

8,0

Modelagem e análise de estabilidade de um sistema gerador de energia eólica

1st Andrea Mara Weber

Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Pato Branco, Brasil
andreaweber@alunos.utfpr.edu.br

2th Kathleen Karoline Kemer

Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Pato Branco, Brasil
kathleens@alunos.utfpr.edu.br

3th Wesley Augusto Catuzzo

Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Pato Branco, Brasil
wesleybona@alunos.utfpr.edu.br

4th Lucas Mascarenhas Coelho

Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Pato Branco, Brasil
lucascoelho@alunos.utfpr.edu.br

→ só falta colocar resultado aqui

Abstract—O presente artigo discute a modelagem, os resultados de simulações, bem como a análise de estabilidade do sistema mecânico de um gerador de energia eólica. É apresentado a modelagem no domínio do tempo para o sistema da turbina e o sistema do gerador. Foi também realizada uma análise da estabilidade do sistema em malha aberta e malha fechada, também como seus parâmetros e implicações. Ao final, conclui-se que a o sistema aerodinâmico com velocidade constante é um sistema estável.

Index Terms—gerador, energia eólica

NOMENCLATURA

ρ	densidade do ar.
v	velocidade do vento.
A	área de varredura da hélice.
T_a	torque da turbina.
β	ângulo de inclinação da pá do rotor.
γ	velocidade da ponta da pá do rotor
C_p	coeficiente de potência, uma função não-linear.
R	raio do rotor.
T_l	torque do gerador.
ω_T	velocidade angular do rotor.
J_r	momento de inércia do rotor.
B_r	amortecimento do rotor.
T_{ls}	torque da haste de baixa velocidade.
J_{ls}	momento de inércia da haste de baixa velocidade.
B_{ls}	amortecimento sobre a haste de baixa velocidade.
ω_{ls}	velocidade angular da haste de baixa velocidade.
J_g	momento de inércia do gerador.
ω_g	velocidade angular do gerador.
B_g	amortecimento sobre a haste de alta velocidade.
T_{hs}	torque da haste de alta velocidade.
T_{em}	torque eletromagnético do gerador.

→ ok! contextualizado

I. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia e a necessidade de se pensar em sustentabilidade, o uso de fontes renováveis de energia faz-se necessário, devido aos ganhos ambientais que estes proporcionam, como também pelo aumento da competitividade no mercado, causada pela produção e comercialização dos mesmos [1]. Com isso, surge a oportunidade de discutir a utilização de geradores de energia eólica, pois a mesma é uma fonte de energia limpa e renovável, e além disso, o atlas do potencial eólico nacional indica que há grandes oportunidades de expansão dos parques de geração em território brasileiro, pois o potencial estimado para o país é da ordem de 143 GW, proporcional a 11 usinas hidroelétricas de Itaipu [1]. Os objetivos deste artigo são (i) apresentar a modelagem de um gerador de energia eólica no domínio do tempo e (ii) a modelagem no domínio da frequência para um modelo aerodinâmico linearizado. (iii) Discutir os resultados obtidos por meio de simulações e suas implicações, além de definir (iv) a estabilidade do sistema mecânico para malha aberta e (v) malha fechada. O artigo é organizado da seguinte forma: A seção II apresenta uma revisão de outros trabalhos sobre geradores de energia eólica. Na seção III é descrita a metodologia utilizada neste trabalho. Os resultados obtidos são apresentados na seção IV. Por fim, a conclusão do seguinte trabalho é apresentada na seção V.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Os sistemas de geração de energia eólica são constituídos de: uma turbina eólica, um gerador elétrico, um conversor eólico, um conversor eletrônico de potência e um sistema de controle correspondente [1]. De maneira que, o subsistema aerodinâmico transfere energia para o subsistema mecânico, que consequentemente transfere energia para o subsistema elétrico [2]. Porém, para simplificar a modelagem e análise de estabilidade deste sistema gerador, optou-se por concentrar o presente trabalho na modelagem dos subsistemas

aerodinâmico e mecânico, tomando como base o modelo de duas massas. Além do mais, para realizar a modelagem do subsistema aerodinâmico, é necessário realizar uma linearização do sistema, pois a geometria das lâminas da hélice sofre perturbações causadas pelo contato com o vento [3]. Por fim, a modelagem do sistema mecânico se inicia pelo somatório dos torques presentes no sistema, se baseando na segunda lei de Newton, resultando na modelagem matemática do sistema no domínio do tempo, representada por um sistema linear de equações diferenciais [2].

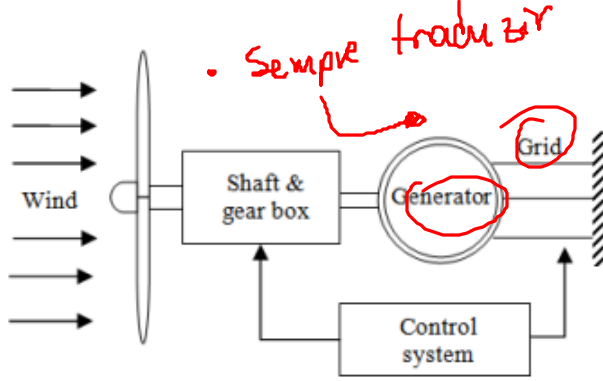


Fig. 1. Modelagem do gerador de energia eólica. Fonte: Mechanical Modeling of Wind Turbine Comparative Study

III. MODELAGEM DO GERADOR DE ENERGIA EÓLICA

A. A turbina eólica

É importante destacar que há diferentes tipos de turbinas eólicas, as turbinas de eixo vertical e as turbinas de eixo horizontal. Sendo o segundo modelo, o mais usado pela indústria, pois como descrito pela literatura, as turbinas de eixo vertical possuem um arranque de torque muito baixo, como também problemas de estabilidade [3].

A turbina eólica é um sistema complexo e não-linear, mas neste trabalho o modelo de turbina receberá uma abordagem mais simplificada, portanto, a característica não-linear do sistema será tratada como constante. A análise do sistema aerodinâmico se inicia pelas hélices, pois a energia cinética obtida do contato das hélices com o vento é transformada em um torque mecânico T_a , que será a entrada do sistema escolhido [3]. A equação de potência obtida do contato do vento com as hélices é descrita na seguinte equação [4]:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho A v^3 \quad (1)$$

Baseando-se nisso, a turbina consegue extrair parte da potência P_a gerada pelo contato das hélices com o vento, essa relação é representada pela seguinte equação [4]:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho A v^3 C_p(\gamma, \beta), \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\omega_T R}{v}, \quad (3)$$

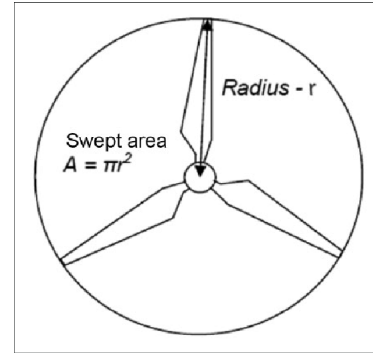


Fig. 2. Área percorrida pelas hélices da turbina. Fonte: Wind Energy

É necessário notar que devido à natureza não-linear do coeficiente de potência da turbina C_p , também conhecido por coeficiente de Betz, a geometria das pás da hélice é afetada pela torção decorrente do atrito com o vento, podendo causar uma rotação no próprio eixo e oscilações na estrutura do gerador. Portanto, é possível assumir que o coeficiente de potência nos diz a eficiência da turbina em converter a energia eólica em energia elétrica [5]. À vista disso, para simplificar a modelagem desse sistema, optou-se por desconsiderar tais perturbações.

Ao entrar em contato com as hélices do gerador, o vento exerce componentes vetoriais sobre elas, no mesmo plano das hélices, definindo um sistema rotativo. Consequentemente, o eixo possui um deslocamento angular próprio, que por conseguinte, possui velocidade e aceleração, resultando em um torque T_a . Desconsiderando possíveis perturbações, pode-se representar o torque gerado do contato da turbina com o vento, o qual é a entrada do sistema estudado, a partir da seguinte equação [5]:

$$T_a = \frac{\rho \pi R^5 \omega_T^2 C_p}{2 \lambda^3 R}, \quad (4)$$

B. Modelagem do subsistema aerodinâmico linearizado

Outrossim, o torque do subsistema aerodinâmico T_a , deve possuir um torque oposto e de mesma magnitude correspondente ao eixo do gerador, T_l , para que a turbina opere em velocidade constante. Caso contrário, se T_a for maior que T_l , a turbina irá acelerar, como também, caso T_l seja maior que T_a , a turbina irá desacelerar. A seguinte equação descreve o somatório dos momentos de inércia [3]:

$$JT \dot{\omega}_T = T_a - T_l, \quad (5)$$

T_l é o torque mecânico necessário para operar o gerador, que por ora, assume-se um valor constante para o mesmo, derivado das propriedades físicas da turbina eólica [3]. Além do mais, como já salientado, devido às propriedades não-lineares do torque aerodinâmico, o mesmo será linearizado. Portanto, assumindo que o torque T_a operacional é equivalente ao torque T_l operacional, resultando na seguinte equação [3]:

$$\dot{\omega}_T = \alpha \Delta u + \gamma \Delta \omega + \delta \Delta \beta, \quad (6)$$

- α coeficiente arbitrário.
- γ coeficiente arbitrário.
- δ coeficiente arbitrário.

A partir da equação linearizada (6), pode-se aplicar a transformada de Laplace e obter a seguinte equação [3]:

$$\Delta\omega_T = [\alpha\Delta u(s) + \delta\Delta\beta(s)] \times \frac{1}{s - \gamma}, \quad (7)$$

Reorganizando os termos, obtém-se a seguinte função de transferência:

$$Gp(s) = \frac{\Delta\omega_T(s)}{\alpha\Delta u + \delta\Delta\beta} = \frac{\Delta\omega_T(s)}{(\Delta T_a/J_T)} = \frac{1}{s - \gamma}, \quad (8)$$

C. Modelagem do subsistema mecânico

Segundo a literatura, a energia cinética obtida através do contato das hélices com o vento é transformada num torque mecânico aplicado ao eixo do rotor da turbina eólica, que é também transferido para o eixo do sistema mecânico [3]. Além do mais, a grande maioria dos controladores funciona melhor com turbinas de alta flexibilidade, as quais não podem ser modeladas com menos de duas massas [2]. Esse modelo pode ser representado através da seguinte figura:

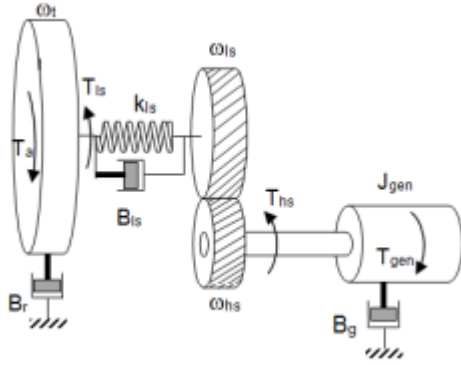


Fig. 3. Representação do subsistema mecânico. Fonte: Mechanical Modeling of Wind Turbine Comparative Study

O sistema mecânico desempenha um grande papel na transformação de energia [2]. Normalmente, as mais simples caixas de transmissão do gerador possuem duas hastes principais: a haste de baixa rotação, a qual está conectada com as pás da hélice da turbina eólica, sendo a responsável por capturar a energia das pás e produzir um movimento rotacional [3]. E a haste de alta rotação, que está conectada diretamente ao eixo do gerador [2], por possuir maior velocidade rotacional, esta segunda haste amplifica a potência produzida pela rotação da primeira. A caixa de transmissão pode ser representada pela figura abaixo:

Para iniciar a modelagem do sistema mecânico, é necessário levar em consideração alguns fatores [2]:

- 1) Considera-se o amortecimento nas lâminas e o amortecimento no gerador.
- 2) Desconsidera-se o impacto da haste de alta velocidade.
- 3) Cancela-se os momentos de inércia das engrenagens.

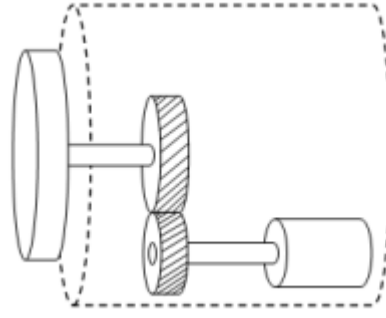


Fig. 4. Caixa de transmissão do subsistema mecânico. Fonte: Mechanical Modeling of Wind Turbine Comparative Study

- 4) Para facilitar a análise de estabilidade do sistema, considera-se uma velocidade fixa para o modelo [3].

Aplicando a segunda lei de Newton para um sistema de corpos em rotação no eixo do rotor, resultando na seguinte modelagem [2]:

$$J_r\dot{\omega}_T + B_r\omega_T = T_a - T_{ls}, \quad (9)$$

A mesma técnica é aplicada para a caixa de transmissão, onde o momento de inércia é cancelado, resultando na seguinte modelagem [2]:

$$J_{ls}\dot{\omega}_T + B_{ls}(\omega_T - \omega_{ls}) + K_{ls}(\theta_t - \theta_{ls}) = T_{ls}, \quad (10)$$

θ_t é o deslocamento angular do rotor.

θ_{ls} é o deslocamento angular da caixa de transmissão.

Como o momento de inércia da engrenagem é cancelado, resultando na seguinte equação [2]:

$$B_{ls}(\omega_T - \omega_{ls}) + K_{ls}(\theta_t - \theta_{ls}) = T_{ls}, \quad (11)$$

Utilizando o mesmo procedimento, obtém-se a seguinte modelagem para o gerador [2]:

$$J_g\dot{\omega}_T + B_g\omega_g = T_{hs} - T_{em}, \quad (12)$$

A velocidade angular da caixa de transmissão é convertida na velocidade angular do gerador através do contato com a haste de alta velocidade, essa conversão pode ser descrita pela seguinte razão [2]:

$$ng = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}}, \quad (13)$$

θ_g é o deslocamento angular da haste de alta velocidade.

θ_{ls} é o deslocamento angular da caixa de transmissão.

Com estas relações, é possível derivar a equação (11) em relação ao tempo, também é possível deixar as equações (9) e (12) em função de t e g , além de fazer uso da razão (13), é possível obter a seguinte matriz [2]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_T \\ \dot{\omega}_G \\ \dot{T}_{ls} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_T \\ \omega_G \\ T_{ls} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix} T_a + \begin{bmatrix} b_{12} \\ b_{22} \\ b_{32} \end{bmatrix} T_{em}, \quad (14)$$

Onde,

$$a_{11} = \frac{-B_r}{J_r}, a_{12} = 0, a_{13} = \frac{-1}{J_r}, a_{21} = 0, a_{22} = \frac{-B_g}{J_g}, \quad (15)$$

$$a_{23} = \frac{1}{n_g J_g}, a_{31} = (K_{ls} - \frac{B_{ls} B_r}{J_r}), a_{32} = \frac{1}{n_g} (\frac{B_{ls} B_r}{J_r} - K_{ls}), \quad (16)$$

$$a_{33} = -B_{ls} \frac{J_r + (n_g)^2 + J_g}{n_g^2 J_g J_r}, b_{11} = \frac{1}{J_r}, b_{12} = 0, \quad (17)$$

$$b_{21} = 0, b_{22} = \frac{-1}{J_r}, b_{31} = \frac{B_{ls}}{J_r}, b_{32} = \frac{B_{ls}}{n_g J_g}. \quad (18)$$

IV. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO SUBSISTEMA AERODINÂMICO

A. Análise em malha aberta

Ao efetuar a análise do sistema em malha aberta, utilizou-se do Diagrama de Bode, gerado através do Matlab. A função de transferência adotada foi a equação (8), nela, está implícita a equação (3), a qual possui os valores desejados. É importante ressaltar que os parâmetros utilizados, como a velocidade rotacional do rotor e a velocidade do vento foram tratados como constantes. Os valores adotados foram:

$$v = 7 \text{ m/s.}$$

$$R = 62,5 \text{ m.}$$

$$\omega_T = 30 \text{ rpm.}$$

Qual a F.T.?

Através do diagrama (visto na figura (5)), é possível

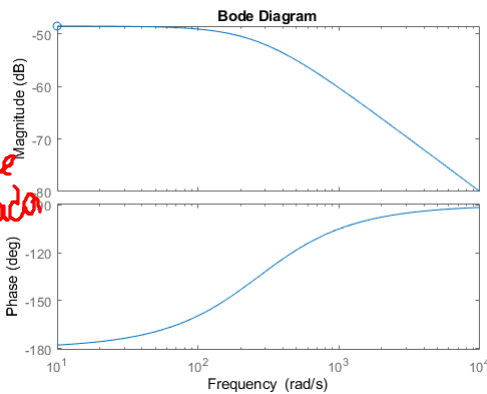


Fig. 5. Diagrama de Bode do subsistema aerodinâmico em malha aberta. Fonte: Autoria própria

constatar que a curva do ganho no gráfico de magnitude, está abaixo dos 0dB, possuindo uma margem de ganho positiva de cerca de 48,6dB, portanto, é possível afirmar que o sistema é estável para a análise em malha aberta. *FECHADA*

B. Análise em malha fechada

Para realizar a análise do sistema em malha fechada, optou-se por utilizar o Critério de Nyquist, no qual utiliza-se do sistema de controle em malha aberta, o diagrama foi gerado computacionalmente pelo software Matlab. A função de transferência escolhida foi a equação (8), e os valores de velocidade rotacional, raio da hélice e velocidade do vento, foram os

mesmos adotados na análise de estabilidade em malha aberta.

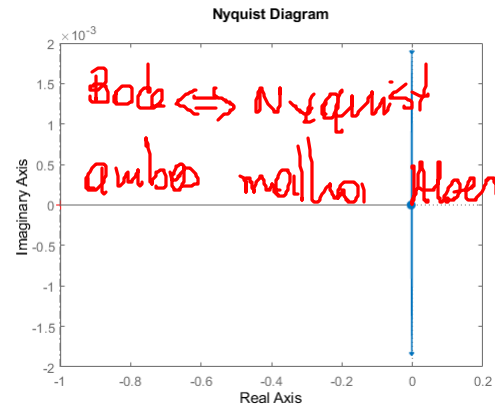


Fig. 6. Diagrama de Nyquist do subsistema aerodinâmico em malha fechada. Fonte: Autoria própria

Portanto, através da geração do diagrama de Nyquist (visto na figura (6)), foi possível concluir que o sistema se comporta de maneira instável no modelo de malha fechada, pois não possui polos no semi-plano esquerdo.

V. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO SUBSISTEMA MECÂNICO

A. Análise em malha aberta

Ao efetuar a análise do sistema em malha aberta, utilizou-se do Diagrama de Bode, gerado através do Matlab. A função de transferência adotada foi a matriz de espaços (14). É necessário ressaltar que os parâmetros utilizados, como a velocidade rotacional do rotor e a velocidade do vento foram tratados como constantes. Os valores adotados foram:

$$v = 7 \text{ m/s.}$$

$$R = 62,5 \text{ m.}$$

$$\omega_T = 30 \text{ rpm.}$$

$$B_r = 818,231 \text{ N*m/(rad*s).}$$

$$J_r = 38759228 \text{ N*m.}$$

$$B_g = 781,721 \text{ N*m/(rad*s).}$$

$$J_g = 535,116 \text{ N*m.}$$

$$n_g = 2.$$

$$B_{ls} = 945,874 \text{ N*m/(rad*s).}$$

$$K_{ls} = 40842400 \text{ N*m/(rad*s).}$$

Através do diagrama (visto na figura (7)), foi possível constatar que a curva do ganho no gráfico de magnitude, está abaixo dos 0dB, possuindo uma margem de ganho positiva de cerca de 151dB, portanto, é possível afirmar que o sistema é estável para a análise em malha aberta.

B. Análise em malha fechada

Para análise em malha fechada, foi utilizado o critério de Nyquist, e com os mesmos valores utilizados na análise de malha aberta, foi possível gerar um diagrama de Nyquist computacionalmente e constatar que o sistema é estável para

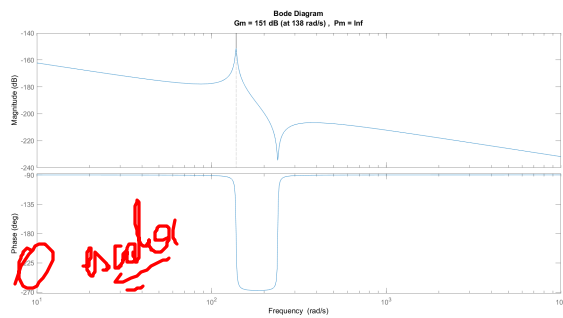


Fig. 7. Diagrama de Bode do subsistema mecânico em malha aberta. Fonte: Autoria própria

malha fechada, possuindo uma margem de ganho positiva de 234dB, podendo ser visto na figura (8).

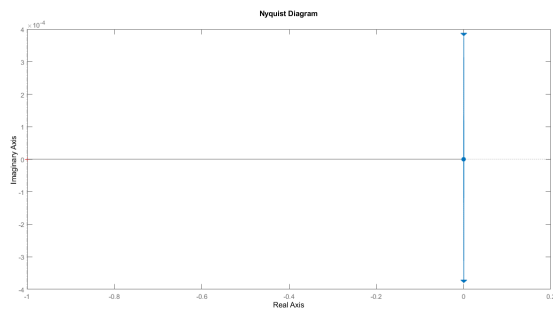


Fig. 8. Diagrama de Bode do subsistema mecânico em malha fechada. Fonte: Autoria própria

VI. CONCLUSÃO

Por conseguinte, foi possível afirmar que o sistema mecânico num todo é um sistema estável, pois na análise de malha aberta dos sistemas aerodinâmico e mecânico houve uma margem de ganho positiva de, 48,6dB e 151dB respectivamente, como também, para a análise em malha fechada do subsistema mecânico, a qual possui um ganho positivo de 234dB. Entretanto, é necessário lembrar que tanto a modelagem quanto as análises de estabilidade possuem certo nível de abstração, se abstendo do rigor matemático que envolve a não-linearidade do sistema. Para trabalhos futuros, seria interessante ater-se a tais critérios, como também, seria importante integrar estes subsistemas com o subsistema eletromagnético, a fim de chegar a um resultado mais conciso.

REFERÊNCIAS

[1] Alfeu Sguarezi Filho e Jaqueline Gomes Cardoso, "ENERGIA EÓLICA: TIPOS DE GERADORES E CONVERSORES USADOS ATUALMENTE", Espaço IEEE, mai 2014. [Online]. Available: <http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/artigo-do-espaco-do-IEEE-maio-2014.pdf>

[2] Waleed K. Ahmed, "Mechanical Modeling of Wind Turbine Comparative Study", INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH, ERU, Faculty of Engineering, United Arab Emirates University, 2013.

[3] Luis Arturo Soriano, Wen Yu and Jose de Jesus Rubio, "Review Article: Modeling and Control of Wind Turbine", Mathematical Problems in Engineering, Hindawi Publishing Corporation, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/982597>

[4] Waleed K. Ahmed, "DAC with LQR Control Design for Pitch Regulated Variable Speed Wind Turbine", INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings), Vancouver, BC, Canada, oct 2014. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6972153>

[5] Chaouki Ghenai and Armen Sargsyan, "Wind Energy", College of Engineering and Computer Science, Florida Atlantic University Boca Raton, Florida, U.S.A, nov 2010.

→ Faltau deixar claro qual o $G(s)$.
 → Erro conceitual sobre o Bode
 → Escrito ok!