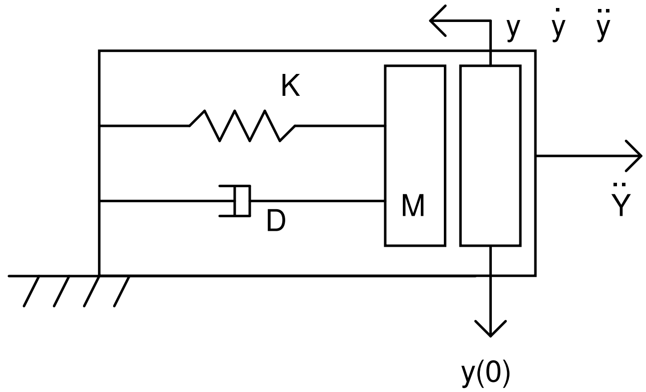
FAIXA DINÂMICA: $D_r = \dfrac{y_{\max}}{y_r} = \dfrac{z_{\max}}{z_r}$

CONTROLE DE ATITUDE (PIL): D_r=10^2 A 10^3

GUIAMENTO: D_r=10^3 A 10^4 - BOA QUALIDADE

NAV INERCIAL LONGA DURAÇÃO: D_r=10^4 A 10^8 ÓTIMA QUALIDADE

MODELAGEM DE ACELERÔMETROS EMPREGANDO DEFLEXÃO DE MASSA (MASSA – MOLA – AMORTECEDOR)



$$M(\ddot{Y} - \ddot{y}) = Ky + D\dot{y}$$

Sejam as transformadas de Laplace:

$\ddot{Y}(s) = L[\ddot{Y}(t)]\,;\; Y(s) = L[y(t)]$ **(atenção à notação)**

$$\Rightarrow \frac{Y(s)}{\ddot{Y}(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{D}{M}s + \frac{K}{M}} = \frac{1}{(s + \omega_n\zeta + j\omega_d)(s + \omega_n\zeta - j\omega_d)}$$

$$\omega_n = \sqrt{K/M}\,;\; \zeta = \frac{D}{2\sqrt{KM}}$$

Em regime e usando a transformação inversa:

$$\lim_{s\to 0} \frac{Y(s)}{\ddot{Y}(s)} = \frac{M}{K} \quad \Rightarrow \; y(t) = \frac{M}{K}\ddot{Y}(t)$$

MEDIÇÃO DE $y(t)$ **ASSUME QUE A RESPOSTA DINÂMICA DO SENSOR É BEM MAIS RÁPIDA QUE O SINAL A MEDIR** $\Rightarrow$ **FREQUÊNCIA NATURAL DO SENSOR É BASTANTE MAIOR QUE A MAIOR FREQUÊNCIA DO SINAL A MEDIR :**

$$z(t) = \frac{M}{K}\ddot{Y}(t) + n(t)$$

CONSIDERANDO ATRITO SECO ($F_{a.s.}$):

$$z(t) = \frac{M}{K}\ddot{Y}(t) + \frac{F_{a.s.}}{K} + n(t)$$

1) REDUZIR EFEITO DE $F_{a.s.}$ $\Rightarrow$ AUMENTAR K

2) AUMENTO DE K REDUZ FATOR DE ESCALA!

3) PEQUENA DEFLEXÃO y $\Rightarrow$ MEDIDA z PEQUENA PODE SER MASCARADA PELA RESOLUÇÃO z_r ($D_r = \frac{z_{\max}}{z_r}$)

4) AUMENTO DE M IMPLICA EM SENSOR COM MAIORES PESO E VOLUME

PORTANTO, SENSOR LEVE E PEQUENO REQUER BAIXO ATRITO SECO E PEQUENO RUÍDO n.

SENSIBILIDADE ESTÁTICA S

$$S = \frac{y_{max}}{a_{max}} = \frac{y_r D_r}{\ddot{Y}_{max}} = \lim_{s\to 0} \frac{Y(s)}{\ddot{Y}(s)} = \frac{M}{K} = \frac{1}{\omega_n^{\ 2}}$$

Aumento da frequência natural aumenta a faixa de operação (a_{max}) e reduz o erro dinâmico, mas aumenta a passagem de ruído ⇒ prejudica o limiar de resposta (pois y_r e D_r não mudaram) e também reduz a sensibilidade estática.

EXEMPLO DE ESPECIFICAÇÃO:

DESEMPENHO DINÂMICO

$$\frac{\omega_n}{2\pi} = f_n \in [20{,}50]Hz;\ \zeta \in [0{,}5\,;0{,}8](\zeta = 0{,}7)$$

DESEMPENHO ESTÁTICO

$$a_{\max} = 10g;\ D_r = \frac{a_{\max}}{a_r} = \frac{y_{\max}}{y_r} \in [100;1000](D_r = 1000)$$

LIMITAÇÕES FÍSICAS

$$M < 20.10^{-3}\,kg\,;\ \mathrm{y_r} = 0{,}5.10^{-5}\,m$$

PORTANTO,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{a_{\max}}{y_r D_r}} = \sqrt{\frac{10.9{,}81}{0{,}5.10^{-5}.1000}} = 140\,rd/s = 22{,}3\,Hz \ \textbf{(ok)}$$

$$K = M\omega_n^{\ 2} = 392\,N/m(400\,grf/cm)$$

$$D = 2\zeta\sqrt{KM} = 2\zeta M\omega_n = 3{,}92\,N.s/m(4\,grf.s/cm)$$

OBSERVAR QUE:

AUMENTAR FREQUÊNCIA NATURAL ω_n **(22,3Hz)**

$\Rightarrow$

$$S = \frac{y_{max}}{a_{max}} = \frac{M}{K} = \frac{1}{\omega_n^{\ 2}}$$

AUMENTO DA ACELERAÇÃO MÁXIMA MENSURÁVEL a_{max} **(10g)**

$\Rightarrow$

REDUÇÃO DA SENSIBILIDADE ESTÁTICA S

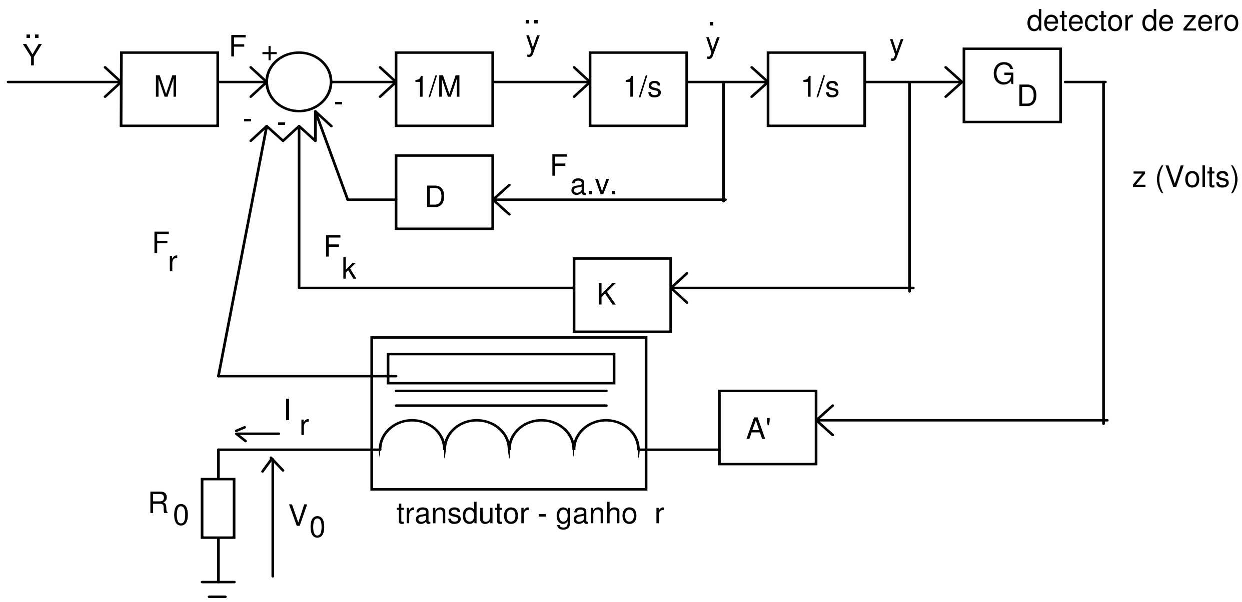
PORTANTO, MENORES DEFLEXÕES OCORRERÃO E AUMENTARÁ O LIMIAR DE ACELERAÇÃO MENSURÁVEL $a_r = \frac{a_{max}}{D_r}$ **(0,01g)**

ω_n, D_r **SÃO PARÂMETROS DE PROJETO QUE REQUEREM COMPROMISSO.**

EX: NAV INERC.: $f_n > 800Hz;\ D_r = 10^4$

REQUER ACELERÔMETRO BASEADO EM EQUILÍBRIO DE FORÇAS

ACELERÔMETRO BASEADO EM EQUILÍBRIO DE FORÇAS (PEQUENA DEFLEXÃO DA MASSA)



$$M(\ddot{Y}-\ddot{y}) = Ky + D\dot{y} + G_D A' r y$$

$$\Rightarrow \frac{Y(s)}{\ddot{Y}(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{D}{M}s + \frac{K + G_D A' r}{M}}$$

$$V_0 = G_D y A' R_0 \Rightarrow V_0(s) = G_D A' R_0 Y(s)$$

EM REGIME: $\lim\limits_{s\to 0} V_0(s) = \dfrac{G_D A' R_0 M \ddot{Y}(s)}{K + G_D A' r}$

PARA $G_D A' r >>> K$: $\lim\limits_{s\to 0} V_0(s) = \dfrac{R_0 M \ddot{Y}(s)}{r}$

1) QUASE NÃO HÁ DEFLEXÃO DA MASSA!

2) A SAÍDA É A CORRENTE NO TRANSDUTOR

3)FATOR DE ESCALA É CONTROLADO PELA SINTONIA DA CARGA R_0

4) ESTABILIDADE DOS PARÂMETROS r E R_0 É CRÍTICA

5) Keq AUMENTA => AUMENTAR A FREQÜÊNCIA NATURAL REQUER REDUÇÃO DO NÍVEL DE RUÍDO PARA REDUZIR O LIMIAR DE RESOLUÇÃO E ASSIM AUMENTAR A FAIXA DINÂMICA.

RESUMO:

A MODELAGEM DOS ERROS EM SENSORES INERCIAIS PERMITE PREVER O DESEMPENHO ALCANÇÁVEL PELOS SISTEMAS QUE OS UTILIZAM, CONSIDERANDO-SE A RAZÃO CUSTO/BENEFÍCIO DOS SENSORES E DOS ALGORITMOS QUE PROCESSAM SEUS SINAIS.

AS DISCIPLINAS DE GUIAMENTO E PILOTAGEM (EE294) E DE SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO INERCIAL E AUXILIADOS POR FUSÃO SENSORIAL (EE295) NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO (ÁREA DE SISTEMAS E CONTROLE – IEES) SE OCUPAM DESSAS E DE OUTRAS MATÉRIAS RELACIONADAS.