



Projeto e análise de um inversor monofásico empregado no contexto V2G e G2V.

Design and analysis of a single-phase inverter for use in the context of V2G and G2V.

Matheus de Farias Bonfim *, Cassius Rossi de Aguiar[†], Antonio Carlos de Lisboa[‡]

RESUMO

Dado o contexto dos veículos elétricos, o objetivo deste trabalho é o projeto de um inversor monofásico utilizado em sistemas bidirecionais de veículos elétricos que possuem a tecnologia Vehicle-To-Grid e Grid-To-Vehicle, com finalidade de realizar o carregamento da bateria ou injeção de energia para a rede. O inversor é acoplado a um filtro L e considerado a implementação do filtro notch, com finalidade de reduzir a THD de corrente injetada ou fornecida pela rede. Neste sentido, é apresentado o esquemático do sistema a ser implementado, a topologia do inversor, a estratégia de controle, assim como a modelagem em espaço de estados e pequenos sinais, que são manipuladas para obter as funções de transferências e que posteriormente são utilizadas nos projetos dos controladores. Os softwares PSIM® e MATLAB® auxiliaram nas validações, nas obtenções das funções matemáticas e projetos dos controladores. Com o desenvolvimento do sistema proposto, é realizado por fim validações e simulações que averigua a eficácia do inversor operando sob os cenários impostos.

Palavras-chave: Inversor Monofásico. Estação elétrica bidirecional. V2G. G2V.

ABSTRACT

Given the context of electric vehicles, the objective of this work is the design of a single-phase inverter used in bidirectional systems of electric vehicles that have Vehicle-To-Grid and Grid-To-Vehicle technology, in order to charge the battery or injection of energy into the grid. The inverter is coupled to an L filter and considered the implementation of the notch filter, in order to reduce the THD of current injected or supplied by the grid. In this sense, the schematic of the system to be implemented is presented, the inverter topology, the control strategy, as well as the state space modeling and small signals, which are manipulated to obtain the transfer functions and which are later used in the controllers' projects. The PSIM® and MATLAB® software helped in the validations, obtaining mathematical functions and controller projects. With the development of the proposed system, validations and simulations are carried out, which verify the efficiency of the inverter operating under the imposed scenarios.

Keywords: Single-phase inverter. Bidirectional power station. V2G. G2V.

1 INTRODUÇÃO

A conceituação de cidades inteligentes traz atualmente um cenário global de soluções tecnológicas com intuito fornecer serviços essenciais aos centros urbanos, tendo como um dos componentes chaves o desenvolvimento sustentável, fazendo uso por exemplo de fontes energéticas renováveis. No contexto desses serviços essenciais,

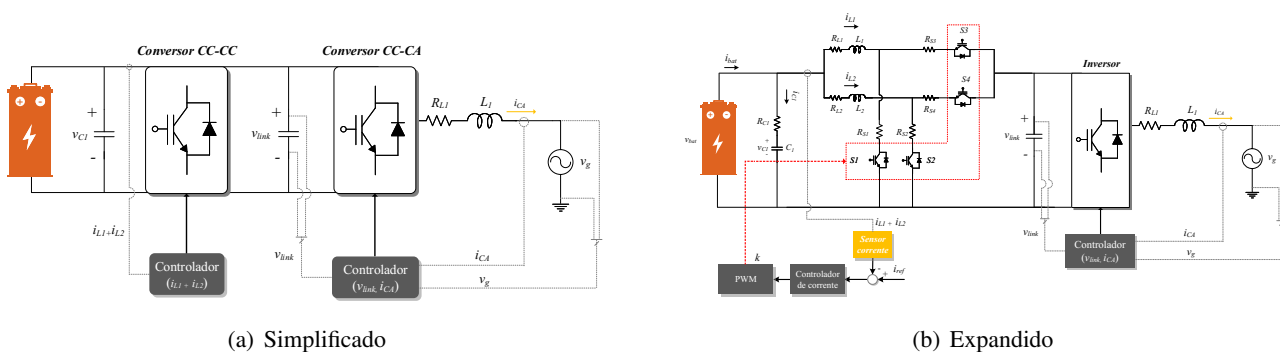
* Engenharia da Computação; matheusbonfim@alunos.utfpr.edu.br; <https://orcid.org/0000-0003-2416-1784>.

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

‡ Engenharia da Computação; antoniolisboa@alunos.utfpr.edu.br; <https://orcid.org/0000-0002-5578-9593>.

destaca-se a inserção dos veículos elétricos, nos quais colaboram como uma solução sustentável para mobilidade (LEAL et al., 2021). Nessa conjuntura, ressalta-se os sistemas de gerenciamento de carga com propósito de manter a qualidade e consumo energético dos veículos elétricos, como a *Vehicle-to-Grid* (V2G) e *Grid-to-Vehicle* (G2V) que tem por finalidade a criação de um sistema de carga e descarga de veículos elétricos, e tais são constituídos de conversores e inversores eletrônicos nos quais baseiam-se em um sistema bidirecional. Estratégias para V2G e G2V são propostas em trabalhos, como por exemplo em Pinto et al. (2013) e Phimphui e Supatti (2019). Neste contexto, a questão de pesquisa explicitada no presente trabalho está associado de como processar e gerenciar a energia para carga e descarga em sistemas V2G e G2V? . Isto posto, esse artigo tem como objetivo propor a modelagem e controle de um inversor monofásico em ponte completa, aplicado à sistemas V2G e G2V. O diagrama de blocos simplificado do sistema é determinado na Fig. 1(a), na qual o inversor com filtro L (conversor CC-CA) na saída é evidenciado, sendo o foco deste estudo.

Figura 1 – Esquemáticos do sistema - V2G e G2V



Fonte: Autoria própria (2021).

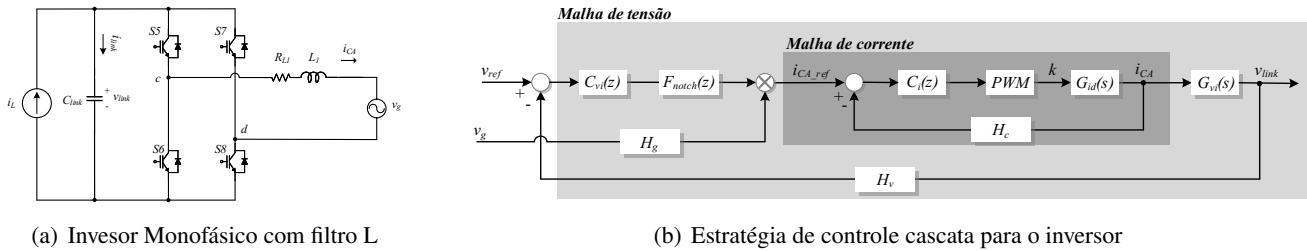
O esquemático apresentado funciona de forma bidirecional, ou seja, ora a bateria fornece energia para rede elétrica (v_g), ora a rede elétrica transmite energia para a bateria do veículo elétrico. Dessa forma, o sistema de controle do inversor é responsável pela regulação de tensão do v_{link} e controle da corrente i_{CA} injetada ou fornecida pela rede. É importante salientar que o inversor deve apresentar um alto rendimento de funcionamento, isto é, garantindo elevado fator de potência e corrente senoidal na rede elétrica com baixo conteúdo harmônico.

É destacado que o conversor CC-CC utilizado no esquemático do sistema, remete-se a um conversor Buck Boost Interleaved, conforme visto no sistema detalhado na Fig. 1(b). Todo projeto e análise deste conversor CC-CC foi apresentado em seminários anteriores (SICITE), conforme é possível ver em Lisboa et al. (2020), e sua realização é dada em conjunto com o projeto de pesquisa contribuindo para conexão da rede elétrica com a bateria do veículo elétrico. Isto posto, nas próximas seções será dado o devido foco para o desenvolvimento do inversor monofásico empregado no sistema V2G e G2V.

2 MÉTODOS

O inversor monofásico é apresentado na Figura 2(a), composto por uma estrutura em ponte completa e sendo alimentado pela saída do conversor CC-CC, evidenciado pela corrente constante i_L . Na saída do inversor está presente um filtro L passa-baixa de primeira ordem em série com a rede elétrica, com intuito de atenuar as componentes de alta frequência que são geradas devido a comutação do inversor, além de ser uma das partes responsáveis pela qualidade da corrente injetada ou fornecida pela rede (ANDRES, 2018).

Figura 2 – Topologia e Estrutura de controle - Inversor



(a) Inversor Monofásico com filtro L

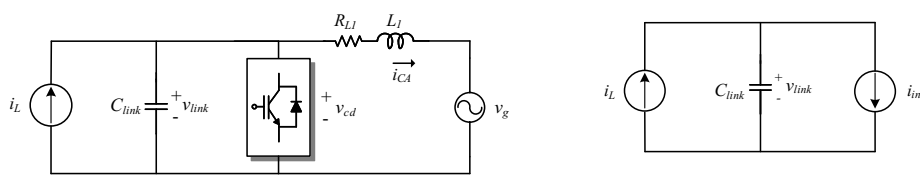
(b) Estratégia de controle cascata para o inversor

Fonte: Autoria própria (2021).

Com o objetivo de realizar o controle do inversor monofásico, a estrutura de controle ilustrada na Figura 2(b) é utilizada. É possível notar que a estrutura de controle é dada por um sistema em cascata, composto por uma malha externa responsável por controlar a tensão (v_{link}) e uma malha interna para o controle da corrente injetada ou fornecida pela rede (i_{CA}), ou seja, produzindo uma corrente que esteja em fase com a tensão da rede elétrica, caso esteja injetando corrente, ou defasada 180°, caso a rede elétrica esteja fornecendo energia. O processo de funcionamento do inversor monofásico apresenta o efeito de pulsação de potência, na qual é gerado uma componente harmônica no dobro da frequência da rede no capacitor C_{link} . Com o objetivo de melhorar a qualidade do sistema e evitar que harmônicos se propaguem para corrente de saída do inversor, é utilizado na malha externa de tensão um filtro notch (F_{notch}) na frequência de 120 Hz. Antes de adentrar para o controle do sistema exposto, é necessário para o projeto do inversor ter seu modelo matemático, tanto da malha de corrente como da malha de tensão, e para tal utiliza-se a modelagem em espaço de estados e pequenos sinais. Os circuitos equivalentes para as modelagens são vistos na Fig. 3.

Primeiramente, a implementação da malha interna de corrente tem por objetivo controlar a forma de onda da corrente i_{CA} , assim tomando como base o desenvolvimento de Andres (2018), o circuito ilustrado na Fig. 5(a) é utilizado para o processo de modelagem com o objetivo de obter a função de transferência $G_{id}(s)$. Vale salientar que a tensão de saída do inversor v_{cd} pode assumir os estados v_{link} e $-v_{link}$.

Figura 3 – Circuitos equivalente para modelagem



(a) Malha interna de corrente

(b) Malha externa de tensão

Fonte: Autoria própria (2021).

Inicialmente, na Eq.1 é apresentada a tensão sobre o indutor L_1 , denominada v_{L1} . A partir do trecho supracitado, sabe-se que a tensão aplicada ao filtro L assume somente dois valores, assim v_{cd} é definida na Eq.1.

$$\begin{cases} v_{L1} = v_{cd} - v_{RL1} - v_g \\ v_{cd} = v_c - v_d = v_{link} \cdot k_c(t) - v_{link} \cdot k_d(t) \end{cases} \quad (1)$$

Na equação acima k_c representa a razão cíclica do ramo "c", na qual se encontra a chave S6, enquanto que k_d representa a razão cíclica do ramo "d", na qual se encontra a chave S8. Posteriormente, é possível afirmar que $k_c(t) = k(t)$ e que $k_d(t) = 1 - k(t)$, devido ao funcionamento da modulação unipolar utilizada. A partir dessas

considerações, é possível substituir tais valores nas equações em Eq. 1, obtendo:

$$L_1 \cdot \frac{di_{ca}}{dt} = v_{link} \cdot (2 \cdot k(t) - 1) - R_{L1} \cdot i_{ca}(t) - v_g \quad (2)$$

Os sistemas aqui estudados, se comportam de maneira não linear, dessa forma é necessário perturbar e linearizar o sistema. Isto posto, é aplicada uma perturbação na razão cíclica na Eq.2 e desprezados os termos de segunda ordem e os termos CC, assim como aplicado a Transformada de Laplace, obtendo a Eq.3.

$$G_{id}(s) = \frac{\widehat{i_{ca}}(s)}{\widehat{k}(s)} = \frac{2 \cdot v_{link}}{s \cdot L_1 + R_{L1}} \quad (3)$$

Posteriormente a malha interna de corrente, é dado o foco para implementação da malha externa que tem por objetivo controlar a tensão do barramento v_{link} . Desta forma, para modelagem do sistema o circuito ilustrado da Fig. 3(b) é utilizado, com o objetivo de obter a função de transferência $G_{vi}(s)$. O modelo é composto por um capacitor do barramento CC (C_{link}) e duas fontes de corrente equivalentes, caracterizando a saída do conversor CC-CC (i_L) e a entrada do inversor (i_{inv}). Leva-se em consideração que, a corrente do conversor CC-CC e da rede estão devidamente controladas e por isso, sendo substituídas por fontes de correntes constante. O valor médio da corrente e potência de entrada e saída do inversor devem manter-se em equilíbrio, com intuito da tensão média no capacitor ser constante (ANDRES, 2018). Portanto, para o balanço de potência é obtido a Eq.4.

$$\underbrace{\overline{v_{link}} \cdot \overline{i_{inv}}}_{\overline{P}} = \underbrace{v_{g,rms} \cdot i_{ca,rms}}_{P_{rms}} \rightarrow \overline{i_{inv}} = \frac{v_{g,rms} \cdot i_{ca,pico}}{\overline{v_{link}} \cdot \sqrt{2}} \quad (4)$$

Com base no circuito da Fig. 3(b) e na Eq. 4, é realizada a Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC). Posteriormente, de forma análoga ao procedimento desenvolvido na modelagem em pequenos sinais da malha de corrente, é aplicada perturbações no sistema e em seguida linearizado, obtendo a função de transferência da malha externa de tensão.

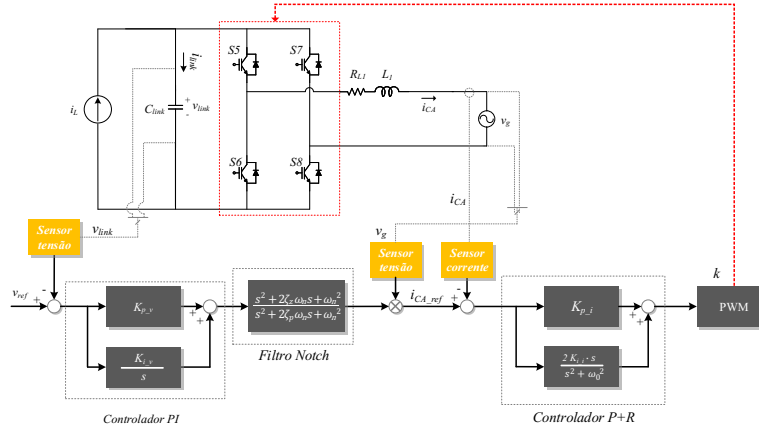
$$i_L - C_{link} \cdot \frac{dv_{link}}{dt} = \frac{v_{g,rms} \cdot i_{ca,pico}}{\overline{v_{link}} \cdot \sqrt{2}} \rightarrow G_{vi}(s) = \frac{\widehat{v_{link}}(s)}{\widehat{i_{ca,pico}}(s)} = \frac{-v_{g,rms}}{s \cdot C_{link} \cdot \overline{V_{link}} \cdot \sqrt{2}} \quad (5)$$

Tendo em posse as equações de transferência do sistema, se torna possível o projeto dos controladores do inversor e do filtro notch como supracitado, estes estruturados na Fig. 2(b). Primeiramente, o projeto do controlador da malha interna de corrente ($C_i(s)$) será realizado utilizando um compensador proporcional ressonante (PR), com alto ganho na frequência de 60 Hz, com objetivo de rastrear a referência senoidal da rede elétrica. Após a definição do compensador da malha interna de corrente, o projeto do controlador da malha externa de tensão ($C_{vi}(s)$) será realizado utilizando um compensador proporcional integral (Controlador PI), com objetivo de rastrear a tensão de referência com alto ganho CC e com erro nulo em regime permanente.

Isto posto, a Fig. 4 ilustra o esquemático geral do sistema a ser implementado com controladores e filtros. Para o projeto desse sistema, o software MATLAB® foi utilizado com o propósito de se obter as constantes K_p e K_i de cada controlador. A fim de se obter um desempenho satisfatório, foram utilizados 18K Hz para frequência de chaveamento, margem de fase igual a 60° e frequências de corte de 18 Hz e 1K Hz para malha de tensão e corrente, respectivamente. No PSIM foram utilizadas o protótipo da Figura 2(b) e o DSP, um mecanismo que simula um microcontrolador baseado na linguagem C. Sendo assim as equações dos controladores e do filtro notch devem ser discretizadas para que possam ser implementadas de forma digital, no qual utilizou-se o método de Tustin (GAZOLI; FILHO, 2011). O sinal que sai dos controladores passa primeiramente por um processo de

modulação por largura de pulso senoidal (SPWM) - Unipolar, que produz um sinal lógico de saída para que seja possível produzir o chaveamento na planta. Isto posto, é possível realizar a simulação do inversor de energia.

Figura 4 – Controle em cascata - Inversor

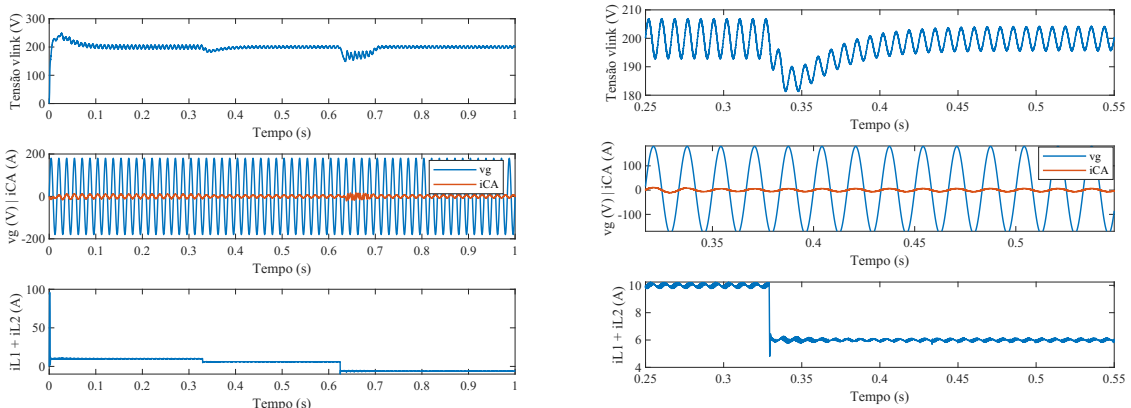


Fonte: Autoria própria (2021).

3 RESULTADOS

Com o propósito de validar e demonstrar o funcionamento do inversor monofásico, o software PSIM é empregado. Assim, a partir dos esquemáticos presentes nas Figuras (2 e 4), é feito a validação dos controladores com a simulação, no qual para isso foram feitas três modificações na referência do controlador de corrente do conversor Buck Boost interleaved (i_{ref}).

Figura 5 – Resultados de simulação - Inversor em conjunto com conversor Buck Boost interleaved



(a) Inversor em conjunto com conversor Buck Boost

(b) Mudança da corrente ($i_{L1} + i_{L2}$) de 10 A para 6A

Fonte: Autoria própria (2021).

Em suma, o cenário proposto tem por objetivo o controle da tensão de barramento v_{link} em 200V e da forma de onda da corrente (i_{ca}) injetada ou fornecida pela rede, garantido elevado fator de potência e baixa distorção harmônica. Dado o contexto apresentado, os resultados de simulação do controle do inversor são ilustrados na Fig. 5. Primeiramente, é determinado uma corrente de referência para o controlador do conversor CC-CC (i_{ref}) com valor de 10 A, no qual pode ser observado com a dinâmica de funcionamento de ($i_{L1} + i_{L2}$). Após isso, é feito um degrau na corrente de referência de 10A para 6A, no período de 0.3 s a 0.45 s, e assim analisado a



resposta do sistema frente a esta variação da corrente, como visto na Fig. 5b. Por fim, é feito um degrau na corrente de referência do controlador de 6A para -6A, no período de 0.6 s a 0.75 s, evidenciando a dinâmica do sistema em um contexto de bidirecionalidade, ou seja, fluxo oposto de corrente. Basicamente, é possível analisar que as alterações da corrente ($i_{L1} + i_{L2}$) resultam na tensão v_{link} controlada em 200V e a corrente i_{CA} mantendo-se em fase com a tensão da rede elétrica, ou defasada em 180° caso a rede elétrica esteja fornecendo energia, alterando somente a amplitude da onda, para manter o sistema em equilíbrio. Isto posto, conclui-se que o sistema de controle funciona de forma satisfatória, tendo a corrente um fator de potência aproximadamente de 0.993 e baixa distorção harmônica.

4 CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho centra-se no projeto e análise do inversor monofásico com filtro notch para aplicação na tecnologia V2G e G2V, presente em veículos elétricos. Para tal, foi realizada toda a estruturação do sistema demonstrando a inserção do conversor e inversor, topologia do inversor, modelo matemático, estratégia de controle, implementação do controle digital e o uso de simulação na validação do sistema, evidenciando a eficácia e o funcionamento do projeto proposto. Com as comprovações da qualidade e estabilidade do inversor, o mesmo se torna adequado para implementação em mecanismos V2G e G2V. Em um contexto associado as próximas atividades, será dado foco a implementação do mesmo via construção da placa de circuito impresso.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos são direcionados ao Programa Institucional de Voluntariado em Iniciação Científica (PIVIC 2020/2021) e ao Programa Institucional de Iniciação Científica da UTFPR referente a bolsa concedida para o aluno Antonio Carlos de Lisboa.

REFERÊNCIAS

- ANDRES, Bernardo. PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONVERSOR MÓDULO INTEGRADO PARA CONEXÃO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA À REDE ELÉTRICA. In:
GAZOLI, J. R.; FILHO, E. Microinversor monofásico para sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica. In:
LEAL, Wagner C. et al. Cascaded Interleaved DC-DC Converter Designed for Grid-to-Vehicle and Vehicle-to-Grid Technologies. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 32, n. 3, p. 786-795, jun. 2021. ISSN 2195-3899. DOI: [10.1007/s40313-021-00693-1](https://doi.org/10.1007/s40313-021-00693-1). Disponível em: [🔗](#).
LISBOA, Antonio et al. Conversor Buck Boost interleaved para carga e descarga de veículos elétricos. In:
PHIMPHUI, Attaphol; SUPATTI, Uthane. V2G and G2V using interleaved converter for a single-phase onboard bidirectional charger. In: ITEC Asia-Pacific 2019. [S.l.: s.n.], 2019. P. 1-5. DOI: [10.1109/ITEC-AP.2019.8903662](https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2019.8903662).
PINTO, J. G. et al. Bidirectional battery charger with Grid-to-Vehicle, Vehicle-to-Grid and Vehicle-to-Home technologies. In: IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). [S.l.: s.n.], 2013. P. 5934-5939. ISBN 9781479902248. DOI: [10.1109/IECON.2013.6700108](https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6700108).