

CONVERSOR CC/CC BIDIRECIONAL EM CORRENTE APLICADO COMO CONTROLADOR DE CARGA EM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA CONECTADOS À REDE

Luccas Tadeu Farnezes Soares¹, Arthur Costa de Souza¹, Cláudio Henrique Gomes dos Santos²

¹Instituto de Ciências Tecnológicas UNIFEI campus Itabira, Itabira, Brasil
(luccastadeu@unifei.edu.br) (arthurcosta@unifei.edu.br)

²Departamento de engenharia mecatrônica CEFET-MG campus Divinópolis, Divinópolis, Brasil (claudiosantos@cefetmg.br)

Resumo: Este trabalho tem como objetivo apresentar a modelagem e implementação computacional de um conversor c.c/c.c bidirecional em corrente atuando como interface de um sistema de armazenamento de energia por baterias de íon-Lítio com capacidade de 25 Ah conectada à rede no software *Matlab/Simulink*. Para isso, foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica sobre a temática e em seguida realizou-se o dimensionamento e modelagem matemática do conversor, por fim, foram aplicadas técnicas de controle linear sobre a planta e todo o sistema foi implementado em ambiente computacional. Foram obtidos resultados satisfatórios em relação ao dimensionamento e modelagem, demonstrado que a metodologia, apesar de apresentar simplificações, pode ser utilizada.

Palavras-chave: Sistemas de armazenamento de energia; Conversor c.c/c.c bidirecional; Algoritmo de carga e descarga de baterias; Controle de sistemas de armazenamento de energia; Modelagem de sistemas de armazenamento de energia.

INTRODUÇÃO

Atualmente, o sistema elétrico brasileiro tem experimentado mudanças radicais em relação à sua dinâmica de funcionamento, essencialmente no que diz respeito à capacidade de geração instalada (TOLMASQUIM, 2015), nesse sentido, a inserção de fontes renováveis tem forte influência sobre este fenômeno. Entre as principais estão a energia fotovoltaica e a eólica, as quais cada vez mais tem uma fatia maior na matriz elétrica do Brasil, assim, em 2021 as gerações eólicas e solar representavam cerca de 13% da matriz elétrica brasileira com tendência de crescimento (EPE, 2022). Entretanto, estas duas fontes, em especial, apresentam um problema relacionado à sua dinâmica de geração. Tanto a energia eólica quanto a solar fotovoltaica exibem desafios no que diz respeito à intermitência de geração de energia elétrica, tendo em vista que uma fonte de energia intermitente se caracteriza por um recurso energético não passível de armazenamento em sua forma original (ANEEL, 2012). Assim, a intermitência e falta de despacho destas fontes influenciam fortemente o sistema elétrico.

Por conseguinte, o avanço de fontes intermitentes e consequentemente a falta de controle sobre o despacho de energia dessas unidades geradoras conduz a novos desafios de operação do sistema elétrico. Em vista disso, a estabilidade de tensão e frequência é um critério importante a ser avaliado (SANTOS e

PASSOS, 2021), a alta intermitência na geração de energia pelas renováveis citadas anteriormente e a ausência de despachabilidade dificulta o controle tanto de tensão quanto de frequência do sistema, pode-se citar, como exemplo, a rede elétrica da Califórnia. O sistema elétrico deste estado possui alta penetração de energia fotovoltaica, consequentemente, durante o dia, a demanda é suprida por esta fonte, entretanto, a noite, a geração de energia através desta renovável cai e a carga líquida aumenta. Isso provoca picos de demanda muito altos, chegando a quase 13 GW em três horas, conforme pode ser observado na “*duck curve* - curva do pato”, Figura 1, (LOUTAN, 2015). Consequentemente a confiabilidade da rede elétrica fica fragilizada o que a torna suscetível a desligamentos inesperados e blecautes. Assim, uma alternativa para amenizar e até mesmo solucionar este problema é a utilização de sistemas de armazenamento de energia.

Entre os principais métodos de armazenamento de energia estão as baterias e dentre os tipos mais comuns tem-se as baterias de íon-Lítio (AYOUB e KARAMI, 2015), este tipo de bateria está sendo amplamente empregado em veículos elétricos (YILMAZ e KREIN, 2013) portanto, a sua aplicação e integração ao sistema elétrico torna-se uma proposta promissora e interessante.

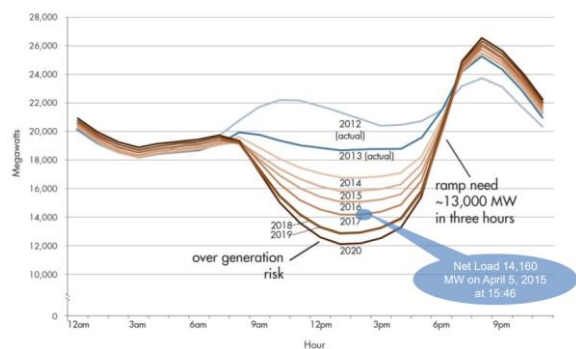


Figura 1. Curva de demanda horária em relação à geração fotovoltaica no estado da Califórnia.

Os sistemas de armazenamento por baterias, conhecidos como *BESS* (*Battery Energy Store System*), basicamente são compostos por um banco de baterias, um sistema de monitoramento de baterias (*BMS – Battery Management System*), um sistema de conversão de potência (*PCS – Power Conversion System*), um sistema de gerenciamento de energia (*EMS – Energy Management System*) e por componentes auxiliares como sensores, extintores de incêndio, entre outros (CAMPOS et al., 2022). Na Figura 2 é possível visualizar um esquemático de um sistema de armazenamento por baterias genérico, para conexão com a rede elétrica.

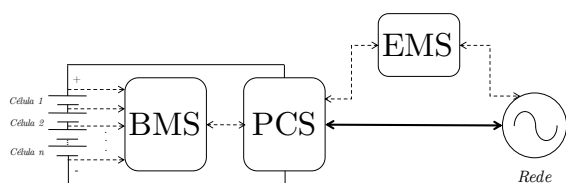


Figura 2. Esquemático de um sistema de armazenamento de energia por baterias.

Observando-se a Figura 2, verifica-se que o sistema *BMS* é o responsável por gerenciar as células do banco de baterias, além disso, este sistema transmite ao *PCS* informações importantes sobre o banco, como temperatura das células, estado de carga, níveis de tensão e corrente. Nesse sentido, o *PCS* (conversor bidirecional em conjunto com o inversor de tensão) é o responsável por gerenciar a troca de energia do banco com a rede ou cargas, este sistema é composto por eletrônica de potência para que a carga e descarga do banco seja feita de forma controlada. Por fim, o *EMS* controla a referência de demanda ou despacho de energia que deve ser fornecida à carga ou rede elétrica e executada através do *PCS*.

Dessa forma, para que o sistema de armazenamento de energia funcione adequadamente é necessário o controle das variáveis de carga e descarga da bateria. Geralmente, o comportamento dos processos de carga e descarga é previsível e obedece a certas metodologias de forma a preservar a vida útil da unidade de armazenamento. Assim, há vários métodos de carga de baterias como: corrente/tensão constante,

método de corrente pulsada, método de corrente pulsada negativa, método pulsado sobreposto, método de carregamento intermitente, controle de carga interrompida, (HORKOS, YAMMINE e KARAMI, 2015). Entre os métodos citados o mais utilizado é o de corrente/tensão constante (YASSER, NAGGAR e ABDALHALIM, 2016), (WONG, HURLEY, WÖLFLE, 2008).

No método de carregamento de corrente/tensão constante, a bateria é submetida a três etapas. A primeira etapa variará a tensão sobre o banco de forma a garantir uma corrente constante de carga, já a segunda etapa a tensão será mantida constante em um determinado valor, sendo independentemente do valor de corrente de carga. Por fim, na terceira etapa o banco de baterias estará submetido à tensão de flutuação com o objetivo de atenuar a autodescarga do elemento armazenador (SILVA, 2020). Entretanto, há algumas variações deste método, como exemplo da inserção de uma etapa adicional que condicionará a mudança do carregamento de tensão constante para flutuação, assim que a corrente de carga atingir um valor inferior a uma referência pré-definida (ROSEMBACK, 2004).

Portanto, tendo em vista que o método de carregamento por corrente/tensão constante é amplamente utilizado para baterias, independentemente do tipo de processo químico que elas utilizam, ele será abordado neste artigo.

Para o controle adequado da carga e descarga da bateria, são utilizados conversores c.c/c.c de potência de forma a controlar tensão e corrente sobre o banco. Dentre os conversores c.c/c.c um dos mais utilizados é o conversor bidirecional em corrente *buck/boost*. A grande utilização deste conversor reside em sua simplicidade e bidirecionalidade em corrente, a qual é garantida pela adição de um interruptor bidirecional em corrente (TAVARES, 2018). Dessa forma, este conversor tem a capacidade de operar nos dois primeiros quadrantes, ou seja, sem alterar o sentido da tensão das fontes, porém alterando-se o sentido da corrente no indutor. A seguir, na Figura 3 é possível visualizar a topologia deste conversor, bem como a tensão e os sentidos das correntes para operação nos dois primeiros quadrantes.

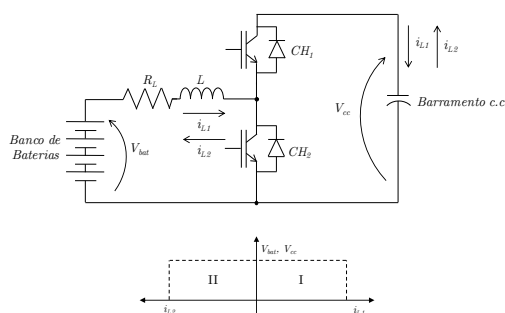


Figura 3. Conversor bidirecional em corrente *buck/boost*.

Na Figura 3 é demonstrado que a corrente sobre o indutor L pode fluir em ambas as direções sem que as tensões do banco de baterias ou do barramento c.c sejam alteradas em sentido, demonstrando assim, a operação do conversor em ambos os quadrantes (I e II). Entretanto, para que o conversor opere de forma segura, as chaves CH1 e CH2 devem comutar de forma complementar, assim, alterando-se a razão cíclica altera-se o sentido do fluxo de potência e consequentemente o sentido da corrente.

Dessa maneira, o principal objetivo deste trabalho é apresentar a modelagem e implementação computacional de um conversor c.c/c.c bidirecional em corrente *Buck/Boost* destinado à interconectar sistemas de armazenamento com conversores c.c/c.a conectados à rede elétrica. Além disso, este trabalho tem como objetivo secundário, a implementação computacional de um algoritmo de carga e descarga de baterias baseado no método de corrente/tensão constante, de forma a atender a demanda do conversor c.c/c.a.

MATERIAL E MÉTODOS

Para conclusão dos objetivos propostos, neste trabalho foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica na literatura técnica sobre sistemas de armazenamento de bateria e controle de conversores c.c/c.c. Após coletadas as referências necessárias, foi realizada a modelagem matemática do conversor, bem como, a implementação computacional no software *Matlab/Simulink* do sistema em estudo. Por fim, foram coletados os resultados para diversos casos em análise, de forma a validar a modelagem empregada.

MODELAGEM DO SISTEMA

Em primeira análise, foi realizado o dimensionamento do indutor do conversor demonstrado na Figura 3, para isso, são utilizados os circuitos equivalentes mostrados nas Figura 4 e 5 considerando as chaves CH1 e CH2 em seus respectivos períodos de chaveamento.

Levando em consideração a operação do conversor em modo *Boost*, em um primeiro momento, a chave CH2 se mantém fechada e a chave CH1 se mantém aberta Figura 4(a), assim o indutor L armazena energia. Quando a chave CH2 é aberta, a chave CH1 é fechada e o indutor se descarrega pelo diodo de CH1 Figura 4 (b). Dessa forma, aplicando a Lei de Kirchhoff das tensões para os circuitos da Figura 4, obtém-se (1) e (2). Por conseguinte, a mesma análise é realizada para os circuitos da Figura 5, obtendo-se (3) e (4), neste caso, o conversor opera em modo *Buck* e a corrente no indutor tem seu sentido comutado. Assim o indutor se carrega por CH1 e se descarrega pelo diodo de CH2, portanto, carregando a bateria.

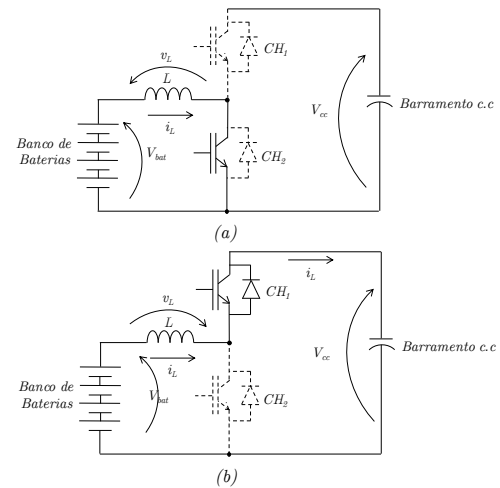


Figura 4. Circuito equivalente para operação como conversor *Boost*. (a) CH2 fechada, (b) CH2 aberta.

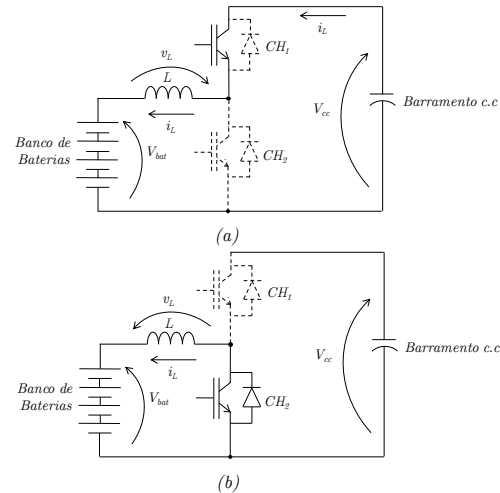


Figura 5. Circuito equivalente para operação como conversor *Buck*. (a) CH1 fechada, (b) CH1 aberta.

$$V_{bat} = v_L \quad (1)$$

$$V_{bat} + v_L = V_{cc} \quad (2)$$

$$V_{cc} = v_L + V_{bat} \quad (3)$$

$$V_{bat} = v_L \quad (4)$$

Considerando que a corrente no indutor possui um valor médio distinto de zero e que possui um *ripple* dado por Δi_L , além disso, considerando que os circuitos equivalentes apresentados nas Figuras 4 (a) e 5 (a) atuam no período de tempo t_{on} e os circuitos das Figuras 4 (b) e 5 (b) atuam no período de tempo t_{off} do período total de chaveamento T_s é possível reescrever (1) a (4) como:

$$V_{bat} = L \frac{\Delta i_L}{t_{on}} \quad (5)$$

$$V_{bat} + L \frac{\Delta i_L}{t_{off}} = V_{cc} \quad (6)$$

$$V_{cc} = L \frac{\Delta i_L}{t_{on}} + V_{bat} \quad (7)$$

$$V_{bat} = L \frac{\Delta i_L}{t_{off}} \quad (8)$$

Isolando os termos t_{on} , t_{off} e Δi_L em (5) e (6) tem-se:

- Etapa Boost

$$t_{on} = L \frac{\Delta i_L}{V_{bat}} \quad (9)$$

$$t_{off} = L \frac{\Delta i_L}{V_{cc} - V_{bat}} \quad (10)$$

$$\Delta i_L = \frac{t_{on} V_{bat}}{L} \quad (11)$$

$$\Delta i_L = \frac{t_{off} (V_{cc} - V_{bat})}{L} \quad (12)$$

Realizando-se uma análise semelhante, porém para (7) e (8) tem-se:

- Etapa Buck

$$t_{on} = L \frac{\Delta i_L}{V_{cc} - V_{bat}} \quad (13)$$

$$t_{off} = L \frac{\Delta i_L}{V_{bat}} \quad (14)$$

$$\Delta i_L = \frac{t_{on} (V_{cc} - V_{bat})}{L} \quad (15)$$

$$\Delta i_L = \frac{t_{off} V_{bat}}{L} \quad (16)$$

Dessa forma, sabendo que o período total de chaveamento é composto pela soma dos tempos em que as chaves permanecem ligadas e desligadas, ou seja, a soma de t_{on} e t_{off} , pode-se somar (9) com (10) e (13) com (14), substituindo o período de chaveamento pelo inverso da frequência é possível obter os valores para o indutor com o conversor operando na etapa *Boost* e *Buck*, respectivamente:

- Etapa Boost

$$t_{on} + t_{off} = T_s$$

$$\frac{1}{f_s} = L \frac{\Delta i_L}{V_{cc} - V_{bat}} + L \frac{\Delta i_L}{V_{bat}}$$

$$L_{boost} = \frac{V_{bat} (V_{cc} - V_{bat})}{f_s \Delta i_L V_{cc}}$$

- Etapa Buck

$$t_{on} + t_{off} = T_s$$

$$\frac{1}{f_s} = L \frac{\Delta i_L}{V_{cc} - V_{bat}} + L \frac{\Delta i_L}{V_{bat}}$$

$$L_{buck} = \frac{V_{bat} (V_{cc} - V_{bat})}{f_s \Delta i_L V_{cc}}$$

Portanto, é possível verificar que para um valor fixo de ripple de corrente no indutor, o valor de indutância que atenderá este critério tanto para o conversor em modo *Buck* ou *Boost* será o mesmo.

Em segunda análise, será avaliado o ganho estático de tensão para os dois modos de operação do conversor bidirecional. Nesse sentido igualando-se (11) com (12) e (15) com (16), obtém-se o ganho estático para operação como *Boost* e como *Buck*, respectivamente.

- Etapa Boost

$$\Delta i_L = \Delta i_L$$

$$\frac{t_{on} V_{bat}}{L} = \frac{t_{off} (V_{cc} - V_{bat})}{L}$$

$$V_{cc} = \frac{V_{bat} T_s}{t_{off}}$$

$$V_{cc} = \frac{\frac{V_{bat} T_s}{t_{off}}}{\frac{T_s}{T_s} - \frac{t_{on}}{T_s}}$$

$$V_{cc} = \frac{V_{bat}}{1 - D}$$

- Etapa Buck

$$\Delta i_L = \Delta i_L$$

$$\frac{t_{off} V_{bat}}{L} = \frac{t_{on} (V_{cc} - V_{bat})}{L}$$

$$V_{cc} = \frac{V_{bat} T_s}{t_{on}}$$

$$V_{cc} = \frac{\frac{V_{bat} T_s}{t_{on}}}{\frac{T_s}{T_s} - \frac{t_{on}}{T_s}}$$

$$V_{cc} = \frac{V_{bat}}{D}$$

$$V_{bat} = V_{cc} D$$

As relações apresentadas anteriormente, apresentam ganhos estáticos clássicos de conversores *Boost*, *Buck*, validando assim as equações desenvolvidas.

Por fim, em terceira análise, será dimensionado um capacitor para interconexão em paralelo com o banco de baterias de forma a minimizar o ripple de tensão

sobre as baterias. Este capacitor é dimensionado com o conversor operando em modo *Buck*, além disso, em regime permanente, considera-se que a variação de corrente no indutor é igual à variação de corrente no capacitor, assim pode-se escrever:

$$\Delta i_L = \Delta i_C$$

$$I_C = \frac{\Delta i_L}{4}$$

$$\Delta V_C = \frac{1}{C} \int_0^T \frac{\Delta i_L}{4} dt = \frac{\Delta i_L}{8fC}$$

$$C = \frac{V_{bat}(V_{cc} - V_{bat})}{8\Delta V_C L f^2 V_{cc}}$$

Após o dimensionamento do indutor e do capacitor do conversor em estudo, a seguir será realizada a modelagem do sistema de forma a obter as funções de transferência de interesse. Logo, para isso, será utilizado os circuitos demonstrados nas Figuras 5 (a) e (b).

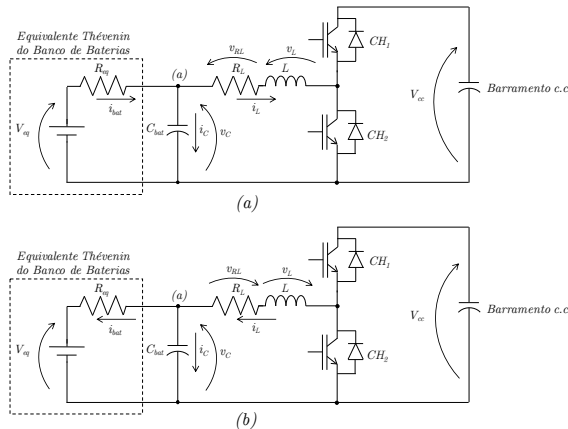


Figura 5. Circuitos equivalentes para modelagem do conversor bidirecional. (a) Como conversor *Boost*, (b) Como conversor *Buck*.

Observando-se as Figuras 5 (a) e (b) é notável que ambos os circuitos possuem um circuito equivalente de Thévenin para um ponto de operação do banco de baterias. Dessa maneira, é válido ressaltar que a modelagem empregada neste trabalho é simplificada e é baseada na modelagem por espaços de estados médios, considerando inicialmente o valor médio das variáveis de interesse, além disso, será realizada a modelagem somente para o circuito equivalente da Figura 5 (a), tendo em vista que o circuito da Figura 5 (b) é idêntico, porém com os sentidos das correntes invertidos, ocasionando funções de transferência com sinais opostos.

Assim, aplicando-se a Lei de Kirchhoff das Correntes ao nó (a) da Figura 5 (a), tem-se:

$$i_{bat} = i_C + i_L$$

$$\frac{V_{eq} - \bar{v}_C}{R_{eq}} = C \frac{d\bar{v}_C}{dt} + \bar{i}_L$$

Aplicando-se a pequenos sinais nos termos não constantes da equação obtida anteriormente, obtém-se:

$$\frac{V_{eq}}{R_{eq}} - \frac{\bar{v}_C}{R_{eq}} - \frac{\bar{v}_C}{R_{eq}} = C \left(\frac{d\bar{v}_C}{dt} + \frac{d\bar{v}_C}{dt} \right) + \bar{i}_L + \tilde{i}_L$$

Assim, aplicando-se a Transformada de Laplace na equação obtida anteriormente considerando-se somente os termos em pequenos sinais, obtém-se a primeira função de transferência de interesse.

$$-\frac{\tilde{v}_C(s)}{R_{eq}} = Cs\tilde{v}_C(s) + \tilde{i}_L(s)$$

$$\frac{\tilde{v}_C(s)}{\tilde{i}_L(s)} = -\frac{1}{sC + \frac{1}{R_{eq}}} = G_{vi}(s) \quad (17)$$

Após a obtenção da função de transferência (17), a qual relaciona a tensão no capacitor com a corrente no indutor, será obtida a função de transferência a qual relacionará a corrente no indutor com o ciclo de trabalho do conversor. Por conseguinte, aplicando-se a Lei de Kirchhoff das Tensões na malha contendo o nó (a) circuito da Figura 5 (a) e considerando que a tensão no capacitor é controlada em um valor constante é possível escrever:

$$\bar{v}_C = \bar{v}_{RL} + \bar{v}_L + \bar{v}_{CH2}$$

$$\bar{v}_C = R_L \bar{i}_L + L \frac{d\bar{i}_L}{dt} + \bar{v}_{CH2}$$

$$\bar{v}_C = R_L \bar{i}_L + L \frac{d\bar{i}_L}{dt} + V_{cc}(1 - \bar{d})$$

Aplicando-se pequenos sinais na equação obtida anteriormente, obtém-se:

$$\bar{v}_C = R_L(\bar{i}_L + \tilde{i}_L) + L \left(\frac{d\bar{i}_L}{dt} + \frac{d\tilde{i}_L}{dt} \right) + V_{cc}(1 - \bar{d} - \tilde{d})$$

Por fim, aplicando-se a Transformada de Laplace e desconsiderando os termos médios é obtida a função de transferência que relaciona a corrente no indutor com o ciclo de trabalho.

$$0 = R_L \tilde{i}_L(s) + sL \tilde{i}_L(s) - V_{cc} \tilde{d}(s)$$

$$\frac{\tilde{i}_L(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{V_{cc}}{sL + R_L} = G_{id}(s) \quad (18)$$

Para a implementação dos controladores será analisada a malha de controle representada na Figura 6. Nesta malha é possível visualizar o bloco do algoritmo controlador de carga que tem como objetivo fornecer uma referência de tensão para o banco de baterias, além disso, há dois controladores PI que farão a compensação das malhas de tensão e corrente de forma a mantê-las no valor desejado. Neste trabalho será realizado o cálculo dos controladores através da técnica de alocação de pólos (OGATA, 2010), objetivando que o zero do controlador anule o pólo da respectiva planta.

Em relação a malha mais interna contendo o controlador PI, o bloco PWM e a planta $G_{id}(s)$, é possível escrever a seguinte expressão do diagrama em malha aberta:

$$PI \cdot G_{id}(s) = \left(k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s}\right) \left(\frac{V_{cc}}{sL + R_L}\right)$$

$$PI \cdot G_{id}(s) = \frac{k_{pi}}{s} \left(s + \frac{k_{ii}}{k_{pi}}\right) \left(\frac{V_{cc}}{L \left(s + \frac{R_L}{L}\right)}\right)$$

Assim, dado que o zero do controlador tem de ser igual ao pólo da planta é possível obter (19).

$$\frac{k_{ii}}{k_{pi}} = \frac{R_L}{L} \quad (19)$$

Analisando-se a malha fechada incluindo (19), em que o zero do controlador $\left(\frac{s+K_{ii}}{K_{pi}}\right)$ é igual o pólo da planta $\left(s + \frac{R_L}{L}\right)$, é possível escrever a seguinte relação:

$$\frac{\frac{k_{pi}V_{cc}}{sL}}{1 + \frac{k_{pi}V_{cc}}{sL}} = \frac{1}{\frac{sL}{k_{pi}V_{cc}} + 1}$$

Dessa forma, a expressão obtida corresponde a um sistema de primeira ordem, cuja frequência de corte é dada pelo termo:

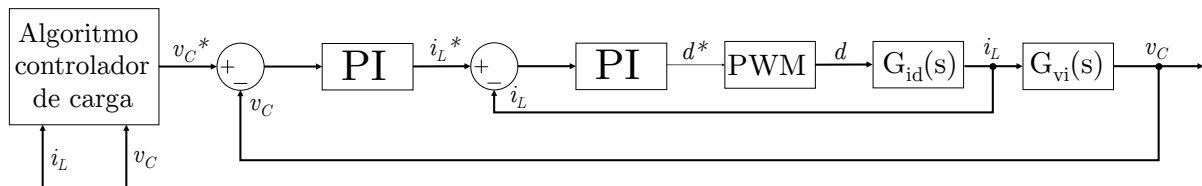


Figura 6. Malha de controle do conversor c.c/c.c bidirecional.

$$s = \frac{k_{pi}V_{cc}}{L} = \omega_c$$

Portanto, o ganho k_{pi} , será dado (20).

$$k_{pi} = \frac{\omega_c L}{V_{cc}} \quad (20)$$

Substituindo (20) em (19) será obtido o ganho integral, demonstrado em (21).

$$k_{ii} = \frac{\omega_c R_L}{V_{cc}} \quad (21)$$

Portanto realizando-se a mesma análise para a malha externa de tensão com o respectivo controlador, obtém-se os ganhos proporcional e integral, que são dados por (22) e (23), respectivamente.

$$k_{pv} = -\omega_c C \quad (22)$$

$$k_{iv} = -\frac{\omega_c}{R_{eq}} \quad (23)$$

Tendo em vista que para o controle do conversor é necessária uma referência de tensão e além disso nos processos de carga e descarga da bateria é necessário manter a corrente constante, foi implementado um algoritmo para que as condições mencionadas anteriormente sejam atendidas. Este algoritmo tem como objetivo gerar uma referência de tensão de forma a carregar a bateria com o método de corrente/tensão constante e descarregar a bateria por meio de uma corrente constante. Esta referência de tensão é gerada através de um controle baseado em histerese, a qual manterá a corrente em uma faixa desejável. Na Figura 7 é possível observar tal algoritmo. Destaca-se ainda que a variável MO é fornecida pelo conversor que conecta o conjunto bateria – conversor bidirecional à rede e que corresponderá às solicitações de carga ou descarga advindas do conversor c.c/c.a de interface com a rede.

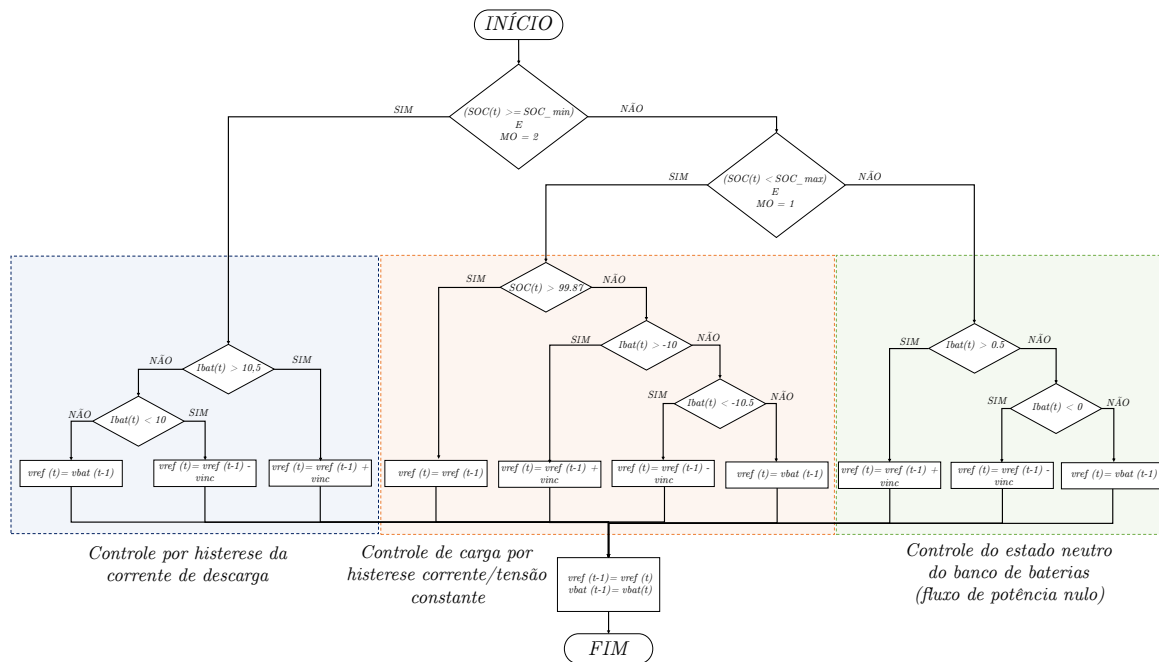


Figura 7. Algoritmo de carga e descarga implementado.

As variáveis v_{ref} , v_{bat} , SOC , I_{bat} , v_{inc} e MO são respectivamente a tensão de referência, a tensão sobre o capacitor C , o estado de carga da bateria, a corrente sobre o indutor, o incremento de tensão e o modo de operação. O algoritmo inicia-se pela verificação da variável MO e pelo estado de carga, determinando assim se a bateria tem possibilidade de carregar ou descarregar. Caso MO seja igual a 2 e as condições do estado de carga sejam atendidas (SOC acima do valor SOC_{min}), inicia-se o processo de descarga da bateria com corrente constante, caso contrário, se MO for igual a 1 e o estado de carga seja favorável para carga (SOC abaixo do valor SOC_{max}), será iniciado o processo de carga de duas etapas, corrente/tensão constante. Vale ressaltar que, se esta última condição não for atendida, ou seja, o estado de carga elevado, a bateria entra em estado neutro com o fluxo de potência tendendo a zero.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validação da modelagem realizada, o circuito da Figura 5 em conjunto com a malha de controle da Figura 6 foram implementados no *software Matlab/Simulink*, conforme visto na Figura 8.

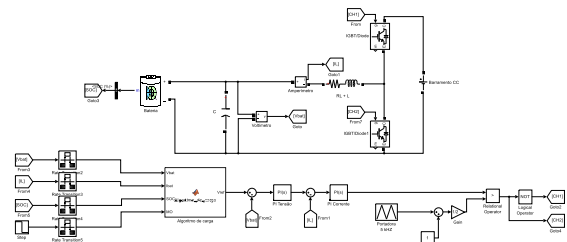


Figura 8. Sistema implantado no *software Simulink*.

Os parâmetros utilizados no sistema são demonstrados na Tabela 1. O sistema foi simulado por um tempo de 15 segundos com passo de cálculo de 1 us. O modelo de bateria utilizado é o disponível no *software Matlab/Simulink*, o qual é baseado no modelo apresentado em (TREMBLAY, DESSAINT e DEKKICHE, 2007). A configuração dos parâmetros da bateria foi realizada conforme apresentado por (SOUZA, 2020). Os ganhos dos controladores foram calculados conforme apresentado em (20) a (23), utilizando uma frequência de corte da malha de corrente de 500 Hz e da malha de tensão de 50 Hz.

Tabela 1. Parâmetros do sistema.

Parâmetro	Valor
Capacitância do conversor (C)	5,42 μF
Indutor do conversor (L)	3,69 mH
Resistência do indutor (R_L)	0,1 Ω
Frequência de chaveamento (f_s)	5 kHz
Tensão do barramento CC (V_{cc})	400 V
Tensão da bateria (V_{bat})	240 V

Inicialmente, a bateria possui um estado de carga (SOC) de 99,9 %, portanto, é iniciado um processo de descarga cuja corrente é mantida próxima de 10 A. O processo de descarga é mantido até a bateria atingir o SOC_{min} de 99,85 % ou a variável MO alterar seu valor para 1. Por conseguinte, na metade da simulação, a variável MO alterará seu valor para 1, indicando que a bateria deverá se carregar, assim, ela iniciará seu processo de carga até que o SOC_{max} de 99,9 % seja atingido ou até que o valor de MO se altere para 2. É válido ressaltar que foram escolhidos estes valores de estado de carga máximo e mínimo levando em consideração o tempo de simulação, o qual seria demasiadamente longo para uma faixa maior, porém o conceito se aplica da mesma maneira.

A seguir, na Figura 9, é demonstrado o estado de carga da bateria durante a simulação.

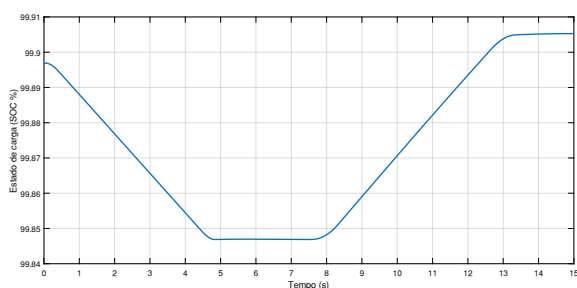


Figura 9. Estado de carga do banco de baterias.

Em análise à Figura 9, observa-se que o SOC variou do SOC máximo ao SOC mínimo, sendo que quando atingido este valor, houve a estabilização do SOC, caracterizando assim, que o banco se encontrava em estado neutro. A partir da mudança da variável MO para 1, em 7,5 s, o SOC começou a elevar seu valor, caracterizando assim um processo de carga do banco de baterias, além disso, quando foi atingido o valor do SOC máximo, mesmo com a variável MO em 1 o processo de carga foi cessado, pois a bateria já se encontrava carregada, dessa forma, o SOC permaneceu constante próximo do SOC máximo.

Em segunda análise, verifica-se a corrente do indutor (i_L). O comportamento das descargas e cargas da bateria também são visualizados nesta variável, sendo uma corrente positiva indicando a descarga e uma corrente negativa, o processo de carga. Conforme apresentado na Figura 10, durante o início da simulação até o momento em que o banco atinge o SOC mínimo, o valor da corrente é positivo e está em torno de 10 A. Entre 5 s e 7,5 s, o banco de baterias está em estado neutro, assim a corrente tende a zero. Já durante o período entre 8,5 s e 12,5 s a corrente possui um valor negativo em torno de 10 A, caracterizando assim uma carga. Por fim, no restante da simulação a corrente possui um valor médio nulo, caracterizando novamente um estado neutro.

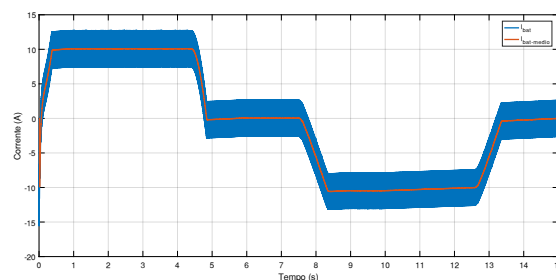


Figura 10. Corrente no indutor.

Além disso, é válido verificar o *ripple* de corrente no indutor de forma a validar o dimensionamento do conversor. Na Figura 11 é demonstrado o *ripple* de corrente neste dispositivo que possui uma amplitude de 5,17 A, conforme estipulado na metodologia de dimensionamento, já que se adotou um *ripple* de 50% da corrente nominal.

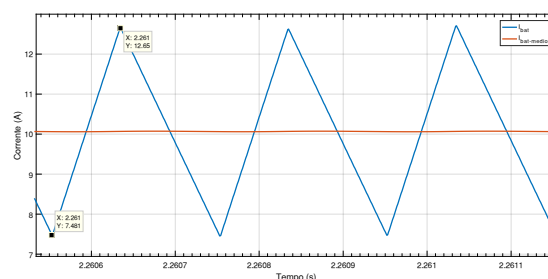


Figura 11. *Ripple* corrente no indutor.

Por conseguinte, no processo de carga do banco de baterias, também é possível verificar o método de corrente/tensão constante. Conforme demonstrado na Figura 12, entre os períodos de 8,5 s a 10 s o processo de corrente constante era executado, assim, entre os períodos de 10 s a 12,5 s era executado o processo de tensão constante, já que a corrente era variada linearmente.

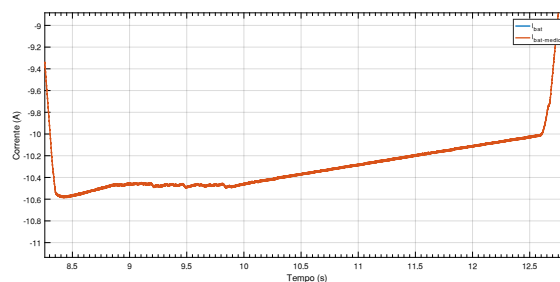


Figura 12. Corrente de carga no indutor.

Em terceira análise, na Figura 13, a qual é demonstrada a tensão do banco de baterias. Assim conforme demonstrado pela corrente, na tensão também é possível visualizar os comportamentos de descarga e carga da bateria. Logo, nos instantes entre 0 s a 4,5 s a tensão sobre o banco é menor que 240 V, portanto, o fluxo de potência é do banco para o barramento c.c. Entre 5 s e 7,5 s e 13 s a 15 s a tensão

é próxima de 240 V, assim o fluxo de potência é próximo de zero e o banco está em estado neutro. Já entre 8,5 s e 12,5 s a tensão no banco é maior que 240 V, assim o fluxo de potência é do barramento c.c para o banco caracterizando o processo de carga das baterias.

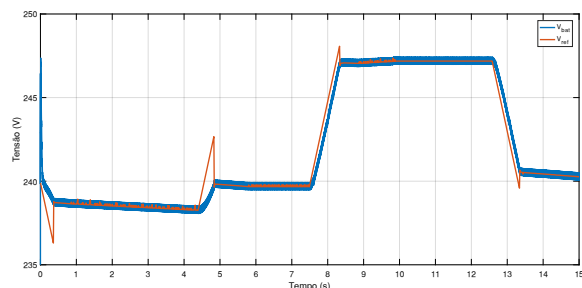


Figura 13. Tensão sobre o banco de baterias.

Por fim, na Figura 14 é demonstrado a tensão do banco de baterias durante o processo de carga, compreendido entre 8,5 s a 12,5 s, neste período a tensão de referência e consequentemente a tensão sobre o banco é variada e posteriormente permanece constante, conforme a metodologia de carga corrente/tensão constante.

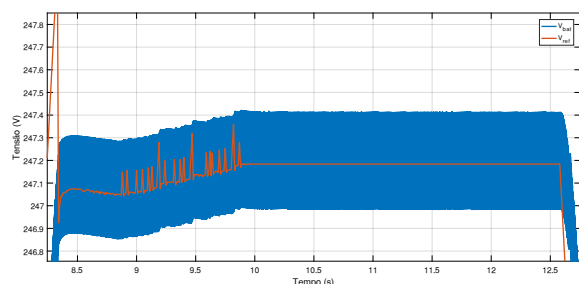


Figura 14. Tensão de carga sobre o banco de baterias.

CONCLUSÃO

Portanto, através do estudo realizado, foi possível validar a proposta de dimensionamento e modelagem empregada para o conversor bidirecional de corrente como interface de sistemas de armazenamento conectados à rede. Apesar da modelagem empregar simplificações, foram obtidos resultados satisfatórios em relação às variáveis de controle. Além disso, através do algoritmo de controle de carga e descarga empregado, é possível aplicar este sistema à conversores conectados à rede, já que a carga e descarga do banco é comandada pelo SOC e por uma variável externa que poderá ser fornecida pelo controle de um conversor c.c/c.a, por exemplo. Para estudos futuros, recomenda-se a implementação do conversor c.c/c.a propriamente dito, o desenvolvimento de um algoritmo para a referência da variável MO e por fim, recomenda-se realizar uma modelagem completa do conversor de forma a comparar as respostas de ambos os sistemas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Governo Federal. Glossário de Energia Elétrica. 2012. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojMjA2OTRhYjctYTg5OC00YWQ4LThkOWUtNTZjNWYzNmVhZmI3IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSI0MmI0jR9&pageName=ReportSection476ee44b6be0e9367c6b%22>. Acesso em: 15 jan. 2023.
- AYOUB, E. e KARAMI, N. "Review on the charging techniques of a Li-Ion battery," 2015 Third International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE), Beirut, Lebanon, 2015, pp. 50-55, doi: 10.1109/TAECE.2015.7113599.
- CAMPOS, Felipe Melo et al. Tecnologias e Aplicações de Sistemas de Armazenamento de Energia para Suporte à Integração de Fontes Renováveis no Brasil. In: IX Congresso brasileiro de energia solar, 9., 2022, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: Cbes, 2022. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1138/1140>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Governo Federal. Matriz Energética e Elétrica. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 15 jan. 2023.
- HORKOS, P. G., YAMMINE, E. and KARAMI, N., "Review on different charging techniques of lead-acid batteries," 2015 Third International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE), Beirut, Lebanon, 2015, pp. 27-32, doi: 10.1109/TAECE.2015.7113595.
- LOUTAN, Clyde. California Independent Operator System. Briefing on the duck curve and current system conditions. 2015. Disponível em: http://www.caiso.com/Documents/Briefing_Duck_Curve_CurrentSystemConditions-ISOPresentation-July2015.pdf. Acesso em: 15 jan. 2023.
- OGATA, Katsuhiko, "Modern Control Engineering", 5 ed, Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2010.
- ROSEMBACK, Ricardo Henrique. Conversor CC-CC Bidirecional Buck-Boost atuando como Controlador de Carga de Baterias em um Sistema Fotovoltaico. 2004. 139 f. Dissertação (Mestrado)

- Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2004.
- SANTOS, Bruno de Oliveira dos; PASSOS, Rafael Schimmelpfeng. Sistemas de armazenamento de energia e geração distribuída: um estudo de caso. 2021. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/53389/53389.PDF>. Acesso em: 15 jan. 2023.
- SILVA, Renata Cristina da. Estudo e Desenvolvimento de um Conversor Formador de Rede Multiterminal. 2020. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1752M.PDF>.
- SOUZA, Arthur Costa de. Sistemas fotovoltaicos trifásicos com compensação de reativo, armazenamento interno de energia e inércia virtual. 2020. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.192>.
- TAVARES, Suzanne Emanuelle. Estudo e Implementação de um Sistema de Controle de Tensão em uma Microrrede CC. 2018. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgel/189-2018-12-20-DissertacaoSuzanneTavares.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2023.
- TREMBLAY, O., DESSAINT, L. A. and DEKKICHE, A. I., "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles," 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Arlington, TX, USA, 2007, pp. 284-289, doi: 10.1109/VPPC.2007.4544139.
- TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (org.). Energia Renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de: Empresa de Pesquisa Energética, 2015. 452 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-172/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2023.
- WONG, Y.S.; HURLEY, W.G.; WÖLFLE, W.H. Charge regimes for valve-regulated lead-acid batteries: Performance overview inclusive of temperature compensation, Journal of Power Sources, Volume 183, Issue 2, 2008, Pages 783-791, ISSN 0378-7753, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.05.069>.
- YASSER E. Abu Eldahab; NAGGAR H. Saad; ABDALHALIM Zekry, Enhancing the design of battery charging controllers for photovoltaic systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 58, 2016, Pages 646-655, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.061>.
- YILMAZ, M. e KREIN, P. T., "Review of the Impact of Vehicle-to-Grid Technologies on Distribution Systems and Utility Interfaces," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 12, pp. 5673-5689, Dec. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2227500.