

# CONTROLE DE CORRENTE E TENSÃO DO CONVERSOR DAB MODIFICADO APLICADO À CARGA DE BATERIAS

PABLO F. S. COSTA, PEDRO H. B. LÖBLER, LEANDRO ROGGIA, LUCIANO SCHUCH.

*Universidade Federal de Santa Maria, Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC)  
Santa Maria – RS, Brasil*

{pablofscosta, phlobler, roggia, schuch.prof}@gmail.com

**Abstract**— Currently, photovoltaic systems have assumed an important role in the integration of renewable sources in the generation of electric energy. The number of connections of this type of generation has grown considerably in recent years, bringing with it problems such as varying voltage, current, power and frequency levels at points with a large number of connections. Therefore, in order to maintain these levels within acceptable ranges and because it is a source that has an intermittent characteristic, it is necessary to integrate an energy storage system (batteries, for example) for the best use of the generated energy. For the connection of the generation system to the battery bank, the Dual Active Bridge (DAB) converter with topological modification through the insertion of an output inductor to reduce the current ripple will be used. In this work, the mathematical modelling will be performed for both the output current and voltage of the converter using the Output Current Linearization method. In addition, the design of current and voltage controllers for the DAB converter applied to a battery bank charging process will be carried out. Finally, the experimental results will be presented.

**Keywords** — DAB converter, Photovoltaic Generation, Mathematical Modelling and Charging Batteries.

**Resumo**— Atualmente, os sistemas fotovoltaicos têm assumido papel importante na integração de fontes renováveis na geração de energia elétrica. O número de conexões deste tipo de geração tem crescido consideravelmente nos últimos anos, trazendo consigo problemas como variação dos níveis de tensão, corrente, potência e frequência nos pontos com grande número de conexões. Logo, para que se possa manter estes níveis dentro de faixas aceitáveis e por ser uma fonte que possui característica intermitente torna-se necessária a integração de um sistema de armazenamento de energia (baterias, por exemplo) para o melhor aproveitamento da energia gerada. Para a conexão do sistema de geração ao banco de baterias será utilizado o conversor Dual Active Bridge (DAB) com modificação topológica através da inserção de um indutor de saída para redução da ondulação da corrente. Neste trabalho, será realizada a modelagem matemática tanto para a corrente quanto para a tensão de saída do conversor fazendo uso do método da Linearização da Corrente de Saída. Além disso, o projeto de controladores de corrente e tensão do conversor DAB aplicado ao carregamento de um banco de baterias serão realizados. Por fim, os resultados experimentais serão apresentados.

**Palavras-chave** — Conversor DAB, Geração Fotovoltaica, Modelagem Matemática e Carregamento de Baterias.

## 1 Introdução

Com o desenvolvimento das fontes de geração de energia e o novo perfil dos consumidores, mudanças na configuração do sistema de distribuição de energia tornam-se necessárias, a fim de assegurar uma fonte de alimentação eficiente e confiável (Bragard et al. 2010). Como solução técnica viável a fim de evitar a necessidade de interação com os consumidores ou mudança de perfil de consumo, os Sistemas de Armazenamento de Energia (*Energy Storage Systems* -ESSs) passaram a receber maior atenção (Jiang et al. 2013).

Os ESSs estão fadados a desempenhar um papel vital em futuras redes elétricas, devido às suas vantagens inerentes à gestão de problemas em sistemas de energia. Se um sistema de distribuição apresentar uma maior penetração de fontes de energia renováveis intermitentes (eólica, biomassa e recursos solares, por exemplo), os ESSs podem ser usados para corrigir problemas de qualidade de energia associados à estas fontes (Sechilariu et al. 2013).

Além disso, ao instalar ESSs em larga escala, o planejamento de novas redes deve considerar apenas a capacidade de geração necessária para atender à demanda elétrica média ao invés das demandas de pico (Karanki et al. 2013).

Outro fator importante é determinar a localização do ESS em locais estratégicos dentro da rede de distribuição, fazendo com que o fluxo de energia possa ser gerenciado, os níveis de tensão mantidos, o carregamento dos cabos (utilização da linha) e as perdas reduzidas. Um processo de carga e descarga adequado também pode compensar a elevação dos níveis de tensão (Jiang et al. 2013). Assim, a tecnologia de armazenamento de energia adequada é selecionada com base nas características de cada tecnologia de armazenamento, como quantidade de energia disponível em um ciclo de carga e descarga, capacidade de potência ativa máxima, taxas de auto descarga, capacidade de potência reativa e custo (Sechilariu et al. 2013).

As tecnologias de armazenamento podem tornar os sistemas de energia mais flexíveis, confiáveis, seguros e suavizar a demanda, reduzindo a variação da demanda diária. A suavização da demanda envolve o carregamento da bateria (ou outro tipo de sistema de armazenamento) durante a menor demanda (geralmente fora do horário de pico) e descarregá-la durante o pico da demanda, trazendo consigo alguns benefícios para as redes de distribuição como redução do uso de fontes de energia adicionais nos horários de alto consumo, maior capacidade nos condutores dos sistemas de distribuição e maior segurança no fornecimento de energia. Do ponto de vista do consumidor de energia do sistema que possui

armazenamento de energia a suavização da demanda pode trazer benefícios econômicos.

Um ESS em escala completo para redes de distribuição ou transmissão é composto por três componentes principais: o próprio meio de armazenamento de energia (por exemplo, baterias de lítio), uma interface de eletrônica de potência que liga o meio de armazenamento à rede e um algoritmo de controle o qual é responsável por tomar a decisão a respeito de qual o modo de operação do sistema com base em medições internas (estado de carga das baterias) e externas ao sistema (tensão do barramento CC) (Alonso et al. 2010).

Devido às aplicações dos ESSs e a sua importância em novos sistemas de distribuição este artigo utiliza um conversor bidirecional CC-CC *Dual Active Bridge* (DAB) para realizar a interface entre um barramento CC e o banco de baterias em um sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição, dadas as suas vantajosas características de alta densidade de energia, bidirecionalidade e isolamento galvânica. Porém, como o conversor DAB apresenta elevada ondulação na corrente de saída, como mostram nas formas de onda da Figura 1, que penaliza a vida útil do banco de baterias, neste trabalho um elemento passivo (indutor de saída) é acrescentado na topologia para que a ondulação da corrente seja reduzida prolongando a vida útil do banco de baterias.

Desta maneira, este trabalho realiza inicialmente a modelagem matemática de corrente e tensão do conversor DAB. Nos novos modelos propostos a indutância de saída é levada em consideração, ao contrário de outros modelos presente na literatura como em (Qin, H. et al, 2012), de modo a representar de forma fiel o comportamento do conversor. Na sequência, especial atenção é dedicada ao

projeto dos controladores aplicados ao processo de carga do banco de baterias, considerando as suas particularidades. Por fim, resultados experimentais são apresentados, comprovando o funcionamento do sistema proposto.

## 2 Conversor Dual Active Bridge (DAB)

Em sistemas fotovoltaicos, conversores CC-CC unidirecionais são utilizados para realizar a interface entre os geradores fotovoltaicos e um barramento CC. A função destes conversores é elevar a tensão do painel fotovoltaico e realizar o rastreamento do ponto de máxima transferência de potência (*Maximum Power Point Tracker* - MPPT). Já os conversores CC-CC bidirecionais são utilizados para carregar ou descarregar as baterias mantendo-se os níveis de tensão do barramento, como pode ser visualizado na Figura 2.

O conversor bidirecional DAB foi originalmente proposto em (De Doncker et al. 1991), sendo um conversor CC-CC bidirecional com base em duas pontes ativas interligadas por um transformador de alta frequência, permitindo o fluxo de energia em ambos os sentidos em caso de carga ativa (Alonso et al. 2010) e proporcionando transferência de altas densidades de energia e potência entre entrada e saída. A estrutura completa do conversor DAB utilizada no decorrer do trabalho é apresentada na Figura 3, evidenciando o indutor de saída e a carga de saída (baterias). Cada ponte ativa é controlada com ciclo de trabalho constante (50%) para garantir uma forma de onda de tensão quadrada de alta frequência nos terminais do transformador.

A indutância  $L_{dab}$  é o principal elemento de transferência de potência, sendo composta pela indutância de dispersão do transformador e, caso necessário, por um indutor auxiliar projetado

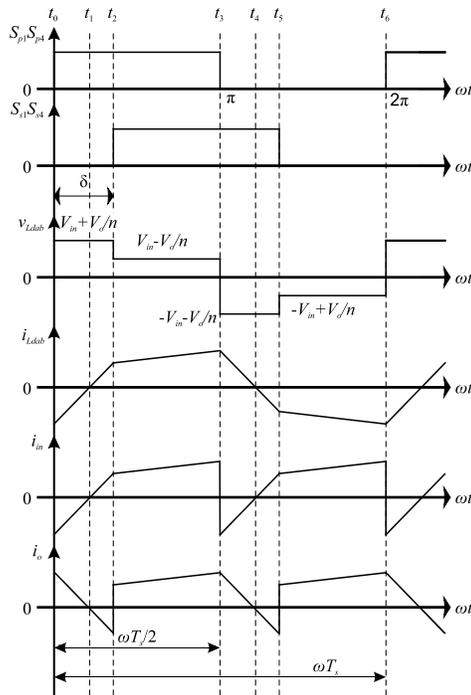


Figura 1. Formas de onda do conversor DAB com PSM.

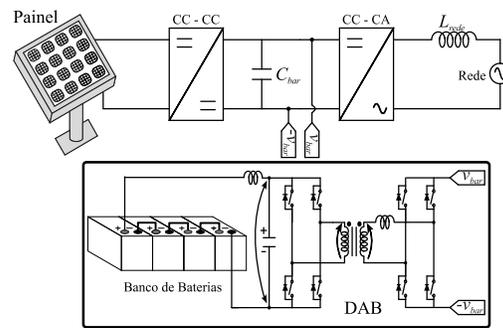


Figura 2. Sistema fotovoltaico com conversor DAB.

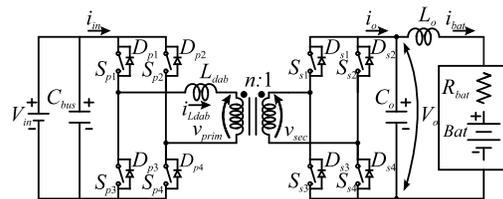


Figura 3. Conversor bidirecional CC-CC DAB com indutor de saída  $L_o$ .

conectado em série (Alonso et al. 2010). O fluxo de potência entre as pontes ativas é controlado fazendo uso da Modulação por Defasagem Angular (*Phase Shift Modulation - PSM*).

### 3 Método de carga de Baterias de Li-íon

Estudos sobre os diversos tipos de armazenamento de energia vêm sendo desenvolvidos em todo o mundo. Uma visão geral das diferentes tecnologias de armazenamento, suas aplicações e limitações são discutidas em (Divya and Ostergaard 2009). Atualmente, o foco principal dos estudos recai sobre a utilização de baterias de Li-íon e baterias de Enxofre de Sódio (NaS) em sistemas de potência. Neste artigo serão utilizadas as baterias de Li-íon, cujo método de carga será apresentado na sequência.

Para obter maior durabilidade das baterias o método de carga deve ser escolhido de modo a não degradar a sua vida útil. Desta forma, o modo de funcionamento do carregador deve ser dependente da resistência interna da bateria, temperatura durante o carregamento, tensão e corrente no final da carga (Yang et al. 2006).

As baterias de Li-íon podem ser carregadas por dois métodos distintos: o método de tensão constante, o qual apresenta maior simplicidade de utilização, e o método Corrente Constante/Tensão Constante (*Constant Current/Constant Voltage - CC/CV*), que 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 (10 % da capacidade da bateria) (Teofilo et al. 1997).

No método de carga CC/CV, o carregamento inicia com um valor constante de corrente (0,1 a 1 C). Durante essa fase, a tensão da bateria deverá atingir a tensão de equalização  $V_{eq}$ . Quando a tensão atinge este valor, a bateria terá a corrente reduzida a fim de que a sua tensão não ultrapasse a tensão  $V_{eq}$ . Mantendo-se a tensão de equalização constante, a corrente de carregamento naturalmente reduzirá, atingido um valor de aproximadamente 0,02 C. Por fim, encerra-se a etapa de equalização e inicia-se a etapa de flutuação, na qual a tensão de referência passa a ser a tensão da célula ( $V_{flu}$ ) (Mukai et al. 2012). O método de carga CC-CV é mostrado na Figura 4.

Outro fator importante para que ocorra o carregamento adequado das baterias é a equalização de tensão entre 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

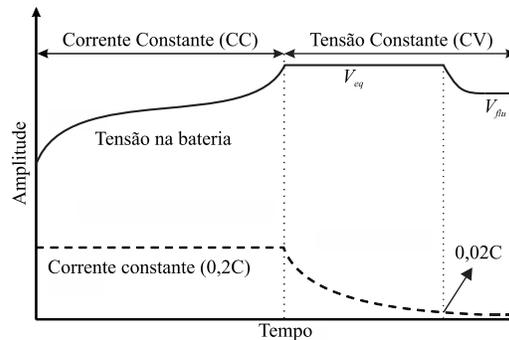


Figura 4. Método de carga CC-CV.

tensão entre elas possuir valor inferior a 3 % da tensão nominal (Isacsson et al. 2000).

### 4 Modelagem Matemática do Conversor DAB

Nesta seção serão realizadas as modelagens matemáticas da tensão de saída pelo ângulo de defasagem e da corrente de saída pelo ângulo de defasagem, através do método da Linearização da Corrente de Saída.

A partir da equação clássica da potência de saída do conversor DAB pode-se calcular a corrente média de saída antes do capacitor, conforme a equação (1). Essa corrente média de saída será utilizada para obtenção do modelo de pequenos sinais da corrente e da tensão de saída em relação ao ângulo de defasagem, de modo análogo ao demonstrado em (Santos 2011).

$$I_{odab} = \frac{V_{in}\delta}{2\pi f_s L_{dab}n} \left( 1 - \frac{|\delta|}{\pi} \right) \quad (1)$$

onde  $V_{in}$  é a tensão de entrada,  $\delta$  o ângulo de defasagem,  $f_s$  a frequência de comutação,  $L_{dab}$  a indutância de transferência de energia entre a ponte primária e a secundária e  $n$  a relação de transformação do transformador.

Inicialmente, torna-se necessário perturbar e linearizar a equação (1), a qual é não linear. Aplicando a perturbação e linearizando, conforme equação (2) e desconsiderando os termos contínuos é possível calcular a equação (3), que representa a variação da corrente de saída em função do ângulo de defasagem, para um ângulo nominal de linearização  $\phi$ . Sendo  $I_{odab}$  a corrente de saída do conversor DAB,  $\Delta i_{odab}$  a variação desta corrente e  $\Delta\delta$  a variação do ângulo de defasagem.

$$I_{odab} + \Delta i_{odab}(t) = i_{odab}(\phi) + \Delta\delta(t) \left. \frac{\partial i_{odab}(\delta)}{\partial \delta} \right|_{\delta=\phi} \quad (2)$$

$$\Delta i_{odab}(t) = \underbrace{\frac{V_{in}}{2\pi f_s L_{dab}n} \left( 1 - \frac{2\delta}{\pi} \right)}_{G_i} \Delta\delta(t) \quad (3)$$

A equação (3) pode ser representada por uma fonte de corrente no lado de saída do conversor DAB, conforme a Figura 5. Essa fonte de corrente depende da variação do ângulo de comutação e de uma constante  $G_i$ , calculada de acordo com os parâmetros do conversor e do ângulo de linearização.

O modelo de pequenos sinais que relaciona a corrente de saída com o ângulo de defasagem pode então ser obtido através da análise do circuito da Figura 5. Assim, a soma das correntes de saída é apresentada em:

$$\begin{aligned} \hat{i}_o(t) &= \hat{i}_{C_o}(t) + \hat{i}_{bat}(t) \\ &\downarrow \text{Laplace} \\ I_o(s) &= I_{C_o}(s) + I_{bat}(s) \end{aligned} \quad (4)$$

onde a corrente de saída  $i_o$  é expressa por:

$$\begin{aligned} i_o(t) &= \delta(t) \frac{V_{in}}{2\pi f_s L_{dab} n} \left(1 - \frac{2\phi}{\pi}\right) \\ &\downarrow \text{Laplace} \\ I_o(s) &= \delta(s) \frac{V_{in}}{2\pi f_s L_{dab} n} \left(1 - \frac{2\phi}{\pi}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

A corrente através do capacitor é definida por:

$$i_{C_o}(t) = C_o \frac{dv_o(t)}{dt} \xrightarrow{\text{Laplace}} I_{C_o}(s) = sC_o V_o(s) \quad (6)$$

Para determinar a corrente de saída através das baterias, inicialmente utiliza-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned} v_o(t) &= R_{bat} i_{bat}(t) + L_o \frac{di_{bat}(t)}{dt} \\ &\downarrow \text{Laplace} \\ V_o(s) &= R_{bat} i_{bat}(s) + sL_o I_{bat}(s) \end{aligned} \quad (7)$$

Isolando a variável de interesse  $I_{bat}(s)$  tem-se:

$$I_{bat}(s) = \frac{V_o(s)}{sL_o + R_{bat}} \quad (8)$$

Após encontrar as equações para as parcelas da corrente de saída e substituindo (5), (6) e (8) em (4) tem-se a equação final da corrente de saída:

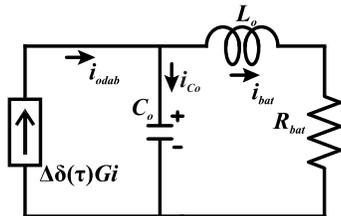


Figura 5. Circuito equivalente do modelo de linearização da Corrente de Saída.

$$\delta(s) \frac{V_{in}}{2\pi f_s L_{dab} n} \left(1 - \frac{2\phi}{\pi}\right) = sC_o V_o(s) + \frac{V_o(s)}{sL_o + R_{bat}} \quad (9)$$

Para determinar a função de transferência da tensão de saída pelo ângulo de defasagem deve-se isolar as variáveis de interesse, resultando em:

$$\frac{V_o(s)}{\delta(s)} = \frac{V_{in}}{2\pi f_s L_{dab} n} \left(1 - \frac{2\phi}{\pi}\right) \frac{sL_o + R_{bat}}{s^2 L_o C_o + sR_{bat} C_o + 1} \quad (10)$$

A função de transferência que relaciona a corrente de saída com o ângulo de defasagem pode ser obtida através da análise da corrente  $I_o$  do circuito da Figura 5, obtendo-se:

$$\frac{I_o(s)}{\delta(s)} = \frac{V_{in}}{2\pi f_s L_{dab} n} \left(1 - \frac{2\phi}{\pi}\right) \left( \frac{1}{s^2 L_o C_o + sR_{bat} C_o + 1} \right) \quad (11)$$

onde  $V_{in}$  é a tensão de entrada,  $f_s$  é a frequência de comutação dos interruptores,  $L_{dab}$  é a indutância de transferência de potência,  $\phi$  é o ângulo de defasagem linearizado,  $L_o$ ,  $C_o$  e  $R_{bat}$  são respectivamente a indutância de saída, a capacitância saída e a resistência interna das baterias.

## 5 Controle do Conversor DAB

Esta seção tem por objetivo realizar a comprovação dos modelos de corrente e tensão resultantes do método de modelagem da Linearização da Corrente de Saída executado anteriormente, bem como apresentar o procedimento de projeto de ambos os controladores a partir dos modelos propostos. Os parâmetros de simulação são mostrados na Tabela 1.

A comprovação dos modelos é realizada através de simulações aplicando perturbações na tensão de entrada e no ângulo de defasagem do conversor DAB.

O resultado do modelo proposto da corrente de saída em comparação com o comportamento do conversor em simulação é apresentado na Figura 6, enquanto que o resultado do modelo proposto da tensão de saída em comparação com o conversor em simulação é apresentado na Figura 7. Três degraus foram aplicados

Tabela 1 - Parâmetros do conversor DAB para simulações e resultados experimentais.

Parâmetro	Valor
Tensão de entrada ( $V_{in}$ )	400 V
Tensão nominal das baterias ( $v_{bat}$ )	48 – 54 V
Corrente nominal das baterias ( $i_{bat}$ )	10 A
Frequência de comutação	20 kHz
Resistência para potência de 500 W	5 $\Omega$
Resistência interna das baterias	12 m $\Omega$
Indutância $L_{dab}$	790,1 $\mu$ H
Indutância $L_o$	141,2 $\mu$ H
Capacitor de saída ( $C_o$ )	560 $\mu$ F
Relação de transformação	8/1
Ângulo de defasagem nominal ( $\delta$ )	20°

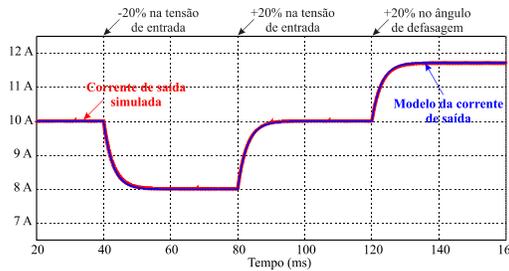


Figura 6. Modelo de corrente obtido pela Linearização da Corrente de Saída nas baterias.

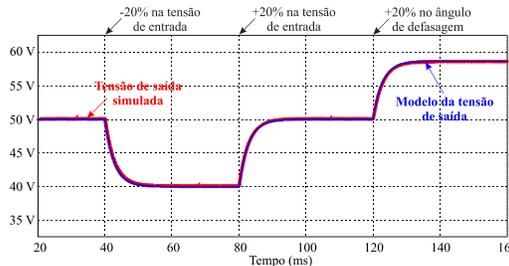


Figura 7. Modelo de tensão obtido pela Linearização da Corrente de Saída nas baterias.

para comprovar os modelos desenvolvidos: um degrau de -20 % na tensão de entrada em 40 ms, um degrau de +20 % na tensão de entrada em 80 ms e um degrau de 20 % no ângulo de defasagem em 100 ms. Observa-se que os modelos propostos seguem o comportamento simulado do conversor, tanto em regime transitório quanto em regime permanente.

Além dos modelos a serem utilizados, 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. Para cada ângulo de defasagem o modelo apresenta diferentes ganhos na resposta em frequência, conforme demonstram as Figuras 8 e 9. Logo, para este projeto o ângulo  $\phi$  foi definido em 20°, o qual 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. Para o projeto foram utilizados os parâmetros da Tabela 1.

### 5.1 Projeto do 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 10. A planta  $G_i(w)$  foi obtida de acordo com (Ogata 1995), já incluindo o atraso de implementação, o efeito da conversão ZOH e adotando-se os parâmetros da Tabela I. A frequência de amostragem  $f_a$  adotada foi de 20 kHz e o modulador PWM foi levado em consideração na modelagem da planta.

Como parâmetros de desempenho, foram adotados uma margem de fase 60° e uma frequência de cruzamento de ganho de 7 Hz, visto que o processo de carga das baterias possui uma dinâmica lenta. Com a intenção de reduzir o erro em regime permanente, um controlador

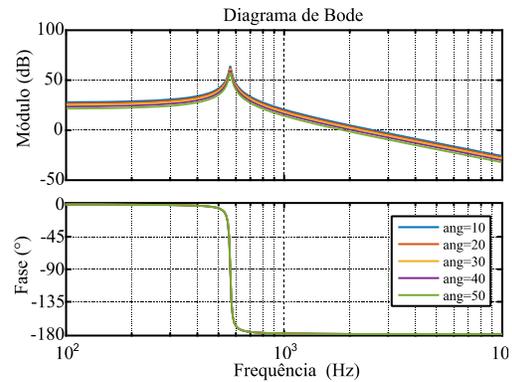


Figura 8. Resposta em frequência para diferentes ângulos de operação para o modelo de corrente.

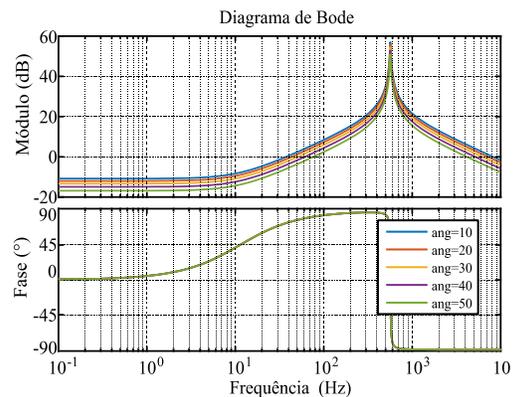


Figura 9. Resposta em frequência para diferentes ângulos de operação para o modelo de tensão.

Proporcional Integral (PI) foi projetado, o qual é definido pela função de transferência no plano  $w$  conforme:

$$C_i(w) = k_p + \frac{k_i}{w} = 0,031707 \frac{(w + 3140)}{w} \quad (12)$$

Aplicando a transformada bilinear inversa é obtida a função de transferência do controlador no domínio  $z$ , dada pela equação:

$$C_i(z) = 0,0342 \frac{(z - 0,854)}{(z - 1)} \quad (13)$$

A implementação digital de uma função de transferência como a da equação (14) requer a conversão para equação de diferenças discreta. Dessa forma, o controlador é representado em função da ação de controle e do erro em cada amostra. A equação de diferença discreta para o controlador de corrente  $C_i(z)$  é dada por:

$$u[k] = u[k - 1] - 0,0342e[k] + 0,02922e[k - 1] \quad (14)$$

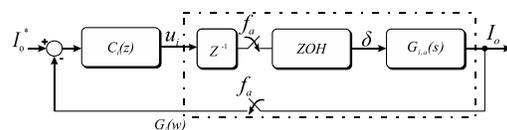


Figura 10. Diagrama de blocos do sistema de controle de corrente do conversor DAB.

O zero adicionado ao controlador PI foi alocado em 500 Hz e o ganho foi ajustado para alcançar as especificações propostas, além de evitar o duplo cruzamento do gráfico do ganho pela origem. Na Figura 11 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.

### 5.2 Projeto do 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  $w$  ilustrado na Figura 12. A função de transferência  $G_v(w)$  foi obtida adotando os parâmetros da Tabela I. Novamente, a frequência de amostragem  $f_a$  considerada foi de 20 kHz e o modulador PWM foi levado em consideração na modelagem da planta.

A planta  $G_v(w)$  foi obtida através da discretização do modelo da tensão de saída do conversor DAB e da sua respectiva conversão para o plano  $w$ , já incluindo o atraso de implementação e o efeito da conversão  $ZOH$ . 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 a equação:

$$C_v(w) = k_p + \frac{k_i}{w} = 0,06312 + \frac{(w + 3140)}{w} \quad (15)$$

Realizando a transformada bilinear inversa na função de transferência  $C_v(w)$  é encontrada a função de transferência no domínio  $z$ , conforme a equação:

$$C_v(z) = 0,07939 \frac{(z - 0,924)}{(z - 1)} \quad (16)$$

A implementação digital de uma função de transferência como a da equação (16) requer a conversão para equação de diferenças discreta. Dessa forma, o controlador é representado em função da ação de controle e do erro em cada amostra. A equação de diferença discreta para o controlador de tensão  $C_v(z)$  é dada por:

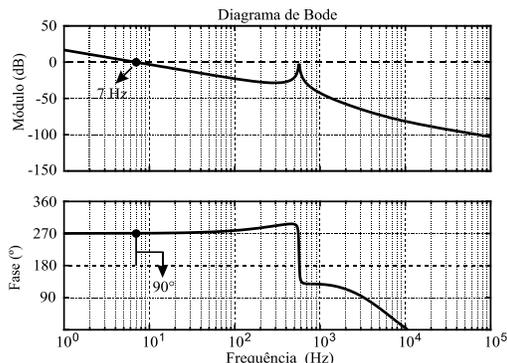


Figura 11. Resposta em frequência da malha de corrente no plano  $w$  após a inserção do controlador.

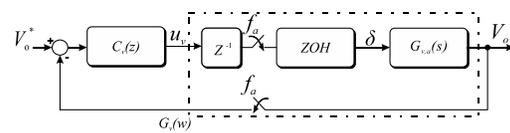


Figura 12. Diagrama de blocos do sistema de controle de tensão do conversor DAB.

$$u[k] = u[k - 1] - 0,07939e[k] + 0,073356e[k - 1] \quad (17)$$

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 impostas. A Figura 13 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.

## 6 Resultados Experimentais

Nesta seção, inicialmente são apresentados os resultados experimentais do conversor DAB em malha fechada com controle de corrente e tensão individualmente, e com carga resistiva. Posteriormente, são apresentados resultados experimentais do conversor com conexão ao banco de baterias, utilizando o método de carga CC/CV já descrito. Os controladores foram projetados através dos modelos de corrente e tensão propostos e implementados digitalmente utilizando o DSP-TMS320F28335 da *Texas Instruments*. Os parâmetros do conversor estão indicados na Tabela I e o protótipo implementado pode ser visualizado na Figura 14.

Inicialmente, o conversor DAB foi testado em malha aberta, considerando uma carga resistiva de 5  $\Omega$  (carga nominal) de saída. Na Figura 15 são mostradas as formas de onda de tensão do lado primário ( $v_{prim}$ ) e secundário ( $v_{sec}$ ) do transformador, além da corrente na indutância de transferência de potência ( $i_{Ldab}$ ). Na Figura 16 são ilustradas as formas de onda da tensão entre coletor e emissor ( $v_{CE\_prim} = 400$  V) do interruptor  $S_{p1}$  do lado primário, da tensão entre coletor e emissor ( $v_{CE\_sec} = 44,5$  V) do interruptor  $S_{s1}$  do lado secundário e da corrente das baterias ( $i_{bat}$ ). Nota-se que o ângulo de defasagem imposto ao DAB situa-se próximo de 19°, como pode ser

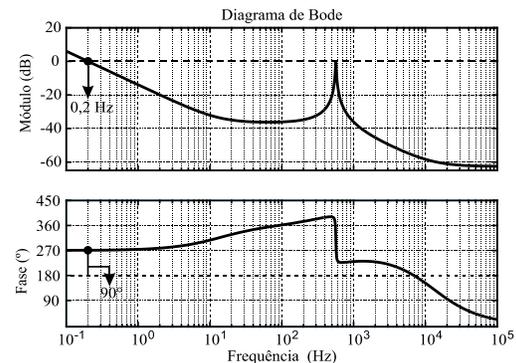


Figura 13. Resposta em frequência da malha de tensão no plano  $w$  após a inserção do controlador.

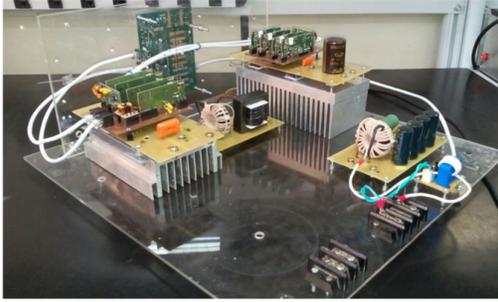


Figura 14. Protótipo implementado do conversor DAB.

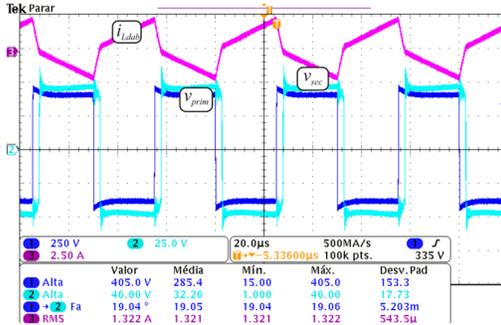


Figura 15. Tensões do lado primário ( $v_{prim}$ ) e secundário ( $v_{sec}$ ) do transformador e corrente na indutância de transferência de potência ( $i_{Ldab}$ ).

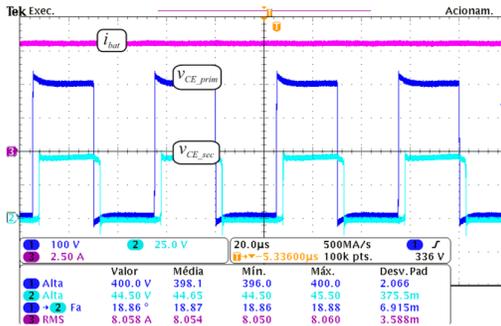


Figura 16. Tensões sobre interruptor do lado primário ( $v_{CE_{prim}}$ ) e secundário ( $v_{CE_{sec}}$ ) e corrente das baterias ( $i_{bat}$ ) em malha aberta.

observado através da defasagem entre as tensões do lado primário e secundário.

Na sequência, o resultado experimental em malha fechada com o controlador de corrente projetado foi obtido. A Figura 17 apresenta as formas de onda da tensão  $v_{CE_{prim}}$  do interruptor  $S_{p1}$  do lado primário, da tensão  $v_{CE_{sec}}$  do interruptor  $S_{s1}$  do lado secundário e da corrente das baterias ( $i_{bat}$ ). Para comprovar o funcionamento do controlador projetado, um degrau de 2 A foi aplicado na referência de corrente. Percebe-se que a corrente das baterias aumentou de aproximadamente 8 A para 10 A, o ângulo de defasagem aumentou de  $18,86^\circ$  para  $27,84^\circ$  e a amplitude da tensão do lado secundário do conversor aumentou de  $44,5$  V para  $54,5$  V.

A Figura 18 mostra o resultado experimental em malha fechada com o controlador de tensão projetado. Na figura são apresentadas as formas de onda da

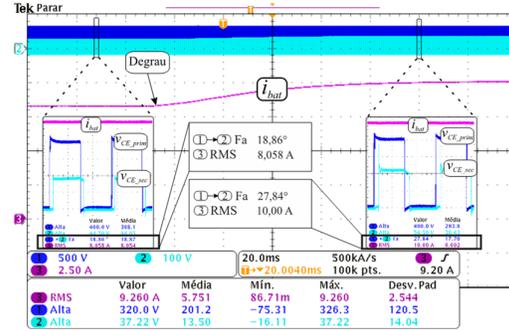


Figura 17. Tensões sobre interruptor do lado primário ( $v_{CE_{prim}}$ ) e secundário ( $v_{CE_{sec}}$ ) e corrente das baterias ( $i_{bat}$ ) com degrau na referência.

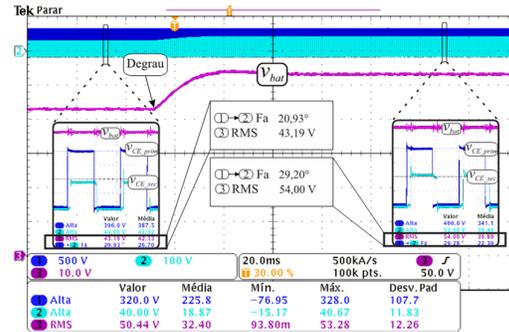


Figura 18. Tensões sobre interruptor do lado primário ( $v_{CE_{prim}}$ ) e secundário ( $v_{CE_{sec}}$ ) e tensão das baterias ( $v_{bat}$ ) com degrau na referência.

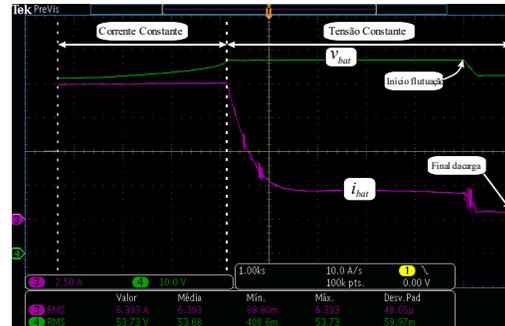


Figura 19. Processo de carga do banco de baterias com método CC/CV.

tensão  $v_{CE_{prim}}$  do interruptor  $S_{p1}$ , tensão  $v_{CE_{sec}}$  do interruptor  $S_{s1}$  e a tensão das baterias ( $v_{bat}$ ). De maneira a comprovar o funcionamento do controlador, um degrau de 20 % do valor recomendado da tensão de saída para baterias de Li-íon foi aplicado na referência de tensão. Pode-se perceber que a tensão das baterias aumentou de  $43,19$  V para  $54,00$  V e o ângulo de defasagem aumentou de  $20,93^\circ$  para  $29,20^\circ$ .

Por fim, na Figura 19 são apresentadas as formas de onda de corrente e tensão durante o processo de carga completo de um banco de quatro baterias de 50 Ah de chumbo ácido conectadas em série, as quais foram utilizadas pela indisponibilidade de baterias de Li-ion para este experimento. Salienta-se que os níveis de tensão para o processo de carga foram alterados para valores estipulados pelo fabricante das baterias

de chumbo ácido. Observa-se que o processo de carga inicia com o modo de corrente constante (10 A) até que a tensão das baterias atinja a tensão de equalização (57,60 V). Neste instante, a malha de controle de tensão entra em operação, mantendo a tensão constante até que a corrente decresça ao valor de 4 % de C (2 A). Neste momento, a tensão é reduzida para 52,80 V (tensão de flutuação), encerrando o processo de carga das baterias. As divisões horizontais da Figura 19 valem 1000 s (aproximadamente 16,67 minutos), indicando que a etapa de corrente constante tem duração em torno de 1 hora e a etapa de manutenção da tensão de equalização tem duração de aproximadamente 80 minutos.

Analisando as formas de ondas apresentadas, verifica-se que os controladores de corrente e tensão atuam de maneira satisfatória, tanto em regime transitório quanto permanente, efetuando o procedimento de carga CC/CV conforme desejado. A potência de operação do conversor é próxima de 500 W durante toda a etapa de corrente constante e decresce até 5,3 % deste valor à medida que a corrente diminui durante a etapa de tensão constante.

## 6 Conclusões

Este trabalho apresentou a modelagem matemática proposta de corrente e tensão do conversor DAB com a inclusão de um indutor de saída, através do método da Linearização da Corrente de Saída, o qual resultou em funções de transferência de segunda ordem. Após a modelagem matemática, os controladores de corrente e tensão do conversor DAB para o carregamento de um banco de baterias foram projetados. O controlador de corrente resultou em uma frequência de cruzamento de 7 Hz e margem de fase mínima de 90°, enquanto que o controlador de tensão resultou em uma frequência de cruzamento de 0,2 Hz e margem de fase mínima de 90°.

Na sequência, resultados experimentais em malha aberta e em malha fechada com perturbações nas referências de corrente e tensão foram apresentados. As variáveis controladas convergiram para os valores especificados sem sobressinais comprovando que os controladores atuaram de maneira satisfatória. Verificou-se também que a inserção do indutor na topologia do conversor DAB proporcionou reduzida ondulação na corrente de saída como requerido. Por fim, o carregamento de um banco de quatro baterias foi realizado, através do qual pode-se observar que os três estágios de carga do método CC/CV foram atendidos, comprovando o funcionamento dos controladores projetados através dos modelos propostos e do sistema implementado.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, CAPES e FAPERGS. Este trabalho é fomentado pelo Governo Brasileiro através do programa PROEX, PRPGP/UFMS, INCT-GD, CNPq processo 465640/2014-1, CAPES

processo 23038.000776/2017-54 e FAPERGS processo 17/2551-0000517-1.

## Referências Bibliográficas

- Alonso, A. R., Sebastian, J. and Lamar, D. G. 2010. An overall study of a Dual Active Bridge for bidirectional DC / DC conversion. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. pp.1129–1135.
- Bragard, M., Soltau, N., Thomas, S., De Doncker, R. W. et al., 2010. The balance of renewable sources and user demands in grids: Power electronics for modular battery energy storage systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(12), pp.3049–3056.
- Divya, K.C. and Østergaard, J., 2009. Battery energy storage technology for power systems-An overview. *Electric Power Systems Research*, 79(4), pp.511–520.
- De Doncker, R.W., Divan, D.M. and Kheraluwala, M.H., 1991. A Three-Phase Soft-Switched High-Power-Density dc/dc Converter for High-Power Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 27(1), pp.63–73.
- Isacsson, M.J. et al., 2000. Advanced Lithium Ion Battery Charger. In *Fifteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances*. pp. 193–198.
- Jiang, Q., Xue, M. and Geng, G., 2013. Energy Management of Micro-Grid in Grid-Connected and Stand-Alone modes. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), pp.3380–3389.
- Karanki, S.B., Xu, D., Venkatesh, B., Singh, B.N., 2013. Optimal location of battery energy storage systems in power distribution network for integrating renewable energy sources. In *Energy Conversion Congress and Exposition*. pp. 4553–4558.
- Mukai, D., Kobayashi, K., Kurahashi, T., Matsueda, N., 2012. Development of Large High-performance Lithium-ion Batteries for Power Storage and Industrial Use. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 49(1), pp.6–11.
- Ogata, K., 1995. *Discrete Time Control Systems*. , p.760.
- Qin, H., Kimball J. W., Generalized Average Modeling of Dual Active Bridge DC–DC Converter. *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 27, n°. 4, Abril, 2012.
- Santos, W.M. dos, 2011. *Estudo e Implementação do Conversor TAB (Triple Active Bridge) Aplicado a Sistemas Renováveis Solares Fotovoltaicos*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Sechilariu, M., Wang, B. and Locment, F., 2013. Building integrated photovoltaic system with energy storage and smart grid communication. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 60(4), pp.1607–1618.
- Teofilo, V.L., Merritt, L. V and Hollandsworth, R.P., 1997. Advanced Lithium Ion Battery Charger. *Fifteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances*, (November), pp.193–198.
- Yang, F.-C. et al., 2006. Hysteresis-Current-Controlled Buck Converter Suitable for Li-Ion Battery Charger. In *International Conference on Communications, Circuits and Systems*. pp. 2723–2726.