

Conversor *Dual Active Bridge* Aplicado no Gerenciamento de Carga e Descarga de um Banco de Baterias em uma Microrrede Residencial

Pablo F. S. Costa[†], Pedro H. B. Löbler[†], Leonardo L. Carvalho[†], Leandro Roggia[§] e Luciano Schuch[†]

[†]Grupo de Eletrônica de Potência e Controle - GEPOC

Email: pablofscosta, phlobler, leonardo.limac, schuch.prof (@gmail.com)

[§]Colégio Técnico Industrial de Santa Maria - CTISM

Email: roggia@gmail.com

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

Resumo—A crescente inserção de geração de energia elétrica renovável no Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem trazido inúmeras dificuldades devido a sua intermitência. Como solução, os veículos elétricos (VEs) passam a ser uma opção viável. Fazendo uso das baterias dos VEs, pode-se deslocar os picos de demanda de energia durante o dia. Porém, para conectar as baterias dos VEs ao SEP e gerenciar o processo de carga e descarga, torna-se necessário utilizar um conversor CC-CC com elevado ganho de tensão, bidirecionalidade no fluxo de energia e isolamento galvânica. Neste trabalho, o conversor *Dual Active Bridge* (DAB) é utilizado, apresentando a modelagem matemática para ambos os sentidos do fluxo de potência, o projeto dos controladores para o carregamento do banco de baterias e para o suporte do barramento CC em caso de descarga das baterias. Por fim, os resultados de simulação serão apresentados.

Keywords – Veículo elétrico, Baterias, Conversor DAB

I. INTRODUÇÃO

A constante busca por geração de energia elétrica por meio das fontes renováveis a fim de reduzir a emissão de gases poluentes causados pela queima de combustíveis fósseis que, a longo prazo, podem causar danos irreversíveis ao meio ambiente, é um agente propulsor a novas pesquisas tecnológicas. Diante desse contexto, estudos estão sendo realizados em sistemas capazes de gerar energia através de recursos renováveis como hídrico, eólico, solar e biomassa. Através da existência de um ou mais sistemas de geração distribuída (GD) é possível reduzir a utilização da energia produzida através de recursos convencionais e descentralizar a distribuição dos grandes centros.

Em complemento a GD, elementos acumuladores de energia (baterias, por exemplo) são utilizados, armazenando o excedente do sistema gerador à fim de suprir demandas de cargas locais, uma vez que os sistemas renováveis apresentam características de geração intermitente, ou até mesmo fornecer energia ao SEP conforme picos de utilização. Em países onde há diferenciação tarifária ao decorrer do dia, a energia armazenada nas baterias pode ser consumida da rede com valor baixo e devolvida à ela quando o valor de venda estiver alto. Neste contexto, as baterias de Lí-íon que estão embarcadas

nos VE tem capacidade de acumular altas densidades de energia, tendo vantagens sobre as demais tecnologias, assim grandes redes de distribuição inteligentes que interconectam esses diversos sistemas podem ser auto suficientes diante da demanda de energia dos consumidores ligados a esta rede.

Para que seja possível realizar a conexão entre os sistemas renováveis de energia, veículos elétricos, consumidores locais e rede de distribuição, devem haver elementos capazes de gerenciar os diferentes níveis de tensão e potência, adequando a direção do fluxo de potência, conforme a demanda. Este processo pode ser realizado através de conversores CC-CC bidirecionais que agregam em suas estruturas transformadores de alta frequência proporcionando isolamento galvânica, confiabilidade nas conexões do barramento CC, modularidade e elevado ganho de tensão. Neste contexto, o conversor *Dual Active Bridge* (DAB) que, além de possuir as características citadas anteriormente, é utilizado em aplicações em sistemas com fluxo de potência superior a 1 kW mantendo alta eficiência com menor custo e volume [1]. Entretanto, o conversor DAB clássico [2] apresenta elevadas ondulações na corrente de carga e descarga das baterias ocasionando a redução do tempo de vida útil dos elementos armazenadores. Devido a modulação empregada em alta frequência, a fim de não degradar o número de ciclos máximos da bateria, é proposto a inclusão de um filtro indutivo em série com o banco de baterias. A partir da proposta do DAB com filtro passivo é realizada a modelagem matemática, e na sequência será apresentado o projeto de um controlador para carga das baterias, utilizando o método Corrente Constante/Tensão Constante (CC/CV), e na descarga um controlador para manter a tensão constante no barramento CC seguido dos respectivos resultados de simulação.

II. CONVERSOR DUAL ACTIVE BRIDGE (DAB) E FLUXO DE POTÊNCIA DA BATERIA

O conversor DAB tem característica bidirecional no fluxo de potência e pode ser aplicado em diversos sistemas como os que conectam-se a sistemas de armazenamento de energia, UPS, VE, equipamentos hospitalares, todos aqueles que necessitam

de energia ininterrupta e também realizam atualização de dados em tempo real.

Para determinar a direção e a quantidade do fluxo de energia a ser transferida, emprega-se a *Phase Shift Modulation* (PSM), a qual aplica uma defasagem angular entre as tensões nos terminais do transformador. Essas tensões apresentam formas de onda quadrada devido aos sinais de comutação que acontece na ponte ativa do primário e secundário do transformador, a qual mantém uma razão cíclica de 50% para cada par de interruptores de cada um dos conversores *full-bridge*.

A quantidade de potência a ser transferida está diretamente ligada ao tamanho da indutância auxiliar somada a indutância de dispersão do transformador [3], representada por L_{dab} na estrutura clássica do DAB. Além disso, é considerado a inclusão de um filtro passivo em série com as baterias à fim de reduzir as oscilações na corrente de carga e descarga, que ocasionam o aumento de temperatura das células internas da bateria. A configuração do conversor desenvolvido nesse trabalho pode ser vista na Fig. 1.

A. Método de carga das baterias

As unidades que armazenam energia com transformação química do seu material interno, como as baterias de íons de lítio (Lí-íon) e de chumbo-ácido (PbA) chegam a ter eficiência superior a 85%, [4], com fluxo de energia bidirecional podem hora ser acumuladores e hora ser fonte de energia. O crescente aumento da produção das baterias fez com que esses elementos fossem diminuindo o valor de comercialização e assim ficando mais acessíveis para serem utilizadas em diversas aplicações junto ao sistema de potência.

Tomando como escolha pelas baterias de Lí-íon, por possuir maior densidade de energia, é definido então o método de carga que será utilizado durante o processo. Neste caso, o método escolhido será o Corrente Constante/Tensão Constante, como mostra a Fig. 2. Este método proporcionará maior eficiência e confiabilidade, voltado a preservação dos materiais internos e prolongando a vida útil das baterias, uma vez que fatores como temperatura durante o carregamento, tensão e corrente no final de carga são parâmetros a serem verificados durante todas as etapas de operação [5].

O carregamento começará com um valor constante de corrente (aproximadamente 0,2 C), dependendo da capacidade do arranjo, durante essa etapa, a tensão da bateria atingirá a tensão de equalização V_{eq} . Logo após, a corrente de carga da

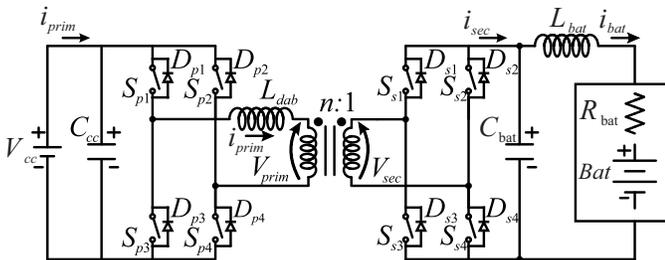


Figura 1: Conversor *Dual Active Bridge*.

bateria será reduzida a fim de que a sua tensão não ultrapasse a tensão V_{eq} . A tensão de equalização será mantida constante e a corrente de carga irá reduzir naturalmente até atingir um valor de aproximadamente 0,02 C. Por fim, a etapa de equalização é encerrada e inicia-se a etapa de flutuação (V_{flu}), na qual a tensão de referência passará a ser a tensão da célula [6].

B. Método de descarga das baterias

O propósito de fazer a descarga das baterias é utilizar a sua energia acumulada para manter a tensão constante (CV) em um barramento CC. À medida em que a tensão no arranjo de baterias diminui, a corrente drenada aumentará, de modo a manter a tensão constante no barramento de saída até a descarga total das baterias. O processo de descarga das baterias pode ser visualizado na Fig. 3.

III. MODELAGEM DO CONVERSOR DAB

A análise do modelo matemático que descreve o funcionamento do conversor DAB durante o fluxo direto e o reverso de energia está diretamente ligado a variação ângulo de defasagem (δ) e das correntes do primário (I_{prim}) e secundário (I_{sec}) do transformador. Através desta premissa, serão obtidos os modelos de pequenos sinais da corrente de carga da bateria (I_{bat}) em função de δ , a tensão das baterias (V_{bat}) em função de δ e a tensão no barramento CC (V_{cc}) em função de δ . Através da equação clássica da potência média do conversor DAB (equação (1)), são encontradas as correntes médias na sequência.

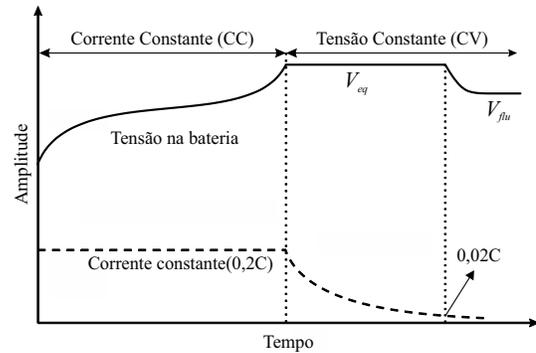


Figura 2: Método de carga CC-CV.

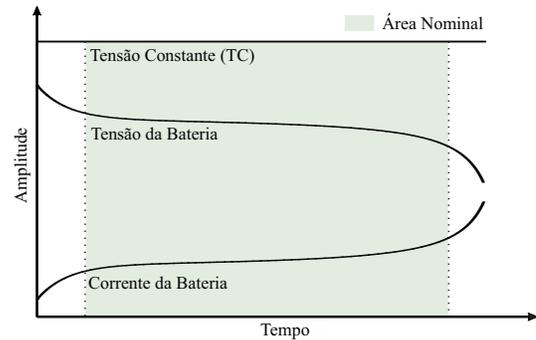


Figura 3: Método de descarga CV.

$$P_{avg} = \frac{V_{cc}V_{bat}}{2\pi f_s L_{dab}n} \delta \left(1 - \frac{|\delta|}{\pi}\right) \quad (1)$$

onde V_{cc} e V_{bat} são a tensão no barramento do lado primário e secundário, respectivamente, δ o ângulo de defasagem, onde seu módulo garante que a potência seja bidirecional, f_s a frequência de comutação, L_{dab} a indutância auxiliar de transferência de energia e n a relação de transformação do transformador.

Considerando um sistema com perdas nulas, o conversor é considerado ideal e opera em regime permanente em torno de um ponto de equilíbrio, então as correntes médias podem ser obtidas isolando os termos da equação (1).

$$I_{prim} = \frac{P_{avg}}{V_{cc}} = \frac{V_{bat}}{2\pi f_s L_{dab}n} \delta \left(1 - \frac{|\delta|}{\pi}\right) \quad (2)$$

$$I_{sec} = \frac{P_{avg}}{V_{bat}} = \frac{V_{cc}}{2\pi f_s L_{dab}n} \delta \left(1 - \frac{|\delta|}{\pi}\right) \quad (3)$$

A. Linearização das correntes médias

A partir das correntes médias são obtidos os modelos de pequenos sinais relacionando o ângulo de defasagem e as correntes de entrada e saída do conversor. Inicialmente, identifica-se que as correntes nas equações (2) e (3) não se apresentam na forma linear, então é necessário perturbar o ângulo δ em torno do ponto de operação linear Φ , como segue:

$$I_{prim} + \Delta i_{prim}(t) = \frac{V_{bat}}{2\pi f_s L_{dab}n} (\Phi + \Delta\delta(t)) \cdot \left(1 - \frac{|\Phi + \Delta\delta(t)|}{\pi}\right) \quad (4)$$

Desconsiderando os termos contínuos, (4) pode ser escrita apenas como um ganho em função do ângulo.

$$\Delta i_{prim}(t) = \underbrace{\frac{V_{bat}}{2\pi f_s L_{dab}n} \left(1 - \frac{|2\Phi|}{\pi}\right)}_{G_{prim}} \cdot \Delta\delta(t) \quad (5)$$

Analogamente a corrente média do primário, a corrente média do secundário é perturbada e linearizada.

$$I_{sec} + \Delta i_{sec}(t) = \frac{V_{cc}}{2\pi f_s L_{dab}n} (\Phi + \Delta\delta(t)) \cdot \left(1 - \frac{|\Phi + \Delta\delta(t)|}{\pi}\right) \quad (6)$$

$$\Delta i_{sec}(t) = \underbrace{\frac{V_{cc}}{2\pi f_s L_{dab}n} \left(1 - \frac{|2\Phi|}{\pi}\right)}_{G_{sec}} \cdot \Delta\delta(t) \quad (7)$$

As equações (5) e (7) mostram comportamento de fonte de corrente dependente da variação do ângulo de comutação e de uma constante G , como mostra a Fig. 4.

O modelo de pequenos sinais que relaciona as variáveis de interesse em função da variação do ângulo δ pode ser obtido através da análise do circuito da Fig. 4, realizando a soma das

correntes para o fluxo direto e o reverso, então são encontradas as seguintes equações:

$$i_{prim}(t) = i_{C_{cc}}(t) + i_{cc}(t) \quad (8)$$

$$i_{sec}(t) = i_{C_{bat}}(t) + i_{bat}(t) \quad (9)$$

Aplica-se a transformada de Laplace em todos os termos de (8) para representá-las no domínio da frequência, então a expressão da corrente I_{prim} é redefinida como:

$$\frac{V_{bat}}{2\pi f_s L_{dab}n} \delta(s) \left(1 - \frac{|2\delta|}{\pi}\right) = s C_{cc} V_{cc}(s) + \frac{1}{R_{cc}} V_{cc}(s) \quad (10)$$

A partir de (10) reorganiza-se os termos de interesse para obter a expressão que define a função de transferência da tensão no barramento em função do ângulo de defasagem:

$$G_{vc}(s) = \frac{V_{cc}(s)}{\delta(s)} = \frac{V_{bat}}{2\pi f_s L_{dab}n} \cdot \left(1 - \frac{|2\delta|}{\pi}\right) \cdot \frac{R_{cc}}{s R_{cc} C_{cc} + 1} \quad (11)$$

Para determinar a corrente que circula pelas baterias em (9), utiliza-se a expressão que analisa as diferenças de tensões:

$$v_{bat}(t) = R_{bat} \cdot i_{bat}(t) + L_{bat} \cdot \frac{di_{bat}(t)}{dt} \quad (12)$$

Isolando i_{bat} e aplicando a transformada de Laplace em (12):

$$I_{bat}(s) = \frac{V_{bat}(s)}{s L_{bat} + R_{bat}} \quad (13)$$

Substituindo todos os termos em (9) encontra-se a corrente no secundário como:

$$\delta(s) \frac{V_{cc}}{2\pi f_s L_{dab}n} \left(1 - \frac{2\delta}{\pi}\right) = s C_{bat} V_{Cbat}(s) + \frac{V_{Cbat}(s)}{s L_{bat} + R_{bat}} \quad (14)$$

Reorganiza-se os termos de interesse para obter a expressão que define a função de transferência da tensão nas baterias em função do ângulo de defasagem:

$$G_{vb}(s) = \frac{V_{bat}(s)}{\delta(s)} = \frac{V_{cc}}{2\pi f_s L_{dab}n} \cdot \left(1 - \frac{2\delta}{\pi}\right) \cdot \frac{s L_{bat} + R_{bat}}{s^2 L_{bat} C_{bat} + s R_{bat} C_{bat} + 1} \quad (15)$$

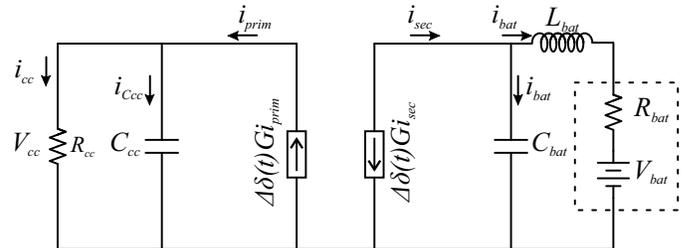


Figura 4: Modelo de pequenos sinais do conversor *Dual Active Bridge*.

Para determinar a corrente das baterias, utiliza-se (9) aplicando Laplace e isolando os termos de interesse, obtendo:

$$G_{ib}(s) = \frac{I_{bat}(s)}{\delta(s)} = \frac{V_{cc}}{2\pi f_s L_{dab} n} \left(1 - \frac{2\delta}{\pi}\right) \cdot \left(\frac{1}{s^2 L_{bat} C_{bat} + s R_{bat} C_{bat} + 1}\right) \quad (16)$$

onde, L_{bat} , C_{bat} e R_{bat} são: a indutância em série com as baterias, a capacitância em paralelo e a resistência interna das baterias respectivamente.

IV. CONTROLE DO CONVERSOR DAB

Para validar os modelos que definem a dinâmica de operação do conversor, inicialmente define-se o ponto de operação para o modelo de pequenos sinais, pois o conversor pode operar dentro de toda a faixa de carga da bateria. Logo, para este projeto δ é definido em 20° , ângulo este próximo do ponto de operação do conversor para alcançar a máxima potência de saída.

A. Projeto do controle de corrente das baterias - Modo carga

O projeto do controlador da corrente das baterias foi realizado com base no diagrama de blocos do sistema de controle digital ilustrado na Fig. 5. A planta $G_{ib}(w)$ foi obtida de acordo com [7], já incluindo o atraso de implementação, o efeito da conversão ZOH e o modulador PWM foram levados em consideração na modelagem da planta.

Como parâmetros de desempenho, foram adotados uma margem de fase 60° e uma frequência de cruzamento do ganho em 7 Hz, visto que o processo de carga das baterias possui uma dinâmica lenta.

A escolha é feita pelo controlador Proporcional Integral (PI), a fim de reduzir o erro em regime permanente mantendo a

característica CC. A função de transferência do controlador de corrente projetado no domínio z é definido pela expressão:

$$C_{ib}(z) = 14,42 \frac{(z - 0,997)}{(z - 1)} \quad (17)$$

B. Projeto do controle de tensão nas baterias - Modo carga

O projeto do controlador da tensão das baterias é realizado de maneira análoga ao anterior, a frequência de cruzamento de ganho adotada foi de 0,2 Hz, com margem de fase em 60° . Novamente o controlador projetado é o PI, onde a parcela integral do compensador consegue atingir uma margem de ganho satisfatória em baixas frequências. A função de transferência do controlador de tensão projetado no domínio z é definido pela expressão:

$$C_{vb}(z) = 2,919 \frac{(z - 0,993)}{(z - 1)} \quad (18)$$

C. Projeto do controle de tensão no barramento CC - Modo descarga

O controlador projetado é o PI com frequência de cruzamento do ganho adotada em 10 Hz e margem de fase em 71° , atendendo assim a dinâmica de resposta do sistema. A função de transferência do controlador de tensão projetado no domínio z é definido pela expressão:

$$C_{vc}(z) = 0,9693 \frac{(z - 0,996)}{(z - 1)} \quad (19)$$

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para comprovar o correto funcionamento do conversor DAB e o desempenho dos controladores projetados para atuar no controle de carga e descarga das baterias, é realizada a simulação no *software* Psim. Os parâmetros dos elementos

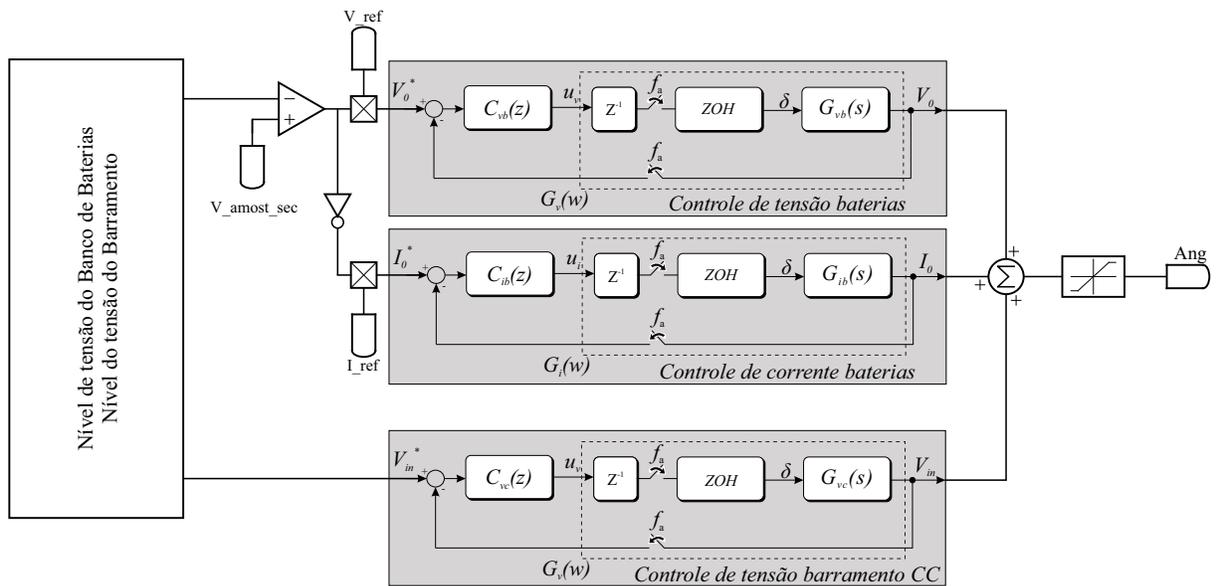


Figura 5: Diagrama de Controle do conversor Dual Active Bridge.

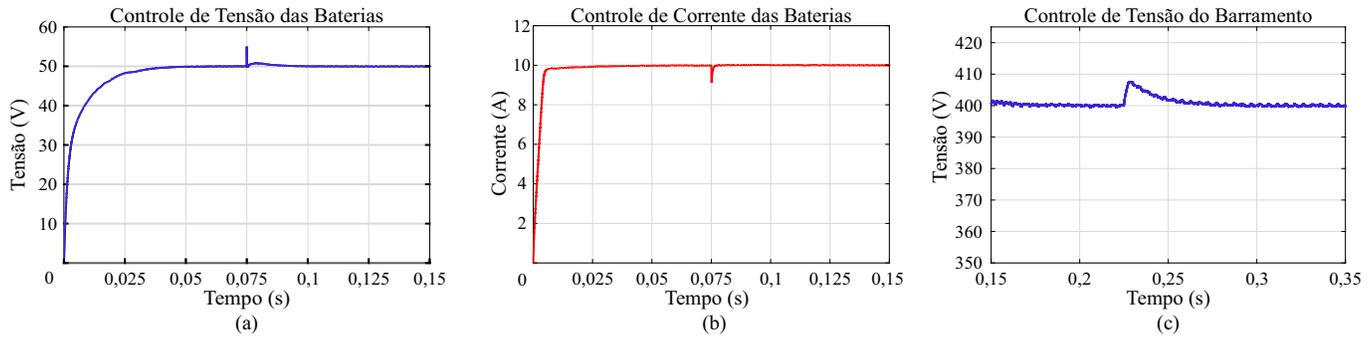


Figura 6: Comprovação dos controles do conversor *Dual Active Bridge*.

utilizados na simulação são apresentados na Tab. 1. A Fig. 1 mostra o conversor na configuração utilizada na simulação.

A Fig. 6 apresenta os resultados de simulação para comprovação do funcionamento dos controladores projetados anteriormente. Salienta-se que foram realizados degraus negativos de carga para a comprovação. Na Fig. 6 (a) é mostrada a tensão do banco de baterias em regime permanente, fazendo uso do controlador de tensão projetado, em $t=75$ milissegundos (ms) foi aplicado um degrau de carga de 10%. Pode-se perceber que o controlador atuou de forma satisfatória, mantendo a tensão controlada em 50 V. A Fig. 6 (b) mostra a corrente do banco de baterias, em $t=75$ ms foi aplicado um degrau de carga de 10%, como pode-se visualizar o controlador de corrente funciona de maneira adequada, mantendo a corrente controlada em torno de 10 A. Na Fig. 6 (c) é apresentada a tensão do barramento CC, a qual deve permanecer em 400 V, em $t=230$ ms um degrau de carga de 25% é aplicado, percebe-se que o controlador de tensão projetado atua mantendo a tensão do barramento controlada em 400 V.

A Fig. 7 apresenta o processo de carga do banco de baterias, sendo possível observar os três estágios do processo de carga. Inicia-se o método com corrente constante CC (10 A), até que o banco de baterias atinja a tensão de equalização (57,6 V), então aplica-se tensão constante (CV) e em seguida a tensão do banco de baterias é reduzida para a tensão de flutuação (52,8 V), neste momento é encerrado o processo de carga do

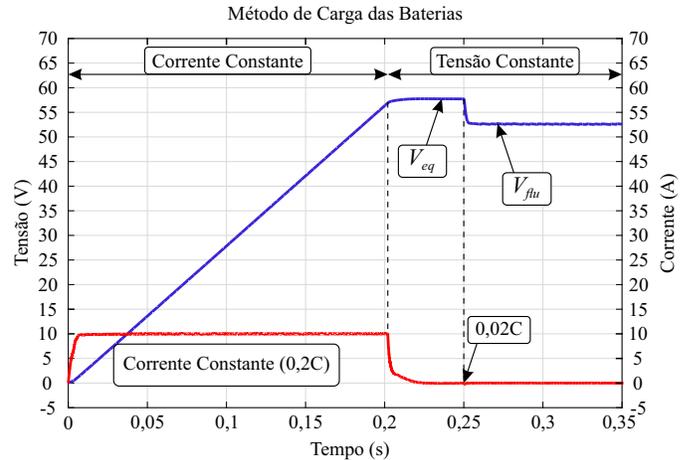


Figura 7: Método de carga das baterias.

Tabela I: Parâmetros de funcionamento do conversor DAB

Especificações dos Parâmetros	Valor
Tensão Nominal das Baterias	50 V
Tensão Nominal do Barramento CC	400 V
Potência Nominal Média	500 W
Relação de Transformação do Transformador	1/8
Frequência de Comutação	20 kHz
Ângulo Nominal de Defasagem	20°
Indutância Auxiliar	790 μ H
Indutância de Filtro	141 μ H
Capacitância no Primário do Transformador	47 μ F
Capacitância no Secundário do Transformador	560 μ F
Carga Resistiva Nominal do Primário	320 Ω
Carga Resistiva Nominal do Secundário	5 Ω

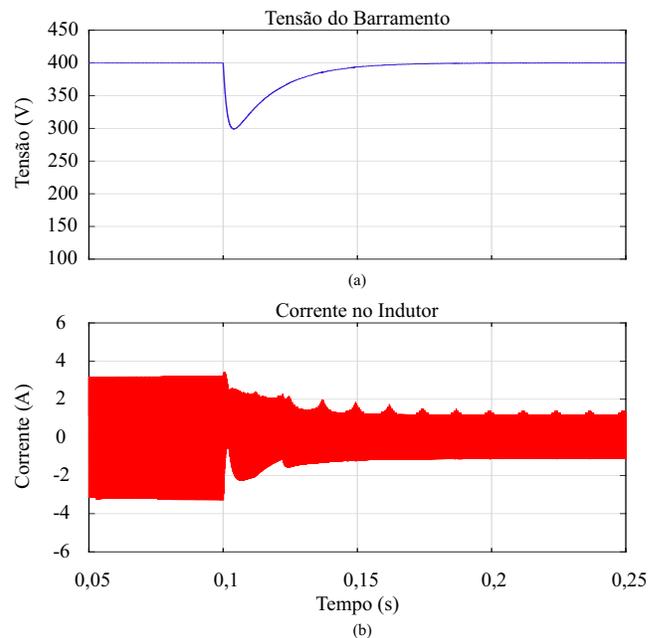


Figura 8: Troca de modos de operação do conversor *Dual Active Bridge*.

banco de baterias.

Na Fig. 8 é apresentado o momento da troca de modos

de operação do conversor, ou seja, ele passa do modo de carregamento do banco de baterias para o modo de suprimento do barramento CC. No momento $t = 100$ ms ocorre a troca de modos e percebe-se que a tensão do barramento (Fig. 8 (a)) sofre um afundamento até que o controlador de tensão consiga compensar o erro. Ainda é possível visualizar que a corrente na indutância de dispersão Fig. 8 (b), L_{dab} , não sofre grandes sobressinais e o conversor continua operando de forma estável durante todo o processo de descarga das baterias.

VI. CONCLUSÃO

A partir do funcionamento do circuito elétrico do conversor DAB foi realizado o levantamento dos modelos matemáticos com a inclusão do filtro de corrente das baterias. Na sequência o projeto dos controladores propostos tiveram margem de fase satisfatória e mantiveram a frequência de cruzamento do ganho baixas pelo fato de que as baterias mantêm dinâmica lenta no processo de carga e descarga.

Os resultados de simulação mostraram primeiramente a comprovação do funcionamento dos controladores projetados (controle de corrente das baterias, controle de tensão das baterias e controle de tensão do barramento CC). Na sequência, os controladores de corrente e tensão das baterias são aplicados no processo de carregamento de um banco de baterias, onde pode-se observar a presença dos três estágios de carga do método CC/CV. Após, realizou-se o controle da tensão do barramento aplicando um degrau de carga. Por fim, a troca de modos entre o modo barramento (transferência do fluxo de potência do barramento CC para as baterias) e o modo baterias (transferência do fluxo de potência do banco de baterias para barramento CC) foi realizado, com esse resultado pode-se perceber que ocorre um afundamento transitório na tensão do barramento, porém a corrente do primário (L_{dab}) não apresenta grandes oscilações, demonstrando a estabilidade da topologia. Durante o processo de descarga do banco de baterias, a tensão no barramento manteve-se constante até a descarga total das baterias, tensão essa informada pelo seu fabricante. Todos os resultados comprovam o funcionamento dos controladores projetados através dos modelos propostos e do sistema do conversor DAB.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001, do INCTGD e órgãos financiadores (CNPq processo n° 465640/2014-1, CAPES processo n° 23038.000776/2017-54 e FAPERGS n° 17/2551-0000517-1).

REFERÊNCIAS

- [1] D. Segaran, D. Holmes, and B. McGrath, "Comparative analysis of single-and three-phase dual active bridge bidirectional dc-dc converters," *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 329–337, 2009.
- [2] R. W. De Doncker, D. M. Divan, and M. H. Kheraluwala, "A three-phase soft-switched high-power-density dc/dc converter for high-power applications," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 27, no. 1, pp. 63–73, 1991.
- [3] B. Zhao, Q. Song, W. Liu, and Y. Sun, "Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional dc–dc converter for high-frequency-link power-conversion system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 8, pp. 4091–4106, 2013.
- [4] A. Bueno and C. Brandão, "Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no brasil," *Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia*, 2016.
- [5] F.-C. Yang, C.-C. Chen, J.-J. Chen, Y.-S. Hwang, and W.-T. Lee, "Hysteresis-current-controlled buck converter suitable for li-ion battery charger," in *2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems*, vol. 4. IEEE, 2006, pp. 2723–2726.
- [6] D. Mukai, K. Kobayashi, T. Kurahashi, N. Matsueda, K. HASHIZAKI, and M. KOGURE, "Development of large high-performance lithium-ion batteries for power storage and industrial use," *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, vol. 49, no. 1, p. 6, 2012.
- [7] K. Ogata *et al.*, *Discrete-time control systems*. Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 1995, vol. 2.