

Comparação de abordagens de controle via LMIs usando diferentes modelagens aplicado a microrrede CC com carga de potência constante

Marenice M. de Carvalho* Rafael S. Mendonça*
Renan Landau P. de Medeiros* Florindo A.C. Ayres Junior*
Vicente Ferreira Lucena Junior*

* Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, AM,
(e-mail: marenice, mendoncarm, renan, florindoayres, vicente
{@ufam.edu.br}).

Abstract: Direct current microgrids have been extensively studied due to their efficiency and compatibility with renewable energy sources. However, the presence of constant power loads can lead to instabilities due to the negative incremental impedance characteristic of these loads. In this context, three control methods based on linear matrix inequalities were compared in a DC MG system with constant power load using different approaches. The first method involves pole placement within a convex region formed by the intersection of three regions bounded by desired performance variables. The second method includes an additional constraint defined by the H_2 norm, which utilizes a mathematical model considering power variation as a disturbance. The third method uses the same set of constraints as the second method but with a mathematical model of parametric variation to capture changes in load power. The approaches were evaluated through a load power variation test, and the analysis of the results considered both qualitative aspects of state trajectories and quantitative performance indices. The findings indicate that the inclusion of the H_2 norm resulted in improved performance and system robustness against power variations.

Resumo: As microrredes de corrente contínua têm sido amplamente estudadas devido à sua eficiência e compatibilidade com fontes renováveis, porém, a presença de cargas de potência constante podem gerar instabilidades devido à característica de impedância incremental negativa dessas cargas. Neste sentido, foram comparados três métodos de controle baseados em Desigualdades Matriciais Lineares em um sistema de microrrede de corrente contínua com carga de potência constante utilizando diferentes abordagens. O primeiro método consiste na alocação de polos em uma região convexa formada pela interseção de três regiões limitadas pelas variáveis de desempenho desejadas. O segundo método inclui à região anterior uma restrição definida pela norma H_2 , o qual utiliza um modelo matemático que considera a variação de potência como um distúrbio. Já o terceiro método utiliza o mesmo conjunto restritivo do segundo método, porém, com um modelo matemático de incerteza paramétrica para capturar as mudanças de potência da carga. As abordagens foram avaliadas em um teste de variação de potência da carga e a análise dos resultados foi conduzida considerando tanto aspectos qualitativos das trajetórias dos estados quanto quantitativos com índices de desempenho. Os resultados obtidos mostram que a inclusão da norma H_2 refletiu em um melhor desempenho e robustez ao sistema frente variações de potência.

Keywords: Direct Current Microgrid; pole placement; norm H_2 ; Linear Matrix Inequalities; Constant Power Load.

Palavras-chaves: Microrrede de corrente contínua; alocação de polos; norma H_2 ; Desigualdades Matriciais Lineares; carga de potência constante.

1. INTRODUÇÃO

O aumento significativo na utilização de sistemas de geração de energia renovável tem impulsionado o desenvolvimento e a expansão dos sistemas de microrredes (MRs) de corrente contínua (CC), devido à sua capacidade de integração facilitada com tais fontes de energia sustentável. As MRs CC são compostas por unidades de geração distribuída (GD), unidades de armazenamento de energia, cargas e sistemas de controle, com o objetivo de assegurar a estabilidade operacional e o gerenciamento eficiente de energia (Sahoo et al., 2018; Kumar et al., 2019).

O controle de estabilidade desempenha um papel crucial no controle primário dos dispositivos conversores de corrente contínua para corrente contínua (CC-CC). Esses dispositivos desempenham a função de equalizar a tensão entre o barramento principal e as cargas ou fontes presentes no sistema (Kumar et al., 2019; Bessa et al., 2020). A estabilidade é considerada um aspecto crítico, pois afeta diretamente o desempenho e a eficiência das MRs CC, além de influenciar a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Dessa forma, diversas pesquisas têm se dedicado a abordar e aprimorar as estratégias de controle de estabilidade, a fim de proporcionar soluções efetivas para os desafios enfrentados pelas MRs CC.

Em Sadabadi et al. (2018), abordou-se o problema de instabilidade e deterioração de desempenho em sistemas de MRs CC ilhadas com operação de *Plug-and-Play* (PnP) de GD. Os autores adotaram um modelo politópico com incertezas paramétricas tanto na modelagem do sistema quanto no projeto do controlador. Com base nessa formulação, foi desenvolvida uma estrutura robusta de controle descentralizado de tensão, visando garantir estabilidade robusta e confiabilidade durante a operação em modo ilhado. A proposta foi avaliada por meio de simulações realizadas no ambiente do software MATLAB, e os resultados obtidos apresentaram várias vantagens significativas. Destacam-se, entre elas, o controle descentralizado de tensão sem a necessidade de comunicação entre os controladores, um desempenho aprimorado, a garantia de estabilidade do sistema durante transientes, a capacidade de *Plug-and-Play* das unidades de GD, entre outros aspectos positivos.

Em Lucas et al. (2019), foram investigados duas metodologias de projeto de controle robustos para atenuar as oscilações causadas por variações de carga de potência constante (CPL, *Constant Power Load*) em MRs CC. A primeira delas baseou-se no Teorema de Kharitonov (CKR), enquanto a segunda utilizou o Teorema da Esfera de Chebyshev (CCS). Ambos os métodos foram projetados por meio de um processo de otimização linear, visando alcançar um desempenho robusto. Constatou-se que o método proposto ofereceu um desempenho superior e uma estabilidade robusta para as MRs CC, mesmo diante das variações de potência na CPL.

No trabalho Jebali Ben Ghorbal et al. (2021), foi conduzida uma comparação entre duas técnicas de controle distintas para as MRs CC. Um método linear baseando-se em reguladores PI e outro método não linear. No segundo, envolveu-se a utilização de duas malhas de controle diferentes, utilizando um controle baseado no conceito de achatamento, e outro um controle de modo deslizante. A estabilidade dos dois controladores foi analisada tanto por meio de simulações quanto por estudos analíticos realizados em testes experimentais. Esses testes contemplaram variações na tensão de entrada do sistema, assim como variações na potência da carga. Os resultados obtidos demonstraram que o modelo não linear apresentou uma estabilidade superior no barramento de tensão do sistema.

Em Mahmoudi and Safari (2019) foi apresentado uma abordagem de controle robusto baseada em desigualdades matriciais lineares (LMIs, do inglês *Linear Matrix Inequalities*) para o gerenciamento de potência e estabilidade em um sistema de conversores. O sistema consistia em dois conversores, um *buck-boost* e um *boost*, configurados de maneira a formar um sistema de conversores CC com múltiplas entradas e saídas. Os autores propuseram e implementaram um controlador de realimentação de estados, utilizando a abordagem LMIs. Neste trabalho foi possível verificar que a abordagem de controle robusto baseada em LMIs foi eficaz na obtenção de um desempenho aprimorado do sistema de conversores, em comparação com a estratégia de controle convencional com PID.

Desta forma, este trabalho apresenta a comparação de três métodos de controle via LMIs utilizando modelagens diferentes. O primeiro método é alocação de polos em uma região convexa, a segunda é a inclusão da restrição da norma H_2 para o modelo matemático que visualiza a variação de potência como um distúrbio. O terceiro método aplica as mesmas restrições, no entanto utiliza o modelo de incerteza paramétrica para as mudanças de potência da carga. Tais métodos foram aplicados em um sistema de MR CC formado por uma estrutura *buck-*

buck. A análise dos métodos foi feita pela combinação as abordagens qualitativa e quantitativas.

Dado isto, este artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta a estrutura da MR assim como sua modelagem matemática, seguido da seção 3 que exhibe o projeto dos controladores. A seção 4 apresenta a metodologia usada, enquanto a seção 5 mostra os resultados e discussões, e por fim a conclusão é apresentada na seção 6.

2. MODELAGEM DO SISTEMA

Esta seção visa apresentar as modelagens utilizadas para a implementação do projeto dos controladores. A Figura 1 apresenta uma MR CC que pode ser representada por meio de conversores em cascata *buck-buck*. Quando estritamente controlado, o conversor CC que recebe alimentação do barramento passa a atuar como uma CPL.

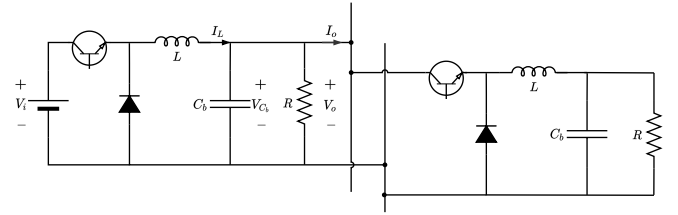


Figura 1. Sistema de MR representada por sistema de conversores em cascata *buck-buck*.

As CPLs são caracterizadas pelo efeito de resistência incremental negativa, o qual pode resultar em uma redução do amortecimento do sistema, levando-o a condições potencialmente instáveis. A Figura 1 ilustra uma configuração de conversores do tipo *buck-buck*, na qual o primeiro conversor atua como uma fonte de alimentação para o barramento, enquanto o segundo conversor opera como uma carga representativa de uma CPL.

Conforme ilustrado na Figura 2, a característica da CPL pode ser adequadamente representada por uma fonte de corrente, expressa como $I_{CPL} = P_{CPL}/V_{CPL}$, em que P_{CPL} representa a potência consumida pela carga e V_{CPL} é equivalente à tensão do barramento. Nesse contexto, o modelo matemático não linearizado é apresentado na equação (1).

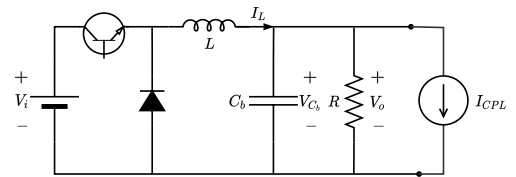


Figura 2. Conversor *buck* com CPL

$$\begin{cases} \dot{i}_L(t) = -\frac{1}{L}v_{C_b}(t) + \frac{V_i}{L}d(t) \\ \dot{v}_{C_b}(t) = \frac{1}{C_b}i_L(t) - \frac{1}{RC_b}v_{C_b}(t) - \frac{P_{CPL}(t)}{C_b v_{C_b}(t)} \\ y(t) = v_{C_b}(t) \end{cases} \quad (1)$$

Para o primeiro modelo considera-se $P_{CPL}(t) = w(t)$, um distúrbio, e lineariza-se o sistema em torno dos pontos de operação, denotados por δx_o , δd_o , e δw_o . Resultando na equação linearizada em (2), onde x_1 é a corrente no indutor e x_2 é a tensão no capacitor.

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \delta x_1 \\ \delta x_2 \end{array} \right] = \underbrace{\left[\begin{array}{cc} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} + \frac{P_o}{Cx_{2o}^2} \end{array} \right]}_A \left[\begin{array}{l} \delta x_1 \\ \delta x_2 \end{array} \right] + \underbrace{\left[\begin{array}{c} V_i \\ L \\ 0 \end{array} \right]}_{B_d} \delta d + \\ \quad + \underbrace{\left[\begin{array}{c} 0 \\ 1 \\ -\frac{1}{Cx_{2o}} \end{array} \right]}_{B_w} \delta w \\ \delta V_o = \underbrace{\left[\begin{array}{cc} 0 & 1 \end{array} \right]}_C \left[\begin{array}{l} \delta x_1 \\ \delta x_2 \end{array} \right] \end{array} \right. \quad (2)$$

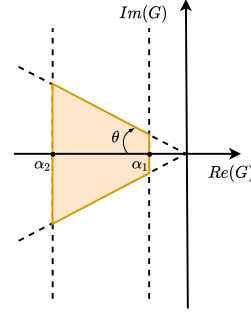


Figura 3. D-região convexa para alocação de polos.

Para o modelo com incerteza paramétrica a potência P_{CPL} permanece como um parâmetro e o sistema é linearizado em torno dos pontos de operações, δx_o e δd_o . Resultando no modelo da equação (3).

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \delta x_1 \\ \delta x_2 \end{array} \right] = \underbrace{\left[\begin{array}{cc} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_b} & -\frac{1}{RC_b} + \frac{P_i}{x_{2o}^2 C_b} \end{array} \right]}_{A_i} \left[\begin{array}{l} \delta x_1 \\ \delta x_2 \end{array} \right] + \underbrace{\left[\begin{array}{c} V_i \\ L \\ 0 \end{array} \right]}_{B_i} \delta d \\ V_o = \underbrace{\left[\begin{array}{cc} 0 & 1 \end{array} \right]}_{C_i} \left[\begin{array}{l} \delta x_1 \\ \delta x_2 \end{array} \right] \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = \zeta \omega_n \\ \alpha_2 = 10 \zeta \omega_n \\ \theta = \arccos \zeta \end{array} \right. \quad (4)$$

Considerando um sobressinal inferior a 10%, um critério de erro de 1% e $t_s = 150$ ms tem-se os seguintes resultados para os limitantes da região de alocação de polos em malha fechada.

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = 30,7 \\ \alpha_2 = 307,0 \\ \theta = 0,9383 \end{array} \right. \quad (5)$$

Após a formulação dos modelos, foi incluído um estado adicional, resultando em um modelo aumentado denotado pelo sobrescrito ‘^’. Tal estado surge pela inserção de um integrador na entrada no sistema com o intuito de assegurar erro nulo, $e(t) = v_{ref} - v_C(t)$.

3. PROJETO DOS CONTROLADORES

Esta seção apresenta a construção dos controladores usados para a garantir a estabilidade do sistema de MR CC com carga ativa. Todas as abordagens foram implementadas via LMIs, a qual permite inserir restrições complexas de maneira mais simples. Foram três os métodos abordados considerando modelagens distintas. O primeiro e o segundo considerou-se a potência da carga CPL como distúrbio, enquanto o terceiro a potência foi inserida como incerteza paramétrica. Em todos as formas foi utilizado uma D-região para alocação de polos, no primeiro foi utilizado somente esta região configurando uma D-estabilidade, já no segundo e terceiro foi inserido a norma H_2 como restrição. E todas as abordagens foram implementadas utilizando o comando `feasp` no `Matlab`.

3.1 Alocação de polos via LMIs

Diferente do método de alocação de polos convencional, que busca definir os polos em uma localização específica, a abordagem que utiliza a técnica de LMIs, define uma região desejada de forma que o controlador projetado possa obter os ganhos apropriados para alcançar um objetivo desejado. A qual configura-se em uma região fechada, conforme ilustrado na Figura 3. Os polos são então alocados dentro dessa região delimitada, que foi construída levando em consideração os critérios de desempenho desejados, tais como sobressinal e tempo de acomodação t_s .

Na Figura 3, é apresentada a interseção de duas regiões distintas: uma faixa e um cone. A faixa é caracterizada

A alocação dos polos de malha fechada na região mostrada na Figura 3 pode ser realizada por meio da seguinte LMI $L_l \otimes P + M_l \otimes \hat{A}P + M_l^T \otimes P \hat{A}^T M_l \otimes \hat{B}_d W + M_l^T \otimes W^T \hat{B}_d^T < 0$ (Mosa et al., 2019). Tal inequação será factível se existir uma matriz simétrica positiva definida P e uma matriz W que a satisfaça para todo $l = 1, 2$ e 3 , referente a cada limitante (Zhou et al., 1996). Para o sistema linear $\dot{x} = \hat{A}x + \hat{B}_d d$ e a lei de controle do sistema aumentado $d = \hat{K}x$, a solução é dada por $\hat{K} = WP^{-1}$ e as matrizes L_i e M_i são obtidas conforme as matrizes seguintes.

$$\begin{array}{l} L_1 = 2\alpha_1, \quad M_1 = 1 \\ L_2 = -2\alpha_2, \quad M_2 = -1 \\ L_3 = 0, \quad M_3 = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ -\cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \end{array}$$

3.2 Condições LMIs para índice H_2

Para o sistema linear do tipo

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \hat{A}_f x(t) + \hat{B}_w w(t) \\ z(t) = \hat{C}x(t) \end{cases} \quad (6)$$

Supondo que $\hat{D}_w = 0$ e que $\hat{A}_f = (\hat{A} + \hat{B}_u K)$ representa a matriz do sistema em malha fechada, podemos estabelecer uma função de transferência T_{zw} que relaciona o sinal de saída controlado $z(t)$ ao sinal de perturbação $w(t)$ e essa função pode ser limitada por uma variável γ , conforme apresentado na equação (7) (Boyd and Balakrishnan, 1994; Kaviani et al., 2018).

$$\|\hat{C}(sI - \hat{A})^{-1}\hat{B}\|_2 < \gamma \quad (7)$$

Conforme apresentado em Duan and Yu (2013), a função de transferência $G_{zw}(s) = \hat{C}(sI - \hat{A}_f)^{-1}\hat{B}_w$ satisfaz $\|G_{zw}(s)\|_2 < \gamma$ se e somente se a declaração em (8) for verdadeira. Sendo $\hat{A}_f \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\hat{B}_w \in \mathbb{R}^{n \times r}$, $\hat{C} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, e $\gamma > 0$ um dado escalar.

$$\hat{A}_f X + X^T \hat{A}_f + \hat{B}_w \hat{B}_w^T < 0, \text{tr}(\hat{C} X \hat{C}^T) < \gamma^2 \quad (8)$$

Para implementar a norma como uma restrição a inequação em (8) foi convertida para a forma em LMIs apresentada em (9), onde só existe solução se e somente se houver uma matriz W , e duas matrizes simétricas Z e X que satisfaça estas desigualdades (Kaviani et al., 2018).

$$\begin{cases} \hat{A}X + \hat{B}_u W + (\hat{A}X + \hat{B}_u W)^T + \hat{B}_w \hat{B}_w^T < 0 \\ \begin{bmatrix} -Z & \hat{C}X \\ X \hat{C}^T & -X \end{bmatrix} < 0 \\ \text{tr}(Z) < \rho \end{cases} \quad (9)$$

onde $\gamma = \rho^{1/2}$ e a solução é dada por $\hat{K} = WX^{-1}$.

3.3 Condições LMIs para índice H_2 para modelo de incerteza paramétrica

As incerteza paramétricas no sistema referem-se a alterações não desejadas e/ou imprevistas nos valores dos parâmetros que afetam o funcionamento do sistema. Essas variações têm o potencial de afetar tanto o comportamento dinâmico do sistema. Cada parâmetro que sofre variação possui um intervalo definido, com um valor mínimo e um valor máximo para aquela variável. Esses valores são fixo e não variam com o tempo. De acordo com o número de parâmetros que estão sujeitos a variações, o sistema pode ser representado como um politopo com 2^n vértices. No contexto deste trabalho, apenas o parâmetro de potência da carga CPL foi considerado como variante, o que resulta em um sistema com apenas dois vértices (Mosa et al., 2019; Mahmoudi and Safari, 2019).

$$\begin{cases} v_1 = \hat{A}_1(P^-) \\ v_2 = \hat{A}_2(P^+) \end{cases} \quad (10)$$

As LMIs resultantes para esta implementação são apresentadas em (11). Em que o sistema só haverá uma solução \hat{K} tal que $\|\hat{C}(sI - \hat{A}_i)^{-1}\hat{B}_i\|_2 < \gamma_2$ seja válido, se e somente se, existir uma matriz W_2 e duas matrizes simétricas Z_2 e X_2 que satisfaçam as LMIs.

$$\begin{cases} [\hat{A}_i X_2 + \hat{B}_i W_2 + (\hat{A}_i X_2 + \hat{B}_i W_2)^T] < 0 \\ \begin{bmatrix} -Z_2 & \hat{C}_2 X_2 \\ X_2 \hat{C}_2^T & -X_2 \end{bmatrix} < 0 \\ \text{tr}(Z_2) < \rho_2 \end{cases} \quad (11)$$

Para todo $i = 1, 2$, e onde $\gamma_2 = \rho_2^{1/2}$ e a solução é dada por $\hat{K} = WX^{-1}$.

4. METODOLOGIA

Foi criado um sistema simulado utilizando o ambiente MATLAB/Simulink, no qual um alimentador e duas cargas foram modelados. Uma das cargas é passiva, representando

uma carga resistiva, enquanto a outra carga é ativa, representando um conversor estritamente controlado conhecido como CPL. Tanto o conversor da CPL quanto o do alimentador são do tipo *buck*, ou seja, são conversores CC-CC. O sistema de controle desses conversores utiliza um controlador de realimentação de estados com um integrador na entrada, resultando em um sistema de ordem superior. A simulação foi realizada utilizando o solver com passo variável com tolerância relativa de $1e-4$ e as LMIs foram computadas por meio do solver *feasp*.

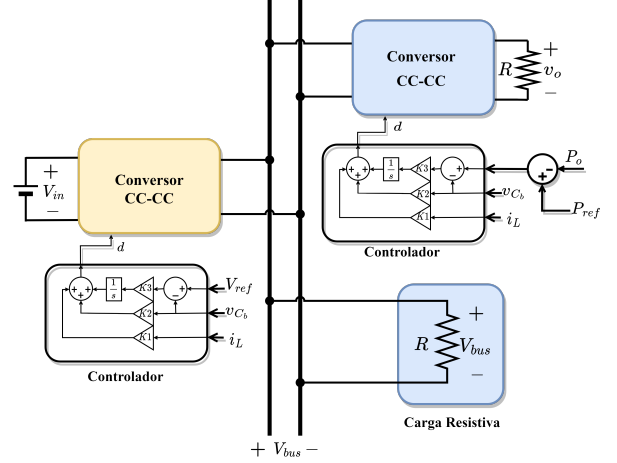


Figura 4. Sistema de conversores com uma carga resistiva e uma carga CPL.

4.1 Descrição dos testes

Para a avaliação de cada um dos controladores, foram conduzidos testes de variação da potência da carga CPL. Tal variação refere-se ao aumento e redução do consumo de energia da carga.

É importante observar que variações instantâneas na potência da CPL podem levar à instabilidade do sistema. Portanto, neste teste, serão realizadas mudanças de $\pm 3,2$ W a partir da potência nominal de 6,4 W, atingindo os valores de potência de 9,6 W em 1 s e retornando para 6,4 W em 1,5 s.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados durante a simulação dos testes propostos.

Tabela 1. Parâmetros utilizados para simulação

Parâmetro	Unidade	Valor	Varição
Tensão de entrada (V_i)	V	12	-
Tensão de saída (V_o)	V	8	-
Resistência de carga (R)	Ω	4,0	-
Indutância (L)	mH	1,0	-
Capacitância (C)	mF	2,2	-
Potência da CPL (P_o)	W	6,4	$\pm 15\%$
Frequência (f)	kHz	20	-

4.2 Análise dos resultados

Os testes serão submetidos a uma análise qualitativa, na qual serão observadas as respostas temporais do sistema, incluindo tensão, corrente e ciclo de trabalho. Além disso, será realizada uma análise quantitativa, utilizando índices de desempenho como o índice do erro quadrático (ISE), o índice do erro quadrático multiplicado pelo tempo (ITSE),

o índice do erro absoluto multiplicado pelo tempo (ITAE) e o índice do sinal de controle quadrático (ISSC). Esses índices fornecerão medidas objetivas do desempenho do sistema, permitindo comparações entre diferentes estratégias de controle.

Através dessa abordagem combinada, que engloba tanto a análise qualitativa das respostas temporais quanto a análise quantitativa com base nos índices de desempenho, busca-se obter uma compreensão completa e detalhada do sistema em estudo. Os resultados obtidos serão cruciais para a avaliação e aprimoramento do desempenho do sistema, contribuindo para o avanço do conhecimento na área e fornecendo informações relevantes para pesquisas futuras e aplicações práticas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção discorre sobre os resultados adquiridos por meio da execução do teste de variação de potência da carga. Os resultados são apresentados na Tabela 2, exibindo os ganhos alcançados por cada método utilizado. A desempenho de cada método será avaliado por meio dos índices de desempenho previamente descritos.

Tabela 2. Ganhos obtidos para cada método de controle

Método	K1	K2	K3
D-est	-0,0398	0,0640	0,7478
$W-H_2$	-0,0317	0,0709	0,5382
$P-H_2$	-0,0424	0,0526	1,1775

Em que os parâmetros K1 e K2 correspondem aos ganhos da realimentação de estados, enquanto o parâmetro K3 representa o ganho do integrador inserido na entrada do sistema. E os métodos D-est, $W-H_2$ e $P-H_2$, referem-se ao método de alocação de polos via LMIs, método que utiliza norma H_2 com a incerteza vista no sinal do distúrbio $w(t)$ e o métodos que utiliza a norma H_2 e as incertezas são modeladas por meio da variação do parâmetro de potência da carga.

5.1 Resultados no domínio do tempo

Os resultados ao longo do tempo são ilustrados nas Figuras 5, 6 e 7 que retratam, respectivamente, a evolução da tensão no barramento, da corrente no indutor do conversor de alimentação e do sinal de controle do sistema.

No que diz respeito à resposta da tensão de saída (Figura 5), todos os métodos de controle empregados exibiram um sobressinal inferior a 10%, atendendo, assim, aos critérios de desempenho previamente estabelecidos. Notavelmente, o método que utiliza a norma H_2 com modelagem de incerteza paramétrica demonstrou um sobressinal inferior a 6,67%, tanto para a variação positiva quanto para a negativa de potência. Quanto ao tempo de acomodação, todos os métodos analisados alcançaram a estabilização em um período inferior a 150 ms.

Verificou-se que todos os métodos adotados garantiram o modo de operação contínua, isto é, a corrente se manteve sempre acima de zero (Figura 6). Além disso, constatou-se que o sinal de controle permaneceu livre de qualquer forma de saturação (Figura 7).

Nesse contexto, a análise dos resultados evidencia a adequação dos métodos de controle utilizados, demonstrando seu desempenho satisfatório em relação aos critérios estabelecidos. Tais informações são fundamentais para a

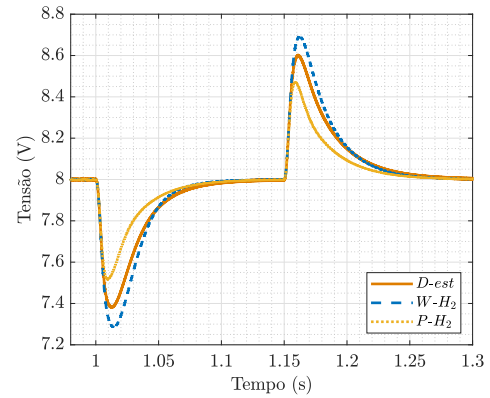


Figura 5. Tensão de saída para teste de variação de potência.

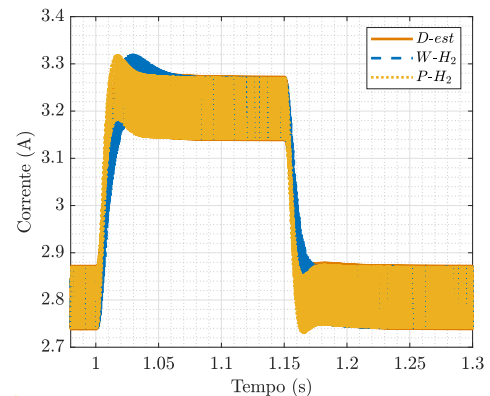


Figura 6. Corrente de saída para teste de variação de potência.

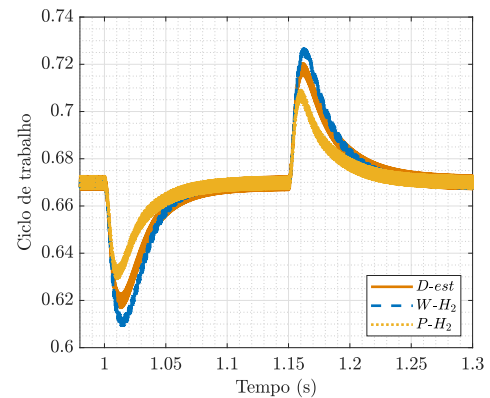


Figura 7. Sinal de controle para teste de variação de potência.

compreensão do comportamento dinâmico do sistema em estudo, fornecendo subsídios relevantes tanto para avanços científicos quanto para aplicações práticas futuras.

5.2 Índices de desempenho

Os índices de desempenho ISE, ITSE, ISSC e ITAE foram utilizados para uma análise quantitativa dos métodos avaliados. Os resultados desses índices para o teste de variação de potência da CPL são apresentados nas Figuras 8 (a) e 8 (b).

A Figura 8 (a) exibe em seus eixos os resultados obtidos para a variação positiva de potência. Verifica-se que a

curva interna, representada pela cor azul, demonstra os menores valores dos índices de desempenho avaliados, o que indica uma superioridade em relação aos outros dois métodos de controle considerados.

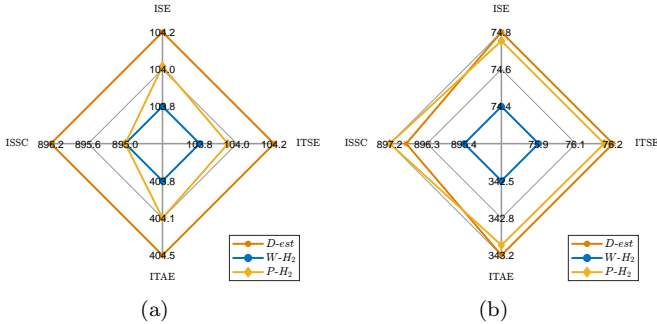


Figura 8. (a) Índices de desempenho para variação de +0,2 p.u. de potência. (b) Índices de desempenho para variação de -0,2 p.u. de potência.

Esse resultado está associado ao método que utiliza a norma H_2 e considera a variação de potência como um distúrbio, o qual apresenta os menores acúmulos de erros ao longo do tempo, seguido do o método $P-H_2$, que emprega a variação de potência como uma incerteza paramétrica. No que diz respeito ao esforço de controle, observa-se que essas duas abordagens apresentam o mesmo resultados comparado ao método de $D-est$. É importante ressaltar que todos os métodos considerados compartilham a mesma região de desempenho.

A Figura 8 (b) mostra os resultados dos índices referentes a variação negativa de potência. É evidente que o método $W-H_2$ apresentou o melhor desempenho comparado aos demais, visto que é a curva mais interna do gráfico. Enquanto, a curva $P-H_2$ mostrou menos acúmulo de erro nos índices temporais em relação ao método $D-est$, no entanto seu esforço foi menor. A tabela 3 exprime com maior detalhe as diferenças numéricas entre cada método.

Tabela 3. Valores dos índices para a variação positiva de potência (+) e para variação negativa (-).

Método	ISE	ITSE	ITAE	ISSC
$D-est$ (+)	104.1699	104.1613	404.4973	896.2007
$W-H_2$ (+)	103.8405	103.8147	403.7599	894.9660
$P-H_2$ (+)	104.0186	103.9464	404.1282	894.9660
$D-est$ (-)	74.8184	76.2014	343.1684	896.8005
$W-H_2$ (-)	74.4243	75.9472	342.4709	895.4365
$P-H_2$ (-)	74.7717	76.1714	343.0748	897.1857

6. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi realizado um estudo comparativo entre diferentes métodos de controle utilizando modelagens distintas para avaliar o comportamento do sistema frente variações de potência. Tanto o método $D-est$ quanto $W-H_2$ utilizaram o modelo que considera a variação de potência um distúrbio, enquanto em $P-H_2$ considera-se a potência como incerteza paramétrica. Os métodos foram implementados utilizando a abordagem de equações de matrizes lineares, a qual possui como vantagem a fácil implementação de restrições complexas como aquelas definidas por desigualdades matriciais. Tais métodos foram

aplicados a um sistema de microrrede de corrente contínua representado pelo sistema de conversores *buck-buck*.

No contexto do uso de LMIs para solucionar o problema, foram estabelecidas regiões de restrições que dependem dos objetivos específicos do sistema em questão. Nesse sentido, observou-se os métodos que incluíam a norma H_2 como restrição apresentaram melhor desempenho, tanto na análise qualitativa quanto na análise quantitativa. Tal resultado pode ser justificado pelo fato de que a norma H_2 é uma medida utilizada para otimizar sistemas de controle, permitindo a melhora de estabilidade e o desempenho do sistema, tornando-o mais robusto diante as perturbações externas.

Foi observado também que a maneira que a variação de potência foi considerada no modelo matemático resultou em respostas diferentes tanto na análise qualitativa quanto quantitativa. O maior esforço de controle de $P-H_2$ pode ser justificado pela presença de mais restrições no método, já que os limites da variações de potência são inseridos como vértices.

Essas constatações revelam a importância de avaliar e comparar diferentes abordagens de controle aplicadas a sistemas específicos, a fim de identificar a estratégia mais eficaz em termos de desempenho em determinado ponto de operação. Neste sentido, por ter um menor esforço de controle e por ter apresentado menor acúmulo de erros, a abordagem $W-H_2$ seria a mais apropriada pela a aplicação. Ao considerar os resultados obtidos nesta pesquisa, é possível obter discernimentos valiosos para futuros desenvolvimentos e aplicações práticas na área de controle de sistemas de microrredes de corrente contínua.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi parcialmente financiada por bolsas concedidas pelo Apoio à Pesquisa da Fundação do Estado do Amazonas (FAPEAM) por meio de bolsas de estudo e pela bolsa FAPEAM nº 062.00272/2020.

Esta pesquisa foi parcialmente financiada pelo Instituto de Pesquisas Eldorado. E pela Samsung Eletrônica da Amazônia Ltda., Nos termos do Lei Federal nº 8.387/1991, por meio do convênio 001/2020, firmado com a Universidade Federal do Amazonas e a FAEPI, Brasil.

REFERÊNCIAS

- Bessa, I., Landau, R., Bessa, I., Ayres, F., Menezes, A., Torres, G., and Filho, J.E. (2020). Comparative study of control strategies for stabilization and performance improvement of dc microgrids with a cpl connected. *Energies*, 13, 1.
- Boyd, S., G.L.E.F.E. and Balakrishnan, V. (1994). *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA.
- Duan, G.R. and Yu, H.H. (2013). *LMIs in Control Systems Analysis, Design and Applications*. CRC Press, 1^o edition.
- Jebali Ben Ghorbal, M., Moussa, S., Arbi Ziani, J., and Slama-Belkhdja, I. (2021). A comparison study of two dc microgrid controls for a fast and stable dc bus voltage. *Mathematics and Computers in Simulation*, 184, 210–224.
- Kaviani, K., Menhaj, M., and Fakharian, A. (2018). Mixed H_2/H_∞ state-feedback control for islanded dc microgrids: An lmi based approach. In *2018 Smart Grid Conference (SGC)*, 1–6. IEEE.

- Kumar, J., Agarwal, A., and Agarwal, V. (2019). A review on overall control of dc microgrids. *Journal of Energy Storage*, 21, 113–138.
- Lucas, K.E., Plaza, D.A., Barra, W., Medeiros, R.L.P., Rocha, E.M., Vaca, D., and Nogueira, F.G. (2019). Interval robust controller to minimize oscillations effects caused by constant power load in a DC multi-converter buck-buck system. *IEEE Access*, 7, 26324–26342.
- Mahmoudi, M. and Safari, A. (2019). Lmi based robust control design for multi-input–single-output dc/dc converter. *International Journal of Dynamics and Control*, 7.
- Mosa, M.A., Ali, A.A., El Zoghpy, H.M., El Samahy, A.A., and Ghany, A.A. (2019). Robust control of dc converter in dc microgrid applications using linear matrix inequality (lmi). In *2019 IEEE Conference on Power Electronics and Renewable Energy (CPERE)*, 385–390. IEEE.
- Sadabadi, M.S., Shafiee, Q., and Karimi, A. (2018). Plug-and-play robust voltage control of dc microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 6886–6896.
- Sahoo, S.K., Sinha, A.K., and Kishore, N.K. (2018). Control techniques in ac, dc, and hybrid ac–dc microgrid: A review. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(2), 738–759.
- Zhou, K., Doyle, J., and Glover, K. (1996). Robust and optimal control. *Control Engineering Practice*, 4(8), 1189–1190.