

DESENVOLVIMENTO DE CONTROLADORES MULTIVARIÁVEIS LQR E ROBUSTO PARA INTEGRAÇÃO DE UMA MICRORREDE À REDE ELÉTRICA

MARCELO DE C. FERNANDES*, PEDRO M. DE ALMEIDA*, GABRIEL A. FOGLI†, ADEÍLSON DA S. B. RIBEIRO*, PEDRO G. BARBOSA*

**Núcleo de Automação e Eletrônica de Potência
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil*

*†Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
João Monlevade, Minas Gerais, Brasil*

Emails: marcelo.castro@engenharia.ufjf.br, pedro.machado@ufjf.edu.br, gabrielfogli@gmail.com, adeilson.ribeiro@engenharia.ufjf.br, pedro.gomes@ufjf.edu.br

Abstract— This paper presents the mathematical modeling of a voltage-sourced converter interfacing a low-voltage power grid with a DC microgrid. Two different modern multivariable control strategies are presented: the linear quadratic regulator (LQR) and the robust control. The controllers are designed and tested in PSIM and results from simulation are shown. Performance of both controllers are evaluated and compared under a bidirectional power flow operation.

Keywords— DC microgrid, VSC, Linear quadratic regulator, Robust control.

Resumo— Este artigo apresenta a modelagem matemática de um conversor fonte de tensão que realiza a interface entre uma rede elétrica de baixa tensão e uma microrrede CC. Duas estratégias de controle multivariável são apresentadas: a abordagem de um regulador linear quadrático (LQR) e de um controlador robusto. Os controladores são projetados e testados em um ambiente de simulação digital. As respostas de ambos controladores são avaliadas e comparadas diante de uma operação que envolve um fluxo de potência bidirecional.

Palavras-chave— Microrrede CC, VSC, Regulador linear quadrático, Controle robusto.

1 Introdução

Atualmente observa-se uma transição no sistema energético mundial, no qual grandes usinas geradoras centralizadas dão espaço a pequenos, distribuídos e descentralizados, sistemas de geração. A Geração Distribuída (GD) tem sido um tema muito estudado nos últimos anos, principalmente devido à preocupação com o crescimento da demanda de energia elétrica e também devido ao crescente interesse de integrar as fontes renováveis ao sistema elétrico de potência.

As microrredes, que podem ser de corrente alternada (CA), corrente contínua (CC) ou híbrida, também têm despertado interesse nessa transição observada no sistema elétrico mundial. Elas são compostas de múltiplas fontes renováveis de GD, sistemas de armazenamento de energia e cargas, todos conectados no nível de distribuição a uma rede elétrica pelo ponto de acomplamento comum (PAC) (Olivares et al., 2014). A conexão da microrrede no PAC é, geralmente, realizada através de um conversor eletrônico de potência operando com o auxílio de controladores especialmente projetados para garantir o funcionamento eficiente, adequado e estável de todos os componentes da microrrede (Ornelas-Tellez et al., 2017).

A integração de microrredes às redes elétricas introduz uma série de desafios relacionados ao controle e proteção desses sistemas. Como exemplo,

podemos citar os fluxos de potência bidirecionais (Olivares et al., 2014). Uma microrrede pode apresentar diversos perfis de fluxos de potência devido à presença de GD e a utilização de fontes renováveis não-despacháveis. Como consequência, há momentos em que a microrrede demanda mais energia do que é gerada, necessitando que esse déficit seja suprido pela rede elétrica principal, através do PAC. O contrário também pode ocorrer, quando há um superávit de geração em relação ao consumo interno da microrrede, em que o excedente de potência deve ser exportado para a rede elétrica principal. Com o intuito de adequar o projeto de controladores a esses desafios, alguns trabalhos têm sido propostos na literatura (Chen et al., 2016), (Miranda et al., 2013).

Inserido neste contexto, o presente artigo apresenta a modelagem matemática assim como o projeto de controladores multivariáveis de um conversor fonte de tensão (VSC - *Voltage Source Converter*) que realiza a interface entre uma microrrede CC e uma rede elétrica CA de baixa tensão. A metodologia convencional de projeto de controladores é baseada em uma malha interna para a corrente e uma malha externa, com dinâmica consideravelmente mais lenta, para a tensão no barramento CC. Essa abordagem apresenta alguns problemas, especialmente quando as constantes de tempo das duas malhas não são suficientemente distanciadas entre si (Rodríguez-Cabero et al., 2016) ou quando varia-

ções paramétricas não permitem o desacoplamento eficaz entre as variáveis de estado. Neste trabalho, a metodologia tradicional é substituída por uma abordagem multivariável em espaço de estados. A metodologia adotada permite a realização e otimização do projeto do controlador, considerando-se a interação entre as variáveis de estado, além de apresentar uma certa robustez a variações paramétricas (Rodríguez-Cabero et al., 2016).

Duas técnicas de controle são apresentadas e analisadas, o regulador linear-quadrático (LQR-*Linear Quadratic Regulator*) e o controlador robusto. O LQR é baseado na alocação ótima dos polos através do cálculo de ganhos apropriados para a realimentação. Já o controlador robusto estudado é baseado numa alocação de polos através da solução de inequações matriciais lineares (LMI-*Linear Matrix Inequality*). Resultados de simulação são apresentados para comparar as respostas e o desempenho dos controladores diante das variações do fluxo de potência entre a microrrede CC e a rede elétrica CA.

2 Modelagem Matemática

Na modelagem matemática, é considerado que o VSC está conectado à rede através de um filtro L, que é adotado por sua simplicidade. Desprezando os harmônicos de corrente e tensão pode-se desenhar o circuito presente na Figura 1 para cada uma das fases. Nela, v_t representa a tensão média instantânea nos terminais do VSC, i representa a corrente média instantânea nos terminais do VSC e v_{pac} representa a tensão instantânea no PAC. Além disso, observa-se também a indutância do filtro L_i e sua inerente resistência r_i , assim como a impedância da rede, representados aqui pelas indutância L_g e resistência r_g .

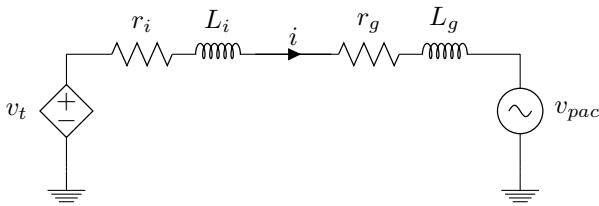


Figura 1: Representação da interface entre o VSC e a rede para cada uma das fases.

Adotando $R = r_i + r_g$ e $L = L_i + L_g$, pode-se escrever uma relação em coordenadas síncronas que represente a dinâmica do sistema. Porém, é importante ressaltar que a tensão nos terminais do inversor, v_t , pode ser escrita em função dos índices de modulação em quadratura e eixo direto, m_q e m_d respectivamente, e em função da tensão v_{cc} no capacitor do barramento CC. Desta forma, tem-se (de Almeida et al., 2012; Yazdani and Iravani, 2010):

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}i_d = +\omega i_q - \frac{R}{L}i_d + \frac{m_d}{2L}v_{cc} - \frac{1}{L}v_{pac,d}, \\ \frac{d}{dt}i_q = -\omega i_d - \frac{R}{L}i_q + \frac{m_q}{2L}v_{cc} - \frac{1}{L}v_{pac,q}. \end{cases} \quad (1)$$

Para completar o modelo, deve-se incluir a modelagem do comportamento dinâmico da tensão sobre o capacitor que determina o barramento. Na Figura 2 o fluxo de potência entre o barramento CC e a rede CA é apresentado. A fonte de corrente contínua pode ser utilizada para representar, de maneira simplificada, todos os equipamentos conectados à microrrede através do barramento CC. Assim, i_{in} assume valores positivos quando a geração da microrrede excede o consumo, e valores negativos quando o consumo é maior do que a geração.

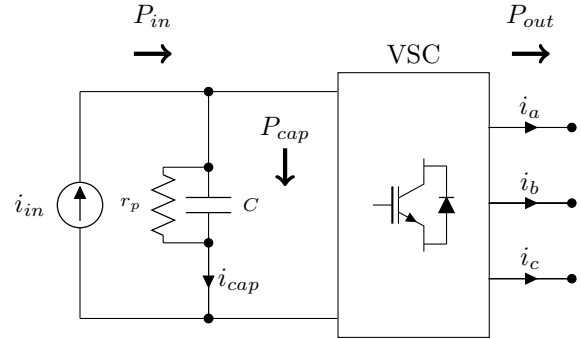


Figura 2: Representação do fluxo de potência através do conversor.

Analisando a Figura 2 e assumindo que não há perdas no processo de conversão CC/CA efetuado pelo VSC, podemos escrever a equação de balanço de potência:

$$P_{in} = P_{cap} + P_{out}. \quad (2)$$

A potência do capacitor, no modelo apresentado, depende de duas parcelas, uma referente à resistência r_p e outra referente à capacitância C :

$$P_{cap} = \frac{v_{cc}^2}{r_p} + C \left(\frac{d}{dt}v_{cc} \right) v_{cc}. \quad (3)$$

Como a resistência r_p é muito grande, a parcela da potência P_{cap} relacionada à ela (de Almeida et al., 2012) pode ser desprezada nos passos seguintes da modelagem.

Na equação (2), a potência de entrada, P_{in} , depende da corrente i_{in} e da tensão do barramento CC, v_{cc} . Já a potência de saída do conversor, P_{out} , pode ser escrita em função das componentes dq da corrente e da tensão de saída do VSC, v_t (de Almeida et al., 2012). No entanto, como já foi dito, v_t pode ser escrita em função de v_{cc} , m_d e de m_q . Assim, (2) pode ser reescrita como segue:

$$i_{in}v_{cc} = C \left(\frac{d}{dt} v_{cc} \right) v_{cc} + \frac{3m_d v_{cc}}{4} i_d + \frac{3m_q v_{cc}}{4} i_q. \quad (4)$$

Como o termo v_{cc} aparece em todos os termos da equação acima, pode-se dividir (4) por este termo, resultando em:

$$\frac{d}{dt} v_{cc} = i_{in} - \frac{3m_d}{4} i_d - \frac{3m_q}{4} i_q. \quad (5)$$

Logo, agrupando (1) e (5), tem-se o sistema:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = +\omega i_q - \frac{R}{L} i_d + \frac{m_d}{2L} v_{cc} - \frac{1}{L} v_{pac,d}, \\ \frac{di_q}{dt} = -\omega i_d - \frac{R}{L} i_q + \frac{m_q}{2L} v_{cc} - \frac{1}{L} v_{pac,q}, \\ \frac{dv_{cc}}{dt} = \frac{i_{in}}{C} - \frac{3m_d}{4C} i_d - \frac{3m_q}{4C} i_q. \end{cases} \quad (6)$$

Nota-se que em (6) há uma multiplicação das variáveis de controle, m_d e m_q , pelas variáveis de estado i_d , i_q e v_{cc} , tornando o conjunto não-linear (Suntio et al., 2018). Logo, é necessário linearizar o sistema em torno de um ponto de operação em regime permanente, e, para isso, basta fazer com que as derivadas das variáveis de estado, calculadas neste ponto, sejam nulas. É importante mencionar que variáveis de tensão e corrente apresentadas em letras maiúsculas representam as variáveis no ponto de operação em regime permanente. Também é necessário lembrar que a componente de eixo em quadratura da tensão do PAC, $V_{pac,q}$, é igual a zero em estado permanente, devido ao rastreamento da malha de captura de fase (PLL - *Phase-Locked Loop*) (Rodriguez et al., 2006). Além disso, pode-se definir que o ponto de operação em regime permanente possui potência reativa igual a zero, de forma que a componente de eixo em quadratura da corrente terminal em estado permanente, I_q , também é nula. Desta forma o ponto quiescente de operação é descrito por (Suntio et al., 2018):

$$\begin{cases} M_d = \frac{V_{pac,d} + \sqrt{(\frac{8}{3})I_{in}V_{cc}R + V_{pac,d}^2}}{V_{cc}}, \\ I_d = \frac{4I_{in}}{3M_d}, \\ M_q = \frac{2LI_d\omega}{V_{cc}}. \end{cases} \quad (7)$$

Linearizando o sistema (6) em torno do ponto de equilíbrio definido por (7), pode-se escrever a dinâmica de pequenos sinais como:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \\ \tilde{v}_{cc} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & \frac{M_d}{2L} \\ -\omega & -\frac{R}{L} & -\frac{M_q}{2L} \\ -\frac{3M_d}{4C} & -\frac{3M_q}{4C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \\ \tilde{v}_{cc} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -\frac{V_{cc}}{2L} & 0 \\ 0 & -\frac{V_{cc}}{2L} \\ -\frac{3I_d}{4C} & -\frac{3I_q}{4C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{m}_d \\ \tilde{m}_q \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{in} \\ \tilde{v}_{pac,d} \\ \tilde{v}_{pac,q} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (8)$$

onde o sobrescrito ($\tilde{}$) representa pequenas perturbações em torno do ponto de operação. Desta forma, uma variável de estado é representada por $b = B + \tilde{b}$.

3 Projeto dos Controladores

No projeto do controlador, uma abordagem multivariável é adotada para as vantagens dessa metodologia sejam aproveitadas e para que os contrapontos da estratégia de controle convencional sejam evitados, como mencionado na Seção 1.

No presente sistema, há duas variáveis de controle m_d e m_q . Logo, apenas duas variáveis de estado podem ser controladas de forma independente. Assim, será realizado o controle da componente de corrente em quadratura, i_q , na saída do VSC, e o controle da tensão do barramento CC, v_{cc} , que deve ter seu valor constante para garantir o funcionamento adequado do VSC e dos dispositivos conectados à microrrede. Uma vez que a corrente de eixo direto e a tensão no barramento estão diretamente relacionadas, controlando v_{cc} , i_d é indiretamente controlada (Rodríguez-Cabero et al., 2016). De forma a garantir que o erro seja nulo em estado permanente para essas duas variáveis, deve-se incluir uma ação de controle do tipo integral. Sendo assim, utilizando variáveis auxiliares x_1 e x_2 , equivalentes à integral dos erros de corrente em quadratura e da tensão do barramento CC, respectivamente, tem-se:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} x_1 = i_q^* - (I_q + \tilde{i}_q), \\ \frac{d}{dt} x_2 = v_{cc}^* - (V_{cc} + \tilde{v}_{cc}). \end{cases} \quad (9)$$

onde o sobrescrito ($*$) indica o valor de referência. Além disso, (9) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^* - I_q \\ v_{cc}^* - V_{cc} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \\ \tilde{v}_{cc} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

Logo, é possível combinar as equações (8) e (10) em um espaço de estados aumentado como:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \\ \tilde{v}_{cc} \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & \frac{M_d}{2L} & 0 & 0 \\ -\omega & \frac{M_q}{2L} & -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ -\frac{3M_d}{4C} & -\frac{3M_q}{4C} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \\ \tilde{v}_{cc} \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \\ &+ \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{V_{cc}}{2L} & 0 & -\frac{3I_d}{4C} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{V_{cc}}{2L} & -\frac{3I_q}{4C} & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}^T} \begin{bmatrix} \tilde{m}_d \\ \tilde{m}_q \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tilde{i}_{in} \\ \tilde{v}_{pac,d} \\ \tilde{v}_{pac,q} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_q^* - I_q \\ v_{cc}^* - V_{cc} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

3.1 Controlador LQR

Para aplicar a estratégia de projeto do LQR, deve-se fazer com que a lei de controle do sistema seja (Sontag, 2013):

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_L \mathbf{x}. \quad (12)$$

A matriz de parâmetros \mathbf{K}_L pode ser calculada substituindo (12) em (13) e minimizando a função custo J (Rodríguez-Cabero et al., 2016).

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt. \quad (13)$$

Os ganhos da matriz \mathbf{K}_L do controlador podem, então, ser sintonizados escolhendo valores apropriados para as matrizes \mathbf{Q} e \mathbf{R} , que ponderam os efeitos da minimização sobre as variáveis de estado e sobre as variáveis de controle, respectivamente (Rodríguez-Cabero et al., 2016). No presente estudo, as matrizes \mathbf{Q} e \mathbf{R} foram determinadas de forma que o sistema de controle apresentasse a resposta desejada. As duas matrizes são apresentadas em (14).

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \text{diag}([1 \ 1 \ 1 \ 10^6 \ 10^5]), \\ \mathbf{R} &= \text{diag}([10^2 \ 10^2]). \end{aligned} \quad (14)$$

Assim, para determinação dos valores da matriz \mathbf{K}_L de ganhos do controlador, deve-se escolher, primeiro, um ponto de operação em regime permanente, correspondente a um ponto de equilíbrio, no qual o sistema (11) é linearizado e para qual os parâmetros em (7) são calculados.

3.2 Controlador Robusto

Em um controlador robusto, a lei de controle a apresentada em (15).

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}_R \mathbf{x}. \quad (15)$$

Assim, um sistema linear generalizado pode ser simplificado como segue:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} = (\mathbf{A} + \mathbf{B} \mathbf{K}_R) \mathbf{x}. \quad (16)$$

O controle robusto consiste, então, em achar a matriz \mathbf{K}_R para que o sistema descrito em (16) seja assintoticamente estável (Duan and Yu, 2013). De acordo com (Duan and Yu, 2013), isso significa achar uma matriz simétrica positiva definida \mathbf{P} e uma matriz \mathbf{W} que satisfaçam a seguinte LMI:

$$\mathbf{A} \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}^T + \mathbf{B} \mathbf{W} + \mathbf{W}^T \mathbf{B}^T < 0. \quad (17)$$

lembrando que, neste caso, temos que: $\mathbf{K}_R = \mathbf{W} \mathbf{P}^{-1}$.

Neste trabalho, a abordagem escolhida para o controlador robusto consiste na determinação de uma região \mathbb{S} para a localização dos polos de malha fechada. Este tipo de abordagem robusta permite a \mathbb{D} -estabilidade do sistema (Duan and Yu, 2013). Para isso, outras LMIs devem ser adicionadas, contendo informações dessa região específica. É necessário mencionar que essa área deve ser convexa para que seja possível calcular matrizes \mathbf{W} e \mathbf{P} que satisfaçam as LMIs (Boyd et al., 1994). Na Figura 3, a região convexa \mathbb{S} , determinada através dos parâmetros α , ρ e θ , é representada.

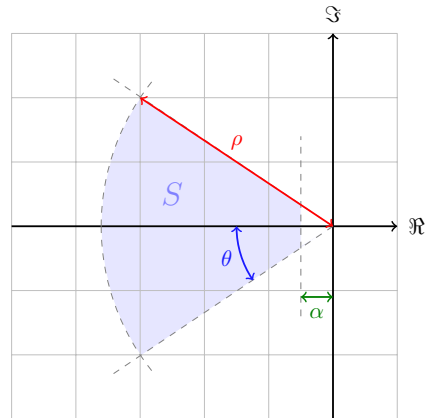


Figura 3: Região \mathbb{S} convexa especificada através dos parâmetros α , ρ e θ .

No projeto desse tipo de controlador robusto, não há a escolha de um ponto de equilíbrio. Ao invés de apenas um ponto ser determinado, limites são utilizados a fim de se determinar uma faixa de operação. Desta forma, após ter sido feita a escolha para a tensão de operação do barramento CC, V_{cc} , e ter sido determinado o valor da tensão da

rede, v_{pac} , pode-se escolher as potências máxima, P_{in}^{max} , e mínima, P_{in}^{min} , sob as quais o VSC deve operar. Para cada uma das potências P_{in} , tem-se um conjunto (11). Assim, um sistema de LMIs pode ser montado, de forma a incluir as especificações α , ρ e θ , assim como o intervalo de operação $P_{in}^{max} < P_{in} < P_{in}^{min}$, e por fim, os valores de \mathbf{W} e \mathbf{P} que satisfaçam todas as inequações podem ser calculados. Assim, o sistema final a ser resolvido é (Duan and Yu, 2013):

$$\begin{aligned}
2\alpha\mathbf{P} + \mathbf{M}_1 &< 0, \\
2\alpha\mathbf{P} + \mathbf{M}_2 &< 0, \\
\begin{bmatrix} -\rho\mathbf{P} & \mathbf{A}_1\mathbf{P} + \mathbf{B}_1\mathbf{W} \\ \mathbf{P}\mathbf{A}_1^T + \mathbf{W}^T\mathbf{B}_1^T + & -\rho\mathbf{P} \end{bmatrix} &< 0, \\
\begin{bmatrix} -\rho\mathbf{P} & \mathbf{A}_2\mathbf{P} + \mathbf{B}_2\mathbf{W} \\ \mathbf{P}\mathbf{A}_2^T + \mathbf{W}^T\mathbf{B}_2^T + & -\rho\mathbf{P} \end{bmatrix} &< 0, \\
\begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 \sin \theta & \mathbf{L}_1 \cos \theta \\ \mathbf{N}_1 \cos \theta & \mathbf{M}_1 \sin \theta \end{bmatrix} &< 0, \\
\begin{bmatrix} \mathbf{M}_2 \sin \theta & \mathbf{L}_2 \cos \theta \\ \mathbf{N}_2 \cos \theta & \mathbf{M}_2 \sin \theta \end{bmatrix} &< 0.
\end{aligned} \tag{18}$$

, por fim

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}_1 &= \mathbf{A}_1\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_1^T + \mathbf{B}_1\mathbf{W} + \mathbf{W}^T\mathbf{B}_1^T, \\
\mathbf{M}_2 &= \mathbf{A}_2\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_2^T + \mathbf{B}_2\mathbf{W} + \mathbf{W}^T\mathbf{B}_2^T, \\
\mathbf{L}_1 &= \mathbf{A}_1\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{A}_1^T + \mathbf{B}_1\mathbf{W} - \mathbf{W}^T\mathbf{B}_1^T, \\
\mathbf{L}_2 &= \mathbf{A}_2\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{A}_2^T + \mathbf{B}_2\mathbf{W} - \mathbf{W}^T\mathbf{B}_2^T, \\
\mathbf{N}_1 &= -\mathbf{A}_1\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_1^T - \mathbf{B}_1\mathbf{W} + \mathbf{W}^T\mathbf{B}_1^T, \\
\mathbf{N}_2 &= -\mathbf{A}_2\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_2^T - \mathbf{B}_2\mathbf{W} + \mathbf{W}^T\mathbf{B}_2^T.
\end{aligned} \tag{19}$$

em que o subíndice (1) nas matrizes \mathbf{A} e \mathbf{B} refere-se aos valores obtidos quando adotamos P_{in}^{max} . Analogamente, o subíndice (2) nas mesmas matrizes refere-se a P_{in}^{min} .

4 Sistema de Testes e Cálculo de Ganhos

O sistema em que a resposta dos controladores são analisados consiste na integração de um VSC à rede CA. Na Figura 4, o sistema testado é representado de forma simplificada. O circuito de sincronismo utilizado é o mesmo apresentado em (Rodriguez et al., 2006), e trata-se de um DSOGI-PLL (*Dual Second Order Generalized - Phase Locked Loop*). Os parâmetros desse sistema são apresentados na Tabela 1.

Para o controlador LQR, é necessário identificar um ponto de operação em regime permanente para que o cálculo da matriz \mathbf{K}_L seja efetuado. Os valores utilizados para o cálculo das variáveis de equilíbrio em (7) e das matrizes em (11) são apresentados na Tabela 2.

A matriz \mathbf{K}_L de ganhos para o LQR é calculada através da função *lqr* do MATLAB[©] e é apresentada em (20).

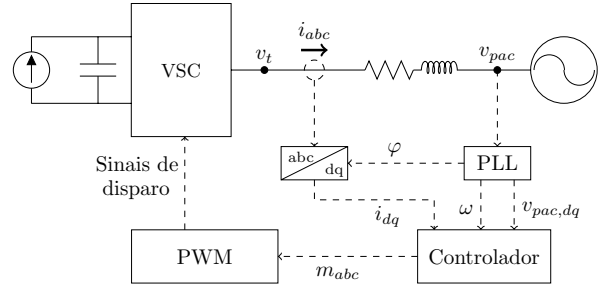


Figura 4: Diagrama simplificado do sistema estudado.

Tabela 1: Parâmetros do sistema.

Descrição	Valor
Tensão eficaz de linha ($v_{pac,rms}$)	220 V
Frequência da rede (f)	60 Hz
Capacitância do barramento CC (C)	2 mF
Resistência do Capacitor (r_p)	1 kΩ
Tensão do barramento CC (V_{cc})	400 V
Indutância L ($L_i + L_g$)	2 mH
Resistência R ($r_i + r_g$)	75,4 mΩ
Frequência de comutação (f_s)	20 kHz

Tabela 2: Parâmetros para o controlador LQR.

Descrição	Valor
Potência de entrada (P_{in})	20 kW
Corrente de entrada (I_{in})	50 A
Tensão no PAC no eixo d ($V_{pac,d}$)	180 V
Tensão no PAC no eixo q ($V_{pac,q}$)	0 V
Referência (I_q^*)	0 A

$$\mathbf{K}_L = \begin{bmatrix} 0,07 & -2 \cdot 10^{-4} & -0,16 & 3,52 & 31,60 \\ -1 \cdot 10^{-3} & 0,11 & -5 \cdot 10^{-3} & -99,94 & 1,11 \end{bmatrix}. \tag{20}$$

Já para o controlador robusto, é necessário identificar tanto o ponto de potência máxima de entrada quanto o ponto de mínima para o cálculo de \mathbf{K}_R . Na Tabela 3 os valores apresentados são utilizados para os cálculos dos parâmetros necessários para a montagem do sistema (18) de LMIs.

A matriz \mathbf{K}_R de ganhos para o controlador robusto é, então, calculada através da toolbox para LMIs do MATLAB[©] e é apresentada em (21).

$$\mathbf{K}_R = \begin{bmatrix} 0,08 & 2 \cdot 10^{-3} & -0,10 & 0,26 & 12,45 \\ 3 \cdot 10^{-4} & 0,06 & -6 \cdot 10^{-3} & -9,36 & 0,70 \end{bmatrix}. \tag{21}$$

5 Resultados de Simulação

O sistema da Figura 4 foi desenvolvido com os ganhos apresentados em (20) e (21) e simulado no ambiente PSIM[©], com um tempo de simulação total de 1,5 s. Neste intervalo de tempo, a potência

Tabela 3: Parâmetros para o controlador robusto.

Descrição	Valor
Potência max. de entrada (P_{in}^{max})	30 kW
Corrente max. de entrada (I_{in}^{max})	75 A
Potência min. de entrada (P_{in}^{min})	-30 kW
Corrente min. de entrada (I_{in}^{min})	-75 A
Tensão no PAC no eixo d ($V_{pac,d}$)	180 V
Tensão no PAC no eixo q ($V_{pac,q}$)	0 V
Referência (I_q^*)	0 A
Tempo de acomodação (t_s)	0,031 s
Atenuação mínima (α)	129 s ⁻¹
Amortecimento mínimo (θ)	45 °
Raio máximo (ρ)	12566,37 s ⁻¹

P_{in} é alterada de 0 para 20 kW e depois para 30 kW de forma instantânea nos instantes $t = 0,2$ s e $t = 0,5$ s, respectivamente. Do instante $t = 0,8$ s ao $t = 1,2$ s a potência P_{in} tem seu valor alterado de 30 kW para -30 kW através de uma reta. As duas seções subsequentes analisam as respostas dos controladores a esses eventos.

5.1 Controlador LQR

Na Figura 5 é apresentada a curva de referência para a potência ativa nos terminais do VSC assim como o comportamento da potência ativa medida. Pode-se perceber que o controlador consegue rastrear a referência para o valor projetado de 20 kW (ponto de equilíbrio) e também para os valores de 0 kW e 30 kW. No entanto, é possível perceber que, após a completa inversão do fluxo de potência, o controlador não consegue mais seguir a referência, comprometendo seu desempenho.

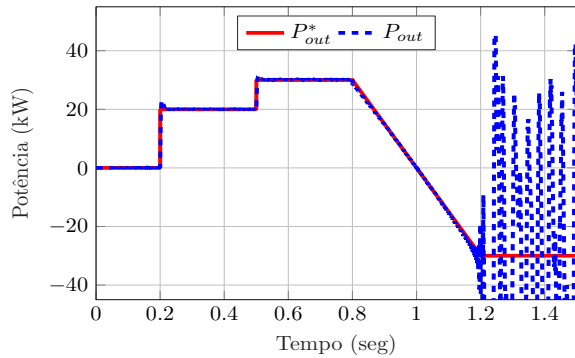


Figura 5: Comportamento da potência ativa nos terminais do VSC durante atuação do controlador LQR.

Este fato é corroborado pela Figura 6, na qual é apresentado o comportamento da tensão do barramento CC comparada ao valor de referência. Percebe-se que a tensão sofre variações nos instantes em que o valor de P_{in} muda em $t = 0,2$ s e $t = 0,5$ s, e que o controlador atua rapidamente para restaurar a tensão para o valor

de referência. Porém, nota-se que, mais uma vez, para $P_{in} = -30$ kW, o controlador não é capaz de atuar na manutenção da tensão do barramento CC.

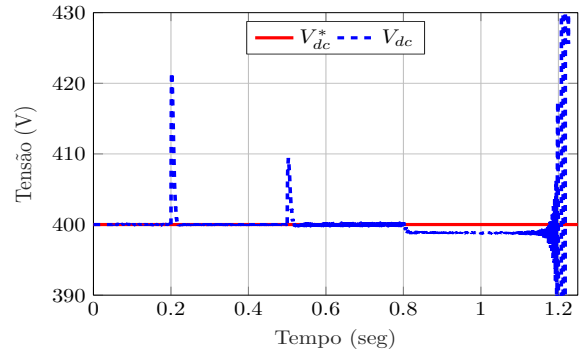
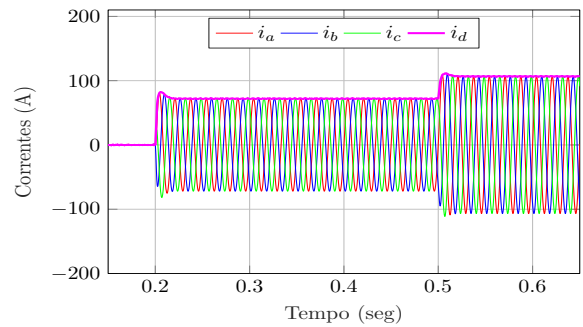
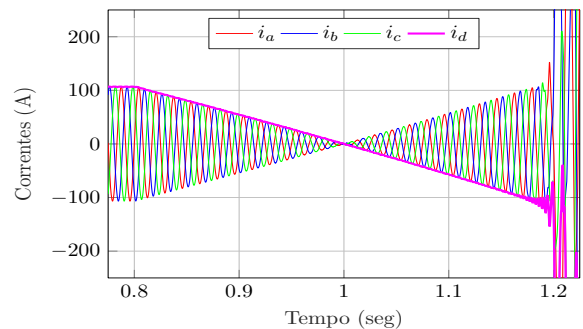


Figura 6: Comportamento da tensão do barramento CC da microrrede durante atuação do controlador LQR.

Na Figura 7, os comportamentos das correntes trifásicas, i_a , i_b e i_c , no terminal do VSC juntamente com o da componente de corrente de eixo direto, i_d são apresentados. Através da Figura 7(a), é possível notar que as correntes apresentam o comportamento esperado, aumentando sua magnitude durante os períodos de aumentos sucessivos na potência P_{in} . Contudo, na Figura 7(b) é revelado que o controlador falha ao invertermos completamente o fluxo da potência na fonte.



(a) Intervalo de operação: 0,15 a 0,65 s



(b) Intervalo de operação: 0,775 a 1,225 s

Figura 7: Comportamento das correntes trifásicas e de eixo direto nos terminais do VSC durante atuação do controlador LQR.

Na Figura 8, o mapa de polos e zeros do sistema em malha fechada utilizando o controlador LQR é representado. O ganho \mathbf{K}_L calculado em (20) é mantido para o funcionamento do sistema para potências P_{in} de 20 kW, 30 kW e -30 kW. Nota-se que para $P_{in} = -30$ kW, há um par de polos no semiplano direito, justificando a dinâmica instável observada.

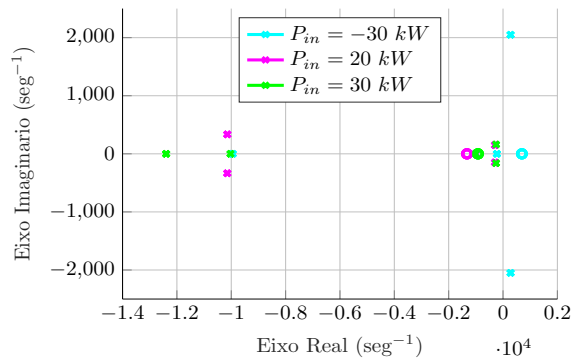


Figura 8: Mapa de polos e zeros do controlador LQR para diferentes níveis de potência P_{in} .

5.2 Controlador Robusto

Na Figura 9, é apresentada a referência para a potência ativa nos terminais do VSC assim como o comportamento da potência ativa medida. Percebe-se que o controlador permite que o sistema siga a referência mesmo quando há a completa inversão do fluxo de potência entre os instantes $t = 0,8$ s e $t = 1,2$ s.

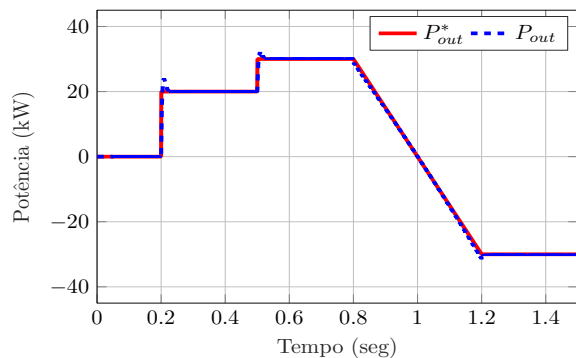


Figura 9: Comportamento da potência ativa nos terminais do VSC durante atuação do controlador robusto.

O comportamento da tensão do V_{cc} é apresentado na Figura 10. É possível notar que variações ocorrem nos momentos de mudança da potência P_{in} . Contudo, a tensão rapidamente retorna a seu valor de referência, e permanecendo neste valor quando não há mudanças na potência ativa.

Na Figura 11, os comportamentos das correntes trifásicas e de eixo direto no terminal do VSC são apresentados. Percebe-se que, ao contrário do

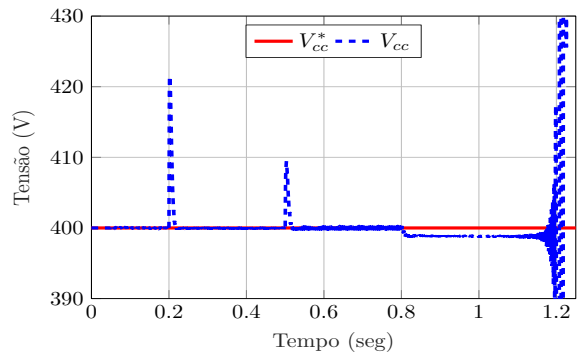
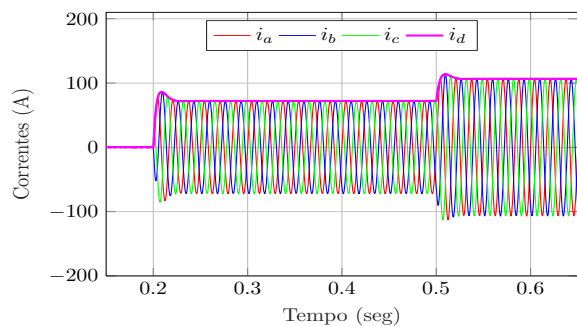
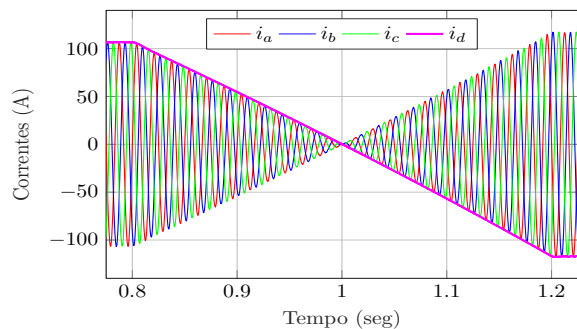


Figura 10: Comportamento da tensão do barramento CC da microrrede durante atuação do controlador robusto.

que é observado durante a atuação do controlador LQR, as correntes mantêm um funcionamento estável após a inversão da potência.



(a) Intervalo de operação: 0,15 a 0,65 s



(b) Intervalo de operação: 0,775 a 1,225 s

Figura 11: Comportamento das correntes trifásicas e de eixo direto nos terminais do VSC durante atuação do controlador robusto.

Na Figura 12, o mapa de polos e zeros do sistema em malha fechada utilizando o controlador robusto é representado. Nessa figura, nota-se que todos os polos estão dentro da área especificada e que não há nenhum polo localizado no semi-plano direito.

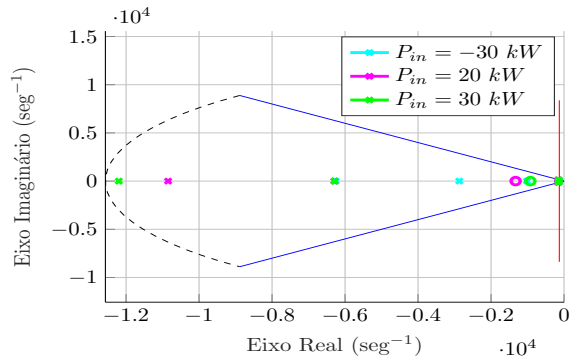


Figura 12: Mapa de polos e zeros do controlador robusto para diferentes níveis de potência P_{in} .

6 Conclusão

No presente artigo, modelos matemáticos de uma interface do tipo RL entre um VSC e a rede, e de um capacitor representando um barramento CC foram apresentados. Os modelos foram então combinados em uma representação do tipo espaço de estados para que a abordagem multivariável fosse possível. O modelo desenvolvido representa um VSC que interliga uma microrrede CC à rede elétrica.

Além disso, o projeto de duas estratégias de controle multivariável foram desenvolvidas: um controlador do tipo LQR e um controlador robusto baseado na alocação de polos através de LMIs. Ambas as estratégias foram testadas de forma a avaliar o desempenho diante de diferentes perfis de potência da microrrede CC. As potências P_{in} positivas indicavam um superávit de geração na microrrede, enquanto valores negativos indicavam um déficit que precisava ser suprido pela rede elétrica.

Através dos resultados foi possível observar que a estratégia LQR possui bom desempenho em torno dos valores de equilíbrio no qual o modelo foi linearizado. Porém, o controlador falhou quando inverteu-se o fluxo de potência, indicando que o desempenho de um controlador LQR depende fortemente dos valores para qual o modelo foi linearizado e projetado. A estratégia de controle robusto, então, se mostrou mais adequada, apresentando resposta estável em diferentes pontos de operação.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a UFJF, a UFOP, a FAPEMIG, CAPES, CNPq pelo suporte financeiro.

Referências

Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E. and Balakrishnan, V. (1994). *Linear matrix inequalities in system and control theory*, Vol. 15, Siam.

Chen, F., Burgos, R., Boroyevich, D., Rodriguez-Diaz, E., Meng, L., Vasquez, J. C. and Guerrero, J. M. (2016). Analysis and distributed control of power flow in dc microgrids to improve system efficiency, *Environment Friendly Energies and Applications (EFEA), 2016 4th International Symposium on*, IEEE, pp. 1–6.

de Almeida, P. M., Ferreira, A. A., Braga, H. A. C. and Barbosa, P. G. (2012). Projeto dos controladores de um conversor vsc usado para conectar um sistema de geração fotovoltaico à rede elétrica, *Congresso Brasileiro de Automática*, SBA.

Duan, G.-R. and Yu, H.-H. (2013). *LMIs in control systems: analysis, design and applications*, CRC press.

Miranda, L. M., Varajão, D., dos Santos, B., Araújo, R. E., Moreira, C. and Lopes, J. P. (2013). Power flow control with bidirectional dual active bridge battery charger in low-voltage microgrids, *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, IEEE, pp. 1–10.

Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Cañizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A. H., Gomis-Bellmunt, O., Saeedifard, M., Palma-Behnke, R. et al. (2014). Trends in microgrid control, *IEEE Transactions on smart grid* **5**(4): 1905–1919.

Ornelas-Tellez, F., Rico, J. J., Espinosa-Juarez, E. and Sanchez, E. (2017). Optimal and robust control in dc microgrids, *IEEE Transactions on Smart Grid*.

Rodríguez-Cabero, A., Sánchez, F. H. and Prodanovic, M. (2016). A unified control of back-to-back converter, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016 IEEE*, IEEE, pp. 1–8.

Rodriguez, P., Teodorescu, R., Candela, I., Timbus, A. V., Liserre, M. and Blaabjerg, F. (2006). New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions, *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC'06. 37th IEEE*, IEEE, pp. 1–7.

Sontag, E. D. (2013). *Mathematical control theory: deterministic finite dimensional systems*, Vol. 6, Springer Science & Business Media.

Suntio, T., Messo, T. and Puukko, J. (2018). *Power Electronic Converters: Dynamics and Control in Conventional and Renewable Energy Applications*, John Wiley & Sons.

Yazdani, A. and Iravani, R. (2010). *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*, John Wiley & Sons.