

# CONVERSOR COM TRÊS PORTAS BIDIRECIONAIS PARA OPERAÇÃO EM MICRORREDES C.C.

MÁRCIO J. M. RÉGES\*, FABRÍCIO BRADASCHIA\*, GUSTAVO M. S. AZEVEDO\*, FRANCISCO A. S. NEVES\*

\**Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Arquitetura, S/N, 50740-550, Recife, Pernambuco, Brasil*

Emails: marcioreges@gmail.com, fabricio.bradaschia@ufpe.br, gustavomsa@aim.com, fneves@ufpe.br

**Abstract**— The need to increase efficiency in distribution systems and the current technological advances of power electronics are the key elements to make the DC microgrids viable alternatives to the traditional AC microgrids. There is a current tendency to standardize the voltage levels of a DC microgrid in three voltage levels: 24 V, 48 V and 380 V. In order to effectively control the three voltage levels of this DC microgrid, it is necessary to use a high-gain three-port bidirectional DC-DC converter that is capable of connecting both loads and sources to its bars. This paper presents the development of an isolated three-port bidirectional DC-DC converter to operate in this DC microgrid. The proposed converter is designed for a nominal power of 500 W, being able to operate isolated and connected to the electrical grid. The mathematical model, the control system and experimental results of the proposed converter are presented in order to demonstrate its feasibility.

**Keywords**— High Voltage Gain, Batteries, Three-Port Converter, DC Microgrid, Distributed Generation.

**Resumo**— Devido à necessidade de se aumentar a eficiência em sistemas de distribuição e aos avanços tecnológicos atuais da eletrônica de potência, microrredes c.c. começam a ser alternativas viáveis às tradicionais microrredes c.a. Há atualmente uma tendência em se padronizar os níveis de tensão de uma microrrede c.c. em três níveis de tensões: 24 V, 48 V e 380 V. Para que o controle de uma microrrede c.c. de três níveis de tensão seja efetivo, verifica-se a necessidade de um conversor bidirecional de três portas com alto ganho, que seja capaz de conectar tanto cargas como fontes aos seus barramentos e que possua um desacoplamento entre os controles das tensões das portas. Este trabalho tem por objetivo apresentar o estudo e desenvolvimento de um conversor c.c./c.c. isolado de três portas bidirecional para operação em uma microrrede c.c. O conversor é projetado para uma potência de 500 W, sendo capaz de operar nos modos conectado à rede e ilhado (isolado da rede). O modelo do conversor proposto, seu sistema de controle e os resultados experimentais são apresentados de forma a validar o seu funcionamento.

**Palavras-chave**— Alto Ganho de Tensão, Baterias, Conversor de Três Portas, Microrrede c.c., Geração Distribuída.

## 1 Introdução

Com os recentes avanços tecnológicos da eletrônica de potência, o aumento das cargas eletrônicas e o crescimento do uso de fontes renováveis de energia e sistemas de armazenamento de energia, uma questão antiga voltou à tona: é mais vantajoso utilizar corrente alternada (c.a.) ou corrente contínua (c.c.)? Essa questão surgiu no fim do século XIX, na época da batalha das correntes entre Edison e Tesla/Westinghouse (Ailee and Tschudi, 2012). Apesar de os sistemas c.c. terem sido pioneiros, as vantagens associadas à geração em c.a. foram preponderantes na época para a sua escolha, principalmente devido ao emprego do transformador para adequar os níveis de tensão, problemas intrínsecos dos comutadores das máquinas c.c. e a impossibilidade de transmissão em corrente contínua por longas distâncias, devido à transmissão em baixa tensão (Alves, 2008). Em consequência dessa escolha, a maioria dos sistemas elétricos de potência no mundo são baseados em c.a. Contudo, com os recentes avanços tecnológicos, sistemas de potência c.c. oferecem vantagens interessantes com respeito a simplicidade, redução de custos e melhoria na eficiência

(Fairley, 2012). Outra mudança tecnológica muito investigada neste contexto são as microrredes c.c., as denominadas Redes Elétricas Inteligentes (*Smart Grids*).

O termo microrrede (MR) pode ser definido como o agrupamento de cargas e fontes de geração distribuídas (GD), também podendo conter sistemas de armazenamento de energia, formando um subsistema elétrico de potência, delimitado por fronteiras elétricas claramente definidas, que age como uma única entidade controlável em relação à rede elétrica principal e que se conecta e desconecta da rede pública de modo a permitir a operação em ambos os modos (Lasseter, 2002) e (Lasseter and Paigi, 2004).

Redes de distribuição em c.c. parecem propiciar certas vantagens importantes sobre redes c.a. quando inseridas no contexto de GD. Algumas das vantagens são:

- Menor número de conversões c.a./c.c. e c.c./c.a. nas cargas e nas unidades de cogeração (Blasi, 2013);
- Maior fluxo de energia para uma mesma linha, pois apresenta maior estabilidade e menores perdas quando comparadas a uma transmissão em

c.a. (Meah and Ula, 2007);

- Necessidade de controle apenas do nível de tensão (controle de frequência e sincronismo não são necessários), permitindo uma maior flexibilidade quanto à expansão da rede (Justo et al., 2013) e (Dragicevic et al., 2016);

- Simplicidade na conexão com sistema de armazenamento de energia, pois a maioria opera em c.c. (Justo et al., 2013);

- Menores riscos aos seres humanos em baixíssima tensão (24 V e 48 V), já que o corpo humano é capaz de suportar maiores níveis de corrente em c.c. em comparação com c.a. (IEC, 2005).

Por outro lado, as redes de distribuição c.c. possuem alguns aspectos que devem ser melhor avaliados, entre eles: garantir a confiabilidade das redes em c.c., como, por exemplo, a readequação das tecnologias de proteção de sistemas c.c., incluindo técnicas de aterramento apropriadas; a necessidade de fluxo bidirecional de potência em vários pontos das redes de distribuição e os efeitos de campos eletromagnéticos gerados por correntes contínuas no ambiente de instalações elétricas (Heldwein, 2009). Ainda há pontos com claras desvantagens para as redes c.c., entre os quais os mais importantes são: falta de padronização (Dragicevic et al., 2016); a maior dificuldade em se interromper uma corrente (Salomonsson et al., 2009); custo elevado dos conversores c.c./c.c. em relação aos transformadores; e a necessidade de substituição de mais de um século de trabalho e instalações em c.a., tendo que se tomar um cuidado de realizar o menor número de mudanças possíveis (Heldwein, 2009).

Apesar das MRs c.c. terem sido estudadas intensivamente nos últimos anos, ainda é uma tecnologia emergente que precisa superar um grande número de desafios antes de obter uma aceitação em larga escala em aplicações industriais e comerciais. Inclusive, a padronização ainda é uma grande barreira para a proliferação de MRs c.c. Com o objetivo de promover MRs c.c., várias organizações têm se dedicado ao desenvolvimento de normas. Segundo (Dragicevic et al., 2016), entre as diferentes organizações que estão desenvolvendo as normas para MRs c.c., uma preocupação comum é a respeito do nível de tensão ideal para uma MR c.c. No presente momento, a opção mais provável parece ser 380 V como o nível de tensão nominal, especialmente para aplicações residenciais (eletrodomésticos de grande porte) e *data centers*. Por outro lado, 48 V ou 24 V podem ser selecionadas comumente como níveis de tensões auxiliares para aplicações de baixa tensão com cargas de baixa potência (eletrodomésticos de pequeno porte e eletroeletrônicos).

Baseado nos estudos apresentados, um dos objetivos deste trabalho é apresentar um novo modelo de MR c.c. que pudesse ser implantada co-

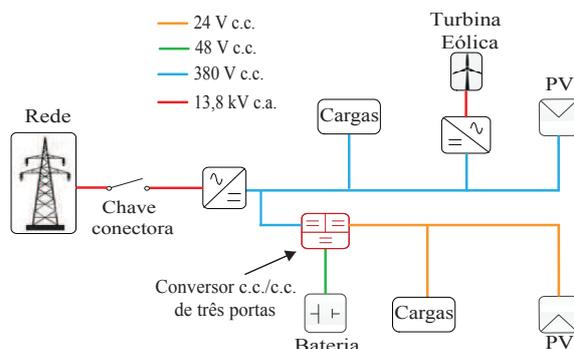


Figura 1: Microrrede c.c. com três níveis de tensão.

mercialmente, como mostrado na Figura 1. Esta MR c.c. possui três níveis de tensões: 24 V, 48 V e 380 V, e pode operar conectada à rede principal ou ilhada da mesma. No barramento de 24 V, poderão ser conectadas cargas menores e módulos fotovoltaicos (PV). No barramento de 48 V será conectada uma bateria, de modo que a MR seja capaz funcionar em ilhamento, quando for necessário. No barramento de 380 V, poderão ser conectadas as cargas de maiores potências, como, turbinas eólicas e PVs, além da conexão com a rede.

A topologia de conversor capaz de atender aos requisitos da MR proposta é denominada de conversor c.c./c.c. de três portas. Assim, para permitir o fluxo de energia entre os barramentos da MR c.c., verifica-se que o conversor deve ser bidirecional nas suas três portas, podendo conectar tanto cargas como fontes. Deve ser também capaz de produzir um alto ganho de tensão em uma das portas (380 V). Por fim, o conversor deverá permitir o controle desacoplado dos três níveis de tensão nas respectivas portas.

Algumas das topologias encontradas na literatura atendem parcialmente aos requisitos da MR proposta, entre elas podemos citar (Tao et al., 2005), (Su and Tang, 2009) e (Wu et al., 2011), mas falhavam em simultaneamente serem bidirecionais em todas as portas, ter um alto ganho de tensão e possuir um controle desacoplado dos três níveis de tensão das portas. Assim, o principal objetivo deste trabalho é propor uma nova topologia de conversor c.c. com três portas bidirecionais que seja capaz de atender a todos os requisitos da MR proposta.

## 2 Operação e modelagem do conversor proposto

A topologia proposta neste trabalho tem sua concepção a partir dos conversores de (Tao et al., 2005), (Su and Tang, 2009) e (Wu et al., 2011). O conversor proposto é um conversor c.c./c.c. de três portas isolado de 500 W bidirecional em todas as portas, conforme mostrado na Figura 2.

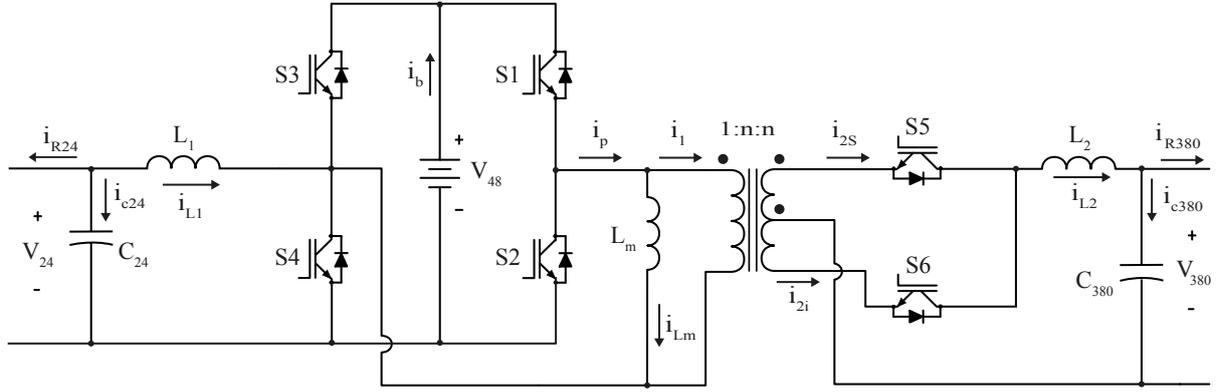


Figura 2: Conversor c.c./c.c. de três portas proposto.

Possui seis chaves semicondutoras de potência e opera como um conversor *buck* bidirecional para o lado de baixa tensão do transformador 1:n:n, e como um *buck* bidirecional em ponte para o lado do barramento de 380 V. O barramento central do conversor possui uma tensão 48 V. A escolha de um transformador com derivação central reduz o número de chaves no secundário do conversor.

A principal vantagem deste conversor em relação aos mencionados anteriormente se deve ao fato das variáveis de controle serem independentes no sistema de controle. O controle do barramento de 24 V é realizado pela razão cíclica da chave  $S_3$  ( $D_3$ ). A razão cíclica da chave  $S_2$  ( $D_2$ ) controla a tensão do barramento de 380 V e a razão cíclica da chave  $S_1$  ( $D_1$ ) é responsável pelo controle da corrente de magnetização do transformador, visando torná-la nula e evitando a saturação do transformador. Este conversor tem como restrições:  $D_3 < (1 - D_1)$ ;  $D_3 > D_2$ ; e  $D_1 + D_2 < 1$ . A restrição  $D_1 + D_2 < 1$  evita que ocorra um curto no braço contendo as chaves  $S_1$  e  $S_2$ . As demais restrições garantem que haja um desacoplamento entre o barramento de 24 V e 380 V. Embora sejam possíveis até oito estados para este conversor quatro são utilizados devido as restrições descritas anteriormente, como sintetizado na Tabela 1.

Para efeito de cálculos será considerado que apenas cargas resistivas estão ligadas aos barramentos de 24 e 380 V, que as resistências das chaves são desprezíveis, que uma bateria está ligada ao barramento de 48 V e que o circuito equivalente do transformador contém apenas a indutância de magnetização. Este conversor possui quatro estados de operação, baseado no padrão espelhado do PWM mostrado na Figura 3. As chaves  $S_4, S_5, S_6$  são complementares, respectivamente, às chaves  $S_3, S_2, S_1$ . As razões cíclicas das chaves  $S_3, S_2, S_1$  são geradas pela comparação de um valor de referência com uma onda triangular.

A equação do modelo médio no espaço de estados do conversor é dada por:

Tabela 1: Estados possíveis das chaves.

Estado	Chaves			Permissão	Restrição
	$S_1$	$S_2$	$S_3$		
Estado 1	Fechada	Aberta	Aberta	Permitido	—
Estado 2	Aberta	Aberta	Aberta	Permitido	—
Estado 3	Aberta	Aberta	Fechada	Permitido	—
Estado 4	Aberta	Fechada	Fechada	Permitido	—
Estado 5	Fechada	Fechada	Fechada	Proibido	$D_1 + D_2 < 1$
Estado 6	Fechada	Fechada	Aberta	Proibido	$D_1 + D_2 < 1$
Estado 7	Aberta	Fechada	Aberta	Proibido	$D_3 > D_2$
Estado 8	Fechada	Aberta	Fechada	Proibido	$D_3 < 1 - D_1$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{Lm} \\ V_{24} \\ V_{380} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{L1}}{L_1} & 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & \frac{-R_{L2}}{L_2} & 0 & 0 & \frac{-1}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{C_{24}} & 0 & 0 & \frac{-1}{C_{24}R_{24}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{380}} & 0 & 0 & \frac{-1}{C_{380}R_{380}} \end{bmatrix} \cdot (1)$$

$$\cdot \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{Lm} \\ V_{24} \\ V_{380} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-V_4}{L_1} \\ \frac{V_2}{L_2} \\ \frac{V_{Lm}}{L_m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

onde  $R_{L1}$  e  $R_{L2}$  são as resistências internas dos indutores  $L_1$  e  $L_2$ , e  $R_{24}$  e  $R_{380}$  são cargas acopladas nas portas de 24 V e 380 V, respectivamente. As variáveis auxiliares  $V_4$  (tensão sobre a chave  $S_4$ ),  $V_2$  (tensão sobre a chave  $S_2$ ) e  $V_{Lm}$  (tensão sobre a indutância de magnetização  $L_m$ ) em (1) são definidas como:

$$V_4 = D_3 V_{48}, \quad (2)$$

$$V_2 = n V_{48} (D_1 + D_2), \quad (3)$$

$$V_{Lm} = V_{48} (D_1 - D_2). \quad (4)$$

Considerando o modelo em (1) em regime permanente, é possível obter as seguintes equações:

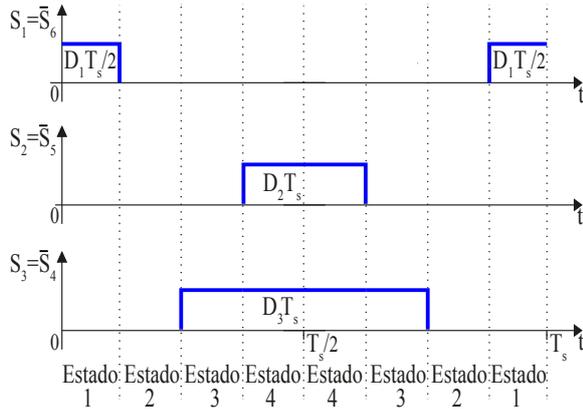


Figura 3: Padrão espelhado do PWM do conversor proposto.

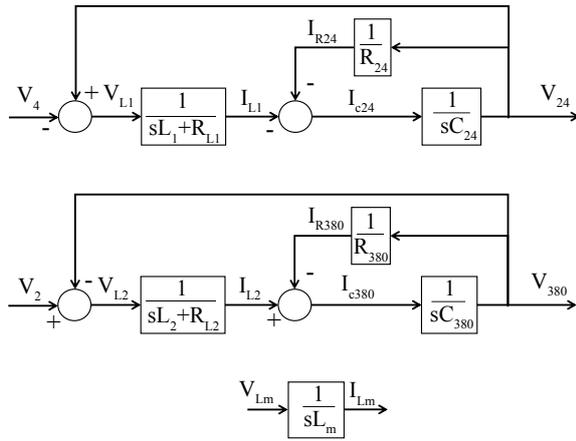


Figura 4: Diagrama de blocos do modelo matemático do conversor.

$$\begin{cases} V_{24} = V_4 = V_{48}D_3 \\ V_{380} = V_2 = nV_{48}(D_1 + D_2) \\ V_{Lm} = 0 \\ \dot{i}_{L1} = \frac{-V_{24}}{R_{24}} = -i_{R24} \\ \dot{i}_{L2} = \frac{V_{380}}{R_{380}} = i_{R380} \end{cases} \quad (5)$$

Das equações em regime permanente, observa-se que a tensão do barramento de 24 V,  $V_{24}$ , depende apenas da razão cíclica  $D_3$  e que a tensão do barramento de 380 V,  $V_{380}$ , depende das razões cíclicas  $D_1$  e  $D_2$ .

A partir das equações do modelo médio do conversor, é possível montar diagramas de blocos que representam o sistema, como mostrado na Figura 4. Dos diagramas de blocos verifica-se que  $I_{L1}$  pode ser controlado por  $V_4$ ,  $V_{24}$  por  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  por  $V_2$ ,  $V_{380}$  por  $I_{L2}$  e  $I_{Lm}$  por  $V_{Lm}$ .

### 3 Controle do conversor proposto

O conversor proposto deve ser capaz de controlar os níveis de tensão dos barramentos da MR (Figura 1), estando ela conectada (chave conectora fechada) ou desconectada da rede (chave conectora aberta). No modo conectado à rede, somente

é necessário impor o valor do barramento de 24V, pois o conversor c.a./c.c. da MR (Figura 1) se torna o responsável por definir o nível de tensão do barramento de 380 V. No modo desconectado da rede, o conversor proposto é responsável por definir os níveis de 24V e 380 V na MR. Assim, é necessário o projeto de controladores para garantir que as tensões não desviem de seus valores nominais quando ocorrerem perturbações no sistema. Para o conversor proposto também se torna necessário que haja um controle de corrente no primário do transformador elevador para garantir que a componente c.c. da corrente de magnetização seja aproximadamente zero. Na Figura 5, é mostrado o diagrama do controle do conversor.

O conversor de três portas proposto tem dois modos de operação: modo conectado (MC) à rede e o modo desconectado (MD) da rede, sendo o seletor, mostrado na Figura 5, o responsável por definir os modos de operação, baseando-se no estado da chave conectora da Figura 1.

No MD, o conversor está ilhado da rede elétrica e a bateria e painéis fotovoltaicos são os únicos responsáveis por alimentar tanto as cargas do lado de 24V como as do lado de 380V. Os painéis fotovoltaicos podem produzir energia para alimentar, suficiente ou parcialmente as cargas. Se os painéis produzirem energia suficiente para alimentar as cargas, o excedente de energia será utilizado para carregar a bateria. Se a energia dos painéis for insuficiente para alimentar as cargas, a bateria entrará em operação para complementar a energia demandada, sendo desse modo descarregada.

No MC, o conversor está conectado a rede elétrica pelo barramento de 380 V, e é apenas necessário controlar a corrente demandada no barramento de 380 V. Tanto as cargas do lado de 24 V como as do lado 380 V são alimentadas pela energia fornecida pela rede principal. A bateria é carregada ou fica em flutuação. Nesse modo, o excedente de energia produzida na MR é entregue à rede principal.

Tanto o barramento de 24 V como o barramento de 380 V são controlados por uma malha fechada exterior de tensão com um controlador proporcional e integral (PI) e uma malha interior de corrente também com um controlador PI. A malha interna de corrente deve ser muito mais rápida que a malha externa de tensão para que haja um desacoplamento entre as dinâmicas de corrente e tensão do controle. O controle da corrente de magnetização do transformador é realizado por apenas um controlador PI.

Quando a MR está no MD, a malha externa de tensão (destacada em vermelho na Figura 5) entra em operação definindo a tensão do barramento de 380 V. No MC, a malha externa de tensão deve ser desabilitada, já que o conversor c.a./c.c. é quem define a tensão do barramento de 380 V. No lugar, insere-se o controle de carregamento da bateria de

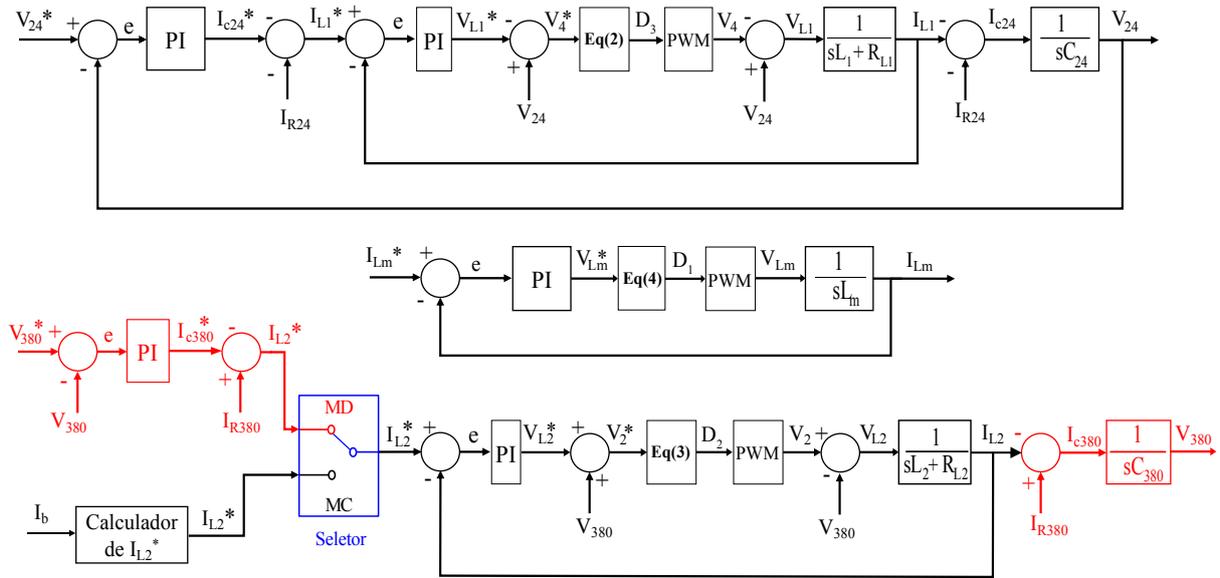


Figura 5: Sistema de controle completo do conversor.

48 V, como pode ser visto na Figura 5.

As malhas de controle do barramento de 24 V e a malha de controle da corrente de magnetização são as mesmas tanto para o MC como para o MD. É importante ressaltar que o chaveamento brusco do MC para MD e MD para MC gera oscilações no controle do barramento de 380 V, sendo necessário cada vez que se muda de um modo para o outro zerar o controlador integral do controlador PI da malha interna de corrente do barramento de 380 V.

No projeto dos controladores procurou-se fazer a resposta da malha de corrente pelo menos 3 vezes mais rápida que a de tensão, garantido assim o desacoplamento entre as malhas. Desejou-se também que o sobressinal (*overshoot*) fosse de no máximo 10% para que não houvessem variações bruscas de tensões nos barramentos.

#### 4 Resultados experimentais

Nesta seção é realizada a validação do conversor proposto e dos projetos dos controladores do sistema de controle da Figura 5, através de experimentos envolvendo uma MR similar a apresentada na seção 1. Apenas o MD será analisado nesta seção. Na Figura 6 tem-se uma foto detalhada do protótipo de 500 W para a análise experimental do conversor proposto.

Para os experimentos de 1 a 4, foram conectadas apenas cargas resistivas nos barramentos de 24 V e 380 V, sendo a bateria (fonte de tensão) a única responsável por alimentar as cargas. Para os experimentos 5 e 6, conectou-se um módulo PV (fonte de corrente) no barramento de 24 V e apenas uma carga no barramento de 380 V, de modo que, se o módulo PV fornecer energia suficiente para alimentar a carga, o excedente carregará a

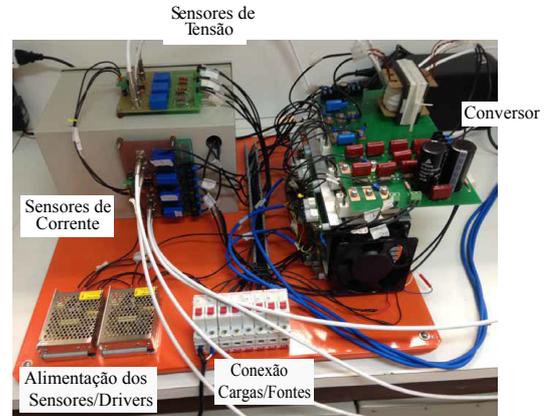


Figura 6: Protótipo do conversor proposto.

bateria. Se o módulo PV não conseguir alimentar a carga, a bateria ajudará a complementar a energia demandada pela carga, sendo assim descarregada. Convém observar que devido a limitações de bancada, a tensão nominal no barramento de 380 V foi mantida em torno de 300 V para todos os experimentos. Na Tabela 2, tem-se os valores dos componentes do conversor utilizados no experimento.

##### 4.1 Experimento 1: Mudança na Tensão de Referência do Barramento de 380 V

Primeiramente foi dado um degrau de 200 V para 300 V na tensão de referência do barramento de 380 V. As cargas conectadas aos barramentos de 24 e 380 V foram de  $60 \Omega$  (9,6 W) e  $561 \Omega$  (160,4). Pode-se observar na Figura 7 que o transitório foi de 175 ms e que houve um aumento no valor médio da corrente da bateria ( $I_b$ ), com um sobressinal na corrente de aproximadamente 5 A. Na corrente do indutor  $L_2$  ocorreu um sobressinal na corrente de aproximadamente 0,75 A devido ao aumento

Tabela 2: Valores dos componentes usados no protótipo do conversor.

Componente	Valor
$C_{380}$	$750 \mu F$
$C_{24}$	$2200 \mu F$
$L_1$	$630 \mu H$
$L_2$	$10,33 mH$
Razão de Espiras do Transformador	1:10
Chaves $S_1$ a $S_4$	Módulos IGBT SKM75GB063D
Chaves $S_5$ a $S_6$	Módulos IGBT SKM75GB176D
Tensão nominal no barramento de 380 V	300 V
Tensão nominal no barramento de 24 V	24 V
Tensão da bateria ( $V_{48}$ )	48 V
Freq. de chaveamento ( $f_s$ )	20 kHz

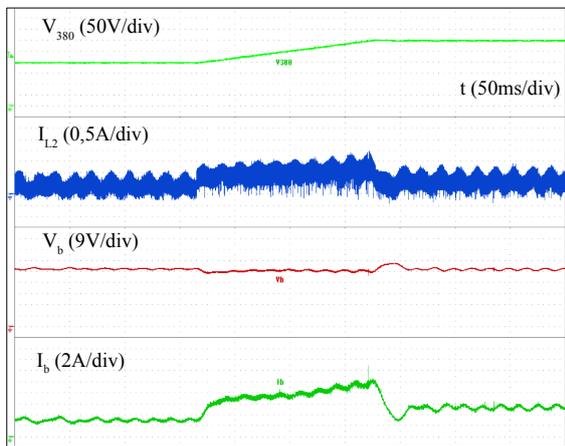


Figura 7: Degrau de tensão no barramento de 380 V.

da tensão do barramento de 380 V. O controle operou de modo satisfatório mudando a referência conforme foi exigido.

#### 4.2 Experimento 2: Inserção de Carga no Barramento de 380 V

No experimento 2, o barramento de 380 V está inicialmente sem carga e o barramento de 24 V está com uma carga de  $60 \Omega$  (9,6 W) conectada. No instante  $t = 50$  ms é conectada uma carga de  $561 \Omega$  (160,4 W) ao barramento de 380 V. Na Figura 8 observa-se que o transitório foi de 350 ms, houve um afundamento de 80 V na lado de 380 V e um aumento na corrente da bateria, com um sobressinal de aproximadamente 5 A. Devido à inserção de uma carga no barramento de 380 V a corrente do indutor  $L_2$  deixa de ser zero e torna-se positiva. O controle do barramento de 380 V operou de modo satisfatório voltando ao valor de referência, de 300 V, após o transitório.

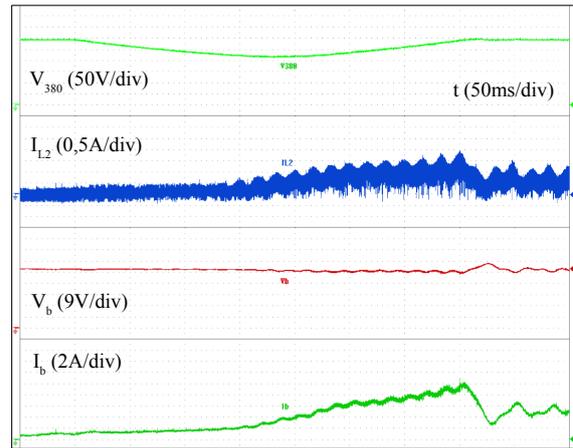


Figura 8: Inserção de carga no barramento de 380 V.

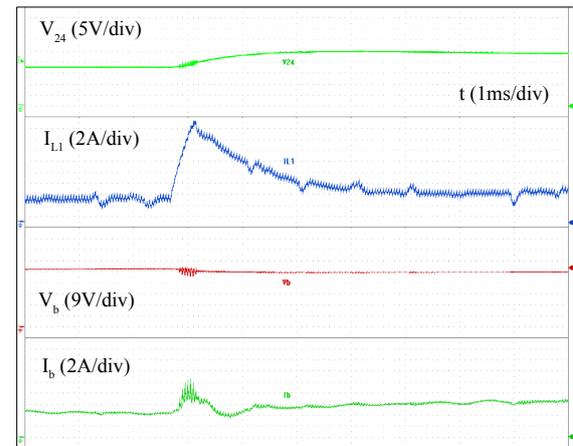


Figura 9: Degrau de tensão no barramento de 24 V.

#### 4.3 Experimento 3: Mudança na Tensão de Referência do Barramento de 24 V

No experimento 3 foi dado um degraú de 6 V (degraú de 25 %), partindo de 18 V para 24 V, na tensão de referência do barramento de 24 V. As cargas conectadas aos barramentos de 24 e 380 V foram de  $4 \Omega$  (144 W) e  $1452 \Omega$  (62 W) respectivamente. Observa-se na Figura 9 que o transitório foi de 2,2 ms e que houve um aumento na corrente da bateria e na corrente do indutor  $L_1$ , com um sobressinal em torno de 13 A, devido ao aumento da tensão do barramento de 24 V. O controle operou de modo satisfatório mudando a referência conforme foi exigido.

#### 4.4 Experimento 4: Inserção de Carga no Barramento de 24 V

No experimento 4, o barramento de 24 V está inicialmente sem carga e o barramento de 380 V está com uma carga de  $1452 \Omega$  (62 W) conectada. Num dado instante é conectada uma carga de  $4 \Omega$  (144 W) ao barramento de 24 V. Na Figura 10 observa-se que o transitório foi de 5 ms e que houve um afundamento de 2,5 V na tensão do barramento de 24 V e um aumento na corrente da bateria e

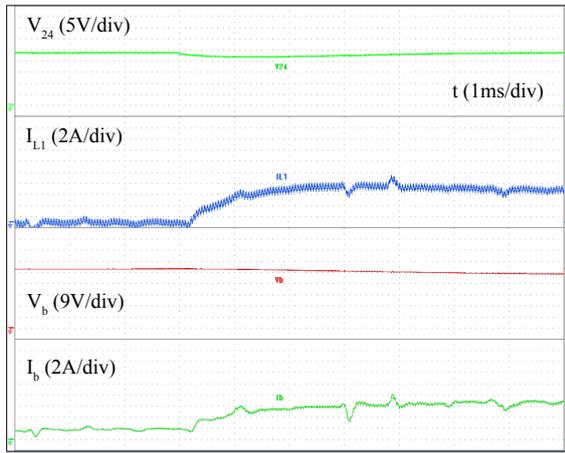


Figura 10: Inserção de carga no barramento de 24 V.

na corrente do indutor  $L_1$  devido a inserção da nova carga. O controle do barramento de 24 V operou de modo satisfatório voltando ao seu valor de referência após o transitório.

#### 4.5 Experimento 5: Inserção de um Módulo PV no Barramento de 24 V

Neste experimento, utilizou-se uma fonte de corrente (FC), representando um PV, conectada ao barramento de 24 V, inicialmente fornecendo 0 A de corrente. Uma carga de  $1452\ \Omega$  (62 W) está conectada ao barramento de 380 V. Em um dado instante é dado um degrau de corrente de 0 para 6 A (144W) na FC conectada ao barramento de 24 V. Na Figura 11 observa-se que o transitório foi de 12 ms e que houve um valor de pico de tensão de 2,5 V no barramento de 24 V e um sobressinal de corrente de 6 A na corrente do indutor  $L_1$ , que passa agora a ser negativa indicando que a FC está fornecendo energia para o sistema.

Também se observa que a bateria inicialmente estava fornecendo energia para o sistema, devido a corrente positiva, e após a FC ser conectada ao barramento de 24 V a bateria passou a ser carregada, a corrente ficou negativa, conforme mostrado na Figura 11. O controle do barramento de 24 V operou de modo satisfatório voltando ao seu valor de referência após o transitório. Na Figura 12, observa-se que degrau de corrente de 0 para 6 A da FC conectada ao barramento de 24 V, praticamente não teve nenhum efeito na tensão do barramento de 380 V. Houve apenas uma leve oscilação na corrente do indutor  $L_2$ .

#### 4.6 Experimento 6: Degrau de Carga no Barramento de 380 V Quando o Módulo PV está Conectado ao Barramento de 24 V

No experimento 6, inicialmente uma carga de  $1452\ \Omega$  (62 W) está conectada ao barramento de 380 V e uma FC está conectada ao barramento de 24 V, fornecendo 6 A (144W) ao sistema. Num dado instante é conectada uma carga de  $726\ \Omega$

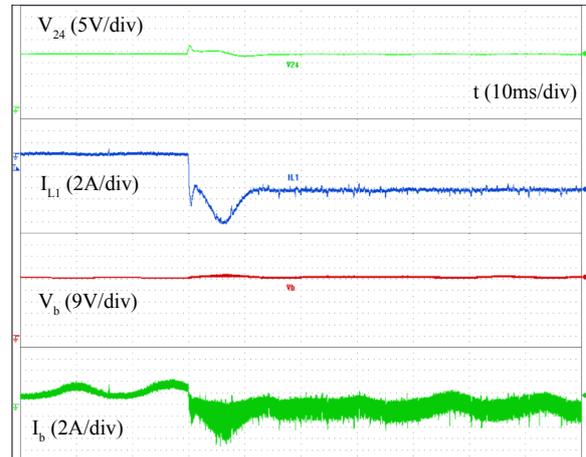


Figura 11: Inserção de uma fonte de corrente no barramento de 24 V.

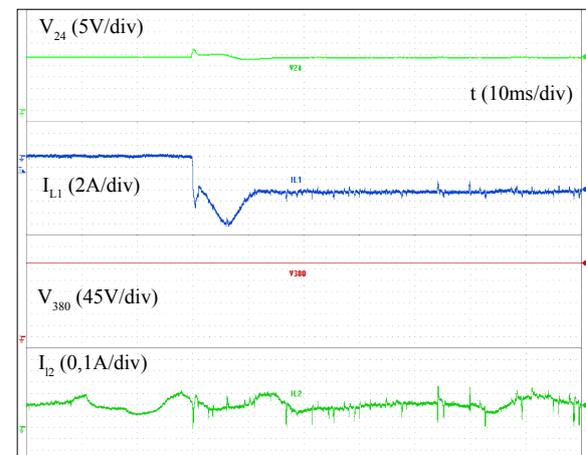


Figura 12: Efeito da inserção de um módulo PV no barramento de 24 V vista pelo barramento de 380 V.

(124 W) ao barramento de 380 V, resultando em uma resistência equivalente de  $484\ \Omega$  (186 W). Na Figura 13 observa-se que o transitório foi de 40 ms e que a corrente do indutor  $L_2$  aumentou devido ao aumento de carga. Observa-se também que a bateria estava inicialmente sendo carregada, uma vez que a corrente era negativa, e que após o aumento de carga a FC não consegue mais suprir a carga e carregar a bateria, necessitando assim que a bateria entre em operação para complementar a demanda da carga. A perturbação na tensão do barramento de 380 V foi imperceptível.

## 5 Conclusões

As principais contribuições explicitadas neste estudo foram: (i) proposta de uma MR c.c. com três níveis de tensão para aplicações residenciais e comerciais futuras; (ii) proposta de uma nova topologia de conversor c.c./c.c. isolado com três portas bidirecionais; (iii) modelagem e definição do sistema de controle do conversor proposto; (iv) comprovação experimental do conversor proposto.

Ao final, concluiu-se que o uso do conversor c.c./c.c. isolado com três portas bidirecionais

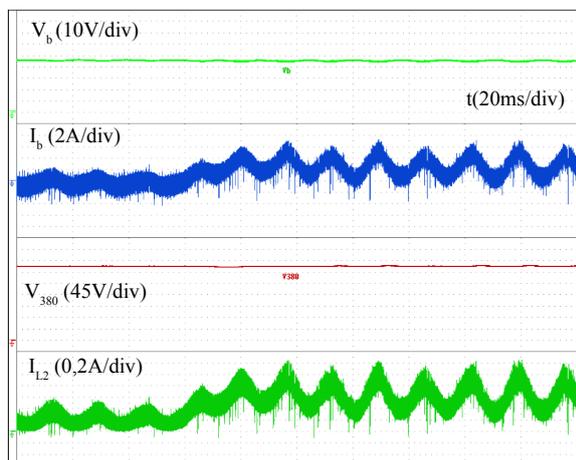


Figura 13: Inserção de carga no barramento de 380 V com uma fonte de corrente conectada ao barramento de 24 V.

apresentado neste trabalho é uma excelente opção para o uso em MRs c.c. devido a sua versatilidade em operar tanto conectado a rede principal como desconectado da mesma. O fato do conversor ser bidirecional em todas as suas portas, permite que cargas ou fontes possam ser conectadas em qualquer um de seus barramentos, assim como possibilita que o excesso de energia produzida na MR c.c. possa ser entregue à rede principal quando o conversor está conectado a ela, ou seja, entregue à bateria quando desconectada dela.

### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro da Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

### Referências

- Ailee, G. and Tschudi, W. (2012). Edison redux: 380 vdc brings reliability and efficiency to sustainable data centers, *IEEE Power and Energy Magazine* **10**: 50–59.
- Alves, R. L. (2008). *Concepção e análise de retificadores híbridos trifásicos unidirecionais*, Tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Blasi, B. R. (2013). *Dc microgrids: Review and applications*, Dissertação de mestrado, Kansas State University, Kansas, USA.
- Dragicevic, T., Lu, X., Vasquez, J. C. and Guerrero, J. M. (2016). Dc microgrids part ii: A review of power architectures, applications,

and standardization issues, *IEEE Transactions on Power Electronics* **31**: 3528–3549.

Fairley, P. (2012). Dc versus ac: The second war of currents has already begun [in my view], *Power and Energy Magazine, IEEE* **10**: 103–104.

Heldwein, M. L. (2009). Microrredes em corrente contínua: Qualidade de fornecimento e eficiência em futuras redes de distribuição. **url:** [http://marceloheldwein.paginas.ufsc.br/files/2012/09/Heldwein\\_UFSC\\_2009.pdf](http://marceloheldwein.paginas.ufsc.br/files/2012/09/Heldwein_UFSC_2009.pdf)

IEC (2005). Iec 60479-1 - effects of current on human beings and livestock - part 1: General aspects. **url:** <http://www.iec.ch/>

Justo, J. J., Mwasilu, F. and Jung, M. J. W. (2013). Ac-microgrids versus dc-microgrids with distributed energy resources: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **24**: 387–405.

Lasseter, R. H. (2002). Microgrids, *Proceedings of the IEEE PowerEngineering Society Winter Meeting* **1**: 305–308.

Lasseter, R. H. and Paigi, P. (2004). Microgrid: a conceptual solution, *Proceedings of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC 04)* **1**: 4285–4290.

Meah, K. and Ula, S. (2007). Comparative evaluation of hvdc and hvac transmission systems, *Power Engineering Society General Meeting, IEEE* **1**: 1–5.

Salomonsson, D., Soder, L. and Sannino, A. (2009). Protection of low-voltage dc microgrids, *IEEE Transactions on Power Delivery* **24**: 1045–1053.

Su, G. J. and Tang, L. (2009). A reduced-part, triple-voltage dc-dc converter for ev/hev power management, *Industry Applications Conference. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005* **24**: 2406–2410.

Tao, H., Kotsopoulos, A., Duarte, J. L. and Hendrix, M. A. M. (2005). Multi-input bidirectional dc-dc converter combining dc-link and magnetic-coupling for fuel cell systems, *Industry Applications Conference. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005* **1**: 2021–2028.

Wu, H., Chen, R., Zhang, J., Xing, Y., Hu, H. and Ge, H. (2011). A reduced-part, triple-voltage dc-dc converter for ev/hev power management, *IEEE Transactions on Power Electronics* **26**: 2697–2706.