



# Projeto e simulação de um inversor trifásico com filtro-LCL considerando o amortecimento passivo e ativo

## *Design and simulation of an LCL-Filter-Based three-phase inverter using passive and active damping*

Gabriel Alexandre de Souza Braga \*, Cassius Rossi de Aguiar<sup>†</sup>

06/09/2021

### RESUMO

Este artigo apresenta a análise de dois esquemas de controle para operação de inversores tipo fonte de tensão trifásico com filtro LCL em modo ilhado. Métodos de atenuação da ressonância passivo e ativo do filtro são apresentados e discutidos ao longo deste trabalho. Estas estruturas de controle incluem um controlador proporcional mais integral (PI) de tensão e corrente em cascata, e o amortecimento ativo trás um estimador de corrente com a finalidade de diminuir o uso de sensores. Com o intuito de garantir a correta operação do inversor e reduzir o conteúdo harmônico presente nos sinais de tensão e corrente, os ganhos dos controladores são projetados, considerando a robustez do sistema. A fim de conduzir e validar a proposta, são demonstradas as diferenças de ambos métodos, suas vantagens e desvantagens. Por fim, resultados de simulação, bem como a análise de estabilidade são apresentadas de forma a validar a proposta apresentada.

**Palavras-chave:** Conversor CC-CA. Filtro-LCL. Amortecimento Passivo. Amortecimento Ativo. Energia Renovável. . .

### ABSTRACT

This paper presents the analysis of two improved control schemes for the operation of an LCL-Filter-Based three-phase voltage source inverters in island mode. Passive and active filter resonance attenuation methods are presented and discussed throughout this article. These control structures include a proportional-integral (PI) cascade voltage and current controller and the active damping with a current estimator to reduce the use of sensors. To guarantee the inverter operation and reduce the harmonic content present in the voltage and current signals. The controller gains are designed considering robustness characteristics for developing and validating the proposal. The differences in the methods, their advantages, and their disadvantages are demonstrated. Finally, simulation results, as well as the stability analysis are presented to validate the proposal.

**Keywords:** DC-AC converter. LCL-Filter. Passive Damping. Active Damping. Renewable Energy. . .

## 1 INTRODUÇÃO

A geração distribuída (GD) de energia tem demonstrado um crescimento significativo, especialmente com sistemas fotovoltaicos e parques de energia eólica como vistos em Purvins e Klebow (2015) e Blaabjerg, Liserre e Ma (2012). Estas propostas de GDs tem sido desenvolvidas para suprir o aumento da demanda de energia e para reduzir o impacto ambiental causado pelas fontes de energia não renováveis, como demonstrado em Calzo

\* Engenharia de Computação; gabrielbraga@alunos.utfpr.edu.br; <https://orcid.org/0000-0002-9583-7684>.

<sup>†</sup> Engenharia de Computação; cassiusaguiar@utfpr.edu.br; <https://orcid.org/0000-0002-5068-6587>.

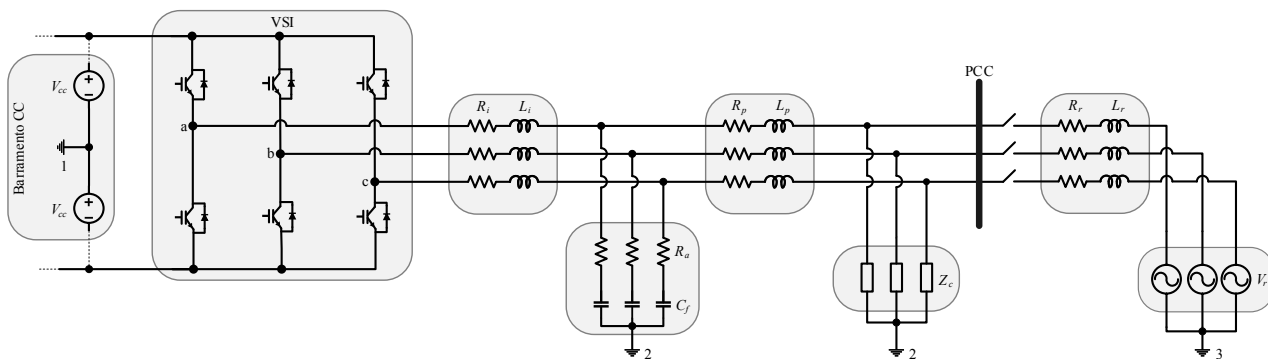
et al. (2012) e Sakae et al. (2014). Essas GDs são normalmente conectadas a rede elétrica e podem ser sistemas trifásicos ou monofásicos.

Neste contexto, este trabalho visa o projeto e análise em ambiente de simulação de um inversor tipo fonte de tensão (VSI, em inglês, *voltage source inverter*) trifásico, com filtro do tipo LCL. Assim, este trabalho é regido por meio da análise comparativa entre o método de atenuação harmônico passivo e ativo. É importante ressaltar que este trabalho não será focado na conexão com a rede elétrica, seu desenvolvimento será concentrado no funcionamento em modo de operação ilhado.

## 2 MÉTODO (OU PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DA PESQUISA)

A topologia utilizada para este trabalho é ilustrada na Fig. 1. Nela é encontrada um VSI trifásico com filtro-LCL e amortecimento passivo. Com base em Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005) é modelado o filtro com amortecimento passivo. Sendo  $L_i \approx 0,84mH$  o indutor de entrada do VSI,  $R_i = 0,12\Omega$  sua resistência parasita,  $R_a \approx 1,6\Omega$  e  $C_f \approx 16\mu F$ , são a resistência de amortecimento e o capacitor do filtro, respectivamente, ao lado esquerdo do ponto de conexão comum (PCC), é observado o indutor  $L_p = 0,4mH$  associado com sua resistência parasita  $R_p = 0,03\Omega$ . Logo em seguida temos a carga do sistemas  $Z_c = 8,1\Omega$  e por fim, ao lado direito do PCC temos o indutor da rede elétrica  $L_r = 0,25mH$  e a resistência parasita do mesmo  $R_r = 0,01\Omega$ . A tensão no barramento CC é  $V_{CC} = 127V_{rms}$ , a potência nominal do sistema é dada por  $P_n = 6kW$ , frequência de chaveamento é  $f_{ch} = 16kHz$ , frequência da rede  $f_r = 60Hz$  e Frequência de ressonância em modo ilhado e conectado é  $f_{ires} \approx 2417Hz$  e  $f_{cres} \approx 2079Hz$  respectivamente.

Figura 1 – Topologia do VSI trifásico com filtro-LCL e amortecimento passivo proposta

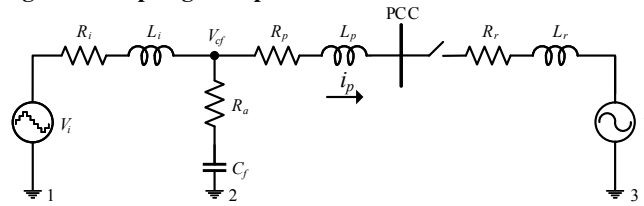


Fonte: Autoria própria (2021).

A estrutura de controle empregada está referenciada em coordenadas estacionárias  $\alpha\beta$ , assim é reduzido a complexidade computacional do controle digital, de tal forma é referenciado um sistema bifásico equivalente ao trifásico proposto inicialmente. Este trabalho abordará duas estruturas de controle, uma com o amortecimento passivo, e outra com amortecimento ativo utilizando o método de estimativa de corrente do ramo do capacitor, como vista em Liston et al. (2018) e Chattopadhyay, De e Bhattacharya (2014). Utilizando a Fig. 2 foi calculado três funções de transferências Eq. (1), Eq. (2) e Eq. (3), que representam a corrente de saída do filtro-LCL em relação a tensão do ramo do capacitor  $\left( G \left( \frac{i_p(s)}{V_{cf}(s)} \right) \right)$ , onde  $L_t = L_p + L_r$  e  $R_t = R_p + R_r$ .

Estas funções representam o sistema em três cenários distintos. A Eq. (1) representa o sistema sem atenuação da ressonância, logo, não há o resistor  $R_a$  demonstrado na Fig. 2. A Eq. (2) representa o sistema com amortecimento passivo, e a Eq. (3) representa o sistema com amortecimento ativo. Então o resistor  $R_a$  é retirado

Figura 2 – Topologia simplificada do circuito em modo conectado



Fonte: Autoria própria (2021).

do sistema e  $V_i = V_r - K_m i_{cf}$ .

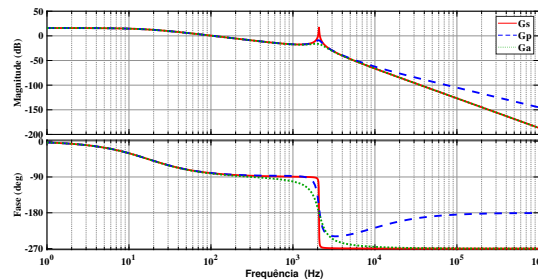
$$G_s(s) = \frac{1}{L_i L_t C_f s^3 + (R_t L_i + R_i L_t) C_f S^2 + (R_i R_t C_f + L_i + L_t) s + R_i + R_t} \quad (1)$$

$$G_p(s) = \frac{R_a C_f s + 1}{L_i L_t C_f s^3 + (R_a L_i + R_t L_i + R_i L_t) C_f S^2 + (R_i R_t C_f + L_i + L_t) s + R_i + R_t} \quad (2)$$

$$G_a(s) = \frac{1}{L_i L_t C_f s^3 + (R_t L_i + R_i L_t + K_m L_t) C_f S^2 + (R_i R_t C_f + K_m R_t C_f + L_i + L_t) s + R_i + R_t} \quad (3)$$

Na Fig. 3 é visto a resposta em frequência da Eq. (1), Eq. (2) e Eq. (3). É evidente que a utilização de métodos de atenuação, seja ele passivo ou ativo, resulta no amortecimento da ressonância gerada pelo sistema.

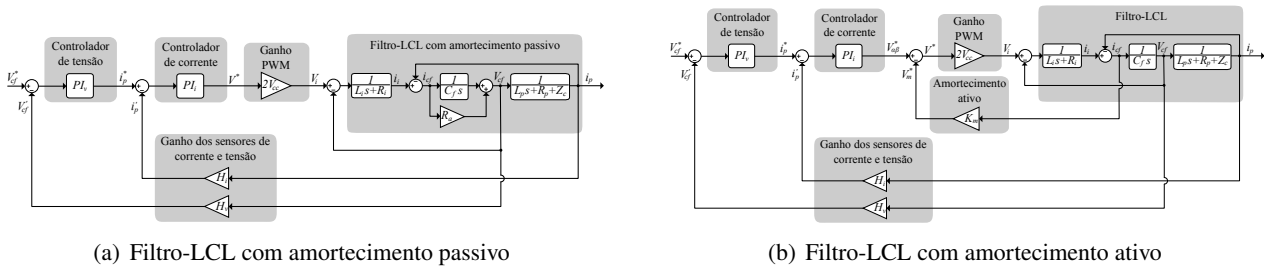
Figura 3 – Resposta em frequência do filtro-LCL para os diferentes tipos de abordagem



Fonte: Autoria própria (2021).

Na Fig. 4 são ilustradas as malhas de controle utilizadas para o sistema, tanto com amortecimento ativo quanto passivo.

Figura 4 – Diagrama de blocos para projeto de ganhos do controlador de tensão em cascata com corrente



(a) Filtro-LCL com amortecimento passivo

(b) Filtro-LCL com amortecimento ativo

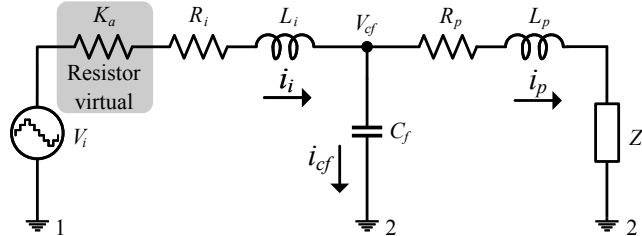
Fonte: Autoria própria (2021).

Onde  $PI_v$  e  $PI_i$  são controladores proporcional mais integral, então com auxílio do *software* MATLAB e utilizando a Fig. 4(a) foi obtido os ganhos, onde para  $PI_v$ ,  $K_p \approx 0,56$  e  $K_i \approx 1800$ , e para  $PI_i$  temos  $K_p \approx 0,75$  e  $K_i \approx 5229$ . O ganho dos sensores se dá em busca do 0,5 p.u, então  $H_i = \frac{9}{400}$  e  $H_v = \frac{1}{360}$ .

### 3 RESULTADOS

Para projetar o controle do amortecimento ativo é necessário primeiro estimar a corrente do capacitor, com base na Fig. 5 é obtido a Eq. (4), Eq. (5) e Eq. (6).

Figura 5 – Circuito elétrico proposto para estimativa da corrente do capacitor do filtro-LCL



Fonte: Autoria própria (2021).

$$\hat{i}_{cf}(s) = \frac{-C_f K_a s i_p(s) - C_f L_i s^2 i_p(s) - C_f R_i s i_p(s) + C_f s V^*(s)}{C_f K_a s + C_f L_i s^2 + C_f R_i s + 1} \quad (4)$$

Nota-se na Eq. (4) que a estimativa da corrente do capacitor se dá por meio de duas funções de transferência  $\hat{i}_{cf}(s) = \hat{i}_{cv}(s) - \hat{i}_{ci}(s)$ , portanto.

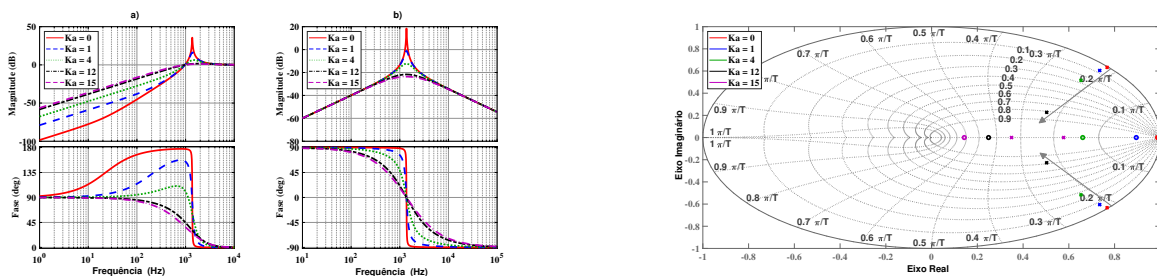
$$G_{icv}(s) = \frac{\hat{i}_{cv}(s)}{V^*(s)} = \frac{C_f s}{C_f K_a s + C_f L_i s^2 + C_f R_i s + 1} \quad (5)$$

$$G_{ici}(s) = \frac{\hat{i}_{ci}(s)}{i_p(s)} = \frac{C_f K_a s + C_f L_i s^2 + C_f R_i s}{C_f K_a s + C_f L_i s^2 + C_f R_i s + 1} \quad (6)$$

Onde  $V^*$  representa o sinal de saída do controle, que será utilizado para fazer a modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*), então desconsiderando o efeito do PWM e utilizando um modelo médio,  $V_i$  pode ser aproximado para  $V^*$ , assim poupando o uso de um sensor. Utilizando a Eq. (5) e Eq. (6), é traçado o diagrama de bode e o do lugar geométrico das raízes visto na Fig. 6.

Na Fig. 6(b) é ilustrado que conforme o  $K_a$  aumenta, seus polos se deslocam para o centro do círculo unitário, demonstrando assim o aumento de sua estabilidade, mas por outro lado, caso  $K_a$  tenha uma alta magnitude, um pequeno erro é introduzido ao sistema, isso ocorre principalmente em redes fracas. Para este trabalho foi escolhido  $K_a = 12$ .

Figura 6 – Efeito do  $K_a$



(a) Diagrama de bode do  $\hat{i}_{cf}$ . a) representa  $G_{ici}(s)$ . b) representa  $G_{icv}(s)$

(b) Polos de  $G_{ici}(z)$

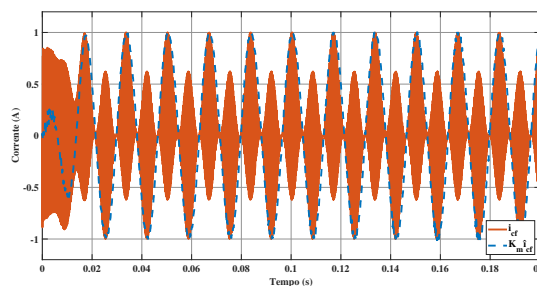
Fonte: Autoria própria (2021).

Observando a Fig. 6(a) nota-se que  $G_{ici}(s)$  se comporta como um filtro passa-faixa com passa-alta e  $G_{icv}(s)$  como um passa-faixa, além disso a Eq. (4) e Eq. (6) são discretizadas utilizando o método de Tustin, e com base nisso a Eq. (4) é transformada em uma equação de diferenças utilizando a propriedade do deslocamento ( $z^{-n}Y(z) \rightarrow y[k-n]$ ) como visto na Eq. (7), onde  $k_1 = 2C_f(T_s(K_a + R_i) + 2L_i + T_s^2)$ ,  $k_2 = 2(4C_fL_i - T_s^2)$ ,  $k_3 = 2C_f(T_s(K_a + R_i) - 2L_i) - T_s^2$ ,  $k_4 = 2C_fT_s$ ,  $k_5 = -2C_f(T_s(K_a + R_i) + 2L_i)$ ,  $k_6 = 8C_fL_i$  e  $k_7 = 2C_f(T_s(K_a + R_i) - 2L_i)$ .

$$\hat{i}_{cf}[n] = \frac{k_2\hat{i}_{cf}[n-1] + k_3\hat{i}_{cf}[n-2] + k_4(V^*[n] - V^*[n-2]) + k_5i_p[n] + k_6i_p[n-1] + k_7i_p[n-2]}{k_1} \quad (7)$$

Utilizando a Eq. (7) e o software PSIM é simulado o sistema a fim de validar a equação encontrada, como demonstrado na Fig. 7. É perceptível que o sinal fornece as características oscilatórias da corrente do capacitor em alta frequência, além de fornecer, de forma mais predominante, a amplitude da corrente do capacitor. Também é importante dizer que  $K_m\hat{i}_{cf}$  não deve exceder 10% do valor de tensão do sistema como visto em Liston et al. (2018), portanto  $K_m = 1,31$ .

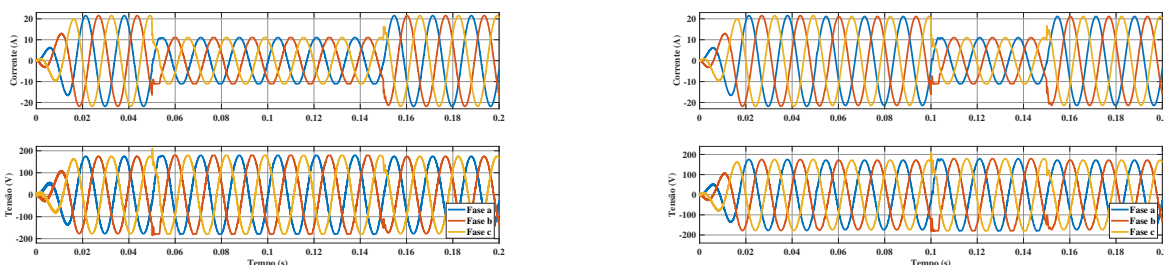
Figura 7 – sinal de corrente estimado  $\hat{i}_{cf}$  e sinal de corrente medido  $i_{cf}$ .



Fonte: Autoria própria (2021).

Então é simulado a estrutura proposta utilizando tanto controle com amortecimento ativo quanto passivo, na Fig. 8 podemos ver a resposta da corrente  $i_p$  e da tensão  $V_{cf}$  em ambas abordagens.

Figura 8 – Resposta do sinal do controle do sistema



(a) Resposta do amortecimento passivo ao degrau de carga de 6kW para 3kW, do instante 0,1 a 0,15 segundos

(b) Resposta do amortecimento ativo ao degrau de carga de 6kW para 3kW, do instante 0,05 a 0,15 segundos

Fonte: Autoria própria (2021).

Na Fig. 8(b) o amortecimento ativo encontra-se desativado do instante 0 a 0,05 segundos, além disso o sistema opera em modo ilhado e com uma carga linear e puramente resistiva, assim não há uma grande geração de distúrbios, mas comparando a Fig. 8(a) com a Fig. 8(b) é perceptível que o sistema demonstra maior estabilidade



ao degraude carga em regime permanente.

#### 4 CONCLUSÕES

Esse artigo apresenta o projeto e simulação, com fins comparativos, de uma atenuação ativa com estimação de corrente e um amortecimento passivo, ambas abordagens com o intuito de garantir a performance do sistema, as estruturas de controle propostas tem como objetivo garantir a estabilidade do sistema em modo ilhado, então é proposto uma simples implementação de estimativa de corrente do capacitor, que permite a operação com baixas e altas frequências de ressonância do filtro, comparado ao método passivo. Portanto, com base nos resultados observados na Fig. 8(b) é possível afirmar que o sinal com amortecimento passivo possui mais ruídos, também ao comparar a Fig. 8(a) com a Fig. 8(b) percebe-se que há uma instabilidade maior à variação abrupta de carga na abordagem por meio da atenuação ativa, mas em regime permanente sua distorção harmônica total se representa menor atingindo 0,78% enquanto que com amortecimento passivo é de 0,93%.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela participação no Programa de Voluntariado em Iniciação Científica e Tecnológica (Edital PROPPG 07/2020 — PVICT) do acadêmico Gabriel Alexandre de Souza Braga.

#### REFERÊNCIAS

- BLAABJERG, Frede; LISERRE, Marco; MA, Ke. **Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems**. Phoenix, AZ: IEEE Transactions on Industry Applications, 2012.
- CALZO, Giovanni Lo et al. **Single-phase three-level transformer-less inverter for residential distributed generation**. Florença, Itália: IEEE, 2012.
- CHATTOPADHYAY, Ritwik; DE, Ankan; BHATTACHARYA, Subhashish. **Comparison of PR Controller and Damped PR Controller for Grid Current Control of LCL Filter Based Grid-Tied Inverter under Frequency Variation and Grid Distortion**. Pittsburgh, PA, EUA: IEEE, 2014.
- LISERRE, Marco; BLAABJERG, Frede; HANSEN, Steffan. **Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier**. Chicago: IEEE, 2005.
- LISTON, Roner André et al. **Robust Design of Active Damping with Current Estimator for Single-Phase Grid-Tied Inverters**. Pato Branco, Paraná, BR: IEEE, 2018.
- PURVINS, Arturs; KLEBOW, Birthe. **Technical grid connection guides for distributed electricity generation systems: a new derlab database has come alive**. Alemanha: IET Renewable Power Generation, 2015.
- SAKAE, Shunsuke et al. **Energy management method for residential distributed generation system using photovoltaic cells and fuel cell vehicle**. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2014.