



Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT

**PROJETO E ANÁLISE DE CONTROLE ÓTIMO APLICADO NO CONTROLE AUTOMÁTICO DE GERAÇÃO
CONSIDERANDO SISTEMAS INTERLIGADOS.**

**CONRADO GABRIEL SODRE ALVES DE MORAES(1); YAN BERTAGNOLLI DE CARVALHO(2); RAPHAEL
AUGUSTO DE SOUZA BENEDITO(3); RAFAEL FONTES SOUTO(4); GABRIELA ROSALEE WEIGERT(5);
UTFPR(1);UTFPR(2);UTFPR(3);UTFPR(4);UTFPR(5);**

RESUMO

Atualmente, a estabilidade de frequência configura-se como um dos maiores desafios para os operadores de sistemas elétricos interligados. Consequentemente, torna-se mais difícil e complexo o ajuste do Controle Automático de Geração (CAG) para estabilizar a frequência da rede. Neste trabalho, o foco consiste na aplicação de técnicas de controle ótimo, especificamente o Regulador Linear Quadrático (LQR), para o problema de estabilidade de frequência. A partir da modelagem matemática dos elementos de controle e do desenvolvimento do projeto do LQR, serão realizadas simulações computacionais através do programa ANATEM do CEPEL, com o objetivo de observar o desempenho dinâmico do sistema.

PALAVRAS-CHAVE

Estabilidade de frequência, controlador linear quadrático, controle ótimo, sistemas interligados.

1.0 - INTRODUÇÃO

Em termos gerais, o conceito de estabilidade pode ser definido como a capacidade de um SEP restabelecer seu estado de equilíbrio original após sofrer uma perturbação física, sem que os limites de operação pré-estabelecidos das variáveis deste sistema sejam violados (1). Dentro da doutrina de análise e controle da estabilidade de sistemas elétricos, destacam-se os estudos focados no comportamento da estabilidade rotórica (ângulo de potência dos geradores), da velocidade angular (frequência do sistema) e da tensão eficaz nos barramentos. Portanto, por mais que o problema de estabilidade seja único, o mesmo é classificado e estudado sob diferentes perspectivas, utilizando técnicas de abordagem específicas, de acordo com critérios como a natureza do problema (2). No desenvolvimento deste trabalho, o foco será na análise da Estabilidade de Frequência que, segundo (1), é definida como a capacidade de um sistema elétrico em manter a sua frequência nominal após sofrer um desequilíbrio entre geração e carga.

O Controle Automático de Geração (CAG) tem como função principal estabelecer a manutenção do equilíbrio entre carga e geração, mantendo a frequência operacional da rede elétrica dentro de níveis estáveis pré-determinados e manter os intercâmbios energéticos programados entre áreas de controle. Os estudos do CAG avaliam o desempenho dos sistemas interligados, identificando as melhores estratégias de controle disponíveis, definindo os critérios de participação das usinas e suas parcelas de contribuição, tanto no controle primário, quanto no controle secundário. Assim, o funcionamento otimizado do CAG é um elemento fundamental na manutenção da qualidade, confiabilidade e segurança operacional dos sistemas elétricos.

Na literatura, os principais conceitos e modelos em torno do CAG foram definidos por (3) no início da década de 1970, quando foram desenvolvidos modelos matemáticos no domínio da frequência cuja função é determinar o comportamento da resposta dinâmica dos elementos básicos que compõem os sistemas elétricos de potência

como geradores síncronos, turbinas, carga e reguladores de velocidade. Trabalhos que apresentam estratégias de controle automático robusto para a estabilidade de frequência podem ser encontrados em (4) e simulações envolvendo a resposta dinâmica de modelos de sistemas interligados estão descritas em (5). Em (6), tratou-se especificamente do controle de intercâmbio de potência entre áreas.

Paralelamente ao desenvolvimento e aplicação do CAG convencional, outras técnicas de controle vêm sendo estudadas e amadurecidas. Técnicas de controle ótimo no domínio do tempo, baseadas em modelagens no espaço de estados foram apresentadas em (7) e (8) com a aplicação do Regulador Linear Quadrático (LQR) para um modelo de SEP composto de duas áreas de controle. Já o uso do controlador integral linear quadrático foi estudado em (9). Em geral, tais técnicas necessitam que todas as variáveis de estado sejam conhecidas durante todo o intervalo de tempo considerado, o que remete à inclusão de observadores de estado no sistema, como apresentado em (10). A aplicação de técnicas de controle ótimo é abordada em outros problemas de estabilidade. Em (11), há a aplicação ao projeto de Estabilizadores de Sistemas de Potência (PSS), que possuem o objetivo de realizar o amortecimento de pequenas oscilações e que normalmente são utilizados para auxiliar no controle de tensão nas máquinas geradoras.

Além do problema de se mensurar todas as variáveis de estado necessárias para a realização do controle de frequência via LQR, deve-se ressaltar a existência de incertezas presentes nos parâmetros do sistema. Estas incertezas podem estar presentes nas constantes de tempo das turbinas e dos reguladores de velocidade, bem como nas constantes de inércia e de amortecimento das máquinas geradoras.

Com isso, a análise e a implementação de técnicas de controle robusto tornaram-se recorrentes para o estudo de estabilidade de frequência. Projetos deste tipo de controlador podem ser encontrados em (12), sendo baseados em possíveis variações nos valores dos parâmetros ao longo do tempo. Estratégias de controle robusto descentralizado, em que há um desacoplamento das malhas de controle de cada área, podem ser encontradas em (13) e permitem realizar os projetos em cada área separadamente. Além disso, (14) apresenta a aplicação de técnicas de controle robusto combinadas com a utilização de algoritmos genéticos para sintonia do controlador.

O objetivo deste artigo é projetar um controlador do tipo LQR para anular os desvios de frequência em regime permanente de um determinado modelo de SEP, baseado nos modelos matemáticos apresentados em (7), (8) e (15). Pretende-se analisar através de simulações computacionais no ambiente ANATEM, o comportamento da frequência do sistema, a potência mecânica no eixo de acoplamento das turbinas das unidades geradoras e os desvios de potência ativa na *TieLine* do sistema mediante a presença do controle ótimo, comparando o desempenho do LQR com os métodos de controle tradicionais.

Para o projeto do LQR, utilizou-se o modelo de uma área de controle isolada, dentro da qual é inserida uma única unidade geradora equivalente representando um sistema multimáquinas. O projeto do LQR para uma área de controle foi então extrapolado para o modelo completo do sistema que envolve as duas áreas de controle. Este conceito representa uma vantagem em termos de simplificação do projeto do controlador, tornando sua implementação computacional mais fácil.

A estrutura de apresentação deste trabalho está organizada da seguinte maneira: O modelo do sistema elétrico de potência com áreas de controle interligadas, a modelagem em espaço de estados, bem como o projeto do LQR associado desenvolvido no *software* MATLAB são apresentados na Seção 2. A Seção 3 exibe os resultados obtidos pelos experimentos computacionais através do *software* ANATEM, analisando-os com base nas respostas dinâmicas de cada cenário de simulação. Por fim, as conclusões são apresentadas na Seção 4, as referências bibliográficas na Seção 5 e os dados biográficos dos autores na Seção 6.

2.0 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

2.1 Elementos Essenciais de Controle Automático de Geração

A Figura 1 mostra a representação em diagrama de blocos no domínio da frequência do SEP equivalente para uma única área de controle com múltiplas unidades geradoras, incluindo as duas malhas de realimentação que compõem os controles primário e secundário. Com base em (2) e (15), a malha de controle primário, do tipo proporcional, é responsável por reestabelecer o equilíbrio de potência ativa no sistema, estabilizando o valor da frequência em regime permanente em um patamar diferente do valor nominal da frequência operacional do sistema. Este equilíbrio é atingido através do ajuste do *output* de potência mecânica das turbinas em conformidade com a variação da carga durante o período da perturbação. No entanto, para que a frequência reestabeleça seu valor nominal, uma malha de controle suplementar é necessária. O controle secundário do tipo integral, corrige os desvios de frequência em regime permanente para que as unidades geradoras continuem fornecendo a potência necessária na frequência nominal do sistema.

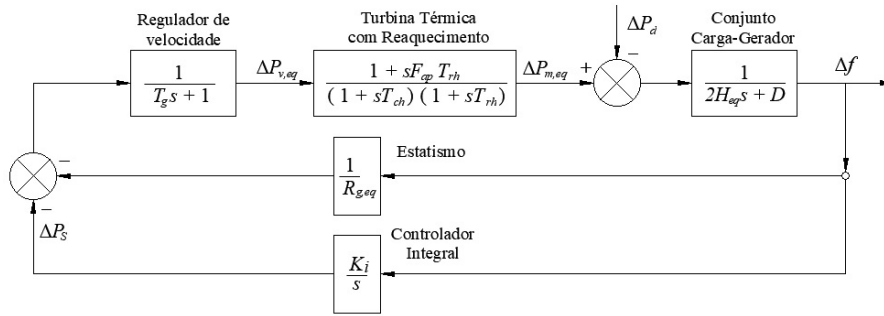


FIGURA 1 – Diagrama de blocos de uma área de controle com CAG convencional.

A configuração fundamental do CAG é composta pelos modelos de gerador, turbina, regulador de velocidade e equivalente carga-gerador sendo realimentado pelas malhas de controle primário e secundário. Isto compõe cada área de controle a ser analisada. Como convenção, neste trabalho, o CAG que possui malha secundária com o controle do tipo integrador, comumente utilizado.

Cabe ressaltar que para realizar mudança do CAG convencional para o LQR, deve-se substituir a malha de controle secundária, que é composta pela realimentação do sinal de frequência com bloco integrador, por uma matriz de ganhos proporcionais. Esta matriz realiza uma realimentação dos estados do modelo de Sistema de Potência apresentado e depende da quantidade de variáveis de estado modeladas. Logo, o bloco integrador que recebe como entrada o sinal de desvio de frequência é substituído por um bloco de ganhos constantes que recebe como entrada os sinais que caracterizam os estados do sistema. Os detalhes dessa substituição são apresentados na Seção 3.

O modelo apresentado na Figura 1 representa o equivalente de um sistema multimáquinas composto por 3 unidades geradoras em uma mesma área de controle. As variáveis presentes neste diagrama são: Δf que é o desvio de frequência do sistema em relação ao seu valor nominal; $\Delta P_{m,eq}$ é o desvio de potência mecânica equivalente fornecido pelo somatório dos desvios $\Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_{m3}$ de cada uma das 3 turbinas; $\Delta P_{v,eq}$ é o sinal equivalente de abertura da válvula, que representa o somatório dos desvios individuais $\Delta P_{v1} + \Delta P_{v2} + \Delta P_{v3}$ das válvulas de cada turbina; ΔP_d que representa a variação de carga no sistema (aqui considerado um sinal do tipo degrau) e ΔP_s , é o sinal de controle do sistema, tanto para o LQR quanto para o CAG convencional. Adicionalmente, no caso de duas áreas interligadas, inclui-se o sinal ΔP para indicar a variação do fluxo de potência na linha de interligação.

O valor T_g refere-se à constante de tempo do regulador de velocidade equivalente. Os valores T_{ch} e T_{rh} representam respectivamente as constantes de tempo para o estágio de alta pressão e reaquecimento para a turbina térmica. Ressalta-se que os valores das constantes da turbina e do regulador de velocidade apresentados são iguais aos valores individuais de cada uma das 3 máquinas representadas pelo modelo equivalente. A constante F_{ap} representa a fração da potência total que é produzida pelo estágio de alta pressão da turbina.

A constante $R_{g,eq}$ é denominada constante de regulação em regime permanente (16), para o modelo de malha de controle desenvolvido neste trabalho, as constantes R_{g1} , R_{g2} e R_{g3} , possuem o mesmo valor, ou seja, $R_{g1} = R_{g2} = R_{g3}$. Assim, calcula-se o estatismo equivalente para n unidades geradoras de acordo com (1):

$$\frac{1}{R_{g,eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{gi}} \quad (1)$$

A constante H_{eq} representa a inércia da máquina síncrona que, neste SEP multimáquinas, é calculada como a soma das constantes de inércia individual de cada unidade geradora presente no sistema, ou seja,

$$H_{eq} = \sum_{i=1}^n H_i \quad (2)$$

Por fim, a constante D é o coeficiente de amortecimento relacionado à parcela da carga dependente da frequência.

2.2 Representação em Espaço de Estados

O projeto do LQR segue a teoria desenvolvida em (18) e requer que o modelo dinâmico do sistema seja representado em espaço de estados, de acordo com:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (3)$$

A matriz de estados do sistema, A , pertence a $\mathbb{R}^{n \times n}$ e a matriz de controle, B , pertence a $\mathbb{R}^{n \times m}$, sendo n o número de variáveis de estado do vetor $x(t)$ com dimensão $n \times 1$ e m o número de sinais de entrada de controle, com dimensão $m \times 1$. Para a obtenção das matrizes A e B que descrevem a dinâmica do sistema, usa-se como base a representação do sistema equivalente no domínio da frequência, conforme Figura 1.

Assim, aplicando a transformada inversa de Laplace às equações dinâmicas do SEP da Figura 1, chega-se a

$$\begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta P_{m,eq} \\ \Delta P_{v,eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{2H_{eq}} & \frac{1}{2H_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{F_{ap}}{R_{g,eq}T_gT_{ch}} & -\frac{1}{T_{rh}T_{ch}} & -\frac{(T_{rh}+T_{ch})}{T_{ch}T_{rh}} & \frac{(T_g-F_{ap}T_{rh})}{T_gT_{ch}T_{rh}} \\ -\frac{1}{R_{g,eq}T_g} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta P_{m,eq} \\ \Delta P_{v,eq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ F_{ap} \\ \frac{1}{T_g} \end{bmatrix} \Delta P_s + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2H} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_d \quad (4)$$

Formatado: Fonte: 8 pt

Pode-se notar que a equação (4) não está adequada à representação dada pela expressão (3), devido ao último termo da soma. Para que ocorra essa adequação, primeiramente consideram-se as seguintes hipóteses que podem ser encontradas em (16) e (17):

- (i) após a perturbação de carga e atuação do controle, considerando que a potência gerada absorve todo o impacto de carga, admite-se que $\Delta P_{m,eq}$, $\Delta P_{v,eq}$ e ΔP_s tendem a ΔP_d em regime permanente (ΔP_d^{rp}). Consequentemente $\Delta P_{m,eq}$ tenderá a zero em regime permanente;
- (ii) Com a atuação do controle, a variável Δf tende a zero em regime permanente.

Considerando estas duas hipóteses, define-se então $y = [\Delta f \ \Delta P_{m,eq} \ \Delta P_{v,eq}]^T$ e $z = \Delta P_s$. Assim, o vetor de estados e a entrada de controle são definidos da seguinte forma a partir de uma transformação de variáveis

$$x = y - y^{rp} = \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta P_m - \Delta P_d^{rp} \\ \Delta P_v - \Delta P_d^{rp} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$u = z - z^{rp} = \Delta P_s - \Delta P_d^{rp} \quad (6)$$

Note o uso do sobrescrito "rp" para indicar valor em regime permanente. Com isso, pode-se reescrever a equação (4) como:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{2H_{eq}} & \frac{1}{2H_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{F_{ap}}{R_{g,eq}T_gT_{ch}} & -\frac{1}{T_{rh}T_{ch}} & -\frac{(T_{rh}+T_{ch})}{T_{ch}T_{rh}} & \frac{(T_g-F_{ap}T_{rh})}{T_gT_{ch}T_{rh}} \\ -\frac{1}{R_{g,eq}T_g} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_g} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{F_{ap}}{T_gT_{ch}} \\ \frac{1}{T_g} \end{bmatrix} u \quad (7)$$

adequando à representação do SEP em Espaço de Estados conforme a equação (3).

2.3 Projeto do Regulador Linear Quadrático (LQR)

A partir do modelo do sistema em Espaço de Estados, equações (5)-(7) e assumindo que todos os estados $x(t)$ do sistema sejam mensuráveis, o projeto do LQR consiste em encontrar uma lei de controle:

$$u(t) = -Kx(t) \quad (8)$$

que minimize o índice de desempenho:

$$J = \int_0^{\infty} (x(t)^T Q x(t) + R u(t)^2) dt, \quad (9)$$

sendo $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ uma matriz real, simétrica, semi-definida positiva e $R \in \mathbb{R}^+$ uma constante positiva, ambos parâmetros de sintonia do LQR que penalizam os desvios do estado e do controle, respectivamente. Assim,

observando-se a equação (9), pode-se verificar que quanto maiores são os valores de Q , menores deverão ser os desvios dos estados do sistema ao longo do tempo. Isto ocorre para que o valor da função de custo J seja mantido o menor possível. Quanto a constante R , quanto maior o seu valor, menor serão os valores desenvolvidos pelo sinal $u(t)$ ao longo do tempo, o que pode ser interpretado como um gasto menor de energia por parte do controlador. Assim, a escolha adequada destas matrizes pode proporcionar respostas satisfatórias dos estados do sistema com um esforço de controle menos dispendioso. Por fim, a escolha destes parâmetros de sintonia influencia diretamente no cálculo da matriz de ganhos K , com dimensão $m \times n$ e que conforme (18) é dada por:

$$K = R^{-1}B^T P \quad (10)$$

sendo P a solução da equação algébrica de Riccati associada ao problema. Equação esta que possui a seguinte expressão:

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (11)$$

Como ponto de partida para a determinação do parâmetro Q , utilizou-se a regra de Bryson descrita em (19). Esta tem como base determinar um valor máximo de desvio que cada estado pode alcançar, determinando cada um dos q_n elementos associados a cada um dos x_n estados do sistema. Dessa forma, considerando uma matriz do tipo diagonal, os valores dos elementos destas matrizes são calculados da seguinte forma:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \frac{1}{x_{1max}^2} & \dots & \vdots \\ \vdots & \ddots & 1 \\ 0 & \dots & \frac{1}{x_{nmax}^2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

neste trabalho, considerou-se diferentes valores de R para os projetos. A seção 3 especifica os parâmetros de projeto.

Por fim, o projeto do LQR consiste em calcular a matriz de ganhos K conforme a equação (10), conhecendo-se as matrizes A e B do modelo em espaço de estados do sistema, determinando-se as matrizes Q e R , além de calcular o valor da matriz P através da equação (12). Diferentes projetos de K foram realizados para este trabalho, nos diferentes cenários simulados. Os mesmos encontram-se na seção 3 que é referente às simulações e resultados.

3.0 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS

3.1 Reguladores Lineares Quadráticos (LQR) Projetados

Neste trabalho, utilizou-se o programa MATLAB (R2018a) para se desenvolver o projeto do LQR, ou seja, para a obtenção da matriz de ganhos de " K " a ser utilizada na lei de controle $u(t) = K \cdot x(t)$. O desenvolvimento do projeto do LQR foi aplicado a uma área de controle composta por 3 unidades geradoras com turbinas térmicas com reaquecimento representadas por seu modelo equivalente, conforme a Figura 1 (mas sem o controlador integrador). Os dados dos parâmetros equivalentes do regulador, turbina e máquina síncrona são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 – Valores dos parâmetros equivalentes de uma área de controle

Req	Tg	Tch	Trh	F_{ap}	H_{eq}	D_{eq}
0,0167	0,2 s	0,3 s	7 s	0,3	15 s	9

Como a matriz de parâmetros de sintonia " Q " e a constante " R " afetam os valores projetados da matriz de ganhos " K ", neste trabalho foram contemplados 3 projetos distintos de LQR, conforme discriminados a seguir:

LQR Projeto 1 - Pondera-se mais o elemento da matriz " Q " associado à variável de desvio de frequência em relação aos demais elementos.

LQR Projeto 2 - Pondera-se mais o elemento da matriz " Q " associado à variável de desvio da válvula de admissão em relação aos demais elementos.

LQR Projeto 3 - Pondera-se mais o elemento da matriz " Q " associado à variável de desvio de potência mecânica em relação aos demais elementos.

A Tabela 2 apresenta os valores dos pesos dos elementos de " Q " e " R "

TABELA 2 – Valores dos pesos atribuídos à matriz " Q " e à constante " R "

Controlador	$Q_{\Delta f}$	$Q_{\Delta P_m}$	$Q_{\Delta P'_m}$	$Q_{\Delta P_v}$	R
LQR Projeto 1	400	1,0	1,0	1,0	1,0
LQR Projeto 2	1,0	1,0	1,0	400	0,1
LQR Projeto 3	1,0	400	1,0	10	0,1

A Tabela 3 mostra os valores dos elementos da matriz de ganhos "K" para cada um dos projetos.

TABELA 3 – Valores dos ganhos dos controladores

Controlador	$K_{\Delta f}$	$K_{\Delta P_m}$	$K_{\Delta P_v}$	$K_{\Delta P_v}$
LQR Projeto 1	-7,261	1,0713	0,5048	0,1753
LQR Projeto 2	-57,47	0,3578	0,1824	62,149
LQR Projeto 3	-55,28	60,426	7,6835	2,5393

3.2 Cenários de Simulações

Para as simulações computacionais da rede elétrica operando com os sistemas de controle projetados, foram utilizados os programas ANAREDE (versão 11.0.1) e ANATEM (versão 11.5.1), ambos do CEPEL. A rede elétrica utilizada como base para os cenários de simulações é apresentada na Figura 2.

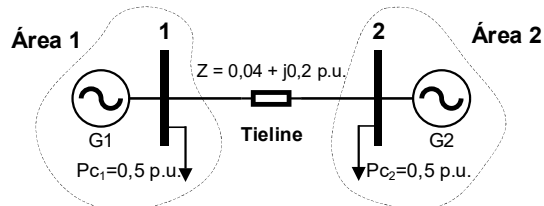


FIGURA 2 – Diagrama unifilar da rede elétrica utilizada nas simulações

Com o intuito de avaliar o desempenho dinâmico e a eficácia do controle de geração com LQR, foram definidos vários cenários de simulações, conforme descritos abaixo.

Cenário 1 – Comparação entre o desempenho dos Projetos 1, 2 e 3 de LQR, de um LQR híbrido e de um CAG convencional, considerando apenas uma área de controle. Neste cenário, considera-se a existência de geração equivalente na Área 1 e despreza-se a geração na Área 2, além disso um degrau de carga de 0,3 pu (ou 30 MW) é aplicado na barra 1. O LQR híbrido é constituído pelo LQR do Projeto 1 com um integrador com ganho $K_i = 10$ inserido analogamente ao integrador do CAG convencional, conforme mostrado na Figura 1. O CAG convencional apresenta um ganho do integrador $K_i = 20$.

Cenário 2 - Análise de desempenho de duas áreas de controle interligadas, sendo a Área 1 dotada de controle LQR (Projeto 2) e a Área 2 composta de CAG convencional. Neste cenário, um degrau de carga de 1,0 pu é aplicado na barra 1.

Cenário 3 – Análise de desempenho de duas áreas de controle interligadas, sendo a Área 1 com LQR híbrido e a Área 2 com CAG convencional. Neste cenário, um degrau de carga de 1,0 pu é aplicado na barra 1.

3.3 Resultados do Cenário 1 – Uma única área de controle

A Figura 3 mostra em (a) a resposta da frequência e em (b) a resposta do desvio do sinal da válvula de admissão da turbina para os sistemas de controle projetados (LQR), para um LQR híbrido e para um CAG convencional.

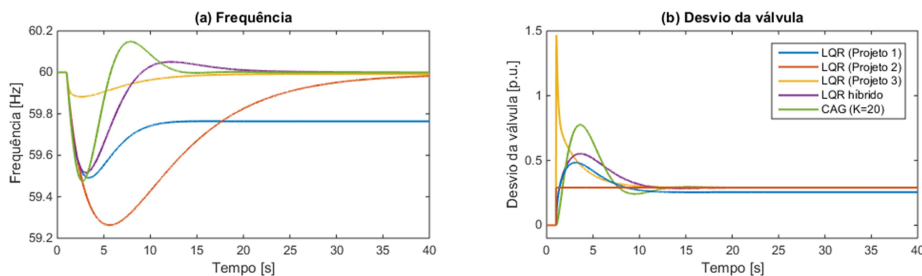


FIGURA 3 – (a) Comparação do comportamento da frequência (b) do sinal do desvio da válvula, para diversos controladores atuando no Cenário 1.

A Figura 3a mostra que a frequência estabiliza para os três projetos de LQR. Entretanto, dependendo dos valores da matriz "Q" utilizada no projeto de LQR, a frequência pode estabilizar em valores distintos da nominal, como mostrado na curva em azul (Projeto 1). Vale ressaltar que o projeto de LQR apresentado neste trabalho tem como objetivo estabilizar o sistema dinâmico, levando para zero o desvio de frequência em regime permanente.

No caso do Projeto 1, onde o maior peso na matriz "Q" é atribuído à variável de desvio de frequência, a resposta da válvula é mais lenta (Figura 3b). Já para o Projeto 2, onde o maior peso na matriz "Q" é atribuído à variável de desvio da válvula, a frequência estabiliza muito próxima ao valor nominal (curva em vermelho na Figura 3a) e a resposta da válvula é mais rápida em relação ao Projeto 1 mas, em contrapartida, o desvio máximo da válvula (*overshoot*) é limitado (curva em vermelho na Figura 3b), fazendo com que a frequência demore mais para estabilizar.

Para o Projeto 3, no qual a ponderação maior na matriz "Q" está na variável de desvio de potência mecânica, a resposta da válvula é rápida e o overshoot do desvio da válvula é bem elevado, se comparado aos valores obtidos com os Projetos 1 e 2. Tal ação causa uma estabilização mais rápida da frequência em seu valor nominal (curva em amarelo na Figura 3a). Os resultados dos Projetos 2 e 3 de LQR mostram que se pode ajustar os pesos da matriz "Q" de modo a estabilizar a frequência no valor nominal. Por outro lado, pode-se ainda combinar a ação de um controle LQR com um integrador com ganho K_i na realimentação de desvio de frequência para estabilizar a frequência no valor nominal, como mostrado nos resultados em roxo do LQR híbrido na Figura 3. A Figura 3 também apresenta os resultados para um CAG convencional com controle integrador (curvas em verde).

3.4 Resultados do Cenário 2 – Sistema Interligado com duas áreas de controle

A Figura 4 apresenta o comportamento dinâmico das principais variáveis envolvidas no controle de geração considerando controle LQR (Projeto 2) na Área 1 e CAG convencional na Área 2, com a aplicação um degrau de carga de 1,0 pu na barra 1. Os valores dos parâmetros equivalentes do regulador, turbina e gerador síncrono da Área 2 são os mesmos apresentados na Tabela 1.

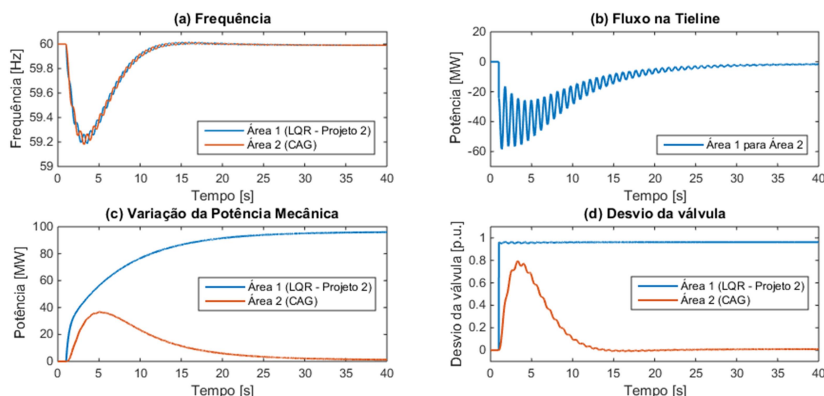


FIGURA 4 – (a) Comportamento da frequência, (b) fluxo na *tieline*, (c) variação da potência mecânica e (d) sinal do desvio da válvula nos geradores para cada área do Cenário 2.

Através dos resultados da Figura 4a, verifica-se que a frequência de ambas as áreas estabilizam no valor nominal da rede. Além disso, as Figura 4b e c mostram que a Área 2 fornece potência para a Área 1 durante o período transitório e à medida que a frequência vai se reestabelecendo novamente ao valor nominal, a Área 1 vai assumindo cada vez mais a carga inserida na barra 1. Logo, tanto o fluxo na *tieline* quanto a potência mecânica da área 2 retornam ao valor inicial (pré-distúrbio). A Figura 4d mostra o comportamento da válvula de admissão para as duas áreas. Nota-se que para a Área 1 não há overshoot dessa grandeza, devido à ponderação dessa variável na matriz "Q" que penaliza desvios de ΔP_v e ΔP_d .

3.5 Resultados do Cenário 3 – Sistema interligado com duas áreas de controle

A Figura 5 apresenta o comportamento dinâmico das principais variáveis envolvidas no controle de geração considerando controle LQR híbrido na Área 1 e CAG convencional na Área 2, com a aplicação um degrau de carga de 1,0 pu na barra 1. Os valores dos parâmetros equivalentes do regulador, turbina e gerador síncrono da Área 2 são os mesmos apresentados na Tabela 1.

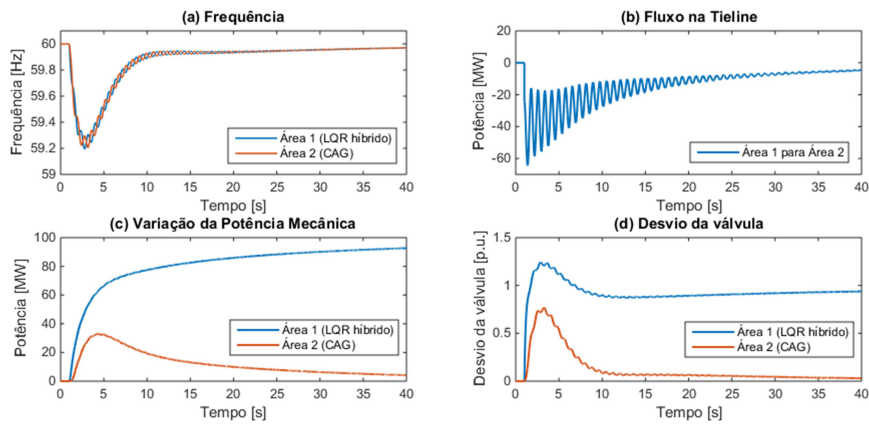


FIGURA 5 – (a) Comportamento da frequência, (b) fluxo na *tie*line, (c) variação da potência mecânica e (d) sinal do desvio da válvula nos geradores para cada área do Cenário 3.

De modo geral, os resultados apresentados na Figura 5 para o Cenário 3 mostram comportamentos dinâmicos de fluxo de potência na *tie*line e de variação de potência mecânica próximos aos apresentados no Cenário 2. No entanto, devido à constante escolhida para o integrador, o restabelecimento da frequência ao valor pré-distúrbio se dá de maneira mais lenta, sendo necessário uma janela de tempo de simulação de mais de 120 segundos para que se perceba o valor de frequência restaurado ao valor exato de 60Hz. Por outro lado, a Figura 5d mostra um *overshoot* maior do sinal da válvula na Área 1 se comparado ao resultado da Figura 4d, uma vez que a ponderação da matriz "Q" não está na variável de variação do sinal da válvula, mas na variação da frequência.

4.0 - CONCLUSÃO

Com base nas análises dos gráficos de desvios de frequência, potência mecânica e desvio da válvula, no geral, as respostas dinâmicas com o uso do LQR foram mais satisfatórias quando comparado ao CAG convencional para sistemas interligados. O LQR apresentou um desempenho otimizado, com picos de sobressinal mais amenos durante o período transitório e também menor impacto no sinal de desvio da válvula de admissão da turbina.

Constata-se que o LQR cumpriu seu propósito definido em projeto, e em todos os cenários analisados anulou os desvios de frequência em regime permanente, amortecendo as oscilações na frequência do sistema. Tal resultado é obtido pela rápida ação do controlador, que minimiza as perdas energéticas, tornando possível o retorno da frequência a valores muito próximos da nominal, mesmo quando não existe a ação de integradores. Entretanto, devido aos diferentes critérios de ajuste nos projetos de LQR propostos, observou-se uma diferença na performance de cada controlador em termos de estabilidade transitória, rapidez na eliminação dos distúrbios e esforço sobre o elemento de controle principal (válvula de admissão). Para cada ponto de equilíbrio do sistema, a frequência operacional nem sempre foi restaurada para o seu valor nominal pré-distúrbio (60 Hz), somente para os projetos do LQR Híbrido e o chamado Projeto 2 de LQR.

Mesmo que no sistema analisado não haja um sinal de realimentação do controlador para a correção dos desvios de fluxo de potência na *tie*line, com base nos resultados obtidos, conclui-se que o LQR projetado neste trabalho atua tanto no restabelecimento da frequência quanto no restabelecimento dos intercâmbios programados na interligação com outra área de controle.

Trabalhos futuros podem considerar áreas de controle com parâmetros diferentes entre si, tanto nos modelos de turbinas quanto em outros modelos. Pode-se também considerar um número maior de áreas de controle (algumas sem o CAG) para que o sistema estudado se aproxime mais da realidade dos complexos sistemas interligados.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) KUNDUR, P., PASERBA, J.J. *et al.* Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401. Agosto de 2004.
- (2) KUNDUR, P. Power System Stability and Control. McGraw-Hill – Estados Unidos. 1994.
- (3) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Standard Definitions of Terms for Automatic Generation Control on Electric Power Systems. IEEE No 94-1970 , pp.1-12. Agosto de 1970.

- (4) CRARY, S.B., MCCLURE, J. B. Supplementary Control of Prime-Mover Speed Governors. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 61, no. 4, pp. 209-214. Abril de 1942.
- (5) CONCORDIA, C., KIRCHMAYER, L. K. Tie-Line Power and Frequency Control of Electric Power Systems. Trans. of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 72, no. 3, pp. 562-572. Junho de 1953.
- (6) COHN, N. Some Aspects of Tie-Line Bias Control on Interconnected Power Systems. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 75, no. 3. Janeiro de 1956.
- (7) ELGERD, O. I., FOSHA C. Optimum megawatt-frequency control of multiarea electric energy systems. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 89, no. 4, pp. 556-563. 1970.
- (8) ELGERD, O. I., FOSHA C. The megawatt-frequency control problem: A new approach via optimal control. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 89, no. 4, pp. 563-570. 1970.
- (9) CALOVIC, M. Linear Regulator Design for a Load and Frequency Control. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-91, no. 6, pp. 2271-2285. Novembro de 1972.
- (10) MOORTHI, V. R., AGGARWAL, R. P. Suboptimal and near-optimal control of a load-frequency-control system. Electrical Engineers, Proc of the Institution of, vol. 119, no. 11, pp. 1653-1660. Novembro de 1972.
- (11) KO, H.S; LEE, K.Y; KIM, H.C. An intelligent based LQR controller design to power system stabilization, Electric Power Systems Research 71. 2004.
- (12) WANG, Y., ZHOU, R., WEN, C. Robust load-frequency controller design for power systems. IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution, vol. 140, no. 1, pp. 11-16. Janeiro de 1993.
- (13) BEVRANI, H., MITANI, Y., TSUJI, K. Robust decentralised load-frequency control using an iterative linear matrix inequalities algorithm. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 151, no. 3, pp. 347-354. Maio de 2004.
- (14) RERKPREEDAPONG, D., HASANOVIC, A., FELIACHI, A. Robust load frequency control using genetic algorithms and linear matrix inequalities. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 2, pp. 855-861, Maio de 2003.
- (15) BEVRANI, H. Robust Power System Frequency Control. Springer – Estados Unidos. 2009.
- (16) FILHO, X.V. Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de Geração. Editora Campus LTDA –Brasil. 1984.
- (17) KOTHARI, M.L., NANDA J. Application of optimal control strategy to automatic generation control of a hydrothermal system. IEE Proceedings D - Control Theory and Applications, vol. 135, no. 4, pp. 268-274. Julho de 1988.
- (18) KALMAN, R.E. Contribution to the theory of optimal control. Bol. Soc. Mat. Mexicana, vol. 5, no. 2, pp. 102-119. 1960.
- (19) FRANKLIN, G.F., POWELL, J.D., NAEINI, E.A. Feedback Control of Dynamic Systems. Prentice Hall – Estados Unidos. 2009.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



CONRADO GABRIEL SODRÉ ALVES DE MORAES, Possui graduação em engenharia elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2016). atualmente é mestrando do programa de pós-graduação em sistemas de energia (PPGSE) pela UTFPR. realiza pesquisas na área de sistemas elétricos de potência com ênfase em estudos estabilidade de frequência, englobando e projetos de controladores ótimos no controle de geração. atualmente atua profissionalmente na área de projetos e instalações elétricas industriais com foco no setor de petróleo e derivados.