

Analysis and Operation of an Electric Power Micro-grid

Hélio Marcos André Antunes¹, Sidelmo Magalhães Silva², Braz de Jesus Cardoso Filho³,
Reginaldo Vagner Ferreira⁴

¹ Doutor, Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) - Vitória - ES.

^{2,3} Doutor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)-Belo Horizonte-MG.

⁴ Mestre, Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) - Campus Betim - Betim - MG.

Email: helio.antunes@ufes.br, sidelmo@ufmg.br, cardosob@ufmg.br, reginaldo.ferreira@ifmg.edu.br

Received: August 01th, 2018.

Accepted: August 16th, 2018.

Published: September 30th, 2018.

Copyright ©2016 by authors and Institute of Technology Galileo of Amazon (ITEGAM).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International

License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ABSTRACT

With the growing introduction of distributed generation, a new concept called microgrid has become important worldwide. A microgrid is constituted by a number of electric power microsources, loads and storage systems, controlled by a central unit. For its correct working, it is needed a coordinated operation between power source and storage systems by means of control techniques. Present work aims to analyze a microgrid operation composed of a current controlled distributed source, a grid-forming converter, a passive filter and electrical loads, in both operating modes, islanded and grid-connected. Matlab/Simulink are used to model the microgrid and to obtain simulation results, which show that the microgrid is able to operate in islanded mode as well as in grid connected mode.

Keywords: Renewable energy sources, microgrids, distributed generation, islanded mode, grid connected mode.

Análise e Operação de uma Microrrede de Energia Elétrica

RESUMO

Com a expansão da geração distribuída um novo conceito vem ganhando destaque denominado de microrrede. Uma microrrede é um conjunto de microfuentes de geração de energia elétrica, cargas elétricas e elementos armazenadores de energia controlados por uma unidade central. Para que a microrrede funcione corretamente deve haver uma operação coordenada entre a fonte de geração e o sistema de armazenamento de energia, por meio de técnicas de controle. Este artigo tem como objetivo analisar a operação de uma microrrede formada por uma fonte de geração distribuída do tipo fonte de corrente, um conversor formador de rede, filtro passivo e cargas elétricas, operando no modo ilhado e conectado à rede elétrica. Será utilizada a plataforma Matlab/Simulink para modelar a microrrede em estudo. Os resultados obtidos por simulação mostram que a microrrede pode operar em ambos os modos de operação.

Palavras-chave: Fontes renováveis de energia, microrredes, geração distribuída, modo ilhado, modo conectado à rede.

I INTRODUÇÃO

No passado, o sistema elétrico de potência basicamente operava transportando energia de grandes plantas geradoras de energia elétrica, muito distante dos grandes centros consumidores [1]. Com a introdução da geração distribuída esse cenário passou a ser alterado, devido à grande evolução das fontes renováveis na geração de energia elétrica. Assim, o cenário da geração de energia elétrica deixou de ser centralizado e passou a ser descentralizado, colocando em primeiro plano os sistemas de

geração descentralizados mais próximo dos consumidores, com potência na ordem de 1 kW a 10 MW [2-3].

Diante do contexto da evolução da geração distribuída surge um novo conceito, denominado de microrrede. Segundo Lasseter [4] uma microrrede é um conjunto de microfuentes de geração de energia elétrica, cargas elétricas e elementos armazenadores de energia controlados por uma unidade central. Deve ser destacado que as microfuentes comumente usam fontes renováveis de energia elétrica, que utilizam a energia solar, eólica e biomassa [5-6]. Em uma microrrede o inversor estático

conectado a uma microfome de energia é chamado de conversor supridor de rede (CSR), com operação em fonte de corrente [7].

Uma microrrede pode operar conectada ao barramento de baixa tensão da concessionária ou de forma ilhada da rede. Quando a microrrede opera interligada a rede elétrica, a tensão e a frequência são impostas pela rede principal. Já quando a microrrede opera ilhada não existe mais referência de tensão e frequência para o sistema. Nessa condição o inversor estático chamado de conversor formador de rede (CFR) é composto por um elemento armazenador de energia e opera no modo “Fonte de Tensão”, sendo responsável por manter tensão e frequência na microrrede [8-9].

Este artigo apresenta a simulação de uma microrrede de energia elétrica c.a. formada pela rede elétrica de baixa tensão, cargas elétricas lineares e não-lineares, filtro passivo, um CSR e um CFR. A microrrede operará no modo conectado à rede elétrica e ilhada do barramento principal. Todo o modelo do sistema será desenvolvido na plataforma Matlab/Simulink, permitindo contemplar uma análise do fluxo de potência, da tensão e frequência no ponto de acoplamento comum (PAC).

II ESTUDO DE CASO

A microrrede analisada neste artigo é ilustrada na Figura 1 por meio de um diagrama por fase. Segundo o padrão IEEE Std. 1547.4 [10] a microrrede é do tipo ilha secundária, com uma fonte de geração distribuída, consumidores e rede de distribuição elétrica de baixa tensão.

A fonte de geração distribuída da microrrede é formada por um CSR, com capacidade de suprir parte das cargas elétricas. Também existe um CFR, com habilidade de armazenar energia produzida pela CSR, além de fornecer suporte ao sistema na condição de operação ilhada da rede elétrica principal. A microrrede também é composta por uma chave estática, que permite a operação ilhada e conectada à rede elétrica principal. A carga elétrica da microrrede é do tipo linear e não-linear. Devido a característica não-linear da carga é utilizado um filtro passivo para compensação harmônica, com três estágios de filtragem. Toda a microrrede é modelada utilizando a plataforma MATLAB/Simulink. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros elétricos para a simulação da microrrede.

Tabela 1: Características elétricas da microrrede em análise.

Sistema	Características
CFR	Transformador (Δ - Y_g) 220/220V-75kVA, $L_1=20\mu\text{H}$, $R_1=10\text{ m}\Omega$, $C_f=550\text{ }\mu\text{F}$, $f_{sw}=15,36\text{ kHz}$, $V_{cc}=500\text{ V}$
CSR	20 kVA, 220V, $f_{sw}=7,68\text{ kHz}$, $L_1=1,5\text{ mH}$, $L_2=47\text{ }\mu\text{H}$, $R_1=R_2=10\text{ m}\Omega$, $R_d=0,3\text{ }\Omega$, $C_f=55\text{ }\mu\text{F}$, $C_{cc}=9,4\text{ mF}$
Carga linear	220 V, 35 kVA, $f_p=0,73$ atrasado
Carga não-linear	220 V, 30 kW, $L=0,5\text{ mH}$, $C=18,8\text{ mF}$, $R_L=2,5\text{ }\Omega$
Filtro passivo	P. Faixa: 5h, $Q=42$, $L_5=2,7\text{ mH}$, $C_5=105,25\text{ }\mu\text{F}$, 2 kVA
	P. Faixa: 7h, $Q=42$, $L_7=1,3\text{ mH}$, $C_7=107,40\text{ }\mu\text{F}$, 2 kVA
	P. Alta: 11h, $Q=2,2$, $L_{11}=0,54\text{ mH}$, $C_{11}=108,7\text{ }\mu\text{F}$, 2kVA
Rede elétrica	220V, 60Hz, $S_{cc}=0,75\text{ MVA}$, $X/R=0,5$

Fonte: Autores, (2018).

II.1 MODELO DA CARGA ELÉTRICA

Uma carga linear pode ser representada por uma impedância série RL do tipo constante. A queda de tensão $v_L(t)$ na carga em função da corrente $i_L(t)$ pode ser descrita por meio da Equação 1 [11].

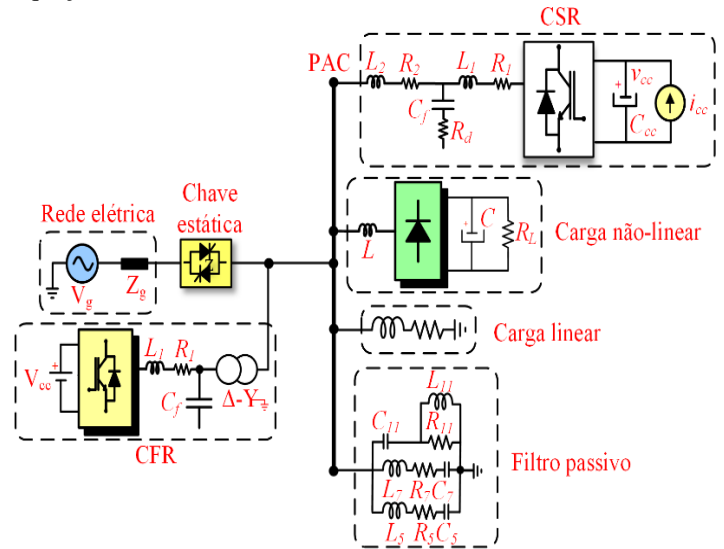


Figura 1: Configuração da microrrede em estudo.

Fonte: Autores, (2018).

Já a carga não-linear é formada por elementos passivos e dispositivos semicondutores. Um retificador trifásico a seis pulsos com fonte de tensão no barramento c.c. e carga resistiva pode representar o modelo de carga não-linear [12].

$$v_L(t) = Ri_L(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (1)$$

II.2 FILTRO PASSIVO

Uma solução utilizada para evitar a contaminação harmônica do sistema elétrico pode ser obtida por meio de filtros passivos [13]. Esta estrutura é formada pela associação série de resistores, indutores e capacitores, sendo geralmente conectados em paralelo com a carga, fornecendo um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas na frequência de sintonia. Outra funcionalidade deste elemento é fazer a correção do fator de potência, pois sua impedância na frequência fundamental é capacitiva [14].

Os filtros passivos podem ser do tipo passa-faixa, passa-alta ou compostos, sendo este último formado por múltiplos estágios de filtragem. A Figura 2 exibe as configurações típicas dos filtros, com suas respectivas impedâncias em função da frequência elétrica angular. As Equações 2 a 5 permitem obter os parâmetros de um filtro passa-faixa. Já para o dimensionamento do filtro passa-alta, parte-se do pressuposto que na frequência fundamental toda a corrente passa pelo ramo LC, sendo desprezível a corrente no resistor. Assim, utilizando as Equações (2) a (4) e (6) é possível determinar todos os parâmetros do filtro [15].

$$w \times L_h - \frac{1}{w \times C_h} = \frac{V_{ef}^2}{Q_{comp}} \quad (2)$$

Tipo de Filtro	Passa-Faixa	Passa-Alta	Composto
Configuração			
Frequência angular versus Impedância			

Figura 2: Típicas configurações de filtros passivos.

Fonte: [15].

$$h^2 = \frac{L_h}{C_h} \quad (3)$$

$$f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_h C_h}} \quad (4)$$

$$Q_{FPB} = \frac{X_h}{R_h} \quad (5)$$

$$Q_{FPA} = \frac{R_h}{\sqrt{\frac{L_h}{C_h}}} \quad (6)$$

Onde:

- w – frequência elétrica angular fundamental;
- L_h e C_h – indutância e capacitância do filtro sintonizado no harmônico de ordem h ;
- V_{ef} e Q_{comp} – tensão de linha eficaz e potência reativa trifásica compensada na frequência fundamental;
- f_h – frequência de ressonância do filtro passa-baixa;
- Q_{FPB} , Q_{FPA} , X_h , R_h – fator de qualidade do filtro passa-baixa, fator de qualidade do filtro passa-alta, reatância indutiva ou capacitiva na frequência de ressonância e resistência do filtro passa-baixa/passa-alta.

II.3 CONVERSOR FORMADOR DE REDE

O conversor formador de rede (CFR) utilizado na microrrede é formado por um inversor trifásico a dois níveis, com modulação Space Vector PWM (SVPWM) implementada com injeção de sequência zero [16]. No CFR existe um banco de baterias e conversor *buck-boost* no barramento c.c. do inversor, que permite a operação da microrrede tanto no modo ilhado e conectado à rede. Também é utilizado um transformador isolador na saída do CFR, com relação de transformação unitária, provendo isolamento galvânico entre o conversor e a rede. A Figura 3 apresenta um circuito equivalente do CFR conectado à rede elétrica [17-18].

O filtro LC do CFR é projetado para que sua frequência de corte seja igual a (1/10) da frequência de chaveamento do inversor. Com um banco de capacitores do filtro LC com capacidade de reativos entre 10 a 15% da potência nominal do inversor CFR é possível obter uma boa característica de filtragem [19].

Todo o controle do CFR é feito no sistema de coordenadas dq0, utilizando controladores do tipo proporcional integral.

Aplicando as Leis de Kirchoff de tensão e corrente na saída do CFR e no filtro LC são obtidas as Equações (7) a (10). A partir destas equações obtém-se a planta do filtro LC ilustrada na Figura 4.

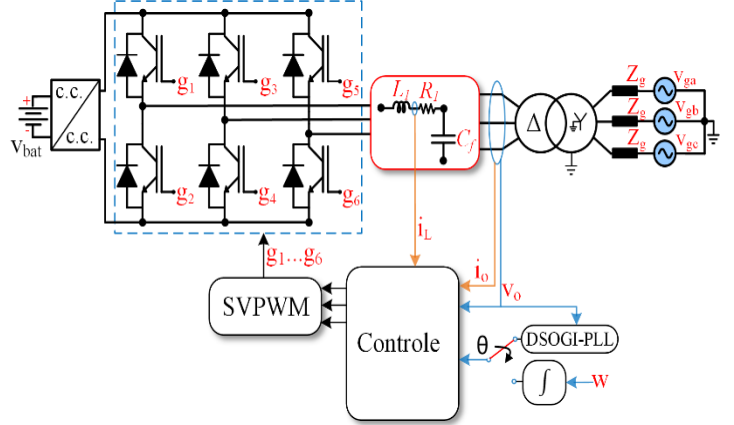


Figura 3: Circuito equivalente do CFR conectado à rede elétrica.

Fonte: Autores, (2018).

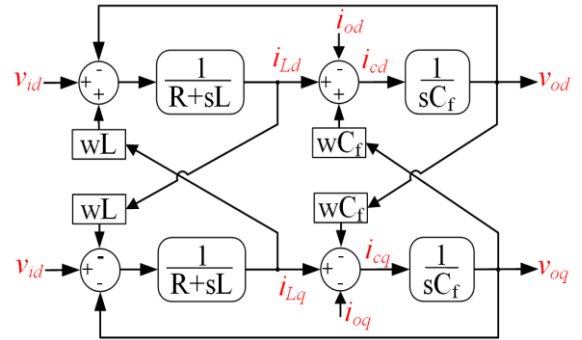


Figura 4: Diagrama com a planta do filtro LC.

Fonte: Autores, (2018).

$$v_{id} = Ri_{Ld} - wLi_{Lq} + L \frac{di_{Ld}}{dt} + v_{od} \quad (7)$$

$$v_{iq} = Ri_{Lq} + wLi_{Ld} + L \frac{di_{Lq}}{dt} + v_{oq} \quad (8)$$

$$-wC_f v_{oq} + C_f \frac{dv_{od}}{dt} = i_{Ld} - i_{od} \quad (9)$$

$$wC_f v_{od} + C_f \frac{dv_{oq}}{dt} = i_{Lq} - i_{oq} \quad (10)$$

A partir do diagrama de blocos do filtro LC da Figura 4 é possível observar que a tensão de saída no capacitor (v_o) e a corrente de saída (i_o) são os distúrbios. Também existe um acoplamento cruzado entre os termos wLi_d , wLi_q , wC_v_d e wC_v_q .

Quando a rede elétrica está presente o CFR opera no modo fonte de corrente, conforme diagrama de controle apresentado na Figura 5 [17]. No modo conectado à rede é utilizado um PLL DSOGI para estimar o ângulo da tensão da rede [20]. Os ganhos do controlador PI para a malha de corrente são calculado a partir das Equações (11) e (12), com uma frequência de corte (w_{c_i}) igual a (1/5) da frequência de chaveamento do CFR [19,21].

$$K_{pi} = L_1 w_{c_i} \quad (11)$$

$$K_{ii} = R_1 w_{c_i} \quad (12)$$

Quando o CFR opera ilhado da rede elétrica este impõe tensão e frequência no PAC, operando no modo Vf. Neste modo o PLL DSOGI é substituído por um oscilador, que gera a frequência elétrica angular a partir de uma referência de frequência de 60 Hz. Todo o esquema de controle do CFR no modo Vf é apresentado na Figura 6. É utilizado uma malha de tensão em cascata com a de corrente, com controlador PI em cada malha. É feita uma realimentação *feed-forward* da corrente de saída (i_o) e tensão de saída (v_o), com desacoplamento dos termos cruzados (wL_1i_d , wL_1i_q , wC_fV_{od} e wC_fV_{oq}) [18, 22]. A malha de corrente é representada por uma função de transferência de primeira, com a constante τ_i calculada pela Equação (13).

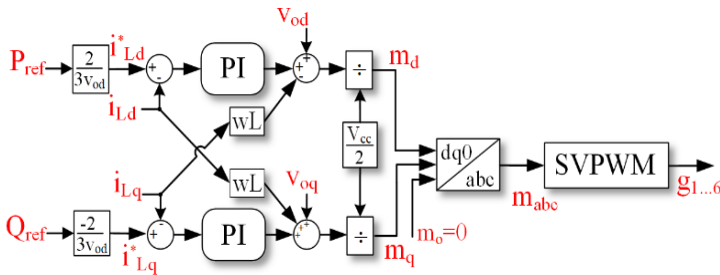


Figura 5: Controle do inversor do CFR no modo fonte de corrente.
Fonte: Autores, (2018).

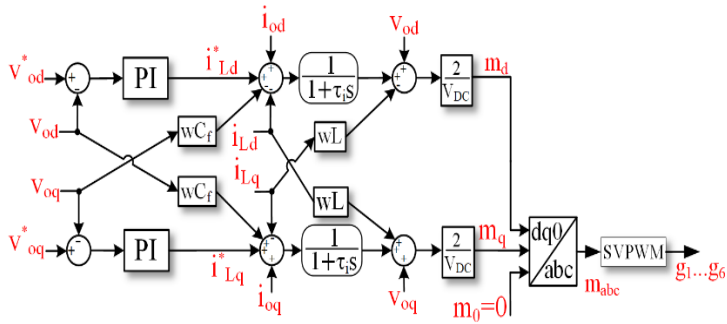


Figura 6: Controle do CFR no modo Vf.
Fonte: Autores, (2018).

Os ganhos do controlador PI para a malha de tensão são definidos pela metodologia proposta por Yazdani [20]. Primeiramente é definido uma margem de fase (δ_m) para a função de malha aberta de tensão, entre 30° a 75° . Considerando a aproximação da frequência de corte (w_c) igual a frequência de crossover é possível calcular os ganhos do PI usando as Equações (14) e (15). A Tabela 2 apresenta os ganhos dos controladores da malha de tensão e corrente para o CFR.

$$\tau_i = \frac{1}{w_{c,i}} \quad (13)$$

$$K_{pv} = C_f \sqrt{\frac{1}{\tau_i^2} \left(\frac{1 - \sin \delta_m}{1 + \sin \delta_m} \right)} \quad (14)$$

$$K_{pi} = \frac{K_{p,v}}{\tau_i} \left(\frac{1 - \sin \delta_m}{1 + \sin \delta_m} \right) \quad (15)$$

Tabela 2: Ganho dos controladores das malhas do CFR.

Malha	Ganho
Tensão	$K_{pv}=1,87 \Omega^{-1}$, $K_{iv}=1125,1 \Omega^{-1}$
Corrente	$K_{pi}=0,37 \Omega$, $K_{ii}=193,02 \Omega$

Fonte: Autores, (2018).

II.3 CONVERSOR SUPRIDOR DE REDE

A Figura 7 ilustra o circuito equivalente do CSR formado por um inversor trifásico a dois níveis, com modulação SVPWM. A fonte de corrente no lado c.c. do inversor representa a fonte primária de energia, que pode representar a intermitência na geração de um sistema fotovoltaico. O inversor estático do CSR opera como fonte de corrente, injetando potência ativa na rede elétrica, sem contribuir com a injeção de reativos. O filtro LCL na saída do inversor é projetado segundo Reznik et al. [23], com amortecimento passivo por meio de resistência. A Figura 8 ilustra o diagrama de controle do inversor utilizando o sistema de coordenadas dq0 [24-26].

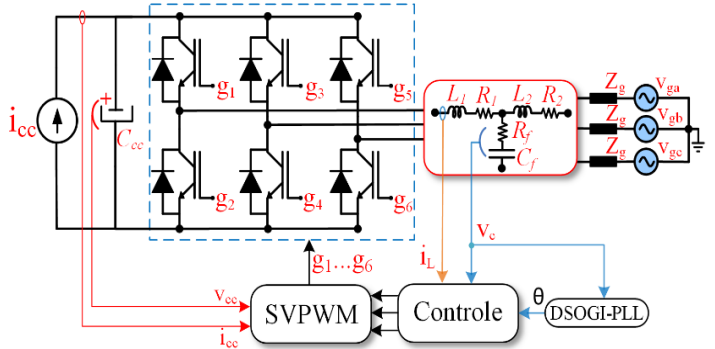


Figura 7: Circuito equivalente do CSR conectado à rede.
Fonte: Autores, (2018).

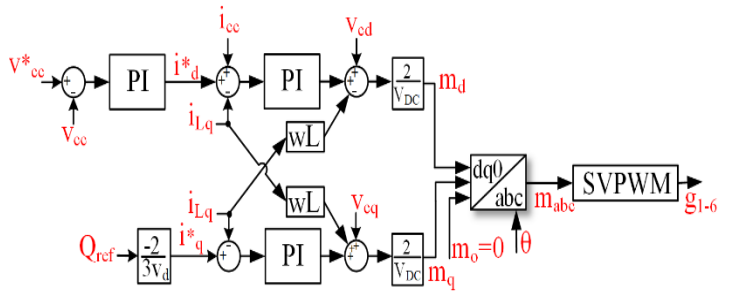


Figura 8: Diagrama de controle do CSR.
Fonte: [23].

A partir da Figura 8 é possível notar que o controle do inversor é composto por uma malha de tensão do barramento c.c. em cascata com uma malha corrente mais rápida, com controlador PI. Os ganhos da malha de corrente foram ajustados de modo similar ao do CFR, porém com uma frequência de corte igual a (1/10) da frequência de chaveamento. Já os ganhos do controlador da malha de tensão são calculados com as Equação (16) e (17), com uma frequência de corte de (1/10) e (1/100) da frequência de corte da malha de corrente. A Tabela 3 apresenta os ganhos das malhas de tensão e corrente do CSR.

$$K_{pcc} = -\frac{4\pi v_{cc}(f_{c1}+f_{c2})C}{3v_d} \quad (16)$$

$$K_{icc} = -\frac{8\pi^2 v_{cc}(f_{c1}+f_{c2})C}{3v_d} \quad (17)$$

Tabela 3: Ganho dos Controladores do CSR.

Malha	Ganho
Tensão barramento c.c.	$K_{pcc}=-9,26 \Omega^{-1}$ $K_{icc}=-406,22 \Omega^{-1}$
Corrente	$K_{pi}=7,05 \Omega$, $K_{ii}=48,25 \Omega$

Fonte: Autores, (2018).

III RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A Figura 9 apresenta a microrrede de energia elétrica desenvolvida no *software* Matlab/Simulink. A seguir serão exibidos os resultados de simulação da microrrede.

III.1 OPERAÇÃO NO MODO CONECTADO À REDE

Quando a microrrede opera conectada à rede elétrica, tanto o CSR quanto o CFR operam os inversores como fonte de corrente. A seguir são enumeradas a sequência de conexão das cargas, fontes e demais elementos da microrrede que produziram o fluxo de potência ativa e reativa no PAC ilustrados na Figura 10, com período de simulação igual a 1s.

- $t=0s$ - conexão da rede elétrica, filtro passivo e o CFR operando como fonte de corrente;
- $t=0,1s$ - o CSR é conectado a rede e a fonte de corrente no seu barramento c.c. passa a injetar 4A;
- $t=0,2s$ - a fonte de corrente no CSR injeta 20A;
- $t=0,3s$ - conexão de carga RL com $(13+j12)$ kVA;
- $t=0,4s$ - a fonte c.c. do CSR é ajustada para 40A;
- $t=0,5s$ - conexão do retificador trifásico com $R=5\Omega$;
- $t=0,6s$ - conexão de carga RL com $(13+j12)$ kVA e a fonte c.c. do CSR é ajustada para 32A;
- $t=0,7s$ - carga do retificador trifásico passa para $R=2,5\Omega$ e o CSR passa a injetar na rede 20 kW;
- $t=0,8s$ - a fonte c.c. do CSR é ajustada para 24A;
- $t=0,9s$ - a fonte c.c. do CSR é desligada.

A partir dos resultados da Figura 10 é possível observar que o CSR variou a injeção de potência ativa na rede elétrica, com valor máximo próximo de 20 kW. Outro ponto a se destacar é que o CSR não contribui com a injeção de reativos. Já o CFR inicialmente supriu as perdas Joule do transformador, com injeção de reativo capacitivo na rede. Em $t=0,7s$ o CFR passou a injetar potência ativa na rede 20 kW, contribuindo com a regulação de tensão na rede. Com a conexão das cargas elétricas houve uma inversão no fluxo de potência no PAC, até atingir um valor de 20 kW e 10 kVar. Já a Figura 11 apresenta o valor rms das tensões por fase no PAC da microrrede, com sua respectiva frequência elétrica.

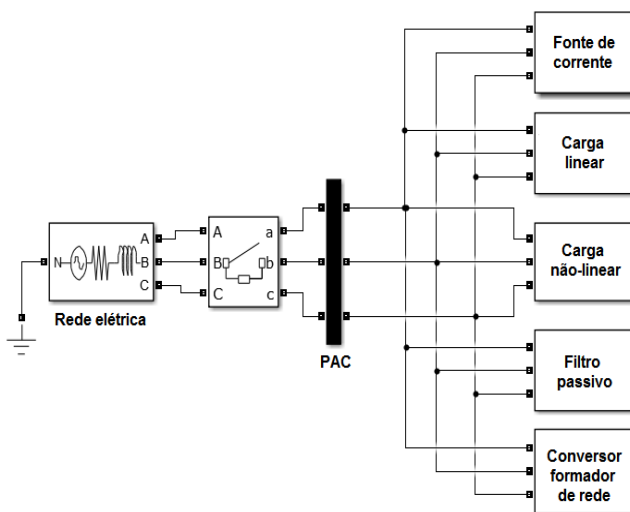
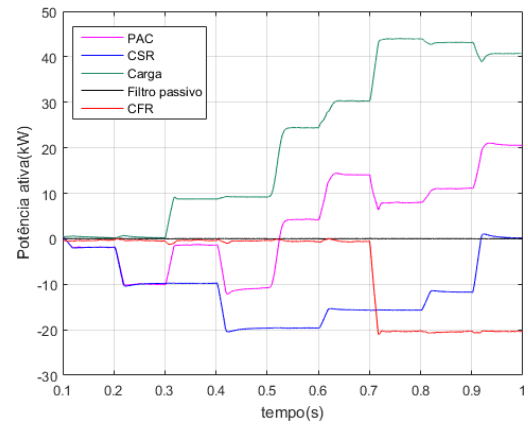
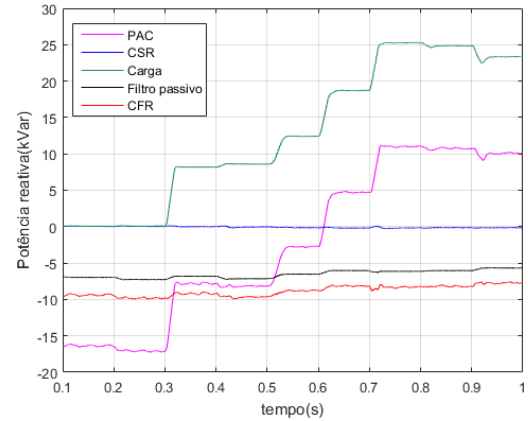


Figura 9: Modelo da microrrede de energia elétrica no Matlab/Simulink.
Fonte: Autores, (2018).



(a)



(b)

Figura 10: Fluxo de potência no PAC: (a) potência ativa; (b) potência reativa.

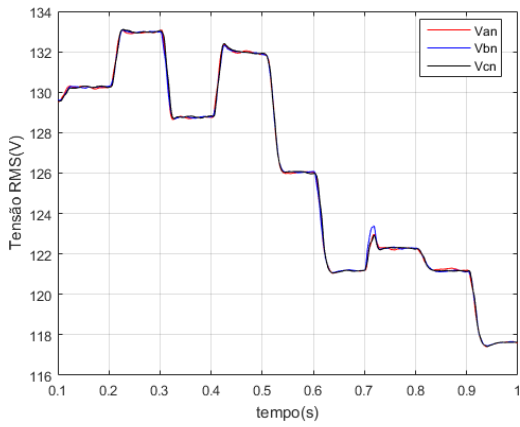
Fonte: Autores, (2018).

A ANEEL [27] define que um barramento com tensão menor que 1 kV, a tensão de fase considerada como adequada deve estar entre 117V e 133V. Já com relação a frequência elétrica a ANEEL define que deve estar entre 59,9 e 60,1 Hz. Porém, em sistemas com geração é possível estender os limites de frequência para 59,5 a 60,5 Hz, por no máximo 30s. Assim, é possível notar na Figura 11 que tanto a tensão quanto a frequência respeitam os limites definidos pela ANEEL.

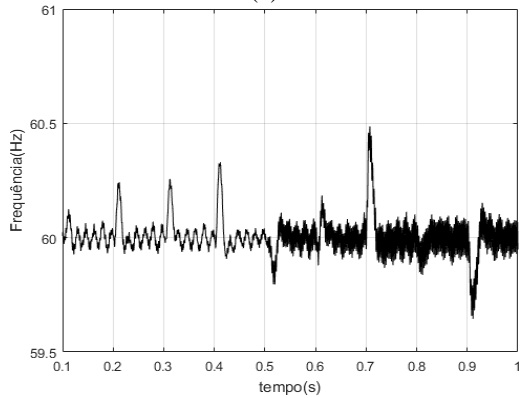
III.2 OPERAÇÃO NO MODO ILHADO

Também é avaliada a operação da microrrede na condição em que a rede elétrica está ausente, operando no modo isolado. A seguir são listadas as operações da microrrede ilhada que determinaram o fluxo de potência apresentado na Figura 12, com período de simulação igual a 1s.

- $t=0s$ - início da simulação com *black start*, em que o CFR opera no modo V/f e o filtro passivo é conectado;
- $t=0,1s$ - a fonte de corrente no CSR passa a injetar 4A;
- $t=0,2s$ - a fonte de corrente no CSR injeta 20A;
- $t=0,3s$ - a fonte c.c. do CSR é ajustada para 40A;
- $t=0,4s$ - conexão de carga RL com $(13+j12)$ kVA;
- $t=0,5s$ - conexão do retificador trifásico com $R=5\Omega$;
- $t=0,6s$ - conexão de carga RL com $(13+j12)$ kVA e a fonte c.c. do CSR é ajustada para 32A;
- $t=0,7s$ - conexão do retificador trifásico com $R=5\Omega$;
- $t=0,8s$ - a fonte c.c. do CSR é ajustada para 24A;
- $t=0,9s$ - a fonte c.c. do CSR é desligada.

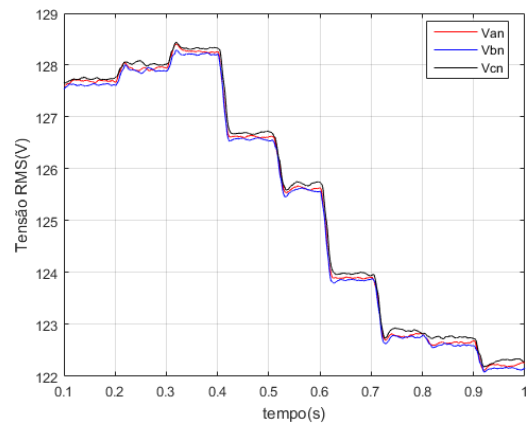


(a)

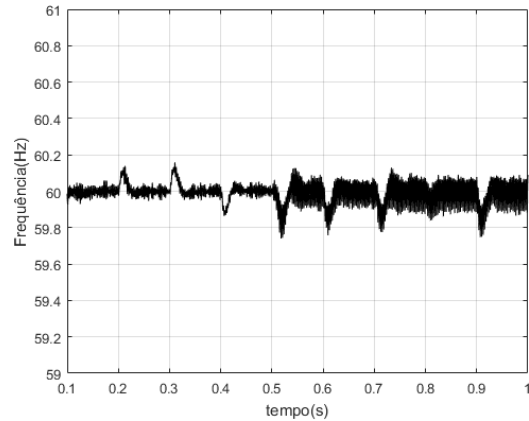


(b)

Figura 11: Grandezas elétricas no PAC da microrrede: (a) tensão rms por fase; (b) frequência elétrica.
Fonte: Autores, (2018).

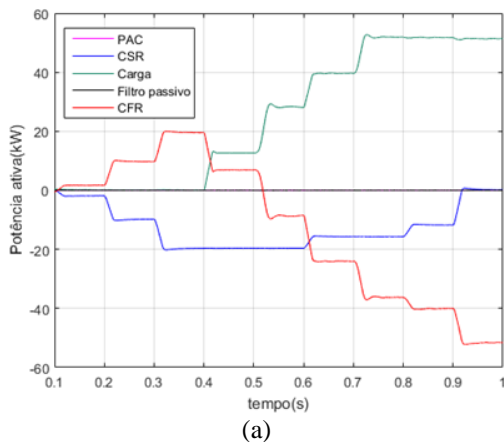


(a)

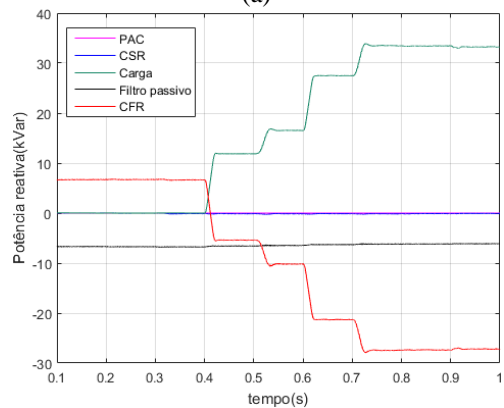


(b)

Figura 13: Grandezas elétricas no PAC da microrrede na operação ilhada: (a) tensão rms por fase; (b) frequência elétrica.
Fonte: Autores, (2018).



(a)



(b)

Figura 12: Fluxo de potência na microrrede operando isolada: (a) potência ativa; (b) potência reativa.

Da Figura 12 é possível notar que inicialmente o CFR absorve toda a potência ativa do CSR em seu banco de baterias, até o instante $t=0,4s$. O CSR também absorve o reativo capacitivo produzido pelo sistema de filtragem passiva. Com a conexão das cargas elétricas o CFR tem seu fluxo de potência invertido, agora suprindo uma potência ativa de 56 kW e reativa indutiva de 28kVar. Logo é demonstrado que o CFR pode operar nos quatro quadrantes de potência durante a operação ilhada da microrrede.

Por final, é ilustrado na Figura 13 a tensão rms e a frequência elétrica no PAC da microrrede durante toda a operação ilhada. Nesta condição de operação no PAC a tensão rms variou entre 122 a 128,3 V, e a frequência entre 59,79 Hz e 60,12 Hz. Como não existe regulamentação da ANEEL para a operação ilhada da microrrede não é possível atestar o desempenho nesta condição de operação.

IV CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o modelo de uma microrrede de energia elétrica, formada por um CFR, CSR, filtro passivo e carga elétrica do tipo linear e não-linear. Foi possível observar o fluxo de potência da microrrede na condição de operação conectada à rede elétrica de baixa tensão e no modo isolado.

Em ambos os modos de operação o CSR teve o seu desempenho adequado, injetado potência ativa oriunda da fonte de corrente c.c. Já o CFR demonstrou que pode operar tanto no modo fonte de corrente quanto no modo fonte de tensão, garantindo a operação ilhada da microrrede.

V AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG pelo suporte à pesquisa e o CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro.

VI REFERÊNCIAS

- [1] Medina, P., Bizuayehu, A. W., Catalão, J. P. S., Rodrigues, E. M. G., Contreras, J. **Electrical Energy Storage Systems: Technologies' State-of-the-Art, Techno-economic Benefits and Applications Analysis**. In: 47th Hawaii International Conference on System Sciences, Waikoloa, 2014, pp. 2295-2304. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6758888/>. ISBN: 978-1-4799-2504-9.
- [2] Bhende, C. N., Kalam, A. **Power Quality Conditioner for Microgrid**. In: Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Hobart, 2013, pp. 1-4. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6725396/>. ISBN: 978-1-86295-913-2.
- [3] Antunes, H. M. A., Silva, S. M., Brandao, D. I., Ferreira, R. V., Filho, B. de J. C. **Analysis of a Grid-Forming Converter Based on Repetitive Control in Centralized AC Microgrid**. In: IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Florianopolis, 2017, pp. 1-8. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7972462/>. ISBN: 978-1509-0-5339-1.
- [4] Lasseter, B. **Microgrids [distributed power generation]**. In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Columbus, 2001, pp. 305–308. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/917020/>. ISBN: 0-78036672-7.
- [5] Bouzid, A. M., Guerrero, J. M., Cheriti, A., Bouhamida, M., Sicard, P., Benghanem, M. **A Survey on Control of Electric Power Distributed Generation Systems for Microgrid Applications**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 44, pp. 751-766, April, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.016>.
- [6] Antunes, H. M. A., Silva, S. M., Brandao, D. I., Machado, A. A. P., Filho, B. de J. C. **Harmonic Compensation Using a Series Hybrid Filter in a Centralized AC Microgrid**, Journal of Control, Automation and Electrical Systems, v. 99, pp. 219–229, April, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40313-017-0365-4>.
- [7] Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., Rodríguez, P. **Control of Power Converters in AC Microgrids**, IEEE Transactions on Power Electronics, v. 27, pp. 4734-4749, May, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2199334>.
- [8] Miao, Z., Domijan, A., Fan, L. **Investigation of Microgrids with Both Inverter Interfaced and Direct AC-Connected Distributed Energy Resources**, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 26, pp. 1634–1642, July, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2114372>.
- [9] Antunes, H. M. A., Silva, S. M., Brandao, D. I., Machado, A. A. P., Filho, B. de J. C. **A New Multifunctional Converter Based on a Series Compensator Applied to AC Microgrids**, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 102, pp. 160-170, November, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.04.013>.
- [10] IEEE, 2011. **IEEE Std 1547.4-2011 - IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems**, New York.
- [11] Kanellos, F. D., Tsouchnikas, A. I., Hatziargyriou, N. D. **Micro-Grid Simulation during Grid-Connected and Islanded Modes of Operation**. In: Int. Conf. Power Syst. Transients, Montreal, 2005, pp. 1-6. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: http://ipstconf.org/papers/Proc_IPST2005/05IPST113.pdf.
- [12] Antunes, H. M. A., Silva, S. M., Filho, B. de J. C. **Análise e Operação de uma Microrrede de Energia Elétrica**. In: SBSE-Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Natal, 2016, pp. 1-6. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ssl4799.website.seguro.com/swge5/PROCEEDINGS/>. ISSN: 2177-6164.
- [13] Akagi, H. **Active Harmonic Filters**, Proceedings of the IEEE, vol. 93, pp. 2128-2141, December, 2005. DOI: 10.1109/JPROC.2005.859603.
- [14] Yousif, S. N. A., Wanik, M. Z. C., Mohamed, A. **Implementation of Different Passive Filter Designs for Harmonic Mitigation**. In: PECon - Power and Energy Conference, Kuala Lumpur, 2004, pp. 229–234. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1461649/>. ISBN: 0-7803-8724-4.
- [15] Das, J. C. **Passive Filters-Potentialities and Limitations**. In: Record of the Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, Charleston, 2003, pp. 187–197. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/Document/1216916/>. ISBN: 0-7803-7931-4.
- [16] Hava, A. M., Kerkman, R. J., Lipo, T. A. **Simple Analytical and Graphical Methods for Carrier-Based PWM-VSI drives**, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, pp. 49–61, January, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1109/63.737592>.
- [17] Xu, L., Miao, Z., Fan, L. **Coordinated Control of a Solar and Battery System in a Microgrid**. In: PES T&D, Orlando, 2012, pp. 1–7. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6281700/>. ISBN: 978-1-4673-1935-5.
- [18] Matos, J. G. de, Ribeiro, L. A. de S., Silva, F. S. F. e. **Controle da Potência Gerada em Microrredes Autônomas e Isoladas com Fontes de Energia Renováveis e Sistema de Armazenamento com Bancos de Baterias**, Rev. Eletrônica Potência, v. 19, pp. 152–162, Maio, 2014.
- [19] Silva, S. M., Filho, B. J. C. **Component-minimized voltage sag compensators**. In: 37th IAS Annual Meeting, Pittsburgh,

2002, pp. 883–889. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1042663/>. ISBN: 0-7803-7420-7.

[20] Rodriguez, P., Teodorescu, R., Candela, I., Timbus, A. V., Liserre, M., Blaabjerg, F. **New Positive-sequence Voltage Detector for Grid Synchronization of Power Converters under Faulty Grid Conditions**. In: 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, 2006, pp. 1–7. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1712059/>. ISBN: 0-7803-9716-9.

[21] Yazdani, A., Iravani, R. **Voltage-Sourced Converters in Power Systems**. John Wiley & Sons, Inc., 2010. Vol. 53, 473p.

[22] Solanki, A., Nasiri, A., Novakovic, B., Bhavaraju, V. **State Space Modeling and Stability Assessment for a Microgrid**. In: 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015, pp. 533–538. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7309735/>. ISBN: 978-1-4673-7151-3.

[23] Reznik, A., Simoes, M. G., Al-Durra, A., Muyeen, S. M. **LCL Filter Design and Performance Analysis for Small Wind Turbine systems**. In: 2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, Montreal, 2012, pp. 1–7. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6316408/>. ISBN: 978-1-4673-1130-4.

[24] Vechiu, I., Curea, O., Llaría, A., Camblong, H. **Control of Power Converters for Microgrids**, COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng., vol. 30, pp. 300–309, January, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1108/03321641111091575>.

[25] Cupertino, A. F., Resende, J. T. de, Pereira, H. A., Seleme Junior, S. I. A. **Grid-Connected Photovoltaic System with a Maximum Power Point Tracker Using Passivity-Based Control Applied in a Boost Converter**. In: 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Fortaleza, 2012, pp. 1–8. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6452753/>. ISBN: 978-1-4673-2411-3.

[26] Rahman, S. A., Varma, R. K. **PSCAD/EMTDC model of a 3-phase grid connected photovoltaic solar system**. In: 2011 North American Power Symposium, 2011, pp. 1–7. Acesso em: 22 ago. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6025184/>. ISBN: 978-1-4577-0419-2.

[27] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. 2018. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, Brasília, DF.