

## Análise do balanceamento das tensões do barramento bipolar de uma microrrede CC através de um conversor *Cuk* \*

Debora Pereira Damasceno \* Mateus Pinheiro Dias \* João I. Y. Ota \*  
José Antenor Pomilio \*

\* Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas - SP,  
Brasil (e-mail: [deboradamasceno@gmail.com](mailto:deboradamasceno@gmail.com),  
[mateuspinhoerodias@gmail.com](mailto:mateuspinhoerodias@gmail.com), [jyota@unicamp.br](mailto:jyota@unicamp.br),  
[antenor@unicamp.br](mailto:antenor@unicamp.br))

**Abstract:** This paper presents an analysis of the balancing voltage of a bipolar dc microgrid ( $\pm 190$  V) formed by a four-wire three-phase bidirectional PWM rectifier. The rectifier is responsible for guaranteeing the total dc bus voltage (380 V). The balancing of symmetrical voltages is guaranteed by a Cuk voltage-balancing converter that acts equalizing the voltages in case of unbalanced loads. DC-DC converters are connected to the dc buses and aims to adjust the voltage levels for residential or commercial applications. The simulation results show that a voltage balancer is essential to keep the voltage balance of the dc microgrid.

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma análise do balanceamento das tensões de uma microrrede CC bipolar ( $\pm 190$  V) formada por um retificador PWM bidirecional trifásico a quatro fios. O retificador é responsável por garantir a tensão total do barramento CC bipolar (380 V). O balanceamento das tensões simétricas é garantido por um conversor *Cuk* balanceador de tensão que atua para equalizar as tensões em caso de cargas desequilibradas. Aos barramentos CC são conectados conversores CC-CC que visam adequar os níveis de tensão para aplicações de característica residencial ou comercial. Os resultados de simulação mostram que é indispensável o uso de um circuito auxiliar para balancear as tensões da microrrede CC bipolar.

**Keywords:** Bipolar dc microgrid, dc-dc converter, Neutral line current, Voltage unbalance.

**Palavras-chaves:** Microrrede CC bipolar, conversor CC-CC, corrente de neutro, desbalanceamento de tensão.

### 1. INTRODUÇÃO

O crescimento da geração distribuída desafia o tradicional sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Com a proliferação de painéis solares nos tetos de casas e indústrias e instalações de usinas eólicas de pequeno porte ou até mesmo micro hidroelétricas, a eletricidade agora pode ser gerada muito próximo de onde se é consumida e no nível de tensão acessado pelo consumidor final (IEC, 2017). Além disso, a operação ilhada da rede CA é uma característica importante que pode garantir uma maior resiliência ao consumidor final, resultando na disseminação das chamadas microrredes (Hatzigiargyriou et al., 2007).

\* Este trabalho tem o apoio (financeiro) da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através dos processos nº 2016/08645-9, 2017/11623-0 e 2018/21436-5, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através dos processos nº 303859/2020-2 e 401216/2016-0, e foi desenvolvido através do programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico PD-00063-3058/2019 - PA3058: “MERGE - Desenvolvimento de Microrredes Eficientes, Confiáveis e Sustentáveis”, regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, em parceria com as distribuidoras do grupo CPFL Energia.

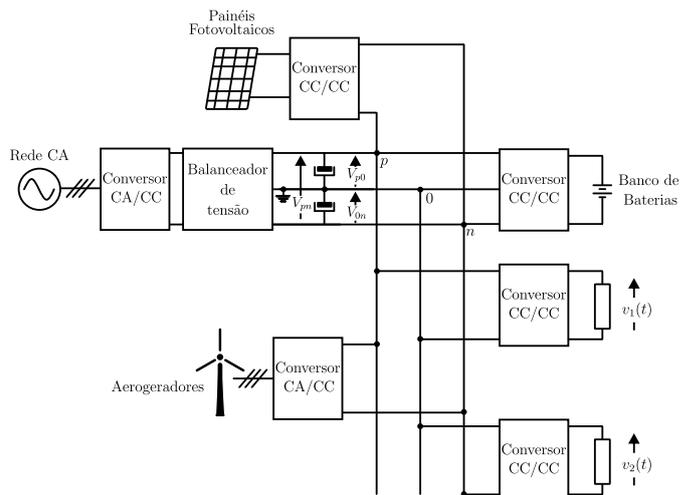


Figura 1. Exemplo de estrutura de uma microrrede CC bipolar.

As microrredes podem operar segregadas ou conectadas à rede de distribuição e, dependendo do tipo de tensão no ponto de acoplamento comum (PAC), podem ser distingui-

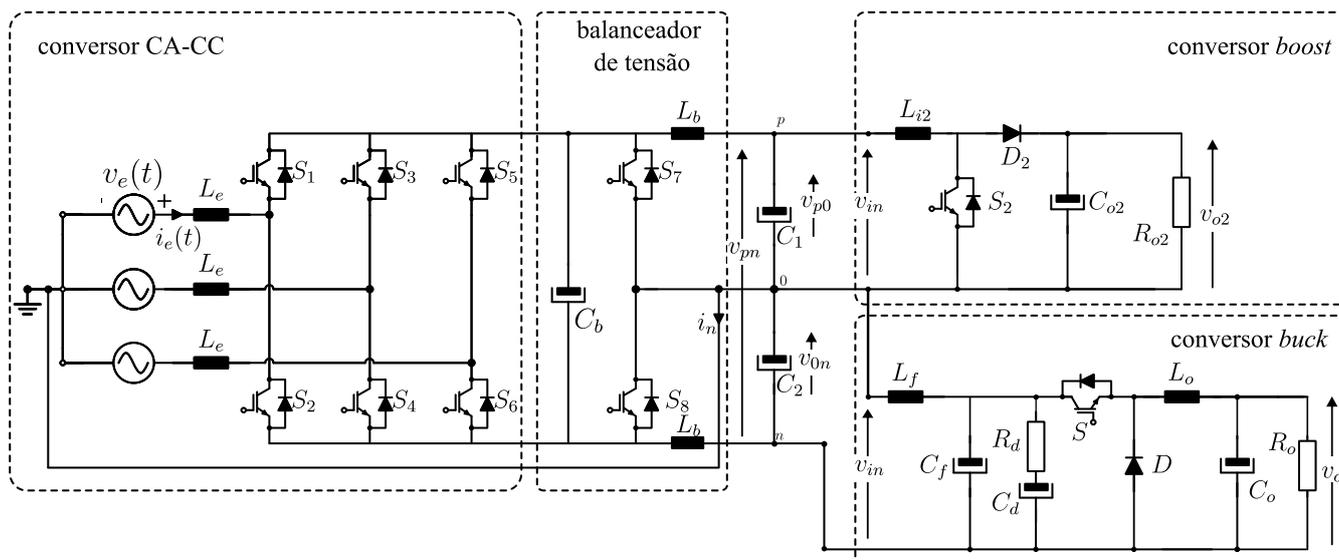


Figura 2. Microrrede CC bipolar.

das em CA e CC. Embora durante a última década, um progresso notável tenha sido feito na melhoria do desempenho de microrredes CA, as microrredes CC são reconhecidas como mais atraentes para vários usos devido à uma maior eficiência, interface mais natural para muitos tipos de fontes de energia renovável e sistemas armazenadores de energia e melhor conformidade com produtos eletrônicos. Além disso, em uma microrrede CC, não há problemas com fluxo de potência reativa e regulação de frequência, resultando em um sistema de controle notavelmente menos complexo do que os de microrredes CA (Dragičević et al., 2016a).

As microrredes CC podem ser formadas por um barramento unipolar ou bipolar. Um barramento unipolar consiste de um polo negativo e um positivo, enquanto que um barramento bipolar consiste de três polos, um positivo, um negativo e um neutro. A Figura 1 exemplifica uma topologia de microrrede CC com barramento bipolar. Há um sistema de conversão de energia eólica, um sistema fotovoltaico, cargas eletrônicas representados pelos conversores CC-CC e um banco de baterias ligados ao barramento CC. A principal característica de microrrede CC bipolar é a disponibilidade de fontes de tensão entre a tensão total do barramento CC,  $V_{pn}$ , e as tensões simétricas,  $V_{p0}$  e  $V_{0n}$ . Além disso, em caso de falha de um dos barramentos CC, parte da microrrede CC pode ser mantida em operação, aumentando a resiliência do sistema (Dragičević et al., 2016b).

O uso de um barramento bipolar pressupõe um aterramento compartilhado entre o sistema CA e o sistema CC através do retificador. Com base nisso, o presente trabalho apresenta a análise do balanceamento das tensões de uma microrrede CC bipolar ( $\pm 190$  V) formada a partir de uma rede CA trifásica, através de um retificador bidirecional PWM. O retificador PWM e sua estrutura de controle são responsáveis por garantir a tensão total do barramento CC bipolar (380 V). O balanceamento das tensões simétricas é garantido por um circuito auxiliar baseado no conversor *Cuk*, que atua para equalizar as tensões em caso de cargas desequilibradas (Rivera et al., 2021) (Wang et al., 2017).

Aos barramentos CC de 190 V estão conectados conversores CC-CC, um do tipo *boost* (conectado ao barramento positivo) e outro do tipo *buck* (conectado ao barramento negativo). Os conversores CC-CC adequam os níveis de tensão para aplicações de característica residencial ou comercial.

Estes estudos inserem-se no contexto das pesquisas em desenvolvimento no Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes - LabREI (Ota and Pomilio, 2020) e da realização de uma microrrede CC na sede da CPFL através do projeto MERGE (Pomilio et al., 2021).

## 2. ESTRUTURA DA MICRORREDE CC

A Figura 2 mostra a estrutura da microrrede CC bipolar a ser analisada neste trabalho.

### 2.1 Retificador PWM

Retificadores PWM oferecem vantagens como bidirecionalidade, correção de fator de potência, controlabilidade e correntes de entrada senoidais (Rivera et al., 2021) (Bueno, 2018). A Figura 3 mostra um retificador trifásico com seis chaves e um barramento bipolar. O neutro do retificador PWM é conectado ao ponto médio do barramento bipolar e é aterrado.

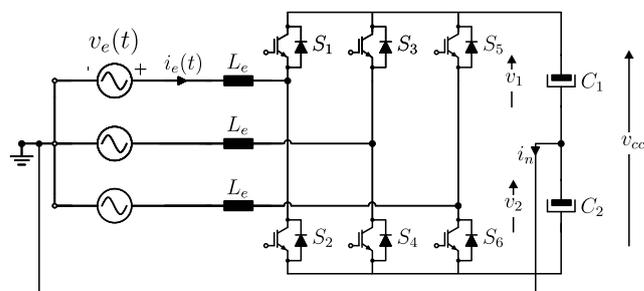


Figura 3. Retificador PWM trifásico a quatro fios.

Este tipo de retificador também é conhecido como retificador tipo *boost* uma vez que proporciona uma tensão

CC maior do que a tensão de pico na entrada CA. Devido à conexão entre o ponto neutro aterrado da entrada CA do retificador PWM e o ponto médio do barramento CC bipolar, a tensão do lado CC deve ser superior ao valor de pico da tensão de fase (180 V) para a operação adequada do retificador, com a regulação da tensão CC de saída do sistema e a imposição de correntes senoidais e equilibradas na entrada, o que justifica a escolha de uma microrrede com tensões bipolares de  $\pm 190$  V. Os parâmetros e especificações do retificador PWM podem ser vistos na Tabela 1.

Em caso de falha de uma ou duas fases da rede CA, este retificador é capaz de manter o barramento CC total controlado e as correntes de entrada senoidais, pois se comporta como três retificador monofásicos conectados. Porém, o ripple do barramento CC aumenta e há circulação de corrente no condutor neutro,  $i_n$  (Bueno and Pomilio, 2019).

Com cargas desequilibradas, o retificador PWM pode balancear as tensões dos barramentos simétricos utilizando uma malha de controle diferencial. Essa malha garante o balanço entre as tensões dos barramentos mesmo com o sistema operando com carga desbalanceada, como visto em Bueno and Pomilio (2018). Porém, implementar uma malha diferencial no controle do retificador PWM trifásico para solucionar os desbalanços do sistema acarreta na circulação de uma componente CC na corrente de neutro,  $i_n$ , da rede CA.

Tabela 1. Parâmetros do Retificador PWM

Parâmetro	Valor
Tensão de fase eficaz ( $V_e$ )	127 Vrms
Tensão CC do barramento total ( $V_{cc}$ )	380 V
Tensão CC de cada barramento ( $V_1 = V_2 = V_o$ )	190 V
Potência de saída ( $P_o$ )	25 kW
Resistência de carga ( $R_{o1}$ )	2,89 $\Omega$
Indutor de entrada CA ( $L_e$ )	350 $\mu$ H
Resistência do Indutor de entrada ( $R_L$ )	0,04 $\Omega$
Capacitância de saída ( $C=C_1=C_2$ )	22 mF
Frequência de chaveamento ( $f_{sret}$ )	15 kHz

O diagrama de blocos do controle do retificador é apresentada na figura 4.

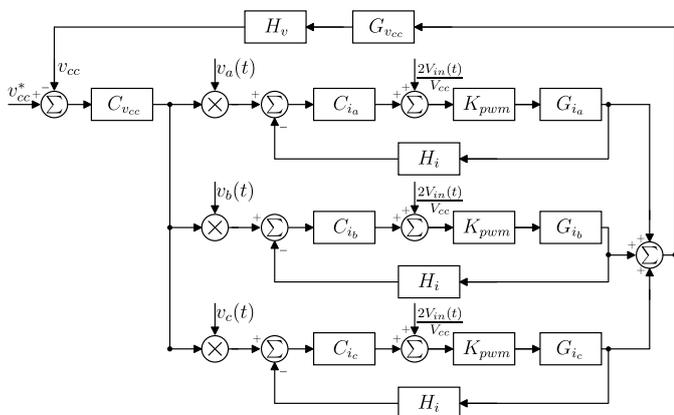


Figura 4. Diagrama de blocos de controle do retificador PWM.

O controle de corrente do sistema deve ser suficientemente rápido para compensar degraus de carga e perturbações

na tensão CA. A função de transferência que a corrente no indutor de entrada e a razão cíclica é descrita em (1) (Bueno and Pomilio, 2018).

$$G_{i_a}(s) = G_{i_b}(s) = G_{i_c}(s) = \frac{\hat{i}_{L_e}}{\hat{\delta}} = \frac{-2 \cdot V_o}{s \cdot L_e + R_L} \quad (1)$$

Determinou-se a frequência de corte do controlador de corrente em uma década abaixo da frequência de chaveamento, ou seja, em 1,5 kHz. A Equação (2) mostra um controlador proporcional-integral (PI) projetado para o sistema. A Tabela 5 mostra os parâmetros de controle do sistema.

$$C_i(s) = K_{p_{ret}} + \frac{K_{i_{ret}}}{s} \quad (2)$$

A função de transferência que relaciona a tensão total do barramento com a corrente de pico de entrada do sistema  $G_{v_{cc}}(s)$  está descrita em (3) (Bueno and Pomilio, 2018).

$$G_{v_{cc}}(s) = \frac{\hat{v}_t}{\hat{i}_p} = \frac{3 \cdot V_p}{2 \cdot V_{cc}} \frac{2 \cdot R_{o1}}{s \cdot R_{o1} \cdot C + 1} \quad (3)$$

O controle de tensão do barramento total é feito por um controlador um PI, com uma frequência de corte de 300 Hz e margem de fase de 90°. A Tabela 5 mostra os parâmetros de controle do sistema.

## 2.2 Balanceador de Tensão

A Figura 3 mostra o circuito auxiliar para balanceamento das tensões derivado de um conversor *Cuk* (Rivera et al., 2021) (Wang et al., 2017). O balanceador de tensão *Cuk* consiste no par de chaves  $S_7$  e  $S_8$ , dois indutores  $L_b$  e o capacitor  $C_b$ . O balanceador fornece um caminho para a corrente de neutro durante eventuais desbalanços de carga. O balanceador de tensão lida com a corrente do indutor para garantir que a tensão no ponto neutro seja equilibrada. Portanto, a componente CC na corrente de neutro é zero mesmo com cargas desbalanceadas. Outras topologias de balanceadores de tensão e redistribuidores de corrente podem ser usadas para garantir o balanceamento das tensões do barramento bipolar (Dragičević et al., 2016b) (Dias et al., 2021) (Bueno, 2018).

O balanceador de tensão tem como função manter as tensões positiva e negativa iguais. O uso de uma conexão *totem pole* para os interruptores é interessante por ser padrão nas montagens dos conversores. Além disso, o balanceamento exige uma característica *buck-boost* do conversor. Com razão cíclica de 50%, mesmo em malha aberta, as tensões em cada polo serão iguais (Wang et al., 2017) (Dragičević et al., 2016b). Tal conjunto de propriedades é comum tanto ao conversor abaixador-elevador de tensão (Dias et al., 2022) quanto ao conversor *Cuk*. A diferença operacional entre os conversores é que o *Cuk* possui dois indutores, um em cada barramento, o que colabora com a redução de circulação de correntes pulsadas pelo circuito. A Tabela 2 mostra as especificações do balanceador de tensão.

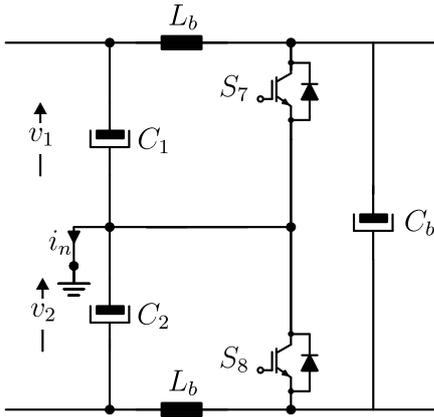


Figura 5. Balanceador de tensão Cuk.

Tabela 2. Parâmetros do balanceador de tensão

Parâmetro	Valor
Tensão CC do barramento total ( $V_{cc}$ )	380 V
Tensão CC de cada barramento ( $V_1 = V_2 = V_o$ )	190 V
Indutores ( $L_b$ )	350 $\mu$ H
Resistência do Indutor ( $R_{Lb}$ )	0,04 $\Omega$
Capacitor ( $C_b$ )	22 mF
Frequência de chaveamento ( $f_{sb}$ )	15 kHz

### 2.3 Conversores CC-CC

Conversores CC-CC são conectados à microrrede, os conversores conectados são um conversor do tipo *buck* e um do tipo *boost*.

**Conversor CC-CC Boost** - O conversor CC-CC do tipo *boost* está conectado no barramento positivo da microrrede CC, portanto, possui tensão de entrada de 190 V. A potência demandada por este conversor é de 10 kW e sua tensão de saída igual a 540 V. As especificações e parâmetros deste conversor são mostrados na Tabela 3 e seu circuito de potência pode ser visto na Figura 6.

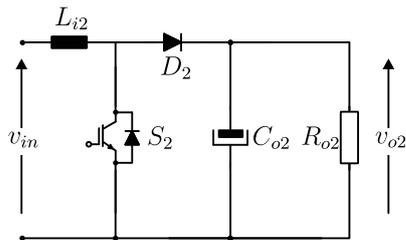


Figura 6. Conversor CC-CC boost.

Tabela 3. Parâmetros do conversor boost

Parâmetro	Valor
Tensão de entrada ( $V_{in}$ )	190 V
Tensão de saída ( $V_{o2}$ )	540 V
Potência de entrada ( $P_{in}$ )	10 kW
Ondulação de corrente ( $\Delta_{iL}$ )	10%
Ondulação de tensão ( $\Delta_v$ )	1%
Razão cíclica ( $\delta$ )	0,6481
Resistência de carga ( $R_{o2}$ )	29,16 $\Omega$
Indutor ( $L_{i2}$ )	1,2 mH
Capacitor ( $C_{o2}$ )	300 $\mu$ F
Frequência de chaveamento ( $f_{sboost}$ )	20 kHz

A função de transferência que relaciona a tensão de saída e a razão cíclica do conversor *boost* possui característica

de fase não-mínima. Essa característica resulta em um sistema de malha aberta com um zero no semi-plano direito. Dessa forma, projetou-se um controlador com duas malhas em cascata, sendo a malha interna a de corrente no indutor e a externa a de tensão de saída. A Figura 7 mostra o diagrama de blocos de controle do conversor *boost*.

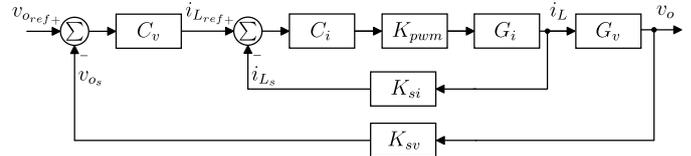


Figura 7. Diagrama de blocos de controle do conversor boost

A função de transferência que relaciona a corrente no indutor de entrada com a razão cíclica é mostrada em (4).

$$G_{i_{boost}}(s) = \frac{\hat{i}_L}{\hat{\delta}} = \frac{V_{in}}{s \cdot L_{in}} \quad (4)$$

Para a malha de corrente, foi projetado um controlador no domínio da frequência do tipo PI com as especificações de margem de fase igual a 90° e frequência de cruzamento igual a uma década abaixo da frequência de chaveamento,  $f_{ci} = 2000$  Hz. A Tabela 5 mostra os parâmetros de controle do sistema.

A função de transferência que relaciona a tensão de saída e a corrente do indutor de entrada é mostrada em (5).

$$G_{v_{boost}}(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{i}_L} = \frac{R_{o2} \cdot D}{s \cdot R_{o2} \cdot C_{o2} + 1} \quad (5)$$

Para a malha de tensão, foi projetado um controlador no domínio da frequência do tipo PI com as especificações de margem de fase igual a 75° e frequência de cruzamento igual a uma década abaixo da frequência de chaveamento,  $f_{cv} = 100$  Hz. A Tabela 5 mostra os parâmetros de controle do sistema.

**Conversor CC-CC Buck** - O conversor CC-CC do tipo *buck* está conectado ao barramento negativo da microrrede CC, portanto, possui uma tensão de entrada de 190 V. A potência demandada por este conversor é de 10 kW e sua tensão de saída é igual a 48 V. As especificações e parâmetros são mostradas na Tabela 4 e seu circuito de potência pode ser visto na Figura 8.

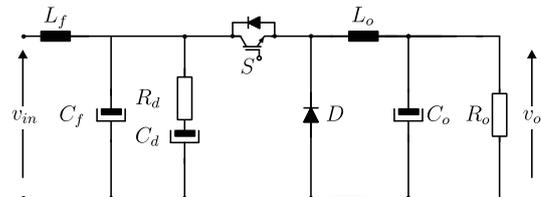


Figura 8. Conversor CC-CC Buck com filtro LC de entrada.

Um filtro LC de entrada é necessário devido à corrente de entrada pulsada, a qual é uma característica do conversor CC-CC *buck*. O filtro LC altera a resposta dinâmica do conversor e o sistema de controle pode se tornar

Tabela 4. Parâmetros do conversor *buck*

Parâmetro	Valor
Tensão de entrada ( $V_{in}$ )	190 V
Tensão de saída ( $V_o$ )	48 V
Potência de entrada ( $P_{in}$ )	10 kW
Ondulação de corrente ( $\Delta i_L$ )	10%
Ondulação de tensão ( $\Delta v$ )	1%
Razão cíclica ( $\delta$ )	0,2526
Resistência de carga ( $R_o$ )	0,2324 $\Omega$
Indutor ( $L_o$ )	86,09 $\mu$ H
Capacitor ( $C_o$ )	300 $\mu$ F
Indutor do filtro de entrada ( $L_f$ )	135 $\mu$ H
Capacitor do filtro de entrada ( $C_f$ )	47 $\mu$ F
Capacitor do ramo de amortecimento ( $C_d$ )	235 $\mu$ F
Resistência do ramo de amortecimento ( $R_d$ )	1 $\Omega$
Frequência de chaveamento ( $f_{sbuck}$ )	20 kHz

instável. Uma solução prática é apresentada em Erickson and Maksimović (2001) que utiliza o ramo  $R_d C_d$  para amortecer a ressonância do filtro LC de entrada. Tal ramo de amortecimento utiliza um capacitor de bloqueio,  $C_{db}$ , em série com um resistor de amortecimento,  $R_{db}$ . Em regime permanente, as perdas no ramo de amortecimento são nulas, pois nenhuma corrente CC flui através do mesmo.

A Figura 9 mostra o diagrama de blocos para o controle da saída do conversor CC-CC *buck*.

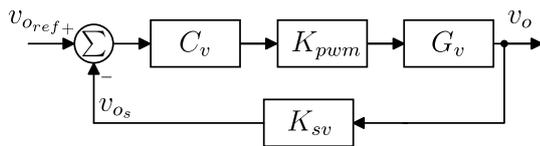


Figura 9. Diagrama de blocos de controle do conversor *buck*.

A função de transferência que relaciona a tensão de saída e a razão cíclica é mostrada em (6).

$$G_{vbuck}(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{\delta}} = \frac{V_{in}}{s^2 \cdot L_o \cdot C_o + s \cdot (L_o/R_o) + 1} \quad (6)$$

Para a malha de tensão, foi projetado um controlador no domínio da frequência do tipo PI com as especificações de margem de fase igual a  $75^\circ$  e frequência de cruzamento igual a uma década abaixo da frequência de chaveamento,  $f_{cv} = 500$  Hz. A Tabela 5 mostra os parâmetros de controle do sistema.

### 3. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para verificar o balanceamento de tensão da microrrede CC, foram realizadas as simulações a seguir.

#### 3.1 Inclusão de balanceador de tensão: análise em regime permanente

Inicialmente, a Figura 10 mostra a resposta de ambos os conversores CC-CC em regime permanente, com potências idênticas (10 kW) e sem a conexão do balanceador de tensão. Observa-se que as tensões de saída dos conversores CC-CC seguem suas referências durante todo o tempo de simulação (2 s), apesar da tendência do conversor *buck* à instabilidade. Nota-se que, apesar de ambos conversores

Tabela 5. Parâmetros dos Controladores.

Retificador PWM	
Parâmetro	Valor
Ganho proporcional de corrente ( $K_{p_{ret}}$ )	-0,0084683
Ganho integral de corrente ( $K_{i_{ret}}$ )	-0,9823228
Ganho proporcional de tensão ( $K_{p_{vcc}}$ )	11,447
Ganho integral de tensão ( $K_{i_{vcc}}$ )	213,94
Conversor Boost	
Parâmetro	Valor
Ganho proporcional de corrente ( $K_{p_{boost}}$ )	0,077364
Ganho integral de corrente ( $K_{i_{boost}}$ )	17,006
Ganho proporcional de tensão ( $K_{p2_{boost}}$ )	0,098671
Ganho integral de tensão ( $K_{i2_{boost}}$ )	51,032
Conversor Buck	
Parâmetro	Valor
Ganho proporcional de tensão ( $K_{p_{buck}}$ )	0,0052926
Ganho integral de tensão ( $K_{i_{buck}}$ )	18,43

operarem em 10 kW, há a divergência de tensão. As tensões do barramento CC divergem do valor de referência de 190 V, resultando em o valor do barramento total não mais permanecer em 380 V.

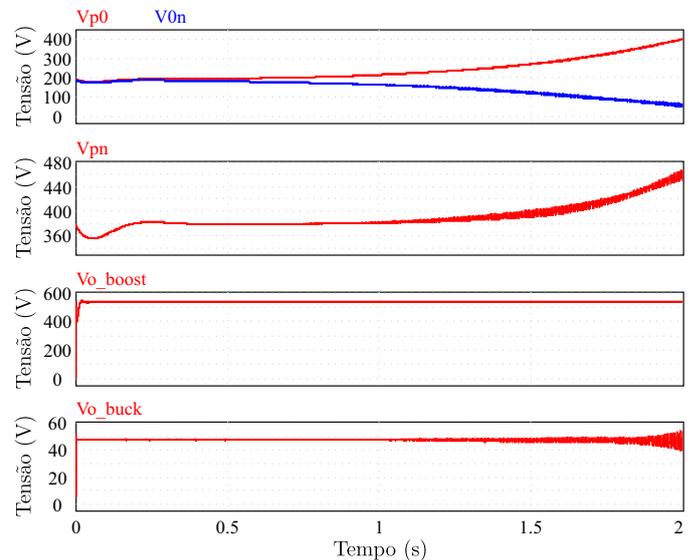


Figura 10. Microrrede CC com um conversor *boost* e um conversor *buck* conectados e sem balanceador de tensão. Tensões dos barramentos CC (cima), tensão total do barramento CC (meio) e tensões de saída dos conversores CC-CC *boost* e *buck* (baixo).

A Figura 11 mostra a resposta de ambos os conversores em regime permanente, com potências idênticas (10 kW) e com a conexão do balanceador de tensão na microrrede CC. Observa-se que as tensões de saída dos conversores CC-CC seguem suas referências durante todo o tempo de simulação (2 s). O balanceador de tensão garante o balanceamento das tensões simétricas do barramento da microrrede CC. As tensões do barramento CC convergem para o valor de referência de 190 V, fazendo com que o valor do barramento total permaneça em 380 V.

#### 3.2 Sistema com balanceador de tensão: resposta dinâmica

A Figura 12 mostra a aplicação de degraus de carga nos conversores CC-CC em diferentes intervalos de tempo. Inicialmente, ambos os conversores CC-CC demandam

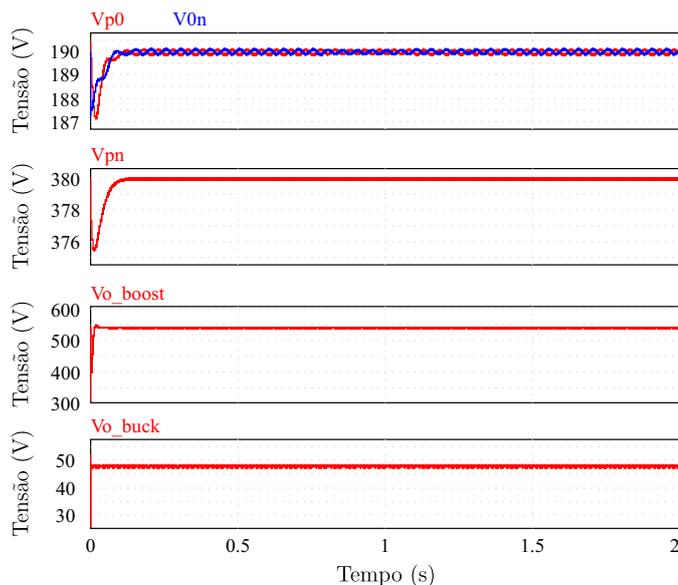


Figura 11. Microrrede CC com um conversor *boost* e um conversor *buck* conectados e com balanceador de tensão. Tensões dos barramentos CC (cima), tensão total do barramento CC (meio) e tensões de saída dos conversores CC-CC *boost* e *buck* (baixo)

10 kW de potência da rede CC. Em  $t = 0,3$  s um degrau de carga é aplicado no conversor *buck* e sua potência reduz para 5 kW, causando um desbalanço de potência nos barramentos CC. Nesse momento o conversor *boost* permanece operando em 10 kW. Em  $t = 0,6$  s um degrau de carga é aplicado no conversor *boost* e sua potência reduz de 10 kW para 5 kW, fazendo com que os conversores CC-CC operem com a mesma potência (5 kW). Em  $t = 1,2$  s outro degrau de carga é aplicado no conversor *buck* e sua potência volta para o valor nominal de 10 kW, causando um novo desbalanço de potência nos barramentos CC. Por fim, em  $t = 1,6$  s, o conversor *boost* volta a operar em seu valor nominal de potência, fazendo com que os conversores operem novamente com valores idênticos de potência (10 kW). A Figura 12 mostra que o balanceador de tensão *Cuk* mantém a tensão diferencial regulada ante as variações de potência das cargas e o desbalanço de potências no barramento bipolar. A resposta dinâmica do sistema é suficientemente rápida e as tensões nos barramentos CC convergem para o valor de 190 V, mantendo a tensão total do barramento em 380 V.

#### 4. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou o balanceamento das tensões de uma microrrede CC bipolar formada por um retificador PWM trifásico bidirecional a quatro fios. Para verificar a resposta do balanceador de tensão *Cuk*, diferentes cenários foram simulados. O primeiro cenário apresentou os conversores CC-CC operando em regime permanente, sem adição de distúrbios, com potências idênticas, com e sem a conexão do balanceador de tensão. Os resultados obtidos em regime mostraram que, quando não há a conexão do balanceador, o valor das tensões dos barramentos CC diverge de 190 V, o que afeta diretamente o valor da tensão total do barramento CC, que tendeu a instabilidade. Além disso, os conversores CC-CC apresentaram respostas dife-

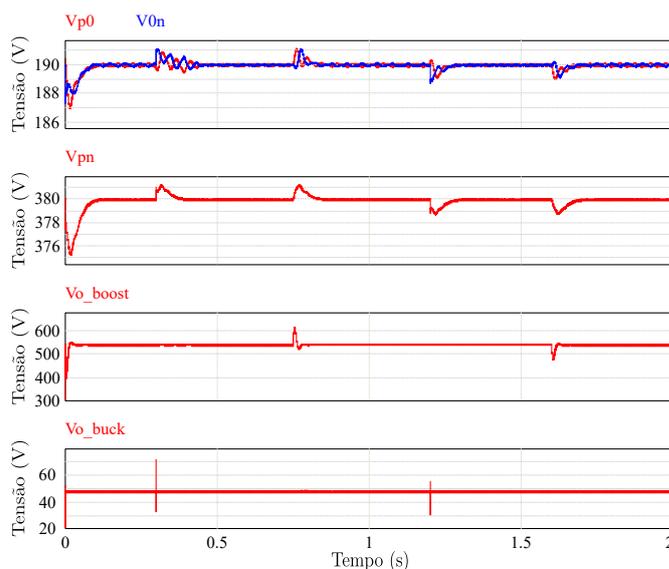


Figura 12. Aplicação de degrau de carga em microrrede CC com dois conversores CC-CC, um *boost* e um *buck*, conectados e com balanceador *Cuk*. Tensões dos barramentos CC (cima), tensão total do barramento CC (meio) e tensões de saída dos conversores *boost* e *buck* (baixo).

rentes, visto que o conversor *buck* tendeu a instabilidade, enquanto que o conversor *boost* se manteve em seu valor nominal de tensão de saída. Com a conexão do balanceador de tensão, as tensões do barramento CC não divergem de 190 V, e a tensão total do barramento se mantém em 380 V. O cenário seguinte analisou os conversores CC-CC operando em diferentes valores de potência, em diferentes intervalos de tempo e com a conexão do balanceador de tensão *Cuk*. Os resultados para esse cenário mostraram que o balanceador mantém as tensões do barramento bipolar equilibradas ante aos desbalanços de potência, resultando na operação estável da microrrede CC.

#### REFERÊNCIAS

- Bueno, A.G. (2018). *Retificador pwm trifásico a quatro fios com alto fator de potência*. Master's thesis, School of Electrical and Computer Engineering of the University of Campinas.
- Bueno, A.G. and Pomilio, J.A. (2018). Balancing voltage in the dc bus with split capacitors in three-phase four-wire pwm boost rectifier. In *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 523–529. doi:10.1109/INDUSCON.2018.8627210.
- Bueno, A.G. and Pomilio, J.A. (2019). Three-phase, four-wire pwm rectifier applied to variable frequency ac systems in airplane electric grid under fault conditions. In *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 1–6. doi:10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065795.
- Dias, M.P., Damasceno, D.P., Ota, J.I.Y., and Pomilio, J.A. (2022). “Analysis of the Bipolar Voltage Bus Balancing of a DC Microgrid with Bidirectional Converters”. In *IECON 2022 - 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society - accepted for publication*.

- Dias, M.P., Ota, J.I.Y., and Pomilio, J.A. (2021). Dc current redistributor for compensating unbalanced loads and interfacing energy storage systems in more electrical aircraft. In *2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, 1–6. doi:10.1109/SPEC52827.2021.9709471.
- Dragičević, T., Lu, X., Vasquez, J.C., and Guerrero, J.M. (2016a). Dc microgrids—part i: A review of control strategies and stabilization techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(7), 4876–4891. doi:10.1109/TPEL.2015.2478859.
- Dragičević, T., Lu, X., Vasquez, J.C., and Guerrero, J.M. (2016b). Dc microgrids—part ii: A review of power architectures, applications, and standardization issues. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(5), 3528–3549. doi:10.1109/TPEL.2015.2464277.
- Erickson, R.W. and Maksimović, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics*. Springer New York, NY, 2 edition.
- Hatziargyriou, N., Asano, H., Iravani, R., and Marnay, C. (2007). Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(4), 78–94. doi:10.1109/MPAE.2007.376583.
- IEC (2017). Electricity access - more than a promise: LvdC. briefing paper. <https://www.iec.ch/basecamp/electricity-access-more-promise-lvdc>.
- Ota, J.I.Y. and Pomilio, J.A. (2020). Labrei: Ambiente experimental para pesquisas interdisciplinares e formação de recursos humanos em redes inteligentes de energia elétrica. In *VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*.
- Pomilio, J.A., Ota, J.I.Y., Lopez-Amezquita, J.C., Ferreira, D.A., and Quadros, R. (2021). *Projeto Merge: Microrredes Eficientes, Resilientes e Sustentáveis*. Synergia. Capítulo do livro Campus Sustentável: um modelo de inovação em gestão energética para a América Latina e o Caribe, 227-240.
- Rivera, S., Lizana F., R., Kouro, S., Dragičević, T., and Wu, B. (2021). Bipolar dc power conversion: State-of-the-art and emerging technologies. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(2), 1192–1204. doi:10.1109/JESTPE.2020.2980994.
- Wang, F., Lei, Z., Xu, X., and Shu, X. (2017). Topology deduction and analysis of voltage balancers for dc microgrid. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 5(2), 672–680. doi:10.1109/JESTPE.2016.2638959.