

# CONVERSOR MONOFASICO MULTIPORTAS APLICADO A MICROGERAÇÃO RESIDENCIAL

SAMANTA G. BARBOSA<sup>1</sup>, BRUNO R. DE ALMEIDA<sup>1,2</sup>, JULIANO DE O. PACHECO<sup>1,3</sup>, DEMERCIL DE S. OLIVEIRA JR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará (UFC), Departamento de Engenharia Elétrica, Fortaleza – Ceará, Brasil  
Caixa Postal 6001, CEP 60455-760, Tel.: +55 (85) 3366-9586 – Fortaleza – CE

<sup>2</sup>Universidade de Fortaleza (Unifor), Departamento de Engenharia Elétrica, Fortaleza – Ceará, Brasil  
Av. Washington Soares, 1321 Room J01, CEP 60811-905, Tel.: +55 (85) 3477-3047

<sup>3</sup>Centro Universitário UniFanor, Departamento de Engenharia Elétrica, Fortaleza – Ceará, Brasil  
Av. Santos Dumont, 7800 - Dunas Fortaleza - CE, CEP 60191-19, Tel.: +55 (85) 4020-4900

E-mails: samantagadelha@dee.ufc.br, almeida@unifor.br,  
juliano.pacheco@unifanor.edu.br, demercil@dee.ufc.br

**Abstract**— This paper presents a multi-port single-phase isolated converter applied to a residential microgeneration, with one port in alternate current (AC) and another in direct current (DC). Its main characteristics, operating steps and working modes are presented. The results are obtained through simulation for a AC voltage of 220 V and voltage on DC ports of 400 V, 96 V and 48 V, switching frequency of 50 kHz and 1500 W power, validating the main control meshes.

**Keywords**— Multi-port converter, microgeneration, fotovoltaic generation, white tariff.

**Resumo**— Este artigo apresenta um conversor monofásico multiportas bidirecional isolado, onde uma porta opera com corrente alternada (CA) e as outras com corrente contínua (CC). São apresentados as principais características, as etapas de operação e os modos de funcionamento. As malhas de controle são validadas através de simulação para tensões de 220V na porta CA, 400V, 96V e 48V nas portas CC, chaveamento em 50 kHz e potência de 1,5 kW.

**Palavras-chave**— Conversor multiportas, microgeração, geração fotovoltaica, tarifa branca.

## 1 Introdução

A energia elétrica é um bem de consumo com importante reflexo no desenvolvimento econômico e social de um país. Analisando o histórico do consumo nacional nas últimas duas décadas fornecidos em (EPE, 2017), representado graficamente na Figura 1, nota-se seu significativo crescimento, podendo ser aproximado por uma curva crescente com leves oscilações durante os períodos de crises econômicas e/ou energéticas.

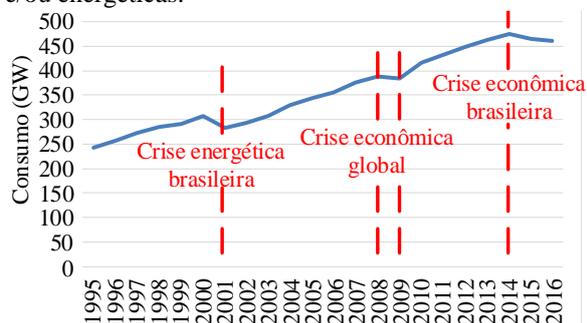


Figura 1. Histórico do consumo brasileiro de energia elétrica

O marco para o ingresso de fontes alternativas na matriz energética brasileira foi a crise econômica de 2001, onde diversas políticas foram adotadas para incentivar a inserção de energia renovável e geração distribuída na matriz energética nacional, que sofria forte dependência do mercado de combustíveis fósseis e das sazonalidades hídricas.

Denomina-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada de até 75 kW, e minigeração aquela com potência entre 75 kW e 5 MW (sendo as fontes hídricas limitadas à 3 MW) (ANEEL, 2015). Estas centrais geradoras, instaladas

próximo aos centros consumidores, além de aliviar o sistema elétrico, reduz a necessidade de expansão e melhora a qualidade da energia devido à proximidade da fonte com a carga. A geração distribuída por fontes renováveis também atrela vantagens como economia financeira, consciência socioambiental e sustentabilidade.

As gerações distribuídas de pequeno porte foram regulamentadas no Brasil através da resolução normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - n° 482/2012 (ANEEL, 2012), revisada posteriormente pela resolução n° 687/2015 (ANEEL, 2015). Após a 482, o processo de difusão da micro e minigeração foi inicialmente lento, acelerando após o ano de 2015, conforme pode ser observado na Figura 2, onde verifica-se a evolução da potência instalada de geração distribuída no Brasil até início de 2017 (ANEEL, 2017a).

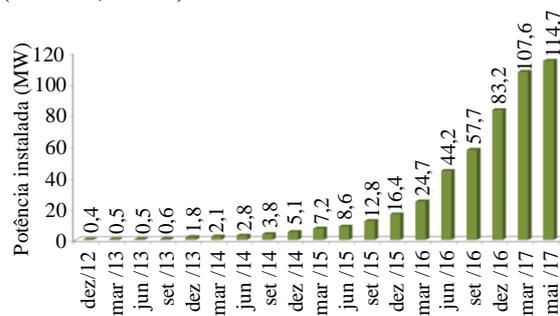


Figura 2. Evolução da potência instalada

Em termos de potência instalada, a fonte solar apresentou forte predominância na geração distribuída com 70% do total, seguida pela eólica com 9%. A Figura 3 apresenta a participação dos tipos de fonte através da potência instalada (ANEEL, 2017a).

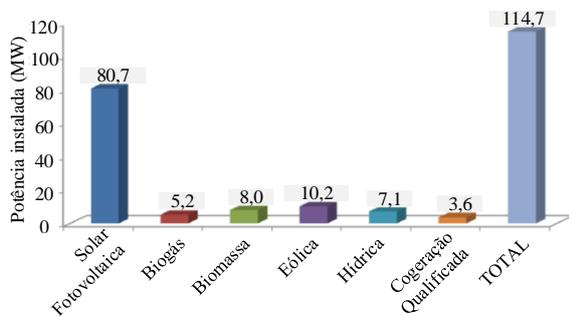


Figura 3. Potência instalada por fonte até maio de 2017

Já em relação a classe de consumo dos usuários, destacou-se a classe residencial com 79,5% do consumo total da geração distribuída, conforme ilustrado na Figura 4 (ANEEL 2017a).

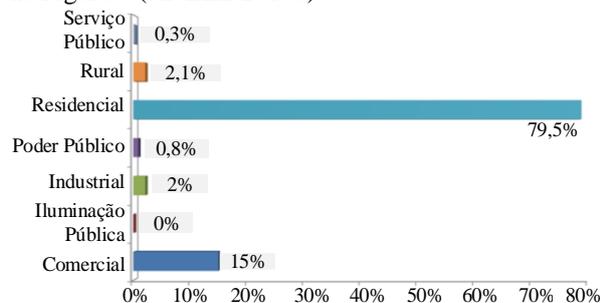


Figura 4. Participação das classes de consumo até maio de 2017

A predominância da energia solar na geração distribuída está associada a modularidade da tecnologia fotovoltaica, apresentando alta aplicabilidade domiciliar e comercial. Inicialmente com um alto custo de implantação, conseguiu se expandir devido a subsídios governamentais e aos investimentos e incentivos aumentando sua inserção no país tornando-se financeiramente mais acessível (EPE, 2016).

Conforme as projeções de geração distribuídas de fotovoltaicas apresentadas pela ANEEL na nota técnica 56/2017 e apresentadas na Figura 5, é previsto um crescimento acelerado da potência instalada residencial para esse tipo de fonte (ANEEL, 2017a).

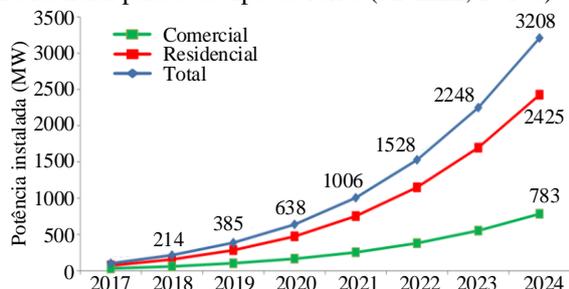


Figura 5. Projeções de geração distribuídas de fotovoltaicas

Buscando incentivar melhores hábitos para as unidades consumidoras que priorizem o uso da energia fora do período de ponta no Brasil, entrou em vigor neste ano a tarifa branca, descrita pela resolução normativa nº 733/2016 em (ANEEL, 2016) e homologada em junho de 2017 (ANEEL, 2017b). A mesma consiste em valores diferentes de tarifas para três horários distintos: ponta, intermediário e fora de ponta durante os dias úteis como apresentado na Fi-

gura 6, enquanto nos finais de semana e feriados são aplicados os valores da tarifa mais baixa.

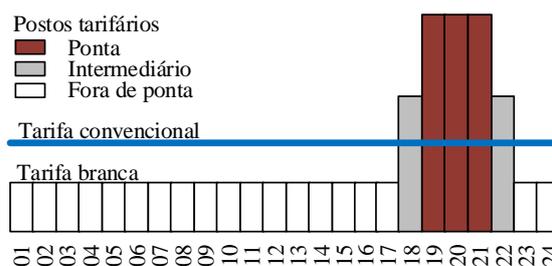


Figura 6. Comparativo entre a tarifa branca e a convencional

Devido a geração distribuída, o uso de armazenadores de energia vem se tornando necessário para garantir a confiabilidade e disponibilidade da energia devido a intermitência das fontes renováveis, podendo também ser utilizados para melhorar a distribuição da demanda de energia das distribuidoras durante o dia, servindo como uma reserva operativa para aplicação durante os horários mais caros.

Uma vez que a microgeração e a utilização de acumuladores de energia se tornaram financeiramente mais atrativas para as pequenas unidades consumidoras, o estudo e desenvolvimento de equipamentos que façam o interfaceamento entre fontes, armazenadores e rede elétrica torna-se uma área de pesquisa promissora.

Neste cenário, este artigo apresenta um conversor eletrônico responsável por interconectar os painéis fotovoltaicos e o banco de baterias à rede elétrica, como ilustra a Figura 7.

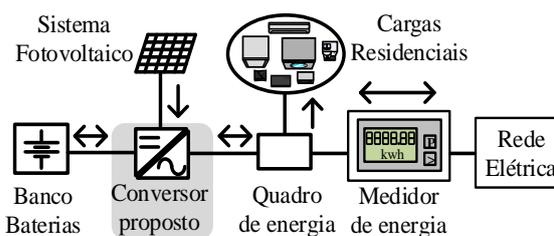


Figura 7. Sistema conectado através do conversor proposto

O conversor proposto além de prover a isolamento galvânica do sistema de geração e armazenamento da rede, é capaz de extrair a máxima potência dos painéis fotovoltaico (MPPT), fazer o controle de carga e descarga do banco de baterias, e injetar corrente na rede elétrica, com alto fator de potência e baixa distorção harmônica.

## 2 Conversor Proposto

Derivado do conversor CA-CA monofásico isolado em alta frequência proposto por (Silva Filho, 2016), e com base na topologia bidirecional CA-CC apresentada por (Oliveira, 2012), propõe-se neste artigo um conversor multiportas isolado, onde uma porta opera com corrente alternada (CA) e outras três com corrente contínua (CC), como ilustrado na Figura 8.

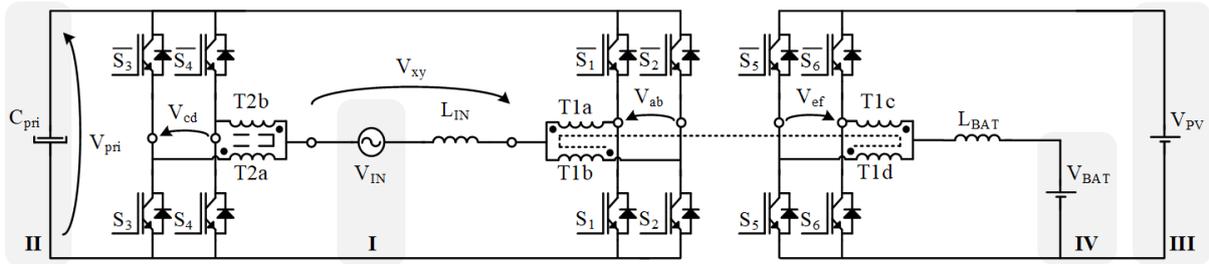


Figura 8. Topologia Proposta

Como principais características da topologia proposta, destacam-se:

- Correção de fator de potência;
- Isolação galvânica em alta frequência;
- Bidirecionalidade de potência;
- Redução do filtro indutivo na porta CA, devido a aplicação de cinco níveis de tensão sobre o mesmo e a utilização de duas células de comutação de três estados que quadruplicam a frequência de chaveamento vista pelo indutor (Bascope, 2000).

Para o sistema de microgeração residencial são utilizadas apenas 3 portas do conversor: porta I, entrada CA; porta III, painéis solares fotovoltaicos; e porta IV, banco de baterias.

### 2.1 Modos de Operação do Sistema

O controle do fluxo de potência entre as portas do conversor eletrônico é feito de acordo com alguns parâmetros do sistema como nível de potência gerada pelo PV e hora do dia. A Figura 9 apresenta os quatro principais modos de operação.

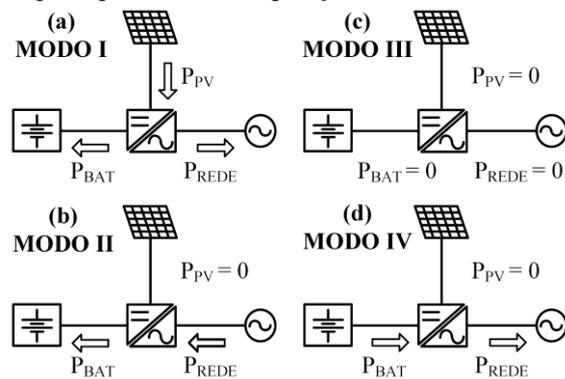


Figura 9. Modos de operação do sistema proposto.

O sentido do fluxo de potência da porta que está conectado o painel fotovoltaico (porta III) é sempre positiva ou nula, ou seja, nunca haverá corrente elétrica entrando nos painéis. Já as outras duas portas podem operar nos modos:

- **Modo I** – Tarifa fora de ponta (mais barata). Sistema PV carrega o banco de baterias e é injetada corrente na rede elétrica;
- **Modo II** – Tarifa fora de ponta, sistema PV sem geração e banco de baterias descarregados. Como a tarifa é a mais barata, o fluxo de potência passa a ser da rede para as bate-

rias, até que as mesmas se carreguem por completo para serem utilizadas no horário de ponta. Após o carregamento total das baterias o sistema passa para o Modo III;

- **Modo III** – Sistema fotovoltaico não está gerando e tarifa na ponta ou intermediária. Neste último não é economicamente vantajoso carregar, nem descarregar o banco de baterias para garantir o mesmo no horário de ponta. Em ambos o controlador mantém a potência entre as portas igual a zero;
- **Modo IV** – Tarifa Ponta (mais cara). Neste modo o sistema aproveita que haverá o melhor pagamento pela energia, assim é injetada toda a corrente do banco de baterias na rede elétrica. Após o descarregamento do banco de baterias o conversor volta para o Modo III.

### 2.2 Análise Qualitativa

A utilização de uma moduladora senoidal no primário do conversor faz com que o ciclo de trabalho (*duty cycle*) das chaves varie periodicamente. As portadoras triangulares de cada braço são defasadas de 180° e a utilização de duas células de comutação de três estados possibilita cinco níveis distintos de tensão entre as pontes ( $V_{xy}$ ), conforme ilustra a Figura 10, e três níveis entre o transformador acoplado ( $V_{ab}$ ). A Tabela 1 apresenta as 14 possíveis combinações de chaveamento com os respectivos níveis de tensão.

Tabela 1. Combinações de chaveamento no primário.

Duty Cycle	Estado de Chaveamento				Tensões	
	S1	S2	S3	S4	$V_{ab}$	$V_{xy}$
A	1	0	0	0	$-V_{pri}$	$-V_{pri}/2$
	1	1	1	0	0	$-V_{pri}/2$
	0	1	0	0	$+V_{pri}$	$-V_{pri}/2$
B	1	1	0	1	0	$-V_{pri}/2$
	1	1	0	0	0	$-V_{pri}$
C	1	0	1	0	$-V_{pri}$	0
	0	1	1	0	$V_{pri}$	0
	0	1	0	1	$-V_{pri}$	0
D	1	0	0	1	$V_{pri}$	0
	1	0	1	1	$-V_{pri}$	$+V_{pri}/2$
	0	0	1	0	0	$+V_{pri}/2$
	0	1	1	1	$V_{pri}$	$+V_{pri}/2$
E	0	0	0	1	0	$+V_{pri}/2$
	0	0	1	1	0	$+V_{pri}$

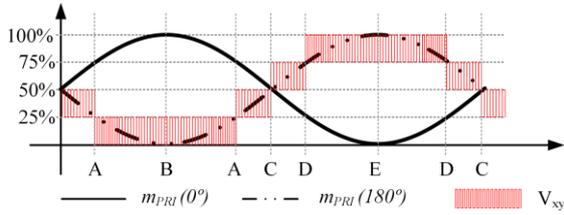


Figura 10. Moduladora do primário e níveis de tensão resultantes.

Já para o secundário é aplicado um sinal de modulação contínuo, cujo ciclo de trabalho varia conforme necessidade de controle, enquanto as portadoras permanecem triangulares defasadas de 180°. Na Figura 11 é ilustrado o chaveamento para três razões cíclicas distintas, enquanto na Tabela 2 são apresentadas as 4 combinações de chaveamento que resultam em três níveis de tensão entre os enrolamentos do secundário, semelhante ao primário.

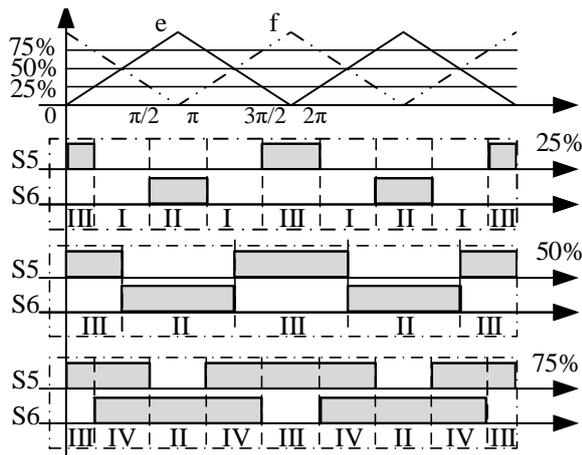


Figura 11. Chaveamento no secundário para *duty cycle* distintos.

Tabela 2. Combinações de chaveamento no secundário.

Modos	Estado de Chaveamento		Tensão Vsec
	S5	S6	
I	0	0	0
II	0	1	+V <sub>PV</sub>
III	1	0	-V <sub>PV</sub>
IV	1	1	0

## 2.1 Estratégia de Controle

Para cada modo de operação deve ser adotado uma estratégia de controle específica. As variáveis que podem ser utilizadas como controle são: Razão cíclica do lado primário ( $D_{PRI}$ ); Razão cíclica do lado secundário ( $D_{SEC}$ ), e o ângulo de defasagem ( $\phi$ ) entre as portadoras do lado primário e secundário, conhecido na literatura como *phase-shift*, que quando positivo impõem o sentido do fluxo de potência do primário para o secundário, e quando negativo impõem o fluxo de potência do secundário para o primário (Santos, 2014). Buscando validar a topologia proposta, na Figura 12 tem-se o diagrama simplificado do controle das principais tensões e correntes, apresentando assim uma visão geral de todas as variáveis.

Nesta configuração, a razão cíclica do primário é responsável pelo controle da tensão CC na porta II

( $V_{OPRI}$ ), e pelo controle da corrente de entrada da porta I ( $I_{IN}$ ), garantindo um alto fator de potência (FP) e uma baixa taxa de distorção harmônica (TDH). O ângulo de defasagem entre as portadoras do primário e secundário controla a tensão CC da porta III ( $V_{PV}$ ), assim, o controle desta tensão é feito transferindo menos ou mais potência do primário para o secundário, podendo até inverter o fluxo de potência caso necessário. Por fim, a razão cíclica do secundário é responsável pelo controle da tensão e da corrente na porta IV ( $V_{BAT}$ ), tornando possível a implementação de métodos de carga do banco de baterias que prolonguem sua vida útil.

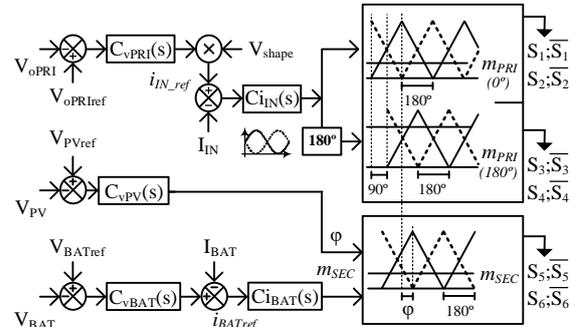


Figura 12. Diagrama de controle das tensões e correntes.

O projeto dos controladores analógicos foi realizado utilizando o método do fator-k (Venable, 1983). A função de transferência da corrente de entrada da porta CA em função da razão cíclica do primário pode ser aproximada para a mesma função do conversor Boost Clássico, que é dada por (1).

$$\frac{I_{IN}(s)}{d(s)} = \frac{V_{PRI}}{s \cdot L_{IN}} \quad (1)$$

Adotando como parâmetros para malha de corrente uma frequência de cruzamento de 12,5 kHz e uma margem de fase de 60°, foi projetado um compensador do Tipo 2 ou controlador PI com a adição de um pólo de filtro. Na Figura 13 é apresentado o diagrama de Bode da função de transferência em laço aberto (FTLA) com compensador, nota-se que o controlador atua mantendo as especificações de projeto.

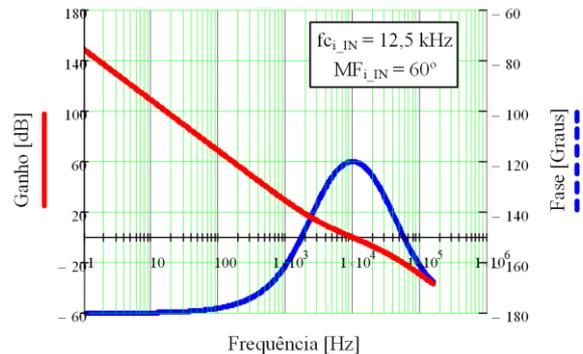


Figura 13. FTLA c/ compensador (Corrente  $I_{IN}$ ).

Para o projeto do controlador da malha de tensão da Porta II ( $V_{PRI}$ ) utilizou-se a função de transferência tensão de saída por corrente de entrada, como mostra (2).

$$\frac{\hat{v}_{PRI}(s)}{\hat{i}_{IN}(s)} = \frac{(1-D_{PRI})}{C_{PRI}} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{C_{PRI} \cdot R_{PRI}}} \quad (2)$$

Para o controle da tensão do  $V_{PRI}$  foi adotado como parâmetros uma frequência de cruzamento de 12 Hz e uma margem de fase de  $60^\circ$ . Na Figura 14 é apresentado o diagrama de Bode da função de transferência em laço aberto com compensador (Tipo 2).

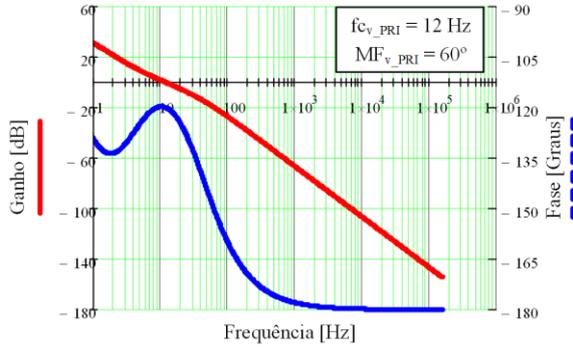


Figura14. FTLA c/ compensador (Tensão  $V_{PRI}$ ).

O controle da tensão na Porta III ( $V_{PV}$ ) é feito utilizando a função de transferência (3) que é oriunda da teoria Gyrtor aplicada aos conversores Dual Active Bridge (Barazarte, 2010).

$$\frac{\hat{v}_{PV}(s)}{\hat{\phi}(s)} = \frac{V_{PRI}}{2 \cdot \pi \cdot fs \cdot (L_{SEC})} \cdot \varphi \cdot \left(1 - \frac{|\varphi|}{\pi}\right) \cdot \frac{R_{SEC}}{R_{SEC} \cdot C_{SEC} \cdot s + 1} \quad (3)$$

Projeteu-se assim um controlador, do Tipo 2, garantindo uma margem de fase de  $60^\circ$  e uma frequência de cruzamento de 24 Hz. Na Figura 15 é apresentado o diagrama de Bode da função de transferência em laço aberto com compensador.

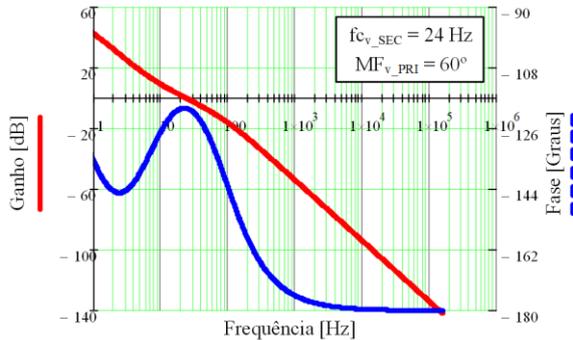


Figura 15. FTLA c/ compensador (Tensão  $V_{PV}$ ).

Para o controle da porta IV (banco de baterias), as funções de transferência podem ser aproximadas para um conversor Buck clássico, como mostra (4) e (5), onde temos a função de transferência da corrente e tensão, respectivamente (Vorpérian, 1990).

$$\frac{\hat{i}_{BAT}(s)}{\hat{d}_{SEC}(s)} = \frac{V_{PV} \cdot (1 + s \cdot R_{SEC} \cdot C_{SEC})}{s^2 \cdot R_{SEC} \cdot L_{BAT} \cdot C_{SEC} + s \cdot L_{BAT} + R_{SEC}} \quad (4)$$

$$\frac{\hat{v}_{BAT}(s)}{\hat{i}_{BAT}(s)} = \frac{R_{SEC} \cdot V_{PV}}{1 + s \cdot R_{SEC} \cdot C_{SEC}} \quad (5)$$

Adotou-se no projeto da malha de corrente e tensão do banco de baterias, uma frequência de cruzamento de 2,5 kHz e 100 Hz, respectivamente. Na Figura 16 e 17, tem-se o diagrama de Bode destas funções de transferência (corrente e tensão) em laço

aberto com compensador, onde podemos observar que o ganho cruzou com 0 dB na frequência de cruzamento desejada e a margem de fase ficou em  $60^\circ$ .

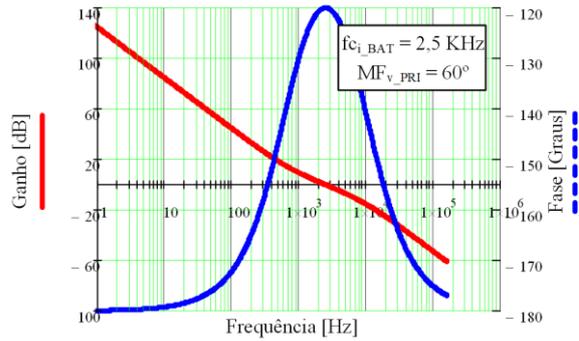


Figura16. FTLA c/ compensador (Corrente  $I_{BAT}$ ).

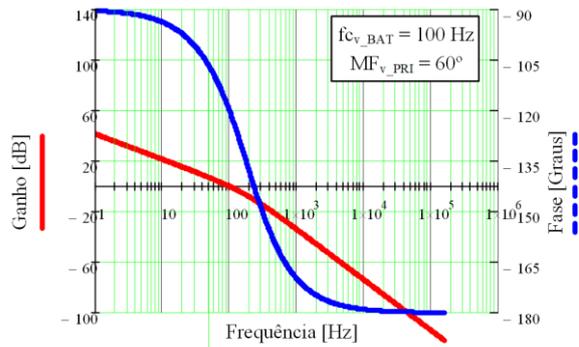


Figura17. FTLA c/ compensador (Tensão  $V_{BAT}$ ).

### 3 Resultados de Simulação

Os resultados preliminares foram obtidos com o software de simulação PSIM (da PowerSim®). Na Figura 18 é vista a forma de onda da corrente de entrada com um TDH de 3,87% e em fase com a tensão CA, apresentando um fator de potência de 0,997. Nesta figura também pode ser observado a tensão aplicada no filtro indutivo, com 5 níveis de tensão, e as tensões na Porta II ( $V_{PRI}$ ) e Porta III ( $V_{PV}$ ), ambas controladas e com uma ondulação de tensão abaixo de 2%.

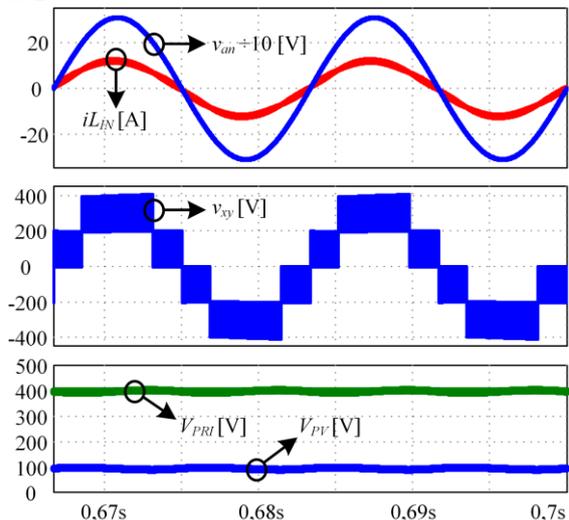


Figura 18. Resposta em regime permanente do conversor.

Buscando validar a bidirecionalidade da topologia proposta, na Figura 19, foi feita a inversão do fluxo de potência. Nota-se que a potência CA se inverte em poucos ciclos da rede, e a tensão na Porta III apresenta um sobressinal de 20%, que rapidamente retorna para a tensão de referência.

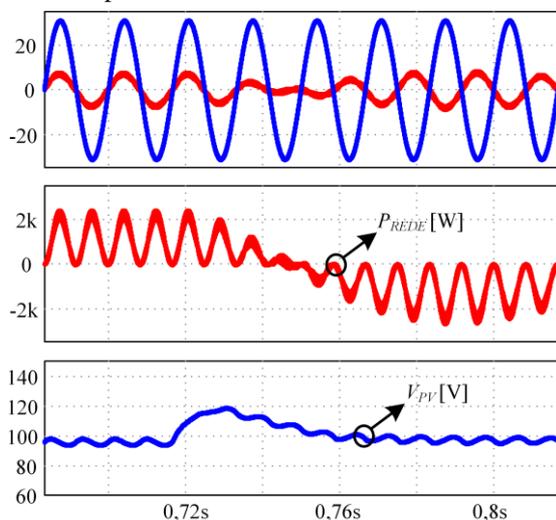


Figura 19. Degrau de inversão de potência.

Na Figura 20 o sistema PV está gerando energia, sendo parte dela utilizada para carregar a bateria e o restante é injetada na rede elétrica. No instante do degrau, a bateria para de ser carregada e toda a potência gerada pelo sistema PV é injetada na rede elétrica.

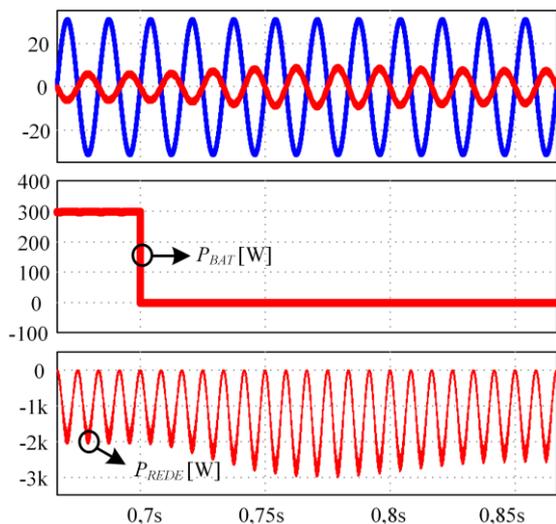


Figura 20. Degrau de potência (Baterias carregadas).

#### 4 Conclusão

Este trabalho propôs um conversor multiportas aplicado à um sistema de geração distribuída residencial. O mesmo interliga a rede elétrica a banco de baterias e painéis fotovoltaicos, controlando o fluxo de potência entre estas fontes e provendo a isolação galvânica. Outra característica do sistema proposto é o uso da tarifa branca, onde o sistema armazena energia durante a tarifa mais barata (fora ponta) e fornece para rede durante a tarifa mais cara (ponta).

Os modos de operação do sistema de microgeração, a estrutura do conversor e a análise qualitativa do mesmo foram apresentadas. O projeto dos controladores é descrito e validado via simulação. Através dos resultados preliminares verificou-se a atuação satisfatória dos controladores em todas as situações testadas, mantendo os barramentos estabilizados e gerenciando o fluxo de potência.

#### Agradecimentos

Aos membros do Grupo de Processamento de Energia e Controle (GPEC) e aos órgãos de fomento à pesquisa CAPES e CNPq.

#### Referências Bibliográficas

- ANEEL (2012) Resolução Normativa N° 482/2012. 17/04/12 ed.
- ANEEL (2015) Resolução Normativa N° 687/2015. 24/04/15 ed.
- ANEEL (2016) Resolução Normativa N° 733/2016. 06/09/16 ed.
- ANEEL (2017a) Nota Técnica n° 0056/2017-SRD/ANEEL. 24/05/17 ed.
- ANEEL (2017b). Resolução Homologatória N° 2264/2017. 27/06/17 ed.
- Barazarte, R. Y.; Gonzalez, G. G. and Ehsani, M. (2010) Generalized Gyrator Theory. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, n°. 7, pag. 1832- 1837.
- Bascope, G. V. T. and Barbi, I. (2000) Generation of a family of non-isolated DC-DC PWM converters using new three-state switching cells. PESC'00. p.858-863 vol.2.
- EPE (2016) Nota técnica DEA 013/15 “Demanda de Energia 2050”. jan. 2016 ed.
- EPE (2017) Consumo Anual de Energia Elétrica por classe (nacional) – 1995-2016.
- Oliveira, D. S.; Batista, M. I. V.; Barreto, L. H. S. C. and Praça, P. P. (2012) A bidirectional single stage AC-DC converter with high frequency isolation feasible to DC distributed power systems. INDUSCON, pp. 1-7.
- Silva Filho, O. C. and Oliveira, D. de S. (2016) Proposal of a new family of high frequency isolated single-phase AC-AC converters. INDUSCON, pp. 1-8.
- Santos, W. M. and Martins, D. C. (2014). Introdução ao conversor DAB monofásico. Eletrônica de Potência – SOBRAEP, vol. 19, n° 1, pp. 36-46.
- Venable, H. D. (1983) The k-factor: A New Mathematical Tool for Stability Analysis and Synthesi. POWERCON, San Diego, USA.
- Vorpérian, V. (1990) “Simplified Analysis of PWM Converters Using Model of PWM Switch”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 26, No. 3, pp. 490-496, 1990.