

Controlador secundário distribuído *fuzzy* consenso aplicado em uma microrrede CA ilhada

Lucas Jonys R. Silva * Rodolpho V. A. Neves ** Vilma A. Oliveira *
Ricardo Q. Machado *

* Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador Sancarlense, 400. São Carlos, São Paulo, Brasil (e-mail: lucasjonys,voliveira,rquadros@usp.br)

** Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n. Viçosa, Minas Gerais, Brasil (e-mail: rodolpho.neves@ufv.br)

Abstract: To correct the frequency and voltage deviations in the buses of an islanded AC microgrid (MG), generated by the droop control, and to achieve precision in the reactive power sharing between the distributed generation (DG) units, this work proposes a distributed fuzzy consensus secondary controller (FCSC), composed by a fuzzy controller (FC) in association with a consensus-based strategy (CBS). The FC is used in each unit to correct deviations in frequency and voltage, using local measurements. The CBS is composed by two algorithms that aim for precision in reactive power sharing. Through a narrowband communication channel, the units exchange reactive power information with neighboring. Simulation results are presented to validate the strategy in a MG composed by four units. The proposed FCSC reduces the frequency and voltage deviations and achieves the accuracy in the reactive power sharing for connection and disconnection of loads on the MG buses.

Resumo: Para corrigir os desvios de frequência e tensão nos barramentos de uma microrrede (MR) CA ilhada, gerados pelo controle em *droop*, e atingir precisão no compartilhamento de potência reativa entre as unidades de geração distribuída (GD), este trabalho propõe um controlador secundário distribuído *fuzzy* consenso (CSFC), composto por um controlador *fuzzy* (CF) em associação à uma estratégia baseada em consenso (EBC). O CF é utilizado em cada unidade para correção dos desvios de frequência e tensão, fazendo uso de medições locais. A EBC é composta por dois algoritmos que visam a precisão no compartilhamento de potência reativa. Através de um canal de comunicação de banda estreita, as unidades trocam informação de potência reativa com as vizinhas. Resultados de simulação são apresentados para validar a estratégia em uma MR composta por quatro unidades. O CSFC proposto reduz os desvios de frequência e tensão e alcança a precisão no compartilhamento de potência reativa para eventos de conexão e desconexão de cargas nos barramentos da MR.

Keywords: AC Microgrid; distributed secondary control; reactive power sharing; droop control; consensus based strategy.

Palavras-chaves: Microrrede CA; controle secundário distribuído; compartilhamento de potência reativa; controle droop; estratégia baseada em consenso.

1. INTRODUÇÃO

A associação de geradores distribuídos (GDs), cargas locais e sistemas de armazenamento em um conjunto controlável, operando isolado ou conectado à rede de distribuição (RD), recebe o nome de microrrede (MR) (Mohiuddin e Qi, 2019). Quando isolada da RD, as GDs que compõem a MR devem compartilhar a carga demandada, sendo o controle em *droop* amplamente utilizado por não requerer comunicação entre as GDs. Além disso, estabilização de

frequência e tensão são alcançados por meio dos controladores *droop* (He et al., 2014; Wang et al., 2020).

Todavia, um problema inerente ao uso do *droop* é a dependência da carga, o que leva a desvios de tensão e frequência que não podem ser corrigidos nesse nível de controle (Mohiuddin e Qi, 2019). Além disso, o controle em *droop* não atinge precisão no compartilhamento de potência reativa entre as unidades (Rey et al., 2017; Wang et al., 2020). Assim, um nível de controle superior, chamado nível secundário, deve ser aplicado para corrigir os desvios de frequência e tensão gerados e melhorar a distribuição de potência entre as unidades. Essa estrutura subdividida em camadas é conhecida como controle hierárquico (CH).

Cada nível do CH possui suas funções bem definidas e realizam troca de informação entre si. Buscando reduzir

* O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, Programa INCT nº 88887.505861/2020-00 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq) - Processo nº 305892/2017-7.

os *links* de comunicação através da operação e controle da MR apenas com medições locais, algoritmos baseados em lógica *fuzzy* têm sido implementados em função de sua simplicidade e facilidade de gerenciamento de múltiplas variáveis (Bevrani e Shokoohi, 2013). Em Neves et al. (2018) é proposto um controlador secundário centralizado *fuzzy* multitarefa para gerenciamento de uma MR CA com duas GDs operando em paralelo em modo de ilha-mento e conectada à RD. A estratégia permite eliminar o chaveamento entre os níveis secundário e terciário por meio da atuação multitarefa da lógica *fuzzy*. Todavia, a estratégia de controle é centralizada. Além disso, a precisão no compartilhamento de potencia reativa não foi abordada.

O nível secundário também é utilizado para compartilhar de forma precisa a potência reativa entre as unidades. Em Han et al. (2017); Alsafran e Daniels (2020), por meio de técnicas distribuídas baseadas em consenso, as GDs trocam informações com as vizinhas por meio de um canal de comunicação para atingirem o consenso em relação à potência reativa. Wang et al. (2020) usam uma estratégia de consenso para garantir correção dos desvios gerados pelo *droop* e precisão no compartilhamento de potência reativa por meio de sinais de correção que são adicionados ao controle primário. Todavia, cada GD envia na rede de dados informação de suas potências, frequências e tensões, sendo requerido um canal de banda larga.

Estratégias que agregam a lógica *fuzzy* e a técnica de consenso são encontradas na literatura. Em Eskandari et al. (2019), um controlador *fuzzy* consenso é aplicado para melhorar o compartilhamento de potência através de um protocolo que incorpora a razão X/R das linhas no controle em *droop* por meio de coeficientes definidos pela lógica *fuzzy*. Contudo, informação de tensões das GDs são compartilhadas na rede de dados, o que requer maior banda de comunicação.

Nesse sentido, este trabalho propõe um controlador *fuzzy* (CF) distribuído associado à uma estratégia baseada em consenso (EBC) denotado controlador secundário *fuzzy* consenso (CSFC). Para corrigir os desvios de tensão e frequência gerados pelo *droop* no nível primário, o CF faz uso de apenas medições locais de tensão, frequência, potência ativa e reativa. A lógica *fuzzy* é aplicada devido à sua capacidade de lidar de forma simultânea com um grande número de variáveis, possibilitando a sintetização de uma estrutura complexa, como o controle de MRs. A EBC é composta por dois algoritmos para atingir a precisão no compartilhamento de potência reativa entre as unidades através de um canal de banda estreita, comunicando apenas as potências reativas das unidades de GD. A operação do CSFC é verificada por meio de simulações em Matlab/Simulink.

2. PRELIMINARES

Para corrigir os desvios de tensão e frequência gerados pelo *droop* e obter precisão no compartilhamento de potência reativa, este trabalho apresenta uma estrutura de CH distribuída. Dividida em nível primário, secundário e terciário, os objetivos de controle podem ser alcançados agregando as funções individuais de cada nível.

2.1 Nível de controle primário

Para promover a estabilização da tensão e frequência do sistema e o compartilhamento de potência entre as unidades sem depender de comunicação, o controle em *droop* convencional é usado no nível primário (Mohiuddin e Qi, 2019; Wang et al., 2020). Sua operação ocorre por meio da subtração de partes proporcionais às potências ativa e reativa médias na frequência e tensão de referência, respectivamente (Guerrero et al., 2010).

Para uma MR com impedância de linha indutiva, há uma relação negativa entre frequência e potência ativa, e entre magnitude de tensão e potência reativa, definidas, respectivamente, pelas constantes m e n , chamadas de coeficientes *droop* (Rey et al., 2017):

$$\omega = \omega_o - mP, \quad (1)$$

$$E = E_o - nQ. \quad (2)$$

A técnica de compartilhamento de potência em *droop* possui a desvantagem de gerar desvios de frequência e tensão em eventos de conexão e desconexão de cargas (Mohiuddin e Qi, 2019), sendo o nível de controle secundário aplicado para correção.

2.2 Nível de controle secundário

A restauração da frequência para seu valor nominal pode ser realizada com precisão pelo nível secundário, diferentemente da restauração de tensão (Rey et al., 2017). Isso acontece pois, quando deseja-se regular a tensão de todos os barramentos em uma referência global, a distribuição de potência reativa é piorada nas linhas de impedância indutiva, uma vez que é necessário uma diferença de amplitude de tensões para que haja fluxo de potência reativa (He et al., 2014). Para contornar este problema, podem ser utilizadas estruturas de controle que operam no nível secundário através da comunicação entre as GDs estabelecida por meio de grafos, como em Bidram et al. (2014).

Definição 1. (Grafo). Um grafo é descrito por um conjunto $\mathcal{G} = \{V, \mathcal{E}, \mathcal{A}\}$ composto por k nós $V = \{v_1, \dots, v_k\}$ conectados por um conjunto de arestas $\mathcal{E} \subset V \times V$. A aresta que conecta um nó i a um nó j é $\mathcal{E}_{i,j} = (v_i, v_j)$, representando que o nó i recebe informação do nó j .

Definição 2. (Matriz de adjacência). A matriz $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in R^{k \times k}$ é chamada de matriz de adjacência com $a_{ij} = 1$ se o nó i recebe informação do nó j ou $a_{ij} = 0$, caso contrário.

Definição 3. (Vizinhos de um nó i). O conjunto de vizinhos de um nó i é descrito por $\mathcal{N}_i = \{j \mid (v_i, v_j) \in \mathcal{E}\}$ e a quantidade de vizinhos do nó i é dada pela matriz diagonal de grau $\mathcal{D} = \text{diag}\{d_{ii}\} \in R^{k \times k}$ tal que

$$d_{ii} = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}. \quad (3)$$

Se partindo de qualquer nó de um grafo for possível atingir qualquer outro nó, de forma direta ou por meio de outros nós e arestas, o grafo é dito conexo. Caso contrário, é dito desconexo (Bidram et al., 2014).

Neste trabalho, um controlador secundário de frequência e de tensão é implementado por meio de um processo de inferência *fuzzy* e o compartilhamento de potência reativa é regulado por uma estratégia baseada em consenso, descritos a seguir.

3. CONTROLADOR FUZZY SECUNDÁRIO BASEADO EM CONSENSO

A estrutura física de uma GD da MR com o CSFC proposto é exibida na Fig. 1. O CF empregado segue a estrutura desenvolvida por Neves et al. (2018) na forma centralizada para corrigir os desvios de frequência e tensão. Contudo, uma modificação neste trabalho é que cada unidade da MR possui seu CF. Por meio de medições locais de tensão, frequência, potência ativa e reativa, os desvios gerados no nível primário podem ser corrigidos. A estrutura do CF é formada por ganhos de entrada e controladores de saída, conforme exibido na Fig. 2.

3.1 Entradas e saídas da inferência fuzzy

O processo de inferência *fuzzy* do CF possui seis entradas e duas saídas. As entradas são os erros e os gradientes de frequência e tensão, representados respectivamente por e_ω , e_E , d_ω e d_E , além do erro de potência ativa e_P e o erro de potência reativa e_Q . As saídas são definidas como incrementos de frequência e tensão representados por Δ_{ω_2} e Δ_{E_2} , respectivamente.

As entradas e_ω e e_E são os desvios de frequência e tensão no barramento da GD, dados por (Neves et al., 2018):

$$e_\omega = K_{e\omega}(\omega_{ref} - \omega), \quad (4)$$

$$e_E = K_{eE}(E_{ref} - E) \quad (5)$$

sendo $K_{e\omega}$ e K_{eE} ganhos de entrada para tais variáveis.

As entradas d_ω e d_E são os gradientes de frequência e tensão que visam impedir que o CF atue de forma mais rápida que o controlador *droop* pode sintetizar. Os ganhos de entrada são $K_{d\omega}$ e K_{dE} , e T_{FPB} é a constante de tempo dos filtros passa-baixa para atenuar os ruídos de alta frequência do gradientes. Matematicamente:

$$d_\omega = G_{d\omega}\omega = K_{d\omega} \frac{s\omega}{1 + sT_{FPB}}, \quad (6)$$

$$d_E = G_{dE}E = K_{dE} \frac{sE}{1 + sT_{FPB}}. \quad (7)$$

As entradas erro de potência ativa e_P e erro de potência reativa e_Q são definidas por (Neves et al., 2018):

$$e_P = K_{eP}(P_{ref} - P), \quad (8)$$

$$e_Q = K_{eQ}(Q_{ref} - Q) \quad (9)$$

sendo K_{eP} e K_{eQ} ganhos para normalização destas no universo de discurso.

As saídas Δ_{ω_2} e Δ_{E_2} do processo de inferência *fuzzy* são processadas, respectivamente, por $G_{CF,\omega}$ e $G_{CF,E}$, controladores de saída constituídos de filtros passa-baixas e termo integral que produzem os sinais ω_2 e E_2 :

$$\omega_2 = G_{CF,\omega}\Delta_{\omega_2}, \quad (10)$$

$$E_2 = G_{CF,E}\Delta_{E_2}. \quad (11)$$

Os sinais ω_2 e E_2 são adicionados ao controlador *droop* em (1) e (2) para correção dos desvios. As funções de pertinência para as entradas e saídas do CF bem como as regras do processo de inferência são analisadas em Neves et al. (2018).

Para redução do custo computacional do CF, foi criada uma tabela de verificação com todos valores de intervalo

possíveis para a combinação das entradas e saídas. Assim, a lógica *fuzzy* é reduzida a um algoritmo de consulta em tabela. Para cada combinação das entradas um valor de saída é encontrado em seu respectivo índice na tabela (*lookup table*), ao invés de verificar todas as 108 regras para cada vetor de entrada (Neves et al., 2018).

A técnica do consenso permite a convergência de todas as unidades para um acordo comum a respeito de uma variável (He et al., 2014). Utilizando os conceitos da teoria de sistemas multiagentes, cada GD é vista como um agente com seus objetivos de controle individuais, comunicando-se apenas com as unidades vizinhas (Bidram et al., 2014). Cada arquitetura de comunicação possui uma estrutura característica associada conhecida como grafo, descrita na Seção 2.

3.2 Compartilhamento baseado em consenso

O compartilhamento preciso de potência ativa entre as GDs é garantido pelo controlador *droop* por meio de medições locais, pois a frequência é uma variável global da MR (Rey et al., 2017). Todavia, como a tensão é uma variável local, variações de tensão ao longo da MR afetam a distribuição de potência reativa (Mohiuddin e Qi, 2019). Além disso, o *droop* $Q - E$ é muito sensível ao desbalanceamento das linhas (Han et al., 2017).

Assim, para alcançar a precisão no compartilhamento de potência reativa é empregada a estratégia de consenso EBC, composta por dois algoritmos que atuam em conjunto. A demanda de potência reativa deve ser dividida entre as GDs conforme a capacidade de geração de cada uma delas. Para uma MR composta por k GDs, é necessário que (Lu e Chu, 2015):

$$\frac{Q_1}{Q_1^*} = \frac{Q_2}{Q_2^*} = \dots = \frac{Q_k}{Q_k^*} \quad (12)$$

sendo Q_i a potência reativa fornecida e Q_i^* a potência reativa nominal da i -ésima GD ($\forall i = 1 : k$). Como os coeficientes *droop* são escolhidos com base na potência nominal da GD, pode-se reescrever (12) como (Eskandari et al., 2019; Alsafran e Daniels, 2020):

$$n_1Q_1 = n_2Q_2 = \dots = n_kQ_k \quad (13)$$

sendo n_i o coeficiente *droop* de tensão da i -ésima unidade GD. O produto nQ é chamado de razão de compartilhamento de potência reativa e, analogamente, o produto mP em (1) é a razão de compartilhamento de potência ativa. Assim, o erro de compartilhamento de potência reativa para cada GD em relação ao conjunto de vizinhas \mathcal{N}_i modelado por um grafo conexo é (Alsafran e Daniels, 2020):

$$e_{Qi} = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(n_iQ_i - n_jQ_j). \quad (14)$$

O primeiro algoritmo da EBC processa o erro em (14) por controladores PID para gerar o sinal de controle δ_{EQ} que, por sua vez, é adicionado ao *droop* de tensão. Logo, as equações do *droop* em (1) e (2) após adição dos sinais do CF e do primeiro algoritmo da EBC ficam:

$$\omega = \omega_o - mP + \omega_2, \quad (15)$$

$$E = E_o - nQ + E_2 + \delta_{EQ}. \quad (16)$$

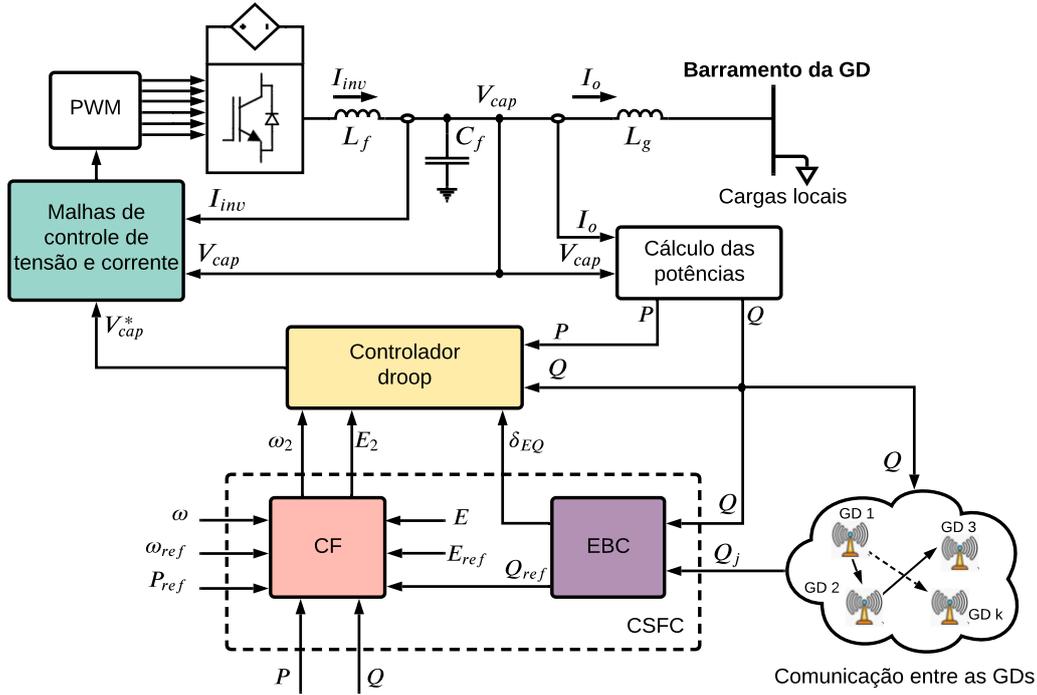


Figura 1. Estrutura de cada GD da MR com o controlador CSFC proposto. A informação da potência reativa Q_j das GDs vizinhas é recebida pela rede de dados modelada por um grafo, que define quais unidades comunicam entre si.

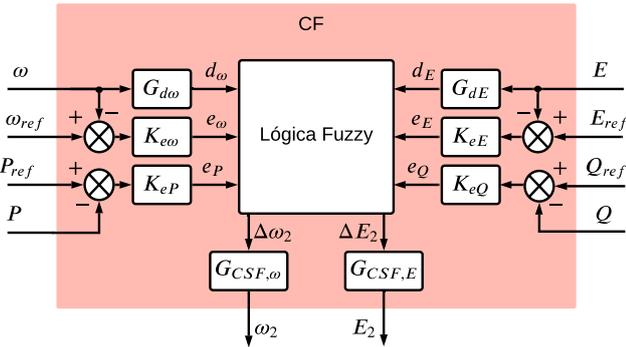


Figura 2. Controlador fuzzy.

O segundo algoritmo da EBC fornece ao CF a potência reativa de referência Q_{ref} . Busca-se zerar o erro em (14):

$$\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (n_i Q_i - n_j Q_j) = 0, \quad (17)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} n_i Q_i - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} n_j Q_j = 0, \quad (18)$$

$$n_i Q_i \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} n_j Q_j = 0. \quad (19)$$

Substituindo (3) em (19) obtém-se:

$$n_i Q_i d_{ii} - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} n_j Q_j = 0. \quad (20)$$

Logo, a potência reativa de referência da i -ésima GD a ser utilizada no CF é definida por:

$$Q_{ref} = \frac{1}{d_{ii}} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \frac{n_j Q_j}{n_i}. \quad (21)$$

Para uma MR genérica composta por k GDs, (14) e (21) podem ser escritos como:

$$[eQ]_{k \times 1} = -([D]_{k \times k} - [A]_{k \times k}) [N]_{k \times k} [Q]_{k \times 1}, \quad (22)$$

$$[Q_{ref}]_{k \times 1} = [D]_{k \times k}^{-1} [N]_{k \times k}^{-1} [A]_{k \times k} [N]_{k \times k} [Q]_{k \times 1} \quad (23)$$

sendo

$$[eQ]_{k \times 1} = [eQ_1, \dots, eQ_k]^T, \quad (24)$$

$$[Q_{ref}]_{k \times 1} = [Q_{ref1}, \dots, Q_{refk}]^T, \quad (25)$$

$$[N]_{k \times k} = \text{diag} \{n_1, \dots, n_k\}, \quad (26)$$

$$[Q]_{k \times 1} = [Q_1, \dots, Q_k]^T. \quad (27)$$

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção, o controlador proposto tem sua operação verificada por meio de simulações para uma MR composta por quatro GDs, como exibido na Fig. 3. Os parâmetros elétricos gerais do sistema são exibidos na Tabela 1.

O grafo utilizado é conexo e é exibido na Fig. 4. O canal de comunicação utilizado é de banda estreita, pois comunica-se apenas de potência reativa entre as GDs, uma variável lenta em virtude dos filtros de potência do nível primário.

Dois casos gerais serão verificados a seguir. Primeiramente, todo nível secundário estará desligado, operando apenas o nível primário. No segundo caso o CSFC estará ativado. Conexões e desconexões de cargas nos barramentos das GDs serão realizadas conforme a Tabela 2. A potência nominal total de todas as cargas é de 20,2 kW - 9,4 kVar - 22,3 kVA. Para todo o sistema, a potência de base é $S_n = 2,2$ kVA.

Foram calculados os erros relativos médios (%) para frequência (E_ω) e para tensão (E_E) em relação ao valores

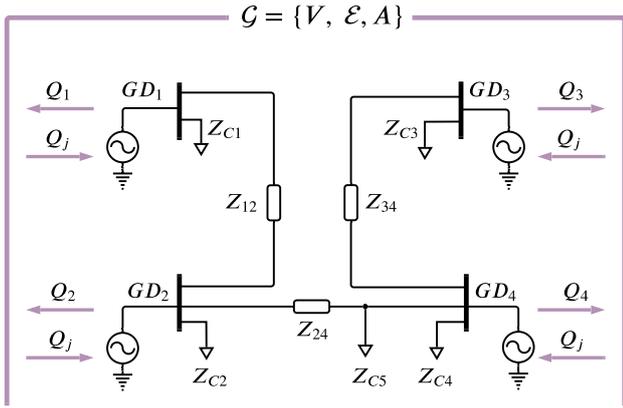


Figura 3. Estrutura física da MR e comunicação entre as unidades. As potências reativas são comunicadas através da rede de dados, modelada pelo grafo \mathcal{G} .

Tabela 1. Parâmetros elétricos da MR

Parâmetro	Símbolo	Valor
Amplitude da tensão de referência	E_o	311 V
Frequência angular de referência	ω_o	$2\pi 60 \text{ rad/s}$
Frequência dos filtros de potência	ω_c	$2\pi 10 \text{ rad/s}$
Indutor do filtro LCL de saída	L_f	1,5 mH
Capacitor do filtro LCL de saída	C_f	20 μF
Indutor de acoplamento	L_g	1,3 mH
Impedância total das linhas (com impedância virtual)	Z_{12}	$0,16 + j3,83 \Omega$
	Z_{24}	$0,13 + j3,85 \Omega$
	Z_{34}	$0,15 + j3,84 \Omega$
Cargas	Z_{C1}	$20 + j12,06 \Omega$
	Z_{C2}	30 Ω
	Z_{C3}	50 Ω
	Z_{C4}	$25 + j15,46 \Omega$
	Z_{C5}	$20 + j24,13 \Omega$

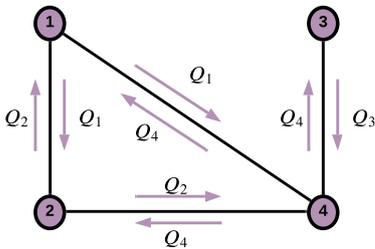


Figura 4. Grafo conexo para modelagem da rede de dados da EBC. As arestas de comunicação são bidirecionais.

Tabela 2. Conexão e desconexão das cargas

	Tempo (s)				
	Z_{C1}	Z_{C2}	Z_{C3}	Z_{C4}	Z_{C5}
Conexão	1	2	8	12	6
Desconexão	—	4	10	—	—

de referência ω_o e E_o dados, respectivamente, por:

$$E_\omega (\%) = \frac{|\omega_o - \omega_i|}{\omega_o} * 100, \quad E_E (\%) = \frac{|E_o - E_i|}{E_o} * 100. \quad (28)$$

4.1 CSFC desativado

Os resultados para a operação da MR sem o CSFC são exibidos na Fig. 5. Os desvios gerados pela conexão e desconexão de cargas não são corrigidos. Os erros relativos

médios de frequência e tensão são apresentados nas duas primeiras colunas da Tabela 3.

Na Fig. 6 são apresentadas as razões de compartilhamento mP e nQ . Note que o compartilhamento de potência ativa entre as unidades neste cenário apresentou-se preciso. Todavia, como as razões nQ das GDs não coincidem, o compartilhamento de potência reativa não atingiu a precisão.

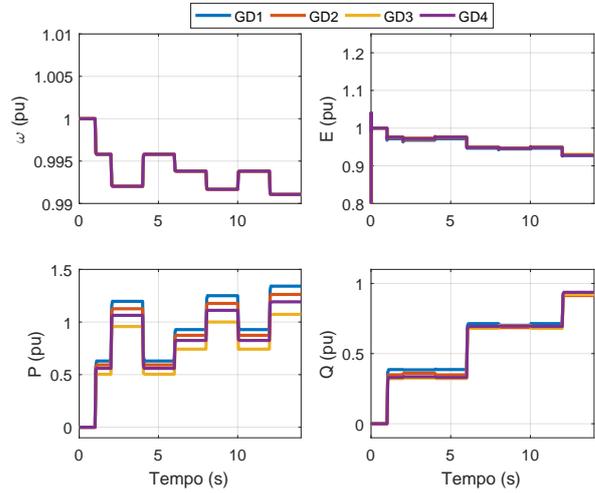


Figura 5. Frequência e tensão das GDs sem o CSFC.

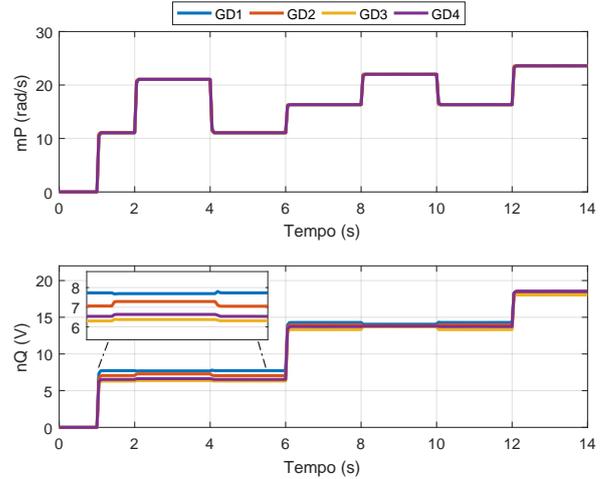


Figura 6. Razões de compartilhamento mP e nQ sem o CSFC.

4.2 CSFC ativado

Os resultados de operação da MR com o CSFC ativado são exibidos na Fig. 7. Pode-se notar que os desvios de tensão e frequência são corrigidos, sendo os erros relativos médio de frequência e tensão reduzidos em relação à operação sem seu uso, como exibidos na Tabela 3.

Na Fig. 8 são exibidas as razões de compartilhamento de potência ativa mP e reativa nQ . O compartilhamento de potência ativa não é muito influenciado pelo ação do nível secundário, com uma pequena piora nas razões mP após o último transitório de carga. Com o CSFC ativado, nota-se que as razões nQ satisfazem (13), evidenciando a ação da EBC na precisão do compartilhamento de potência reativa.

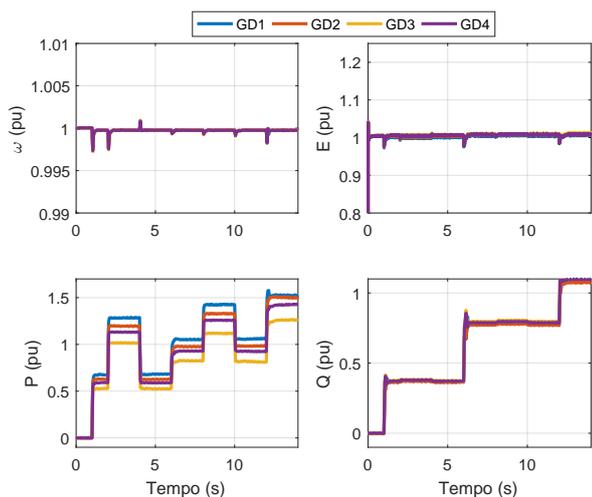


Figura 7. Frequência e tensão das GDs com o CSFC.

Tabela 3. Erro relativo médio de frequência e tensão para MR operando sem e com o CSFC

	Sem CSFC		Com CSFC	
	E_ω (%)	E_E (%)	E_ω (%)	E_E (%)
GD1	0,6250	4,4761	0,0169	0,4909
GD2	0,6250	4,2770	0,0168	0,6705
GD3	0,6251	4,0849	0,0170	0,8933
GD4	0,6251	4,2163	0,0168	0,7473
Média	0,6251	4,2636	0,0169	0,7005

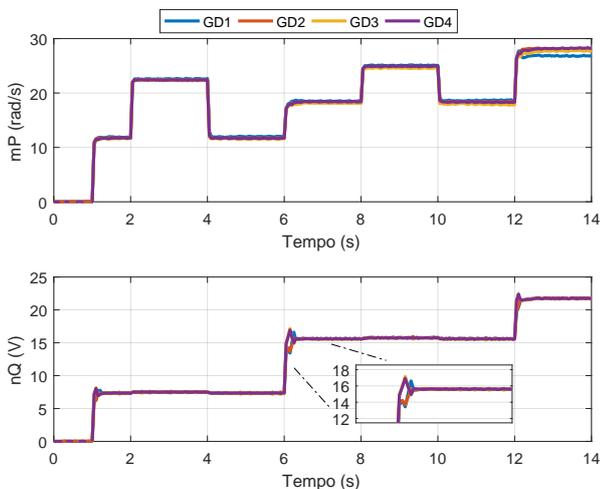


Figura 8. Razões de compartilhamento mP e nQ com o CSFC.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta de controlador secundário distribuído CSFC para MR CA isolada composta por um controlador *fuzzy* CF associado a uma estratégia baseada em consenso EBC em que os desvios de frequência e tensão gerados pelo controle em *droop* são corrigidos pelo controlador *fuzzy* e o compartilhamento de potência reativa entre as unidades é atingido via comunicação local entre as GDs vizinhas via consenso.

Os resultados de simulação mostraram que, utilizando o CSFC, os desvios foram corrigidos, com redução do erro

médio em 37 vezes para as frequências e em 6 vezes para as tensões, aproximadamente. Além disso, a EBC permitiu atingir a precisão no compartilhamento de potência reativa entre as unidades por um canal de comunicação de banda estreita, o que reduz complexidade e custos. Os próximos passos incluem testar a capacidade de *plug and play* com o CSFC, falhas e atrasos de comunicação na rede de dados da EBC, além da implementação do controlador em bancada e análise em dispositivo *hardware-in-the-loop*.

REFERÊNCIAS

- Alsafran, A.S. e Daniels, M.W. (2020). Consensus control for reactive power sharing using an adaptive virtual impedance approach. *Energies*, 13(8), 2026.
- Bevrani, H. e Shokohi, S. (2013). An intelligent droop control for simultaneous voltage and frequency regulation in islanded microgrids. *IEEE transactions on smart grid*, 4(3), 1505–1513.
- Bidram, A., Lewis, F.L., e Davoudi, A. (2014). Distributed control systems for small-scale power networks: Using multiagent cooperative control theory. *IEEE Control systems magazine*, 34(6), 56–77.
- Eskandari, M., Li, L., Moradi, M.H., Wang, F., e Blaabjerg, F. (2019). A control system for stable operation of autonomous networked microgrids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(4), 1633–1647.
- Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Matas, J., De Vicuña, L.G., e Castilla, M. (2010). Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids—a general approach toward standardization. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 58(1), 158–172.
- Han, R., Meng, L., Ferrari-Trecate, G., Coelho, E.A.A., Vasquez, J.C., e Guerrero, J.M. (2017). Containment and consensus-based distributed coordination control to achieve bounded voltage and precise reactive power sharing in islanded ac microgrids. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(6), 5187–5199.
- He, D., Shi, D., e Sharma, R. (2014). Consensus-based distributed cooperative control for microgrid voltage regulation and reactive power sharing. In *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 1–6. Istanbul.
- Lu, L.Y. e Chu, C.C. (2015). Consensus-based secondary frequency and voltage droop control of virtual synchronous generators for isolated ac micro-grids. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 5(3), 443–455.
- Mohiuddin, S.M. e Qi, J. (2019). Droop-free distributed control for ac microgrids with precisely regulated voltage variance and admissible voltage profile guarantees. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(3), 1956–1967.
- Neves, R.V., Machado, R.Q., Oliveira, V.A., Wang, X., e Blaabjerg, F. (2018). Multitask fuzzy secondary controller for ac microgrid operating in stand-alone and grid-tied mode. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(5), 5640–5649.
- Rey, J.M., Martí, P., Velasco, M., Miret, J., e Castilla, M. (2017). Secondary switched control with no communications for islanded microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(11), 8534–8545.
- Wang, X., Zhang, J., Zheng, M., e Ma, L. (2020). A distributed reactive power sharing approach in microgrid with improved droop control. *CSEE Journal of Power e Energy Systems*. Early Access.