

APLICAÇÃO DE CONTROLE ÓTIMO PARA O PROBLEMA DE ESTABILIDADE DE FREQUÊNCIA EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS: PROJETO DO CONTROLADOR E ANÁLISES COMPUTACIONAIS

RAFAEL FONTES SOUTO*, YAN L. BERTAGNOLLI DE CARVALHO†, RAPHAEL A. DE SOUZA BENEDITO†

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília - Campus Ceilândia
Brasília, DF, Brasil*

†*Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, PR, Brasil*

Emails: raphael.souto@ifb.edu.br, yanbertagnolli@hotmail.com,
raphaelbenedito@utfpr.edu.br

Abstract— Frequency stability is one of the main concerns of the Electric Power Systems (EPS) operators and it is associated with the ability of the system to regulate and maintain constant the electric frequency of the network. Traditionally, frequency regulation is performed by Automatic Generation Control (AGC) through the application of classical control techniques. Although such control systems present satisfactory results, energy regulatory agencies have been establishing increasingly rigorous frequency performance criteria, within narrow ranges of operation, thus motivating research into the application of modern control techniques in AGC. In this sense, the objective of this work is to develop the design of a Linear Quadratic Regulator (LQR) to act in the frequency control of an isolated multi-machine EPS. The performance of the LQR is compared to that of the classical CAG via computational experiments, and an analysis of the impact on this performance caused by the insertion of a state observer in the project concludes the experimental part.

Keywords— Frequency Stability, Automatic Generation Control, Linear Quadratic Regulator.

Resumo— A estabilidade de frequência é uma das maiores preocupações dos operadores de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) e está associada à capacidade de o sistema regular e manter constante a frequência elétrica da rede. Tradicionalmente, a regulação de frequência é executada pelo Controle Automático de Geração (CAG) por meio da aplicação de técnicas clássicas de controle. Embora tais sistemas de controle apresentem resultados satisfatórios, as agências regulatórias de energia vem estabelecendo critérios de desempenho de frequência cada vez mais rigorosos, dentro de faixas estreitas de operação, motivando assim a pesquisa da aplicação de técnicas de controle moderno no CAG. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é desenvolver o projeto de um Regulador Linear Quadrático (LQR) para atuar no controle de frequência de um SEP isolado multimáquinas. O desempenho do LQR é comparado ao do CAG clássico via experimentos computacionais, e uma análise do impacto nesse desempenho causado pela inserção de um observador de estados no projeto conclui a parte experimental.

Palavras-chave— Estabilidade de Frequência, Controle Automático de Geração, Regulador Linear Quadrático.

1 Introdução

Controladores automáticos inseridos em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) possuem um papel importante na preservação da integridade do sistema e na restauração de sua operação normal quando ocorre algum distúrbio físico, seja este pequeno ou grande (Kundur, 1994). Em outras palavras, o sistema de controle busca manter o desempenho desejado e estabilizar o sistema após uma perturbação, tal como um curto-circuito, uma perda de geração, variações de carga, entre outras.

Nesse contexto, Kundur et al. (2004) define estabilidade como sendo a capacidade de um SEP, para uma determinada condição de operação inicial e após ter sido submetido a um distúrbio físico, recuperar um estado de equilíbrio com suas variáveis dentro dos limites operativos.

Cabe ressaltar que em um SEP há uma certa sobreposição entre os diferentes mecanismos de instabilidade, uma vez que, à medida que as perturbações ocorrem, mais de uma forma de instabilidade pode surgir (Kundur, 2007). Assim, distinguir entre diferentes formas de instabilidade é fundamental na compreensão das causas subjacentes do problema, a fim de desenvolver projetos de controladores e procedimen-

tos operacionais adequados. Tradicionalmente, as formas de instabilidade se dividem em: instabilidade do ângulo do rotor, instabilidade de tensão e instabilidade de frequência, sendo esta última o foco de interesse deste trabalho.

Por instabilidade de frequência, de maneira geral, entende-se a deterioração progressiva do valor da frequência do sistema após uma perturbação, de modo que um novo ponto de equilíbrio não seja atingido (situação denominada “colapso de frequência”) (Machowski et al., 2008). Em termos práticos de operação e controle de sistemas elétricos, o fenômeno de instabilidade de frequência está associado à incapacidade de um SEP manter sua frequência dentro dos limites de operação especificados.

Geralmente, a instabilidade de frequência é resultado de um desequilíbrio significativo entre carga e geração, estando associada à má coordenação de equipamentos de controle e proteção, reservas de geração insuficientes e inadequações nas respostas de equipamentos (Kundur, 1994).

Assim, o problema de estabilidade de frequência relaciona-se diretamente à regulação da frequência e ao controle automático de geração (CAG), o qual visa equilibrar a geração e a carga para alcançar a frequência nominal do sistema (no Brasil, 60 Hz). Esta regu-

lação de frequência do sistema, como principal função do CAG, tem sido um dos problemas de controle importantes no projeto e na operação dos SEP e está tornando-se mais significativa atualmente devido à complexidade e ao tamanho crescente dos sistemas, à mudança de estrutura, novas incertezas e restrições ambientais.

Vale a pena frisar que uma frequência fora da normalidade pode afetar diretamente a operação do SEP, bem como seu grau de confiabilidade (Kundur, 1994). Além disso, um grande desvio de frequência pode danificar equipamentos, degradar o desempenho da carga, fazer com que as linhas de transmissão fiquem sobrecarregadas e interferir com os esquemas de proteção do sistema, levando a uma condição instável para o sistema (Bevrani, 2009).

De um ponto de vista classificatório, o controle de frequência se enquadra na classe de controles normais/preventivos, ou seja, controles que são aplicados para manter o SEP no seu estado normal de operação ou para retorná-lo às condições normais, caso ele esteja em um estado de alerta ¹.

Já no que diz respeito ao horizonte de tempo do controle de frequência, embora a estabilidade da frequência do SEP seja impactada por dinâmicas rápidas e dinâmicas lentas, o intervalo de tempo de atuação do controlador varia de alguns segundos a vários minutos (Kundur, 2007).

Ressalta-se que, em um SEP, o sistema de controle geral é complexo, de modo que uma série de malhas de controle distintas atuam em diferentes escalas de tempo. Contudo, devido ao desacoplamento destas malhas, na maioria dos casos, é possível estudar individualmente cada uma delas. Dependendo da natureza da malha de controle, do modelo necessário, das variáveis relevantes, das incertezas e dos objetivos, diferentes estratégias de controle podem ser aplicáveis, configurando-se, portanto, um amplo campo de pesquisas na área de controle.

Segundo Bevrani (2009), em um SEP moderno, a geração, a transmissão e a distribuição de energia elétrica só podem ser atendidas por meio do uso de metodologias de controle ótimo/robusto e de tecnologia da informação no projeto das unidades de controle, bem como por um sistema de aquisição de dados adequado. Isso remete à consideração de incertezas nos projetos de controle e a uma modelagem dinâmica mais eficaz.

Nesse contexto, foi a partir de 1970 que técnicas de controle moderno, especificamente de controle ótimo baseadas em funções de custo quadráticas, começaram a ser estudadas visando aplicações no problema de controle carga-frequência. Os primeiros tra-

¹No estado de alerta, todas as variáveis do SEP estão dentro do intervalo aceitável; no entanto, o sistema pode estar prestes a entrar no estado de emergência após o distúrbio. No estado de emergência, por sua vez, algumas variáveis do sistema estão fora do intervalo aceitável. Assim, pode-se definir uma outra classe de controle de SEP, não abordada neste trabalho, a qual corresponde aos controles de emergência (aplicados em situações de emergência para interromper o progresso da falha e devolver o sistema a um estado normal ou de alerta).

balhos nesta área apresentaram uma modelagem do SEP em espaço de estados e uso do Regulador Linear Quadrático (LQR) para o controle suplementar (Elgerd and Fosha, 1970b; Elgerd and Fosha, 1970a). Outras técnicas de controle ótimo, como o controlador integral linear quadrático, foram apresentadas por Calovic (1972).

Um dos desafios principais para a implementação das técnicas de controle ótimo citadas acima é a dificuldade de se ter acesso a todas as variáveis de estado do sistema. Dessa forma, algumas estratégias de controle ótimo com redução de ordem do sistema e acréscimo de observadores de estado foram propostas na literatura inicialmente por (Moorthi and Aggarwal, 1972).

Em trabalhos posteriores, tais como (Costa et al., 1995) e (Dotta et al., 2009), melhorias na estabilidade de SEP multimáquinas foram obtidas com o projeto de sistemas de controle em dois estágios. Nesse tipo de abordagem, o projeto do controlador baseia-se no LQR e leva em conta a existência de restrições estruturais, como a disponibilidade para realimentação apenas das variáveis mensuráveis. A otimização, nesse caso, recai sobre a solução de uma equação de Riccati generalizada, mas resulta em controladores dinâmicos de saída, o que dispensa a inclusão de observadores de estado no projeto.

Além disso, incertezas nas determinações dos parâmetros utilizados nos modelos para o CAG também proporcionam limitações nas implementações práticas. Assim, técnicas de controle robusto, das quais é possível fazer o controle do sistema determinando-se apenas os limites máximo e mínimo dos parâmetros sem conhecer seus valores em específico, começaram a ser pesquisadas. Os trabalhos de Wang et al. (1993) e Bevrani et al. (2004) são exemplos nessa linha de pesquisa.

Embora as técnicas de controle moderno aplicadas ao problema de controle de geração venham sendo investigadas há mais de 40 anos, ainda existe muito a ser pesquisado e explorado, uma vez que as agências regulatórias de energia elétrica estabelecem critérios de desempenho de frequência cada vez mais rígidos, dentro de faixas estreitas de operação. Além disso, em um sistema multimáquinas, quanto mais máquinas estiverem operando com controle de geração, menor será o amortecimento das oscilações de frequência (comportamento mais oscilatório), comprometendo o desempenho do CAG.

Nesse sentido, objetivando aprofundar as pesquisas em SEP multimáquinas, esse trabalho propõe o projeto de um LQR para atuar no controle de frequência de um SEP composto por três unidades geradoras. O desempenho do LQR é comparado ao do CAG clássico via simulações computacionais. Assim, a Seção 2 desenvolve o modelo do sistema e a Seção 3 apresenta o projeto do controlador. Simulações computacionais e análise dos resultados constam na Seção 4, sendo a Seção 5 destinada às conclusões do trabalho.

2 Modelagem do Sistema

A dinâmica de um SEP é não linear e variante no tempo. Contudo, com o propósito de síntese e análise de controle de frequência na presença de distúrbios de carga, é possível utilizar um modelo simplificado, tendo em vista que as dinâmicas que afetam a resposta em frequência do sistema são relativamente lentas ao se considerar um intervalo de tempo que varie de alguns segundos a poucos minutos.

A Fig. 1 apresenta um modelo (linear e invariante no tempo) de resposta de frequência para um SEP isolado com uma unidade geradora e duas malhas de controle, a primária e a secundária².

Os sinais ΔP_m , ΔP_l e Δf correspondem, respectivamente, à variação da potência mecânica da turbina, à variação da potência elétrica demandada pela carga e à variação da frequência do sistema com relação aos seus valores nominais. Ademais, os sinais ΔP_p e ΔP_s representam as ações de controle primário e secundário e, finalmente, ΔP_v está relacionado com o desvio de posição da válvula de admissão da turbina.

Nesse modelo, a função de transferência da máquina síncrona representa, de forma geral, a relação dinâmica (gerador-carga) entre o desequilíbrio incremental de potência $\Delta P_m - \Delta P_l$ e o desvio de frequência Δf . Assim, $H > 0$ é a constante de inércia do gerador síncrono e $D \geq 0$ é o coeficiente de amortecimento da carga, isto é, a parcela da carga que é dependente da frequência³.

Com o intuito de reduzir a complexidade do modelo, considera-se uma turbina térmica sem reaquecimento, com constante de tempo $T_t > 0$. Assim, a potência elétrica fornecida pelo gerador é determinada por meio da potência mecânica da turbina, sendo esta potência mecânica controlada pela abertura ou fechamento de válvulas que regulam a entrada de vapor na turbina.

Cabe ressaltar que a frequência de operação de um SEP depende do balanço de sua potência ativa e, portanto, essa entrada de vapor da turbina precisa ser regulada continuamente para atender à potência ativa (variante no tempo) demandada pela carga. Com efeito, uma mudança na potência demandada pela carga em um ponto da rede é refletida em todo o sistema por uma mudança de frequência, uma vez que o distúrbio é inicialmente compensado pela energia cinética, ou seja, pela variação da velocidade da máquina síncrona.

Assim, por meio das malhas de controle primário e secundário, o regulador de velocidade detecta a mu-

²A ação de controle primário geralmente não é suficiente para restaurar a frequência nominal do sistema, tornando necessária uma malha de controle secundário, a fim de gerar um sinal adequado para que a turbina forneça uma potência mecânica capaz de restaurar a frequência nominal. Portanto, além de um controle de frequência primário, a maioria dos grandes geradores síncronos estão equipados com uma malha de controle de frequência secundário.

³O parâmetro D geralmente é expresso como uma variação percentual na carga para uma variação de 1% na frequência. Por exemplo, um valor típico de 1,5 para D significa que uma variação de 1% na frequência do sistema causaria uma variação de 1,5% na carga.

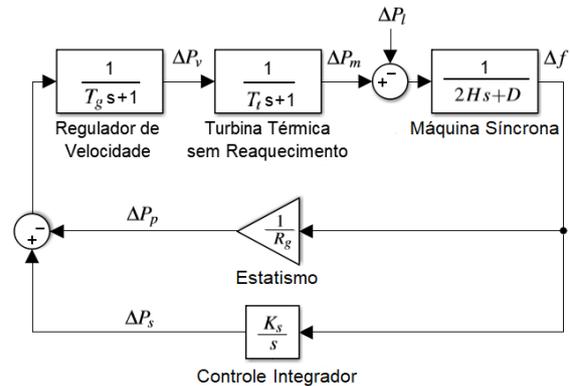


Figura 1: Modelo de resposta em frequência para o CAG de um SEP isolado com apenas gerador.

dança de velocidade da máquina (mudança esta que ocasiona o desvio de frequência do sistema) e atua de forma a proporcionar as forças mecânicas necessárias para posicionar a válvula principal contra a pressão do vapor, regulando a entrada de vapor na turbina para produzir a potência mecânica adequada ao reestabelecimento do estado estacionário do sistema nominal. No modelo dinâmico do regulador de velocidade, $T_g > 0$ corresponde a sua constante de tempo.

Por fim, a malha de controle primário é composta por um ramo de realimentação de ganho $1/R_g$ (estatismo), sendo $R_g > 0$ a constante de regulação do sistema, e a malha de controle secundário é composta por um controlador integral com ganho $K_s < 0$.

2.1 O Modelo Multimáquinas

O modelo de SEP isolado com uma unidade geradora e duas malhas de controle, descrito até o momento, pode ser expandido para considerar um sistema multimáquina, isto é, com mais de uma unidade geradora. Nesse caso, o regulador de velocidade em cada unidade geradora realiza a ação primária de controle de velocidade e, assim, todas as unidades geradoras contribuem para a mudança geral na geração, independentemente da localização do distúrbio de carga dentro da área de controle. Já a ação secundária de controle é distribuída entre as unidades geradoras na proporção de sua participação.

A Fig. 2 apresenta um modelo de resposta de frequência para o CAG de um SEP isolado multimáquina com três unidades geradoras. Os parâmetros α_1 , α_2 e α_3 correspondem aos fatores de participação de cada unidade, sendo $\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1$.

Note que, em um contexto mais genérico, as unidades geradoras poderiam apresentar valores diferentes para os parâmetros que modelam a dinâmica turbina-regulador de velocidade. Contudo, neste trabalho, considera-se que as unidades geradoras são iguais, adotando-se, portanto, os mesmos parâmetros para cada uma delas.

A Tabela 1 exhibe os parâmetros adotados. Além disso, os geradores podem ou não participar do con-

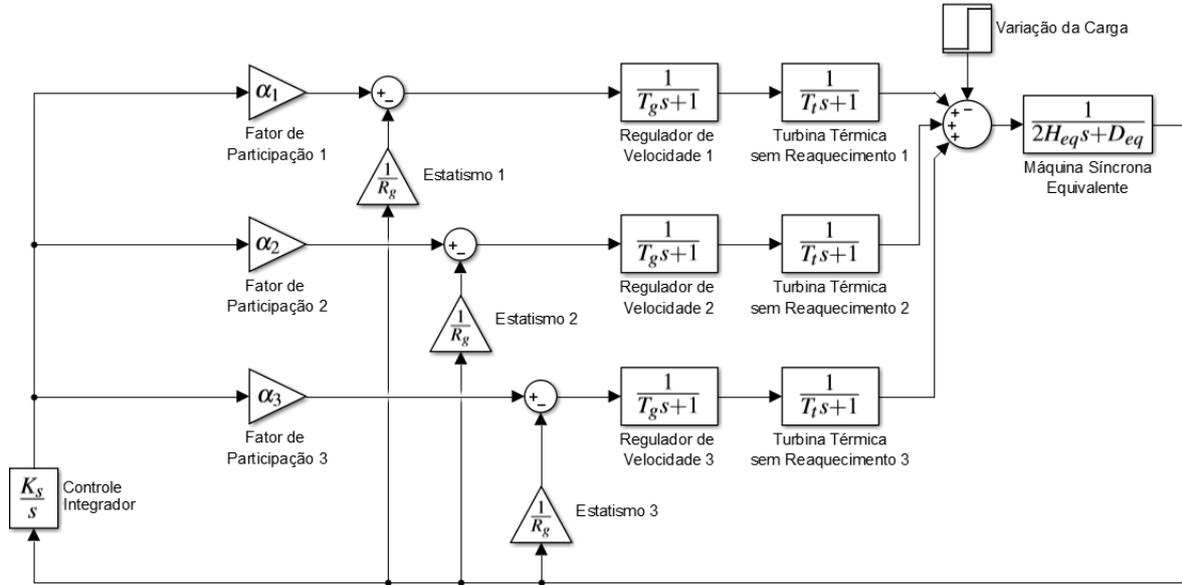


Figura 2: Modelo de resposta em frequência para o CAG de um SEP isolado com três unidades geradoras.

trole secundário, de modo que um gerador i não participante estará associado a um fator $\alpha_i = 0$.

Tabela 1: Parâmetros do SEP multimáquina.

D_{eq}	H_{eq}	T_t	T_g	R_g
1	15s	0,3s	0,2s	0,05

3 Projeto do Controlador Ótimo

Com o intuito de analisar o desvio de frequência de um SEP isolado na presença de mudanças repentinas de carga, é usual modelar um comportamento dinâmico multimáquina por uma única máquina equivalente (Bevrani, 2009). Neste caso, o modelo apresentado na Fig. 2 pode ser convertido em um modelo de resposta de frequência equivalente, conforme Fig. 3.

O modelo equivalente acumula os efeitos das cargas e geradores do sistema em um único coeficiente de amortecimento equivalente, D_{eq} , o qual representa a parcela da carga da área que é dependente da frequência. A constante de inércia equivalente H_{eq} é assumida como sendo igual à soma das constantes de inércia de todas as unidades geradoras e o estatismo equivalente pode ser calculado por $\frac{1}{R_{g,eq}} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{R_{g,i}} = 60$.

Além disso, a partir da hipótese de que as turbinas possuem o mesmo comportamento dinâmico e os reguladores de velocidade possuem os mesmos parâmetros de regulação, o conjunto turbina-regulador de velocidade equivalente também apresentará esses mesmos parâmetros.

O uso do modelo equivalente facilita a realização de um projeto de LQR para o SEP multimáquina, uma vez que permite a construção do espaço de estados a partir de um número menor de equações de estado. Ressalta-se, no entanto, que, após projetado, o LQR

será testado (computacionalmente) a partir de sua inserção no modelo do SEP multimáquina com turbinas individualizadas, considerando os devidos fatores de participação de cada máquina. Desse modo, o LQR substituirá o controle integrador $\frac{K_g}{s}$ da malha de controle secundário na Fig. 2. Os resultados desse teste são apresentados na Seção 4.

Assim, com base no modelo da Fig. 3, as seguintes equações dinâmicas podem ser utilizadas para descrever um SEP com três unidades geradoras

$$\dot{\Delta f} = -\frac{D_{eq}}{2H_{eq}} \Delta f + \frac{1}{2H_{eq}} \Delta P_m - \frac{1}{2H_{eq}} \Delta P_l, \quad (1)$$

$$\Delta \dot{P}_v = -\frac{1}{T_g} \Delta P_v + \frac{1}{T_g} \Delta P_s - \frac{1}{T_g R_{g,eq}} \Delta f, \quad (2)$$

$$\Delta \dot{P}_m = -\frac{1}{T_t} \Delta P_m + \frac{1}{T_t} \Delta P_v, \quad (3)$$

de modo que, em notação matricial, tem-se

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta f} \\ \Delta \dot{P}_m \\ \Delta \dot{P}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_{eq}}{2H_{eq}} & \frac{1}{2H_{eq}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_t} & \frac{1}{T_t} \\ -\frac{1}{T_g R_{g,eq}} & 0 & -\frac{1}{T_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta P_m \\ \Delta P_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_g} \end{bmatrix} \Delta P_s + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2H_{eq}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_l. \quad (4)$$

De acordo com (Vieira-Filho, 1984), após a ocorrência da perturbação da carga e a atuação do controlador, tendo em vista que a potência gerada pelo sistema absorve todo o impacto causado pela perturbação, pode-se assumir que $\Delta P_m, \Delta P_v, \Delta P_s \rightarrow \Delta P_l^{rp}$ (em p.u.) e $\Delta f \rightarrow 0$, sendo o sobrescrito “rp” usado para indicar o valor de um sinal em regime permanente.

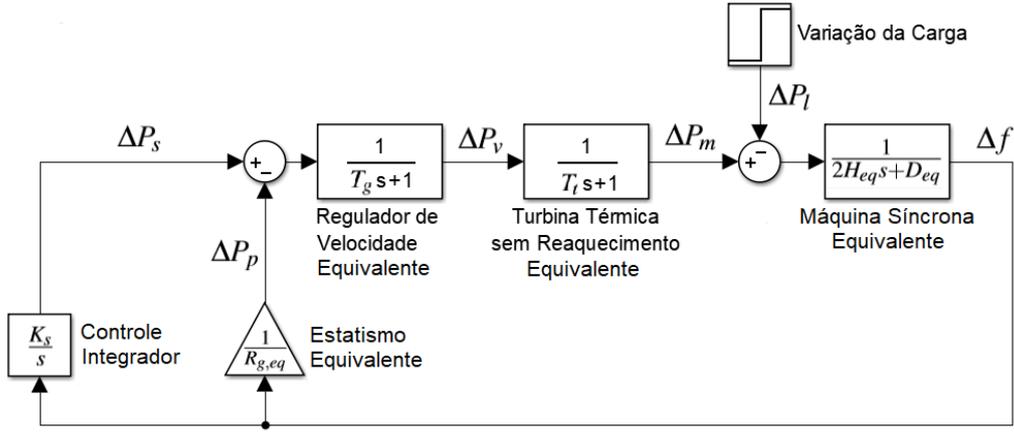


Figura 3: Modelo de resposta em frequência equivalente para o CAG de um SEP isolado multimáquina.

Assim, definindo inicialmente $z = [\Delta f \ \Delta P_m \ \Delta P_v]^\top$, $v = \Delta P_s$ e adotando as seguintes mudanças de variáveis

$$x = z - z^{rp} = [\Delta f \ \Delta P_m - \Delta P_l^{rp} \ \Delta P_v - \Delta P_l^{rp}]^\top, \quad (5)$$

$$u = v - v^{rp} = \Delta P_s - \Delta P_l^{rp}, \quad (6)$$

chega-se, a partir de (4), ao seguinte modelo em espaço de estados

$$\dot{x} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{D_{eq}}{2H_{eq}} & \frac{1}{2H_{eq}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_r} & \frac{1}{T_r} \\ -\frac{1}{T_g R_{g,eq}} & 0 & -\frac{1}{T_g} \end{bmatrix}}_A x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_g} \end{bmatrix}}_B u, \quad (7)$$

com $x(0) = z(0) - z^{rp} = [0 \ -\Delta P_l^{rp} \ -\Delta P_l^{rp}]^\top$.

Dessa forma, utilizando como índice de desempenho para o controle de frequência do SEP o custo quadrático

$$J = \int_0^\infty (x(t)^\top Q x(t) + R u(t)^2) dt, \quad (8)$$

com $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ uma matriz semidefinida positiva, real e simétrica, e $R \in \mathbb{R}^+$ uma constante positiva, o projeto do LQR consiste em encontrar uma lei de controle $u(t) = -Kx(t)$ que minimize o índice J em (8), sujeito à dinâmica (7), levando o estado x para zero em regime permanente.

O procedimento de obtenção do ganho K pode ser encontrado no trabalho original de Kalman (Kalman, 1960), resultando, nesse caso, em $K = R^{-1}B^\top P$, com P sendo a solução da equação algébrica de Riccati, envolvendo A , B , Q e R . Portanto, adotando os parâmetros que constam na Tabela 1 para compor as matrizes A e B e sintonizando os valores de Q e R pela Regra de Bryson (Franklin et al., 2013),

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{(0,05)^2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad R = 1, \quad (9)$$

chega-se a

$$K = [2,26 \ 0,37 \ 0,58]. \quad (10)$$

4 Simulações Computacionais e Análise dos Resultados

No contexto do problema de controle de frequência de um SEP isolado com três unidades geradoras, para comparar o desempenho do CAG clássico, apresentado na Seção 2 e exibido na Fig. 2, com o LQR projetado na Seção 3 e inserido⁴ no lugar do controle integrador na Fig. 2, foram realizadas algumas simulações computacionais no intervalo de tempo de 0s a 10s a partir de uma perturbação de carga do tipo função degrau unitário, a saber, $\Delta P_l = 1$ p.u. para $t > 1$ s.

O parâmetro de controle K_s do CAG clássico foi ajustado por meio de uma busca no intervalo $[10, 50]$, com passo de 0,5, visando a obtenção do menor valor de J , o que resultou em $K_s = 30,5$. Já o parâmetro de controle K do LQR pode ser visto em (10).

A Fig. 4 exibe os desvios de frequência auferidos com a atuação de cada controlador. Nota-se que o uso do LQR ocasionou em um pico de subfrequência de 0,009 p.u. (0,54 Hz), o que corresponde a um valor aproximadamente 57% menor que o valor de 0,021 p.u. (1,26 Hz) obtido com a utilização do CAG clássico.

Apesar de ambos os controladores conseguirem manter a frequência da rede dentro dos requisitos estabelecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)⁵, percebe-se que o uso do LQR permitiu um retorno mais rápido da frequência para seu valor nominal.

No que tange ao esforço de controle, medido aqui pelo desvio da válvula de admissão da turbina, isto é, pelo sinal $\Delta P_v = \sum_{i=1}^3 \Delta P_{v,i}$, verifica-se que o LQR

⁴A inserção do LQR no diagrama da Fig. 2 requer uma pequena adaptação, no sentido de fazer com que a entrada do LQR seja dada pelos sinais Δf , $\Delta P_m - \Delta P_l^{rp}$ e $\Delta P_v - \Delta P_l^{rp}$, conforme vetor x definido em (5). Ressalta-se que aqui $\Delta P_m = \sum_{i=1}^3 \Delta P_{m,i}$, $\Delta P_v = \sum_{i=1}^3 \Delta P_{v,i}$ e que todos os estados possam ser mensurados.

⁵Frequência abaixo de 57Hz ($\Delta f < -3$ Hz): atuação instantânea dos relés.

Frequência entre 57Hz e 57,5Hz (-3 Hz $< \Delta f < -2,5$ Hz): atuação temporizada dos relés após 5s.

Frequência entre 57,5Hz e 58,5Hz ($-2,5$ Hz $< \Delta f < -1,5$ Hz): atuação temporizada dos relés após 10s.

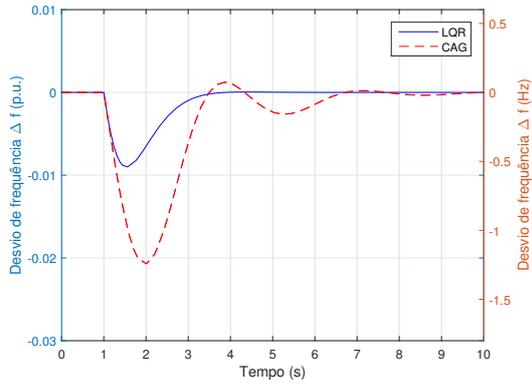


Figura 4: Desvio de frequência no SEP isolado com três unidades geradoras.

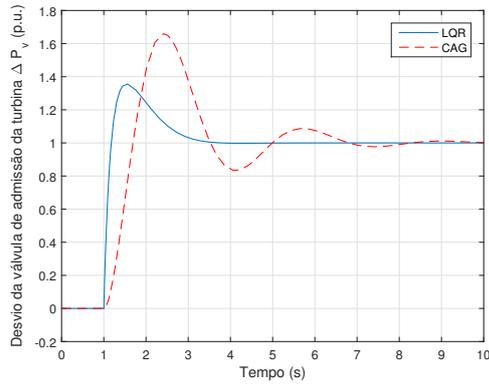


Figura 5: Desvio da válvula de admissão da turbina no SEP isolado com três unidades geradoras.

também proporcionou melhores resultados. A Fig. 5 exibe os sinais de desvio da válvula de admissão da turbina com a atuação de cada controlador. Nota-se que o uso do LQR gerou um sobressinal de 1,36 p.u., o que corresponde a um valor aproximadamente 18% menor que o valor de 1,66 p.u. obtido com o uso do CAG clássico.

Por fim, o desempenho de ambos os sistemas foi mensurado por meio do custo J , apresentado em (8), sendo x e u dados por (5) e (6), respectivamente, e os pesos Q e R dados por (9). A comparação dos custos também aponta para um melhor desempenho do LQR em detrimento do CAG clássico. De fato, obteve-se nesse cenário de simulação $J_{LQR} = 0,51$, o que corresponde a um valor aproximadamente 80% menor que $J_{CAG} = 2,60$.

Mantendo todos os parâmetros de simulação inalterados, procedeu-se então a uma análise dos desvios de potência mecânica da turbina, considerando a atuação do LQR em dois cenários distintos para a escolha dos fatores de participação: (i) $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \frac{1}{3}$ e (ii) $\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{1}{2}$ e $\alpha_3 = 0$. As Figs. 6 e 7 exibem os resultados para os cenários (i) e (ii), respectivamente.

No cenário (i), a potência mecânica é distribuída igualmente entre as três unidades geradoras, uma vez que todas são participantes do controle de frequência

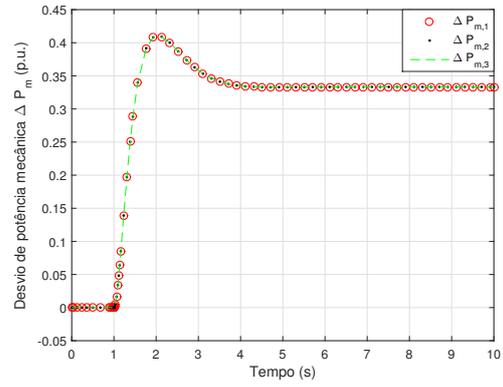


Figura 6: Desvio da potência mecânica no SEP isolado com três unidades geradoras com mesmo fator de participação.

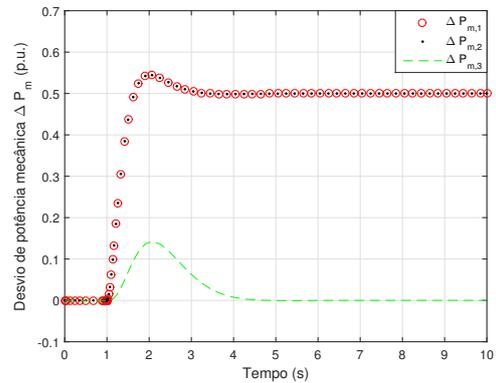


Figura 7: Desvio da potência mecânica no SEP isolado com três unidades geradoras com diferentes fatores de participação.

de carga com iguais fatores de participação. Já no cenário (ii), a potência mecânica é distribuída igualmente entre as duas unidades geradoras participantes do controle secundário, de modo que a terceira unidade, não participante, apresenta um sinal de desvio de potência mecânica diferente.

Note que a retirada do controle secundário em uma das unidades geradoras fez com que as outras duas precisassem atingir um sobressinal maior, a fim de estabilizar a frequência do sistema. De fato, o pico de desvio de potência mecânica nas unidades participantes subiu de 0,41 p.u. para 0,54 p.u., enquanto que o pico de desvio de potência mecânica na unidade não participante caiu de 0,41 p.u. para 0,15 p.u.

Do ponto de vista do desvio de frequência, ajustar os fatores de participação de diferentes maneiras não altera o desempenho do sistema, uma vez que a soma dos desvios individuais permanece a mesma em todos os cenários. Entretanto, em um SEP cujas unidades geradoras possuam características dinâmicas distintas, faz-se necessário um ajuste adequado dos fatores de participação para se obter um bom controle de frequência sem o movimento excessivo de algumas unidades.

Até aqui, demonstrou-se a melhoria de desempenho do sistema ocasionada pela substituição do controle integral do CAG clássico pelo controle LQR. Contudo, nas simulações realizadas, considerou-se que todos os estados do sistema podiam ser mensurados. Surge então a questão do quanto seria alterado o desempenho do LQR, caso apenas o desvio de frequência do sistema pudesse ser mensurado e um observador de estados tivesse que ser acrescentado à malha de controle para estimar os estados não mensuráveis.

Para responder essa questão, um observador de estados de ordem plena foi inserido no projeto, de tal forma que o observador receba os sinais Δf e ΔP_s como entrada e retorne o vetor de estados estimados $\tilde{x} = [\Delta \tilde{f} \ \Delta \tilde{P}_m - \Delta P_l^{r,p} \ \Delta \tilde{P}_v - \Delta P_l^{r,p}]^T$ como saída. Assim, o LQR passa a contar apenas com a estimativa dos estados a partir da medição do desvio de frequência e, conseqüentemente, $u(t) = -K\tilde{x}(t)$, sendo K o mesmo calculado em (10).

Os três polos do observador foram arbitrados como sendo reais e duas vezes mais rápidos que os polos de malha fechada do sistema controlado, isto é,

$$\text{Polos do Observador} = 2\text{Re}[\lambda(A - BK)], \quad (11)$$

em que $\lambda(\cdot)$ corresponde aos autovalores da matriz e $\text{Re}[\cdot]$ à sua parte real.

Para a simulação do SEP com a inserção do observador, todos os parâmetros foram mantidos os mesmos das simulações anteriores. Os resultados dessa nova simulação podem ser vistos nas Figs. 8 e 9. Note que o erro de estimação dos estados cometido pelo observador se anula em aproximadamente 3s, gerando um pequeno impacto no desvio de frequência. De fato, o pico de subfrequência que era de 0,54Hz passou a ser de 0,69Hz.

Finalmente, o aumento do custo do sistema, medido pelo índice J , foi de 27,5%, ou seja, J_{LQR} passou de 0,51 para 0,65.

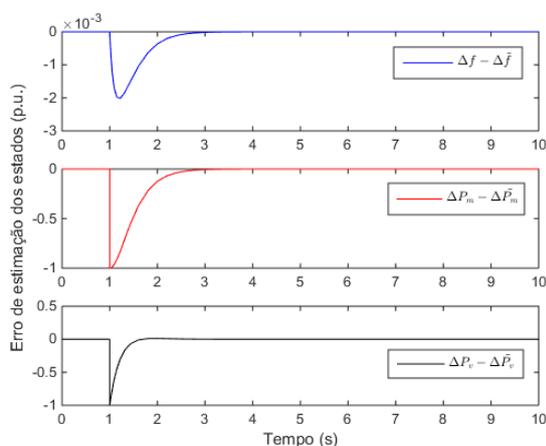


Figura 8: Erro de estimação dos estados cometido pelo observador de ordem plena.

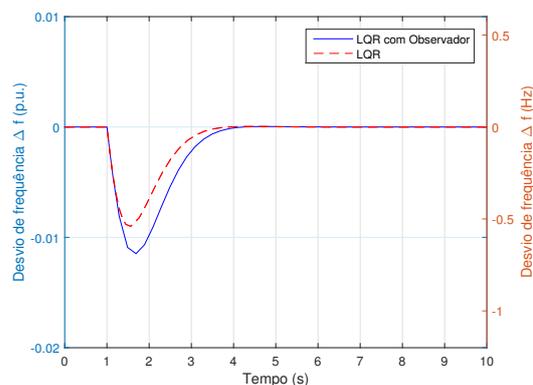


Figura 9: Comparação do desvio de frequência quando se insere o observador de ordem plena.

5 Conclusões

Este artigo apresentou a modelagem de um SEP isolado multimáquina com a finalidade de se projetar um LQR para atuar no problema de estabilidade de frequência diante de perturbações na carga do sistema.

O LQR foi projetado e seu desempenho foi comparado ao do CAG clássico via experimentos computacionais e análise dos sinais de desvio de frequência e do desvio das válvulas de admissão da turbina, bem como de um custo quadrático associado ao sistema.

Vale a pena frisar que a ação do LQR implementado preserva o conceito de controle de geração baseada em repartição de geração e controle primário/secundário, uma vez que a realização de um experimento com uma das unidades geradoras possuindo fator de participação nulo revelou que o desvio de potência mecânica nessa unidade não participante atenua-se até zerar em poucos segundos.

Para lidar com a dificuldade de medição dos estados do sistema, a qual poderia surgir em uma implementação prática, propôs-se a inserção de um observador de estados de ordem plena na malha de controle. A presença do observador no projeto torna mais fiel a comparação das estratégias de controle, visto que o sinal de desvio de frequência é o único estado do sistema utilizado no CAG clássico.

Em todos os cenários analisados, o LQR apresentou um desempenho melhor que o CAG clássico, mesmo com a presença do observador de estados que transmitia ao LQR estimativas dos estados, e não seus valores reais.

Por fim, sugere-se que trabalhos futuros nessa linha de pesquisa envolvam a aplicação do LQR em SEP com várias áreas de controle interligadas. Em tais cenários, além da preocupação da estabilidade da frequência, também existe a manutenção adequada dos intercâmbios de fluxo de potência ativa de uma área para outra. Simulações e análises preliminares apontam resultados promissores e interessantes da aplicação do LQR em sistemas interligados.

Referências

- Bevrani, H. (2009). *Robust Power System Frequency Control*, Springer, New York.
- Bevrani, H., Mitani, Y. and Tsuji, K. (2004). Robust decentralized load–frequency control using an iterative linear matrix inequalities algorithm, *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib* **151**(3): 347–354.
- Calovic, M. S. (1972). Linear regulator design for a load and frequency control, *IEEE Trans. Power App. Syst.* **91**: 2271–2285.
- Costa, A. J. A. S., Freitas, F. D. and Pena, H. E. (1995). Power system stabilizer design via structurally constrained optimal control, *Electric Power Systems Research* **33**(1): 33–40.
- Dotta, D., Silva, A. S. and Decker, I. C. (2009). Wide-area measurements-based two-level control design considering signal transmission delay, *IEEE Transactions on Power Systems* **24**(1): 208–216.
- Elgerd, O. I. and Fosha, C. (1970a). The megawatt-frequency control problem: A new approach via optimal control, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* **89**(4): 563–570.
- Elgerd, O. I. and Fosha, C. (1970b). Optimum megawatt-frequency control of multiarea electric energy systems, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* **89**(4): 556–563.
- Franklin, G. F., Powell, J. D. and Emami-Naeini, A. (2013). *Sistemas de Controle para Engenharia*, 6 edn, Editora Bookman.
- Kalman, R. E. (1960). Contribution to the theory of optimal control, *Bol. Soc. Mat. Mexicana* **5**(2): 102–119.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York.
- Kundur, P. (2007). *Power System Stability*, Boca Raton (FL): CRC Press/Taylor & Francis.
- Kundur, P., Paserba, J. and et al. (2004). Definition and classification of power system stability, *IEEE Trans. on Power Systems* **19**(3): 1387–1401.
- Machowski, J., Bialek, J. W. and Bumby, J. R. (2008). *Power System Dynamics: Stability and Control*, 2 edn, John Wiley & Sons, Ltd.
- Moorthi, V. R. and Aggarwal, R. P. (1972). Suboptimal and near optimal control of a load frequency control system, *Proceedings of The Institution of Electrical Engineers* **119**(11): 1653–1660.
- Vieira-Filho, X. (1984). *Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de Geração*, Editora Campus LTDA, Rio de Janeiro.
- Wang, Y., Zhou, R. and Wen, C. (1993). Robust load–frequency controller design for power systems, *Proceedings of The Institution of Electrical Engineers* **140**(1): 11–16.