

## Desenvolvimento de um sistema de armazenamento de energia operando em paralelo com a rede

Vitor G. Neves<sup>\*,\*\*</sup>, Renata C. da Silva<sup>\*\*</sup>, Maria J. F. Ramos<sup>\*\*</sup>,  
Clodualdo V. de Sousa<sup>\*\*</sup>, Fadul F. Rodor<sup>\*\*</sup>, Tiago de Sá Ferreira<sup>\*\*</sup>,  
Guilherme M. de Rezende<sup>\*\*</sup>, Victor F. Mendes<sup>\*</sup>

*\* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Minas Gerais*

*Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil  
(e-mail: vitorgomes22neves@unifei.edu.br, victormendes@cpdee.ufmg.br)*

*\*\* Universidade Federal de Itajubá - Campus de Itabira  
Rua Irmã Ivone Drumond, 200, 35903-087, Itabira, MG, Brasil  
(e-mail: renatacristina@ymail.com, mjuliaframos@unifei.edu.br,  
clodualdosousa@unifei.edu.br, fadulrodor@unifei.edu.br,  
tiagoferreira@unifei.edu.br, guilhermemre@unifei.edu.br)*

---

**Abstract:** The battery energy storage systems (BESS) have been gaining notoriety in recent years due to the high penetration of renewable energies in distributed generation. It has the main goal of providing a dispatchable and reliable generation source. This study details the implementation of a BESS with a bidirectional converter as the interface between the battery bank and the supply network. The converter's modeling and control equations are presented, as well as the experimental results obtained with a 10kVA prototype. Thus, this work presents a complete characterization of a system capable of carrying out the process of Lead Acid Battery charging and discharging, energy supply and ancillary services.

**Resumo:** Os sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS, do inglês "battery energy storage systems") vêm ganhando notoriedade nos últimos anos devido à alta penetração de energias renováveis na geração distribuída. Seu principal intuito é fornecer uma fonte de geração despachável e confiável. Esse estudo apresenta a implementação do conversor bidirecional de um BESS para realizar a interface entre o banco de baterias e a rede de alimentação. São apresentados os equacionamentos de modelagem e controle dos conversores envolvidos no sistema, bem como os resultados experimentais obtidos em um protótipo de 10kVA. Assim, realiza-se a caracterização completa de um sistema capaz de realizar o processo de carga e descarga de baterias de Chumbo-Ácido, permitindo o fornecimento de energia, serviços ancilares e demais auxílios a infraestrutura da rede.

**Keywords:** BESS; Battery Energy Storage Systems; Bidirectional converter; Interlaced Converter; Lead Acid Battery; Back-to-back Converter; IGBT Power Module.

**Palavras-chaves:** Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias; Conversor Bidirecional; Conversor Entrelaçado; Bateria de Chumbo-Ácido; Conversor Back-to-Back; Módulo de Potência IGBT.

---

### 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, tem-se que a produção de energia elétrica proveniente de hidroelétricas é cerca de 61,53% da energia total produzida (Aneel, 2020). Apesar disso, o plano nacional de energia (PNE 2050) indica para um crescimento de quase 50 vezes na geração distribuída entre 2019 e 2050, tendo a sua principal fonte na energia fotovoltaica. Porém, essa alteração impacta diretamente na estabilidade transitória da rede elétrica, uma vez que sem a energia cinética armazenada nos geradores não há naturalmente potência para restaurar o equilíbrio do sistema elétrico frente a uma queda de frequência causada por um distúrbio (Suaia, 2020; Such and Masada, 2017). Assim, para evitar

\* Os autores agradecem ao apoio da FAPEMIG, CAPES e CNPQ e ao suporte financeiro através do projeto CEMIG/ANEEL D722.

a intensificação das quedas de frequência e a diminuição da confiabilidade do sistema elétrico, deve-se estudar os sistemas de armazenamento de energia para responder rapidamente a qualquer variação dos parâmetros nominais do sistema interligado nacional (SIN) (Chatrunga, 2019; Cheun Hau and Seng Lim, 2020; Prompinit and Khomfoi, 2015; Yoo et al., 2012).

Os sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS, do inglês "Battery Energy Storage Systems") vêm sendo implementados em função da necessidade de uma fonte de energia despachável confiável. O objetivo é garantir o abastecimento energético e a qualidade de energia do SIN e, assim, minimizar os problemas causados pelas gerações intermitentes. Adicionalmente, é possível por meio

do BESS, a realização de vários serviços com o objetivo de auxiliar a rede elétrica (Wu et al., 2020; Xavier, 2020).

Nesse contexto, o presente estudo se propõe a realizar o projeto dos controladores e a implementação de um conversor para um BESS bidirecional. Para isso, elaborase a modelagem e controle dos conversores envolvidos no BESS, de modo a gerenciar o processo de carga e descarga das baterias de chumbo-ácido. Além disso, as técnicas de controle estudadas são testadas em um protótipo de 10kVA, por meio do qual se valida o funcionamento do sistema. Desse modo, esse estudo realiza uma análise da operação em regime permanente e os procedimentos de carga e descarga de baterias, obtendo a caracterização do comportamento do sistema.

O texto é organizado da seguinte maneira: na segunda seção, se demonstra a topologia escolhida para o estudo e se detalha as partes componentes do conversor utilizado, além de exibir as características da montagem experimental, os parâmetros utilizados no projeto dos controladores e a modelagem dos conversores presentes no sistema. Na terceira seção, se apresenta a estratégia de controle escolhida para os conversores. Na quarta seção, são apresentados os resultados experimentais obtidos e se analisam as características da operação em regime e do carregamento das baterias. Por fim, na quinta seção, se destacam as principais contribuições e conclusões obtidas.

## 2. SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Para implementar o sistema de armazenamento de energia, utiliza-se um conversor *back-to-back* estruturado como é visto na Figura 1, com um conversor c.c./c.a. e um conversor c.c./c.c. com duas células conectadas ao mesmo banco de baterias.

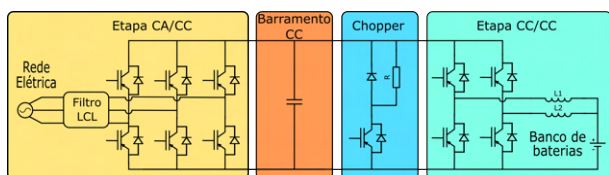


Figura 1. Estrutura do conversor *back-to-back*.  
Fonte: Autoria própria.

Com a utilização de um conversor bidirecional, busca-se executar as duas configurações possíveis: realizar o carregamento do banco de bateria a partir da energia proveniente da rede e injetar energia na rede proveniente do banco de baterias. Além disso, destaca-se a presença de um *chopper* para a proteção de sobretensão no barramento c.c. Desse modo, o conversor altera o seu modo de operação em função da energia necessária na rede e da sua condição de carga, sendo possível atender as demandas de potência e os serviços auxiliares (Xavier, 2020). Assim, divide-se o conversor em duas partes de acordo com a sua função, sendo elas a etapa c.c./c.a. e a etapa c.c./c.c.

A etapa c.c./c.a. é composta por três braços do conversor ligados a um filtro, tendo como função realizar a conversão da tensão contínua em corrente alternada da rede da concessionária. O filtro adotado é do tipo LCL e tem como objetivo a atenuação das altas frequências oriundas da ação de chaveamento do conversor (Liserre et al., 2005; da Silva, 2020b). Desse modo, esses braços do conversor operam de dois modos. O retificador PWM realiza a

extração de potência da rede para o carregamento do banco de baterias. Por sua vez, a operação como inversor realiza a retirada da energia presente no barramento c.c., modificando-a para os padrões da corrente alternada.

Já o estágio c.c./c.c. é formado por duas células entrelaçadas que atuam como elevadoras ou abaixadoras de tensão. A utilização desse conversor multicélulas, conforme visto na Figura 1, tem como objetivo atenuar os *ripples* presentes na tensão e corrente de entrada e saída, melhorando a eficiência e confiabilidade dos conversores, além de reduzir o custo e o volume ocupados pelos indutores (Jantharamin and Zhang, 2009). Desse modo, esses braços do conversor operam de dois modos. Os *boost* realizam a conversão c.c./c.c. elevadora de tensão, extraindo a energia presente nas baterias. Ressalta-se que o nível de tensão do barramento c.c. deve ser pelo menos  $\sqrt{2}$  vezes maior que a tensão de fase da rede RMS, visto que está sendo utilizado um modulador do tipo SVPWM (Hava et al., 1999). Já a operação como *buck* realiza a conversão c.c. / c.c. abaixadora, injetando a potência proveniente da rede nas baterias, atendendo aos devidos critérios de carregamento das mesmas.

Para a realização dos estudos foi projetado e montado um protótipo de um BESS de 10kVA no laboratório de Geração de Energia Elétrica da Unifei Campus de Itabira, que é apresentado na Figura 2. O sistema de controle é composto pela FPGA sbRIO-9606 e o processamento do controle sbRIO 9606 da *National Instruments*, bem como um banco de baterias, visto na Figura 3. Ressalta-se que são utilizadas 12 baterias estacionárias Freedom DF4100, em que cada bateria possui capacidade de fornecimento de 240Ah e tensão de operação de 12V, de modo que ligadas em série totalizam uma tensão de 144V no banco de baterias. As principais características do conversor BESS são expostas na Tabela 1.

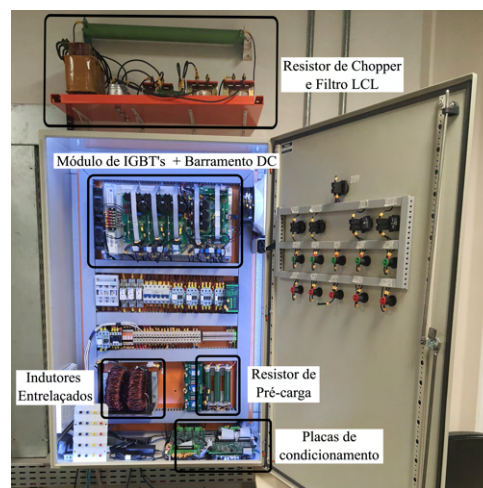


Figura 2. Montagem do BESS.  
Fonte: Autoria própria.

Para analisar o comportamento do conversor c.c/c.c., simplifica-se a estrutura em apenas a parcela que tem contato direto com o banco de baterias, vista na Figura 4. Para contemplar as duas configurações possíveis, utiliza-se simbolicamente uma chave que comuta entre a operação para o carregamento das baterias e para a injeção de potência na rede.



Figura 3. Estrutura do banco de baterias do BESS.  
Fonte: Autoria própria.

Tabela 1. Parâmetros do sistema

Conversor	Parâmetros	Valor
c.a./c.c.	Potência máxima	10kVA
	Tensão nominal c.a. ( $V_N$ )	220V
	Frequência fundamental ( $f_{rede}$ )	60Hz
	Frequência de chaveamento ( $f_{sw}$ )	5100Hz
	Tensão c.c. nominal ( $V_{DC}$ )	400V
	Indutância do filtro ( $L_1$ e $L_2$ )	2mH
	Resistência do indutor ( $R_1$ e $R_2$ )	0,015Ω
	Capacitância do filtro ( $C_f$ )	20μF
Resistência de amortecimento ( $R_f$ )	1,8Ω	
c.c./c.c.	Frequência de chaveamento	5100Hz
	Indutância c.c./c.c. ( $L_1$ )	3,761mH
	Indutância c.c./c.c. ( $L_2$ )	3,938mH
	Tensão nominal das baterias ( $V_{BB}$ )	144V

Para obter o controlador de corrente em ambos os conversores, busca-se um modelo que relacione a corrente dos indutores com o ciclo de trabalho ( $d$ ), variável pela qual se atua na modulação PWM a fim de obter a saída desejada. Já para as malhas externas, seja de potência ou tensão, deseja-se uma equação que modele o comportamento da variável de interesse em função da corrente dos indutores (Ogata, 2011; da Silva, 2020a).

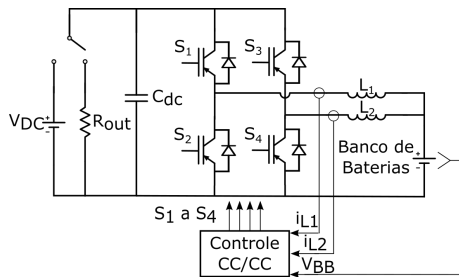


Figura 4. Estrutura do conversor c.c./c.c.  
Fonte: Autoria própria.

Desse modo, realiza-se a modelagem dos conversores em espaço de estados para as duas situações possíveis: chave aberta e chave fechada. Durante a operação como abaixador, a potência proveniente do barramento c.c. é destinada para as baterias, correspondendo a chave seletora na fonte de tensão. Analisando o circuito elétrico, definem-se as equações diferenciais que resultam nos espaços de estados que representam o comportamento do sistema, visto em (1), tal que,  $R_{o1}$  é a resistência equivalente na potência nominal desejada,  $L$  é a indutância de cada um dos braços do conversor c.c. / c.c.,  $C_{bb}$  é a capacitância equivalente a presença do banco de baterias,  $D$  é o ciclo de trabalho para a condição nominal de operação,  $v_{dc}$  é a tensão

no barramento c.c.,  $V_{BB}$  é tensão nominal do banco de baterias,  $P_{BB}$  é a potência nominal do buck,  $i_L$  é a corrente no indutor e  $v_c$  é a tensão no capacitor. (da Silva, 2020a; Jantharamin and Zhang, 2009).

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C_{bb} & -1/R_{o1}C_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D/L \\ 0 \end{bmatrix} v_{dc} \quad (1)$$

$$\forall R_{o1} = V_{BB}^2/P_{BB}$$

Desse modo, as funções de transferência do modelo de pequenos sinais são dada por (2), de modo a relacionar a corrente com o ciclo de trabalho e a tensão com a corrente. Destaca-se que a dinâmica é linearizada na tensão nominal do barramento c.c. ( $V_{DC}$ ).

$$G_{mc_{buck}}(s) = \frac{i_L(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{V_{DC}(R_{o1}C_{bb}s + 1)}{R_{o1}LC_{bb}s^2 + Ls + R_{o1}} \quad (2)$$

$$G_{mv_{buck}}(s) = \frac{v_c(s)}{i_L(s)} = \frac{R_{o1}}{R_{o1}C_{bb}s + 1}$$

Operando como elevador de tensão, a potência proveniente das baterias é destinada para o barramento c.c., correspondendo a chave seletora na resistência. Por meio do circuito elétrico, formula-se as equações diferenciais e se define os espaços de estados que representam a dinâmica do sistema (da Silva, 2020a; Jantharamin and Zhang, 2009). Desse modo, o espaço de estados médio resultante é visto em (3), tal que,  $R_{o2}$  é a resistência equivalente na potência nominal desejada,  $C_{dc}$  é a capacitância do barramento c.c. e  $v_{bb}$  é a tensão no banco de baterias.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_L/L & -D'/L \\ D'/C_{dc} & -1/R_{o2}C_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} v_{bb} \quad (3)$$

$$\forall R_{o2} = V_{DC}^2/P_{BB}, D' = 1 - D$$

Assim, as funções de transferência do modelo de pequenos sinais são dadas em (4) e (5), de modo a relacionar a corrente com o ciclo de trabalho e a tensão com a corrente. Vale ressaltar que, para a modelagem de potência, utiliza-se a malha fechada do controlador de corrente, a função de transferência da planta e um ganho de conversão de corrente para potência, tal que  $C_{mc_{boost}}$  é o compensador adotado para a malha de corrente e  $V_{BB}$  é tensão nominal do banco de baterias.

$$G_{mc_{boost}}(s) = \frac{i_L(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{V_{BB}(R_{o2}C_{dc} \cdot s + 2)}{D'[R_{o2}LC_{dc} \cdot s^2 + L \cdot s + R_{o2}D'^2]} \quad (4)$$

$$G_{mp_{boost}}(s) = \frac{P_{BB}(s)}{\tilde{i}_L(s)} = \frac{C_{mc_{boost}} \cdot G_{mc_{boost}}}{1 + C_{mc_{boost}} \cdot G_{mc_{boost}}} \cdot K_{Pbb} \quad (5)$$

$$\forall K_{Pbb} = V_{BB}$$

Para compreender o funcionamento da parcela c.a. / c.c., simplifica-se a estrutura na forma vista na Figura 5, de modo que, dependendo do sentido de potência desejado, alterna-se simbolicamente a chave seletora.

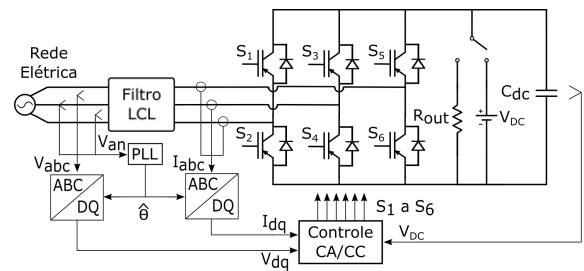


Figura 5. Estrutura do conversor c.a. / c.c.  
Fonte: Autoria própria.

Por mais que existam duas condições de operação diferentes, o comportamento do sistema é expresso por apenas

um modelo, uma vez que a dinâmica dos dois processos é a mesma e a única alteração é o sentido do fluxo de potência. Por meio do diagrama monofásico do filtro LCL, obtém-se as equação diferencial da conexão do conversor na rede. Ressalta-se que o capacitor é desconsiderado na análise, tendo em vista que, para a frequência da fundamental, seus efeitos são reduzidos. Aplicando as transformações de referencial para o referencial síncrono e a transformada de Laplace nessas componentes, realiza-se o desacoplamento entre as malhas por meio de uma ação *feedforward* (Teodorescu et al., 2007; da Silva, 2020b). Desse modo, obtém-se (6), tal que  $I_d$  é a corrente de eixo direto,  $I_q$  é a corrente de quadratura,  $V_{gd}$  é a tensão de eixo direto no ponto de acoplamento comum (PAC),  $V_{gq}$  é a tensão de quadratura no PAC,  $V_d$  e  $V_q$  são as tensões sintetizadas pelo conversor no eixo direto e de quadratura (da Silva, 2020a).

$$\begin{aligned} V_d(s) &= R_{eq}I_d(s) + sL_{eq}I_d(s) - \omega_g L_{eq}I_q(s) + V_{gd}(s) \\ V_q(s) &= R_{eq}I_q(s) + sL_{eq}I_q(s) + \omega_g L_{eq}I_d(s) + V_{gq}(s) \end{aligned} \quad (6)$$

Com isso, tem-se igualmente as funções de transferência da corrente de eixo direto e quadratura vistas em (7).

$$\begin{aligned} G_{mcd}(s) &= \frac{I_d(s)}{V_d(s)} = \frac{1}{R_{eq} + sL_{eq}} \\ G_{mcq}(s) &= \frac{I_q(s)}{V_q(s)} = \frac{1}{R_{eq} + sL_{eq}} \end{aligned} \quad (7)$$

Para obter a malha que representa o comportamento da tensão do barramento c.c., considera-se a corrente proveniente das baterias como um distúrbio do sistema e que há uma conversão de potência c.a. em c.c., deve-se aplicar um ganho que realiza essa transformação, como visto na Equação (8), tal que  $i_{dc}$  é a corrente que flui para o conversor, ou seja, a corrente proveniente das baterias, menos o valor que flui pelo barramento c.c. (Tremblay et al., 2007).

$$i_{dc}(t) = K_{mv} \cdot i_d(t) \quad \forall \quad K_{mv} = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot \frac{V_d}{V_{DC}} \quad (8)$$

Desse modo, a função de transferência é modificada para possibilitar o controle, adotando a forma vista em (9).

$$G_{mvd}(s) = \frac{V_{DC}(s)}{I_d(s)} = \frac{1}{C_{dc} \cdot s} \cdot K_{mv} \quad (9)$$

Para o controle da potência reativa, lineariza-se o comportamento do sistema para  $V_d$  em condição nominal e se modela o comportamento do sistema em função da ação da malha fechada do sistema com os controladores de corrente (da Silva, 2020a; Tremblay et al., 2007). Desse modo, a função de transferência resultante é dada em (10), tal que  $K_{pcAC}$  e  $K_{icAC}$  são os ganhos dos controladores de corrente do conversor c.c. / c.a. e  $Q$  é a potência reativa.

$$\begin{aligned} G_{mQ}(s) &= \frac{Q(s)}{I_q(s)} = K_{mQ} \frac{\left(K_{pcAC} + \frac{K_{icAC}}{s}\right) G_{mcq}(s)}{1 + \left(K_{pcAC} + \frac{K_{icAC}}{s}\right) G_{mcq}(s)} \\ \forall \quad K_{mQ} &= (3/2) \cdot V_{gd} \end{aligned} \quad (10)$$

Implementa-se a estratégia *Dual Second Order Generalized Integrator - Phase Locked Loop* (DSOGI-PLL) para obter o alinhamento angular entre as tensões do conversor e a rede elétrica (Rodríguez et al., 2006). Destaca-se que a escolha pela DSOGI-PLL ocorre devido a elevada distorção harmônica observada na rede elétrica da instituição em que o protótipo se encontra. A técnica apresenta alto desempenho e permite a definição de uma referência de sincronismo com a tensão de sequência positiva, mesmo em

condições extremas de desequilíbrio e distorções harmônicas (Prakash et al., 2019; Chung, 2000).

### 3. CONTROLE DOS CONVERSORES

Para realizar o controle do conversor *buck*, utiliza-se o diagrama visto na Figura 6, tal que a  $V_{BB}$  é adotada como a variável da malha externa e que é utilizado o conjunto de Equações (2) para o projeto. Para os ganhos dos controladores de corrente, utiliza-se a técnica de lugar das raízes e, para a tensão, adota-se a resposta em frequência, resultando nos parâmetros vistos na Tabela 2. Ressalta-se que esses valores são obtidos por meio de simulações do sistema completo, de modo a serem os valores que minimizam critérios de máximo sobressinal e tempo de acomodação, além de garantir o distanciamento das frequências de operação da malha interna e externa, permitido a controlabilidade do sistema. Destaca-se que, são utilizados como critérios de projeto: sobressinal de 1% e 6,81% e tempo de acomodação de 1,5ms e 1.95ms, respectivamente para a corrente e tensão.

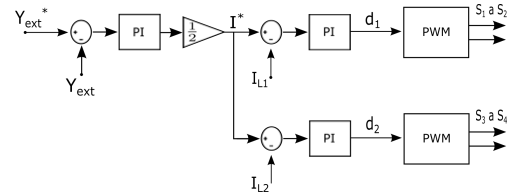


Figura 6. Estrutura de controle conversor c.c./c.c.  
Fonte: Autoria própria.

O controle do conversor *boost* é realizado a partir das Equações (4) e (5), considerando a montagem vista na Figura 6, tal que para a variável controlada pela malha externa é a potência oriunda das baterias ( $P_{bb}$ ), sendo descrita por (11).

$$P_{bb} = V_{BB} \cdot (I_{L1} + I_{L2}) \quad (11)$$

Para os ganhos dos controladores de corrente, utiliza-se o projeto por lugar das raízes e, para a tensão, opta-se pela técnica de resposta em frequência, resultando nos parâmetros vistos na Tabela 2. Destaca-se que esses critérios de projeto são obtidos por meio de simulações do sistema em programa computacional, com o intuito de serem os valores que garantem o distanciamento das frequências das malhas e minimizam critérios de sobressinal e tempo de acomodação. Destaca-se que, são utilizados como critérios de projeto: sobressinal de 1% e 0,15% e tempo de acomodação de 1ms e 18,36ms, respectivamente para a corrente e tensão.

Já para o controle do lado c.a., utiliza-se o diagrama visto na Figura 7, composta tanto pela parcela realizada pelo controle, quanto pelas componentes de *feedforward*, as transformadas e a modulação SVPWM.

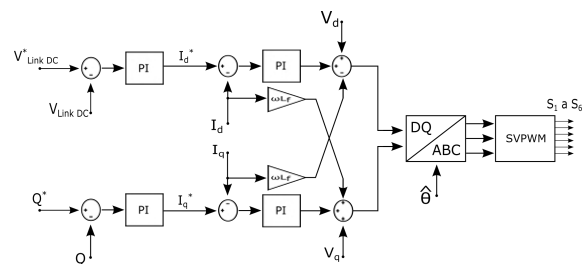


Figura 7. Estrutura de controle conversor c.a./c.c.  
Fonte: Autoria própria.

A partir do conjunto de Equações (7) e alocando o zero do controlador de forma a anular o pólo da planta, obtém-se os ganhos dos controladores vistos na Tabela 2. Para o controle da tensão do barramento, utiliza-se a Equação (9), por meio do qual se compara o denominador com a equação característica de um sistema de segunda ordem, obtendo os parâmetros vistos na Tabela 2. Já para obter ganhos do controlador de potência reativa, utiliza-se a Equação (10) considerando o controlador de corrente como um ganho unitário e se adicionando um compensador de modo que o zero do controlador PI cancele o pólo da malha fechada de corrente. Os parâmetros do controlador de potência reativa do conversor c.a./c.c. são apresentados na Tabela 2.

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

##### 4.1 Operação em regime permanente

Com o intuito de analisar o comportamento do sistema em regime permanente, realiza-se um conjunto de testes variando os principais atributos do sistema, a fim de avaliar impactos no funcionamento do sistema. Os principais atributos da operação desse sistema são apresentados nas Figuras 8 e 9. Destaca-se que se utiliza o valor médio das variáveis com o intuito de minimizar as ações dos ruídos de medição e *ripples* de chaveamento. Ressalta-se que esses resultados estão apresentados nas Figuras 8a a 8h com um tempo de amostragem de  $0,49590\mu s$ , e que seus principais atributos serão analisados nessa seção. Durante o processo de iniciação do BESS, corresponde aos 0,004 minutos iniciais, a tensão do barramento c.c. é elevada em rampa, de modo a tornar o sistema apto para o uso.

Tabela 2. Parâmetros dos controladores.

Modo	Operação	Parâmetros	Valor
Buck	Corrente	$K_{pc_{buck}}$	$0,0456 A^{-1}$
		$K_{ic_{buck}}$	$88,3536 s/A$
	Tensão	$K_{pv_{buck}}$	$0,6674 A/V$
		$K_{iv_{buck}}$	$264,9444 As/V$
Boost	Corrente	$K_{pc_{boost}}$	$0,08 A^{-1}$
		$K_{ic_{boost}}$	$234,5009 s/A$
	Potência	$K_{pP_{boost}}$	$1,7782 \mu A/W$
		$K_{iP_{boost}}$	$1,6779 As/W$
c.c./c.a.	Corrente	$K_{pc_{AC}}$	$2,9751 V/A$
		$K_{ic_{AC}}$	$214,8849 Vs/A$
	Tensão do barramento	$K_{pvdc_{AC}}$	$0,0606 A/V$
		$K_{ivdc_{AC}}$	$0,4038 As/V$
	Potência Reativa	$K_{pQ_{AC}}$	$0,20621 \mu A/VAr$
		$K_{iQ_{AC}}$	$0,0194 As/VAr$

O primeiro experimento a ser analisado é a operação do sistema sem carga, tal que ele ocorre de 0,004 a 0,165 minutos. Nessa condição o barramento é mantido em 400 V e toda potência que flui pelo conversor c.c./c.a. tem como finalidade, suprir as perdas e manter a tensão do barramento, conforme visto nas Figuras 8a e 8b. Desse modo, a potência que flui pelo sistema é pequena e puramente ativa, cerca de  $24,71W$ . Observa-se também uma diferença de tensão entre o PAC e a sintetizada pelo conversor c.c./c.a. para promover esse fluxo e alimentar o filtro LCL, como pode ser observado na Figura 8c, apresentando  $\Delta V_d = -2,7V$  e  $\Delta V_q = -9,44V$ , resultando assim em  $I_d = 0,096A$ . Ressalta-se que, devido a presença de um transformador de acoplamento entre o filtro e a rede, a tensão no PAC não é constante, sendo impactada pelo maior fluxo de potência, conforme visto na Figura 8c. Em função disso, os dados de tensão  $V_d$  e  $V_q$ , são considerados na forma da diferença entre a tensão no PAC

e a tensão sintetizada, para possibilitar melhores análise dos fluxo de potência. Outra observação a ser feita é que a potência calculada é uma função da corrente do conversor c.c./c.a. e a tensão medida após o filtro, de modo que essa consideração gera um erro de calculo devido a corrente que flui pelos capacitores do filtro LCL, gerando os resultados vistos na Figura 8b. Destaca-se que esse erro é pequeno, de modo há não justificar a inserção de mais um conjunto de medições apenas com esse propósito.

O segundo experimento é o fornecimento de potência reativa indutiva pelo conversor c.c./c.a., conforme visto na Figura 8b, tal que ele ocorre de 0,738 a 1,057 minutos. Ressalta-se que a potência ativa vinda da rede fornece energia ao barramento c.c. e, por meio do inversor, essa energia é reinjetada no SIN na forma de potência reativa, resultando em  $P_{AC} = -136,2W$  para  $Q_{AC} = 4000VAr$ . Outro atributo a ser analisado é o comportamento das correntes trifásicas do conversor para essa condição de operação, vista Figura 8i, bem como a THD (Distorção Harmônica Total), vista na Figura 9a. Desse modo, constata-se que a IHD (Distorção Harmônica Individual) do 5° harmônico é a mais representativa, 2,17%, e se mantém menor que os 4% permitidos pela NBR 16149:2013 para harmônicos ímpares de corrente, bem como nas definições do INMETRO (ABNT, 2013; INMETRO, 2022).

O próximo experimento é o fornecimento de potência reativa capacitiva pelo conversor c.c./c.a., conforme visto na Figura 8b, tal que ele ocorre de 1,176 a 1,588 minutos. Os resultados são semelhantes em regime permanente aos obtidos para potência reativa indutiva, alterando principalmente o sentido do defasamento presente entre a tensão e corrente, ocasionando um fluxo de potência da forma  $P_{AC} = -52,39W$  para  $Q_{AC} = -4000VAr$ . Analisando o comportamento das correntes trifásicas, visto na Figura 9b, constata-se que há uma ampliação da THD observada para 3,59%, porém esse valor se mantém abaixo de 5% que é o limite estabelecidos em norma (ABNT, 2013).

O quarto experimento analisado é o fornecimento de potência ativa por meio dos boosts, conforme visto na Figura 8e, tal que ele ocorre de 1,994 a 2,537 minutos. Ao ativar o controle de potência dos *boosts*, observa-se que a corrente dos dois indutores são próximas, apresentando uma máxima diferença de 0.24A. Constata-se também que, ao longo do tempo, a corrente aumenta, esse fato ocorre em função da queda da tensão do banco de baterias, vista na Figura 8f, que ocorre em função do processo de descarga das baterias, obtendo correntes que variam de  $-13,6A$  a  $-14,04A$  e  $-13,84A$  a  $-13,97A$  para indutores 1 e 2, respectivamente. Ressalta-se que, devido a pequena variação de indutância entre os braços do conversor c.c./c.c., há uma diferença no ciclo de trabalho de cada um dos ramos para que a corrente nos indutores seja semelhante, mesmo com o desequilíbrio presente nas indutâncias. Nesse procedimento, observa-se que a tensão  $V_d$  a ser sintetizada pelo conversor se eleva para promover a ejeção da potência adicional presente no barramento, impactando diretamente na corrente  $I_d$  que flui pelo conversor c.c./c.a. vista na Figura 8d. Considerando o fluxo de potência das baterias para a rede elétrica, tem-se que é relevante se observar o comportamento das correntes trifásicas por meio da THD, vista na Figura 9c, por meio do qual se constata que ela se mantém abaixo dos limites estabelecidos para



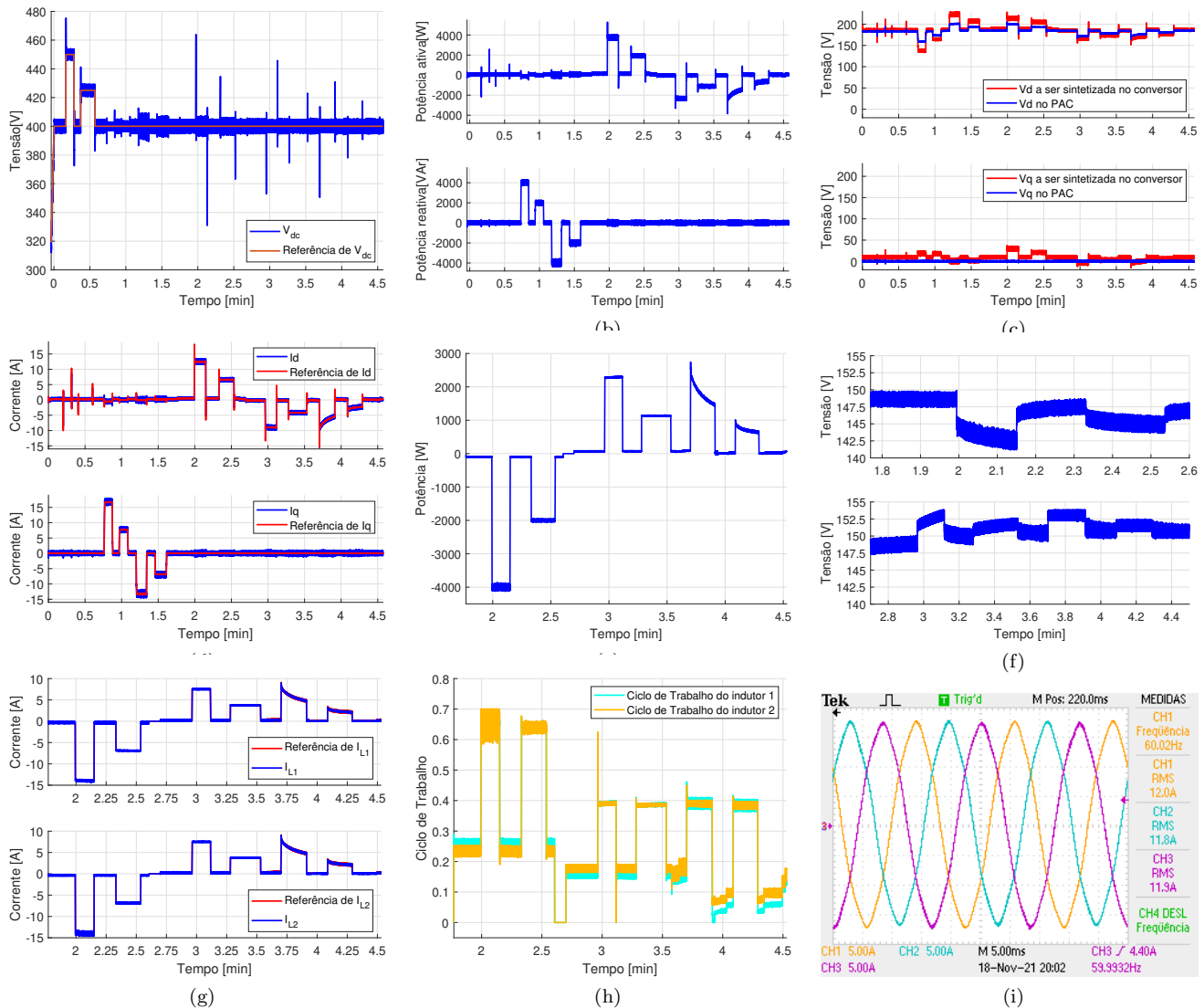


Figura 8. Resultados experimentais em protótipo de 10kVA. (a) Tensão do barramento c.c. (b) Potência da parcela c.a. do conversor. (c) Tensões da parcela c.a. transformadas para o eixo dq. (d) Corrente do conversor c.a. transformada para o eixo dq. (e) Potência c.c. total que flui pelo banco de baterias. (f) Tensão no banco de baterias. (g) Corrente dos indutores. (h) Ciclo de trabalho dos conversores c.c. (i) Correntes trifásicas para  $Q=+4000 \text{ VAr}$ .

Fonte: Autoria própria.

conversores dessa modalidade, apresentando um valor de 4,41% (ABNT, 2013; INMETRO, 2022).

O quinto experimento realizado é o carregamento das baterias utilizando o controle de corrente, conforme visto na Figura 8g, tal que ele ocorre de 2,964 a 3,532 minutos. Observa-se que, com o fornecimento de corrente para as baterias, a tensão do banco de baterias aumenta em função do processo de carga, apresentando valores de 151,4V até 153V e, assim, a potência fornecida para o conjunto também é elevada, inicialmente com uma potência de  $-2294W$  e finalizando em  $-2323W$ . Devido a isso, observa-se que a potência e a corrente extraídas da rede pelo conversor c.a. / c.c. são ampliadas para suprir a maior necessidade de energia. Para essa condição de funcionamento, observa-se que as correntes trifásicas apresentam a menor THD observada, cerca de 2,62% de distorção harmônica, vista na Figura 9d, atendendo aos critérios normatizados dos produtos comercializados no Brasil (INMETRO, 2022).

O último experimento de operação em regime é o carregamento de baterias com controle de tensão, visto na Figura 8f, tal que ele ocorre de 3,702 a 4,291 minutos. Observa-se que a tensão do banco de baterias é mantida no valor de controle, de modo que a potência utilizada para garantir essa condição varia rapidamente, de  $2389W$  para  $1458W$ , fazendo com que os atributos de corrente, tensão e potência dos conversores c.c./c.a. e c.c. / c.c. variem consideravelmente. Ressalta-se que a diferença entre as razões cíclicas dos *bucks* é maior para condições de carga reduzida, conforme visto na Figura 8h, tendo em vista que a dinâmica dos conversores em condições de menor carga, tem maior impacto das diferenças de indutâncias, conforme relatado na Equação (2).

Por fim, destaca-se que, em todos os procedimentos de carga e descarga das baterias, a potência de entrada do sistema, seja pelo conversor c.c./c.c. ou c.a./c.c., é maior que a potência entregue na saída, de modo que a potência de entrada do sistema supre também as perdas

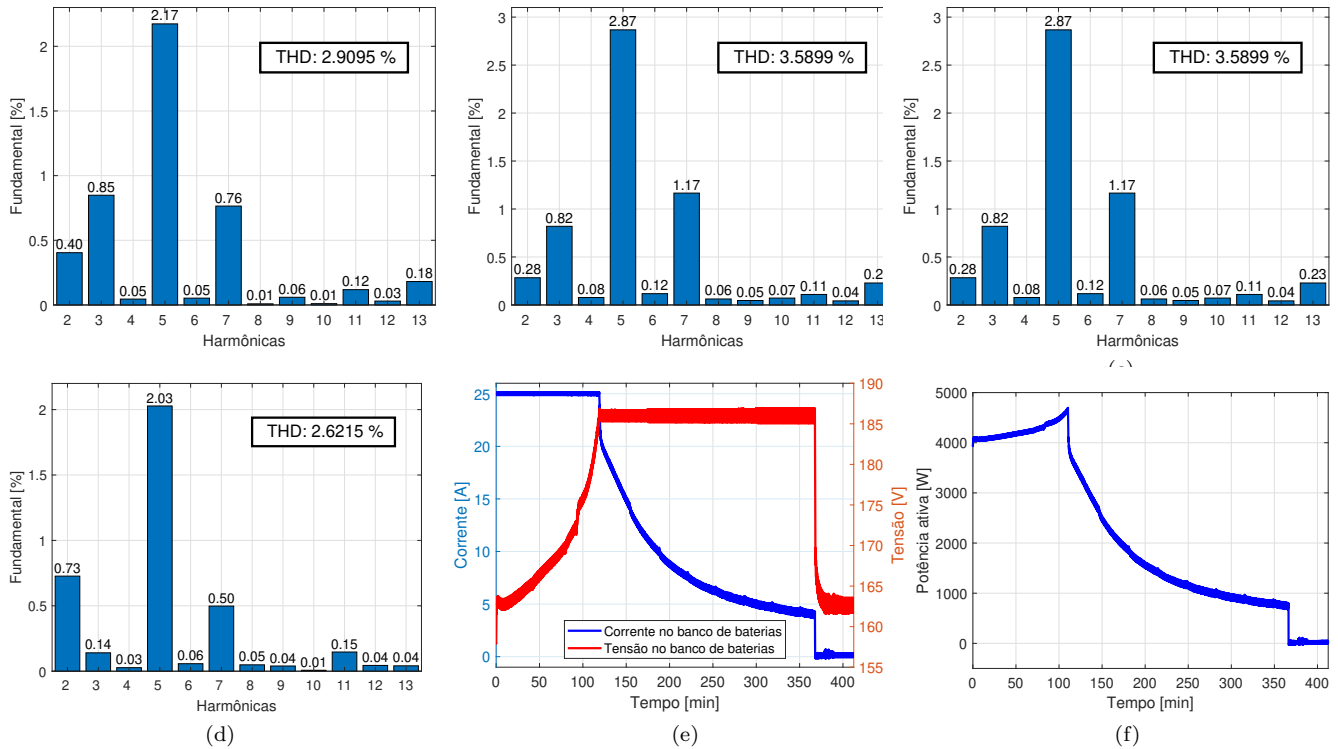


Figura 9. Resultados experimentais em protótipo de 10kVA. (a) THD da corrente  $I_a$  (CH1) para  $Q=+4000 \text{ VAR}$ . (b) THD da corrente  $I_a$  (CH1) para  $Q=-4000 \text{ VAR}$ . (c) THD da corrente  $I_a$  (CH1) para  $P=4000 \text{ W}$ . (d) THD da corrente  $I_a$  (CH1) para  $I_{LT} = 24 \text{ A}$ . (e) Procedimento de carregamento de baterias. (f) Potência de carregamento de baterias.

Fonte: Autoria própria.

dos conversores, conforme visto nas Figuras 8b e 8e. Assim, obtém-se que o sistema apresenta perdas médias de aproximadamente 3,95%, 1,99% e 0,53%, na ordem dos experimentos exibidos que apresentam a caracterização da parcela c.c./c.c. e c.c./c.a. Desse modo, esses experimentos caracterizam o funcionamento dos conversores para operar como um sistema de armazenamento de energia em bateria, atendendo as funções exigidas de um BESS típico. Por meio dos testes foram analisados os principais fluxos de potência possíveis para o conversor, permitindo assim que os conversores sejam usados em regime. Ressalta-se que o comportamento do sistema atende a todos os critérios estabelecidos pela NBR 16149:2013, e apresenta uma taxa de distorção harmônica adequada para seu nível de potência (ABNT, 2013; INMETRO, 2022). A cerca do comportamento dinâmico do sistema, constata-se que os controles implementados promovem características de tempo de acomodação e sobressinal compatíveis com a operação do BESS e possuem erro de regime permanente nulo.

#### 4.2 Operação de carregamento em longa duração

Com o objetivo que corroborar o funcionamento do processo de carregamento de baterias, realiza-se um experimento de longa duração no qual se verifica o comportamento do sistema frente as três etapas principais: carga rápida, equalização e flutuação (Silva, 2013). Esse experimento é visualizado na Figura 9e e tem seus principais atributos destacados na Tabela 3.

No procedimento de carga rápida, observa-se que a corrente é mantida no valor máximo desejado para os conversores c.c. / c.c. Ressalta-se que a potência fornecida ao

conjunto aumenta devido a elevação da tensão das baterias, conforme visto na Figura 9f e na Tabela 3. Ao atingir a tensão de equalização do banco de baterias, 186 V, inicia-se o processo de equalização em que se passa a utilizar um controle de tensão e ao manter as baterias em uma tensão contante, assim se observa que a potência fornecida reduz ao longo do tempo, devido a menor necessidade de corrente para manter o mesmo nível de tensão. Quando a corrente desse conjunto atinge a corrente de 4 A, inicia-se o processo de flutuação em que o nível de tensão é reduzido para a tensão de flutuação de 162 V, de modo manter a bateria carregada e suprir as perdas de auto descarga, fato esse corroborado pela baixa potência fornecida ao conjunto nesse período.

Tabela 3. Carregamento de baterias

Procedimento	Tempo [min]	Corrente [A]	Tensão [V]	Potência [W]
Carga rápida	0 a 118,7	25,0	157,9 a 186,0	4045 a 4651
	118,7 a 367,9		186,0	4651 a 736,8
Flutuação	367,9 a 412,4	0,1367	162,0	22,13

## 5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, foi apresentado um estudo sobre o funcionamento dos sistemas de armazenamento de energia por baterias (BESS). Para isso, foi desenvolvido a modelagem matemática dos conversores utilizados, bem como uma lógica de controle para operar o sistema. Foi realizada a montagem experimental do conversor em um protótipo de 10kVA presente no laboratório utilizado pelo grupo de pesquisa Controle e Conversão de Energia Elétrica (CCEE) na

Unifei, Campus Itabira. Foram obtidos dados acerca do funcionamento dos dois fluxos de potência possíveis para o BESS: carregamento de baterias e a injeção de potência na rede.

Por meio dos experimentos, constata-se que os controladores implementados garantem o funcionamento do conversor para o sistema de armazenamento de energia operando em paralelo com a rede, permitindo a execução das funcionalidades típicas do BESS. Assim, o protótipo garante as condições controlabilidade, de modo a garantir uma execução com erro de regime permanente nulo e taxas de distorção harmônicas adequadas aos padrões definidos na NBR 16149:2013 e na normativa N° 140 / 2022 do INMETRO (ABNT, 2013; INMETRO, 2022).

Desse modo, tem-se caracterizado e comprovado o funcionamento de um conversor capaz de realizar a carga e descarga de um banco de baterias. Por meio desse conversor, torna-se possível que, frente uma ampliação da geração distribuída com fontes de energia não despacháveis, sempre haja potência disponível na rede e não se perca a qualidade de energia. Além disso, esse sistema possibilita também o fornecimento de serviços ancilares que garantam a robustez e segurança do sistema interligado nacional.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio da FAPEMIG, CAPES e CNPQ e ao suporte financeiro através do projeto CEMIG/ANEEL D722 "Análise de Arranjo Técnico e Comercial baseado em uma Planta Piloto de Sistema Distribuído de Armazenamento de Energia em Alimentador Crítico da Rede de Distribuição de 13,8 kV".

#### REFERÊNCIAS

- ABNT (2013). Sistemas fotovoltaicos (fv) características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Technical Report ABNT NBR 16149:2013, Brasil.
- Aneel (2020). Informações de geração - aneel. <http://www.aneel.gov.br/siga>. (Acessado em 10/07/2021).
- Chatrungs, N. (2019). Battery energy storage system (bess) and development of grid scale bess in egat. In *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*, 589–593.
- Cheun Hau, L. and Seng Lim, Y. (2020). Financial benefits of pv only, bess only and pv with bess under the trading arrangements of nem and etou in malaysia. In *2020 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, 59–64.
- Chung, S.K. (2000). A phase tracking system for three phase utility interface inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15(3), 431–438.
- da Silva, R.C. (2020a). *Estudo e Desenvolvimento de um Conversor Formador de Rede Multiterminal*. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- da Silva, R.C. (2020b). Inversor operando em modo isolado com compartilhamento de carga pelo controle droop. *Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Automática*, 2(1), 431 – 441.
- Hava, A., Kerkman, R., and Lipo, T. (1999). Simple analytical and graphical methods for carrier-based pwm-vsi drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 14(1), 49–61.
- INMETRO (2022). Regulamento técnico da qualidade e os requisitos de avaliação da conformidade para equipamentos de geração, condicionamento e armazenamento de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos. Technical Report INMETRO N° 140 / 2022, Brasil.
- Jantharamin, N. and Zhang, L. (2009). Analysis of multiphase interleaved converter by using state-space averaging technique. In *2009 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, volume 01, 288–291.
- Liserre, M., Blaabjerg, F., and Hansen, S. (2005). Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(5), 1281–1291.
- Ogata, K. (2011). *Engenharia de controle moderno*. Pearson Prentice Hall. ISBN 978-85-7605-810-6.
- Prakash, S., Singh, J.K., Behera, R.K., and Mondal, A. (2019). Comprehensive analysis of sogi-pll based algorithms for single-phase system. In *2019 National Power Electronics Conference (NPEC)*, 1–6.
- Prompinit, K. and Khomfoi, S. (2015). Design of active power controller of a bess in ac microgrids. In *2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 1–6.
- Rodríguez, P., Teodorescu, R., Candela, I., Timbus, A.V., Liserre, M., and Blaabjerg, F. (2006). New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions. In *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*.
- Sauaia, R. (2020). Grandes usinas solares apoiando a estabilidade da rede elétrica. [http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/33\\_sauaia\\_2020\\_08\\_11.pdf](http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/33_sauaia_2020_08_11.pdf). (Acessado em 10/07/2021).
- Silva, W.W.A.G. (2013). *Estudo e implementação de um conversor bidirecional como interface na regulação de tensão em barramento c.c. e carregamento de baterias em um Sistema Nanorrede*. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Such, M.C. and Masada, G.Y. (2017). Bess control on a microgrid with significant wind generation. In *2017 IEEE Power Energy Society General Meeting*, 1–5.
- Teodorescu, R., Liserre, M., and Rodriguez, P. (2007). *Appendix A: Space Vector Transformations of ThreePhase Systems*, 355–362.
- Tremblay, O., Dessaint, L.A., and Dekkiche, A.I. (2007). A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. In *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 284–289.
- Wu, D., Gui, Q., Zhao, W., Wang, J., Shi, S., and Zhou, Y. (2020). Battery energy storage system (bess) sizing analysis of bess-assisted fast-charge station based on double-layer optimization method. In *2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS)*, 658–662.
- Xavier, L.S. (2020). *A Comprehensive Analysis of Design and Performance of Power Converters for Battery Energy Storage Systems*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Yoo, H.J., Kim, H.M., and Song, C.H. (2012). A coordinated frequency control of lead-acid bess and li-ion bess during islanded microgrid operation. In *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1453–1456.