

Comparação de técnicas de controle via LMI aplicadas em microrredes CC com CPL

Marenice M. de Carvalho* Renan Landau P. de Medeiros*
Florindo A.C. Ayres Junior* Isaías Valente de Bessa*
Vicente Ferreira Lucena Junior*

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

Abstract: DC microgrids have gained a lot of prominence due to their high efficiency and compatibility with renewable sources, however, these systems in the presence of constant power loads (CPL) can become unstable due to the negative impedance characteristic of CPLs. Linear Matrix Inequalities (LMI) is a powerful tool used to synthesize control projects, in which the results are reliable and accurate. Thus, it was proposed to compare the methods of controlling pole allocation, Lyapunov stability, and minimizing the H_2 standard via LMI, applied to the buck converter microgrid system with CPL. The pole allocation region was defined by the intersection of a strip region and a cone region, forming a convex region. The Lyapunov stability is presented by the inequality of the Lyapunov function in sets with a convex region formed by the same region as the pole allocation method. And when minimizing the H_2 norm, a convex restriction region equivalent to that used in other methods was used. When selecting convex regions to solve the problems in LMI the solutions are obtained in a faster and more satisfactory way, different from the classic solution in which only the desired poles are selected.

Resumo: As microrredes CC tem ganhado bastante destaque devido sua alta eficiência e compatibilidade com as fontes renováveis, no entanto, estes sistemas na presença de cargas de potência constante (CPL) podem torna-se instáveis devido a característica de impedância incremental negativa das CPLs. Inequações de Matrizes Lineares (LMI) são uma poderosa ferramenta utilizadas para sintetize projetos de controle, em que os resultados são confiáveis e precisos. Desta forma, foi proposta a comparação dos métodos de controle de alocação de polos, estabilidade de Lyapunov, e minimização da norma H_2 via LMI, aplicado ao sistema de microrrede do conversor buck com CPL. A região para alocação de polos foi definida pela interseção de uma região de faixa e uma região de cone, formando uma região convexa. Já a estabilidade de Lyapunov é apresentada pela inequação da função de Lyapunov em conjuntos com uma região convexa formada pela mesma região do método de alocação de polos. E ao minimizar a norma H_2 foi utilizado uma região convexa de restrição equivalente a usada nos demais métodos. Ao se selecionar regiões convexas para solucionar os problemas em LMI as soluções são obtidas de forma mais rápida e satisfatória, diferente das solução clássica em que se seleciona apenas os polos desejados.

Keywords: DC microgrid; CPL; pole placement; Lyapunov; H_2 norm.

Palavras-chaves: microrrede CC; CPL; alocação de polos; Lyapunov; norma H_2 .

1. INTRODUÇÃO

O crescente consumo de energia elétrica promove o aumento do uso de energias renováveis que são comumente utilizadas para alimentar microrredes CC, além da fácil aplicação das fontes renováveis, as microrredes CC possuem alta eficiência (Bianchi et al., 2019). Para ajustar o nível de tensão das fontes e cargas ao nível do barramento CC é necessário o uso de diversos conversores. Aqueles usados para adequar o valor de tensão entregue as cargas são estritamente controladas, apresentando a característica de carga de potência constante (CPL), que podem levar o sistema a instabilidade devido seu efeito de impedância negativa (Bessa et al., 2020).

Na literatura diversas técnicas de controle já foram aplicadas para solucionar este problema. Em (Su et al., 2018) dois métodos lineares são avaliados, um em que foram selecionados os autovalores da região de desempenho do controlador PI em um sistema de ordem elevada e outro baseado em um método de queda de tensão modificado, o qual se identifica a estabilidade do sistema e se melhora o compartilhamento de potência. Já em (Xu et al., 2019) utilizaram o algoritmo *backstepping* para o projeto de um controlador não linear e assim obter a estabilidade global do sistema e uma resposta rápida da dinâmica do sistema.

Embora se tenha diversos estudos e aplicações de diferentes propostas de controle para solucionar o problema de instabilidade provocado pelas CPLs em microrredes CC, ainda não se analisou o uso de técnicas clássicas pela

abordagem de inequações de matrizes lineares (LMI). As LMIs são facilmente resolvidas com o uso de algum pacote de *software*, obtendo resultados confiáveis e precisos. O maior desafio é converter o problema analisado em LMI.

Por meio do uso de LMI, (Mardani et al., 2019), (Lucas-Marcillo et al., 2019), (Babaiahgari et al., 2020) apresentam soluções para o problema de instabilidade em microrredes CC causadas por cargas do tipo CPL. O primeiro apresenta um projeto de um controlador utilizando o modelo *fuzzy* de Takagi-Sugeno e também a teoria da D-estabilidade quadrática. Já o segundo, um controlador é baseado em programação linear, considerando o teorema de Chebyshev e teorema de Kharitonov que garantem uma solução mínima considerando uma família de polinômios característicos. O terceiro apresenta um método ativo de controle em que a variável do indutor é usada para modificar a região de atração de estabilidade, também utilizando LMI, melhorando a estabilidade do regime transitório dos sistemas de micro rede CC com CPL.

Desta forma, este trabalho apresenta a comparação de três métodos de controle via LMI, os quais são: alocação de polos, estabilidade de Lyapunov e minimização da norma H_2 , aplicados em um sistema de micro rede CC formado por dois conversores em uma estrutura buck-buck. A análise dos métodos é feita por quatro índices de desempenho, avaliados em dois testes simulados: variação de tensão de entrada e variação de potência da carga CPL.

O restante do artigo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta a modelagem matemática do sistema, na seção 3 é apresentado a metodologia utilizada para o projeto dos controladores via LMI. Enquanto a seção 4 descreve os testes simulados realizados e a forma de análise e a 5 mostra os resultados obtidos assim como uma discussão sobre os mesmo e por fim a seção 6 relata as conclusões do artigo.

2. MODELAGEM DO SISTEMA

2.1 Micro rede CC

Uma micro rede CC é formada pelo agrupamento de fontes geradoras, sistemas de armazenamento, diversas categorias de cargas e também por sistemas de controle (Sahoo et al., 2018). Podem ser utilizadas tanto conectadas à rede quanto isoladas, o principal componente responsável pelo correto funcionamento das microrredes são os dispositivos conversores, responsáveis por ajustar o nível de tensão das fontes e cargas para o mesmo nível de tensão do barramento principal (Kumar et al., 2019).

Uma micro rede CC pode ser representada pelo uso de dois conversores buck-buck em cascata (Figura 1). O primeiro conversor é responsável por ajustar o nível de tensão da fonte com o barramento, podendo ser visto como um alimentador com uma carga resistiva R conectada ao barramento que ajuda no amortecimento do sistema, já o segundo conversor é visto como uma carga que também compõe o sistema (Bessa et al., 2020). Devido ao controle utilizado para ajustar o nível de tensão no conversor carga, pode-se dizer que esta carga é estritamente controlada apresentando-se como uma carga de potência constante (CPL, do inglês *Constant Power Load*). Esta característica

pode levar o sistema a instabilidade visto que a CPL apresenta o efeito de impedância negativa o que reduz o amortecimento do sistema (Bianchi et al., 2019)(Bessa et al., 2020).

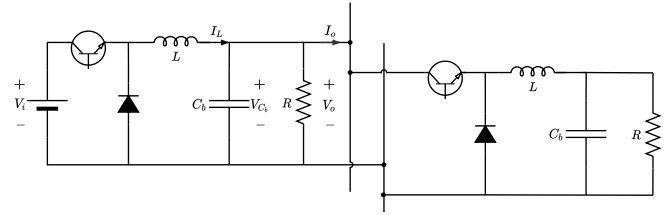


Figura 1. Sistema de microrrede representada por sistema de conversores em cascata buck-buck.

O sistema do conversor buck com CPL e uma carga resistiva R é apresentado na figura 2, em que a carga CPL é representada por uma fonte de corrente $I_{CPL} = P_{CPL}/V_{CPL}$. Desta representação obtemos o modelo médio em espaço de estados linearizado por meio da série de Taylor em torno do ponto de operação (x_{1o}, x_{2o}, d_o) em (1). Além disso, um integrador é inserido na entrada do sistema com intuito de garantir erro nulo em relação a uma dada referência, r , resultando em um sistema com ordem aumentada.

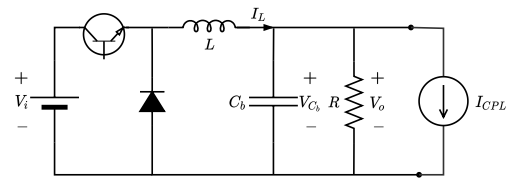


Figura 2. Conversor buck com CPL

$$\left\{ \begin{aligned} \begin{bmatrix} \delta \dot{x}_1 \\ \delta \dot{x}_2 \\ \delta \dot{x}_a \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{C_b} & \left(-\frac{1}{RC_b} + \frac{P_{CPL}}{C_b x_{2o}^2}\right) & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \delta x_a \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{V_i}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_d} \delta d \\ V_o &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \delta x_a \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

em que $\delta x_1, \delta x_2, \delta x_a$ e δd são as variáveis de desvio em torno do ponto de operação. Sendo δx_1 e δx_2 referentes aos estados do sistema, corrente e tensão, respectivamente, δx_a é o estado aumentado, e δd é a entrada de controle.

3. PROJETO DOS CONTROLADORES

Esta seção apresenta os métodos utilizados para simulação e comparação dos controladores. O sistema de micro rede proposto é constituído e modelado por um sistema em cascata de conversores do tipo buck, equivalente ao obtido em (1). Os testes simulados são realizados no ambiente de simulação *Matlab/SIMULINK* utilizando um passo de 10^{-6} , em que a tensão do barramento CC é avaliada para cada um dos métodos analisados.

3.1 Inequações de matrizes lineares (LMI)

As LMIs são utilizadas como restrições durante a solução de um problema de otimização, dentre os problemas padrões têm-se (Duan and Yu, 2013):

- Problema de factibilidade: o objetivo é encontrar a solução $x \in \mathbb{R}^n$ que satisfaça a restrição LMI do seguinte formato

$$A(x) \prec B,$$

em que x é o vetor variável de decisão.

- Problema de minimização convexa: dada uma função convexa $f(x)$, o objetivo também é encontrar $x \in \mathbb{R}^n$, porém a solução tem que levar a função $f(x)$ para o valor mínimo satisfazendo a restrição

$$A(x) \prec B(x).$$

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } A(x) \prec B(x). \end{cases} \quad (2)$$

onde x é o vetor variável de decisão.

- Problema do autovalor generalizado: o objetivo é encontrar a solução $x \in \mathbb{R}^n$ em que o λ seja mínimo satisfazendo as seguintes restrições LMI

$$\begin{cases} \min \lambda \\ \text{s.t. } A(x) \prec \lambda B(x) \\ \quad B(x) \succ 0 \\ \quad C(x) \prec 0, \end{cases} \quad (3)$$

onde x é o vetor ou escalar variável de decisão.

3.2 Alocação de polos via LMI

A alocação de polos é o método em que se define a posição dos polos de forma que o controlador projetado encontre os ganhos adequados para se atingir um objetivo desejado. No entanto, em LMI, definimos uma região desejada, cuja região é fechada (Figura 3) e os polos serão alocados dentro dela, a qual é constituída a partir dos critérios de desempenho desejados de sobressinal, e tempo de acomodação, t_s .

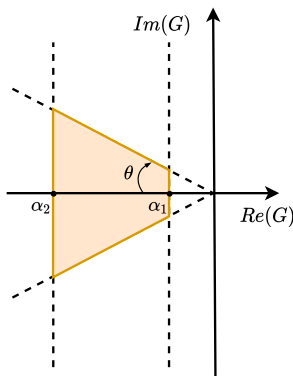


Figura 3. D-região convexa para alocação de polos.

Na figura 3 podemos observar a interseção de duas regiões, uma faixa e um cone. A faixa é limitada em seus limites inferior e superior pelas variáveis α_1 e α_2 enquanto o cone é limitado por θ . A relação destas variáveis e os critérios de desempenho são definidos pelas equações (4).

$$\begin{cases} \alpha_1 = \zeta \omega_n \\ \alpha_2 \approx 100 \zeta \omega_n \\ \theta = \arccos \zeta \end{cases} \quad (4)$$

Deseja-se que o sobressinal seja inferior a 10%, então temos que $\zeta \cong 0,6$, além disso, temos que

$$t_s = -\frac{4,6}{\zeta \omega_n},$$

e para $t_s = 150$ ms ao realizar as substituições adequadas temos os seguintes resultados para os limitantes da região de alocação de polos.

$$\begin{cases} \alpha_1 = 30,667 \\ \alpha_2 \approx 3000,00 \\ \theta = 0.9383 \end{cases} \quad (5)$$

A região mostrada na Figura 3 pode ser uma região LMI $\mathbb{D}_{(L,M)}$ que possui uma função característica da forma

$$F_{\mathbb{D}} = L + sM + \bar{s}M^T.$$

Sendo a lei de controle do sistema aumentado $d = Kx$ para o sistema linear $\dot{x} = Ax + B_d d$ temos

Teorema 1. (Duan and Yu, 2013) A matriz $(A+B_dK)$ será $\mathbb{D}_{(L,M)}$ -estável se e somente se existir uma matriz simétrica positiva definida P e uma matriz W que satisfaça

$$L \otimes P + M \otimes AP + M^T \otimes PA^T M \otimes B_d W + M^T \otimes W^T B_d^T \prec 0.$$

Em que \otimes é o produto de Kronecker e a solução é dada por

$$K = WP^{-1}.$$

Para a região da Figura 3 temos a interseção das seguintes inequações

$$L_1 \otimes P + M_1 \otimes AP + M_1^T \otimes PA^T M_1 \otimes B_d W + M_1^T \otimes W^T B_d^T \prec 0 \quad (6)$$

$$L_2 \otimes P + M_1 \otimes AP + M_2^T \otimes PA^T M_2 \otimes B_d W + M_2^T \otimes W^T B_d^T \prec 0 \quad (7)$$

$$L_3 \otimes P + M_3 \otimes AP + M_3^T \otimes PA^T M_3 \otimes B_d W + M_3^T \otimes W^T B_d^T \prec 0 \quad (8)$$

Em que

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

Que são implementadas no `Matlab` utilizando o comando `feasp`.

3.3 Estabilidade de Lyapunov via LMI

A estabilidade segundo o conceito de Lyapunov avalia as trajetórias dos estados de um sistema autônomo $\dot{x}(t) = Ax(t)$ com $x(0) = x_0$, verificando se as mesmas se mantêm dentro dos limites da função dos estados, que para o caso linear é uma função quadrática positiva do tipo $V(x(t)) = x(t)^T P x(t)$. Para avaliar estas trajetórias analisa-se a derivada da função dos estados, se for negativa, ou seja, $\dot{V}(x(t)) < 0$, então o sistema é assintoticamente estável.

Neste contexto, para o sistema autônomo $\dot{x}(t) = Ax(t)$ ser assintoticamente estável segundo Lyapunov ($x(t) \equiv 0$ é o estado de equilíbrio) devem ser atendidas às duas condições $P \succ 0$ e $A^T P + PA \prec 0$. Então aplica-se este conceito em um sistema a ser controlado do tipo $\dot{x}(t) = Ax(t) + B_d d(t)$ em que o sinal de controle é $d(t) = Kx(t)$, assim tem-se o seguinte teorema em que $A_f = A + B_d K$ é assintoticamente estável.

Teorema 2. (Duan and Yu, 2013) O problema de realimentação de estados pela teoria de Lyapunov tem solução se e somente se existir $P = P^T \succ 0$ e uma matriz W que satisfaça

$$AP + PA^T + B_d W + W^T B_d^T \prec 0.$$

Em que a solução é obtida por

$$K = WP^{-1}.$$

Para a solução utilizando o teorema de Lyapunov foi implementado a inequação utilizando o sistema (1) e também a região de desempenho de (6) a (8) implementadas no `Matlab` empregando o comando `feasp`.

3.4 Problema de otimização

Para o sistema linear do tipo

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_f x(t) + B_w w(t) \\ z(t) = Cx(t) + D_w w(t) \end{cases} \quad (9)$$

Considerando $D_w = 0$ e que $A_f = (A + B_u K)$ é a matriz do sistema em malha fechada, a função de transferência T_{zw} que relaciona o sinal de saída controlado $z(t)$ com o sinal de perturbação $w(t)$ pode ser limitada por uma variável γ . Embora não se tenha uma matriz de perturbação definida ainda é possível encontrar uma solução para o problema de otimização.

Teorema 3. (Duan and Yu, 2013) Sendo $A_f \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_w \in \mathbb{R}^{n \times r}$, $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$, e $\gamma > 0$ sendo um dado escalar. A função de transferência $G_{zw}(s) = C(sI - A_f)^{-1} B_w$ satisfaz $\|G_{zw}(s)\|_2 \prec \gamma$ se e somente se uma das declarações seguintes for verdadeira:

$$(1) \exists X \succ 0, \text{ s.t.}$$

$$A_f X + X^T A_f + B_w B_w^T \prec 0, \text{tr}(CXC^T) \prec \gamma^2. \quad (10)$$

$$(2) \exists Y \succ 0, \text{ s.t.}$$

$$A_f^T Y + Y A_f + C^T C \prec 0, \text{tr}(B_w^T Y B_w) \prec \gamma^2. \quad (11)$$

Baseado no Teorema 3, o problema de encontrar uma lei de controle que busque o menor escalar γ que satisfaça a condição (10) ou (11), convertidos em LMI são equivalentes ao próximo teorema.

Teorema 4. (Duan and Yu, 2013) O problema H_2 tem solução se e somente se existir uma matriz W , e duas matrizes simétricas Z e X que satisfaça

$$\begin{cases} \min \rho \\ \text{s.t. } AX + B_u W + (AX + B_u W)^T + B_w B_w^T \prec 0 \\ \begin{bmatrix} -Z & CX + D_w W \\ (CX + D_w W)^T & -X \end{bmatrix} \prec 0 \\ \text{tr}(Z) \prec \rho, \end{cases} \quad (12)$$

onde $\gamma = \rho^{1/2}$ e a solução é dada por $K = WX^{-1}$. Este problema de minimização é resolvida utilizando o sistema

(12) e também a restrição da região de desempenho de (6) a (8) no `Matlab` utilizando o comando `mincx`.

4. SIMULAÇÃO DO SISTEMA

4.1 Descrição dos testes

Para avaliar cada um dos controladores serão realizados testes de variação da tensão de entrada e variação da potência da carga CPL.

Variar a tensão de entrada do conversor fonte representa uma fonte geradora de energia constante que varia temporalmente, como as fontes solares e eólicas, cujos níveis de tensão dependem das condições climáticas. Neste teste, a variação ocorre em mudanças de ± 0.9 V em torno da tensão nominal $V_i = 12$ V, resultando em uma variação de $\pm 15\%$ do valor nominal.

Já a variação de potência da CPL representa o aumento ou diminuição de consumo de energia da carga. Sabendo que a variação instantânea da potência da CPL pode ocasionar instabilidade no sistema este teste realizará mudanças de ± 0.2 p.u da potência nominal de 0.5 p.u. até que se alcance os valores de 0.1 p.u. a 0.9 p.u. de potência pela carga CPL.

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

Parâmetro	Unidade	Valor	Varição máxima
Tensão de entrada (V_i)	V	12	$\pm 15\%$
Tensão de saída (V_o)	V	6	-
Resistência de carga (R)	Ω	4,0	-
Indutância (L)	mH	1,0	-
Capacitância (C)	mF	2,2	-
Potência da CPL (P_o)	W	4.5	$\pm 80\%$
Frequência (f)	kHz	20	-

Tabela 1. Parâmetros utilizados para simulação

4.2 Análise dos resultados

Os resultados dos testes serão analisados de forma qualitativa por meio das respostas temporais de tensão, corrente e *duty cycle* do sistema e de forma quantitativa por meio dos índices de desempenho, os quais são: índice do erro quadrático (ISE), índice do erro quadrático multiplicado pelo tempo (ITSE), índice do erro absoluto multiplicado pelo tempo (ITAE) e índice do sinal de controle quadrático (ISSC).

$$\begin{aligned} \text{ISE} &= \int_0^t e^2 dt \\ \text{ITSE} &= \int_0^t t e^2 dt \\ \text{ITAE} &= \int_0^t t |e| dt \\ \text{ISSC} &= \int_0^t d^2 dt \end{aligned} \quad (13)$$

onde $e = V_{ref} - V_o$ é o sinal de erro utilizado para calcular cada índice.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos para o teste de variação de tensão de entrada e o teste de variação de potência da carga, onde a tabela 2 apresenta os ganhos obtidos para cada método.

Tabela 2. Ganhos obtidos para cada método de controle

Método	K1	K2	Ka
min H_2	-0.4483	-3.0505	108.7667
D-reg.	-0.1841	-0.0631	6.1474
Lyap.	-0.1848	-0.0649	5.7587

onde, K_1 e K_2 são os ganhos da realimentação de estados, e o K_a é o ganho do integrador inserido na entrada do sistema.

5.1 Teste de variação de tensão

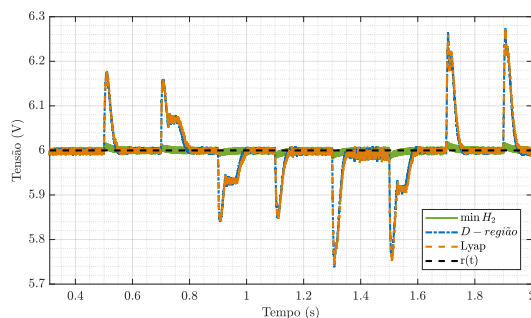
Resposta temporal Os resultados para o teste de variação de tensão ao longo do tempo são apresentados nas Figuras 4, 5 e 6 em que se mostra a tensão do barramento, a corrente do indutor do conversor de alimentação e o sinal de controle do sistema, respectivamente.

Para a resposta da tensão de saída (Figura 4) todos os métodos de controle apresentados obtiveram sobressinal inferior a 10%, atendendo aos critérios de desempenho pré-estabelecidos, sendo que minimizar a norma H_2 obteve sobressinal inferior a 1%. Já o que diz respeito a tempo de acomodação, todos os métodos acomodaram em um tempo inferior a 150 ms. As figuras (5)(b-e), apresentam os transitórios da tensão de saída para as variações de $\Delta V_i = +0.9$ V, $\Delta V_i = +1,8$ V, $\Delta V_i = -0.9$ V e $\Delta V_i = -1.8$ V, respectivamente.

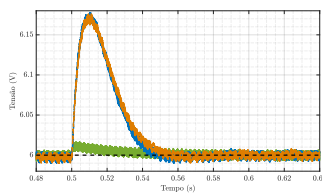
Todos os métodos apresentaram modo de operação contínua, ou seja, com valor de corrente sempre superior a zero (Figura 5), além de manterem o sinal de controle sem qualquer tipo de saturação (Figura 6).

Índices de desempenho Todos os métodos apresentaram modo de operação contínua, ou seja, com valor de corrente sempre superior a zero (Figura 5), além de manterem o sinal de controle sem saturação (Figura 6). Os índices de desempenho ISE, ITSE, ISSC, ITAE apresentam uma análise quantitativa em relação aos métodos avaliados. Para o teste de variação da tensão de entrada os resultados dos índices são mostrados nas Figuras 7 a 10.

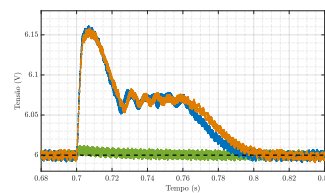
Podemos observar que o método que minimiza a norma H_2 apresentou menor acúmulo de erro dos três métodos nos índices ISE, ITSE, e ITAE, e um maior esforço de controle mostrado no gráfico do ISSC, esse resultado deve-se ao processo de otimização do método, que objetiva não apenas a estabilidade mas também o menor custo para o sistema. Embora os métodos de alocação de polos e de Lyapunov tenham a mesma região de desempenho, utilizar apenas a D-região de alocação de polos obteve menor acúmulo de erro comparado ao método de Lyapunov nos índices ISE, ITSE e ITAE, e o mesmo esforço de controle no ISSC.



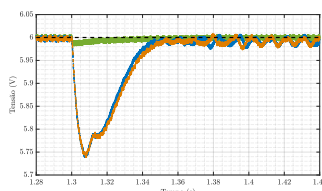
(a)



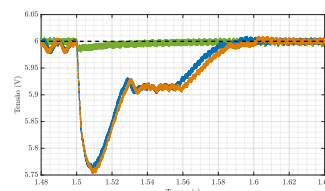
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4. Tensão de saída para teste de variação de tensão

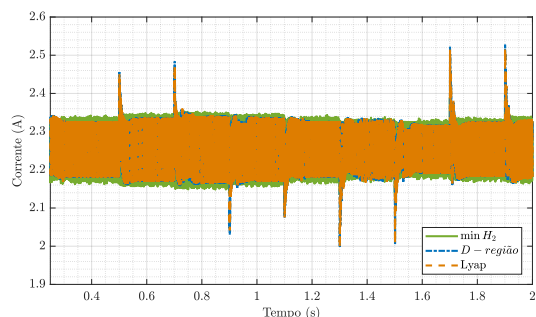


Figura 5. Corrente do indutor do conversor de alimentação teste de variação de tensão

5.2 Teste de variação de potência

Esta seção mostra os resultados para o teste de variação de potência da carga em que a tensão de entrada é mantida constante.

Resposta temporal A tensão de saída para a teste de variação de potência apresentada na Figura 11, apresenta sobressinal menor que 10% para todos os métodos. E também um tempo de acomodação inferior a 150 ms, atendendo aos critérios de desempenho estabelecido. Podemos observar que para as taxas de variações positivas apresentou resultados com características mais oscilatórias, ou seja, quando o consumo de corrente (Figura 12) é aumentado e o amortecimento do sistema diminui, no entanto, o sistema manteve-se estável. As figuras (12)(b-e), apresentam os transitórios da tensão de saída para

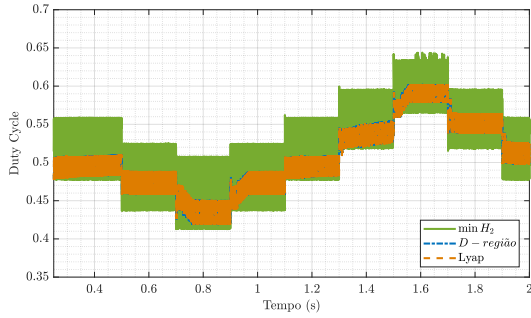


Figura 6. Sinal de controle para o teste de variação de tensão.

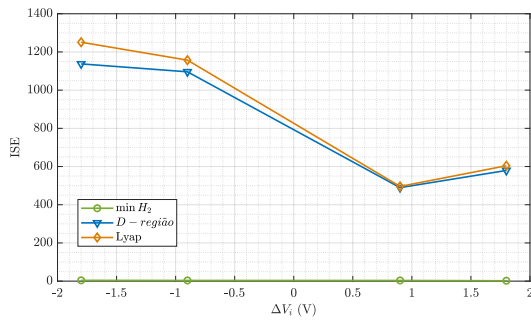


Figura 7. ISE para teste de variação de tensão.

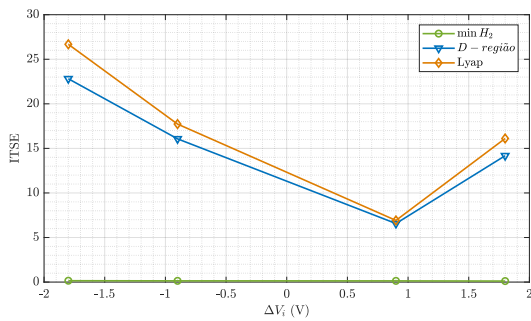


Figura 8. ITSE para teste de variação de tensão.

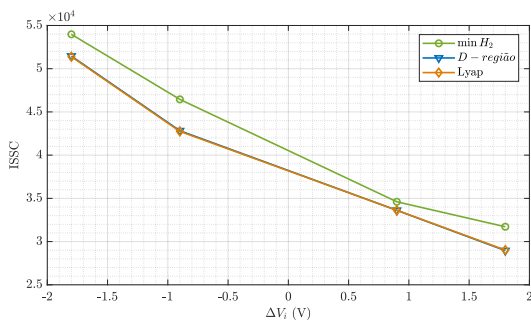


Figura 9. ISSC para teste de variação de tensão.

as variações de $\Delta P_o = +0,2$ p.u., $\Delta P_o = +0,4$ p.u., $\Delta P_o = -0,2$ p.u. e $\Delta P_o = -0,4$ p.u., respectivamente.

A corrente do indutor do conversor fonte (Figura 12), assim como anteriormente, manteve-se com valor de corrente sempre superior a zero. E neste teste de variação de

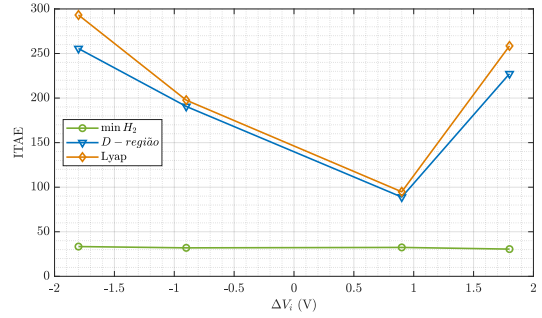
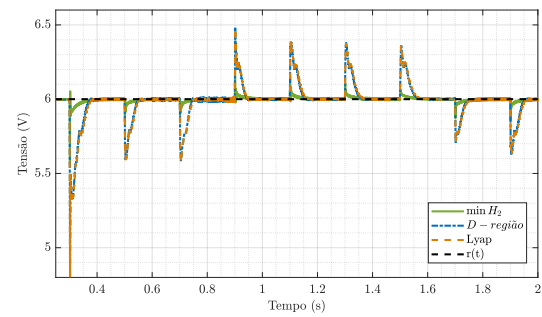
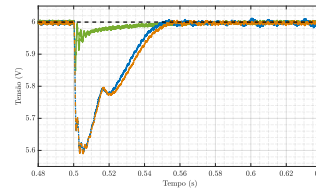


Figura 10. ITAE para teste de variação de tensão.

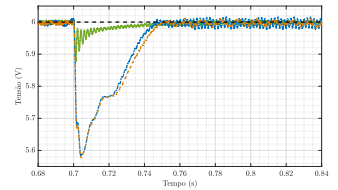
potência todos os métodos mantiveram o sinal de controle sem saturações (Figura 13).



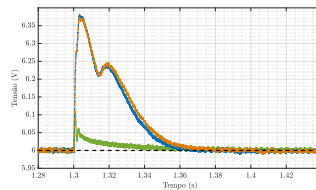
(a)



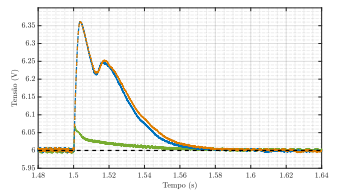
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 11. Tensão de saída para teste de variação de potência

Índices de desempenho As Figuras 14 a 16 mostram os resultados para os seguintes índices ISE, ITSE, ITAE e ISSC, respectivamente. Para os índices que calculam o erro observamos que minimizar a norma H_2 apresenta o menor acúmulo de erro, seguido da alocação de polos e método de Lyapunov, exceto no ITAE que na variação de $+0.4$ p.u. o método de Lyapunov apresentou o segundo menor acúmulo de erro. Já quanto ao esforço de controle minimizar H_2 apresentou maior esforço, enquanto alocação de polos e Lyapunov apresentaram custo semelhante, tendo uma variação apenas para taxa de variação de $+0.4$ p.u. Ao solucionar os problemas pelas funções `place` e `lyap` no `Matlab` selecionamos polos desejados específicos e com

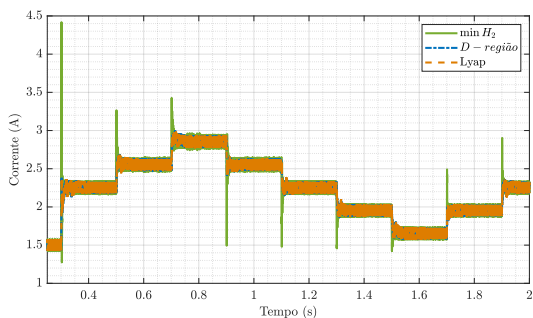


Figura 12. Corrente do indutor do conversor de alimentação do teste de variação de potência

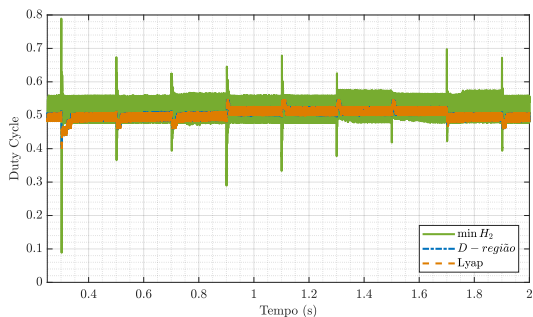


Figura 13. Sinal de controle para o teste de variação de potência.

isso obtemos os mesmos resultados, no entanto, quando se resolve o mesmo problema via LMI seleciona-se uma região convexa para posicionar os polos, e com isto obtêm-se ganhos distintos para os dois métodos, onde a região de alocação de polos apresentou melhor desempenho que o método de Lyapunov.

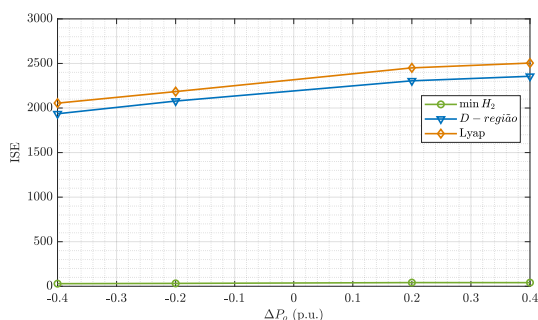


Figura 14. ISE para teste de variação de potência.

6. CONCLUSÃO

Neste artigo propôs-se uma comparação entre métodos de controle de alocação de polos, estabilidade de Lyapunov e minimização da norma H_2 solucionados por matrizes de inequações lineares, aplicados a um sistema de micro rede CC representado pelo sistema de conversores buck-buck. Para solucionar o problema via LMI são definidas regiões de restrições que dependem dos objetivos do problema. Desta forma observou-se que minimizar a norma H_2

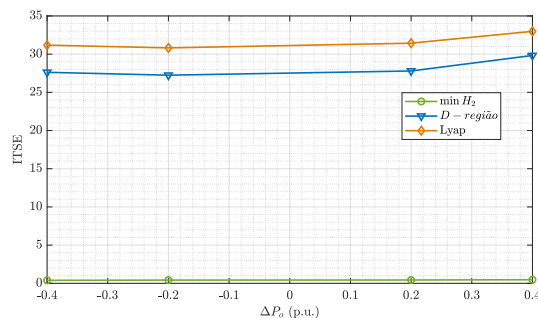


Figura 15. ITSE para teste de variação de potência.

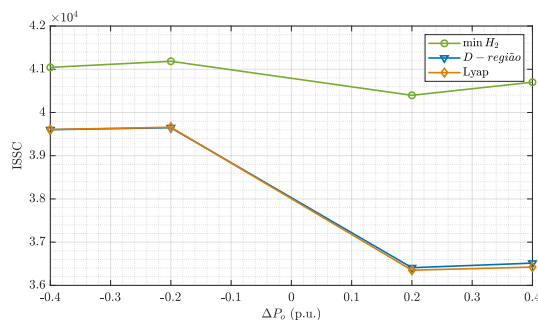


Figura 16. ISSC para teste de variação de potência.

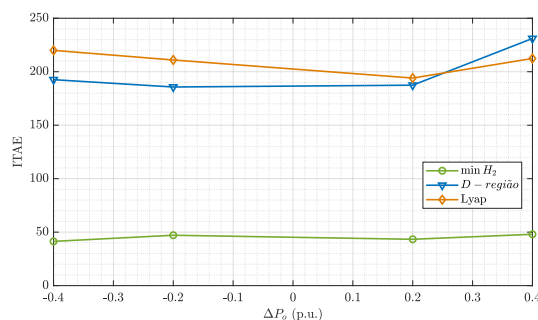


Figura 17. ITAE para teste de variação de potência.

apresentou o melhor desempenho, na comparação dos três métodos, visto que trata-se de um problema de otimização que visa obter custo mínimo, porém quando se analisa os métodos de alocação de polos e o método de estabilidade de Lyapunov observa-se que alocar os polos na região desejada alcançou um melhor desempenho quando analisados os índices ISE, ITSE e ITAE.

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, realizada no âmbito do Projeto Samsung-UFAM de Ensino e Pesquisa (SUPER), nos termos do artigo 48 do Decreto nº 6.008/2006 (SUFRAMA), foi financiada pela Samsung Eletrônica da Amazônia Ltda., Nos termos da Lei Federal nº 8.387/1991, por meio do convênio 001/2020, firmado com a Universidade Federal do Amazonas e a FAEPI, Brasil.

REFERÊNCIAS

- Babaiahgari, B., Jeong, Y., and Park, J.D. (2020). Dynamic control of region of attraction using variable inductor for stabilizing dc microgrids with constant power loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1–1. doi:10.1109/TIE.2020.3026270.
- 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. doi:10.3390/en13102663.
- Bianchi, M.A., Zurbriggen, I.G., Paz, F., and Ordóñez, M. (2019). Improving dc microgrid dynamic performance using a fast state-plane-based source-end controller. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(8), 8062–8078. doi:10.1109/TPEL.2018.2878383.
- Duan, G.R. and Yu, H.H. (2013). *LMIs in Control Systems Analysis, Design and Applications*. CRC Press, 1^o edition.
- Kumar, J., Agarwal, A., and Agarwal, V. (2019). A review on overall control of dc microgrids. *Journal of Energy Storage*, 21, 113–138. doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2018.11.013. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X18302019>.
- Lucas-Marcillo, K.E., Plaza Guingla, D.A., Barra, W., De Medeiros, R.L.P., Melo Rocha, E., Vaca-Benavides, D.A., Ríos Orellana, S.J., and Herrera Muentes, E.V. (2019). Novel robust methodology for controller design aiming to ensure dc microgrid stability under cpl power variation. *IEEE Access*, 7, 64206–64222. doi:10.1109/ACCESS.2019.2915027.
- Mardani, M.M., Vafamand, N., Khooban, M.H., Dragičević, T., and Blaabjerg, F. (2019). Design of quadratic d-stable fuzzy controller for dc microgrids with multiple cpls. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(6), 4805–4812. doi:10.1109/TIE.2018.2851971.
- 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. doi:10.1109/JESTPE.2017.2786588.
- Su, M., Liu, Z., Sun, Y., Han, H., and Hou, X. (2018). Stability analysis and stabilization methods of dc microgrid with multiple parallel-connected dc-dc converters loaded by cpls. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(1), 132–142. doi:10.1109/TSG.2016.2546551.
- Xu, Q., Zhang, C., Wen, C., and Wang, P. (2019). A novel composite nonlinear controller for stabilization of constant power load in dc microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(1), 752–761. doi:10.1109/TSG.2017.2751755.