

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE CONVERSORES EM UMA MICRORREDE DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Gustavo César de Melo Oliveira¹; Leandro Freitas²; Reginaldo Vagner Ferreira³

¹ Bolsista (PIBIC), Engenharia de Controle e Automação, IFMG *Campus* Betim; gustavocesar.mo@gmail.com

² Orientador, docente, IFMG *Campus* Betim; leandro.freitas@ifmg.edu.br

³ Coorientador, docente, IFMG *Campus* Betim; reginaldo.ferreira@ifmg.edu.br

RESUMO

A expansão recente da geração distribuída no contexto de microrredes, principalmente por motivos econômicos e ambientais, tem possibilitado o surgimento de estruturas cada vez maiores e mais complexas, com variadas quantidades de conversores e técnicas de controle, diferentes modos de operação, presença ou ausência de cargas locais, dentre outros. Nesse cenário, considerando todo o contexto de microrredes, que abrange diferentes elementos operando em conjunto e com diferentes funções e aplicação de técnicas, o desafio de controle associado a estabilidade do sistema se torna muito relevante na implementação de microrredes. Dessa forma, a capacidade de representar matematicamente esses sistemas se apresenta como uma solução para o desafio exposto, tornando possível compreender o comportamento para diferentes situações e realizar análise de estabilidade frente a variações de diversos parâmetros, fornecendo maior garantia de uma operação segura e eficiente desses sistemas. Grande parte das representações matemáticas encontradas na literatura com foco em análise de estabilidade, nesse aspecto, está associada a modelagem de pequenos sinais em conjunto com métodos de linearização. Considerando o cenário exposto, o desenvolvimento deste projeto de pesquisa foi voltado para a proposição de um modelo de pequenos sinais flexível, capaz de representar diferentes configurações de microrredes, para análise de estabilidade do sistema, sem a necessidade de grandes modificações no modelo ou realização de uma nova modelagem. Como estudo de caso do modelo proposto e desenvolvido, foi definida uma configuração específica de microrrede, composta por dois conversores, utilizando duas técnicas de controle diferentes: *droop* em um e *synchronverter* no outro, com a presença de cargas locais e operando no modo isolado. Para validar o modelo obtido, através do estudo de caso da configuração definida, foi feita a comparação de seu comportamento com o de um modelo dinâmico, simulado no MATLAB/Simulink, frente a aplicação de perturbação na tensão de saída do conversor com controle *droop*.

INTRODUÇÃO:

Nos últimos anos, a demanda por geração de energia renovável tem crescido consideravelmente, motivada principalmente por razões econômicas e ambientais, com uma maior busca por alternativas que possibilitam substituir os combustíveis fósseis (BORAZJANI et al., 2014) e diversificar a matriz energética. Esse comportamento pode ser observado numericamente: enquanto em 2010 a geração de energia renovável no mundo era de pouco menos que 4200 terawatts-hora (TWh), em 2020 essa geração ultrapassou o valor de 7400 TWh, representando um aumento de aproximadamente 77% em um intervalo de 10 anos (RITCHIE; ROSER; ROSADO, 2020).

Nesse cenário, a ideia de geração distribuída (GD) tem sido amplamente discutida e aplicada, em que fontes, como energia fotovoltaica e turbinas eólicas, fornecem energia elétrica para um sistema de distribuição local (VECHIU et al., 2011). A possibilidade da integração de unidades de geração distribuída viabilizou o conceito de microrredes, que se resume na possibilidade de interligação entre fontes, cargas e elementos de armazenamento (VANDOORN et al., 2011), criando um sistema autônomo, capaz de operar tanto de forma conectada quanto isolada da rede principal (ROGERS et al., 2012).

A interligação dos elementos em uma microrrede estabelece a necessidade de interfaces entre as unidades de geração distribuída, uma vez que os variados tipos de fontes geradoras apresentam diferentes formas de

geração, como: fontes CA de frequência variável, fontes CA de alta frequência e fontes CC (ZHONG; WEISS, 2011). Essas interfaces são conhecidas como conversores de potência.

Nesse sentido, o controle de conversores se apresenta como um elemento consideravelmente relevante em microrredes, em termos de estabilidade e qualidade de energia. Existem diferentes técnicas de controle de conversores, sendo que algumas delas permitem o compartilhamento de cargas ou fornecimento de energia para a rede principal sem comunicação entre os conversores (BORAZJANI et al., 2014). Se destaca, nesse cenário, o controle *droop*, já consolidado na literatura, e o *synchronverter*, que tem recebido atenção entre pesquisadores (FERREIRA et al., 2016; ZHONG; WEISS, 2011).

Considerando todo o contexto de uma microrrede, que envolve desde o controle utilizado em um conversor até a operação de toda a estrutura, análise de estabilidade se torna um tema muito pertinente para compreender melhor o comportamento do sistema frente a diferentes parametrizações e configurações. Grande parte dos modelos desenvolvidos para análise de estabilidade, nesse contexto, está associada a modelagem de pequenos sinais em conjunto com métodos de linearização, que possibilitam a representação da dinâmica do sistema, válida em torno de um ponto de operação (KONSTANTOPOULOS et al., 2014).

Tendo em vista o cenário apresentado, este projeto de pesquisa tem como objetivo a simulação e modelagem de pequenos sinais de microrredes, utilizando diferentes configurações e técnicas de controle aplicadas a conversores, com foco em análise de estabilidade. Dessa forma, foi desenvolvido um modelo de pequenos sinais com uma estrutura flexível, para diferentes configurações de microrredes, permitindo representar variadas configurações através de pequenas modificações no modelo, sem a necessidade de uma nova modelagem.

METODOLOGIA:

O modelo de pequenos sinais flexível, desenvolvido nesta pesquisa, utilizou como ponto de partida a modelagem apresentada por Ferreira et al. (2019), que, apesar de ter uma estrutura com aspecto flexível, não explorou essa característica para diferentes configurações de microrredes.

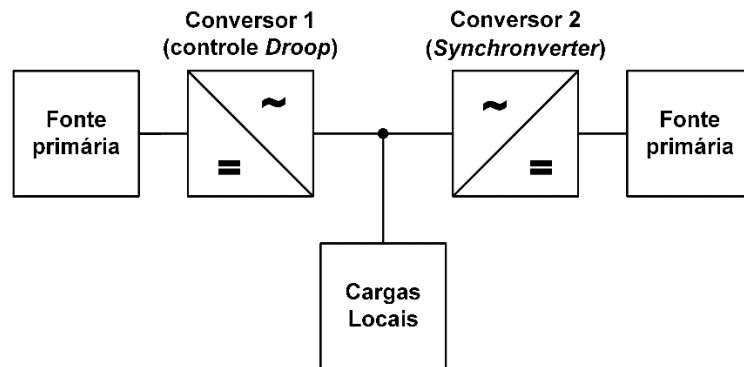
Em Ferreira et al. (2019) é possível observar um modelo composto por blocos de matrizes de transferência em que, a conexão entre eles forma a estrutura de um conversor conectado à rede principal, onde foram investigadas duas configurações distintas de microrredes, fazendo uso de duas técnicas de controle de conversores: *droop* em uma configuração e *synchronverter* em outra.

Nesse sentido, para o conceito do modelo desenvolvido nesta pesquisa, foi pensada uma estrutura que, através dos blocos modelados em Ferreira et al. (2019), conseguisse representar diferentes configurações de microrredes, permitindo adicionar ou remover cargas locais e conversores, com diferentes técnicas de controle, bem como conectar à rede principal ou operar no modo isolado. Isso foi feito através do levantamento das equações relacionadas as correntes e tensões na microrrede, que são as variáveis de entrada e saída dos blocos, juntamente com as impedâncias.

Com as equações do modelo, foi possível obter uma estrutura flexível, em que a inserção ou remoção de conversores, com diferentes técnicas, rede principal e cargas, depende apenas da conexão ou desconexão de blocos em pontos específicos do modelo.

Com o objetivo de comprovar a capacidade de representação do modelo obtido, foi proposto um estudo de caso de uma microrrede composta por dois conversores, cargas locais e operando isolada da rede principal. Para cada conversor foi utilizada uma técnica de controle diferente, implementando o controle *droop* em um e *synchronverter* no outro. O diagrama de blocos mostrado na Figura 1 apresenta a estrutura definida no estudo de caso.

Figura 1 – Diagrama de blocos da microrrede definida para estudo de caso.

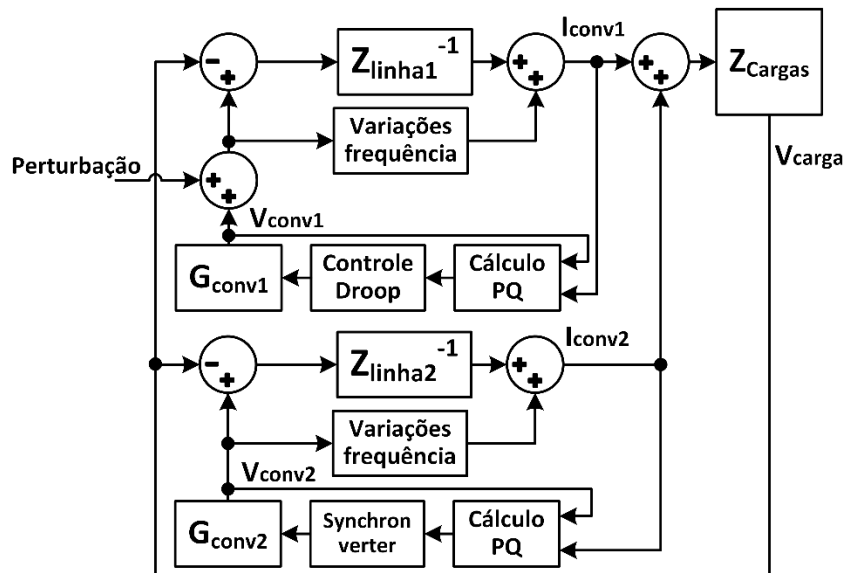


Fonte: autores.

Para implementação do modelo de pequenos sinais, foi desenvolvido um algoritmo no *software* MATLAB, que possibilita a utilização de diversas ferramentas de análise de estabilidade nesse contexto. Como forma de validação do modelo, foram realizadas simulações no ambiente de simulação Simulink que, por ser integrado ao MATLAB, facilita consideravelmente a realização de análises comparativas.

O modelo de pequenos sinais do estudo de caso proposto pode ser melhor compreendido através do diagrama de blocos mostrado na Figura 2, onde, a representação de cada conversor inclui: a impedância de linha, a malha de controle, juntamente com o próprio conversor, e a influência das variações de frequência nas impedâncias de linha.

Figura 2 – Diagrama de blocos do modelo de pequenos sinais do estudo de caso.



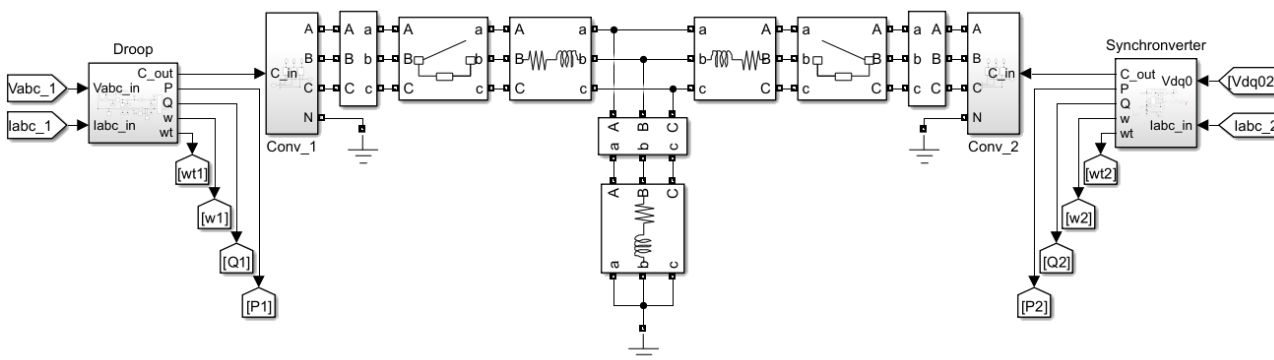
Fonte: autores.

Na Figura 2 é possível identificar o conversor com controle *droop* no lado superior esquerdo, o conversor com *synchronverter* logo abaixo dele e as cargas locais no lado superior direito.

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

A Figura 3 apresenta a montagem realizada no Simulink da microrrede utilizada para estudo de caso do modelo de pequenos sinais flexível desenvolvido. No lado esquerdo da figura é possível visualizar o conversor controlado pela técnica de controle *droop* e no direito está o outro conversor, que utiliza a técnica do *synchronverter*. No centro da figura, é possível observar a carga RL utilizada, representando as cargas locais presentes na microrrede.

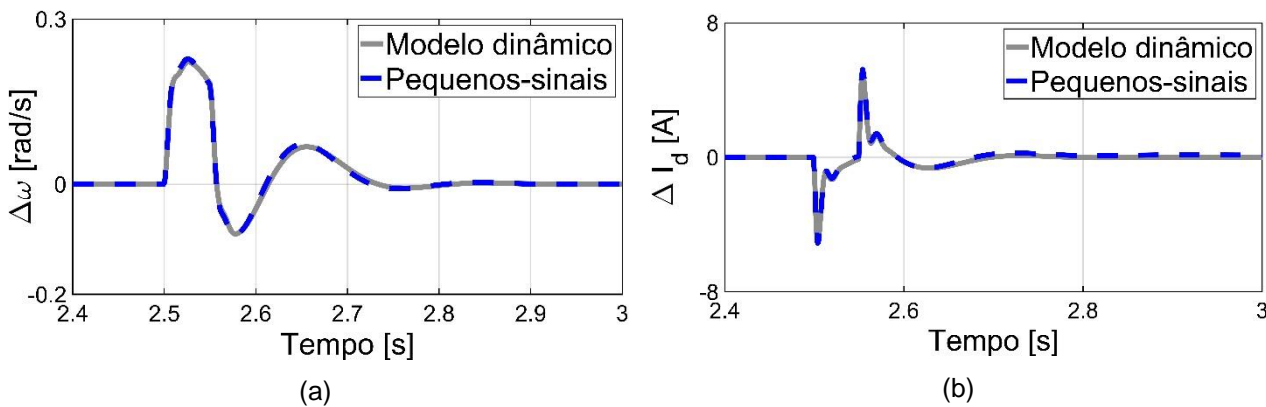
Figura 3 – Circuito da microrrede simulada no Simulink.



Fonte: autores.

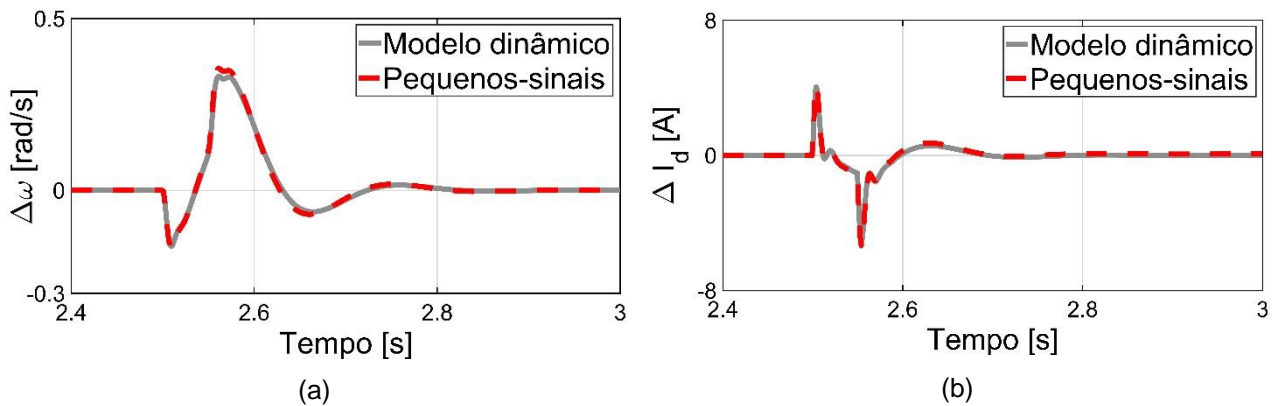
Aplicando uma perturbação de 5% de afundamento da tensão de saída do conversor com controle *droop*, durante 50 ms, foi observado o comportamento da frequência de saída e da corrente de eixo direto, em cada um dos conversores, do modelo de pequenos sinais e do modelo dinâmico simulado. A Figura 4 mostra os resultados obtidos analisando a saída do conversor com controle *droop* e a Figura 5 mostra os resultados analisando a saída do conversor com controle *synchronverter*.

Figura 4 – Comportamento da (a) frequência de saída e (b) corrente de eixo direto no conversor com controle *droop*.



Fonte: autores.

Figura 5 – Comportamento da (a) frequência de saída e (b) corrente de eixo direto no conversor com controle *synchronverter*.



Fonte: autores.

Como é possível observar nas Figuras 4a, 4b, 5a e 5b, a dinâmica do modelo de pequenos sinais se aproximou consideravelmente da do modelo dinâmico. Isso mostra que o modelo de pequenos sinais desenvolvido representou devidamente a configuração proposta, permitindo então a validação do modelo.

Considerando que a modelagem de pequenos sinais, com o objetivo de análise de estabilidade, está associada a linearização, é importante levar em conta que o desempenho do modelo depende do quão perto dos pontos de operação ele está sendo utilizado. Quanto mais longe, maior a diferença do comportamento do modelo de pequenos sinais em relação ao sistema real.

CONCLUSÕES:

O desenvolvimento deste projeto de pesquisa permitiu a proposição de um modelo de pequenos sinais flexível, que comporta diferentes configurações de microrredes, obtido através da expansão do modelo desenvolvido em Ferreira et al. (2019).

O estudo de caso proposto permitiu a validação do modelo de pequenos sinais, em que a configuração de uma microrrede com dois conversores, um com controle *droop* e outro com *synchronverter*, cargas locais e operando no modo isolado, foi utilizada na comparação entre modelo de pequenos sinais e modelo dinâmico, sendo este último obtido através de simulação no Simulink.

Os resultados de validação obtidos, apresentaram grande proximidade entre modelo de pequenos sinais e modelo dinâmico, mostrando que o modelo de pequenos sinais tem boa capacidade de representação. Nesse sentido, o próximo passo de desenvolvimento é avançar para análise de estabilidade, onde, através da variação de parâmetros de controle, é possível definir quais são os limites de estabilidade do sistema.

Outra análise que pode ser relevante para este trabalho é a verificação da região de validade do modelo de pequenos sinais proposto, onde é possível quantificar a deterioração da capacidade de representação do modelo à medida em que é aumentada a distância dos pontos de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

BORAZJANI, P. et al. A Review on Microgrid Control Techniques. **2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)**, p. 749-753, 2014.

FERREIRA, R. V. et al. Dynamic Analysis of Grid-Connected Droop-Controlled Converters and Synchronverters. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, p. 741-753, jun. 2019.

FERREIRA, R. V. et al. Single-phase synchronverter for residential PV power systems. **17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**, p. 861-866, 2016.

KONSTANTOPOULOS, G. C. et al. Bounded Droop Controller for Accurate Load Sharing Among Paralleled Inverters. **2014 American Control Conference**, p. 934-939, 2014.

RITCHIE, H.; ROSER, M.; ROSADO, P. Renewable Energy. **Our World in Data**, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/renewable-energy>. Acesso em: 01 maio 2022.

ROCABERT, J. et al. Control of Power Converters in AC Microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 11, p. 4734-4749, nov. 2012.

VANDOORN, T. L. et al. A Control Strategy for Islanded Microgrids With DC-Link Voltage Control. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 2, p. 703-713, abr. 2011.

VECHIU, I. et al. Control of Power Converters for Microgrids. **COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering**, v. 30 n. 1, p. 300-309, 2011.

ZHONG, Q.; WEISS, G. Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 4, p. 1259-1267, abr. 2011.