

Controle Baseado em Potência Aplicado em Geradores Distribuídos em uma Microrrede de Baixa Tensão

Wellinton M. A. Agostinho*
Clodualdo V. Sousa, Geovane L. Reis, Waner. W. A. Silva**
Victor F. Mendes***

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil, (e-mail: wellinton.agostinho@ufmg.br).*

** *Universidade Federal de Itajubá, campus Itabira, MG, Brasil (e-mail: clodualdosousa@unifei.edu.br, geovanereis@unifei.edu.br, waner@unifei.edu.br)*

*** *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil, (e-mail: victormendes@cpdee.ufmg.br).*

Abstract: This work consists in the application of the power-based control technique in the management of power flow in distributed energy resources connected to a low-voltage microgrid. The microgrid is composed of six single-phase H-bridge converters, three connected between phase-neutral and three with phase-phase connection sharing a single DC bus controlled by an active PWM (Pulse Width Modulation) rectifier. The converters used are current mode controlled, injecting or absorbing active and reactive power in the micro-grid to meet the specifications of the AC grid. A low speed communication structure based on the CAN 2.0 protocol establishes the communication between the DERs and the master controller, which is responsible for determining the energy contributions of each converter allowing the proportional sharing of power among them and regulating the power flow in the PAC. The results obtained through the experimental prototype, show that the power based control, guarantees in permanent regime a stable active and reactive power following the requested reference and the proportional sharing of power among the DERs according to their maximum capacities.

Resumo: Este trabalho consiste na aplicação da técnica de controle baseado em potência no gerenciamento do fluxo de potência em recursos energéticos distribuídos conectados à uma microrrede de baixa tensão. A microrrede é composta por seis conversores monofásicos em ponte H, sendo três conectados entre fase-neutro e três com conexão fase-fase compartilhando um único barramento c.c. controlado por um retificador ativo PWM (Pulse Width Modulation). Os conversores utilizados são controlados em modo de corrente injetando ou absorvendo potência ativa e reativa na microrrede para atender às especificações da rede c.a.. Uma estrutura de comunicação de baixa velocidade baseado no protocolo CAN 2.0 estabelece a comunicação entre os DERs e o controlador mestre, que é responsável por determinar as contribuições energéticas de cada conversor permitindo o compartilhamento proporcional de potência entre eles e regular o fluxo de potência no PAC. Os resultados obtidos através do protótipo experimental, mostram que o controle baseado em potência, garante em regime permanente uma potência ativa e reativa estável seguindo a referência solicitada e o compartilhamento proporcional de potência entre os DERs conforme às suas capacidades máximas.

Keywords: Microgrid; Distributed generator; Energy management; Electronic converter; power flow control.

Palavras-chaves: Microrrede; Gerador distribuído; Gerenciamento de energia; Conversor eletrônico; Controle do fluxo de potência.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas com geração distribuída e microrredes estão se tornando cada vez mais importantes à medida que o nível de penetração de energia renovável aumenta na rede elétrica (Bellido, 2018). Os geradores distribuídos (GDs) que fazem a interface entre as fontes de geração de energia e a rede elétrica c.a., são uma parte essencial das microrredes. Esses conversores podem ser classificados como: conversor formador de rede (CFR), conversor alimentador de rede (CAR) e conversor de suporte à rede (CSR). O conversor formador de rede é controlado como fonte de tensão ideal e fornece a referência de amplitude e frequência para um sistema isolado (Ferreira, 2018a). O conversor alimentador de rede é controlado como fonte de corrente ideal, operando com uma referência de corrente correspondente a uma dada referência de potência (Monshizadeh et al., 2015). Recebe este nome por injetar potência na microrrede de uma fonte primária (e.g., fotovoltaica, eólica, células combustíveis etc.). Já o conversor de suporte à rede, atua absorvendo ou injetando potência ativa e reativa para regular o nível de tensão e de frequência no local em que está instalado (Rocabert et al., 2012).

As microrredes são uma parte essencial para o futuro das *smartgrids* por causa de sua inteligência local, automação, interoperabilidade e capacidade de integração de DERs (Júnior, 2018). Dessa forma, estratégias de controle avançadas são componentes vitais para a operação das microrredes. Em Bidram and Davoudi (2012) são separadas as funções hierárquicas de controle em microrredes que podem ser divididas em:

- (1) Controle primário: possui dinâmica rápida e tem como funções comuns a detecção de ilhamento, controle de potência de saída do conversor, regulação de tensão e frequência e o controle do compartilhamento de energia.
- (2) Controle secundário: compensa os desvios de tensão e frequência causados pelo controle primário, além de ser responsável pela economia e confiabilidade da microrrede.
- (3) Controle terciário: otimiza a operação da microrrede no modo conectado ou ilhado, controlando o fluxo de potência das fontes geradoras e entre a microrrede e a rede principal. A escala de tempo do controle terciário é da ordem de minutos ou é orientada por eventos.

Existem diversas técnicas de controle primário empregadas, a exemplo, o controle *droop* que causa desvios de tensão e frequência. Esses desvios podem ser solucionados através da implementação de um controle secundário utilizando meios físicos de comunicação conforme Morstyn et al. (2015). Um aspecto importante na operação das microrredes são os benefícios econômicos para os proprietários e usuários do sistema. Um ponto chave sobre

* Reconhecimento do suporte financeiro deve vir nesta nota de rodapé.

a microrrede é verificar quando é mais economicamente viável utilizar a energia gerada localmente para equilibrar a oferta, demanda e armazenamento em relação a energia proveniente da rede principal (Nordman and Christensen, 2015). Neste cenário é importante um sistema de comunicação entre os elementos da microrrede que além do controle de estabilidade garanta uma operação econômica. Tecnologias de comunicação com fio e sem fio podem ser empregadas para interligação dos diversos elementos. A tecnologia com fio permite alta transferência de dados e com maior segurança, entretanto, o custo de instalação é relativamente alto. Por outro lado, sistemas de comunicação sem fio possuem menor custo, são mais flexíveis e mais adequados em áreas remotas (Setiawan et al., 2015).

A técnica de controle proposta neste artigo baseia-se no algoritmo de controle PBC em nível secundário, utilizando um controlador central. Conforme Caldognetto et al. (2015), devido à sua facilidade de implementação, é uma estratégia altamente viável em comparação com outras estruturas de controle. Apresenta ótima estabilidade, boa robustez às variações da rede, proteção contra sobrecarga dos geradores distribuídos e resposta dinâmica rápida.

2. ARQUITETURA DO SISTEMA

Este trabalho tem como objetivo principal a aplicação do algoritmo de controle baseado em potência (PBC) em uma microrrede de baixa tensão para regular o fluxo de potência ativa e reativa no ponto de conexão comum (PAC) entre a microrrede e a rede de distribuição. Além disso, realizar o compartilhamento proporcional de potência entre os DERs conforme às suas disponibilidades permitindo uma operação eficiente e segura da microrrede. A Figura 1 apresenta a arquitetura da microrrede. Para validação da estratégia de controle proposta, a microrrede foi simulada no *software* versão 4.1.2 e posteriormente foi construído um protótipo em escala reduzida para extrair os resultados experimentais. Um retificador trifásico controlado, topologia *boost* é utilizado para regular a tensão no barramento c.c.. Destaca-se que o controle do retificador ativo é realizado em coordenadas *dq* com duas malhas internas de corrente (*id* e *iq*) e uma malha externa de tensão e potência reativa. Entretanto, estes resultados não são objetivos do estudo deste trabalho e desta forma, não serão explorados. Conectado ao barramento c.c., tem-se seis geradores distribuídos, na configuração *full-bridge*, conectados na rede de distribuição através de transformador de isolamento (T_2 a T_7).

O sistema de controle dos conversores é implementado em um processador de sinal digital (DSP) de ponto flutuante da *Texas Instruments* TMS320F28379/D. O protocolo de comunicação *CAN 2.0* (*Controller Area Network*) é utilizado para a troca de informações entre o controlador central e as unidades distribuídas, permitindo a coleta de informações sobre os DERs e da rede enviando os coman-

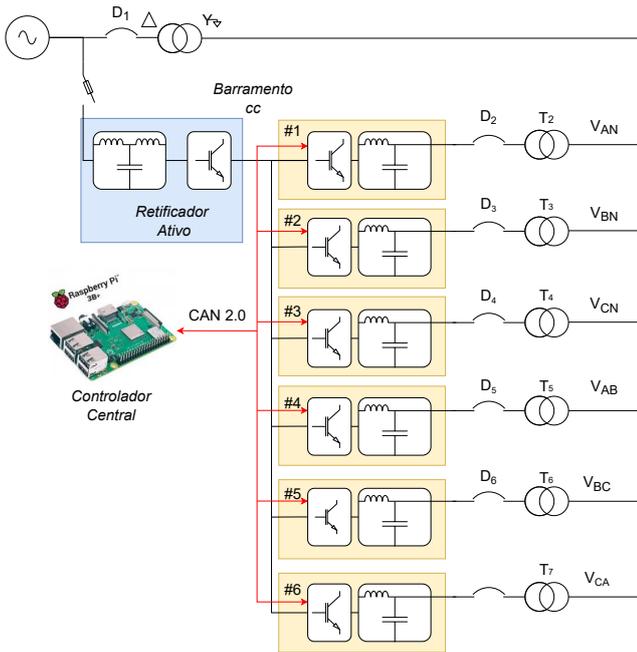


Figura 1. Arquitetura geral da microrrede.

dos de referências de potência para os DERs permitindo uma resposta rápida e o compartilhamento proporcional de potência entre os DERs (da Silva, 2020). O pacote de dados trocados entre o controlador central e os geradores distribuídos estão descritos na seção 3.2. A Tabela 1 apresenta os parâmetros da rede de distribuição enquanto as Tabelas 2 e 3 e exibem os parâmetros dos conversores fase-neutro e fase-fase respectivamente.

Tabela 1. Parâmetros da rede de distribuição.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão nominal	V_n	220V	V
frequência	f_n	60	Hz
Potência de curto circuito	S_{cc}	50	MVA

Tabela 2. Parâmetros dos GDs fase-neutro.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão barramento CC	V_{DC}	400V
Tensão da rede	V_g	127V
frequência da rede	f_o	60Hz
Resistência parasita do indutor	R_f	0,1 Ω
Indutor do filtro	L_f	3,6 mH
Capacitor do filtro	C_f	15 μ F
frequência de chaveamento	f_s	18kHz
Potência máxima	$P_{G_j}^{max}$	1,0 kW
Corrente nominal	I_n	13, 12A
pico da portadora	cpk	1
ganho do sensor de corrente	H_i	20
ganho do sensor de tensão	H_v	400

3. ESTRUTURA DE CONTROLE

3.1 Estrutura de controle dos conversores de potência

A Figura 2 exibe a estrutura de potência e o sistema de controle dos geradores distribuídos.

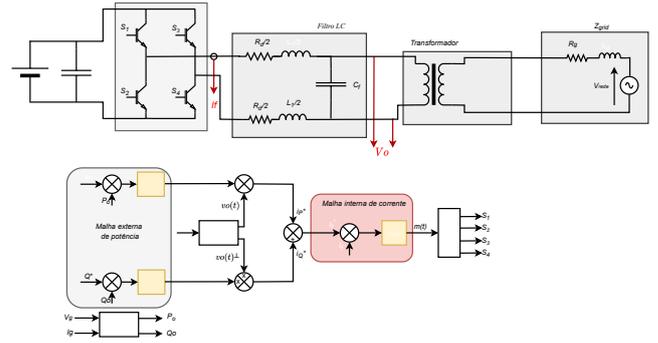


Figura 2. Estratégia de controle dos DERs.

Os conversores são controlados como fonte de corrente e apresenta melhor resposta dinâmica e desacoplamento entre os demais DERs (Ferreira, 2018a). A malha de corrente é responsável pela injeção de corrente na microrrede, sendo a corrente de referência i_f^* dividida em duas quantidades, i_P^* em fase com a tensão de saída, v_o , portanto, transfere potência ativa e i_Q^* em quadratura com a tensão de saída e representa a circulação de potência reativa, sendo indutiva ou capacitiva dependendo do ângulo de deslocamento entre a corrente e a tensão v_o . Para produzir uma tensão de saída senoidal na frequência desejada, é empregada a técnica PWM com chaveamento de tensão bipolar conforme Vitorino (2019). As correntes i_P^* e i_Q^* podem ser definidas conforme a teoria da potência conservativa (Tenti et al., 2010) e exibidas em 1 e 2 respectivamente.

$$i_P^* = \frac{P^*}{\|v_o\|^2} \cdot v_o \quad (1)$$

$$i_Q^* = \frac{Q^*}{\|v_o\|^2} \cdot v_o^\perp \quad (2)$$

Tal que:

$$\|v_o\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int v_o^2(t) dt} \quad (3)$$

sendo $\|v_o\|$, o valor eficaz da tensão de saída e T o período do sinal.

v_o^\perp é o sinal de $v_o(t)$ deslocada de 90° , que pode ser gerado conforme 4.

Tabela 3. Parâmetros dos GDs fase-fase.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão barramento CC	V_{DC}	400V
Tensão da rede	V_g	220V
frequência da rede	f_o	60Hz
Resistência parasita do indutor	R_f	0,1 Ω
Indutor do filtro	L_f	3,6 mH
Capacitor do filtro	C_f	15 μ F
frequência de chaveamento	f_s	15, 36kHz
Potência máxima	$P_{G_j}^{max}$	1,4/0,7 kW
Corrente nominal	I_n	6, 81/3, 63A
pico da portadora	cpk	1
ganho do sensor de corrente	H_i	20
ganho do sensor de tensão	H_v	400

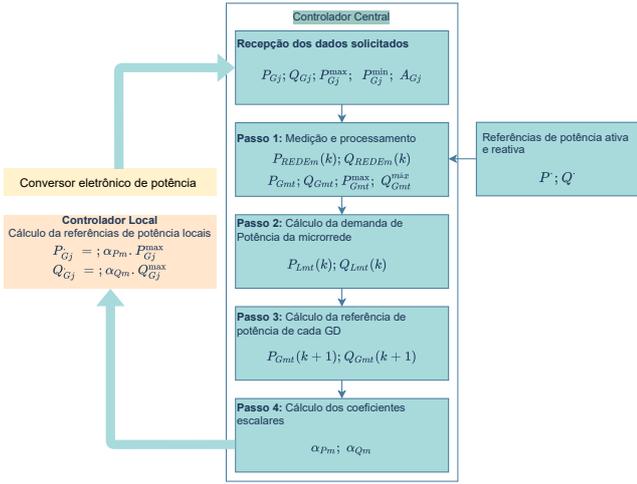


Figura 3. Estrutura de controle Hierárquico da microrrede.

$$v_o^\perp = \left[\int_0^t v_o(t) dt - \frac{1}{T} \int_{\tau-t}^t \left(\int_0^t v_o(t) dt \right) \right] \cdot \omega, \quad (4)$$

onde ω é a frequência angular da tensão v_o .

A sincronização dos conversores com as tensões do PAC é fundamental para garantir o alto desempenho dos sistemas conectados à rede (ANEEL, 2014). Devido a sua estrutura simples, boa capacidade de filtragem e adaptabilidade de frequência, neste trabalho é utilizado o *SOGI – PLL* (*Second-Order Generalized Integrator Phase Looked Loop*) do qual são obtidos os sinais $v_o(t)$ e $v_o(t)^\perp$ conforme Xu et al. (2021). A malha de potência é responsável por controlar a potência a ser injetada na microrrede, respeitando a capacidade máxima de cada conversor eletrônico e opera seguindo a referência do nível hierárquico superior, proporcionando uma operação despachável do DER. É definida por um controlador com dinâmica mais lenta do que o controlador da malha de corrente conforme Teodorescu et al. (2011). O projeto das malhas de potência é baseado conforme descrito em Buso and Mattavelli (2015) e Kathushiko (2011). As referências de potência ativa e reativa são definidas pelo controlador central, que coordena todas as unidades distribuídas para alcançar os objetivos de controle secundário, permitindo o compartilhamento proporcional de potência entre os DERs participantes da microrrede e regular o fluxo de potência no PAC. Neste contexto, cada DER contribui para a regulação do fluxo de potência na microrrede de forma proporcional conforme sua capacidade máxima.

3.2 Controle PBC

A estrutura de controle hierárquico da microrrede é vista na Figura 3.

Neste trabalho será utilizado um controlador central com o algoritmo PBC embarcado em nível de controle secundário. Uma infraestrutura de comunicação baseada no protocolo *CAN 2.0* estabelece a comunicação entre o controlador central e os geradores distribuídos na rede, que atuam como escravos. Basicamente, o controle PBC é baseado na interação entre o controlador central e os geradores distribuídos. No primeiro instante, o controlador central a cada ciclo de controle k , envia uma solicitação

de dados a todos os DERs participantes da microrrede. Estes enviam ao controlador central um pacote de dados contendo (Caldognetto, 2016):

- $P_{Gj}(k)$ - potência ativa injetada na microrrede no ciclo de controle atual (k);
- $Q_{Gj}(k)$ - potência reativa injetada/absorvida da microrrede no ciclo de controle atual (k);
- P_{Gj}^{max} - capacidade máxima disponível de potência ativa;
- P_{Gj}^{min} - capacidade máxima de armazenamento de energia (i.e., para os casos em que há elementos armazenadores de energia);
- A_{Gj} - capacidade nominal do conversor eletrônico.

O primeiro passo é calcular o fluxo de potência ativa e reativa no PAC [$P_{REDE}(k)$ e $Q_{REDE}(k)$], a partir das medições de tensões e correntes no PAC (Ferreira, 2018b). Com os dados armazenados no ciclo de controle k , o controlador central calcula a potência ativa e reativa total por fase gerada [$P_{Gmt}(k)$ e $Q_{Gmt}(k)$] pelos DERs, conforme 5 e 6 respectivamente. Também é processado pelo controle central a potência reativa máxima disponível em cada DER [$Q_{Gj}^{max}(k)$] e a potência reativa máxima por fase que pode ser injetada na microrrede [$Q_{Gmt}^{max}(k)$] conforme as equações 7 a 8 respectivamente.

$$P_{Gmt}(k) = \sum_{j=1}^J P_{Gj}(k) \quad (5)$$

$$Q_{Gmt}(k) = \sum_{j=1}^J Q_{Gj}(k) \quad (6)$$

$$Q_{Gj}^{max}(k) = \sqrt{A_{Gj}^2(k) - P_{Gj}^2(k)} \quad (7)$$

$$Q_{Gmt}^{max}(k) = \sum_{j=1}^J Q_{Gj}^{max}(k) \quad (8)$$

O segundo passo, é determinar a demanda da microrrede. Por meio da lei de Kirchhoff aplicada ao PAC, estima-se a potência ativa e reativa consumida pela microrrede no ciclo atual de controle [$P_{Lmt}(k)$ e $Q_{Lmt}(k)$] conforme 9 e 10.

$$P_{Lmt}(k) = P_{REDEm}(k) + P_{Gmt} \quad (9)$$

$$Q_{Lmt}(k) = Q_{REDEm}(k) + Q_{Gmt} \quad (10)$$

Com estes dados, são calculadas as contribuições por fase dos DERs para a demanda de potência ativa e reativa da microrrede para o próximo ciclo de controle [$P_{Gmt}(k+1)$ e $Q_{Gmt}(k+1)$], (ver equações 11 e 12).

$$P_{Gmt}^*(k+1) = P_{Lmt}(k) - P_{REDE}^*(k+1) \quad (11)$$

$$Q_{Gmt}^*(k+1) = Q_{Lmt}(k) - Q_{REDE}^*(k+1) \quad (12)$$

Após determinar a potência total consumida, a potência total injetada na microrrede e o fluxo de potência no PAC, o controlador central determina os coeficientes escalares (α_{Pm} e β_{Qm}) de referência para as malhas de controle de potência dos DERs conforme o algoritmo mostrado na Tabela 4. Com os coeficientes de potência determinados, o controlador central os transmite para os controladores

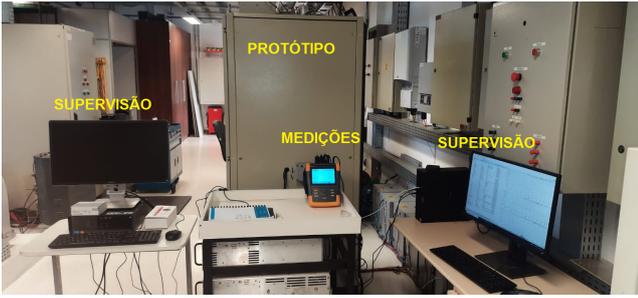


Figura 4. Protótipo da microrrede.

locais dos geradores distribuídos e estes se encarregam de converter para a referência de potência conforme a Tabela 5 em seus DSPs (Ferreira et al., 2019).

Tabela 4. Algoritmo do controlador central.

Condição	Coefficientes
$P_{Gmt}^*(k+1) < 0$	$\alpha_{Pm} = -1$
$0 \leq P_{Gmt}^*(k+1) \leq P_{Gmt}^{max}(k)$	$\alpha_{Pm} = \frac{P_{Gmt}^*(k+1)}{P_{Gmt}^{max}(k)}$
$P_{Gmt}^*(k+1) > P_{Gmt}^{max}(k)$	$\alpha_{Pm} = 1$
$-Q_{Gmt}^{max}(k) \leq Q_{Gmt}^*(k+1) \leq Q_{Gmt}^{max}(k)$	$\beta_{Qm} = \frac{Q_{Gmt}^*(k+1)}{Q_{Gmt}^{max}(k)}$

Tabela 5. Referência de potência para os DERs.

Coefficientes	Referência de potência
$\alpha_{Pm} \geq 0$	$P_{Gj}^*(k+1) = \alpha_{Pm} \cdot P_{Gj}^{max}$
$\alpha_{Pm} < 0$	$P_{Gj}^*(k+1) = 0$
$-1 \leq \beta_{Qm} \leq 1$	$Q_{Gj}^*(k+1) = \beta_{Qm} \cdot Q_{Gj}^{max}$

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

A estratégia de controle proposta foi validada através da modelagem e simulação da microrrede utilizando o software PLECS versão 4.1.2 e os dados tratados no Matlab. Foi construído um protótipo experimental exibido na Figura 4 para validação da estratégia de controle proposta. Este protótipo foi construído no laboratório LCGE (Laboratório de Geração e Conversão de Energia) na Universidade Federal de Itajubá, campus Itabira-MG em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, onde os detalhes podem visualizados na Figura 5.

A conexão da microrrede com a rede principal é através de um transformador de distribuição conforme a Figura 1. O disjuntor D_1 faz a proteção e o seccionamento da rede. Os elementos D_2 a D_7 são contadores eletromecânicos



Figura 5. Elementos da microrrede.

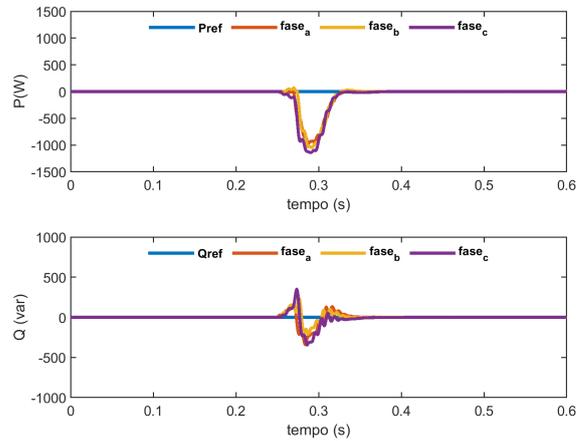


Figura 6. Controle do fluxo de potência ativa e reativa na rede.

comandados pelo sistema de supervisão. As fontes e cargas são manipuladas pelo painel elétrico de forma a permitir a análise do sistema de controle mediante inserção e retirada súbita de carga. Para o controle e supervisão em tempo real, é utilizada a plataforma de hardware Raspberry PI com o módulo de rede CAN BUS SN65HVD230.

4.1 Resultados de simulação

Os resultados de simulação do controle do fluxo de potência ativa e reativa no PAC com a conexão súbita de uma carga é apresentado na Figura 6.

Conforme exibido na Figura 6, no instante $t = 0,27$ s, ocorre a conexão súbita de uma carga, a qual absorve $1000+j500$ VA/fase. Enquanto a geração distribuída não entra, a rede c.a. fornece a demanda solicitada pela microrrede. Em seguida a geração distribuída é acionada e o algoritmo PBC controla o fluxo de potência ativa no PAC, de modo que em regime permanente os valores de potência ativa e reativa são iguais a zero conforme a referência [$P_{REDE}^* = 0$ e $Q_{REDE}^* = 0$]. As Figuras 7 e 8 mostram o compartilhamento de potência entre os DERs. Em regime

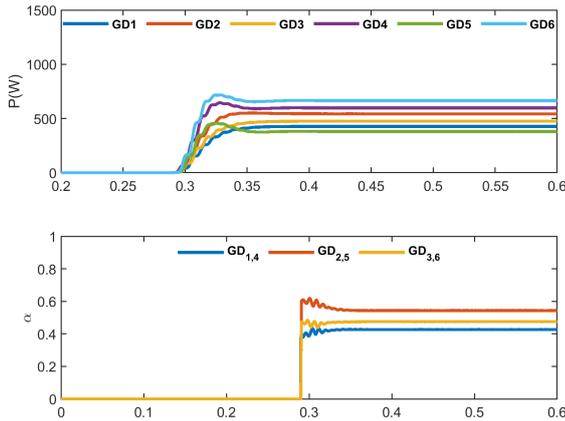


Figura 7. Compartilhamento de potência ativa entre os DERs e coeficientes escalares.

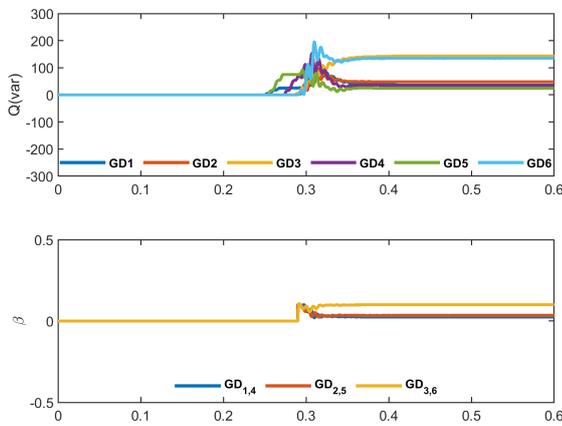


Figura 8. Compensação de reativos no PAC e coeficientes escalares.

permanente os coeficientes escalares α_{P_m} são $[\alpha_{P1} = 0,42, \alpha_{P2} = 0,54, \alpha_{P3} = 0,47]$ e β_{Q_m} iguais a $[\beta_{Q1} = 0,025, \beta_{Q2} = 0,034, \beta_{Q3} = 0,1]$. As Tabelas 6 e 9 apresentam os valores de potência ativa e reativa injetada na rede em regime permanente, respectivamente.

Tabela 6. Fluxo de potência ativa em regime permanente.

Ativo	Conexão	$P_{G_j}^{max}(W)$	$P_{G_j}(W)$
DER ₁	V_{an}	1000	426,95
DER ₂	V_{bn}	1000	543,22
DER ₃	V_{cn}	1000	474,84
DER ₄	V_{ab}	1400	597,64
DER ₅	V_{bc}	700	380,14
DER ₆	V_{ca}	1400	664,75
Carga	PAC	3000	-

4.2 Resultados experimentais

Após a validação da técnica de controle em ambiente de simulação, foi implementado o protótipo experimental exibido na Figura 4. A Figura 9 mostra a corrente de saída do conversor DER1 para uma referência de potência ativa igual à 700 W enquanto a referência de potência reativa

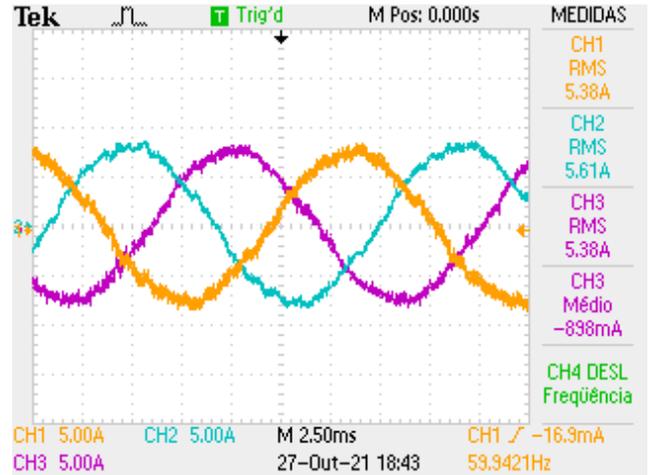


Figura 9. Corrente na saída dos DERs.

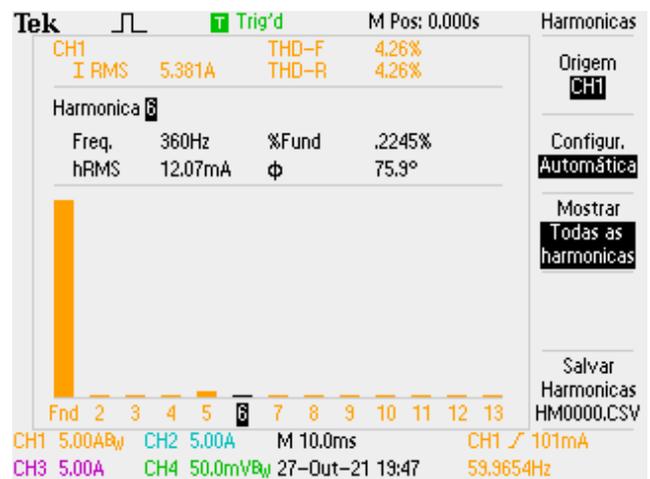


Figura 10. Espectro de frequências da corrente de saída do conversor DER1.

é mantida igual à 0 var. Nota-se o funcionamento efetivo da malha de corrente, na qual a corrente injetada na rede segue a corrente de referência estabelecida pela malha de potência. A Figura 10 exibe o espectro de frequências dos harmônicos presentes na corrente de saída do conversor. A corrente apresenta uma taxa de distorção harmônica total de 4,26%, ou seja, dentro dos limites determinados pela norma IEEE Std 1547 (2018), que determina que em condições nominais, a distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5%.

As Figuras 11 e 12 mostram o fluxo de potência ativa e reativa no PAC. No instante da conexão, a referência de potência ativa e reativa na rede são iguais a zero (i.e.

Tabela 7. Fluxo de potência reativa em regime permanente.

Ativo	$Q_{G_j}^{max}(var)$	$Q_{G_j}(var)$
DER ₁	1437,95	34,36
DER ₂	1398,18	48,33
DER ₃	1422,85	143,03
DER ₄	1375,80	34,37
DER ₅	703,91	24,38
DER ₆	1344,65	135,31
Carga	1500	-

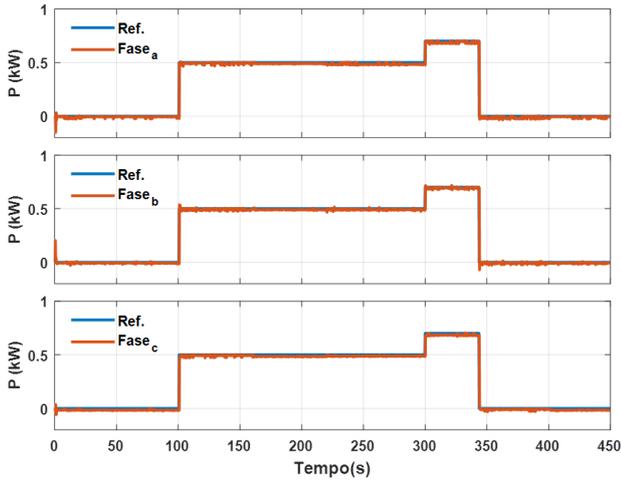


Figura 11. Fluxo de potência ativa no PAC.

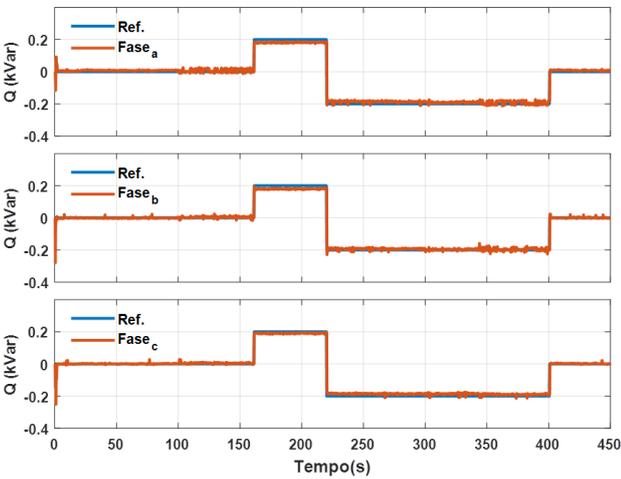


Figura 12. Fluxo de potência reativa no PAC.

$P_{REDE}^* = 0$ e $Q_{REDE}^* = 0$). Observa-se que os conversores injetam uma parcela de potência ativa na microrrede para suprir as perdas desta e absorvem a potência reativa capacitiva da microrrede devido a presença dos capacitores de filtro dos conversores. No instante $t = 100$ s, a referência de potência ativa no PAC recebe um comando em degrau para 500 W e permanece até o instante $t = 300$ s.

Na Figura 13 é mostrado o compartilhamento proporcional de potência ativa entre os DERs. Em $t = 160$ s, a referência de potência reativa recebe um comando em degrau de 200 var, então os DERs começam a injetar potência reativa de modo proporcional conforme indicado na Figura 14 e a rede passa a absorver tanto a potência ativa quanto a reativa. No instante $t = 220$ s, a referência de potência reativa recebe um comando de -200 var e a rede passa a fornecer potência reativa e absorver potência ativa. Verifica-se a versatilidade do sistema de controle, na qual pode-se regular o fluxo de potência ativa e reativa no PAC em ambos sentidos, a depender das necessidades locais da microrrede e da concessionária. O sinal positivo indica potência ativa ou reativa fluindo dos DERs para a rede elétrica c.a., enquanto o sinal negativo, indica o contrário. As Tabelas 8 e 9 e indicam os valores de potência ativa e

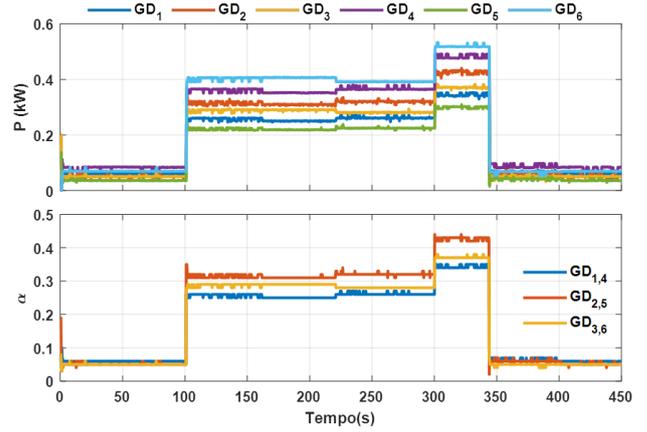


Figura 13. Compartilhamento de potência ativa entre os DERs.

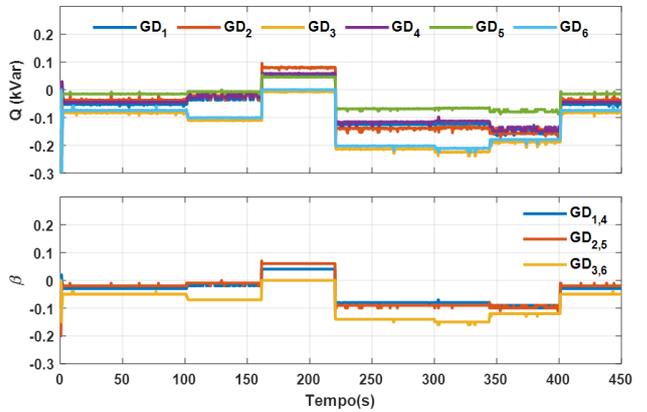


Figura 14. Compartilhamento de potência reativa entre os DERs.

reativa de cada DER conforme a referência de potência no PAC e seus respectivos coeficientes escalares de referência.

Tabela 8. Fluxo de potência ativa em regime permanente.

$P_{REDE}^* (W)$	0	500	700
DER_1	61	259	349
DER_2	49	321	430
DER_3	51	283	370
DER_4	84	351	476
DER_5	84	364	476
DER_6	69	407	518
α_{P1}	0,06	0,26	0,34
α_{P2}	0,05	0,32	0,43
α_{P3}	0,05	0,29	0,37

5. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs estudar e investigar o controle de uma microrrede regulando adequadamente os DERs disponíveis. Estes DERs compartilham o único barramento c.c. de forma a não restringir as análises a um campo de aplicação específico uma vez que o conversor é o responsável pela interface entre a fonte de geração primária e a rede c.a. seja qual for a mesma. É apresentado o algoritmo PBC para coordenar a contribuição da potência injetada pelos DERs para o objetivo de regular o fluxo de potência no

PAC entre a rede de distribuição e a microrrede. O controle dos DERs é feito por meio de um algoritmo de controle, que realiza o processamento do *status* da microrrede e suas necessidades e determina os valores que cada DER participante da microrrede irá contribuir de forma proporcional às suas capacidades disponíveis. O algoritmo PBC, garante em regime permanente, uma potência ativa e reativa estável seguindo a referência e permite o compartilhamento proporcional de potência entre os DERs. De acordo com a necessidade da concessionária, a operação da microrrede pode operar injetando ou absorvendo potência ativa e realizar a compensação de reativos. Em momentos de super-geração, o excedente pode ser despachado de forma controlada para rede suprindo as necessidades locais. A técnica de controle foi validada através da construção de um protótipo experimental em escala de laboratório onde permitiu verificar a eficácia da técnica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio das agências FAPEMIG e CAPES e do suporte financeiro do CNPQ através do projeto 436213/2018-4. Também agradecemos à Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, onde foram realizados os experimentos.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, C.T. (2014). Micro e minigeração distribuída. *Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, DF, Brasil: Centro de Documentação-Cedoc.*
- Bellido, M.M.H. (2018). *Microrredes elétricas: uma proposta de implementação no Brasil.* Ph.D. thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Bidram, A. and Davoudi, A. (2012). Hierarchical structure of microgrids control system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1963–1976. doi:10.1109/tsg.2012.2197425.
- Buso, S. and Mattavelli, P. (2015). Digital control in power electronics. *Synthesis Lectures on Power Electronics*, 5(1), 1–229.
- Caldognetto, T. (2016). *Control of electronic power converter for low-voltage microgrids.* Ph.D. thesis, University of Padova.
- Caldognetto, T., Buso, S., Tenti, P., and Brandao, D.I. (2015). Power-based control of low-voltage microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(4), 1056–1066. doi:10.1109/jestpe.2015.2413361.
- da Silva, R.C. (2020). *Estudo e Desenvolvimento de um Conversor Formador de Rede Multiterminal.* mthesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Ferreira, W.M. (2018a). *Abordagem multiobjetivo para o controle do fluxo de potência e melhorias na qualidade de energia de uma microrrede de baixa tensão.* Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Ferreira, W.M., Brandão, D.I., M, S.S., Alondo, A.M., and Marafão, F.P. (2019). Otimização multiobjetivo aplicada ao controle centralizado de uma microrrede de baixa tensão: controle do fluxo de potência e compensação de desbalanço. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, volume 1.
- Ferreira, W.M. (2018b). *Abordagem multiobjetivo para o controle do fluxo de potência e melhorias na qualidade de energia de uma microrrede de baixa tensão.* Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- IEEE Std 1547 (2018). Ieee standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces. *IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003)*, 1–138. doi:10.1109/IEEESTD.2018.8332112.
- Júnior, F.M.P. (2018). *Análise da interoperabilidade de sistemas de comunicações móveis na operação e controle resiliente de microrredes.* Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- Kathushiko, O. (2011). Engenharia de controle moderno. 5ª edição. *Editora LTC.*
- Monshizadeh, P., Persis, C., Monshizadeh, N., and Schaft, A. (2015). A communication-free master-slave microgrid with power sharing.
- Morstyn, T., Hredzak, B., and Agelidis, V.G. (2015). Distributed cooperative control of microgrid storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(5), 2780–2789. doi:10.1109/tpwrs.2014.2363874.
- Nordman, B. and Christensen, K. (2015). DC local power distribution with microgrids and nanogrids. In *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*. IEEE. doi:10.1109/icdcm.2015.7152038.
- Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., and Rodríguez, P. (2012). Control of power converters in ac microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(11), 4734–4749. doi:10.1109/TPEL.2012.2199334.
- Setiawan, M.A., Shahnian, F., Rajakaruna, S., and Ghosh, A. (2015). ZigBee-based communication system for data transfer within future microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(5), 2343–2355. doi:10.1109/tsg.2015.2402678.
- Tenti, P., Paredes, H.K.M., and Mattavelli, P. (2010). Conservative power theory, a framework to approach control and accountability issues in smart microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(3), 664–673.
- Teodorescu, R., Liserre, M., and Rodriguez, P. (2011). *Grid converters for photovoltaic and wind power systems.* John Wiley & Sons.
- Vitorino, M.A. (2019). *Eletrônica de potência: conceitos e aplicações.* Curitiba, 1 edition.
- Xu, J., Qian, H., Hu, Y., Bian, S., and Xie, S. (2021). Overview of sogi-based single-phase phase-locked loops for grid synchronization under complex grid conditions. *IEEE Access*, 9, 39275–39291. doi:10.1109/ACCESS.2021.3063774.

Tabela 9. Fluxo de potência rativa em regime permanente.

$Q_{REDE}^*(var)$	0	200	-200
DER_1	-54	51	-125
DER_2	-38	80	-139
DER_3	-82	-7	-205
DER_4	-44	57	-115
DER_5	-16	45	-68
DER_6	-75	0	-201
α_{Q1}	-0,03	0,04	-0,08
α_{Q2}	-0,02	0,06	-0,09
α_{Q3}	-0,05	0	-0,14