

# Estratégia de Controle de um Conversor CC-CC Bidirecional Intercalado Aplicado a um Banco de Baterias de um Sistema de Propulsão Híbrido

Maria Eduarda S. Bastos\* Vitor C. S. Torres\*\*  
Matheus S. Almeida\*\* Manuel A. Rendón\*\*  
Márcio C. B. P. Rodrigues\*\*\* Pedro S. Almeida\*  
Janaina G. Oliveira\*

\* *Grupo de Conversão Eletromecânica de Energia (GCEME),  
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade  
Federal de Juiz de Fora (UFJF), MG*

\*\* *Grupo de Conversão Eletromecânica de Energia (GCEME),  
Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora  
(UFJF), MG*

\*\*\* *Grupo de Conversão Eletromecânica de Energia (GCEME),  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de  
Minas Gerais (IF Sudeste MG), Campus Juiz de Fora, MG*

E-mail: mariaeduarda.bastos@engenharia.ufjf.br;  
vitor.torres@engenharia.ufjf.br; matheus.almeida@engenharia.ufjf.br;  
manuel.rendon@ufjf.edu.br; marcio.carmo@ifsudestemg.edu.br;  
pedro.almeida@ufjf.edu.br; janaina.oliveira@ufjf.edu.br

---

**Abstract:** This paper presents the modeling and control of an interleaved bidirectional DC-DC converter responsible for the interconnection of a battery bank with an aircraft propulsion system. The modeling performed is based on the average model techniques in the state space and small signal linearization. The employed charge/discharge technique consists of two stages, where the constant current is maintained and, subsequently, the constant voltage. In order to accomplish this task, current and voltage controllers are used. The validation of the propulsion test bench subsystem is performed by means of simulation results, considering a fixed voltage DC bus and a dynamic model that represents the behavior of the battery bank.

**Resumo:** Este artigo apresenta a modelagem e o controle de um conversor CC-CC bidirecional intercaldado responsável pela interconexão de um banco de baterias com um sistema de propulsão de aeronave. A modelagem realizada é baseada nas técnicas de modelo médio no espaço de estados e linearização por pequenos sinais. A técnica de carga/descarga empregada é composta por duas etapas, onde mantém-se a corrente constante e, posteriormente, a tensão constante. Para realizar esta tarefa, são utilizados controladores de corrente e tensão. A validação do subsistema do banco de ensaios de propulsão é realizada por meio de resultados de simulações, considerando um barramento CC de tensão fixa e um modelo dinâmico que representa o comportamento do banco de baterias.

*Keywords:* hybrid aircraft; aeronautical propulsion; interleaved bidirectional DC-DC converter; battery charger; buck mode control.

*Palavras-chaves:* aeronave híbrida; propulsão aeronáutica; conversor CC-CC bidirecional intercaldado; carregador de bateria; controle em modo buck.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento dos impactos das emissões de gases causadores do efeito estufa, a utilização de tecnologias que minimizem a degradação do meio ambiente tem se tornado cada vez mais necessária. Com relação ao setor de transportes, os veículos híbridos/elétricos são uma alternativa interessante por possibilitarem a redução das emissões de poluentes atmosféricos e um uso mais eficiente das fontes de energia disponíveis (Ribberink and Entchev, 2013; Rashed et al., 2016).

Além dos veículos terrestres, como os carros elétricos leves e os de transporte público de passageiros e de cargas, as tecnologias de propulsão elétrica vêm sendo também investigadas para aplicações aeronáuticas. Por necessitarem de elevadas quantidades de energia, os sistemas híbridos de propulsão são atualmente mais interessantes para esse tipo de aplicação, uma vez que combinam turbinas e motores de combustão com máquinas elétricas (Del Pizzo et al., 2016).

Atualmente, diversas arquiteturas de tecnologias para aeronaves híbridas são encontradas. A associação de múltiplas fontes de energia com diferentes densidades, como turbogeradores e bancos de baterias, é fundamental para proporcionar o desempenho necessário a esse tipo de aplicação (Melo, 2014). Há também a presença de aeronaves auxiliadas por geração fotovoltaica (Dantsker et al., 2019). Conversores estáticos realizam a interface dessas fontes de fornecimento de energia e o motor elétrico (Lawhorn et al., 2018; Torres et al., 2019).

Os avanços tecnológicos dos sistemas de armazenamento de energia têm contribuído significativamente para a ascensão dos transportes elétricos, proporcionando-os maior autonomia. Características como diminuição de peso e tamanho, aumento de densidade de energia, redução de custo e aumento de vida útil, tem tornado viável o uso desses sistemas como fonte de energia para diversos tipos de veículos (Tariq et al., 2017). Os conversores que interligam as baterias aos sistemas de propulsão veiculares devem ser capazes de operar com fluxo bidirecional de energia. As topologias para esse tipo de conexão podem ser CC-CC ou CA-CC como, por exemplo, os conversores *Buck*, *Boost* e ponte completa (Mayer et al., 2015).

Nesse sentido, o presente artigo apresenta a modelagem e o controle de um conversor CC-CC bidirecional intercalado (ou *interleaved*), responsável por realizar a gestão do fluxo de potência entre o barramento CC de um sistema de propulsão híbrido de aeronave e um banco de baterias. A topologia do conversor é composta por três braços intercalados, que atuam de maneira independente, com uma defasagem angular elétrica de  $120^\circ$ .

A associação de forma intercalada dos braços do conversor permite que a corrente seja distribuída entre seus indutores, o que possibilita o uso de componentes de menor capacidade nominal e reduz a ondulação de corrente no banco de baterias. Ademais, com esse tipo de estratégia, pode-se alcançar um melhor rendimento diante de potências elevadas (Queroz, 2019). Por outro lado, a característica bidirecional é fundamental para possibilitar o fluxo de potência entre o barramento e o banco de baterias.

Para avaliação da abordagem proposta, simulações considerando um barramento CC de tensão fixa e um modelo dinâmico que representa o comportamento do banco de baterias foram realizadas no ambiente PSIM.

Este artigo está dividido da seguinte forma: na Seção 2 é abordado o sistema de propulsão híbrido-elétrico sob estudo; a modelagem matemática proposta é apresentada na Seção 3, com a descrição da topologia de conversor adotada, sua modelagem e estratégia de controle, bem como apresentação do modelo equivalente considerado para o banco de baterias; as simulações e resultados são mostrados na Seção 4, que é seguida da conclusão, agradecimentos e referências.

## 2. BANCO DE ENSAIOS PARA PROPULSÃO AERONÁUTICA HÍBRIDO-ELÉTRICA

Este artigo tem o intuito de apresentar a modelagem e o controle de um conversor CC-CC bidirecional que conecta um banco de baterias ao barramento CC do sistema de propulsão, de arquitetura híbrida série, mostrado na Figura 1. O banco de ensaios em destaque é composto por um motor elétrico alimentado por duas fontes diferentes de energia, um gerador elétrico movido a uma turbina a gás e o banco de baterias.

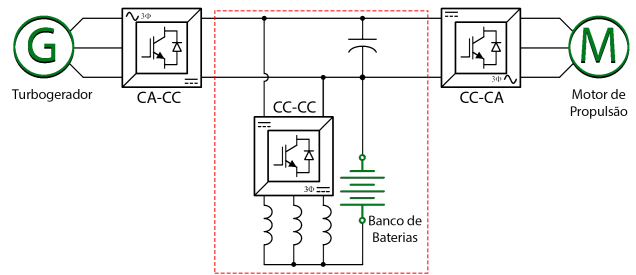


Figura 1. Visão geral do sistema de propulsão híbrido-elétrico sob estudo.

Por serem equipamentos que funcionam em corrente alternada, a retificação da energia gerada pelo turbogerador é proporcionada por um conversor CA-CC, enquanto que a inversão da energia para alimentação do motor a partir do barramento CC é realizada por um inversor de frequência (CC-CA). Este, também é responsável pelo controle de conjugado e velocidade do motor elétrico. O intercâmbio de potência entre o barramento CC e banco de baterias é proporcionado pelo conversor CC-CC abordado neste trabalho.

O retificador que conecta o turbogerador ao barramento é responsável por manter o nível de tensão CC fixo. Assim, o conversor CC-CC bidirecional trabalha sempre no modo *buck*, regulando o nível de tensão nos terminais do banco de baterias e impondo o sentido de corrente necessário para carga do banco de baterias ou para alimentação do barramento CC.

No topo da hierarquia de controle do banco de ensaios, um sistema supervisor constante monitora as condições de cada subsistema, isto é, a disponibilidade de combustível, estado de carga (SoC, do inglês *state of charge*) do banco de baterias e a potência solicitada pelo motor, e analisa a condição de operação emulada (decolagem, subida,

cruzeiro, descida ou pouso). Com esses parâmetros, o grau de hibridação ótimo é determinado, seguindo critérios de otimização. Essa informação é, então, utilizada para definir as referências das malhas de controle de cada conversor do sistema de propulsão, incluindo quando o banco de baterias deve extrair ou injetar potência no barramento CC.

### 3. MODELAGEM MATEMÁTICA

A Figura 2 apresenta a topologia intercalada empregada no controle de fluxo de potência entre o barramento CC e o banco de baterias. A característica bidirecional oferecida por esse modelo é essencial para o intercâmbio de energia em ambos os sentidos. Na técnica *interleaved* os conversores CC-CC são conectados de maneira paralela e compartilham um único filtro de saída. O acionamento dos interruptores é realizado com uma defasagem angular elétrica de 120° entre cada braço e a corrente de entrada é igualmente compartilhada pelas fases do conversor (Fuzato, 2015). A técnica mostra-se interessante para aplicações com elevados fluxos de potência, como é o caso do sistema considerado neste trabalho.

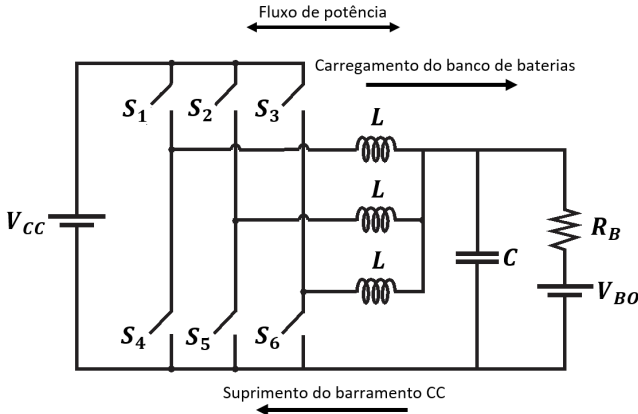


Figura 2. Conversor CC-CC bidirecional intercalado.

Na Figura 2, o banco de baterias é representado como uma fonte de tensão ( $V_{BO}$ ), correspondente ao seu valor de tensão nominal, uma vez que as variações de tensão neste elemento ocorrem de maneira mais lenta e em menor amplitude que no restante do circuito. Além disso, as resistências internas dos interruptores e indutores foram incluídas na modelagem, tornando o modelo mais realístico. A modelagem realizada considera uma operação em modo de condução contínua, cuja frequência de comutação é constante.

Para garantir o correto funcionamento do conversor, é fundamental que suas variáveis elétricas sejam corretamente controladas. O projeto dos controladores, por sua vez, exige o levantamento do modelo da planta, obtido a partir de equações diferenciais lineares resultantes da linearização de equações não-lineares em torno dos pontos de operação do conversor (Barbi, 2015).

Assim, nesta seção são descritos os modelos matemáticos utilizados para avaliar a operação do conversor CC-CC intercalado nos processos de carga e descarga do banco de baterias do sistema de propulsão da Figura 1. A modelagem do conversor CC-CC bidirecional intercalado é apre-

sentada, bem como sua validação e a estratégia de controle adotada. Além disso, descreve-se o modelo considerado para o banco de baterias a fim de possibilitar a simulação computacional dos processos de carga e descarga.

#### 3.1 Modelagem do conversor CC-CC

A modelagem foi realizada por meio das técnicas de modelo médio no espaço de estados e linearização por pequenos sinais. Para isso, leva-se em conta a operação do conversor alternando entre dois estados topológicos, “ $D$ ” e “ $1 - D$ ”, referentes à razão cíclica e à razão cíclica complementar, respectivamente. Cada um descrito por um conjunto linear de equações de espaço de estados, conforme indicado em (1).

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}_S \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_S \cdot \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_S \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{E}_S \cdot \mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (1)$$

onde  $\mathbf{x}(t)$ ,  $\mathbf{u}(t)$  e  $\mathbf{y}(t)$  representam os vetores de estado, de entrada e de saída, respectivamente. As matrizes  $\mathbf{A}_S$ ,  $\mathbf{B}_S$ ,  $\mathbf{C}_S$  e  $\mathbf{E}_S$  formam o modelo de espaço de estados do conversor para cada subtopologia, sendo conhecidas como matriz dinâmica, matriz de controle, matriz de saída e matriz de transferência direta, respectivamente.

Neste trabalho, foram consideradas como variáveis de estado as correntes nos indutores de cada braço do conversor ( $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  e  $i_{L3}$ ) e a tensão no capacitor de saída ( $v_C$ ), enquanto que a tensão de entrada ( $V_{CC}$ ) e a tensão interna da bateria ( $V_{BO}$ ) formam a matriz de entrada do sistema. Ademais, sabendo que os circuitos equivalentes obtidos para cada braço do conversor são similares, uma vez que seus componentes são de mesmo valor, foi realizada a modelagem referente a apenas um de seus braços, sendo as relações obtidas adaptadas aos demais.

Por meio das leis de Kirchhoff é possível obter as equações de estado que dão origem ao modelo. Durante o primeiro estágio (estado topológico “ $D$ ”), em que o interruptor  $S_1$  encontra-se em estado de condução e o interruptor  $S_4$  em estado de bloqueio, o indutor  $L$  é carregado pela diferença de tensão entre a fonte de entrada e a carga. O circuito equivalente a esta situação é exibido na Figura 3. As equações (2) e (3) descrevem as relações de corrente e tensão deste circuito equivalente.

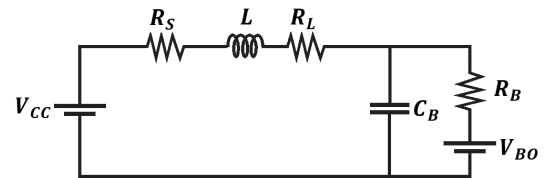


Figura 3. Circuito equivalente para um braço do conversor:  $S_1$  em condução e  $S_4$  em bloqueio.

$$L \cdot \frac{di_L}{dt} = -R_S \cdot i_L - R_L \cdot i_L - v_C + V_{CC} \quad (2)$$

$$C_B \cdot \frac{dv_C}{dt} = i_L - \frac{v_C - v_B}{R_B} \quad (3)$$

Considerando o segundo estágio de operação (estado topológico “1-D”), em que os interruptores  $S_1$  e  $S_4$  encontram-se, respectivamente, em bloqueio e condução, como ilustrado na Figura 4, a representação matemática das correntes e tensão é dada pelas relações descritas em (4) e (5). Neste estágio, a energia anteriormente armazenada no indutor  $L$  é transferida para a carga.

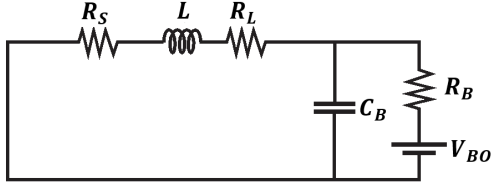


Figura 4. Circuito equivalente para um braço do conversor:  $S_1$  em bloqueio e  $S_4$  em condução.

$$L \cdot \frac{di_L}{dt} = -R_S \cdot i_L - R_L \cdot i_L - v_C \quad (4)$$

$$C_B \cdot \frac{dv_C}{dt} = i_L - \frac{v_C - v_B}{R_B} \quad (5)$$

Após substituir as equações de estado levantadas para cada estágio de operação do conversor CC-CC na relação descrita em (1), pode-se obter o modelo médio para a operação do circuito, conforme descrito em (6) (Barbi, 2015).

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \mathbf{x} = [\mathbf{A}_1 D + \mathbf{A}_2 (1 - D)] \mathbf{x} + [\mathbf{B}_1 D + \mathbf{B}_2 (1 - D)] \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = [\mathbf{C}_1 D + \mathbf{C}_2 (1 - D)] \mathbf{x} + [\mathbf{E}_1 D + \mathbf{E}_2 (1 - D)] \mathbf{u} \end{cases} \quad (6)$$

As matrizes que resultam no modelo médio do conversor são definidas conforme indicado em (7), que levam às matrizes generalizadas apresentadas em (8), (9) e (10).

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \mathbf{A}_1 \cdot D + \mathbf{A}_2 \cdot (1 - D) \\ \mathbf{B} = \mathbf{B}_1 \cdot D + \mathbf{B}_2 \cdot (1 - D) \\ \mathbf{C} = \mathbf{C}_1 \cdot D + \mathbf{C}_2 \cdot (1 - D) \\ \mathbf{E} = \mathbf{E}_1 \cdot D + \mathbf{E}_2 \cdot (1 - D) \end{cases} \quad (7)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-(R_S - R_L)}{L} & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{-(R_S - R_L)}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 & \frac{-(R_S - R_L)}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_B} & \frac{1}{C_B} & \frac{1}{C_B} & -\frac{1}{R_B \cdot C_B} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{D}{L} & 0 \\ \frac{D}{L} & 0 \\ \frac{D}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_B \cdot C_B} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

O modelo de pequenos sinais pode ser obtido por meio do ponto de operação do sistema em regime permanente e na adição de perturbações em suas entradas. Assim, a partir de uma análise de pequenos sinais, a matriz  $B_d$  pode ser obtida, sendo descrita por (11).

$$\mathbf{B}_d = (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \cdot \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \frac{V_{CC}}{L} & 0 \\ \frac{V_{CC}}{L} & 0 \\ \frac{V_{CC}}{L} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

A matriz de transferência de controle do sistema, que relaciona o efeito do comando de controle nas saídas do conversor, pode então ser obtida pela equação (12).

$$\mathbf{W}(s) = \frac{\tilde{\mathbf{y}}(s)}{\tilde{\mathbf{d}}(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{B}_d \quad (12)$$

A partir da matriz de transferência de controle é possível obter as funções de transferência para a corrente do indutor ( $G_{il}(s)$ ) e impedância do conversor ( $Z_0(s)$ ), descritas pelas equações (13) e (14), respectivamente.

$$G_{il}(s) = \frac{V_{CC} \cdot (1 + C_B \cdot r_B \cdot s)}{C_B \cdot L \cdot r_B \cdot s^2 + L \cdot s + 3 \cdot r_B} \quad (13)$$

$$Z_0(s) = \frac{r_B}{1 + s \cdot r_B \cdot C_B} \quad (14)$$

Em adicional, a matriz de transferência de distúrbios, que relaciona o efeito de variações nas entradas  $V_{CC}$  e  $V_{BO}$  nas saídas do conversor pode ser obtida por meio da relação descrita em (15). As funções de transferência dessa matriz são utilizadas na validação do modelo generalizado levantado.

$$\mathbf{W}_D(s) = \frac{\tilde{\mathbf{y}}(s)}{\tilde{\mathbf{d}}(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{B} \quad (15)$$

Pode-se destacar que as funções de transferência que relacionam as variações na entrada  $V_{CC}$  com as saídas do sistema são idênticas às que relacionam as variações na ação de controle, bastando trocar  $V_{CC}$  por  $D$  no numerador. Enquanto que as que relacionam as variações em  $V_{BO}$  não dependem de  $D$  e  $V_{CC}$ .

### 3.2 Validação do Modelo Generalizado

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de simulação do conversor bidirecional, adotados também no modelo equivalente levantado para sintonia dos controladores do sistema.

Tabela 1. Parâmetros de simulação.

Descrição	Símbolo	Valor
Tensão Barramento CC	$V_{CC}$	670 V
Resistências internas interruptores	$R_S$	10 m $\Omega$
Indutâncias	$L$	2,4 mH
Resistências internas indutores	$R_L$	100 m $\Omega$
Capacitância	$C$	120 $\mu$ F
Tensão nominal da bateria	$V_{BO}$	249,6 V
Resistência interna da bateria	$R_B$	54,6 m $\Omega$
Frequência de comutação	$f_S$	16 kHz

A fim realizar a validação do modelo obtido, a Figura 5 apresenta as respostas de corrente e tensão quando aplicadas variações na razão cíclica do conversor ( $D$ ).

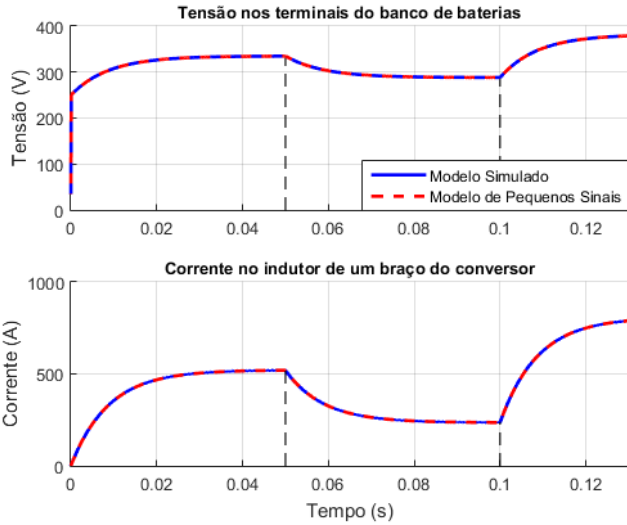


Figura 5. Comparação entre as saídas do conversor no modelo simulado e no modelo matemático desenvolvido.

A comparação da resposta do modelo desenvolvido com a simulação computacional do conversor CC-CC permite concluir que as equações obtidas representam de maneira satisfatória o comportamento do sistema considerado. No instante 0,05 s a razão cíclica sofreu uma redução de 20%, levando a tensão nos terminais do modelo de bateria de 335 V para 288 V. Mais adiante, em 0,1 s um degrau de 40% foi aplicado alterando a tensão para 380 V. É importante destacar que no modelo equivalente levantado, grandes variações no comando de controle exigem que a tensão de entrada do conversor não sofra variações.

### 3.3 Estratégia de Controle

O controle do processo de armazenamento de energia em uma bateria (carga) pode ser realizado em duas etapas, em que primeiro deve-se manter corrente constante e, posteriormente, tensão constante (Rodrigues et al., 2014). Já o processo de descarga depende da corrente requerida pela carga. Além disso, é necessário o monitoramento da tensão terminal da bateria, de modo a evitar que se extrapole os limites de segurança para os processos de carga e descarga, conforme determinação do fabricante. Faz-se, então, necessária a utilização de controladores tanto de corrente como de tensão. Deste modo, a Figura 6 apresenta o diagrama de blocos do controle proposto para o sistema de interface entre o barramento CC e o banco de baterias, composto por três malhas internas e uma malha externa.

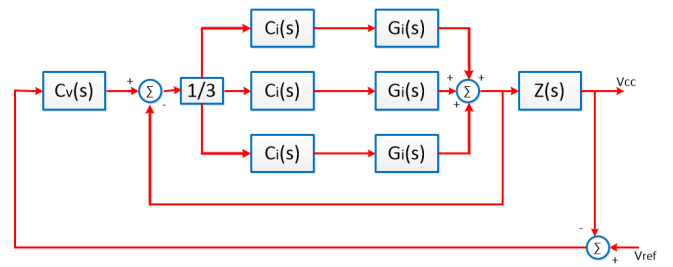


Figura 6. Diagrama de blocos para controle do conversor.

As malhas internas referem-se ao controle das correntes nos indutores dos três braços do conversor CC-CC intercalado, enquanto que a malha externa corresponde ao controle de tensão nos terminais da bateria. De forma geral, com base na tensão de referência definida, a malha externa gera a corrente de referência total dos três braços do conversor e as malhas internas geram os sinais de controle que são comparados com as portadoras defasadas de 120° para gerar o sinal PWM aplicado aos interruptores do conversor. Para o correto funcionamento da estratégia adotada, é fundamental que a malha externa de tensão apresente uma dinâmica mais lenta que as demais (Deus, 2018).

A sintonia dos controladores foi realizada com o auxílio do *Sisotool* do *software* MATLAB e por intermédio de uma análise do sistema no domínio da frequência. Para um resultado satisfatório no projeto de controladores, Pomilio (2018) sugere que a frequência de corte escolhida para o sistema compensado deve ser inferior a 1/5 da frequência de comutação, a fim de evitar os efeitos de comutação sobre o sinal de controle. Pensando em aplicações digitais, Wenk (2019) ainda sugere que se adote uma frequência de corte até uma década abaixo da frequência de comutação. Por outro lado, a margem de fase deve ser estabelecida entre 45° e 90° (Barbi, 2007).

Assim, o projeto da malha de corrente foi realizado considerando uma frequência de corte em 1600 Hz, que representa um décimo da frequência de comutação, e uma margem de fase de 70°, a fim de proporcionar resposta transitória adequada à aplicação, com oscilação e sobressinal reduzidos, além de tempo de acomodação satisfatório. Por outro lado, na malha externa, uma frequência de corte em duas décadas abaixo da frequência de comutação (160



$H_z$ ) foi adotada de modo a atender os requisitos necessários de operação da estratégia adotada.

Considerando as especificações de projeto discutidas, as funções de transferência do controlador utilizado em cada uma das malhas de corrente ( $C_i$ ) e do controlador da malha externa de tensão ( $C_v$ ) são apresentadas em (16) e (17), respectivamente.

$$C_i = \frac{(0,0336 \cdot s + 127,6)}{s} \quad (16)$$

$$C_v = \frac{18412,9}{s} \quad (17)$$

### 3.4 Modelo do banco de baterias

A fim de avaliar o desempenho da operação da estratégia de controle proposta para o conversor CC-CC intercalado nos processos de carga e descarga do banco de baterias, faz-se necessário utilizar um modelo equivalente que possibilite representar variações de estado de carga. Desse modo, o circuito equivalente simplificado, mostrado na Figura 7, foi adotado, visando representar as características de armazenamento de energia e descarga do banco de baterias.



Figura 7. Circuito equivalente para representação do comportamento do banco de baterias.

Esse circuito, formado por um resistor ( $R_B$ ) associado em série com um capacitor ( $C_B$ ), que reproduzem, respectivamente, a resistência interna e a carga armazenada no banco de baterias, é definido de modo que o capacitor só opere no intervalo de tensão estabelecido pelo fabricante da bateria. Assim, o cálculo do capacitor é realizado conforme a relação descrita em (18) (Araújo et al., 2016).

$$C_B = \frac{7200 \cdot Q_B \cdot V_N}{|V_i^2 - V_f^2|} \quad (18)$$

onde,  $Q_B$  representa a capacidade das baterias, enquanto  $V_N$ ,  $V_i$  e  $V_f$  representam as tensões nominal, máxima e mínima do banco, respectiva.

O banco de baterias do sistema sob estudo (Figura 1) é composto por uma associação em série de 78 módulos TSWB-LYP40AHA, da Thunder Sky Winston Battery. Essas células de íons de lítio possuem uma capacidade nominal de 40 Ah, podendo operar com uma corrente máxima de carga ou descarga contínua de até 3 C em uma temperatura de operação entre  $-45^\circ\text{C}$  e  $85^\circ\text{C}$ , sendo adequadas para aplicações de tração, incluindo veículos elétricos ou híbridos, e também para aplicações estacionárias, como sistemas fotovoltaicos e UPS (Winston Battery, 2015). Além da tensão nominal de 249,6 V, a associação das células de bateria fornece uma tensão máxima de carga de 312 V e de descarga de 218,4 V. A resistência interna total do banco é aproximadamente 54,6 mΩ. No circuito

equivalente da Figura 7 foram considerados, então,  $Q_B = 40$  Ah,  $V_N = 249,6$  V,  $V_i = 312$  V e  $V_f = 218,4$  V.

Ao longo dos últimos anos, as baterias de íons de lítio vêm se mostrando bastante promissoras, contribuindo significativamente para o desenvolvimento tecnológico. Características como baixa taxa de auto-descarga, fornecimento de altas tensões, boa capacidade de armazenamento e pouca necessidade de manutenção, tornam sua presença atrativa nas mais diversas aplicações, incluindo os veículos elétricos. Todavia, sua utilização demanda a existência de sistemas de proteção que garantam sua operação dentro dos limites de corrente, tensão e temperatura estabelecidos (Ferro and Barbi, 2018).

## 4. RESULTADOS

Para verificar o desempenho do sistema em malha fechada e a dinâmica de armazenamento de energia e descarga do banco de baterias, simulações computacionais foram conduzidas utilizando o simulador PSIM. O capacitor utilizado no modelo foi calculado conforme detalhado em (18). Todavia, visando verificar o comportamento do sistema em reduzido tempo de simulação, utilizou-se uma análise em escala reduzida, com o valor de capacitância dividido por 3600. Deste modo, um ciclo completo de carga ou descarga pode ser realizado em 1 s, fazendo com que a tensão terminal do banco de baterias varie entre seus limites em tal intervalo de tempo. Além disso, a tensão de entrada do conversor foi considerada fixa e a tensão de referência nos terminais do modelo mostrado na Figura 7 foi limitada entre 218,4 e 312 V, que referem-se, respectivamente, à tensão total mínima de descarga e máxima de carga do banco de baterias.

A Figura 8 apresenta as curvas de tensão e corrente nos terminais do modelo do banco de baterias quando um perfil de carga do tipo “corrente constante, tensão constante” é simulado considerando um ciclo com taxa de carga 1 C, ou seja, com corrente constante de 40 A. O valor de tensão

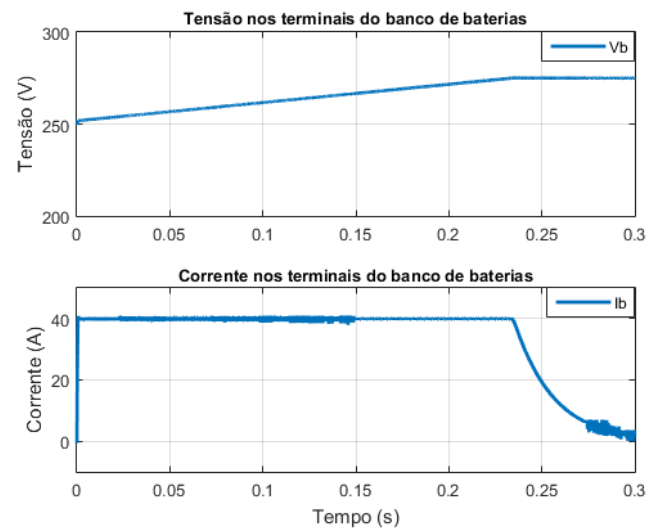


Figura 8. Avaliação da operação do sistema de controle proposto em processo de carga do banco de baterias.

inicial escolhido equivale ao valor nominal do banco, 249,6 V. Por outro lado, a tensão de referência foi definida

como 275 V, que representa estado de carga SoC = 100%, de acordo com as informações do fabricante das baterias TSWB-LYP40AHA. Pode-se notar que, inicialmente, a corrente na carga permanece constante em 40 A até o instante em que a tensão atinge o valor pré-estabelecido. A partir desse instante, a tensão permanece constante e a corrente começa a decrescer até se tornar nula, com o banco de baterias com carga completa.

De maneira análoga, o comportamento do sistema diante de um perfil de descarga com corrente constante, taxa de descarga 1 C, foi verificado, conforme exibido na Figura 9. A tensão de referência para operação em tensão constante foi estabelecida em 234 V, que representa SoC = 20% (limite inferior de operação do banco de baterias). Neste caso, o processo de descarga inicia com corrente constante de -40 A, indicando fornecimento de energia armazenada no banco de baterias ao sistema de propulsão. Uma vez atingido o limite inferior de tensão, a corrente começa a reduzir (em módulo) gradativamente de modo que a tensão seja mantida constante no valor de referência.

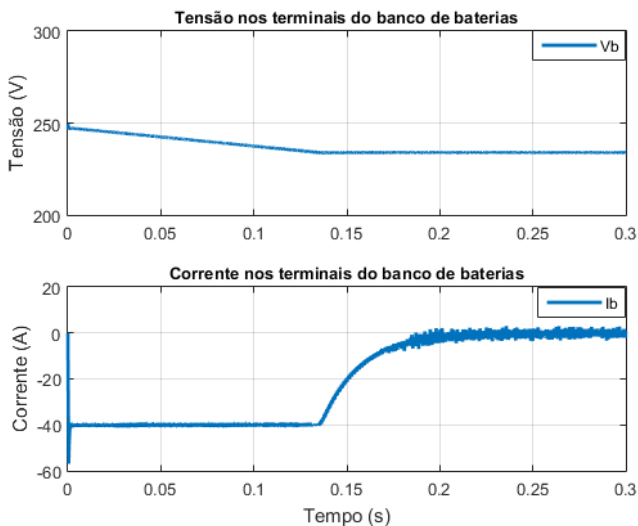


Figura 9. Avaliação da operação do sistema de controle proposto em processo de descarga do banco de baterias.

Os resultados obtidos evidenciam que a estratégia de controle adotada propicia injeção e extração de potência do modelo de banco de baterias de forma satisfatória, respeitando os limites estabelecidos pelo fabricante das células a serem utilizadas no sistema de propulsão real. Escolhendo-se uma referência de controle proporcional ao SoC desejado, o conversor CC-CC bidirecional intercalado é capaz de proporcionar um processo de carga seguro para o conjunto de baterias por meio da estratégia de controle proposta. Por outro lado, sabendo-se a demanda de potência do barramento CC do sistema de propulsão, a estratégia proposta mostra-se capaz de extrair a corrente necessária das baterias, respeitando seus limites de operação.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como foco a modelagem e a definição de estratégia de controle de um conversor CC-CC responsável

pela interconexão de um banco de baterias com um sistema de propulsão elétrico-híbrido de uma aeronave. A sintonia dos controladores foi realizada por meio de um modelo de pequenos sinais e o banco de baterias foi representado por um circuito equivalente com objetivo de simular ciclos de carga/descarga.

A partir dos resultados de simulação foi possível verificar que a estratégia de controle adotada atende o subsistema do banco de ensaios de propulsão sob estudo de maneira efetiva e segura, sendo capaz de gerir o fluxo de potência entre o conjunto de baterias e o barramento CC.

Uma vez que os resultados de simulação evidenciam a viabilidade de utilização do sistema de controle proposto para o conversor CC-CC bidirecional intercalado, como desenvolvimentos futuros planeja-se sua implementação experimental.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFJF e às agências de fomento Capes, FAPEMIG e CNPq pelo apoio e suporte prestados durante o desenvolvimento deste trabalho. A equipe também agradece à Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico da EMBRAER pela parceria que possibilitou o avanços na exploração do conhecimento técnico/científico acerca do tema.

## REFERÊNCIAS

- Araújo, J., Pedrosa, H., Rodrigues, M., and Barbosa, P. (2016). Real-time “hardware-in-the-loop” simulation of components of an electric vehicle powertrain: Modeling and implementation. In *12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 1–7. IEEE.
- Barbi, I. (2007). *Projeto de Fontes Chaveadas*. Florianópolis.
- Barbi, I. (2015). *Modelagem de Conversores CC-CC Empregando Modelo Médio em Espaço de Estados*.
- Dantsker, O.D., Caccamo, M., and Imtiaz, S. (2019). Electric propulsion system optimization for long-endurance and solar-powered unmanned aircraft. In *2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)*, 1–24.
- Del Pizzo, A., Di Noia, L.P., and Marulo, F. (2016). Design considerations on energy storage system for electric aircraft propulsion. In *2016 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, 1–6.
- Deus, F.R.A. (2018). Estudo comparativo entre técnicas de controle aplicadas em um conversor buck. Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade.
- Ferro, J.L. and Barbi, I. (2018). Carregador de baterias de Íon-lítio para veículos elétricos integrado a geração fotovoltaica. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Fuzato, G.H.F. (2015). Análise de um conversor boost interleaved com multiplicador de tensão para sistemas de geração distribuída que utilizam células a combustível como fonte primária. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Lawhorn, D., Rallabandi, V., and Ionel, D.M. (2018). Power electronics powertrain architectures for hybrid

- and solar electric airplanes with distributed propulsion. In *2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)*, 1–6.
- Mayer, R., Péres, A., and Oliveira, S.V.G. (2015). Conversor cc-cc multifásico bidirecional em corrente não isolado aplicado a sistemas elétricos de tração de veículos elétricos e híbridos. *Eletrôn. Potên.*, 20(3), 311–321.
- Melo, R.R. (2014). Conversor cc-cc bidirecional intercalado aplicado a supercapacitores para veículos elétricos. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Pomilio, J.A. (2018). *Fontes Chaveadas*. Publicação FEEC 13/95, Campinas.
- Queroz, F.V.S. (2019). Conversor cc-cc bidirecional de alto ganho para carregamento de baterias em uma nanorede cc de prossumidor residencial. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Rashed, M., Le Peuedic, J., and Bozhko, S. (2016). Conceptual design of battery energy storage for aircraft hybrid propulsion system. In *2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, 1–6.
- Ribberink, H. and Entchev, E. (2013). Electric vehicles — a ‘one-size-fits-all’ solution for emission reduction from transportation? In *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, 1–7.
- Rodrigues, M.C.B.P., Oliveira, J.G., Ferreira, A.A., Barbosa, P.G., and Braga, H.A. (2014). Conexão de veículos elétricos à rede de energia elétrica para recarga de baterias: uma visão geral. *Revista Eletrônica de Potência*, 19(2), 193–207.
- Tariq, M., Maswood, A.I., Gajanayake, C.J., and Gupta, A.K. (2017). Aircraft batteries: current trend towards more electric aircraft. *IET Electrical Systems in Transportation*, 7(2), 93–103. doi:10.1049/iet-est.2016.0019.
- Torres, V.C., Vinicius, M., Rendón, M.A., Almeida, P.S., Oliveira, J.G., and Rodrigues, M.C. (2019). Interleaved bidirectional dc-dc converter for application in hybrid propulsion system: Modeling and control. In *IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (CO-BEP/SPEC)*, 1–6. IEEE.
- Wenk, M. (2019). Estudo, modelagem e controle de conversor cc-cc bidirecional não-isolado baseado na célula de comutação de três estados. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville.
- Winston Battery (2015). Tswb-lyp40aha datasheet. URL [en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp40aha?category\\_id=176](http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp40aha?category_id=176).