



## **TÍTULO: Modelagem e Controle da Passividade de Conversores em Paralelo Aplicados em Microrredes**

Prof. Orientador: Dalmo Cardoso da Silva Júnior

Linha de pesquisa: Eletrônica de Potência e Sistemas de Energia Elétrica

### **RESUMO**

A mudança na geração de energia elétrica vem se destacando a partir da geração distribuída e com o conceito de microrredes. Elas se integram ao sistema elétrico convencional de maneira compatível, exigindo menos adaptações. Podem operar em modos conectados ou ilhados da rede elétrica principal, sendo crucial um controle preciso durante o modo ilhado, onde inversores substituem máquinas síncronas para equilibrar a demanda. Os formadores de rede, compostos por conversores, desempenham papel crucial ao impor referências de tensão e frequência. A estabilidade e a impedância desses conversores são essenciais para a estabilidade do sistema, exigindo comportamento resistivo para garantir a estabilidade, especialmente durante variações na carga ou na rede.

**Palavras-chave: Conversor formador de rede, microrrede, passividade de conversores, eletrônica de potência.**

### **1 INTRODUÇÃO**

A geração de energia elétrica vem passando por uma grande mudança na forma como ela é produzida, por meio do incentivo à Geração Distribuída (GD) com forte inserção das fontes alternativas de energia. Com essa massiva inserção da GD no sistema elétrico de baixa e média tensões, surgiu o conceito de microrrede. A

principal vantagem da microrrede é a compatibilidade com o Sistema Elétrico de Potência (SEP) tradicional, o que não exige grandes adaptações por parte dos consumidores e do sistema de distribuição de energia elétrica.

No gerenciamento ativo de potências em microrredes existem algumas topologias no princípio de controle que são hierárquicas e variam conforme o modo de operação da microrrede se conectada ou ilhada da rede elétrica principal. O modo de operação da microrrede conectada à rede principal requer uma estratégia de controle simples para o conversor de interface controlar a potência ativa e reativa injetada na rede da concessionária. Nesse modo de operação, a magnitude e a frequência da saída de tensão do conversor são impostas pela rede principal.

Já o controle de uma microrrede durante o modo ilhado é particularmente crítico. Como não há máquina síncrona na maioria das microrredes, para atingir o equilíbrio de demanda e fornecimento os inversores devem ser responsáveis pelo equilíbrio. O uso de um Conversor Fonte de Tensão, do inglês – Voltage Source Converter (VSC) para fornecer uma referência de tensão e frequência permite que as microrredes operem no modo ilhado.

Sendo assim, em uma microrrede ilhada, o conversor formador de rede atua com controle em malha fechada, impondo em sua saída uma tensão e frequência de referência. A partir da operação nesse modo, o conversor possui uma pequena impedância de saída, diferentemente do supridor de rede. O princípio de operação do formador de rede é oriundo de uma Fonte de Potência Ininterrupta, do inglês Uninterruptible Power Supply (UPS) que pode suprir uma dada carga elétrica independente da presença da rede elétrica, por possuir um sistema de armazenamento de energia. Em uma microrrede, quando a rede elétrica principal estiver ausente, um ou múltiplos formadores de rede (dependendo da arquitetura de controle) podem impor uma referência para que todos os suprimentos de rede e as cargas elétricas operem de forma normal.

Os formadores de rede, em geral, são formados por um VSC que pode ser monofásico ou trifásico, com filtro passivo do tipo LC, garantindo uma tensão senoidal em sua saída. Um formador de rede também pode operar em uma microrrede com a rede elétrica principal presente, fazendo o papel de suporte à rede. Nesse caso, o conversor pode contribuir com a regulação de tensão no PAC da microrrede, operando como uma fonte de corrente, com a obrigatoriedade do sistema de armazenamento de energia, já que pode ser necessário absorver potência ativa da rede. Com a rede

elétrica presente o formador de rede fica sincronizado com ela, aguardando o momento da sua entrada em operação no modo ilhado.

Os inversores interagem com a impedância da rede, cargas e com eles mesmos enquanto estão conectados em paralelo. Portanto, não apenas a estabilidade da função de transferência em malha fechada é importante, mas também a impedância de saída do conversor, uma vez que distingue o comportamento do conversor em relação a outros componentes do sistema. Um conversor formador de rede pode ser modelado como equivalente de Thevenin do sistema. Segundo Akhana, Vasquez e Guerrero (2022), um conversor com impedância de saída puramente capacitiva, por exemplo, pode tornar o sistema instável enquanto estiver conectado a uma carga ou a uma impedância da rede puramente indutiva. Portanto, o sistema de controle do conversor, além de garantir o rastreamento da referência de tensão, deve ser projetado para ter sua impedância de saída com comportamento resistivo em todas ou pelo menos em uma ampla faixa de frequências. Desta forma, a impedância de saída do conversor tem um comportamento passivo e, portanto, ele pode funcionar de forma estável independentemente do comportamento dos outros componentes do sistema. Esta é uma definição simples da passividade de conversores, a qual sugere que a fase da impedância de saída do conversor deve estar entre  $[-90^\circ, 90^\circ]$ . Nesta condição, o conversor tem sempre um valor real positivo que é sinônimo de resistência positiva. Caso contrário, a resistência negativa da impedância de saída pode tornar o sistema instável, dependendo das condições da carga e/ou da rede.

Finalmente, este artigo tem como objetivo mostrar, por simulação, o funcionamento e comportamento do conversor formador de rede em atuação dinâmica (mudanças não lineares de carga) no PAC. Este artigo está organizado da seguinte forma: A seção 2 descreve o referencial teórico. A seção 3 apresenta os esquemas de modelagem e controle. Na seção 4, os resultados e discussões da simulação podem ser observados. Finalmente, a seção 5 aborda as conclusões deste trabalho.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 CONVERSORES FONTE DE TENSÃO CC-CA**

Os conversores CC-CA, também conhecidos na literatura como inversores, têm como função principal converter a tensão de entrada CC em uma tensão de saída CA,

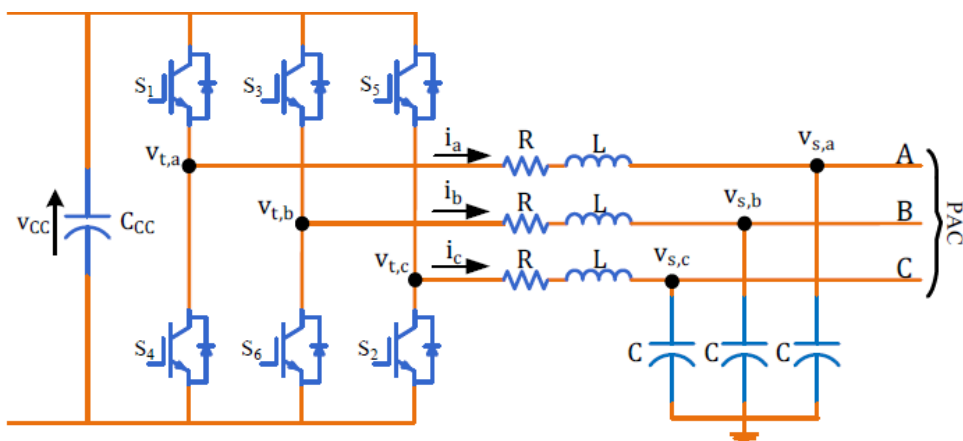
com amplitude e frequência desejada (RASHID, 2014). De acordo com AHMED (2000), os inversores são conversores estáticos de potência que convertem potência CC em potência CA, conforme comentado com a frequência e tensão, ou corrente de saída desejada. Por definição, os inversores podem ser monofásicos ou trifásicos, de três ou quatro braços. A maioria das aplicações de inversores requerem algum modo de controle, seja por tensão e/ou por corrente da saída CA. Para isso, vários métodos são usados e podem ser classificados em três categorias (AHMED, 2000):

- Controle da tensão de entrada CC, fornecida para o inversor;
- Controle da tensão de saída CA do inversor (objetivo do trabalho);
- Controle da corrente de saída do inversor.

O circuito do inversor trifásico converte a tensão de entrada que é CC para uma tensão de saída variável trifásica de frequência desejável. A tensão CC pode ser obtida de uma fonte CC (renovável em sua grande maioria) ou de uma tensão CA retificada, ou a partir de baterias como sistema de armazenamento de energia (AHMED, 2000). No presente trabalho, o inversor trifásico recebe tensão CC de fontes CC, modeladas como baterias.

Em aplicações de alta potência, como as redes de distribuição, normalmente, utilizam-se os inversores trifásicos. O presente trabalho utilizou um inversor trifásico estático controlado no modo de corrente, constituído de seis dispositivos chaveados, sendo dois desses para cada braço ou dois por cada fase, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Conversor CC-CA trifásico, três fios e dois níveis.



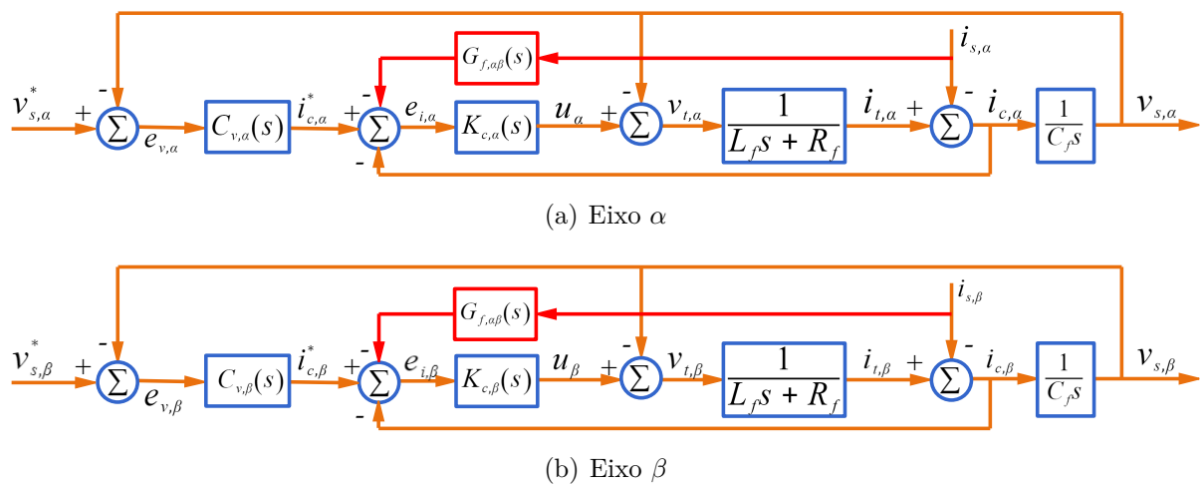
FONTE: O autor

A modulação por largura de pulso (do inglês, *Pulse Width Modulation*, PWM) é o método mais comum para controlar a tensão e ou a corrente de saída do conversor. Nela, a tensão de saída é uma onda modulada por largura de pulso, controlada pela variação da duração dos pulsos (AHMED, 2000). Dessa forma, nesse trabalho aplicou-se a estrutura de PWM unipolar para chaveamento dos semicondutores utilizados no VSC.

## 2.2 CONTROLADORES DE TENSÃO E DE CORRENTE DO VSC

Várias teorias e técnicas foram desenvolvidas para o controle de um conversor formador de rede. Os controladores dos formadores de rede podem ser projetados com uma, duas ou mais malhas de controle, envolvendo as tensões e correntes sintetizadas pelos conversores. Na estratégia com duas malhas, geralmente, é adotada uma malha interna de corrente e uma externa de tensão (KAMAL et al, 2014). Neste trabalho, foi utilizada a técnica de malha dupla de controle da tensão do conversor formador de rede, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3: Malhas: externa, de tensão e interna, de corrente do VSC.



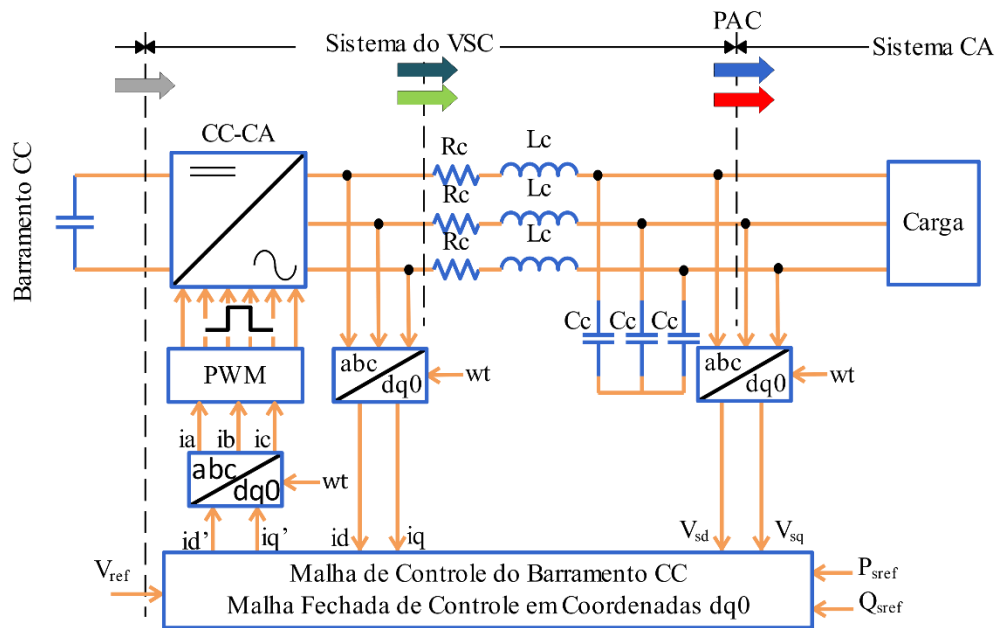
FONTE: O autor

Nessa figura, a primeira malha garante proteção contra sobrecorrente e proporciona robustez contra variações nos parâmetros do sistema, enquanto a segunda promove o valor de referência para o controlador de corrente além do controle da tensão.

### 3 METODOLOGIA

Na operação do conversor fonte de tensão, (do inglês, *Voltage-Sourced Converter*, VSC) existe a possibilidade de controle da potência ativa e reativa que fluem pelo VSC. Uma das estratégias mais utilizada é conhecida como controle no modo de tensão (do inglês, *Voltage-Mode Control*, VMC). Neste modo, as potências injetadas na rede elétrica são controladas pela amplitude e fase das tensões monofásicas sintetizadas em relação ao ponto comum, normalmente, as tensões do capacitor do filtro LC. Este modo de controle será estudado nesta seção, onde a modelagem foi baseada em Yazdani e Iravani (2010).

Figura 4: Visão geral do controlador de corrente associado à rede elétrica



FONTE: O autor

De acordo com a Figura 4, observa-se que a dinâmica do lado CA é determinada conforme as equações abaixo:

$$L_f \frac{di_a}{dt} = -R_f i_a + V_{ta} - V_{sa} \quad (4)$$

$$L_f \frac{di_b}{dt} = -R_f i_b + V_{tb} - V_{sb} \quad (5)$$

$$L_f \frac{di_c}{dt} = -R_f i_c + V_{tc} - V_{sc} \quad (6)$$

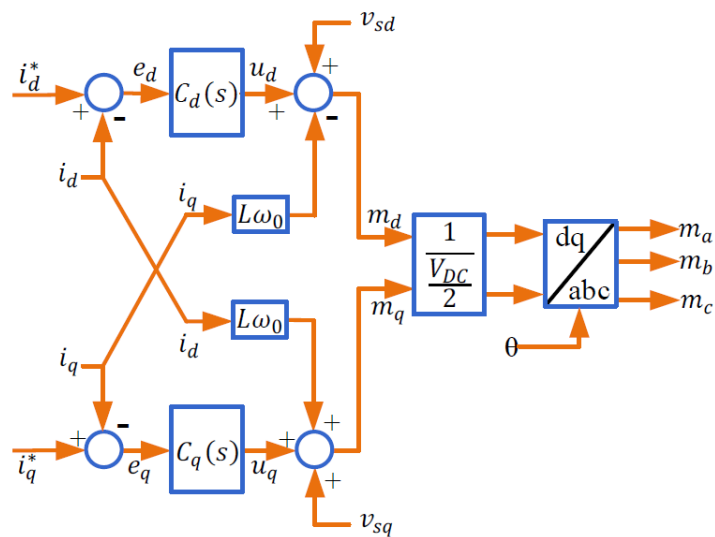
Aplicando a transformada de Park em (4), (5) e (6) e assumindo condições de estado permanente, tem-se em (7) e (8) a dinâmica do lado CA no sistema de coordenadas  $dq$ .

$$L_f \frac{di_d}{dt} = L_f \omega_0 i_q - R_f i_d + V_{td} - V_{sd} \quad (7)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = L_f \omega_0 i_d - R_f i_q + V_{tq} - V_{sq} \quad (8)$$

A Figura 5 ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle da corrente no sistema de coordenadas síncrono. Pode-se observar que o acoplamento entre  $i_{sd}$  e  $i_{sq}$  é eliminado pela compensação *feed-forward* de desacoplamento.

Figura 5: Diagrama de blocos do sistema de controle de corrente



FONTE: O autor

Após aplicar o desacoplamento das dinâmicas dos eixos  $d$  e  $q$ , pode-se considerar o sistema expresso por:

$$L_f \frac{di_d}{dt} = -R_f i_d + V_{td} - V_{sd} \quad (9)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = -R_f i_q + V_{tq} - V_{sq} \quad (10)$$

Conforme (9) e (10), observa-se que há uma relação entre as tensões de saída do inversor e da rede elétrica. A primeira, ( $V_t$ ) é modelada como a entrada de controle,

já a segunda, ( $V_s$ ), como um distúrbio. A fim de simplificar o equacionamento, essa relação pode ser modelada como uma única ação de controle,  $u_d$  para (11) e  $u_q$  para (12), resultando em:

$$L_f \frac{di_d}{dt} = -R_f i_d + u_d \quad (11)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = -R_f i_q + u_q \quad (12)$$

Aplicando-se a transformada inversa de Laplace em (11) e (12), tem-se

$$L_f i_d s = -R_f i_d + u_d \quad (13)$$

$$L_f i_q s = -R_f i_q + u_q \quad (14)$$

Nesse caso, a função de transferência do sistema pode ser expressa por:

$$\frac{i_d}{u_d} = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (15)$$

$$\frac{i_q}{u_q} = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (16)$$

Para esse sistema, tem-se a malha simplificada de controle no sistema de coordenadas síncrono  $dq$ . Pode-se perceber que o comportamento das componentes  $dq$  é idêntico, possibilitando, portanto, o projeto do controlador em apenas um eixo, mas os mesmos ganhos serão aplicados em ambas as malhas de controle.

Sabe-se também que quando se utiliza a transformada de Park, suas componentes passam a possuir um comportamento estacionário no tempo, vez que esse sistema é de coordenadas girantes. Com isso, as correntes  $i_d$  e  $i_q$  nas respectivas malhas de controle devem seguir referências constantes, o que permite o uso de um controlador PI, de acordo com o princípio do modelo interno.

A função de transferência característica do controlador PI pode ser escrita como:



$$C(s) = \frac{K_{p,i}s + K_{i,i}}{s} \quad (17)$$

em que  $K_{p,i}$  e  $K_{i,i}$  são os ganhos proporcional e integral do controlador PI da malha de controle da corrente.

Sendo assim, considerando apenas a dinâmica em componente  $d$ , a multiplicação de (15) por (17) fornece a função de transferência em malha aberta do controle de corrente, conforme a seguir:

$$M_{a,i}(s) = \left( \frac{K_{p,i}}{L_f s} \right) \frac{s + \frac{K_{i,i}}{K_{p,i}}}{s + \frac{R_f}{L_f}} \quad (18)$$

É possível observar em (18) que o sistema possui um polo em  $s = -R_f/L_f$ . Pela técnica de cancelamento de polos e zeros, o zero do controlador PI, ou seja,  $s = -K_{i,i}/K_{p,i}$  deve estar situado em cima do polo da função de transferência. Assim, estabelece-se a relação:

$$\frac{K_{i,i}}{K_{p,i}} = \frac{R_f}{L_f} \quad (19)$$

Com isso, é fácil perceber que a função de transferência em malha aberta da planta de controle se transforma em:

$$M_{a,i}(s) = \frac{K_{p,i}}{L_f s} \quad (20)$$

E a função de transferência em malha fechada é dada por:

$$M_{f,i}(s) = \frac{1}{\frac{L_f}{K_{p,i}}s + 1} \quad (21)$$

Como observado em (21), a função de transferência é de primeira ordem. Sabe-se que função de transferência de um sistema de primeira ordem é apresentada conforme a seguir:

$$M_f(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (22)$$

em que  $\tau_i$  é a constante de tempo do sistema em (s).

Sendo assim, comparando (21) e (22), pode-se determinar o valor de  $K_{p,i}$ :

$$K_{p,i} = \frac{L_f}{\tau_i} \quad (23)$$

E substituindo (23) em (19), é possível determinar o valor de  $K_{i,i}$ :

$$K_{i,i} = \frac{R_f}{\tau_i} \quad (24)$$

Yazdani e Iravani (2010) sugerem que a constante de tempo deve ser  $0,5 \text{ ms} \leq \tau_i \leq 5 \text{ ms}$  para sistemas cuja frequência fundamental é  $f = 60 \text{ Hz}$ . Assumindo, então, uma constante de tempo  $\tau_i = 1 \text{ ms}$  e, conforme já mencionado,  $R_f = 0,5 \Omega$  e  $L_f = 1 \text{ mH}$ , tem-se os seguintes parâmetros do controlador de corrente:

Tabela 1: Parâmetros

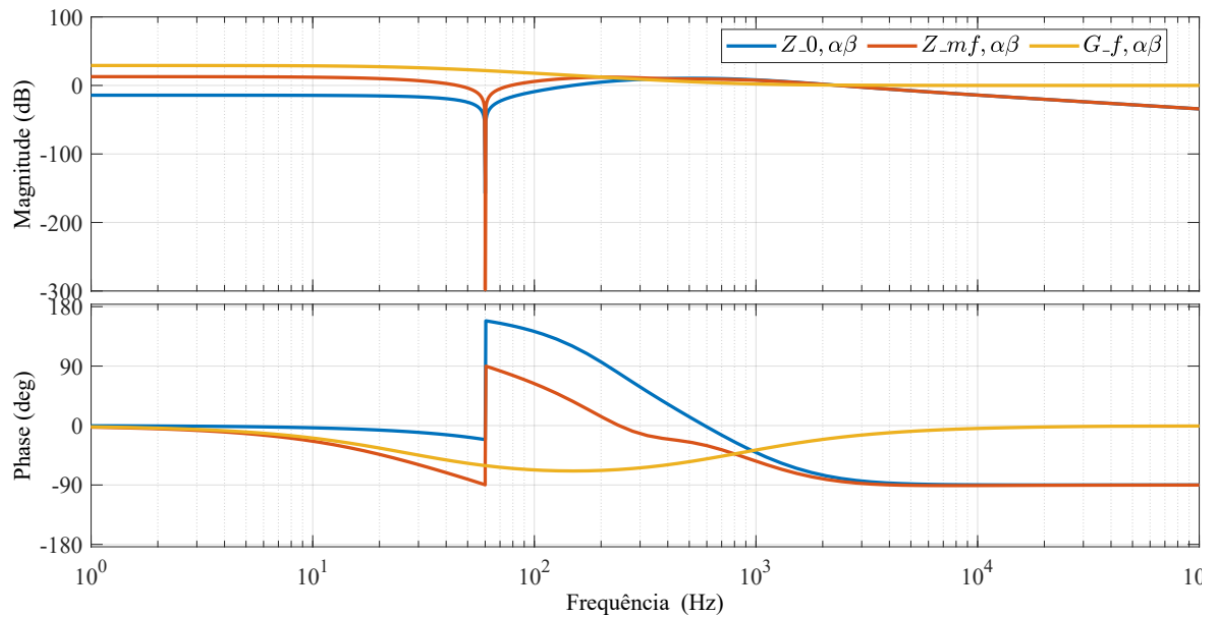
Parâmetro	Valor
$K_{p,i}$	1 H/s
$K_{i,i}$	50 $\Omega/s$

Fonte: O autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram obtidos a partir do Diagrama de Bode da Figura 6, onde é possível perceber que a passividade dos conversores é garantida para toda a faixa de frequência.

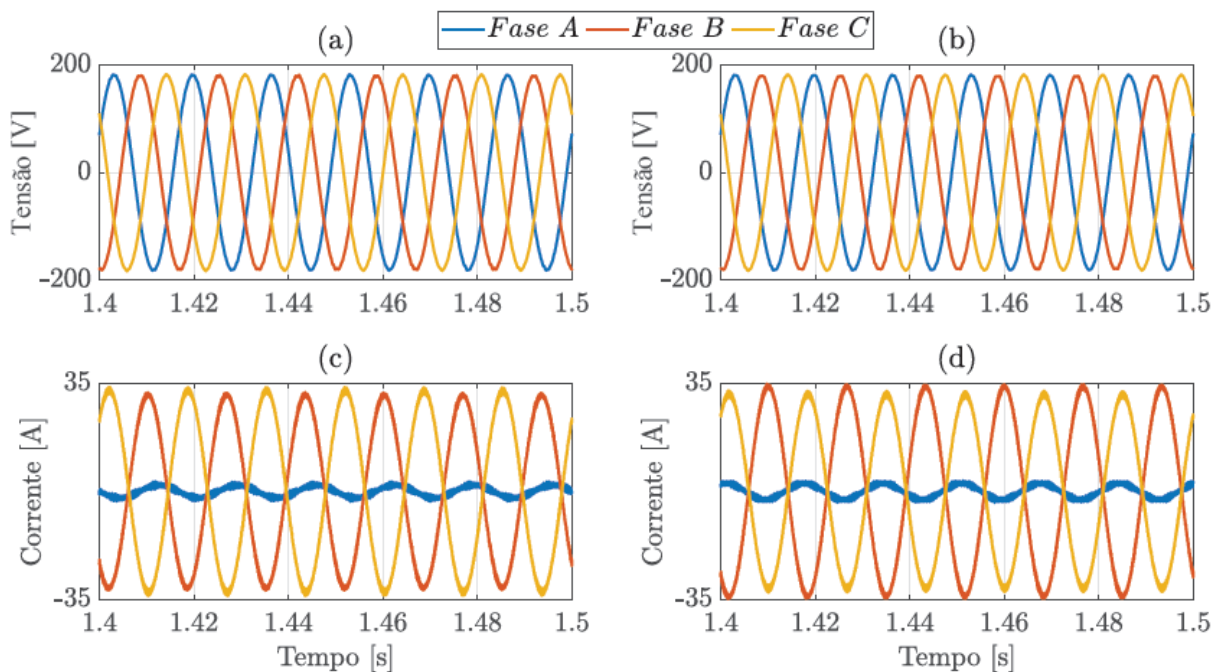
Figura 6: Diagrama de Bode da impedância de saída do conversor.



#### 4.1 ATUAÇÃO DO FORMADOR DE REDE PARA CARGA DO TIPO 1

Pode-se observar na Figura 7 a tensão sintetizada pelo conversor em (a) e (b), assim como as correntes drenadas pela carga em (c) e (d). Ambas as situações são semelhantes, evidenciando a “emulação da rede elétrica” para uma carga com alto grau de desequilíbrio.

Figura 7: Formas de onda: tensão e corrente no formador para a carga do Tipo 1.

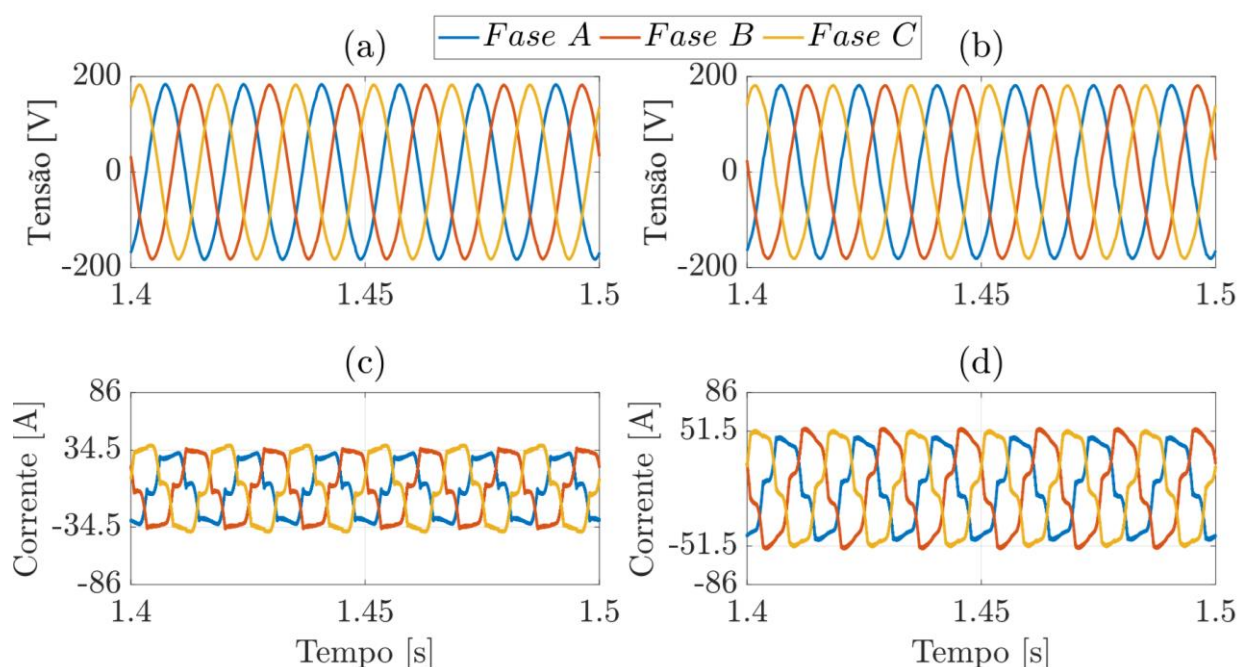


FONTE: O autor

## 4.2 ATUAÇÃO DO FORMADOR DE REDE PARA CARGA DO TIPO 2

Pode-se observar na Figura 8 a tensão sintetizada pelo conversor em (a) e (b), assim como as correntes drenadas pela carga em (c) e (d). Ambas as situações são semelhantes, evidenciando a “emulação da rede elétrica” para uma carga com alto grau de harmônicos.

Figura 8: Formas de onda: tensão e corrente no formador para a carga do Tipo 2.



FONTE: O autor

Portanto, como pode ser visto nas Figuras 7 e 8, mesmo com uma variação repentina e programada de carga, tanto o sistema de controle quanto a dinâmica do conversor formador de rede não foram afetados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo ressalta a transformação na geração de energia, enfocando a Geração Distribuída (GD) e as microrredes. As microrredes se mostram uma adição compatível ao sistema elétrico tradicional, minimizando as necessidades de adaptação. Elas operam em modos conectados ou ilhados, onde inversores assumem um papel crucial

para equilibrar a demanda na ausência de máquinas síncronas. Os conversores, componentes-chave dos formadores de rede, têm seu desempenho intrinsecamente ligado à estabilidade e à impedância, demandando comportamento resistivo para garantir a estabilidade em cenários variáveis de carga ou rede. Esses elementos são fundamentais para a evolução e confiabilidade do sistema de geração de energia elétrica.

### **ABSTRACT**

The shift in electrical power generation has been highlighted by distributed generation and the concept of microgrids. They integrate into the conventional electrical system in a compatible manner, requiring fewer adaptations. They can operate in connected or islanded modes of the main electrical grid, with precise control being crucial during the islanded mode, where inverters replace synchronous machines to balance the demand. Network formers, consisting of converters, play a crucial role in imposing voltage and frequency references. The stability and impedance of these converters are essential for system stability, requiring resistive behavior to ensure stability, particularly during load or grid variations.

**Key words: Grid-forming converter, microgrid, converter passivity, power electronics.**

### **REFERÊNCIAS**

CHAKRABORTY, S.; SIMÕES, M. G.; KRAMER, W. E. **Power electronics for renewable and distributed energy systems**. A Sourcebook of Topologies, Control and Integration, Springer, p. 235-265, 2013.

FOGLI, G. A. et al. **Integração de um grupo motor gerador diesel em uma rede secundária de distribuição através de um conversor estático fonte de tensão**. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2014.

FERREIRA, R. A. F. et al. **Controle de microrredes cc baseado em droop adaptativo de tensão - simulação em tempo real com control-hardware-in-loop**. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2015.

ALMEIDA, P. M. d. et al. **Contribuições ao estudo de conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica sem filtros passivos: projeto de controladores digitais para redução do conteúdo harmônico**. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2013.

MUSSE, B. F. et al. **Real time simulation of pv system integration to the distribution grid using dynamic load model.** In: IEEE. Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2017 IEEE 8th International Symposium on. 2017. p. 1-6.

RANAWEERA, I.; SANCHEZ, S.; MIDTGARD, O.-M. **Residential photovoltaic and battery energy system with grid support functionalities.** In: IEEE. 2015 IEEE 6<sup>th</sup> International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). 2015. p. 1-7.

ABU-RUB, H.; MALINOWSKI, M.; AL-HADDAD, K. **Power electronics for renewable energy systems, transportation, and industrial applications.**: John Wiley & Sons, 2014.

SHUVRA, M. A.; CHOWDHURY, B. H. **Autonomous control of smart inverters in grid connected and islanded mode.** In: IEEE. Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2017 IEEE. 2017. p. 1-5.

MALEKPOUR, A. R.; PAHWA, A. **A dynamic operational scheme for residential pv smart inverters.** IEEE Transactions on Smart Grid, IEEE, 2017.

BELL, F. et al. **Secondary voltage and reactive power support via smart inverters on a high penetration distributed photovoltaic circuit.** In: IEEE. Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2016 IEEE Power & Energy Society. 2016. p. 1-6.

Frederico T Ghetti, Pedro G Barbosa, Henrique AC Braga, and André A Ferreira. **Estudo comparativo de tecnicas de controle de corrente aplicadas a filtros ativos shunt.** In XVIII Congresso Brasileiro de Automática, pages 12–16, 2010.

Pablo C de S Furtado, Gabriel A Fogli, Pedro M de Almeida, Pedro G Barbosa, and Janaína G de Oliveira. **Topology and control of a two-phase residential pv system with load compensation capability.** In 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pages 1127–1132. IEEE, 2015.

Hirofumi Akagi, Edson Hirokazu Watanabe, and Mauricio Aredes. **Instantaneous power theory and applications to power conditioning.** John Wiley & Sons, 2017.

Amirnaser Yazdani and Reza Iravani. **Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications.** John Wiley & Sons, 2010.