

# CONVERSOR DAB APLICADO À CARGA DE BANCO DE BATERIAS EM UMA MICRORREDE COM GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

**Pablo Fernando Soardi Costa** – pablofscosta@gmail.com

**Pedro Henrique Bulegon Löbler** – phlobler@gmail.com

**Leonardo Lima Carvalho** - leonardo.limac@gmail.com

**Patrick Godoi Peranconi** - p.patrickgodoi@gmail.com

**Leandro Roggia** – roggia@gmail.com

**Luciano Schuch** - schuch.prof@gmail.com

Universidade Federal de Santa Maria, Grupo de Eletrônica de Potência e Controle – GEPOC, RS

**Resumo.** *Sistemas fotovoltaicos estão assumindo um papel importante na integração de fontes renováveis na geração de energia. Porém, essas fontes possuem características intermitentes, fazendo com que se torne necessário a integração de um sistema de armazenamento de energia (baterias, por exemplo) para o melhor aproveitamento da energia gerada. Para realizar o carregamento das baterias deve-se utilizar um conversor CC-CC com elevado ganho de tensão e isolamento galvânica entre entrada e saída, logo, o conversor DAB será utilizado para esta aplicação. Este trabalho tem como objetivo realizar o projeto de um sistema de controle de corrente e tensão para o conversor DAB, o qual será utilizado para carregar um banco de baterias em uma microrrede com geração fotovoltaica. Além disso, os resultados experimentais serão apresentados.*

**Palavras-chave:** *Conversor DAB, Carregamento de Banco de Baterias de Li-íon, Sistema Fotovoltaico.*

## 1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a estrutura da rede pode ser descrita por plantas de geração de energia convencionais, uma rede de transmissão e distribuição, e uma carga distribuída bem definida. Os principais centros de carga são normalmente localizados nas proximidades das grandes cidades. Porém, a fim de reduzir os gases do efeito estufa provenientes da geração de energia convencional, a rede elétrica existente passou a incorporar recursos de energia renováveis, as quais são o complemento necessário para a geração de energia elétrica tradicional. Esta geração de energia é baseada em sistemas que podem ser classificados como (Sechilariu; Wang; Locment, 2013):

- Sistema conectado à rede, com injeção de potência total e permanente;
- Sistema isolado, visto como um substituto de ligação à rede de serviço público, mais usual para locais remotos;
- Sistema *off-grid/on-grid* e de segurança da rede.

Devido a possibilidade de venda da energia gerada, a conexão com o sistema para a injeção da energia produzida tem sido proposto para estas aplicações. Porém, este aumento traz consigo algumas limitações técnicas, tais como flutuações de tensão e frequência da rede, tornando necessário que as fontes de geração convencionais operem sobrecarregadas para assegurar o equilíbrio entre a geração e a demanda de energia. Isto ocorre devido ao fato de que a geração de energia renovável apresenta característica intermitente (Sechilariu; Wang; Locment, 2013).

Por outro lado, estudos sobre sistemas conectados à rede têm sido propostos e realizados, como a utilização de conversores de potência abordados em (Zhang *et al.*, 2011), (Yang *et al.*, 2010), (Roman *et al.*, 2006), (Chen *et al.*, 2010) e na integração do sistema com a rede (Bragard *et al.*, 2010). No entanto, levando em conta a ausência da gestão integrada da rede, o desenvolvimento de sistemas renováveis conectados à rede poderia ser contido especialmente fazendo uso de gerenciamento em tempo real da capacidade da rede de energia.

Desta forma, as incertezas da energia produzida por fontes renováveis têm afetado as decisões de diferentes atividades relacionadas com o funcionamento dos sistemas de potência. Os custos de infraestrutura dos serviços de energia estão sendo impulsionados pela necessidade de atender a carga durante os picos de demanda, tornando necessária a redução destes picos. Desta forma evitando a necessidade de atualizações nas fontes geradoras, na transmissão e na distribuição de energia. Uma forma eficaz de alcançar a redução no pico de carga é a aplicação de sistemas de armazenamento de energia (*Energy Storage System* - ESSs), onde a energia elétrica possa ser armazenada durante o período fora de pico, e extraída durante o período de pico de carga ou demanda. Além do nivelamento da demanda, as baterias podem ser amplamente utilizadas para o controle de frequência, regulação de tensão e melhoria da qualidade de energia no sistema de distribuição. Todas estas aplicações servem para aumentar a confiabilidade e a estabilidade da rede (Karanki *et al.*, 2013).

Atualmente, o Brasil vem promovendo a diversificação da sua matriz energética, buscando alternativas para aumentar a segurança no abastecimento de energia elétrica, além de permitir a valorização das características e potencialidades regionais e locais (Guedes; Santos; Oliveira, 2009).

Há alguns fatores que favorecem a expansão do mercado de módulos fotovoltaicos no Brasil: o fato de o Brasil possuir grandes reservas de quartzo e silício (CGEE, 2009), matéria-prima importante para a construção dos painéis, e possuir um potencial solar muito favorável à geração. Os níveis médios de irradiação no Brasil variam de 4,25 a 5,50

kWh/m<sup>2</sup>/dia. Como comparação, na Alemanha estes índices variam entre 2,5 e 3,4 kWh/m<sup>2</sup>/dia e, na Espanha, de 3,3 a 5,1 kWh/m<sup>2</sup>/dia (Pereira *et al.*, 2006; EPE, 2012).

Devido às aplicações de ESSs em conjunto com sistemas fotovoltaicos e a sua importância para os novos sistemas de distribuição, este artigo apresenta um conversor CC-CC bidirecional (DAB) para realizar a interface entre um barramento CC e o banco de baterias em uma microrrede com geração fotovoltaica. O projeto dos controladores de tensão e de corrente utilizados durante o processo de carregamento das baterias e os resultados experimentais da aplicação também serão apresentados.

## 2. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS E BATERIAS DE LI-ÍON

Esta seção apresenta uma revisão bibliográfica referente à módulos fotovoltaicos e baterias de Li-íon. Inicialmente serão apresentadas as características dos painéis fotovoltaicos e posteriormente serão apresentados o conceito e algumas características das baterias de Li-íon.

### 2.1 Painéis Fotovoltaicos

A história da humanidade foi marcada por revoluções energéticas sucessivas, não por escassez de recursos, mas sim por uma visão voltada para fontes de menor custo e/ou maior qualidade, como a que parece estar havendo com a tecnologia fotovoltaica (Paulista; Machado; Rangel, 2017).

Com o desenvolvimento de novas tecnologias, nas décadas de 60 e 70, as células fotovoltaicas eram utilizadas principalmente para o fornecimento de energia para satélites e veículos espaciais, e depois passaram a ser usadas para a geração de energia para situações do cotidiano. Atualmente, as células solares vêm ganhando mais espaço, sobretudo pela redução do custo de produção, proporcionado pelas novas tecnologias de fabricação. De acordo com (Paulista; Machado; Rangel, 2017) essa queda do valor dos painéis fotovoltaicos pode ser associada ao imperativo ecológico em que se vive nos últimos anos.

O país possui um ótimo índice de radiação solar, principalmente no Nordeste. Na região do semiárido estão os melhores índices, com valores típicos de 1.752 a 2.190 kWh/m<sup>2</sup> por ano de radiação incidente. Essa característica coloca o país em vantagem com relação aos países industrializados no que tange à utilização da energia solar fotovoltaica.

Um sistema fotovoltaico de energia é composto por um ou mais módulos fotovoltaicos e por um conjunto de equipamentos complementares, como acumuladores eletroquímicos, controladores de carga, inversores e outros equipamentos de proteção. Esses componentes variam de acordo com a aplicação do sistema fotovoltaico (Rüther, 2004).

Segundo (Pinho e Galdino, 2014), os sistemas fotovoltaicos são classificados das seguintes formas:

**a) Sistemas autônomos ou híbridos:** são sistemas que funcionam sem ligação à rede de distribuição elétrica das concessionárias e funcionam tanto com ou sem o armazenamento de energia elétrica.

**b) Sistemas ligados à rede:** um sistema fotovoltaico conectado à rede, conforme, em inglês *on-grid* ou *grid-tie*, é um gerador de energia que tem como combustível a energia solar, e que trabalha em conjunto com a rede elétrica da distribuidora de energia.

Os estudos e o desenvolvimento de painéis fotovoltaicos vêm crescendo muito nos últimos anos, porém, a sua fabricação ainda é cara o que o torna menos atrativo para os consumidores. Outro problema, é que seu auge de produção é diferente do máximo de consumo, o que leva a necessidade de se utilizar sistemas de armazenamento de energia, os quais armazenam a energia gerada em excesso no horário de pico de produção dos painéis e devolvem para a rede nos horários em que o consumo é maior do que a produção.

Mesmo com muitas variáveis como o alto custo e a escolha entre as tecnologias disponíveis os painéis fotovoltaicos são uma solução para a consolidação das fontes renováveis e um futuro mais limpo para a produção de energia. Deve-se incentivar a produção e o desenvolvimento dessa tecnologia para que o país não dependa somente da produção hidrelétrica e termoeletrônica.

### 2.2 Baterias de Li-íon

As baterias de Li-íon podem ser carregadas por dois métodos distintos. O método de tensão constante, o qual apresenta maior simplicidade de aplicação e, o método Corrente Constante / Tensão Constante (*Constant Current / Constant Voltage* - CC/CV), o qual é o mais aplicado a este tipo de baterias.

O primeiro método consiste em manter a tensão de saída constante com o valor da tensão nominal da bateria. A corrente pode ser limitada a valores inferiores ou até mesmo ao valor nominal da bateria. Deste modo, quando a bateria está carregada a corrente de carga é rapidamente reduzida. Assim, a bateria é considerada completamente carregada quando a corrente de carga reduz para um valor inferior a 0,1 C (Teofilo; Merritt; Hollandsworth, 2000).

Em (Mukai *et al.*, 2012) é apresentado o modo de carga corrente constante / tensão constante para as baterias de Li-íon. O modo de carga é iniciado com corrente (C) constante a partir da tensão de corte ( $V_{off}$ ) da bateria, valores entre 2,5 e 2,7 V até a mesma atingir sua tensão de equalização ( $V_{eq}$ ). Após atingir  $V_{eq}$  o modo de tensão constante entra em operação, nesta etapa a tensão se mantém constante e a corrente é reduzida naturalmente até aproximadamente 2% de C (Ah). Assim que a corrente da bateria atinge 2 % de C a tensão é reduzida para o valor de flutuação ( $V_{flu}$ ), nesta etapa o processo de carga é encerrado e a bateria atinge sua carga nominal. O método de carga pode ser visualizado na Figura 1.

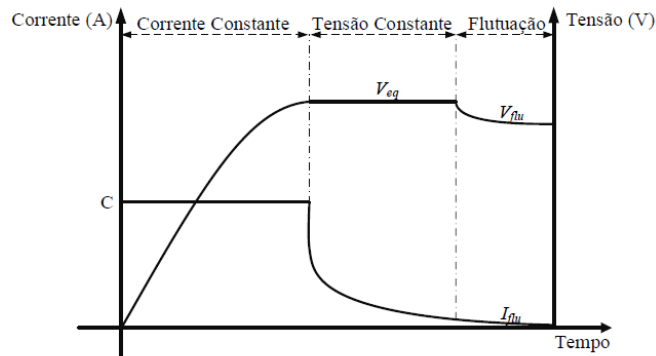


Figura 1 - Método de carga CC-CV

Outro fator importante para que ocorra o carregamento adequado das baterias é a equalização de tensão entre as células ligadas em série. Este processo deve ser realizado antes do início do carregamento das baterias. O desbalanceamento causa tensões individuais diferentes entre as células, o que pode causar uma redução de até 25% da capacidade de um pacote de células. As células de bateria são consideradas balanceadas quando a diferença de tensão entre células possuir valor inferior a 3 % da tensão nominal das células (Teofilo; Merritt; Hollandsworth, 2000).

### 3. CONVERSOR DUAL ACTIVE BRIDGE (DAB)

Em sistemas fotovoltaicos, conversores CC-CC unidirecionais são utilizados para realizar a interface entre os geradores fotovoltaicos e o barramento CC. A função destes conversores é elevar ou reduzir a tensão do painel fotovoltaico e rastrear o ponto de máxima potência. Já os conversores CC-CC bidirecionais são utilizados para carregar ou descarregar as baterias, como pode ser visualizado na Fig. 2 (a).

O conversor *Dual Active Bridge* (DAB), originalmente proposto em (De Doncker; Divan; Kheraluwala, 1991), é um conversor CC-CC constituído por duas pontes ativas interligadas por um transformador de alta frequência, como ilustrado na Fig. 2 (b). Fluxo bidirecional de energia e capacidade de processamento de energia com elevada densidade de potência são características importantes do DAB. A indutância  $L_{dab}$ , composta pela indutância de dispersão do transformador e, quando necessário, por uma indutância auxiliar conectada em série, é o elemento responsável pela transferência de energia entre a porta primária (ponte ativa de entrada) e a porta secundária (ponte ativa de saída). Cada ponte é controlada com ciclo de trabalho constante (50%) para garantir uma forma de onda de tensão quadrada de alta frequência nos terminais do transformador.

Considerando a presença da indutância de dispersão do transformador e uma indutância auxiliar com valor projetado e conhecido, é adotada a estratégia de modulação por defasagem angular (*Phase-Shift Modulation*- PSM), a qual permite o controle do fluxo de potência entre as portas através da defasagem angular entre as tensões do lado primário e secundário do transformador. Além disso, os interruptores de cada ponte são controlados por pulsos de comando com ciclo de trabalho constante igual a 50% para garantir uma forma de onda de tensão quadrada de alta frequência nos terminais do transformador. Com o ajuste do ângulo de defasagem, a transferência bidirecional de potência pode ser alcançada (Alonso *et al.*, 2010).

#### 3.1 Etapas de operação do conversor DAB

Durante um período completo de operação o conversor DAB possui seis etapas de operação. As análises de cada etapa consideram que o circuito esteja em regime permanente, ou seja, os capacitores  $C_{cc}$  e  $C_o$  estão carregados com as tensões de entrada e saída, respectivamente. E estas serão consideradas constantes durante toda a análise. Além disso, as

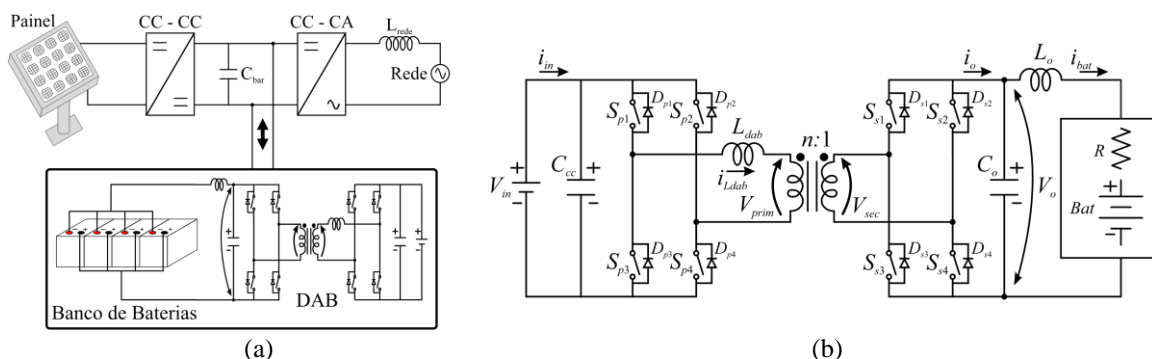


Figura 2 – Sistema fotovoltaico conectado à rede com banco de baterias: (a) Sistema PV completo, (b) Conversor DAB.

etapas de operação são mostradas para a situação de transferência direta de energia do primário para o secundário.

**Etapa 1 ( $t_0-t_1$ ).** Nesta etapa a corrente não circula pelas chaves e sim pelos diodos  $D_{p1}$ ,  $D_{p4}$ ,  $D_{s2}$  e  $D_{s3}$ . Logo, a corrente na indutância ( $i_{L_{dab}}$ ) está partindo de um valor inicial negativo definido como  $i_{L_{dab}}(0)$ . A tensão na indutância auxiliar ( $L_{dab}$ ) nesta etapa será a tensão de entrada somada à tensão de saída refletida para o lado primário. Esta etapa chega ao fim quando a corrente se torna igual a zero. Deste modo a corrente na indutância auxiliar  $i_{L_{dab}}$  pode ser definida por (1).

$$i_{L_{dab}} = (-i_{L_{dab}}(0)) + \left( V_{in} + \frac{V_o}{n} \right) \cdot \frac{\omega t}{\omega_s L_{dab}} \quad (1)$$

Sendo  $\omega_s$  a frequência angular de comutação ( $\omega_s = 2\pi f_s$ ),  $f_s$  a frequência de comutação,  $V_{in}$  a tensão de entrada,  $V_o$  a tensão de saída,  $n$  a relação de transformação do transformador de alta frequência e  $L_{dab}$  a indutância de transferência de potência.

**Etapa 2 ( $t_1-t_2$ ).** Esta etapa inicia quando a corrente  $i_{L_{dab}}$  chega a zero. Durante este intervalo, os interruptores  $S_{p1}$ ,  $S_{p4}$ ,  $S_{s2}$  e  $S_{s3}$  conduzem e  $i_{L_{dab}}$  torna-se positiva. A inclinação da reta da corrente  $i_{L_{dab}}$  não se altera, mantendo-se igual ao definido na Eq. (1). Esta etapa é concluída quando há uma comutação nos interruptores do lado secundário, ou seja,  $S_{s2}$  e  $S_{s3}$  são bloqueados e  $S_{s1}$  e  $S_{s4}$  são habilitados a conduzir.

**Etapa 3 ( $t_2-t_3$ ).** Na terceira etapa quando os interruptores  $S_{s2}$  e  $S_{s3}$  passam ao estado de bloqueio e os interruptores  $S_{s1}$  e  $S_{s4}$  ao estado de condução. A corrente através da indutância  $L_{dab}$  mantém-se positiva e ainda circula através de  $S_{p1}$  e  $S_{p4}$ . Já no lado secundário, circula pelos diodos  $D_{s1}$  e  $D_{s4}$ . Contudo, a inclinação da reta da corrente é alterada, uma vez que a polaridade da tensão do lado secundário em relação à  $V_o$  é invertida. A Eq. (2) determina a corrente nesta etapa. O final desta etapa representa a metade do ciclo de operação do conversor.

$$i_{L_{dab}}(\omega t) = i_{L_{dab}}(\delta) + \left( V_{in} - \frac{V_o}{n} \right) \cdot \frac{(\omega t - \delta)}{\omega_s L_{dab}} \quad (2)$$

**Etapa 4 ( $t_3-t_4$ ).** Esta etapa tem início quando ocorre a comutação dos interruptores do lado primário,  $S_{p1}$  e  $S_{p4}$  passam para o estado de bloqueio e os interruptores  $S_{p2}$  e  $S_{p3}$  para o estado de condução. Como a corrente ainda é positiva, está circulando pelos diodos  $D_{p2}$  e  $D_{p3}$ , no lado primário, e por  $D_{s1}$  e  $D_{s4}$  no lado secundário. Logo, a corrente  $i_{L_{dab}}$  é definida pela Eq. (3).

$$i_{L_{dab}}(\omega t) = i_{L_{dab}}(\pi + \delta) - \left( V_{in} + \frac{V_o}{n} \right) \cdot \frac{(\omega t - \pi - \delta)}{\omega_s L_{dab}} \quad (3)$$

**Etapa 5 ( $t_4-t_5$ ).** Esta etapa inicia quando  $i_{L_{dab}}$  chega a zero. A corrente passa a circular por  $S_{p2}$ ,  $S_{p3}$ ,  $S_{s1}$  e  $S_{s4}$ . Tanto a inclinação da reta quanto a equação da corrente através de  $L_{dab}$  mantêm-se iguais às da etapa anterior. Esta etapa é finalizada quando ocorre a comutação dos interruptores do lado secundário.

**Etapa 6 ( $t_5-t_6$ ).** Esta etapa tem início no instante em que os interruptores  $S_{s1}$  e  $S_{s4}$  passam para o estado de bloqueio e  $S_{s2}$  e  $S_{s3}$  ao estado de condução. A corrente no lado primário circula por  $S_{p2}$  e  $S_{p3}$ , já no lado secundário circula através dos diodos  $D_{s2}$  e  $D_{s3}$ . A corrente através de  $L_{dab}$  nesta etapa é expressa pela Eq. (4).

$$i_{L_{dab}}(\omega t) = i_{L_{dab}}(\pi - \delta) + \left( -V_{in} + \frac{V_o}{n} \right) \cdot \frac{(\omega t - \pi - \delta)}{\omega_s L_{dab}} \quad (4)$$

A Figura 3 apresenta as formas de onda durante as etapas de operação do conversor DAB com modulação PSM. Pode-se observar a presença de ondulações significativas tanto na corrente de entrada quanto na corrente de saída.

#### 4. PROJETO DOS CONTROLADORES DE CORRENTE E TENSÃO DO CONVERSOR DAB

Para o projeto dos controladores do conversor DAB torna-se necessário possuir as equações dos modelos matemáticos que representam o conversor. Desta forma, os modelos que serão utilizados para o projeto dos controladores de corrente e tensão são apresentadas nas Eq. (5) e (6), respectivamente. Esses modelos são definidos através do teorema da Linearização da Corrente de Saída.

$$\frac{I_o(s)}{\delta(s)} = \frac{V_{in}}{2\pi f_s L_{dab} n} \left( 1 - \frac{2\delta}{\pi} \right) \left( \frac{1}{s^2 L_o C_o + s R_o C_o + 1} \right) \quad (5)$$

$$\frac{V_o(s)}{\delta(s)} = \frac{V_{in}}{2\pi f_s L_{dab} n} \left(1 - \frac{2\delta}{\pi}\right) \left( \frac{sL_o + R_o}{s^2 L_o C_o + sR_o C_o + 1} \right) \quad (6)$$

onde  $V_{in}$  refere-se a tensão de entrada,  $f_s$  a frequência de comutação dos interruptores,  $L_{dab}$  a indutância de transferência de potência,  $\delta$  é o ângulo de defasagem,  $L_o$ ,  $C_o$  e  $R_o$  são a indutância de saída, a capacitância de saída e resistência

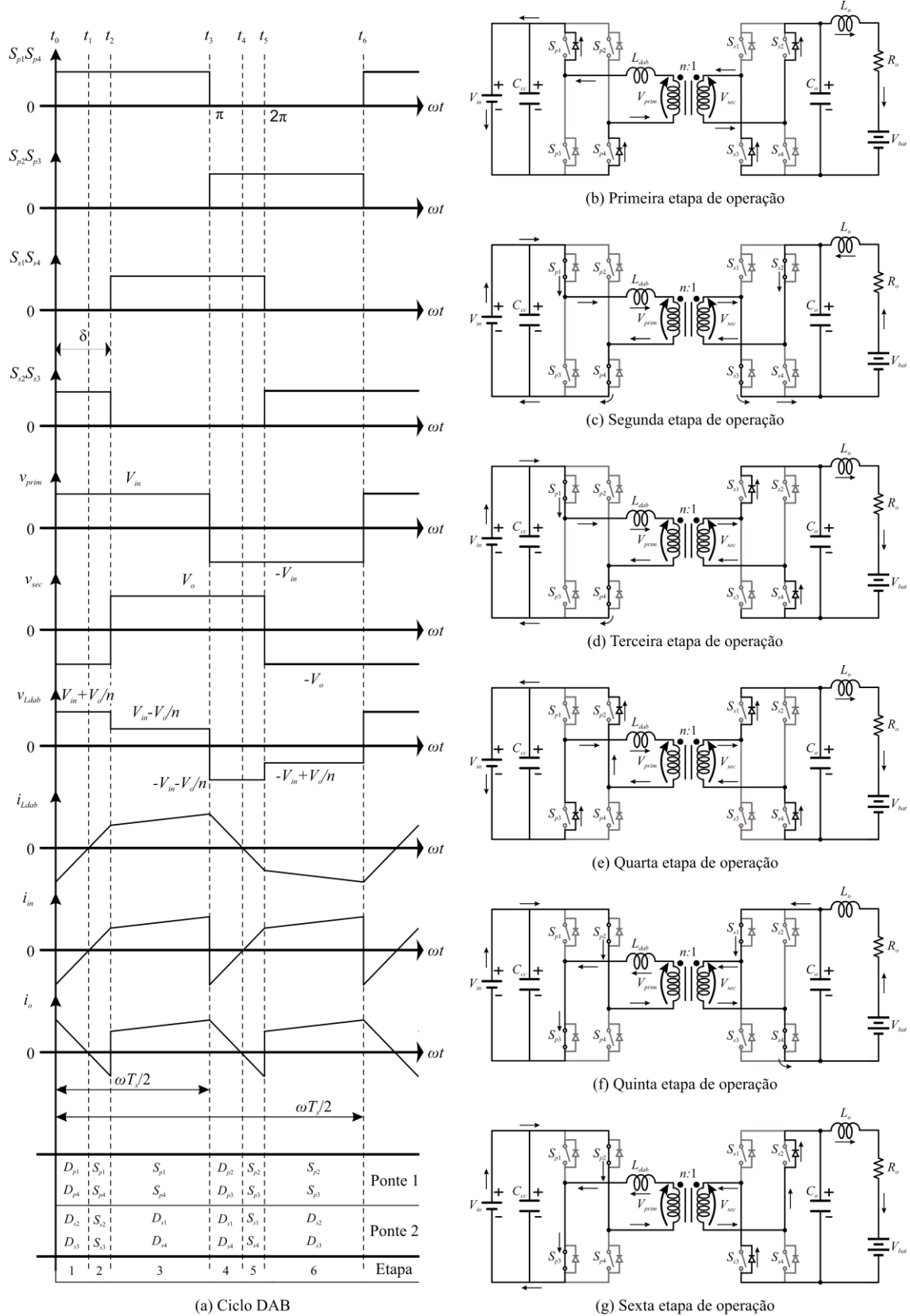


Figura 3 - Formas de onda e etapas de operação do conversor DAB.

interna das baterias, respectivamente.

Além do modelo a ser utilizado, outra questão a ser definida antes do projeto do controlador é o ponto de operação para o modelo de pequenos sinais, pois o conversor pode operar dentro de toda a faixa de carga da bateria. Dessa maneira, para cada ângulo de defasagem o modelo apresenta diferentes ganhos na resposta em frequência. Logo, para este projeto o ângulo  $\delta$  foi definido em  $20^\circ$ , que é um ângulo próximo do ponto de operação do conversor. Com a definição dos modelos e do ângulo de linearização do conversor, pode-se então iniciar o projeto dos controladores.

#### 4.1 Controlador de corrente

O projeto do controlador da corrente de saída do conversor DAB foi realizado com base no diagrama de blocos do sistema de controle digital ilustrado na Figura 4. A planta  $G_f(w)$  foi obtida de acordo com (Ogata, 1995), já incluindo o atraso de implementação, o efeito da conversão ZOH e adotando os parâmetros da Tabela 1. A frequência de amostragem  $f_a$  adotada foi de 20 kHz e o modulador PWM foi levado em consideração na modelagem da planta.

Tabela 1 - Especificações do conversor DAB.

Especificação	Valor
Tensão CC nominal de entrada ( $V_{in}$ )	400 V
Tensão CC nominal de saída ( $V_o$ )	50 V
Potência ativa nominal ( $P_o$ )	500 W
Ganho de tensão ( $M_{dab}$ )	1
Relação de transformação do transformador ( $n_{Tr}$ )	0,125
Frequência de comutação ( $f_s$ )	20 kHz
Rendimento teórico $\eta_{dab}$	100 %
Ângulo de defasagem nominal ( $\delta$ )	$20^\circ$
Indutor auxiliar ( $L_{dab}$ )	790,1 $\mu$ H
Capacitor de saída ( $C_o$ )	560 $\mu$ F
Indutor de saída ( $L_o$ )	141,2 $\mu$ H

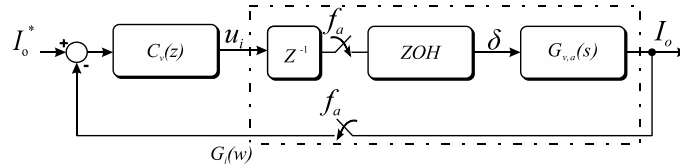


Figura 4 - Diagrama de blocos do sistema de controle do conversor DAB.

Na Figura 5 é apresentado o diagrama de blocos simplificado no domínio  $w$  da malha de controle de corrente do DAB.

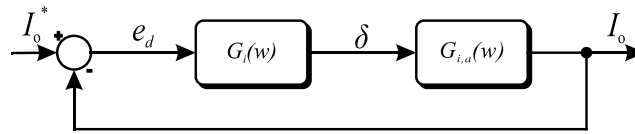


Figura 5 - Diagrama de blocos simplificado da malha de controle de corrente do conversor DAB no domínio  $w$ .

Como parâmetros de desempenho, foram adotados uma margem de fase  $60^\circ$  e uma frequência de cruzamento de ganho de 7 Hz. Com a intenção de reduzir o erro em regime permanente um controlador Proporcional Integral (PI) foi projetado, o qual é definido pela função de transferência (7):

$$G_i(w) = k_p + \frac{k_i}{w} = 0,031707 \frac{(w+3140)}{w} \quad (7)$$

Aplicando a transformada bilinear inversa é obtida a função de transferência do controlador no domínio  $z$ , dada pela Eq. (8).

$$G_i(z) = 0,0342 \frac{(z-0,854)}{(z-1)} \quad (8)$$

O zero adicionado ao PI foi alocado em 500 Hz e o ganho foi ajustado para alcançar as especificações propostas. Na Figura 6 é apresentada a resposta em frequência da função de transferência de laço aberto compensada da malha de corrente do conversor DAB. Percebe-se que as especificações de projeto foram atendidas.

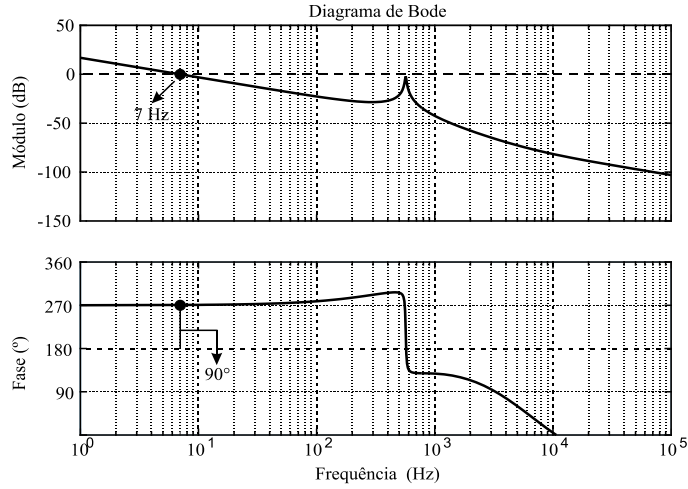


Figura 6 - Resposta em frequência da malha de corrente no plano  $w$  após a inserção do controlador.

#### 4.2 Controlador de Tensão

O projeto do controlador da tensão de saída do conversor DAB foi realizado com base no diagrama de blocos do sistema equivalente no plano  $w$  como o ilustrado na Figura 7. A função de transferência  $G_v(w)$  foi obtida adotando os parâmetros da Tabela 1. A frequência de amostragem  $f_a$  considerada foi de 20 kHz.

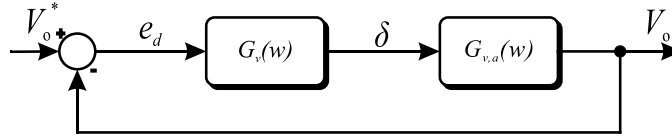


Figura 7 - Diagrama de blocos simplificado da malha de controle de tensão do conversor DAB no domínio  $w$ .

A planta  $G_v(w)$  foi obtida através da discretização do modelo de saída do conversor DAB e da sua respectiva conversão para o plano  $w$ . A frequência de cruzamento de ganho adotada foi de 0,2 Hz, enquanto que a margem de fase desejada foi estipulada em 60°. O controlador projetado no plano  $w$  para atender a estas especificações de projeto é do tipo PI, conforme o seguinte:

$$G_v(w) = k_p + \frac{k_i}{w} = 0,06312 + \frac{(w + 3140)}{w} \quad (9)$$

Realizando a transformada bilinear inversa na função de transferência  $G_v(w)$  encontra-se a função de transferência no domínio  $z$ , conforme a Eq. (10).

$$G_v(z) = 0,07939 \frac{(z - 0,924)}{(z - 1)} \quad (10)$$

Neste projeto, o zero adicionado ao controlador PI foi alocado em 500 Hz, da mesma maneira que no controlador de corrente. O ganho foi ajustado para alcançar as especificações propostas. A Figura 8 mostra a resposta em frequência da função de transferência de laço aberto compensada da malha de tensão. Pode-se perceber que as especificações de projeto foram atendidas.

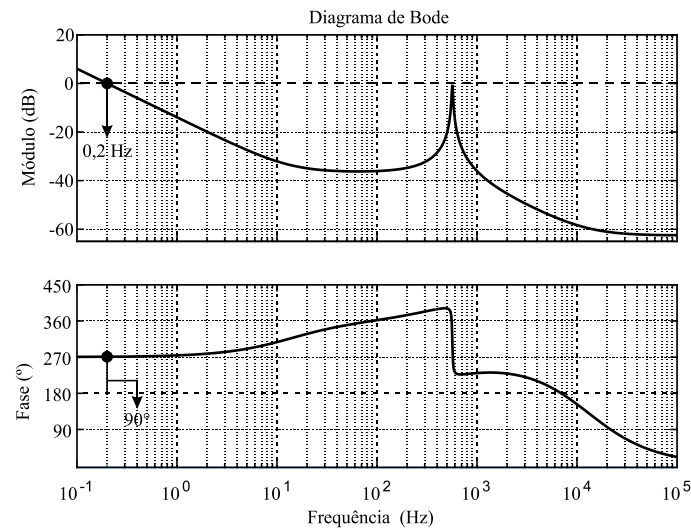


Figura 8 - Resposta em frequência da malha de tensão no plano w após a inserção do controlador.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Inicialmente o conversor DAB foi testado para um ângulo nominal de  $20^\circ$  em malha aberta. As tensões entre o coletor e emissor dos interruptores do lado primário e secundário do conversor ( $v_{CE\_prim}$  e  $v_{CE\_sec}$ ) e a corrente através da indutância de transferência de potência (corrente do lado primário do transformador)  $i_{prim}$  são ilustradas na Figura 9, considerando uma carga resistiva nominal de saída de  $5 \Omega$ . Nota-se que o ângulo de defasagem imposto ao DAB estabiliza-se em torno de  $19^\circ$ , isto fica visível na defasagem entre as tensões  $v_{CE\_prim}$  e  $v_{CE\_sec}$ . Por fim, percebe-se que a corrente através do enrolamento primário do transformador possui o formato esperado, sendo o seu valor eficaz bem próximo ao calculado.

Através da Figura 9 pode-se observar que o conversor DAB projetado e implementado está operando de acordo com o projeto. Não apresenta sobressinais na corrente da indutância de transferência de potência e nem nas tensões entre coletor e emissor dos interruptores de ambas as pontes.

Para comprovar o funcionamento do controlador de corrente desenvolvido para o conversor DAB foram realizados testes onde somente a malha de corrente foi implementada. Para comprovar o funcionamento da malha de corrente foi realizado um degrau na referência do controlador de corrente. A Fig. 10 apresenta a forma de onda da corrente de saída, onde pode-se perceber que a corrente passa de aproximadamente 8,3 A para o valor da corrente nominal após mudança de referência da malha de corrente (10 A). Outro fator que comprova o funcionamento do controlador é a variação de corrente obtida após a corrente se estabilizar ( $\Delta=1,65$  A). Ainda se torna visível na Fig. 10 o tempo de acomodação da corrente que fica em torno de 98 ms.

A Fig. 11 mostra o resultado em malha fechada com o controlador de tensão projetado. De maneira a comprovar o funcionamento do controlador, um degrau na referência foi aplicado. A Fig. 11 apresenta a forma de onda da tensão de saída durante o degrau. Percebe-se que a tensão passa de 41,3 V para o valor de aproximadamente 54 V (tensão de

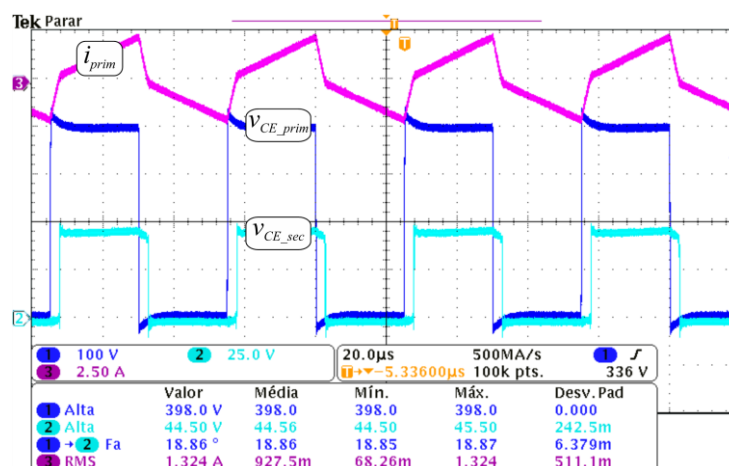


Figura 9 - Tensões entre coletor e emissor dos interruptores do lado primário e secundário ( $S_{p1}$  e  $S_{s1}$ ) (Ch1: tensão coletor/emissor interruptor do lado primário do DAB (100 V/div); Ch2: tensão coletor/emissor interruptor do lado secundário do DAB (25 V/div); Ch3: corrente através da indutância de transferência de potência (2,5 A/div)).



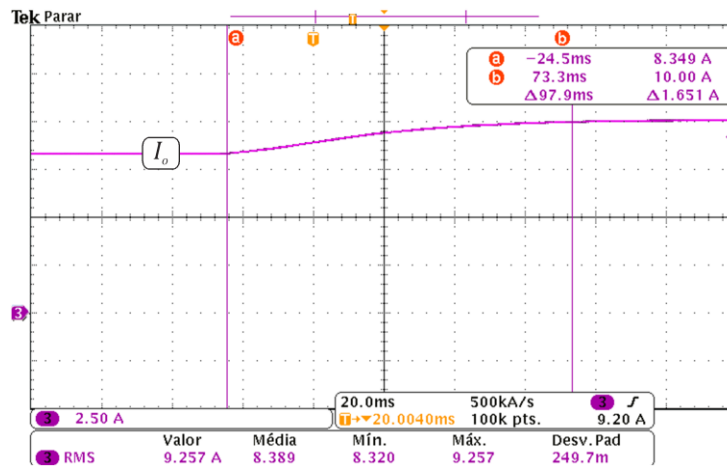


Figura 10 - Distúrbio na referência de corrente.

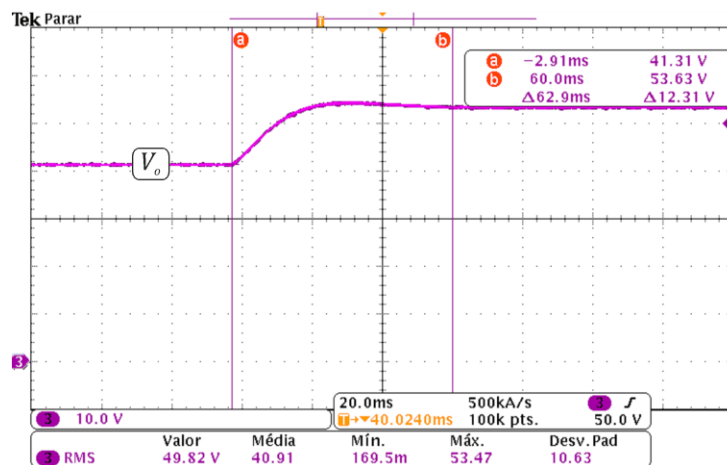


Figura 11 - Distúrbio na referência de tensão.

referência em malha fechada). Ainda pode-se observar que a variação entre as tensões antes e após o degrau na referência foi de 12,31 V e que o controlador levou aproximadamente 63 ms para se estabilizar.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As inserções de fontes renováveis no SEP tornaram-se cada vez mais frequentes devido sua facilidade de aplicação, retorno financeiro com a venda ou reutilização da energia gerada. Porém, para que se possa fazer uso da energia gerada em períodos variados do dia ou realizar a venda, há necessidade de agregar um ESS ao sistema, aumentando assim o aproveitamento da energia produzida pela planta. Para realizar o carregamento do ESS é necessário um conversor CC-CC com elevado ganho de tensão e isolamento galvânica, sendo utilizado o conversor DAB para esta aplicação. Logo, este trabalho apresentou o desenvolvimento do projeto de dois controladores para o conversor DAB para o carregamento de um banco de baterias. Inicialmente o projeto de um controlador de corrente com frequência de cruzamento de 7 Hz e margem de fase mínima de 60° foi apresentado e, na sequência, o projeto de um controlador de tensão com frequência de cruzamento de 0,2 Hz e margem e fase mínima de 60°. Após o desenvolvimento do projeto de cada controlador, resultados experimentais são apresentados para comprovar o funcionamento de cada um dos controladores. Observa-se que os valores de corrente e tensão do conversor em malha aberta apresentam valores inferiores aos encontrados após o fechamento das malhas de controle. Para corroborar os resultados mudanças nas referências de tensão e corrente foram realizadas. Após o degrau as variáveis controladas tenderam ao seu novo valor comprovando assim que os controladores atuam de maneira satisfatória sem grandes sobressinais e com resposta dentro do proposto.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- Alonso, A. R. *et al.* An overall study of a Dual Active Bridge for bidirectional DC / DC conversion. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, p. 1129–1135, 2010.
- Bragard, M. *et al.* The balance of renewable sources and user demands in grids: Power electronics for modular battery energy storage systems. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 25, n. 12, p. 3049–3056, 2010.
- CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Estudo prospectivo em energia fotovoltaica. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2009. (Nota Técnica).
- Chen, Y.-M. *et al.* The AC Line Current Regulation Strategy for the Grid-Connected PV System. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 25, n. 1, p. 209–218, 2010.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira. Rio de Janeiro: EPE, 2012. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos\\_23/NT\\_EnergiaSolar\\_2012.pdf](http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf)>.
- Guedes, L. M. Santos, E. C., Oliveira, M. A. G. Alocação de geração distribuída em redes de distribuição radiais considerando análise de curva de carga. XIII Encontro Regional Ibero Americano do Comitê Nacional Brasileiro de 2009.
- Karanki, S. B. *et al.* Optimal location of battery energy storage systems in power distribution network for integrating renewable energy sources. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2013
- Mukai, D. *et al.* Development of Large High-performance Lithium-ion Batteries for Power Storage and Industrial Use Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2012.
- Ogata, K. Discrete Time Control Systems, 1995.
- Paulista, C.R., Machado, T.S., Rangel, J.J.A. Análise da Expansão da Geração Elétrica Fotovoltaica e Emissões de Dióxido de Carbono. Revista Produção e Desenvolvimento, v.3, n.1, p.12-25, 2017.
- Pinho, João T., Galdino, Marco A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Grupode Trabalho de Energia Solar - GTES. CEPTEL /CRESESB, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- Pereira, E. B. *et al.* Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: INPE, 2006.
- Roman, E. *et al.* Intelligent PV Module for Grid-Connected PV Systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 53, n. 4, p. 1066–1073, 2006.
- Rüther, Ricardo. Edifícios solares fotovoltaicos : o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis, Brasil. Editora UFSC, 2004.
- Sechilariu, M.; Wang, B.; Locment, F. Building integrated photovoltaic system with energy storage and smart grid communication. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 60, n. 4, p. 1607–1618, 2013.
- Teofilo, V. L.; Merritt, L. V; Hollandsworth, R. P. Advanced Lithium Ion Battery Charger. Fifteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances, n. November, p. 193–198, 2000.
- Yang, B. *et al.* Design and Analysis of a Grid-Connected Photovoltaic Power System. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 25, n. 4, p. 992–1000, 2010.
- Zhang, L. *et al.* A Modular Grid-Connected Photovoltaic Generation System Based on DC Bus. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 26, n. 2, p. 523–531, 2011.

## DAB CONVERTER APPLIED TO BATTERY BANK CHARGING IN A MICROGRID WITH PHOTOVOLTAIC GENERATION

**Abstract.** Photovoltaic systems are assuming an important role in the integration of renewable sources in the generation of energy. However, these sources have intermittent characteristics, making it necessary to integrate a system of energy storage (batteries, for example) to better use the energy generated. To charge the batteries, use a DC-DC converter with high voltage gain and galvanic isolation between input and output, so the DAB converter will be used for this application. This work has the objective of realizing the design of a correct and voltage control system for a DAB converter, which will be used to charge a bank of batteries in a microgrid with photovoltaic generation. In addition, the experimental results will be presented.

**Key words:** DAB Converter, Battery Charging Li-ion, Photovoltaic System.