

## Análise de sistema de geração distribuída de energia elétrica em cenário de microrredes

### Analysis of distributed power generation system in a micro grid scenario

#### RESUMO

**Anderson Honório Nunes**  
[andernolsi@hotmail.com](mailto:andernolsi@hotmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Comélio Procópio, Paraná, Brasil.

**Leonardo Poltronieri Sampaio**  
[sampaio@utfpr.edu.br](mailto:sampaio@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Comélio Procópio, Paraná, Brasil.

**Sérgio Augusto Oliveira da Silva**  
[augus@utfpr.edu.br](mailto:augus@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Comélio Procópio, Paraná, Brasil.

Objetivo: Estudo e análise de uma microrrede trifásica CA de baixa tensão operando em modo ilhado empregando a estratégia de controle por decaimento (*droop control*). Metodologia: A topologia em estudo de microrrede é composta por duas fontes renováveis em corrente contínua, onde cada uma das fontes é conectada a um inversor trifásico com filtro de saída LCL. A partir da modelagem do sistema, as respectivas funções de transferência para o controle da malha de tensão e malha de corrente dos inversores são obtidas, bem como a partir das funções de transferências os ganhos proporcional e integral são determinados. O controle do compartilhamento de energia entre as gerações distribuídas é realizado por meio da técnica de decaimento. Resultados: Por meio de resultados de simulação a microrrede é avaliada para diferentes condições de testes, nos quais é possível constatar que *droop control* é um método eficaz para realizar a operação autônoma da microrrede. Adicionalmente, nas simulações da microrrede foi levado em conta testes envolvendo cargas lineares e cargas não-lineares, operando dentro de valores aceitáveis de taxa de distorção harmônica e determinados valores de amplitude e frequência.

**PALAVRAS-CHAVE:** Geração Distribuída. Microrredes. Controle por Decaimento.

#### ABSTRACT

Objective: Study and analysis of a low voltage AC three-phase microgrid operating in island mode using the droop control strategy. Methodology: The microgrid study topology consists of two direct current renewable sources, where each source is connected to a three phase inverter with LCL output filter. From the system modeling, the respective transfer functions for controlling the voltage loop and current loop of the inverters are obtained, and from the transfer functions the proportional and integral gains are determined. Control of energy sharing between distributed generations is accomplished through the droop technique. Results: Through simulation results the microgrid is evaluated for different test conditions, where it can be seen that droop control is an effective method to perform the autonomous microgrid operation. Additionally, in the microgrid simulations, tests involving linear loads and nonlinear loads were considered, operating within acceptable values of harmonic distortion rate and certain amplitude and frequency values.

**KEYWORDS:** Distributed Generation. Microgrid. Droop Control. Voltage Source Inverter.

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

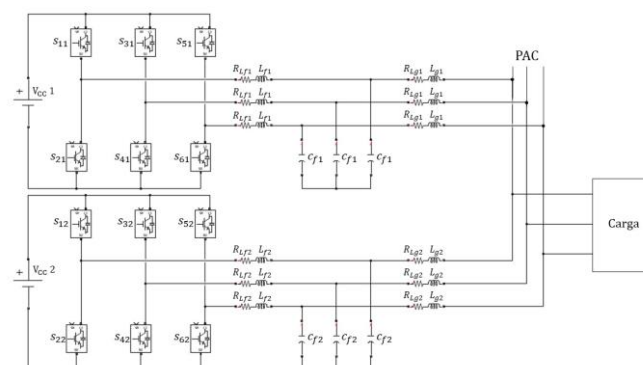
Com o aumento o consumo energético e a preocupação ambiental relacionada aos combustíveis fósseis, o uso de geração distribuída utilizando energia renováveis tem aumentado tanto em sistemas conectados à rede elétrica, quanto para locais remotos (GUERRERO, 2013; HAN, 2016). Isso se deve ao fato de a demanda por energia elétrica ter aumentado nos últimos anos, além disso, a preocupação em reduzir os impactos no meio ambiente e a possível escassez dos combustíveis fósseis impulsionaram o uso de energias renováveis em diversos países. A geração distribuída (GD) de energia elétrica pode ser composta por diversas fontes alternativas de energia, tais como: energia solar, energia eólica, célula à combustível, maremotriz, pequenas centrais hidrelétrica, dentre outras (SANTOS, 2008).

Normalmente, os sistemas de geração distribuídos operam conectados à rede elétrica fornecendo energia para a rede tradicional de energia elétrica, e devem ser desconectados por motivos de falhas e/ou manutenção da rede (GUERRERO, 2011). Por outro lado, é possível continuar fornecendo energia para as cargas conectados nestes sistemas por meio de um formador de rede. Assim, a microrrede é composta por um ou mais formadores de rede, os quais tem a função de fornecer uma tensão, dentro das características estabelecidas por normas, para cargas conectados no ponto de acoplamento de cargas (PAC) (GUERRERO, 2013). A microrrede podem operar tanto em conexão com a rede quanto no modo ilhado (sem conexão à rede) (TAYAB et al., 2017). As microrredes podem ser concebidas em corrente alternada, corrente contínua ou híbridas. Tradicionalmente, as microrredes pode-se controlar a amplitude e a frequência da tensão fornecida utilizando as curvas de decaimento  $P-f$  e  $Q-V$ , também conhecida como *Droop Control* (GUERRERO, 2011; TAYAB et al., 2017).

## MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de estudo neste trabalho é apresentado na Figura 1, o sistema consiste em dois inversores trifásicos com filtro LCL conectados a um mesmo ponto de acoplamento comum (PAC) alimentados cargas lineares e não lineares.

Figura 1 - Microrrede de estudo.

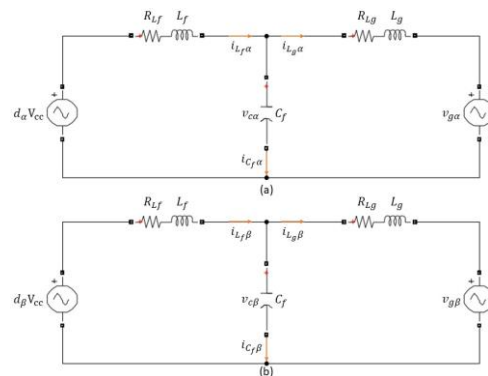


Fonte: Autoria própria.

Para realizar a modelagem do inversor trifásico foi considerado o circuito equivalente de um único inversor ao realizar o chaveamento. A partir das equações

obtidas aplicando a lei de Kirchhoff das tensões e das correntes, desenvolvendo as equações diferenciais dos elementos armazenadores de energia e utilizando a transformada de Clarke para desacoplar o sistema transformando as variáveis do referencial estacionário  $abc$  para o referencial estacionário  $\alpha\beta 0$  é possível obter o circuito equivalente do inversor trifásico com filtro LCL no referencial  $\alpha\beta 0$  como apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Circuito equivalente do inversor trifásico em  $\alpha\beta$ .



Fonte: Autoria própria.

Realizando a modelagem de pequenos sinais dos circuitos da Figura (3) é possível obter a função de transferência  $G_{id}$  que é dada pela equação (1), que corresponde a malha interna de corrente e a equação (2) representa a função de transferência  $G_{vi}$ , que corresponde a malha externa de tensão (Erickson, 2001).

$$G_{id} = V_{CC} \frac{s^2 C_f L_g + s R_{Lg} C_f + 1}{s^3 C_f L_g L_f + s^2 (R_{L_f} C_f L_g + R_{L_g} C_f L_f) + s (R_{L_f} R_{L_g} C_f + L_f + L_g) + R_{L_f} + R_{L_g}} \quad (1)$$

$$G_{vi} = \frac{s L_g + R_{L_g}}{s^2 L_g C_f + s R_{L_g} C_f + 1} \quad (2)$$

O sistema de estudo neste trabalho é apresentado na Figura 1, o sistema consiste em dois inversores trifásicos com filtro LCL conectados a um mesmo ponto de acoplamento. Para realizar o controle da microrrede operando no modo ilhada é comum o uso de um controle hierárquico, sendo composto por quatro camadas de controle com diferentes níveis de prioridade, sendo: controle interno, controle primário, controle secundário e controle terciário (GUERRERO, 2011; SAMPAIO, 2013).

O controle interno é referente ao controle do chaveamento do inversor, correspondendo a malha interna de corrente e a malha externa de tensão do VSI. A malha interna é responsável pelo controle da corrente do indutor de filtragem  $L_f$  e a malha externa é responsável pelo controle da tensão no capacitor  $C_f$ . Esse sistema de controle com uma malha interna e uma malha externa é chamado de multimalhas.

Ao conectar dois ou mais VSI em paralelo é possível que ocorra a circulação de potência ativa e reativa. O controle primário ajusta os valores de frequência e amplitude da referência de tensão para as malhas do controle interno do VSI utilizando as curvas  $P-f$  e  $Q-V$  (GUERRERO, 2011). Assim, pode-se controlar a

amplitude e frequência de  $v_{g\alpha}$  e  $v_{g\beta}$  apresentado na Figura 2 utilizando as curvas de  $P-f$  e  $Q-V$  para variar a tensão de referência do controle interno  $v_{C_f}^*$ , essa técnica é conhecida como *droop control*.

Para linha com parcela indutiva significativamente maior que a resistiva,  $X_L \gg R_L$ , é feita a suposição que a impedância é puramente indutiva, dessa forma  $Z_L = X_L$  e  $\theta = 90^\circ$  (GUERRERO, 2009), logo a potência ativa e reativa podem ser calculadas como apresentado nas equações (3) e (4).

$$P = \frac{v_{C_f} V_g}{X_L} \sin \delta \quad (3)$$

$$Q = \frac{v_{C_f} V_g}{X_L} \cos \delta - \frac{V_g^2}{X_L} \quad (4)$$

Baseando-se nas equações (3) e (4) é possível retirar as curvas de decaimento do *droop control*. Devido ao indutor de acoplamento  $L_g$  a linha ganha uma característica fortemente indutiva, assim considerando um ângulo de delta pequeno, tal que  $\sin \delta \approx \delta$  e  $\cos \delta \approx 1$ , a potência ativa injetada do inversor para a carga é predominantemente influenciada pelo ângulo delta, enquanto que a potência reativa é dependente da diferença de amplitude de  $V_g$  e  $V_{C_f}$  (SAMPAIO, 2013; TAYAB, 2017).

As curvas de potência do *droop control* podem ser expressas em função da inclinação das retas, definindo as funções como descrito em (5) e (6), respectivamente.

$$f = f^* - k_p(P^* - P) \quad (5)$$

$$v_{C_f} = v_{C_f}^* - k_q(Q^* - Q) \quad (6)$$

Sendo  $f$  a frequência na saída do VSI,  $v_{C_f}$  a tensão sobre o capacitor,  $f^*$  a frequência de referência,  $k_p$  e  $k_q$  definem a inclinação angular das curvas  $P-f$  e  $Q-V$ ,  $P^*$  e  $Q^*$  representam a potência ativa e reativa, respectivamente, de referência. Para compensar os desvios na tensão e frequência que ocorrem no controle primário, se utiliza o controle secundário para garantir que os níveis de tensão e frequência da microrrede estão de acordo com os valores nominais (GUERRERO, 2011).

## RESULTADOS

O circuito da Figura 1 foi simulado no programa MATLAB/Simulink f. Os dados utilizados na simulação são apresentados a seguir na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados do sistema

Geração Distribuída 1		Geração Distribuída 2	
$V_{CC1}$	400 V	$V_{CC1}$	400 V
$L_{f1}$	0,7937 mH	$L_{f1}$	0,7937 mH
$L_{g1}$	0,2381 mH	$L_{g1}$	0,2381 mH
$C_{f1}$	16,446 $\mu$ F	$C_{f1}$	16,446 $\mu$ F
$R_{L_{f1}}$	0,2 $\Omega$	$R_{L_{f1}}$	0,2 $\Omega$
$v_{C_f1}^*$	127 V	$v_{C_f2}^*$	127 V
$f^*$	60 Hz	$f^*$	60 Hz

Geração Distribuída 1		Geração Distribuída 2	
$k_{p1}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$k_{p2}$	$40 \cdot 10^{-6}$
$k_{q1}$	$5,66 \cdot 10^{-3}$	$k_{q2}$	$5,66 \cdot 10^{-3}$
$k_{pi1}$	0,0539	$k_{pi2}$	0,1079
$k_{ii1}$	301,8807	$k_{ii2}$	588,9109
$k_{pv1}$	0,0795	$k_{pv2}$	0,0398
$k_{iv1}$	48,6334	$k_{iv2}$	25,3424

Fonte: Autoria própria

Foram realizadas alterações nos valores de carga durante a simulação, os resultados são apresentados a seguir. Foi conectado ao PAC cargas resistivas, indutivas, capacitivas e não lineares ao longo do tempo.

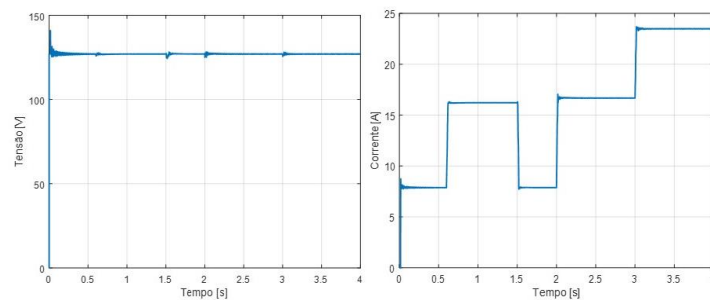
Tabela 2 – Cargas ao longo do tempo

Tempo (s)	Carga
0 até 0,6	3000 W
0,6 até 1,5	6000 W e 1500 VAR
1,5 até 2	3000 W
2 até 3	6000 W e 2100 VAR
3 até 4	8680 W e 2100 VAR

Fonte: Autoria própria

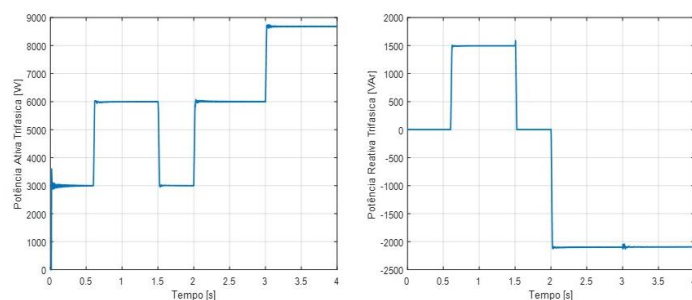
A Figura 3 apresenta a tensão eficaz e a corrente eficaz na fase a ao longo do tempo no PAC e a Figura 4 apresenta a potência ativa e reativa consumidas pela carga.

Figura 3 - Tensão eficaz e corrente eficaz na fase a.



Fonte: Autoria própria

Figura 4 - Potência ativa e potência reativa na carga consumida pela.



Fonte: Autoria própria

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisado o uso do *droop control* para controlar uma microrrede composta por dois inversores com filtro LCL. O controle por decaimento se mostrou um método eficaz para realizar a operação autônoma da microrrede. Para o controle interno do inversor foi realizada a modelagem de pequenos sinais para determinar os ganhos dos controladores do multimalhas. A simulação apresentada válida o controle apresentado para cargas lineares e não lineares.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho conta com o apoio da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e Bolsa de Iniciação Científica do CNPq.

## REFERÊNCIAS

GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C.; MATAS, J.; VICUNA, L. G. de; CASTILLA, M. Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 1, p. 158-172, jan. 2011.

GUERRERO, J. M.; LOH, do P. C.; LEE, T.; CHANDORKAR, M.. Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part II: Power Quality, Energy Storage, and AC/DC Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 60, n. 4, p. 1263-1270, abr 2013.

HAN, H.; HOU, X.; YANG, J.; WU, J.; SU, M.; GUERRERO, J. M. Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 7, n. 1, p. 200-215, Jan. 2016.

Tayab, U., Roslan, M., Hwai, L. and Kashif, M. (2017). A review of droop control techniques for microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, pp.717-727.

SAMPAIO, L. P. Controle da injeção de potências ativa e reativa em inversor de Geração Distribuída conectado à rede de distribuição em corrente alternada em baixa tensão, empregando LMIs com realimentação de estados e critérios de D-estabilidade. 2013. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

SANTOS, Ana Maria. Resende. Tendências tecnológicas das células a combustível para uso do hidrogênio derivado de petróleo e gás natural. 2008, 105 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.