



MODELAGEM E CONTROLE LQG/LTR DISCRETO DE UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

Ronilson Rocha

Peterson Resende

José L. Silvino

Universidade Federal de Minas Gerais,
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica
Cx. P. 209 - 30161-970 - Belo Horizonte, MG, Brasil

Marcos V. Bortolus

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica
Cx. P. 209 - 30161-970 - Belo Horizonte, MG, Brasil

Resumo. Neste trabalho é apresentado o projeto de um controlador robusto, baseado na metodologia LQG/LTR, visando atender aos aspectos mais importantes em um sistema de conversão de energia eólica: a maximização da eficiência energética e a redução dos esforços mecânicos no eixo. Para isso, um modelo simplificado de um sistema de energia eólica é proposto. São apresentados resultados de simulações computacionais que comprovam a capacidade deste controlador na regulação de sistemas eólicos.

Palavras-chave: Energia Eólica, Modelamento, Controle LQG, Controle Vibracional.

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda energética, um grande interesse mundial no aproveitamento de fontes de energia renováveis foi despertado, com destaque para a energia eólica, que apesar de suas conhecidas limitações, tem apresentado um relativo sucesso comercial. O uso de técnicas de projeto e construção da indústria aeronáutica, o desenvolvimento da eletrônica de potência para o processamento da energia gerada e o progresso na engenharia de controle tem conferido aos sistemas eólicos atuais uma grande confiabilidade estrutural, além de uma eficiência energética comparável aos das plantas convencionais (Freris, 1990; Manwell, 1991).

As vantagens em incorporar técnicas de controle ao projeto de sistemas eólicos está na melhoria da eficiência na conversão energética e no aumento da flexibilidade operacional do sistema. Em um sistema eólico conectado a rede elétrica, além da operação em paralelo em regime permanente, existem também a resposta do sistema às variações do vento, variações

da carga elétrica, distúrbios e as próprias ações de controle. A redução da influência desses transitórios na potência elétrica gerada é um requisito básico do controlador. Assim, existe a necessidade de identificar os fenômenos nos quais o controle deve atuar para decidir a melhor estratégia de controle a ser implementada, tanto em sistemas eólicos individuais como em níveis hierárquicos superiores (Hinrichsen, 1984).

Um fato a ser considerado no projeto de controladores para sistemas eólicos é que o torque proporcionado pelo vento é de média variável e apresenta ondulações que não devem ser propagadas, sob o risco de penalizar tanto a qualidade da energia gerada como a vida útil do sistema (Lefebvre, 1985; Dessaint, 1986). Dessa forma, a atenuação tanto da amplitude como da duração destas ondulações deve ser promovida pelo controlador (Ribeiro, 1995).

Para a aplicação de modernas técnicas de controle, é necessário o desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevam adequadamente a dinâmica dos sistemas eólicos, bem como a determinação das incertezas envolvidas nestas representações introduzidas através de fatores tais como linearizações, atrasos, variações paramétricas, dinâmicas não modeladas, etc. Estas incertezas estabelecem um conjunto de possíveis modelos para o sistema real, para os quais o projeto do controlador deve assegurar todos critérios de estabilidade e desempenho especificados (Cruz, 1996; Ribeiro, 1995).

Entre as metodologias utilizadas para solucionar o problema de controle robusto, encontra-se a metodologia LQG/LTR - Linear Quadratic Gaussian / Loop Transfer Recovery - a qual reúne diversas características que asseguram um alto desempenho ao projeto de controladores multivariáveis, garantindo a estabilidade para pequenas incertezas do modelo. O projeto de um controlador LQG/LTR é simples e mistura os procedimentos de obtenção do controlador linear quadrático ótimo e recuperação das propriedades desejadas de robustez a ele associadas.

Neste artigo, um modelo linearizado de uma turbina eólica sem controle de passo é proposto e empregado para projetar um controlador utilizando a metodologia LQG/LTR. Procurou-se maximizar a extração energética do vento durante a operação a velocidades subnominais, proporcionar o necessário amortecimento dos principais modos torsionais da turbina e evitar eventuais instabilidades causadas pela turbulência do vento e por outras fontes, tais como o “wind shear” e “stall” aerodinâmico. Resultados de simulações computacionais do controle proposto são apresentados, objetivando a análise do controle proposto.

2. MODELO LINEAR APROXIMADO DO SISTEMA

Um sistema de conversão de energia eólica é composto basicamente por uma turbina eólica mecanicamente acoplada, diretamente ou através de multiplicadores de velocidade, a um gerador elétrico. O sistema de acoplamento mecânico pode ser modelado como um conjunto de massas acopladas através de eixos com elementos flexíveis, massas distribuídas e rigidez. A ordem do modelo é determinada pelo número de massas girantes e sua escolha deve ser baseada no prévio conhecimento do modo ressonante dominante do sistema, sendo altamente desejável manter a complexidade baixa (Novak, 1995). O modelo considerado neste trabalho pode ser visto na fig. 1. Normalizando variáveis e parâmetros em relação a potência e a velocidade nominais do sistema, e supondo o multiplicador de velocidades como ideal, o referido acoplamento mecânico pode ser descrito utilizando a dinâmica rotacional clássica:

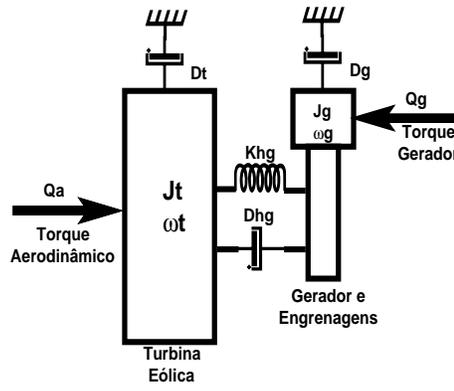


Figura 1: Modelo do acoplamento mecânico

$$J_t \dot{\omega}_t + D_t \omega_t = Q_a - Q_m - D_{hg} (\omega_t - \omega_g) \quad (1)$$

$$J_g \dot{\omega}_g + D_g \omega_g = D_{hg} (\omega_t - \omega_g) + Q_m - Q_g \quad (2)$$

$$Q_m = K_{hg} \int (\omega_t - \omega_g) dt \quad (3)$$

onde ω_t = velocidade de rotação da turbina, ω_g = velocidade de rotação do gerador, J_t = inércia da turbina, J_g = inércia do gerador, D_t = constante de amortecimento da turbina, D_g = constante de amortecimento do gerador, D_{hg} = constante de amortecimento do eixo, K_{hg} = constante de elasticidade do eixo, Q_a = torque aerodinâmico, Q_g = torque do gerador e Q_m = torque elástico no eixo.

A determinação do torque aerodinâmico Q_a é um problema complicado que aumenta a dificuldade de caracterizar o fenômeno físico em sua investigação experimental. Dessa maneira, o comportamento aerodinâmico de uma turbina eólica é melhor avaliado com a adoção de coeficientes adimensionais que expressam a sua habilidade em converter a energia cinética do vento em energia mecânica ou torque, denominados respectivamente coeficientes de potência C_p e de torque C_q (Novak, 1995):

$$Q_a = \frac{1}{2} \rho A R \frac{C_p}{\lambda} V^2 = \frac{1}{2} \rho A R C_q V^2 \quad (4)$$

onde ρ = densidade do ar, A = área do disco do rotor, R = raio da turbina, V = velocidade do vento e λ é um parâmetro adimensional definido como:

$$\lambda = \frac{R \omega_t}{V} \quad (5)$$

Os coeficientes C_p e C_q de uma turbina eólica são funções não lineares de λ e a avaliação desta relação é um procedimento essencial ao projeto e otimização de um sistema de conversão de energia eólica (Silva, 1988). Um estudo da curva $C_q \times \lambda$ mostrada na fig. 2 identifica duas regiões distintas de operação da turbina. A região “A” corresponde a região de operação normal da turbina, sendo estável e caracterizada por uma inclinação negativa da curva. A região “B” corresponde ao “stall” aerodinâmico, onde ocorre uma brusca e significativa queda no torque aerodinâmico. Esta região é instável e caracterizada por uma inclinação positiva.

Para projetos de controle, um modelo do torque aerodinâmico simplificado e linearizado dentro da região de operação normal pode ser utilizado sem comprometimento dos resultados (Novak, 1995). A derivada do torque aerodinâmico Q_a no ponto correspondente

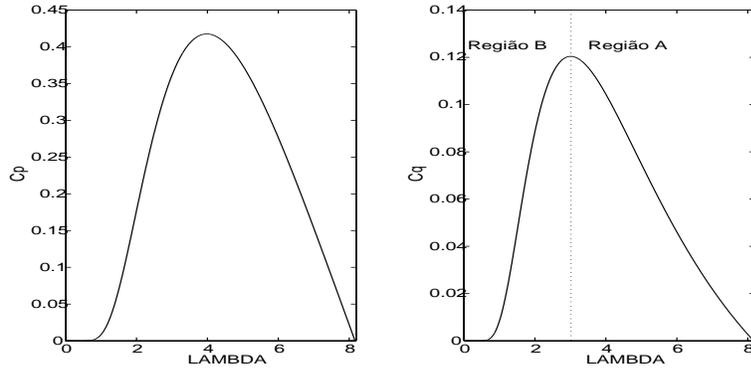


Figura 2: Curvas $C_p \times \lambda$ e $C_q \times \lambda$ para a turbina MOD-2

a C_p máximo será:

$$\dot{Q}_a = \alpha \dot{V} + \gamma \dot{\omega}_t \quad (6)$$

onde os coeficientes α e γ podem ser facilmente calculados a partir de dados fornecidos em catálogos de fabricantes de turbinas eólicas:

$$\alpha = \left. \frac{\delta Q_a}{\delta V} \right|_{opt} = \frac{1}{2} \rho A R C_{pmax} \left(2 \frac{V}{\lambda_{opt}} - 1 \right) \quad (7)$$

$$\gamma = \left. \frac{\delta Q_a}{\delta \omega_t} \right|_{opt} = -\frac{1}{2} \rho A R^3 \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^2} \quad (8)$$

O gerador elétrico constitui o elo de ligação entre energia mecânica do vento e energia elétrica. Os geradores síncronos e os de indução são os mais utilizados, e podem ser conectados a carga elétrica diretamente ou através de dispositivos eletrônicos destinados a processar a energia elétrica gerada. Neste último caso, o torque gerador é independente da dinâmica do sistema eólico (Novak, 1995), e o seu ajuste fornece um mecanismo para regular a velocidade de rotação da turbina e a eficiência do sistema, consistindo na única forma de controle em uma turbina sem controle de passo (Lefebvre, 1985; Dessaint, 1986).

A partir das equações (1), (2), (3) e (6), um modelo linearizado e normalizado de estados pode ser escrito para uma turbina eólica sem controle de passo:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{w}_1 \quad (9)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{w}_2 \quad (10)$$

onde $\mathbf{x}^T = [Q_a \ \omega_t \ \omega_g \ Q_m]$, $\mathbf{u} = Q_g$ e $\mathbf{w}_1^T = [\alpha \dot{V} \ 0 \ 0 \ 0]$. O vetor \mathbf{w}_1 é a perturbação no torque aerodinâmico devido a flutuação da velocidade vento \dot{V} , que pode ser considerada como uma variável aleatória cujo valor médio em regime estacionário é nulo (Wasynczuk, 1981). O vetor \mathbf{w}_2 corresponde ao ruído de medição e as matrizes \mathbf{A} , \mathbf{B} e \mathbf{C} são dadas por:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \gamma \frac{1}{J_t} & -\gamma \frac{D_t + D_{hg}}{J_t} & \gamma \frac{D_{hg}}{J_t} & -\gamma \frac{1}{J_t} \\ \frac{1}{J_t} & -\frac{D_t + D_{hg}}{J_t} & \frac{D_{hg}}{J_t} & -\frac{1}{J_t} \\ 0 & \frac{D_{hg}}{J_g} & -\frac{D_{hg} + D_g}{J_g} & \frac{1}{J_g} \\ 0 & K_{hg} & -K_{hg} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J_g} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

3. METODOLOGIA LQG/LTR

Inicialmente, o modelo linearizado da turbina eólica é discretizado e expandido em novos estados com o objetivo de incluir um integrador na entrada da planta, de forma a assegurar a eliminação dos erros estacionários em regime permanente. O novo vetor de estados \mathbf{x}_e consiste do erro de velocidade do gerador $\varepsilon(k) = r - \omega_g(k)$ e das diferenças de primeira ordem de cada estado $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}(k-1)$. A nova entrada é definida como a diferença de primeira ordem da entrada original $\Delta u(k) = Q_g(k) - Q_g(k-1)$. Sendo \mathbf{A}_d , \mathbf{B}_d e \mathbf{C}_d as matrizes correspondentes a discretização das Eqs. (9) e (10), o sistema expandido $\{\mathbf{A}_e, \mathbf{B}_e, \mathbf{C}_e\}$ é dado por:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon(k+1) \\ \Delta \mathbf{x}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\mathbf{C}_d \mathbf{A}_d \\ \mathbf{0}_{4 \times 1} & \mathbf{A}_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \Delta \mathbf{x}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\mathbf{C}_d \mathbf{B}_d \\ \mathbf{B}_d \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (11)$$

$$\mathbf{y}_e(k) = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}_{1 \times 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \Delta \mathbf{x}(k) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Em seguida, encontra-se o regulador discreto ótimo de realimentação de estados \mathbf{K}_c , o qual produz um sinal de controle que minimiza a seguinte função custo (Maciejowski, 1989):

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [\mathbf{x}_e^T(k) \mathbf{Q} \mathbf{x}_e(k) + \Delta \mathbf{u}^T(k) \mathbf{H} \Delta \mathbf{u}(k)] \quad (13)$$

As matrizes \mathbf{Q} e \mathbf{H} denotam, respectivamente, os pesos avaliados para estados e entradas do sistema, cuja escolha é determinada por fatores tais como a largura de faixa, incertezas do sistema e localização dos pólos de malha fechada (Anderson, 1990). Alguns trabalhos sugerem o uso de pesos dependentes com a frequência, objetivando penalizar seletivamente determinadas faixas de operação (Leithead, 1991). O sinal de comando $\Delta u(k)$ é dado por:

$$\Delta \mathbf{u}(k) = \mathbf{K}_c \mathbf{x}_e \quad (14)$$

onde o regulador \mathbf{K}_c é dado por (Anderson, 1990):

$$\mathbf{K}_c = [\mathbf{H} + \mathbf{B}_e^T \mathbf{P}_c \mathbf{B}_e]^{-1} \mathbf{B}_e^T \mathbf{P}_c \mathbf{A}_e \quad (15)$$

e \mathbf{P}_c é a solução definida positiva da seguinte equação discreta de Riccati:

$$\mathbf{P}_c = \mathbf{Q} + \mathbf{A}_e^T \mathbf{P}_c \mathbf{A}_e - \mathbf{A}_e^T \mathbf{P}_c \mathbf{B}_e [\mathbf{H} + \mathbf{B}_e^T \mathbf{P}_c \mathbf{B}_e]^{-1} \mathbf{B}_e^T \mathbf{P}_c \mathbf{A}_e \quad (16)$$

A complementação do projeto consiste na determinação do filtro de Kalman para a estimação ótima dos estados do sistema, a qual será utilizada pelo regulador LQG como a medida exata dos estados. O filtro de Kalman é dado por (Maciejowski, 1985):

$$\hat{\mathbf{x}}_e(k+1|k) = \mathbf{A}_e \hat{\mathbf{x}}_e(k|k-1) + \mathbf{B}_e \Delta \mathbf{u}(k) - \mathbf{A}_e \mathbf{K}_f (\mathbf{C}_e \hat{\mathbf{x}}_e(k|k-1) - \mathbf{y}_e(k)) \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_e(k|k) = \hat{\mathbf{x}}_e(k|k-1) - \mathbf{K}_f (\mathbf{C}_e \hat{\mathbf{x}}_e(k|k-1) - \mathbf{y}_e(k)) \quad (18)$$

O ganho \mathbf{K}_f do filtro é dado por:

$$\mathbf{K}_f = \mathbf{P}_f \mathbf{C}_e^T [\mathbf{V} + \mathbf{C}_e \mathbf{P}_f \mathbf{C}_e^T]^{-1} \quad (19)$$

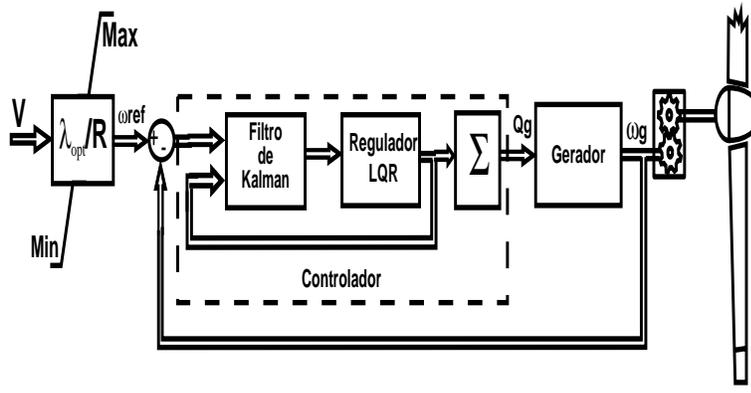


Figura 3: Diagrama de blocos do controle

onde \mathbf{P}_f é a solução semidefinida positiva da seguinte equação de Riccati:

$$\mathbf{P}_f = \mathbf{W} + \mathbf{A}_e \mathbf{P}_f \mathbf{A}_e^T - \mathbf{A}_e \mathbf{P}_f \mathbf{C}_e^T [\mathbf{V} + \mathbf{C}_e \mathbf{P}_f \mathbf{C}_e^T]^{-1} \mathbf{C}_e \mathbf{P}_f \mathbf{A}_e^T \quad (20)$$

onde \mathbf{V} e \mathbf{W} são as matrizes de covariância dos ruídos de medição e de estado.

O controlador LQG/LTR completo é sintetizado pela conexão do filtro de Kalman ao regulador linear quadrático ótimo, resultando na estrutura dada por:

$$\hat{\mathbf{x}}_e(k+1) = (\mathbf{A}_e - \mathbf{B}_e \mathbf{K}_c)(\mathbf{I} - \mathbf{K}_f \mathbf{C}_e) \hat{\mathbf{x}}_e(k) + (\mathbf{A}_e - \mathbf{B}_e \mathbf{K}_c) \mathbf{K}_f \mathbf{y}_e(k) \quad (21)$$

$$\Delta \mathbf{u}(k) = \mathbf{K}_c (\mathbf{I} - \mathbf{K}_f \mathbf{C}_e) \hat{\mathbf{x}}_e(k) + \mathbf{K}_c \mathbf{K}_f \mathbf{y}_e(k) \quad (22)$$

A inclusão do filtro de Kalman pode implicar na degradação das propriedades de robustez e desempenho obtidas no projeto do regulador. Entretanto, na maioria dos casos, é possível recuperar estas propriedades através do procedimento LTR - Loop Transfer Recovery (Maciejowski, 1985). Este procedimento consiste no ajuste apropriado das matrizes de covariância \mathbf{V} e \mathbf{W} do filtro de Kalman (ou das matrizes de peso \mathbf{Q} e \mathbf{H} do regulador) conforme descrito por Maciejowski (1990).

4. PROJETO DO CONTROLADOR

A variável mais importante no controle de uma turbina eólica, principalmente se esta não possuir controle de passo, é a sua velocidade de rotação. Através do controle da velocidade do gerador, é possível maximizar a energia extraída do vento e promover o amortecimento dos principais modos torsionais da turbina (Hinrichsen, 1984).

Para obter máxima eficiência, o sistema eólico deve operar a velocidade variável com relação λ constante na faixa sub-nominal, mantendo sempre o máximo C_p (Manwell, 1991). Para velocidades acima da nominal, é necessário que o sistema opere com rotação fixa com o objetivo de reduzir as cargas mecânicas. A operação na região de “stall” aerodinâmico, embora seja uma opção para limitar a velocidade da turbina, deve ser evitada afim de garantir um melhor desempenho do sistema. A figura 3 mostra o diagrama de blocos da estratégia de controle proposta.

Esta estratégia implica na dependência direta da velocidade da turbina com a flutuação do vento. Elevados modos torsionais são provocados por diferenças transitórias entre as velocidades da turbina e do gerador, induzidas por variações abruptas da velocidade do vento, o que pode gerar variações inaceitáveis de esforços mecânicos. Tais esforços contínuos provocam oscilações de torque e a fadiga do eixo, comprometendo tanto a estabilidade como a vida útil do sistema.

Dessa forma, o projeto do controlador LQG/LTR deve considerar este problema, estabelecendo um compromisso entre a melhoria da eficiência na conversão energética e a redução dos esforços mecânicos. Este objetivo pode ser alcançado através da seleção apropriada dos elementos das matrizes de peso do regulador (Ji, 1995). Adotando a matriz \mathbf{Q} como:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w_2 + w_3 & -w_2 & 0 \\ 0 & 0 & -w_2 & w_2 + w_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

o índice de desempenho \mathbf{J} torna-se:

$$\mathbf{J} = \sum_0^{\infty} \{w_1 I_{\varepsilon}^2 + w_2 (\omega_t - \omega_g)^2 + w_3 \omega_t^2 + w_4 \omega_g^2 + H Q_g^2\} \quad (24)$$

onde I_{ε} é a integral do erro de velocidade.

O nível de amortecimento dos modos torsionais é determinado pelo peso w_2 , enquanto a amplitude do sobressinal de velocidade é limitada através da escolha do peso w_1 . Dessa forma, através da adequada seleção dos pesos w_1 , w_2 , w_3 , w_4 e H , o desempenho do sistema pode ser configurado de acordo com as especificações de projeto. Para evitar instabilidades decorrentes da flutuação do vento e de outras fontes de esforços, deve-se observar que a localização dos pólos de malha fechada do sistema esteja o mais distante possível das frequências onde se concentram as maiores densidade de energia destas fontes de torque oscilatório (Connell, 1982).

5. SIMULAÇÃO

Para verificar o desempenho do controle proposto, foi simulada a operação de um sistema de conversão de energia eólica para as condições de vento mostradas em fig. 4. O sistema simulado foi a turbina MOD 2, de duas pás de 45,72m, 2,5MW e rotação nominal de 17rpm. Os dados desta turbina para o projeto do controlador se encontram na Tabela 1, normalizados em relação a potência e a velocidade nominais do sistema. Para simular o sistema real, utilizou-se o modelo detalhado desta turbina apresentado por Wasynczuk (1981).

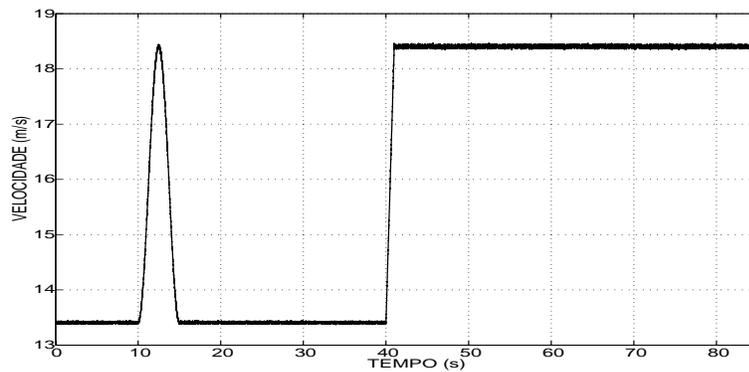


Figura 4: Velocidade do vento

Tabela 1: Dados normalizados da turbina MOD 2

J_t	D_t	J_g	D_g	K_{hg}	D_{hg}
37,413	$2,024 \times 10^{-2}$	2,091	$3,01 \times 10^{-2}$	28,4	1,831

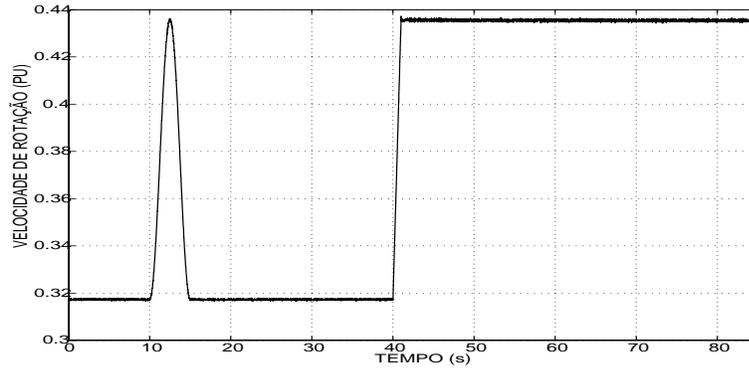


Figura 5: Velocidade de rotação do gerador

Para o projeto do controlador, o modelo simplificado foi discretizado utilizando o método de Euler, uma vez que o sistema apresenta altas constantes de tempo em relação ao período de amostragem adotado de 5ms. Os pesos do controlador foram ajustados por tentativa e erro, obtendo resultados satisfatórios com $w_1 = 2000$, $w_2 = 2000$, $w_3 = 100$, $w_4 = 100$ e $H = 1$. No procedimento LTR, as matrizes de covariância do filtro de Kalman foram ajustadas como $\mathbf{V} = \rho \mathbf{B} \mathbf{B}^T$ e $\mathbf{W} = 1$, observando-se uma recuperação satisfatória em $\rho = 1 \times 10^6$.

Os resultados obtidos na simulação são mostrados nas figuras 5, 6 e 7. Os gráficos apresentados estão normalizados em uma base de 2,5MW e 3600rpm. Como pode ser visto na fig. 5, a velocidade do gerador acompanhou a sua referência, designada para ser proporcional a velocidade do vento. Um preço pago por esta dependência direta entre a referência de velocidade e o vento é a existência de um pequeno ruído em ω_g devido a flutuação do vento. Este problema pode ser resolvido adotando-se uma pré-filtragem do sinal de referência do controlador.

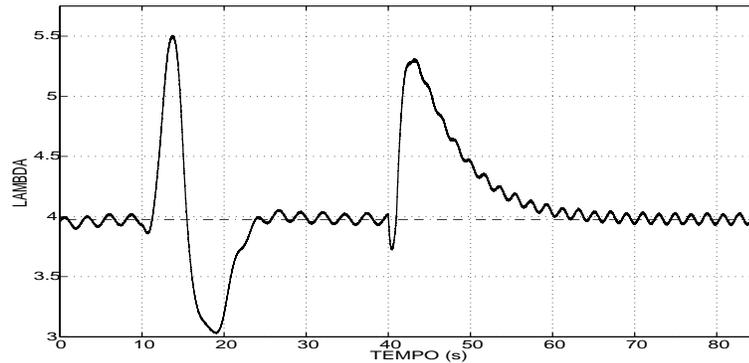


Figura 6: Relação de velocidades λ

A figura 6 mostra que a operação do sistema se deu a λ constante, exceto durante a ocorrência de variações bruscas da velocidade do vento. Isto pode ser explicado pela grande inércia da turbina, que não permite que ω_t seja ajustada com a mesma rapidez

que ω_g , sendo este atraso refletido na relação λ .

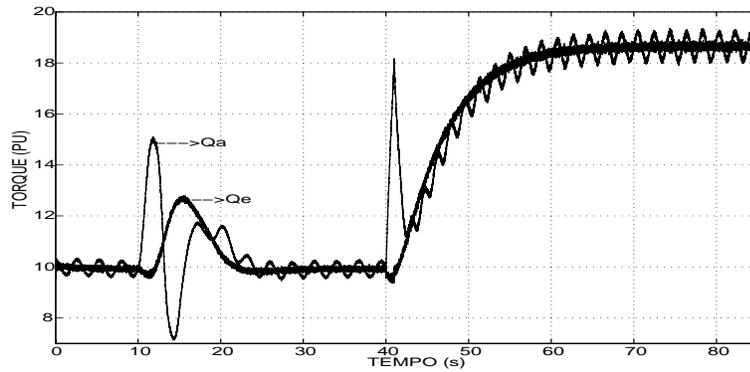


Figura 7: Torque aerodinâmico Q_a e torque gerador Q_g

Na figura 7, percebe-se que o torque do gerador Q_g tende a antecipar, em determinados momentos, o torque aerodinâmico Q_a , de forma a acelerar a turbina e obter um ajuste mais rápido da velocidade do gerador ω_g . As ondulações presentes em λ e Q_a são provocadas pelo fenômeno “wind shear”, resultado da variação da velocidade do vento ao longo das pás.

6. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi apresentado o desenvolvimento do projeto de um controlador robusto, utilizando a metodologia LQG/LTR, para sistemas de conversão de energia eólica. Para isso, foi proposto um modelo dinâmico simplificado que abrange a faixa normal de operação de um sistema eólico genérico. O objetivo principal é maximizar a eficiência na conversão deste sistema, promovendo a necessária atenuação dos modos torsionais da turbina. Através da seleção das matrizes de peso do regulador, o desempenho do controlador foi ajustado visando atender aos requisitos estabelecidos, e a recuperação das propriedades de malha fechada foi executada através do ajuste das matrizes de covariância do filtro de Kalman.

A partir dos resultados obtidos na simulação, conclui-se que, apesar das variações bruscas da velocidade do vento, o controlador proposto conseguiu manter o sistema operando a λ constante e máxima eficiência de conversão energética, evitando a propagação de oscilações para o gerador, o que demonstra a capacidade do controlador LQG/LTR para operar em sistemas de conversão de energia eólica.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq e da FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- Anderson, B. D. O. & Moore, J. B., 1990, Optimal control - Linear Quadratic Methods, Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Connell, J. R., 1982, The spectrum of wind speed fluctuations encountered by a rotating blade of a wind energy conversion system, Solar Energy, vol. 29, n. 5, pp. 363-375.

- Cruz, J. J., 1996, Introdução ao controle robusto, XI CBA, São Paulo, pp. 87-105.
- Dessaint, L., Nakra, H. & Mukhedkar, D., 1986, Propagation and elimination of torque ripple in a wind energy conversion system, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 1, n. 2, pp. 104-112.
- Freris, L. L., 1990, Wind energy conversion systems, Prentice Hall Inc., United Kingdom.
- Hinrichsen, E. N., 1984, Control for variable pitch wind turbine generators, IEEE trans. on Power Apparatus and System, vol. 103, n. 4, pp. 886-892.
- Ji, J. K. & Sul, S. K., 1995, Kalman filter and LQ based speed controller for torsional vibration suppression in a 2-mass motor drive system, IEEE trans. on Industrial Electronics, vol. 42, n. 6, pp. 564-571.
- Lefebvre, S., Dessaint, L., Dubé, B., Nakra, H. & Pérocheau, A. , 1985, Simulator study of a vertical axis wind turbine generator connected to a small hydro network, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 104, n. 5, pp. 1095-1101.
- Leithead, W. E., De La Salle, S. A. & Reardon, D., 1991, Optimal control and performance of constant speed HAWT, EWEC, Amsterdam, pp. 85-89.
- Maciejowski, J. M., 1985, Asymptotic recovery for discrete-time systems, IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 30, n. 6, pp. 602-605.
- Maciejowski, J. M., 1989, Multivariable Feedback Design, Addison-Wesley Publishing.
- Manwell, J. F., MacGowan, J. G. & Bailey, B. H., 1991, Electrical / Mechanical options for variable speed wind turbine, Solar Energy, vol. 46, n. 1, pp. 41-51.
- Novak, P., Ekelund, T., Jovik, I. & Schmidtbauer, B., 1995, Modeling and Control of variable-speed wind-turbine drive-system dynamics, IEEE Control Systems, vol. 15, n. 4, pp 28-38.
- Ribeiro, J. F. & Martins Neto, A. F., 1995, Controle ativo de vibrações em rotores flexíveis usando o método LQG/LTR, Anais do XIII COBEM/ II CIDIM, Belo Horizonte.
- Silva, S. R., Araújo, T. S., Simões, F. S. & Lopes, J. E. J. S., 1988, Modelagem de uma turbina eólica de passo variável, VII CBA, São José dos Campos, pp. 670-675.
- Wasynczuk, O., Man, D. T. & Sullivan, J. P., 1981, Dynamic behaviour of a class of wind turbine generators during random wind fluctuations, IEEE trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 100, n. 6, pp 2837-2845.

MODELLING AND DISCRETE LQG/LTR CONTROL OF A WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM

Abstract. *In this paper is presented a robust controller design, based on LQG/LTR methodology, to attain the more important aspects in a wind energy conversion system: energy efficiency maximization and shaft stress reduction. A simplified model of a wind energy conversion system is proposed. Simulation results show the controller performance on wind systems regulation.*

Keywords: *Wind Energy, Modelling, LQG Control, Vibrational Control.*