

Desenvolvimento de uma malha auxiliar ativa baseada em ESP para mitigação de oscilações em conversores CC-CC

Isaías V. de Bessa * Renan L. P. de Medeiros * Iury Bessa *
Marenice M. de Carvalho ** Florindo A. C. Ayres Jr. *
João E. C. Filho * Vicente F. L. Jr **

* Departamento de Eletricidade, Universidade Federal do Amazonas, AM (e-mail: isaias@ufam.edu.br, renanlandau@ufam.edu.br, iurybessa@ufam.edu.br, florindoayres@ufam.edu.br, joaoedgarc@gmail.com)

** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Amazonas, AM (e-mail: marenice@ufam.edu.br)

*** Departamento de Eletrônica e Computação, Universidade Federal do Amazonas, AM (e-mail: vicente@ufam.edu.br)

Abstract: This paper aims to adapt the structure and design procedures of a power system stabilizer (PSS) to the context of the use of DC-DC converters to mitigate the oscillations due to connection of constant power loads (CPL). In this sense, a buck converter with voltage previously regulated by a controller is considered and based on the power variations gain and phase contributions cause in the system, the active auxiliary loop design is carried out to mitigate these effects. Furthermore, by modifying the structure of this loop, the performance and stability of the system are evaluated.

Resumo: Este trabalho tem por objetivo adaptar a estrutura e procedimentos do projeto de um estabilizador de sistema de potência (ESP) para o contexto de amortecimento de oscilações em conversores CC-CC decorrentes da conexão de cargas de potência constante (*constant power load* - CPL). Para isso, considera-se um conversor *buck* com tensão previamente regulada por um controlador e baseado nas contribuições de ganho e fase que as variações de potência causam no sistema, realiza-se o projeto de malha auxiliar ativa para mitigar esses efeitos. Além disso, através da modificação da estrutura dessa malha, avalia-se o desempenho e a estabilidade do sistema.

Keywords: PSS, constant power loads, buck converter, active auxiliary loop.

Palavras-chaves: ESP, cargas de potência constante, buck converter, malha auxiliar ativa.

1. INTRODUÇÃO

Conversores CC-CC são amplamente utilizados em sistemas de distribuição CC com o objetivo de regulação de tensão e potência (Dragicevic et al., 2016). A integração desses conversores operando em níveis de tensão distintos caracteriza uma microrrede CC (Elsayed et al., 2015). Contudo, esta integração pode ocasionar a diminuição da estabilidade global do sistema (Riccobono and Santi, 2014), sobretudo quando conectado a uma carga de potência constante (*constant power load* - CPL).

As CPLs são geralmente construídas através de conversores chaveados com potência regulada, e seus efeitos são observados sobretudo quando a dinâmica do regulador de potência é mais rápida que a dinâmica do barramento de tensão regulado, ocasionando oscilações indesejadas que apresentam o efeito de impedância negativa, podendo ocasionar o colapso do sistema (AL-Nussairi et al., 2017; Mosskull, 2018).

Nesse contexto, diversas técnicas foram desenvolvidas com o objetivo de mitigar os efeitos decorrentes da conexão com CPLs. Em Yousefizadeh et al. (2019) os autores desenvolvem um filtro de Kalman para estimar a variação de potência incerta de CPLs em conjunto com uma estrutura de controle adaptativo, já em Lucas-Marcillo et al. (2019); Lucas et al. (2021) os autores realizam estratégias de controle robusto baseado em algoritmos de otimização linear.

Outro caminho investigado na literatura é o desenvolvimento de malhas de controle auxiliares que tem por objetivo a emulação de inércias virtuais, como: aplicação de um resistor virtual Potty et al. (2020), a aplicação de uma impedância virtual Zhang et al. (2019), e aplicação de um indutor virtual Liu et al. (2018).

Nesse sentido, a proposta desse trabalho é fazer uso do conceito da malha auxiliar apresentado em (Isaías V. de Bessa et al., 2021) para desenvolver o projeto de uma malha baseada no projeto de um estabilizador de sistema de potência (ESP), geralmente utilizado em máquinas AC.

A proposta é adaptar a estrutura e metodologia utilizada para conversores CC-CC modificando a estrutura dessa malha para três casos de interesse: 1) malha auxiliar composta apenas por um ganho proporcional (MGP), 2) malha auxiliar composta por uma estrutura de avanço puro (MAP) e 3) malha auxiliar composta por um compensador de avanço/atraso de fase (MLL). Dessa forma, pode-se avaliar a melhoria do desempenho e da estabilidade de um conversor *buck* alimentando uma carga do tipo CPL, quando aplicado a malha auxiliar proposta neste estudo.

O restante do trabalho está dividido como se segue: a Seção 2 aborda a modelagem do sistema utilizado, enquanto que a Seção 3 mostra os procedimentos necessários para implementar a malha proposta. A Seção 4 descreve o ambiente de simulação e os testes realizados para avaliar o sistema com e sem a ação da malha auxiliar, já a Seção 5 analisa e apresenta os principais resultados obtidos na simulação do sistema, por fim, a Seção 6 apresenta as considerações finais do trabalho desenvolvido.

2. MODELAGEM DO SISTEMA

Nesse trabalho é utilizado um conversor *buck* para a regulação de tensão entregue a uma carga resistiva R e uma CPL de corrente $I_{cpl} = \frac{P}{V_C}$. A Figura 1 mostra o conversor alimentado por uma tensão de entrada (V_i), entregando uma tensão de saída (V_C), sobre o capacitor (C) para uma corrente (I_L), no indutor (L), sob ação do controlador $C(s)$ que computa um ciclo de trabalho da chave (d), para garantir a regulação. O modelo em espaço de estados médio do conversor *buck* é apresentado nas equações (1) e (2).

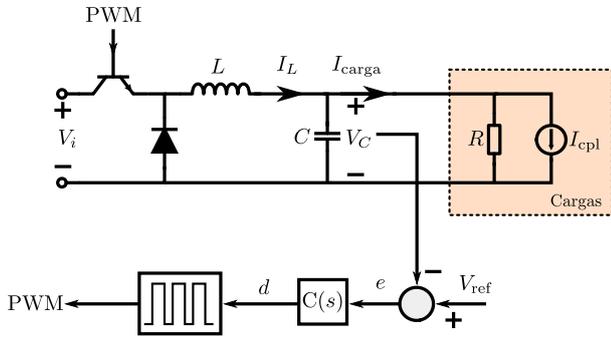


Figura 1. Diagrama do conversor *buck* sob ação do controlador $C(s)$.

$$\dot{I}_L = -\frac{1}{L}V_C + \frac{V_i}{L}d \quad (1)$$

$$\dot{V}_C = \frac{1}{C}I_L - \frac{1}{C}I_{carga} \quad (2)$$

onde, a corrente de carga I_{carga} depende diretamente do estado de tensão, como indicado na equação (3).

$$I_{carga} = \frac{V_C}{R} + \frac{P}{V_C} \quad (3)$$

Em (3) é possível observar que a corrente da carga (I_{carga}) é composta por uma parcela relativa a carga resistiva ($\frac{V_C}{R}$) e outra composta pela parcela relacionada a CPL ($\frac{P}{V_C}$). A CPL atua no sistema como uma carga constante,

contudo quando ocorre pequenas variações na sua tensão de alimentação, isso resulta em pequenas variações no seu valor de corrente resultando em uma característica de admitância negativa, como indicado na equação (4).

$$I_{cpl} = \frac{P}{V_C} \rightarrow \frac{\partial I_{cpl}}{\partial V_C} = -\frac{P}{V_C^2} \quad (4)$$

As equações (1)-(2) podem ser linearizadas em torno de um ponto de operação (u_o, P_o, I_L^o, V_C^o), resultando em (5), com $x_1 = I_L - I_L^o$, $x_2 = V_C - V_C^o$, $u = d - d^o$ e $w = P - P_o$. Da equação (5), pode-se determinar as funções de transferência que relacionam a saída de tensão com a entrada controlada u ($G_u(s)$) e com a perturbação de potência w ($G_w(s)$).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} \left(\frac{1}{R} - \frac{P_o}{V_C^o} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_i}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{CV_C^o} \end{bmatrix} w \quad (5)$$

O controlador $C(s)$ é responsável por garantir a regulação de tensão e mitigar o efeito do sinal de perturbação w . Nesse sentido, a estrutura utilizada para esse controlador é mostrada na equação (6).

$$C(s) = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s(s+N)} \quad (6)$$

O sistema sob ação do controlador pode então ser calculado pela função de transferência mostrada em (7).

$$M_u(s) = \frac{C(s)G_u(s)}{1 + C(s)G_u(s)} \quad (7)$$

O controlador projetado deve atender as especificações de desempenho desejadas, quando considera-se pequenas variações de potência, contudo a medida que a demanda de carga aumenta, as oscilações de tensão no barramento regulado tornam-se maiores, até atingir uma potência máxima P_{max} responsável por causar uma oscilação sustentada. Para este trabalho o controlador $C(s)$ é projetado para garantir um tempo de acomodação de 0,5 s e máximo sobressinal inferior a 10%. Baseado nisso, a Tabela 1 sumariza os valores utilizados para o conversor *buck* e para o controlador $C(s)$.

Tabela 1. Parâmetros do sistema.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão de entrada	V_i	20	V
Tensão de saída	V_o	12	V
Ciclo de trabalho da chave	d	0,6	-
Frequência	f	20	kHz
Potência da CPL	P_o	10	W
Potência máxima	P_{max}	62	W
Resistência de carga	R	4	Ω
Indutância	L	1	mH
Capacitância	C	2,2	mF
Ganho proporcional	k_p	22,3189	V^{-1}
Ganho integral	k_i	2011,83	$V^{-1}.s^{-1}$
Ganho derivativo	k_d	0.057806	$V^{-1}.s$
Polo auxiliar	N	4628	rad/s

3. PROJETO DA MALHA AUXILIAR

A malha auxiliar proposta consiste no projeto de um filtro *washout* $F(s)$ e de um compensador $L(s)$ que atue sob o sinal de tensão, contribuindo com um sinal auxiliar no erro e utilizado para o cômputo de d . A estrutura dessa malha é mostrada na Figura 2. Esta estrutura é comumente utilizada em projeto de ESP aplicados para amortecimento de polos em máquinas síncronas.

Nesse caso o projeto da malha tem dois objetivos básicos, sendo estes sumarizados abaixo:

- (1) Amortecer oscilações decorrentes predominantemente de variações instantâneas de potência da CPL;
- (2) Não interferir no comportamento dinâmico do sistema na ausência de uma perturbação.

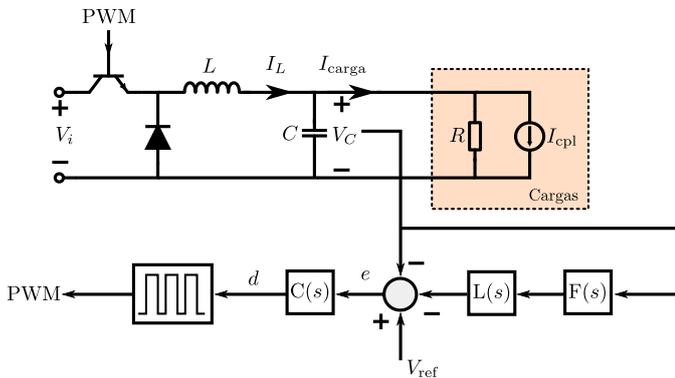


Figura 2. Proposta da malha auxiliar sob o sistema.

3.1 Projeto do filtro washout – $F(s)$

O filtro *washout* $F(s)$ é responsável por selecionar de forma adequada as frequências relacionadas a correta operação de $L(s)$. De forma ideal, ele garante uma contribuição de fase nula e ganho unitário na frequência de oscilação $\omega_{osc} = 709 \text{ rad/s}$ relacionado ao período de oscilação que uma variação instantânea de potência ocasiona no barramento, como mostrada na Figura 3.

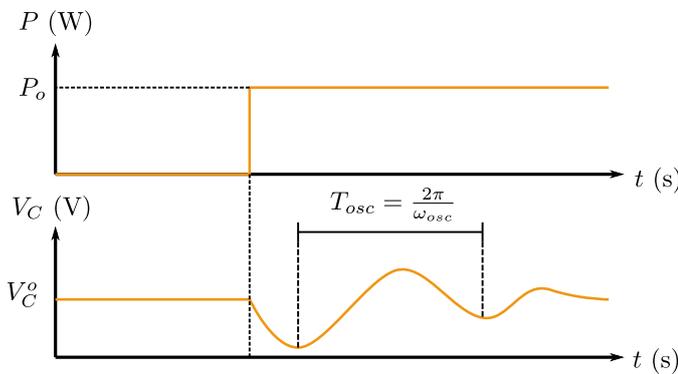


Figura 3. Efeito da variação de potência no barramento regulado.

Baseado nisso, a estrutura do filtro utilizada é mostrada na equação (8), em que $Q = 1,42$ é o fator de qualidade do filtro projetado.

$$F(s) = \frac{\frac{\omega_{osc}}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_{osc}}{Q} s + \omega_{osc}^2} \quad (8)$$

3.2 Projeto do compensador – $L(s)$

Para o projeto do compensador $L(s)$ considere que o conversor sob ação do controlador na frequência de oscilação ω_{osc} tenha uma contribuição de ganho $\|M_u\| = 0,6867$ e uma contribuição de fase $\theta_{M_u} = -36,94^\circ$, nesse caso, a estrutura genérica para $L(s)$ é dada na equação (9).

$$L(s) = K_{ESP} \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \quad (9)$$

Este compensador é projetado de forma a garantir uma contribuição nula de fase, e um amortecimento ζ_d mediante a variação de potência. Então, os passos a seguir resumizam o projeto do compensador $L(s)$.

- **Passo 1:** Encontrar a frequência de oscilação ω_{osc} que deseja-se amortecer;
- **Passo 2:** Escolhendo-se T_1 , calcula-se T_2 garantido que o critério de fase seja obedecido:

$$\angle L(j\omega_{osc}) + \theta_{M_u} = 0 \quad (10)$$

- **Passo 3:** Escolhendo um amortecimento $0,2 \leq \zeta_d \leq 0,6$, calcula-se o ganho K_{ESP} tal que:

$$K_{ESP} = \frac{2\zeta_d}{\|L(j\omega_{osc})\| \|M_u\|} \quad (11)$$

Nesse contexto, a estrutura do compensador $L(s)$ foi modificada para três situações distintas:

- (1) Estrutura MGP: Malha auxiliar composta por $F(s)$ e compensador apenas com ganho proporcional K_{ESP} . Nessa situação o **Passo 2** não é realizado.
- (2) Estrutura MAP: Malha auxiliar composta por $F(s)$ e compensador $L(s)$ com estrutura de avanço puro. Nessa situação $T_2 = 0$ e utiliza-se o **Passo 2** para calcular T_1 .
- (3) Estrutura MLL: Malha auxiliar composta por $F(s)$ e compensador $L(s)$ com estrutura de avanço/atraso, como mostrada na equação (9).

Então, a Tabela 2 sumariza os ganhos calculados para cada estrutura.

Tabela 2. Ganhos das estruturas de malha auxiliar propostas no trabalho.

Estrutura	T_1	T_2	K_{ESP}
MGP	-	-	1,4562
MAP	0,0011	-	1,1639
MLL	0,1500	0,0018	0,0225

4. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Uma vez que a malha auxiliar foi projetada, o próximo passo é simular o sistema sem malha auxiliar (SMA) e com malha auxiliar com as estruturas MGP, MAP e MLL.

A planta é simulada utilizando o *software* MATLAB 2019 em conjunto com a extensão SIMULINK, com um passo de simulação de 1×10^{-5} , para um tempo total de simulação de 3,5 segundos por teste.

4.1 Descrição dos testes

Para avaliar o desempenho e estabilidade da malha auxiliar proposta, propõe-se a aplicação de três testes, sendo estes:

Teste 1: Variação de potência: Nesse teste o sistema é colocado no ponto de operação, a malha auxiliar é ativada e no instante $t = 3,0$ s a CPL entra com potência máxima projetada (62 W). Nessa situação, deseja-se observar o desempenho da planta na presença da malha auxiliar e sem a malha auxiliar para uma grande entrada de carga.

Teste 2: Entrada da malha auxiliar durante a variação: Nesse teste o sistema é exposto a uma entrada de carga de 62 W no instante $t = 1,0$ s. E no instante $t = 1,1$ s a malha auxiliar é ativa, observando como a planta se comporta quando as malhas auxiliares entram durante a oscilação prolongada ocasionada pela CPL.

Teste 3: Variação de referência de tensão: Nesse teste, realiza-se a mudança de *setpoint* do barramento de tensão regulado no instante $t = 1,5$ s de 12 V para 13 V, para avaliar se a malha auxiliar é capaz de não interferir na dinâmica da planta se não houver uma variação de potência da CPL.

4.2 Avaliação de desempenho e estabilidade

Por fim, para realizar uma análise comparativa e quantitativa entre o desempenho do SMA e as estruturas MGP, MAP e MLL realiza-se o cálculo dos índices de desempenho integrais, sendo estes: integral do erro quadrático (*integral of square error* - ISE) para o sistema com 20%, 40%, 60% e 80% da carga máxima. O cálculo do ISE é mostrado na equação (12).

$$ISE = \int_0^T e(t)dt \quad (12)$$

Além disso, também é avaliado como a ação da malha auxiliar contribui com a estabilidade relativa do sistema, mediante a variação de potência. Nesse caso, a função de transferência $T_w(s)$ em (13) relaciona o sinal de tensão de saída com a perturbação de potência w sob a ação da malha auxiliar.

$$T_w(s) = \frac{G_w(s)}{1 + C(s)G_u(s)(1 + F(s)L(s))} \quad (13)$$

Com (13), pode-se traçar o diagrama de Bode para avaliar como a malha auxiliar atua próximo a frequência de projeto e redondezas. Além disso, através do diagrama de Nyquist, pode-se calcular a margem de ganho (MG) para cada estrutura proposta visando avaliar a contribuição de estabilidade relativa do sistema.

Vale mencionar que a equação (13) também permite avaliar a ação do sistema SMA, considerando $F(s)L(s) = 0$.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção tem por objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos durante os testes objetivando realizar

a avaliação de desempenho e estabilidade relativa da metodologia proposta.

5.1 Avaliação da resposta temporal

A Figura 4(a) mostra a evolução temporal do Teste 1. Observe que no instante em que ocorre a entrada de carga o sistema SMA entra em estado de oscilação sustentada, relacionada a diminuição da estabilidade da rede. Por outro lado as metodologias MGP, MAP e MLL apresentam a capacidade de amortecer essa oscilação, garantindo a estabilidade do barramento. Em especial, MAP e MLL conseguem amortecer mais rapidamente as oscilações, tendo resultados temporais similares para esse teste.

A Figura 4(b) mostra a resposta temporal do sistema para uma entrada de carga máxima e com a malha auxiliar sendo inserida apenas durante a oscilação prolongada. Observe que a partir da entrada da malha a oscilação é mitigada, garantido a estabilidade do barramento regulado. Novamente MAP e MLL apresentam resultados similares e melhor que MGP.

Por fim, a Figura 4(c) mostra como a malha auxiliar atua mediante a variações que não estão relacionadas a potência da CPL. Como projetado, a malha auxiliar não possui atuação sobre o sistema na ocorrência de uma variação de referência de tensão, devido a presença do filtro *washout* $F(s)$ que garante a atuação de $L(s)$ apenas em frequências similares decorrente das variações de potência da CPL.

5.2 Avaliação de desempenho e estabilidade

A Figura 5 mostra o ISE calculado para cada estrutura proposta para diferentes níveis de cargas.

Note que o sistema SMA apresenta maior ISE, indicando um maior acúmulo de erro na mitigação das oscilações decorrentes da entrada de carga no sistema. Por outro lado, os sistemas sob ação da malha auxiliar apresentaram menor ISE, indicando um menor acúmulo de erro para mitigar a oscilação. Para uma carga de até 60% da máxima, MGP, MAP e MLL apresentam desempenho similares. Contudo, para uma variação de 80% da carga máxima, os sistemas apresentam uma pequena discrepância, em que observa-se que MAP tem um ISE ligeiramente inferior ao MLL, ratificando a similaridade da atuação das duas malhas nas respostas temporais.

A Figura 6 mostra o diagrama de Bode para a variação de frequência da função de transferência $T_w(s)$, em que observa-se que os sistemas sob ação da malha auxiliar são responsáveis por diminuir a contribuição de módulo da perturbação sobre o sistema para frequências próximas a ω_{osc} . Além disso, observe que para frequências distantes de ω_{osc} o sistemas com malha auxiliar e SMA apresentam comportamento idênticos, o que justifica a resposta encontrada durante o Teste 3 de variação de referência de tensão, em que a malha auxiliar não atua no sistema. Outro ponto interessante é o deslocamento do MGP, que ocorre devido a estrutura utilizada não conter polos e zeros para contribuir com fase, ocasionando o deslocamento do pico.

Por fim, a Figura 7 mostra o diagrama de Nyquist de $T_w(s)$ para cada estrutura proposta. Através dessa curva é possível determinar a MG para cada caso, através da

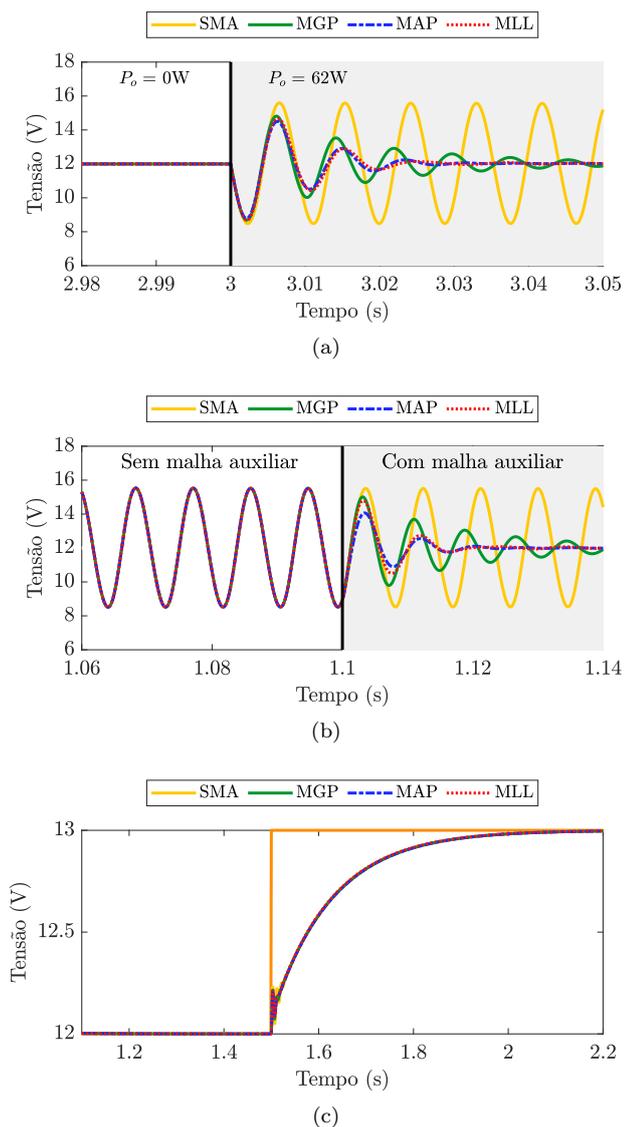


Figura 4. Resultado das simulações propostas. (a) Simulação do Teste 1 de variação de potência com a malha auxiliar inicialmente conectada, (b) simulação do Teste 2 de entrada da malha auxiliar durante a variação de potência e (c) simulação do Teste 3 de variação de referência.

interseção da curva com o eixo real, indicando a frequência de cruzamento de fase. A Tabela 3 sumariza esse valor para cada estrutura.

Tabela 3. Margem de ganho para cada estrutura proposta.

Estrutura	MG
SMA	4,6502
MGP	7,3165
MAP	9,3043
MLL	9,3002

Nesse caso, observe que a malha auxiliar contribuíram com um aumento da margem de ganho, ocasionando um aumento da estabilidade relativa do sistema. Além disso, as estruturas MAP e MLL apresentaram margem de ganho similares com MAP tendo MG ligeiramente superior.

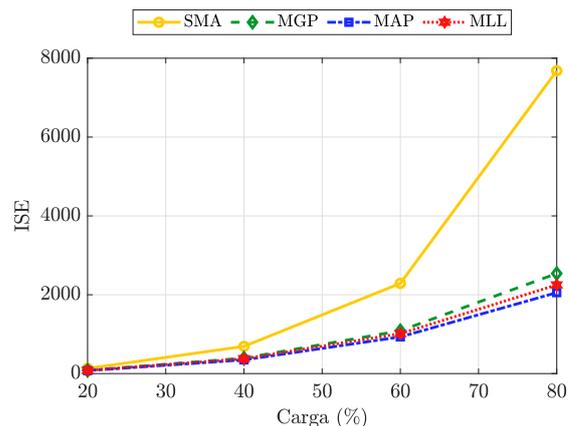


Figura 5. Análise de desempenho através do cálculo do ISE.

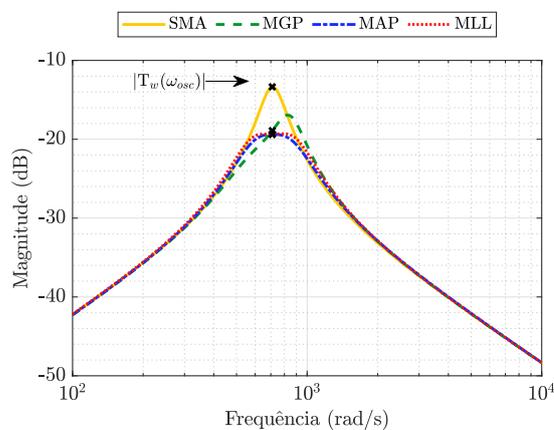


Figura 6. Análise de estabilidade através do diagrama de Bode.

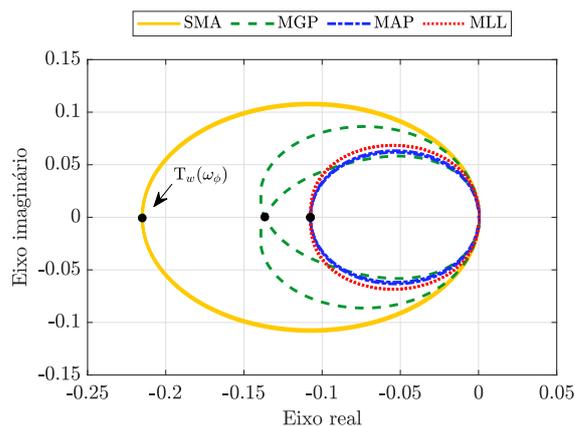


Figura 7. Análise de estabilidade através do diagrama de Nyquist.

6. CONCLUSÃO

A proposta desse trabalho é desenvolver o projeto de uma malha auxiliar baseado no projeto de um ESP, amplamente utilizado para amortecimento de oscilações eletromecânicas no sistema elétrico de potência. Nesse sentido,

o foco do trabalho foi em apresentar a adaptação da estrutura agora voltada para o amortecimento de oscilações em conversores CC-CC chaveados, para mitigar oscilações oriundas de variações instantâneas de potência da CPL.

Então, observou-se que a malha auxiliar proposta atua sobre a planta de forma a reduzir as oscilações decorrentes da variação de potência, decorrente do aumento da estabilidade relativa do sistema. Além disso, também pode-se mostrar que esta malha não modifica a resposta dinâmica do sistema para variações não relacionadas a frequência de oscilação decorrentes da CPL.

Além disso, entre as três estruturas de malha auxiliar propostas pode-se observar que MAP e MLL apresentaram melhor desempenho e maior contribuição na estabilidade relativa do sistema, devido a presença de polos e zeros nessas estruturas que garantem uma contribuição de fase, afim de melhorar o desempenho do sistema e garantir a estabilidade.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi parcialmente financiado por: CNPq, CAPES e FAPEAM.

REFERÊNCIAS

- AL-Nussairi, M.K., Bayindir, R., Padmanaban, S., Mihet-Popa, L., and Siano, P. (2017). Constant power loads (cpl) with microgrids: Problem definition, stability analysis and compensation techniques. *Energies*, 10(10). doi:10.3390/en10101656. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1656>.
- Dragicevic, T., Lu, X., Vasquez, J.C., and Guerrero, J.M. (2016). DC Microgrids - Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(7), 4876–4891. doi: 10.1109/TPEL.2015.2478859.
- Elsayed, A.T., Mohamed, A.A., and Mohammed, O.A. (2015). DC microgrids and distribution systems: An overview. *Electr. Power Syst. Res.*, 119, 407 – 417. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.10.017>.
- Isaiás V. de Bessa, Renan L. P. de Medeiros, Iury Bessa, Florindo A. C. Ayres Junior, Marenice M. de Carvalho, and Vicente Ferreira Lucena Junior (2021). Desenvolvimento de uma malha auxiliar ativa para supressão de oscilações decorrentes da conexão com CPL em sistemas de distribuição CC. *Proceedings do XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, 929–934. doi:10.20906/sbai.v1i1.2680.
- Liu, S., Su, P., and Zhang, L. (2018). A Virtual Negative Inductor Stabilizing Strategy for DC Microgrid With Constant Power Loads. *IEEE Access*, 6, 59728–59741. doi:10.1109/ACCESS.2018.2874201.
- Lucas, K.E., Pagano, D.J., Vaca-Benavides, D.A., García-Arcos, R., Rocha, E.M., Medeiros, R.L.P., and Ríos, S.J. (2021). Robust control of interconnected power electronic converters to enhance performance in dc distribution systems: A case of study. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(4), 4851–4863. doi:10.1109/TPEL.2020.3019402.
- Lucas-Marcillo, K.E., Plaza Guingla, D.A., Barra, W., De Medeiros, R.L.P., Melo Rocha, E., Vaca-Benavides, D.A., Rios 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(c), 64206–64222. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2915027.
- Mosskull, H. (2018). Constant power load stabilization. *Control Eng. Pract.*, 72(September 2017), 114–124. doi: 10.1016/j.conengprac.2017.12.002.
- Potty, K.A., Bauer, E., Li, H., and Wang, J. (2020). Smart Resistor: Stabilization of DC Microgrids Containing Constant Power Loads Using High-Bandwidth Power Converters and Energy Storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(1), 957–967. doi:10.1109/TPEL.2019.2910527.
- Riccobono, A. and Santi, E. (2014). Comprehensive Review of Stability Criteria for DC Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(5), 3525–3535. doi:10.1109/TIA.2014.2309800.
- Yousefizadeh, S., Bendtsen, J.D., Vafamand, N., Khooban, M.H., Blaabjerg, F., and Dragičević, T. (2019). Tracking Control for a DC Microgrid Feeding Uncertain Loads in More Electric Aircraft: Adaptive Backstepping Approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(7), 5644–5652.
- Zhang, X., Zhong, Q.C., Kadiramanathan, V., He, J., and Huang, J. (2019). Source-side series-virtual-impedance control to improve the cascaded system stability and the dynamic performance of its source converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(6), 5854–5866. doi:10.1109/TPEL.2018.2867272.