

Received March 30, 2024; accepted June 13, 2024; Date of publication June 29, 2024.
The review of this paper was arranged by Associate Editor Allan F. Cupertino and Editor-in-Chief Heverton A. Pereira.

Digital Object Identifier <http://doi.org/10.18618/REP.2005.1.053061>

Estudo e Implementação de Controle Secundário em Microrredes CC

Juliana C. Neves¹, Rafaela D. Silveira¹, Sérgio A. Oliveira da Silva¹,
Leonardo P. Sampaio¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica, Cornélio Procopio – PR, Brasil.

e-mail: juliana_cunhaneves@hotmail.com, rafaeladsilveira@hotmail.com, augus@utfpr.edu.br, sampaio@utfpr.edu.br

RESUMO Este trabalho visa no estudo de microrredes CC, devido à crescente utilização de fontes alternativas e renováveis de energia capazes de gerar eletricidade em CC. As microrredes podem ser gerenciadas por uma estrutura hierárquica de controle com ênfase no controle secundário, integrando sistemas de geração distribuída e de armazenamento de energia, bem como cargas genéricas. O controle secundário desempenha funções cruciais de compartilhamento de potência/corrente e regulação da tensão CC no barramento da microrrede. Uma questão essencial abordada neste trabalho é a implementação de uma rede de comunicação entre os conversores que compõem a microrrede CC. Desta forma, este estudo propõe uma abordagem distribuída para o compartilhamento de potência/corrente, melhorando a eficiência de distribuição de alocação de potência e operação da microrrede. O estudo também avalia duas topologias, em anel e linha, de redes de comunicação. Como consequência, os resultados obtidos validaram a estratégia de controle secundário proposta para microrredes CC, bem como concluiu-se que a configuração de comunicação em anel demonstrou maior robustez em comparação à topologia em linha. Tais resultados foram obtidos através de simulações computacionais e testes experimentais, os quais incluíram variações de carga, distúrbios e falhas de comunicação.

PALAVRAS-CHAVE Controle Hierárquico, Controle Secundário, Compartilhamento de Corrente/Potência, Microrrede CC, Rede de Comunicação.

Study and Implementation of Secondary Control in DC Microgrids

ABSTRACT This work aims to study DC microgrids, due to the increasing use of alternative and renewable energy sources capable of generating electricity in DC. Microgrids can be managed by a hierarchical control structure emphasizing secondary control, integrating distributed generation and energy storage systems and generic loads. Secondary control performs crucial power/current sharing functions and DC voltage regulation on the microgrid bus. An essential issue addressed in this work is implementing a communication network between the converters that make up the DC microgrid. Therefore, this study proposes a distributed approach for power/current sharing, improving the distribution efficiency of power allocation and microgrid operation. The study also evaluates two topologies, ring and line, of communication networks. As a consequence, the results obtained validated the proposed secondary control strategy for DC microgrids and concluded that the ring communication configuration demonstrated greater robustness compared to line one. Such results were obtained through computer simulations and experimental tests, which included load variations, disturbances, and communication failures.

KEYWORDS Communication Networks, DC microgrids, Hierarchical Control, Power/Current Sharing, Secondary Control.

I. INTRODUÇÃO

A expansão da geração distribuída (GD) e a integração de tecnologias de informação no sistema elétrico estão transformando a dinâmica de produção e consumo de energia elétrica. No cenário atual, marcado por crescentes desafios na infraestrutura elétrica, as microrredes surgem como uma solução inovadora e viável. Esses sistemas elétricos, dotados de recursos distribuídos, têm a capacidade de operar de maneira coordenada com a rede principal ou de forma independente, ou seja, sem a necessidade da rede convencional em CA [1]-[3]

As microrredes podem funcionar em CC, CA ou de maneira híbrida, sendo que as microrredes CC apresentam vantagens, como a não necessidade de regulação de frequência, ajuste de ângulo de fase, bem como possui eficiência geralmente superior em comparação às microrredes CA [4]-[6].

Apesar das vantagens, as microrredes CC enfrentam desafios associados ao controle e gerenciamento de energia.

Na literatura, destaca-se o método hierárquico de controle proposto em [7], que utiliza camadas para implementar diferentes técnicas em cada nível. A adoção de uma estrutura hierárquica de controle em microrredes torna-se atrativa devido à sua capacidade de garantir operação estável e eficaz,

permitindo o compartilhamento eficiente de potência entre as fontes geradoras. Essa abordagem compreende três níveis de controle, como ilustrado na Figura 1 e descrito a seguir:

Controle primário: Encarregado de ajustar os parâmetros locais de potência, tensão e corrente. Além disso, este nível também visa atuar no compartilhamento de carga e a regulação da tensão e corrente de cada conversor estático.

Controle secundário: Responsável por mitigar desvios de tensão e realizar ajustes no compartilhamento de potência/corrente.

Controle terciário: Encarregado pela troca de fluxo de energia. Também desempenha funções de otimização e operação econômica, além de análise de tarifas de mercado de energia e negociação de fluxo de potência entre a microrrede CC e a rede elétrica da concessionária.

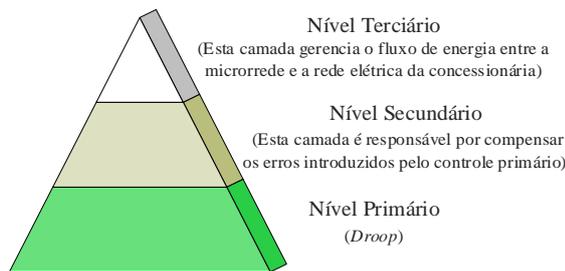


FIGURA 1. Níveis de controle hierárquico de uma microrrede CC.

Quando se trata em controle hierárquico em nível primário, o emprego do método de controle por droop tem sido uma abordagem comumente utilizada [8]-[9]. Apesar de oferecer um compartilhamento proporcional de corrente, este método introduz desvios de tensão e erros no compartilhamento de potência [10]. Para corrigir tais desvios, os quais são relacionados ao compartilhamento de potência, surgem duas abordagens, sendo elas: ajuste dos coeficientes de droop, conhecido como slope adjusting, e adição da correção de tensão, conhecido por voltage shifting. Tais abordagens estão relacionadas ao controle em nível secundário.

Diversas propostas de controle secundário têm como objetivo aprimorar o compartilhamento de corrente/potência em microrredes. Em [11] é introduzida a técnica de voltage shifting para otimizar simultaneamente o compartilhamento de corrente e a restauração da tensão no barramento, utilizando comunicação de baixa largura de banda. Sua principal desvantagem é a susceptibilidade a falhas de comunicação e a complexidade dos cálculos necessários. Já em [12] é destacada a interação entre controladores para estabelecer o valor médio das correntes dos conversores. No entanto, essa abordagem apresenta desafios na coordenação contínua entre múltiplos controladores, o que pode ser especialmente complicado em sistemas maiores. Além disso, também requer uma rede de comunicação confiável para coordenar os controladores de maneira eficaz. Outras abordagens têm adotado o ajuste do coeficiente droop através do slope adjusting que oferece um controle adaptativo e preciso do compartilhamento de potência. A combinação de controle distribuído e descentralizado nesta abordagem, aumenta a robustez e flexibilidade do sistema. Contudo, essa complexidade adicional de implementação e a necessidade de monitoramento contínuo dos parâmetros do sistema podem

representar desafios significativos [13]. Neste contexto, existe também estratégias baseadas em sistemas multiagentes [14], os quais visam otimizar o controle de forma adaptativa com foco na redução de custos operacionais. A natureza distribuída dos sistemas multiagentes facilita a escalabilidade, permitindo acomodar mais fontes e cargas. No entanto, essa abordagem pode exigir maior poder computacional e algoritmos sofisticados para a coordenação entre agentes, além de, como em outras abordagens, ser dependente de uma rede de comunicação robusta e sincronizada. Estas propostas têm como foco a melhoria do compartilhamento de corrente e a estabilidade do sistema elétrico.

Neste trabalho é proposto e validado experimentalmente uma configuração de microrrede CC que incorpora redes de comunicação no controle secundário, utilizando uma nova estratégia para o compartilhamento de corrente/potência com abordagem hierárquica. A finalidade dessa estratégia é viabilizar uma distribuição precisa de potência, baseada em taxas de alocação predefinidas. Ainda, este trabalho visa explorar e comparar duas topologias de rede de comunicação empregando a técnica de compartilhamento proposta.

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as características principais de algumas estratégias de controle secundário encontradas na literatura que se utilizam do ajuste do coeficiente de droop, em relação à abordagem proposta neste trabalho, a qual se destaca por possibilitar uma definição mais precisa da contribuição no compartilhamento de corrente/potência.

TABELA 1. Comparação de estratégia de controle secundário para microrrede CC utilizando ajuste de coeficiente

Proposta	Informação compartilhada	Comunicação entre os conversores	Definição de Proporção de Potência
[15]	Tensão, Tensão Dinâmica Média e Corrente	Todos	Não
[16]	Tensão, corrente e coeficiente de droop	Todos	Não
[17]	Potência	Vizinhos	Não
[18]	Corrente e Tensão	Todos	Não
[19]	Corrente e Tensão	Vizinhos	Não
Proposta	Potência	Vizinhos	Sim

Neste trabalho, o ambiente de simulação Matlab® Simulink com a toolbox TrueTime é usado para desenvolver as redes de comunicação em tempo real. A validação via simulação é conduzida por meio de uma análise de desempenho em diversos cenários de perturbação da rede e falhas de comunicação.

Este trabalho está dividido como segue: A Seção II descreve o conceito do controle hierárquico, enquanto o desenvolvimento das estratégias de controle é realizado na Seção III. Na Seção IV são apresentadas tanto as estruturas de topologias de microrrede CC quanto das redes de comunicação exploradas neste trabalho. Na Seção V são mostrados e discutidos os resultados obtidos via simulações computacionais e testes experimentais. Por fim, as conclusões são apresentadas na Seção VI.

II. CONTROLE HIERÁRQUICO

A. CONTROLE EM NÍVEL PRIMÁRIO

O controle primário se destaca ao adotar uma abordagem descentralizada através do controle por droop, alcançando um equilíbrio entre eficiência de custo e estabilidade. A estratégia de droop atua na modificação da tensão de referência do controlador local de cada conversor, garantindo um compartilhamento proporcional de corrente e preservando o equilíbrio desejado entre os conversores conectados à microrrede [20]. Em termos gerais, a representação formal da estratégia de controle por droop de tensão é expressa por:

$$V_{oj}^* = V_{MG}^* - R_{Dj} i_{oj} \quad (1)$$

onde V_{oj}^* é a referência de tensão para o controle local do conversor j da microrrede; R_{Dj} é a resistência virtual de *droop* para o conversor j da microrrede; i_{oj} é corrente de saída do conversor j ; e V_{MG}^* é a tensão nominal de referência do barramento CC.

Com base em (1), a representação do conceito de emulação da impedância virtual na saída do conversor é demonstrada na Figura 2, através de sua implementação na malha de controle.

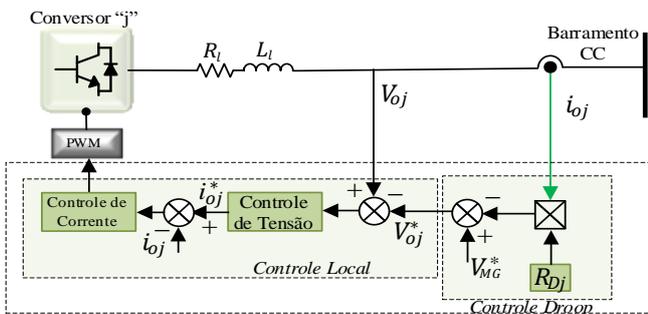


FIGURA 2. Diagrama típico do controle por droop.

B. CONTROLE EM NÍVEL SECUNDÁRIO

1) Desvio de tensão no barramento CC

Para contrabalançar as variações de tensão no barramento CC originadas pelo controle de droop no nível primário, a metodologia proposta em [11] introduz uma estratégia de controle secundário com centralização. Este controle incorpora o termo δV_{oj} em (1), como descrito a seguir:

$$V_{oj}^* = V_{MG}^* + \delta V_{oj} - R_{Dj} i_{oj} \quad (2)$$

onde δV_{oj} representa o ajuste para correção do desvio de tensão para todos os conversores.

Entretanto, corrigir as variações de tensão pode não assegurar a redução de erros no compartilhamento de corrente/potência à carga, uma vez que o termo de compensação de tensão é aplicado de maneira uniforme a todos os conversores.

2) Compartilhamento de potência/corrente

A técnica *voltage shifting* pode ser vista na Figura 3, a qual adiciona de um termo de correção de tensão δv_{oj} para ajustar a referência de tensão de cada conversor [11], como segue:

$$V_{oj}^* = V_{MG}^* + \delta V_{oj} + \delta v_{oj} - R_{Dj} i_{oj} \quad (3)$$

Nesse contexto, a abordagem baseada no *slope adjusting* tem a finalidade de compensar as resistências virtuais dos conversores adicionando um termo δR_{Dj} a R_{Dj} , como segue:

$$V_{oj}^* = V_{MG}^* + \delta V_{oj} - (\delta R_{Dj} + R_{Dj}) i_{oj} \quad (4)$$

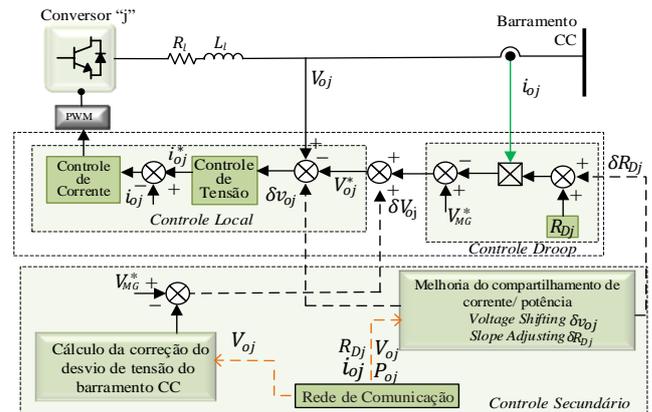


FIGURA 3. Diagrama de blocos do controle secundário de uma microrrede CC.

III. DESENVOLVIMENTO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE SECUNDÁRIO

A estratégia de implementação do controle no nível secundário é feita de maneira distribuída. O objetivo dessa nova abordagem é aprimorar o compartilhamento de potência e corrigir variações de tensão no barramento CC, resultantes do controle por *droop* na microrrede, por meio da troca de informações entre conversores adjacentes. Essa troca de informações possibilita a adaptação dos coeficientes de *droop* e a correção dos desvios de tensão. O esquema de controle secundário, visto na Figura 4, inova ao estabelecer proporções específicas de potência para cada conversor na microrrede.

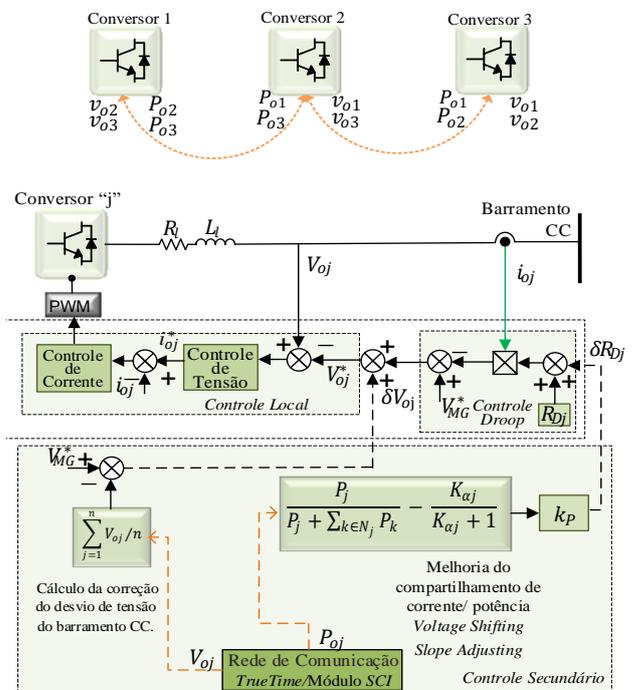


FIGURA 4. Diagrama em blocos associado ao princípio de funcionamento do controle proposto para o compartilhamento de corrente/potência.

A estratégia adotada é alcançada por meio da comunicação e troca de informações da potência de saída de cada conversor, priorizando a gestão eficiente da potência e

garantindo uma alocação precisa de recursos elétricos, mantendo o equilíbrio desejado entre os conversores que compõem a microrrede.

A. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CONTROLE PROPOSTO PARA O COMPARTILHAMENTO DE CORRENTE/POTÊNCIA

O método proposto busca ajustar a potência de cada conversor conectado ao barramento CC da microrrede, ajustando os valores das resistências de *droop*, com o objetivo de alcançar um compartilhamento desejado de potência.

Para isso, é estabelecida uma troca de informações entre os conversores vizinhos por meio de uma rede de comunicação, permitindo o compartilhamento de informações a respeito da potência e tensão entre os conversores. Com base nessa comunicação, o cálculo para o ajuste do coeficiente de *droop* pode ser devidamente realizado.

O objetivo dessa estratégia é ajustar o coeficiente *droop* para o conversor j . Este ajuste leva em consideração a diferença entre dois termos conforme descrito em (5). O primeiro termo é formado por uma relação entre a potência atual fornecida pelo conversor j e potência total fornecida por cada conversor. Já o segundo termo utiliza as alocações de potência descrita por $K_{\alpha_j} P_T$, sendo estes os valores ideais de potência que devem ser apresentados tanto para o conversor j quanto para os demais conversores. O objetivo principal é fazer com que a diferença entre os termos seja nula.

$$\delta R_{Dj} = K_P \left(\frac{P_j}{P_j + \sum_{k \in N_j} P_k} - \frac{K_{\alpha_j} P_T}{K_{\alpha_j} P_T + P_T} \right) \quad (5)$$

Com base em (5) P_j é a potência de saída do conversor j ; P_k é a potência de saída do conversor k ; P_T é potência total; δR_{Dj} é a ajuste da resistência de *droop* do conversor j ; K_P é o ganho de ajuste de tempo do compartilhamento de potência; e K_{α_j} representa a variável de alocação da potência do conversor j .

A variável responsável pela alocação de potência K_{α_j} para o conversor j , situa-se entre 0 e $n/(n+1)$, onde n é número de conversores formadores de rede.

A Equação (5) pode ser reescrita por:

$$\delta R_{Dj} = K_P \left(\frac{P_j}{P_j + \sum_{k \in N_j} P_k} - \alpha_j \right) \quad (6)$$

onde a variável $\alpha_j = K_{\alpha_j}/(K_{\alpha_j} + 1)$ é definida como fator de alocação de potência, a qual descreve a proporção da potência gerada pelo conversor j em relação à potência total compartilhada, considerando o ajuste específico determinado pelo parâmetro K_{α_j} .

Sendo assim, a estratégia de controle proposta consiste em atingir a convergência quando houver o equilíbrio do valor desejado, ou seja:

$$\frac{P_j}{P_j + \sum_{k \in N_j} P_k} = \alpha_j = \frac{K_{\alpha_j}}{K_{\alpha_j} + 1} \quad (7)$$

B. CONTROLE DOS DESVIOS DE TENSÃO DO BARRAMENTO CC

A metodologia utilizada implica na comparação entre a referência de tensão do barramento CC e a média das tensões

de saída dos conversores adjacentes conectados ao mesmo barramento. Esta comparação leva à criação de um termo de compensação identificado por δV_{oj} , o qual é definido por:

$$\delta V_{oj} = V_{MG}^* - \sum_{j=1}^n \left(\frac{V_{oj}}{n} \right) \quad (8)$$

A equação que representa essa abordagem é dada por:

$$V_{oj}^* = V_{MG}^* + \delta V_{oj} - R_{Dj} i_{oj} \quad (9)$$

Essa abordagem de cálculo do termo de compensação δV_{oj} contribui para a correção eficaz do desvio de tensão no barramento CC, garantindo a operação estável e balanceada dos conversores na microrrede.

IV. MICRORREDE CC

A. ESTRUTURA DA TOPOLOGIA DA MICRORREDE CC EM ESTUDO

A topologia adotada da microrrede CC neste trabalho está representada na Figura 5. Com configuração radial de barramento único, a microrrede é composta por dois conversores boost voltage-mode (VM-BC), os quais são alimentados por fontes CC, além de um conversor de interface de rede, grid-interface (G-IC), empregado para injetar ou drenar energia da rede CA. Além de serem controlados por *droop* no controle primário, todos os conversores desempenham o papel de formadores de rede, contribuindo para controlar a tensão no sistema.

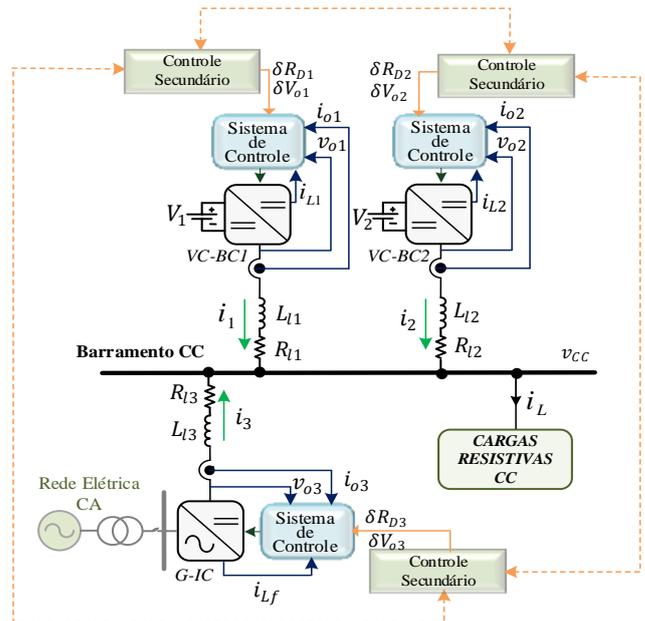


FIGURA 5. Configuração da microrrede CC em estudo.

B. CONTROLE DOS DESVIOS DE TENSÃO DO BARRAMENTO CC

Este trabalho aborda duas topologias de rede de comunicação empregadas para o controle secundário. A primeira em linha está mostrada na Figura 6(a), enquanto a segunda, em anel, está apresentada na Figura 6(b). A topologia em linha tem dispositivos conectados em uma única linha, enquanto a topologia em anel forma um caminho fechado, condição que oferece robustez a falhas individuais e facilita a adição/remoção de dispositivos.

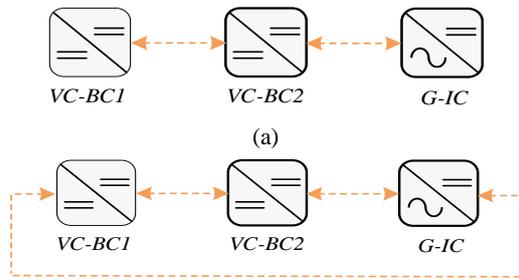


FIGURA 6. Topologias de redes de comunicação. (a) em linha; (b) anel.

C. DESENVOLVIMENTO DA REDE DE COMUNICAÇÃO EXPERIMENTAL

Na implementação de uma microrrede, a escolha das características do sistema de comunicação é crucial para a eficiência e confiabilidade da transmissão de dados e controle dos dispositivos. Optou-se por uma comunicação com fios trançados entre os conversores da microrrede CC, priorizando a segurança na troca de dados, apesar do custo de instalação mais elevado em comparação com a comunicação sem fio. A utilização de cabos físicos é comum nessas aplicações devido ao bom custo-benefício, alta velocidade de transmissão e baixa latência, atendendo aos requisitos essenciais. O protocolo de comunicação empregado na microrrede CC em estudo é o UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) que faz uso do módulo de Interface Comunicação Serial (do inglês Serial Communication Interface - SCI) no dispositivo Digital Signal Controller (DSC) modelo TMS320F28335 da Texas Instruments.

1) Módulo SCI

O módulo de SCI é uma porta serial assíncrona responsável por suportar comunicações digitais entre a Unidade Central de Processamento (CPU) e outros periféricos assíncronos que usam o formato padrão non-return to-zero (NRZ). Possui um transmissor e um receptor serial, cada um com seu próprio conjunto de registradores para configuração e controle, com transmissão e recepção por fios diferentes (TX e RX, respectivamente) (Texas Instruments). O receptor e o transmissor SCI têm, cada um deles, um sistema FIFO (do inglês - First In/First Out) de 16 níveis para reduzir a sobrecarga de manutenção onde cada um tem seus próprios bits separados de habilitação e interrupção. Ambos podem ser operados independentemente para comunicação half-duplex ou simultaneamente para comunicação full-duplex.

O clock da comunicação serial no DSC empregado é definido por SCICLK, que por sua vez é originado por meio do LSPCLK (Low Speed Peripheral Clock) e do BRR (Baud Rate Register).

O BRR opera a uma taxa de bits programável para diferentes velocidades por meio de um registro de seleção de transmissão de 16 bits. Já o LSPCLK possui frequência de 37,5 MHz. Dessa forma, é possível obter o cálculo de SCICLK, conforme:

$$SCICLK = \frac{LSPCLK}{(BRR + 1)} \quad (10)$$

Para especificar a integridade dos dados, o SCI verifica os dados recebidos quanto à detecção de quebra, paridade, saturação e erros de enquadramento. A taxa de bits é programável para diferentes velocidades por meio de um

registro de seleção de transmissão de 16 bits. A Figura 7 mostra o formato de dados da comunicação SCI na seguinte sequência:

- Um bit de início, também denominado de *start bit*;
- Entre um e oito bits de dados;
- Um bit de paridade par/ímpar (opcional);
- Um ou dois bits de parada ou *stop bit*;
- Um bit extra para distinguir endereços de dados (somente modo de bit de endereço).

No entanto, para programação no DSC é necessário definir o BRR. Assim, é possível obter a taxa de transmissão para comunicação, como segue:

$$BRR = \frac{LSPCLK}{(Taxa_{SCI} * 8)} - 1 \quad (11)$$

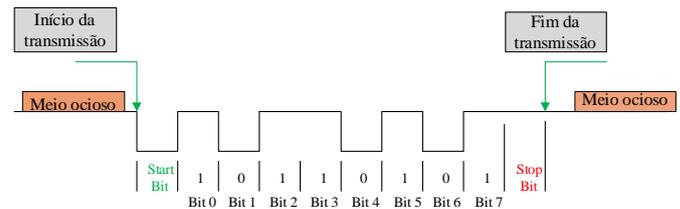


FIGURA 7. Formato do quadro SCI.

V. RESULTADOS

O protótipo de microrrede, o qual é utilizado para avaliação dos resultados experimentais está apresentado na Figura 8. Já a Figura 9 apresenta em detalhes os DSCs utilizados e as conexões utilizadas na comunicação serial.

O protótipo inclui um conversor full-bridge monofásico da SEMIKRON conectado ao sistema elétrico por um indutor de filtragem, além de dois conversores VM-BCs.

As medições de tensões, correntes e potências foram realizadas usando placas de condicionamento de sinais com transdutores de efeito Hall (LEM), e os resultados foram analisados com um analisador de precisão do modelo WT3000 (Yokogawa). Já a estratégia de controle e algoritmos foram embarcados em DSCs TMS320F28335 (Texas Instruments) em UART com módulo SCI, utilizando parâmetros de comunicação dispostos na Tabela 2, destacando que os mesmos dados foram aplicados para todos os DSCs.

As validações das concepções teóricas são obtidas por meio de simulações computacionais realizadas no software Matlab®, ambiente Simulink, toolbox TrueTime, emprega-se os parâmetros disposto por Tabela 3. Este toolbox do Simulink permite validar e simular falhas e atrasos de comunicação. A métrica de atraso da entrada para saída refere-se à latência do sistema de comunicação.

Os parâmetros empregados nas simulações e experimentos, assim como os dados e parâmetros dos conversores utilizados, estão detalhados na Tabela 4 incluído a carga resistiva R_L utilizada no estudo. Com o objetivo de tornar as simulações mais próximas de um sistema real, os algoritmos, aquisição de dados e sistema de controle foram discretizados na frequência de amostragem exibida na Tabela 4.

TABELA 2. Parâmetros de comunicação do módulo SCI

SYSCLKOUT	150 MHz
LSPCLK	37,5 MHz

Taxa SCI	9600
BRR	487

TABELA 3. Parâmetros de simulação do toolbox TrueTime

	VM-BC1	VM-BC2	G-IC
Período de amostragem	6,67 μ s		
Atraso da entrada para saída	0,02 μ s	0,06 μ s	0,06 μ s
Tempo de início para a tarefa 1	0,01s	0,01 s	0,01s
Tempo de início para a tarefa 2	0,02 s	0,02 s	0,02 s
Tempo de início para a tarefa 3	0,01 s	0,01 s	0,01 s

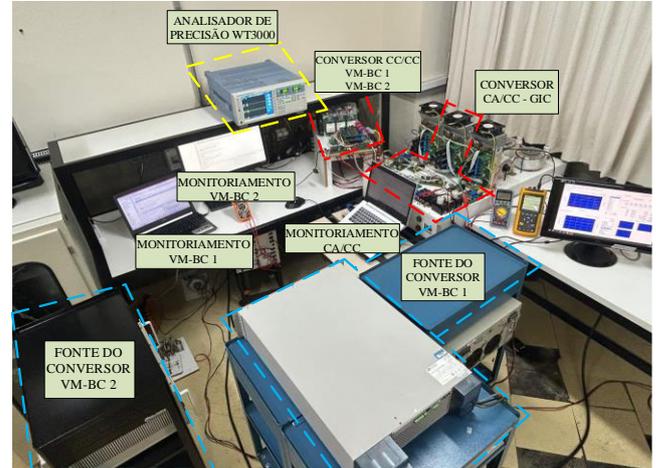
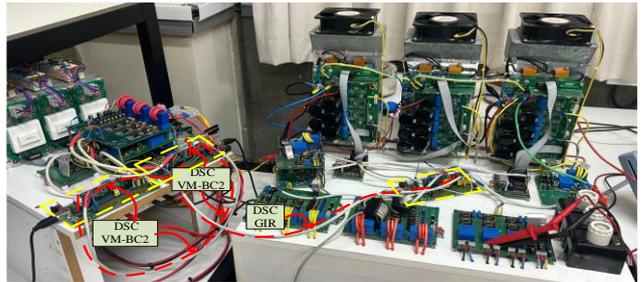
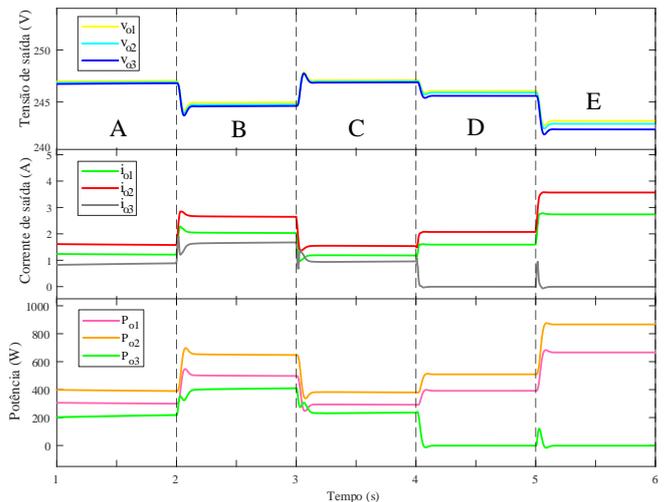
TABELA 4. Parâmetros dos testes experimentais e simulações

Parâmetros gerais	
Tensão eficaz nominal da rede elétrica	$V_S = 127 V$
Frequência nominal da rede elétrica	$f_s = 60 Hz$
Tensão nominal do barramento da microrrede CC	$V_{MG} = 250 V$
Frequência de chaveamento dos conversores	$f_{sw} = 20 kHz$
Frequência de amostragem	$f_a = 40 kHz$
Impedância de linha (barra 1)	$R_{l1} = 0,30 \Omega$ $L_{l1} = 1 mH$
Impedância de linha (barra 2)	$R_{l2} = 0,15 \Omega$ $L_{l2} = 1,5 mH$
Impedância de linha (barra 3)	$R_{l3} = 0,18 \Omega$ $L_{l3} = 2,5 mH$
Cargas	$R_{L1} = 67,2 \Omega$ $R_{L2} = 90 \Omega$
Conversor G-IC	
Potência nominal	$P_{GIC} = 1 kW$
Variável de alocação da potência	$K_{\alpha GIC} = 0,2$
Coefficiente de Droop	$R_{GIC} = 3 \Omega$
Indutância de acoplamento com a rede elétrica	$L_f = 1,5 mH$
Resistência interna do indutor de acoplamento	$R_f = 0,21 \Omega$
Capacitância de saída	$C_{GIC} = 4795 \mu F$
Frequência de corte do Filtro Passa Baixa (FPB)	$\omega_{FPB} = 188,5 \frac{rad}{s}$
Ganhos do controlador de tensão	$KP_{vi} = 0,1172$ $KI_{vi} = -0,1172$
Ganhos do controlador de corrente	$KP_{ii} = 0,0218$ $KI_{ii} = 0,0218$
Ganho PWM	$K_{PWM}^i = \frac{2}{3749}$
Conversor VM-BC	
Potência nominal VM-BC 1	$P_{B1} = 1,2 kW$
Potência nominal VM-BC 2	$P_{B2} = 1,5 kW$
Coefficiente de droop	$R_{DB1} = 2,5 \Omega$ $R_{DB2} = 2 \Omega$
Variável de alocação da potência	$K_{\alpha B1} = K_{\alpha B2} = 0,4$
Indutância de linha	$L_{LB} = 1,5 mH$
Resistência interna do indutor de linha	$R_{L,B} = 0,21 \Omega$
Capacitância de saída	$C_B = 560 \mu F$
Tensão Nominal de Entrada	$V_{S1} = V_{S2} = 125 V$
Frequência de corte do FPB	$\omega_{FPB} = 188,5 \frac{rad}{s}$
Ganhos do controlador de tensão	$KP_{vi} = 0,1373$ $KI_{vi} = -0,1373$
Ganhos do controlador de corrente	$KP_{ii} = 167,6553$ $KI_{ii} = -164,2940$
Ganho PWM	$K_{PWM}^i = 2/3750$

A. Controle Primário

Por meio de simulação, a Figura 10 destaca a eficácia da estratégia de regulação em cinco modos de operação na microrrede CC, exibindo as saídas de tensão, correntes de saída e potências dos conversores. No modo “A”, com R_{L1} , a microrrede mantém $v_{MGavg} = 246,88 V$ sob controle por droop. No modo “B”, R_{L2} é adicionada caracterizando um

degrau de carga. No intervalo “C”, R_{L2} é removida, retornando às condições do modo “A”. Em “D”, a microrrede é isolada da rede elétrica, e apenas os VM-BCs operam. Na transição final, R_{L2} é reintroduzida, aumentando as potências dos conversores para atender à nova demanda. A Tabela 5 sintetiza os valores em regime permanente para cada modo de operação.


FIGURA 8. Protótipo da microrrede CC.

FIGURA 9. Detalhe experimental da comunicação adotada.

FIGURA 10. Desempenho do controle primário em simulação.
TABELA 5. Valores numéricos via simulação em regime permanente do controle primário

	$v_{o1} [V]$	$v_{o2} [V]$	$v_{o3} [V]$	$v_{cc} [V]$	$P_{o1} [W]$	$P_{o2} [W]$	$P_{o3} [W]$
A	247,01	246,88	246,77	246,81	302,26	393,48	211,28
B	244,96	244,75	244,6	244,33	499,52	650,00	405,18
C	247,08	246,96	246,87	246,89	293,20	381,67	232,69
D	246,07	245,90	245,59	246,09	391,40	509,38	0
E	243,19	242,90	242,37	242,62	666,16	866,53	0

Já a Figura 11 apresenta os resultados experimentais do mesmo panorama disposto anteriormente na fase de simulação com as cinco etapas de análise. A Tabela 6 sintetiza os valores numéricos obtidos em regime permanente para cada um dos modos de operação mencionados.

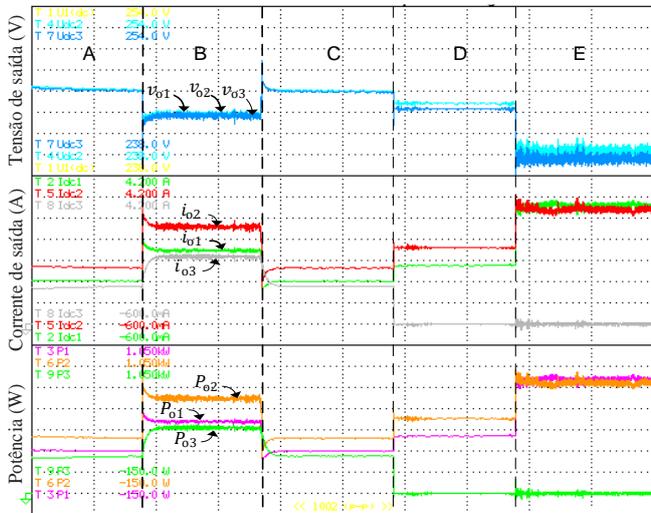


FIGURA 11. Desempenho do controle primário experimental (30s/div).

TABELA 6. Valores numéricos obtidos experimentalmente em regime permanente do controle primário

	v_{o1} [V]	v_{o2} [V]	v_{o3} [V]	v_{cc} [V]	P_{o1} [W]	P_{o2} [W]	P_{o3} [W]
A	246,28	246,15	246,04	256,70	295,86	392,51	253,12
B	243,92	243,74	243,63	258,16	512,62	673,66	450,64
C	246,28	246,18	246,02	259,39	298,00	396,35	255,86
D	244,93	244,82	244,28	255,36	402,57	528,61	0,00
E	240,23	239,80	239,09	251,62	806,20	763,01	0,00

B. Controle secundário com comunicação em linha

Primeiramente, a Figura 12 exibe os resultados de simulações com a microrrede CC operando com o controle por *droop* ativo fornecendo potência para carga R_{L1} ligada ao barramento CC. Entretanto, verifica-se que a tensão $v_{MGavg} = 246,88 V$ está abaixo do valor de referência. Essa diferença é devido à operação apenas do controle primário.

Para corrigir esse desvio, no estágio subsequente “B”, o controle secundário de regulação de tensão é ativado, resultando em um ganho $\delta V_{Oavg} = 1,56 V$. Já no cenário “C”, a estratégia de compartilhamento de corrente/potência opera de acordo com as proporções definidas pelo controle secundário. A transição para o modo de operação “D” traz um novo evento com a inclusão da carga R_{L2} em paralelo, alterando as correntes e tensões de saída dos conversores. A estratégia de controle, então, corrige o balanço de potência do sistema, bem como a regulação de tensão no barramento CC. Em “E”, R_{L2} é desconectada, causando uma perturbação no barramento CC. Contudo, a atuação da estratégia de controle secundário restabelece a estabilidade, retornando para as mesmas condições “A”. Posteriormente, em “F”, ocorre uma falha na comunicação entre os conversores VM-BC, comprometendo a troca de informações. No entanto, como não ocorrem eventos, o controle secundário mantém os ajustes anteriores. Em “G” R_{L2} é reintegrada. Devido ao comprometimento parcial da comunicação, o controle secundário se revela incapaz de corrigir a tensão do

barramento CC. Contudo, em “H”, acontece a restauração do sistema de comunicação, reativando o controle secundário. Em seguida, em “I”, a microrrede CC opera em modo autônomo. Por fim, em “J” é feita a desconexão de R_{L2} da microrrede, direcionando os conversores VM-BC apenas para o fornecimento de potência à R_{L1} . Nas últimas etapas, a microrrede demonstrou eficácia ao atender as demandas de carga, mesmo durante desconexão da rede elétrica CA. A Tabela 7 apresenta os valores numéricos das grandezas envolvidas. A Figura 13 mostra os ajustes da resistência de *droop* δR_{Dj} e do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} .

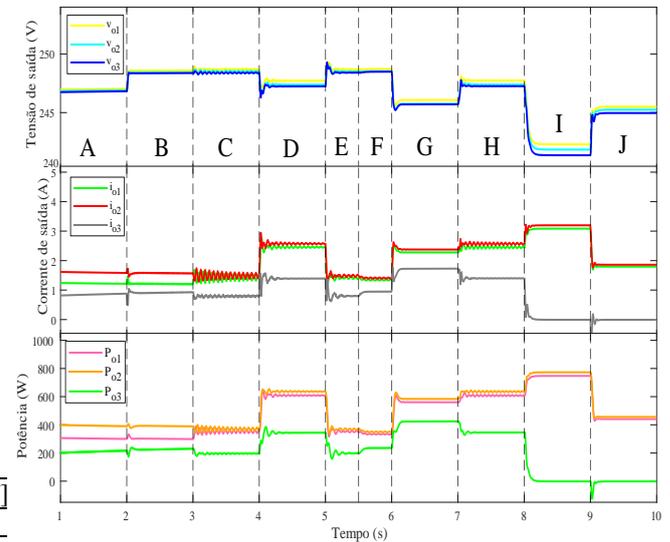


FIGURA 12. Desempenho do controle secundário em simulação em linha.

TABELA 7. Valores numéricos obtidos via simulação em regime permanente do controle secundário em linha

	v_{o1} [V]	v_{o2} [V]	v_{o3} [V]	v_{cc} [V]	P_{o1} [W]	P_{o2} [W]	P_{o3} [W]
A	247,0	246,88	246,79	246,80	302,62	393,92	209,82
B	248,56	248,44	248,37	248,37	300,89	391,90	225,22
C	248,69	248,54	248,43	248,47	361,45	364,11	192,95
D	247,72	247,38	247,24	246,96	612,12	632,44	343,97
E	248,70	248,51	248,40	248,44	363,40	369,77	185,60
F	248,72	248,53	248,49	248,48	331,84	352,33	234,86
G	246,08	245,75	245,70	245,37	560,55	583,81	423,67
H	247,75	247,38	247,26	246,98	603,78	639,73	345,39
I	242,29	241,84	241,36	241,61	747,12	773,16	0,00
J	245,51	245,25	244,97	245,62	440,71	456,15	0,00

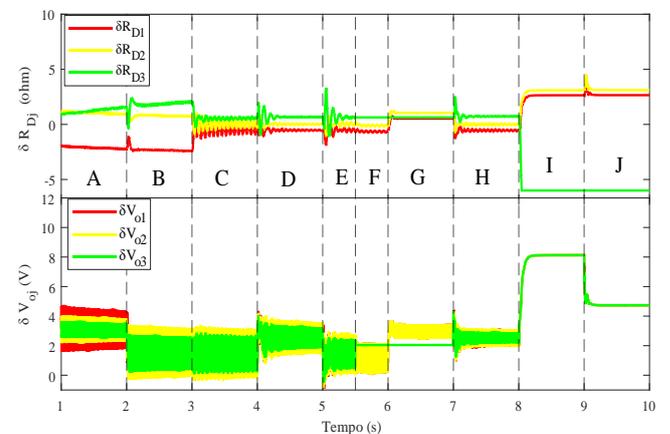


FIGURA 13. Ajuste da resistência de *droop* δR_{Dj} e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} em linha - simulação.

Em conformidade com os resultados das simulações computacionais na topologia de rede de comunicação em linha, o cenário foi validado experimentalmente, explorando dez situações de operação. A Figura 14 apresenta as variáveis de corrente, tensão e potência de saída dos conversores, com valores específicos de $K_{\alpha CIR} = 20\%$, $K_{\alpha B1} = 40\%$, $K_{\alpha B2} = 40\%$ conforme apresentado na Tabela II.

Na fase inicial, a microrrede CC opera com controle por droop ativo com tensão de referência de 250 V. No entanto, a tensão no barramento CC inicialmente apresenta um desvio, onde $v_{MGmed} = 244,49 V$. Este valor é corrigido para 247,64 V pela atuação do controle secundário de regulação de tensão, resultando em um ganho $\delta V_{Omed} = 1,31 V$.

No cenário “C”, a estratégia de compartilhamento de corrente/potência opera conforme as proporções definidas pelo controle secundário. A transição para o modo de operação “D” inclui a carga R_{L2} em paralelo, alterando as correntes e tensões de saída dos conversores, corrigidas pelo controle. O evento “E” desconecta R_{L2} , causando uma perturbação, mas o controle secundário restabelece a estabilidade. A falha na comunicação entre os conversores VM-BCs ocorre em “F” comprometendo a troca de informações, mas o controle secundário mantém os ajustes anteriores sem eventos perturbadores adicionais. Em “G” ocorre com a reintegração de R_{L2} causando perturbações no barramento CC. Devido à comunicação parcialmente comprometida, o controle secundário não corrige a tensão adequadamente, resultando em $v_{MGmed} = 244,01 V$. Em “H”, o sistema de comunicação é restaurado e reativa o compartilhamento de corrente/potência e a regulação de tensão. Em “I”, a microrrede opera autonomamente, suprimindo a potência demandada pelas cargas. Em “J”, R_{L2} é desconectada, direcionando os conversores VM-BCs exclusivamente para o fornecimento de potência à carga. A microrrede CC demonstra capacidade de atender às exigências das cargas mesmo desconectada da rede elétrica CA.

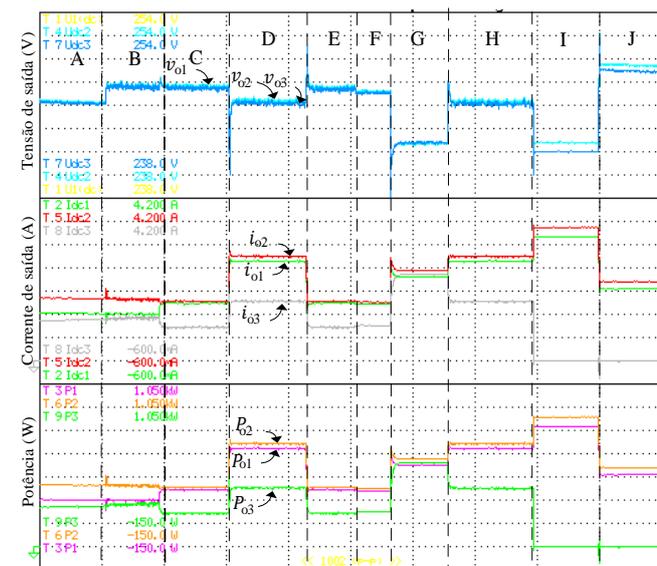


FIGURA 14. Experimentação do controle secundário em linha (30 s/div).

A Tabela 8 apresenta os valores numéricos das grandezas envolvidas. A Figura 15 mostra os ajustes da resistência de droop δR_{Dj} e do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} .

TABELA 8. Valores numéricos obtidos experimentalmente em regime permanente do controle secundário em linha

	v_{o1} [V]	v_{o2} [V]	v_{o3} [V]	v_{cc} [V]	P_{o1} [W]	P_{o2} [W]	P_{o3} [W]
A	246,45	246,32	246,22	258,05	295,69	389,08	262,12
B	247,75	247,62	247,55	260,74	297,00	380,29	281,84
C	247,71	247,47	247,34	260,06	115,83	377,94	214,89
D	246,57	246,21	246,08	262,37	633,38	647,67	397,66
E	247,72	247,48	247,35	258,72	113,95	373,69	217,67
F	246,35	245,98	245,88	261,21	624,73	634,74	410,72
G	244,17	243,91	243,93	258,13	553,83	603,39	479,62
H	246,32	245,97	245,83	260,06	630,51	640,16	392,91
I	239,07	238,61	237,89	251,98	805,35	759,54	0,00
J	248,72	248,44	247,98	258,72	486,02	471,41	0,00

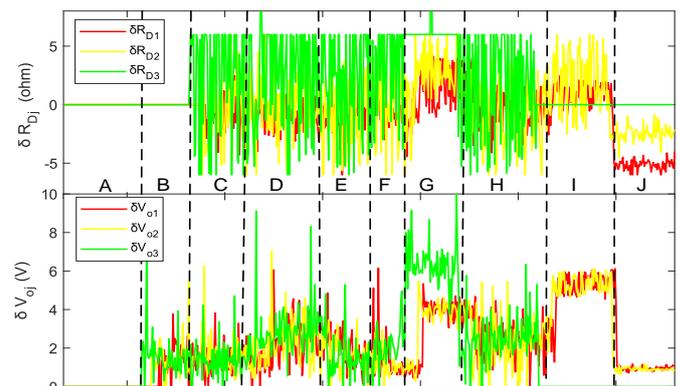


FIGURA 15. Ajuste da resistência de droop δR_{Dj} e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} em linha – experimental (30 s/div).

C. Controle secundário com comunicação em anel

Nesta subseção a comunicação em anel é testada via simulações com condições iguais à comunicação em linha, sendo os resultados mostrados na Figura 16. A microrrede CC inicia sua operação com controle por droop e a carga R_{L1} conectada ao barramento CC. Em “B” o controle secundário para desvio da tensão do barramento CC é habilitado. Já em “C” é ativado o controle para compartilhamento de corrente/potência conforme as variáveis de alocação predefinidas. Na etapa “D” R_{L2} é conectada em paralelo. Em “E”, R_{L2} é desconectada do sistema. A falha no sistema de comunicação ocorre em “F” entre o conversor VM-BC 1 e o conversor VM-BC 2. Apesar de comprometer parcialmente, a comunicação em anel se transforma em linha, mantendo a comunicação do sistema, o que torna essa topologia de comunicação mais robusta. A perturbação ocorre em “G” quando R_{L2} é reintegrada, gerando distúrbios no barramento CC. Embora a comunicação seja afetada, a troca de dados permanece inalterada, devido à transição da topologia de anel para linha. Isso preserva a troca de informações e, consequentemente, a correção da tensão no barramento CC e a atuação do controle secundário de corrente/potência. Em “H” o sistema de comunicação é restaurado, retornando para a topologia de comunicação em anel. Logo em seguida em “I” a microrrede CC opera independente da rede elétrica CA, mantendo o compartilhamento de corrente/potência. Por fim, em “J” a carga R_{L2} é desconectada da microrrede, e os conversores VM-BC fornecem potência apenas para carga R_{L1} .

A Tabela 9 apresenta os valores numéricos das grandezas envolvidas. A Figura 17 mostra os ajustes da resistência de droop δR_{Dj} e do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} .

Experimentalmente, a microrrede CC é testada sob condições semelhantes à análise anterior e os resultados são mostrados na Figura 18. Inicia-se com controle por droop e uma carga R_{L1} conectada ao barramento CC. O controle secundário estabiliza a tensão em $v_{MGmed} = 247,51 V$, e a técnica de compartilhamento de corrente/potência é implementada. A carga R_{L2} é conectada em “D”, causando uma redução de 1,37 V no barramento CC. A falha de comunicação ocorre em “F” entre VM-BC1 e VM-BC2, mas a topologia de comunicação se adapta, mantendo a estabilidade. A reintegração de R_{L2} em “G” gera distúrbios no barramento CC, mas a transição da topologia preserva a correção da tensão e o controle secundário. A restauração do sistema em “H” retorna à topologia de comunicação em anel. Em “I”, a microrrede opera independentemente da rede CA, mantendo o compartilhamento de corrente/potência. Finalmente, em “J”, R_{L2} é desconectada, e os conversores VM-BC fornecem potência exclusivamente para R_{L1} .

A Tabela 10 apresenta os valores numéricos das grandezas envolvidas. A Figura 19 mostra os ajustes da resistência de droop δR_{Dj} e do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} .

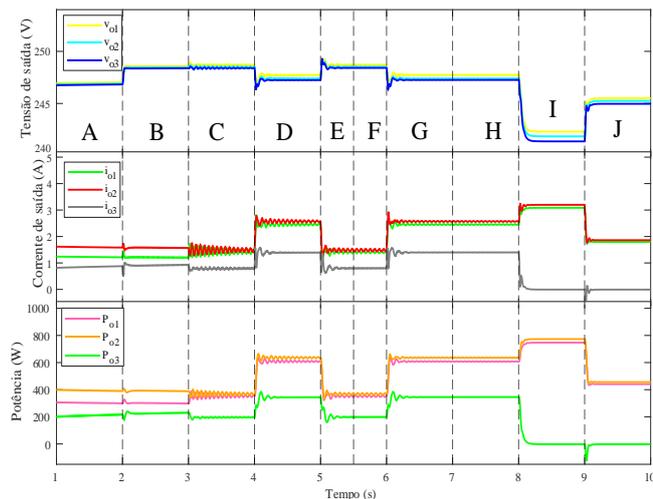


FIGURA 16. Desempenho do controle secundário em simulação - anel.

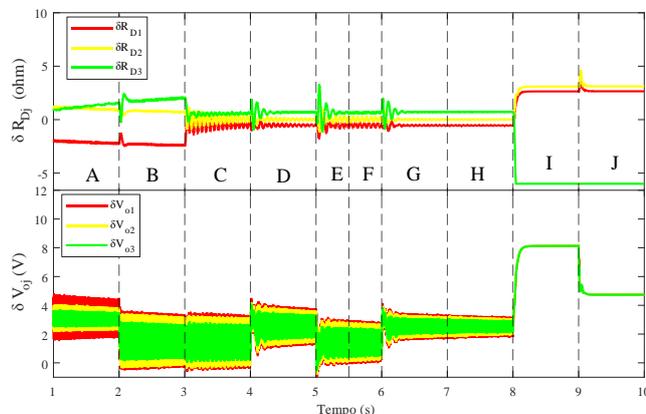


FIGURA 17. Ajuste da resistência de droop δR_{Dj} e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} em anel – simulação.

TABELA 9. Valores numéricos obtidos simulações em regime permanente do controle secundário em anel

	v_{o1} [V]	v_{o2} [V]	v_{o3} [V]	v_{cc} [V]	P_{o1} [W]	P_{o2} [W]	P_{o3} [W]
A	247,00	246,88	246,79	246,80	302,62	393,92	209,82
B	248,56	248,44	248,37	248,37	300,95	391,92	225,17
C	248,67	248,51	248,44	248,45	350,19	375,88	192,52
D	247,72	247,39	247,24	246,97	607,38	637,67	343,47
E	248,69	248,52	248,41	248,44	366,17	366,83	185,81
F	248,70	248,49	248,42	248,44	345,58	375,39	197,72
G	247,74	247,38	247,25	246,97	606,93	636,21	345,67
H	247,74	247,39	247,26	246,99	607,29	636,15	345,43
I	242,29	241,84	241,36	241,61	747,12	773,16	0,00
J	245,51	245,25	244,97	245,62	440,70	456,15	0,00

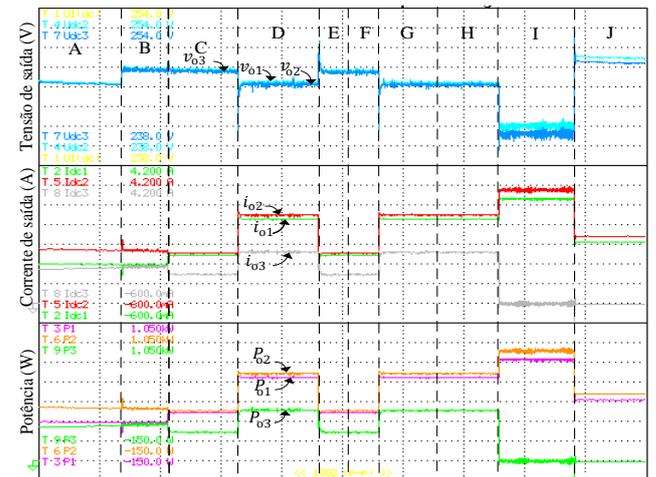


FIGURA 18. Experimentação do controle secundário em anel (30 s/div).

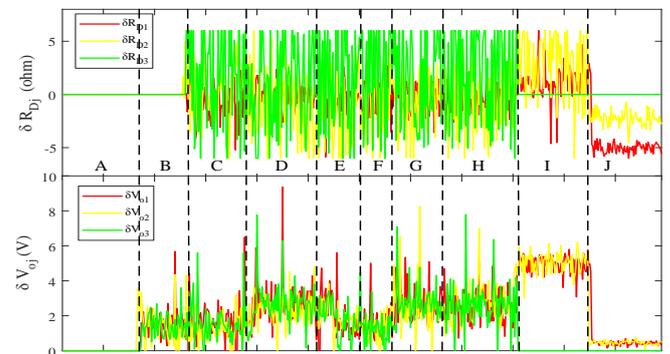


FIGURA 19. Ajuste da resistência de droop δR_{Dj} e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} em anel – experimental (30 s/div).

TABELA 10. Valores numéricos obtidos experimentalmente em regime permanente do controle secundário em anel

	v_{o1} [V]	v_{o2} [V]	v_{o3} [V]	v_{cc} [V]	P_{o1} [W]	P_{o2} [W]	P_{o3} [W]
A	246,34	246,20	246,11	259,39	290,26	387,02	272,81
B	247,62	247,49	247,42	260,06	294,37	385,32	277,48
C	248,41	247,83	247,69	260,06	366,78	380,25	211,97
D	246,90	246,58	246,36	261,21	635,98	666,78	371,26
E	248,41	247,83	247,69	260,06	366,78	380,25	211,97
F	248,41	247,84	247,71	259,39	362,68	381,67	212,73
G	246,73	246,40	246,21	260,83	633,36	660,56	377,75
H	246,74	246,39	246,22	261,98	636,59	662,79	379,18
I	242,54	242,22	241,44	254,67	771,83	832,14	0,00
J	249,23	249,02	248,54	260,06	458,15	505,43	0,00

D. Análise dos resultados experimentais

Destacando-se pela robustez na comunicação, especialmente em situações de falha, a topologia de comunicação em anel demonstrou uma capacidade efetiva em se adaptar para manter a comunicação ativa entre os conversores. Por outro lado, a topologia de comunicação em linha, embora eficiente, foi mais suscetível a problemas de comunicação, potencialmente afetando o controle secundário.

Ambas as topologias exibiram habilidades na correção de tensão e compartilhamento de corrente/potência. Entretanto, a implementação da topologia em anel pode ser mais desafiadora devido à necessidade de manter caminhos de comunicação redundantes.

Em termos de robustez operacional, a topologia em anel ofereceu uma operação mais estável durante falhas, mantendo a continuidade das operações. Isso foi evidenciado durante a falha de comunicação entre os conversores VM-BCs (ver situação F), onde a topologia em anel adaptou-se para manter a troca de informações ativa.

Além disso, a eficiência na alocação de potência representa um quesito importante a ser considerado. Ambas as topologias foram eficazes nesse aspecto, mas a topologia em anel pôde oferecer uma alocação mais precisa devido à sua capacidade de manter a comunicação ativa mesmo em situações de falha.

A escolha entre as duas topologias depende das necessidades específicas do sistema. A topologia em anel é mais adequada para ambientes onde a resiliência da comunicação e a eficiência na alocação de potência são cruciais, enquanto a topologia em linha pode ser adotada em situações em que a simplicidade de implementação é prioritária e os riscos de falha de comunicação são menores.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma nova abordagem no controle secundário em microrredes CC, destinada a aprimorar a eficiência e otimização do compartilhamento de energia, juntamente com a avaliação das topologias de redes de comunicação em linha e em anel.

Além de corrigir desvios de tensão por meio da média das tensões de saídas dos conversores, a proposta ressaltou sua capacidade de ajustar dinamicamente a alocação de potência através do ajuste da resistência de droop. Os resultados obtidos revelaram variações percentuais da potência fornecida inferiores a 5% em relação aos valores esperados de alocação de potência. Isso indica uma precisão relevante no ajuste da potência ativa, garantindo um suprimento estável e confiável de energia às cargas. Vale ressaltar que a avaliação foi conduzida em duas configurações de comunicação: em anel e em linha. Enquanto a topologia em linha revelou-se simples e de implementação mais direta, sua vulnerabilidade associada aos problemas de comunicação, especialmente em cenários de falha, ficou evidente. Por outro lado, a topologia em anel demonstrou capacidade de adaptação adequada, mantendo a comunicação ativa mesmo diante de falhas, o que realça sua robustez e confiabilidade.

Os testes práticos confirmaram a eficácia do controle secundário na alocação de potência. Os resultados validaram a estabilidade e confiabilidade do sistema, mesmo em condições variadas de operação. Essa validação fortalece a

confiança na viabilidade prática da abordagem desenvolvida para microrredes CC.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido do CNPq (Processos 304707/2021-0 e 308620/2021-6) e o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

NEVES, J.C.: Conceptualization, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Validation, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing. **SILVEIRA, R.D.:** Conceptualization, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Validation, Writing – Review & Editing. **DA SILVA, S.A.O.:** Conceptualization, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Resources, Supervision, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing. **SAMPAIO, L.P.:** Conceptualization, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Resources, Supervision, Writing – Review & Editing.

PLÁGIO E SIMILARIDADE

O artigo foi submetido para verificação de similaridade no sistema Crossref Similarity Check (iThenticate).

REFERÊNCIAS

- [1] A. Ashok Kumar, N. Amutha Prabha, "A comprehensive review of DC microgrid in market segments and control technique", *Heliyon*, vol. 8, n° 11, 11694, Nov. 2022, doi: [10.1016/j.heliyon.2022.e11694](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11694)
- [2] G. Lou, S. Li, W. Gu, and Q. Yang, "Distributed Harmonic Power Sharing with Voltage Distortion Suppression in Islanded Microgrids Considering Non-linear Loads," *Journal of Power and Energy Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 117-128, Jan. 2024, doi: [10.17775/CSEEJPES.2021.00870](https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2021.00870)
- [3] J. M. S. Callegari, W. F. De Souza, D. I. Brandao, T. R. Oliveira, e B. J. Cardoso Filho, "The UFMG Microgrid Laboratory: a Testbed for Advanced Microgrids", *Eletrônica Potência*, vol. 28, no 2, p. 163–173, Jun. 2023 doi: [10.18618/REP.2023.2.0043](https://doi.org/10.18618/REP.2023.2.0043).
- [4] M. Fotopoulou, D. Rakopoulos, D. Trigkas, F. Stergiopoulos, O. Blanas, S. Voutetakis, "State of the art of low and Medium Voltage direct current (DC) microgrids," *Energies*, vol. 14, n° 18, pp. 5595, Set. 2021, doi: [10.3390/en14185595](https://doi.org/10.3390/en14185595).
- [5] R. Silveira, S. Silva, L. Sampaio, S. Machado, "Full-order models and dynamic assessment of droop-controlled grid-connected and off-grid DC microgrids," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 64 103685, Abr. 2024, doi: [10.1016/j.seta.2024.103685](https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103685).
- [6] J. G. De Matos, L. A. de S. Ribeiro, e F. S. F. E Silva, "Controle da Potência Gerada em Microrredes Autônomas e Isoladas com Fontes de Energia Renováveis e Sistema de Armazenamento com Bancos de Baterias", *Eletrônica Potência*, vol. 19, no 2, p. 152–162, Mai. 2014, doi: [10.18618/REP.2014.2.152162](https://doi.org/10.18618/REP.2014.2.152162).
- [7] A. Abhishek, A. Ranjan, S. Devassy, B. Kumar Verma, S. K. Ram, A. K. Dhakar, "Review of hierarchical



- control strategies for DC microgrid", *IET Renew. Power Gener.*, vol. 14, nº 10, pp. 1631–1640, Jul. 2020, doi: [10.1049/iet-rpg.2019.1136](https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1136).
- [8] Z. Li, M. Shahidehpour, "Small-signal modeling and stability analysis of hybrid AC/DC microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, nº 2, pp. 2080–2095, Dez. 2019, doi: [10.1109/tsg.2017.2788042](https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2788042).
- [9] S. K. Sahoo, A. K. Sinha, N. K. Kishore, "Control techniques in AC, DC, and hybrid AC–DC microgrid: A review," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 6, nº 2, pp. 738–759, Dez. 2017, doi: [10.1109/jestpe.2017.2786588](https://doi.org/10.1109/jestpe.2017.2786588).
- [10] C. Jin, J. Wang, P. Wang, "Coordinated secondary control for autonomous hybrid three-port AC/DC/DS microgrid", *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 4, no 1, p. 1–10, Mar. 2018, doi: [10.17775/cseejpes.2016.01400](https://doi.org/10.17775/cseejpes.2016.01400).
- [11] X. Lu, J. M. Guerrero, K. Sun, "Distributed secondary control for DC microgrid applications with enhanced current sharing accuracy", *2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Mai, 2013, doi: [10.1109/ISIE.2013.6563742](https://doi.org/10.1109/ISIE.2013.6563742).
- [12] S. Anand, B. G. Fernandes, J. Guerrero, "Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, nº 4, pp. 1900–1913, Abr. 2013, doi: [10.1109/tpe.2012.2215055](https://doi.org/10.1109/tpe.2012.2215055)
- [13] W. W. A. G. da Silva, T. R. Oliveira, P. F. Donoso-Garcia, "Hybrid distributed and decentralized secondary control strategy to attain accurate power sharing and improved voltage restoration in DC microgrids", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, nº 6, pp. 6458–6469, Jun. 2020, doi: [10.1109/tpe.2019.2951012](https://doi.org/10.1109/tpe.2019.2951012).
- [14] M. Zaery, E. M. Ahmed, M. Orabi, M. Youssef, "Operational cost reduction based on distributed adaptive droop control technique in DC microgrids", em *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Out. 2017, doi: [10.1109/ECCE.2017.8096498](https://doi.org/10.1109/ECCE.2017.8096498).
- [15] S. Sahoo e S. Mishra, "A distributed finite-time secondary average voltage regulation and current sharing controller for DC microgrids", *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, nº 1, pp. 282–292, Jan. 2019, doi: [10.1109/tsg.2017.2737938](https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2737938).
- [16] P. Wang, X. Lu, X. Yang, W. Wang, D. Xu, "An improved distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, nº 9, pp. 6658–6673, Set. 2016, doi: [10.1109/tpe.2015.2499310](https://doi.org/10.1109/tpe.2015.2499310).
- [17] W. W. A. G. da Silva, T. R. Oliveira, P. F. Donoso-Garcia, "Hybrid distributed and decentralized secondary control strategy to attain accurate power sharing and improved voltage restoration in DC microgrids", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, nº 6, pp. 6458–6469, Jun. 2020, doi: [10.1109/tpe.2019.2951012](https://doi.org/10.1109/tpe.2019.2951012).
- [18] S. Augustine, M. K. Mishra, N. Lakshminarasamma, "Adaptive droop control strategy for load sharing and circulating current minimization in low-voltage standalone DC microgrid", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, nº 1, pp. 132–141, Jan. 2015, doi: [10.1109/tste.2014.2360628](https://doi.org/10.1109/tste.2014.2360628).
- [19] W. W. A. G. Silva, T. R. Oliveira, P. F. Donoso-Garcia, "An improved voltage-shifting strategy to attain concomitant accurate power sharing and voltage restoration in droop-controlled DC microgrids", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, nº 2, pp. 2396–2406, Feb. 2021, doi: [10.1109/tpe.2020.3009619](https://doi.org/10.1109/tpe.2020.3009619).
- [20] R. Sondhi, N. Bhatt, S. Arora, "Primary control in DC microgrids: a review", *2021 International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*, Mar. 2021, doi: [10.1109/ICACITE51222.2021.9404603](https://doi.org/10.1109/ICACITE51222.2021.9404603).

DADOS BIOGRÁFICOS

Juliana Cunha Neves é engenheira eletricista (2020) e mestre em engenharia elétrica (2023) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procopio (UTFPR-CP). Atualmente é engenheira de desenvolvimento de hardware na Embraer, Brasil. Suas áreas de interesse são: sistemas de energia, qualidade da energia elétrica, sistemas de geração distribuída e microrredes CC, AC e híbridas.

Rafaela Dizaró Silveira é engenheira eletricista (2017), mestra em engenharia elétrica (2019) e doutora em engenharia elétrica (2023) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP). Atualmente é engenheira de desenvolvimento na Siemens Smart Infrastructure, onde atua em projetos de sistemas de gerenciamento de energia para microrredes. Suas áreas de interesse são microrredes, aproveitamento de energias renováveis, qualidade da energia elétrica, sistemas de gerenciamento de energia e modelagem e controle de conversores estáticos.

Sérgio Augusto Oliveira da Silva é engenheiro eletricista (1987) e mestre em engenharia elétrica (1989) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); e doutor em engenharia elétrica (2001) pela Universidade Federal de Minas Gerais. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, (UTFPR-CP) desde 1993. É coordenador do Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQER). Atualmente, é coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UTFPR-CP. Atualmente, é bolsista produtividade PQ-1D da CNPq. Suas áreas de interesse são: sistemas de energia ininterrupta (UPS), condicionadores ativos de energia elétrica, controle empregando DSC, qualidade da energia elétrica, energias renováveis e desenvolvimento de ferramentas educacionais para o ensino de eletrônica de potência. É membro da SOBRAEP e do IEEE.

Leonardo Poltronieri Sampaio é engenheiro eletricista (2008), mestre em engenharia elétrica (2010) e doutor em engenharia elétrica (2013) pela Universidade Estadual Paulista, Campus Ilha Solteira (UNESP/IS). É professor associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP). É membro e colaborador do Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQER). É bolsista produtividade PQ-2 da CNPq. Seus principais interesses são: aproveitamento de energias alternativas e renováveis, aplicações fotovoltaicas, qualidade de energia, modelagem e controle de conversores estáticos empregando DSC, desenvolvimento de ferramentas educacionais e programação em Java e C. É membro da SOBRAEP.