

MODELAGEM DE PEQUENOS SINAIS PARA CONVERSORES SEGUIDORES DE REDE NO CONTEXTO DE MICRORREDES DE ENERGIA ELÉTRICA

Gustavo César de Melo Oliveira¹; Reginaldo Vagner Ferreira²; Leandro Freitas³

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

2 Orientador: Pesquisador do IFMG, IFMG *Campus* Betim; reginaldo.ferreira@ifmg.edu.br

3 Coorientador: Pesquisador do IFMG, IFMG *Campus* Betim; leandro.freitas@ifmg.edu.br

RESUMO

Os avanços de pesquisadores e empresas do setor de energia elétrica em áreas relacionadas a geração distribuída e microrredes, motivados principalmente por questões econômicas e ambientais, tem tornado esses sistemas cada vez mais complexos e diversos em termos de: formas de geração, quantidade de conversores, técnicas de controle, modos de operação quanto a conexão com uma rede principal e presença de cargas locais. Nesse contexto, modelos de pequenos sinais para análise de estabilidade de microrredes representam uma importante ferramenta para maior garantia de uma operação segura desses sistemas. Antes, na literatura, era possível encontrar apenas modelos de pequenos sinais fixos aplicados às microrredes, sem capacidade de modularidade, no sentido de permitir a fácil representação de diferentes configurações. Essa ausência foi suprida no projeto de pesquisa “Modelagem, Simulação e Controle de Conversores em uma Microrrede de Geração Distribuída”, desenvolvido no IFMG, onde um modelo de pequenos sinais modular de microrrede foi proposto. Porém, o modelo permaneceu limitado do ponto de vista do modo de operação de conversores, uma vez que, os conversores seguidores de rede, muito comuns no cenário de microrredes, não foram abordados. Dessa forma, o objetivo deste projeto de pesquisa consistiu na modelagem de pequenos sinais do conversor seguidor de rede com foco na aplicação no modelo modular de microrrede. Para validação da modelagem realizada nesta pesquisa, foi proposta uma estrutura simples de conversor seguidor de rede e rede principal, em que foram obtidos resultados de análise de estabilidade quanto aos limites dos ganhos de controle. Para demonstração da capacidade de integração do modelo do conversor seguidor de rede ao modelo de pequenos sinais modular de microrrede, foi definida e validada uma estrutura com: um conversor que emula a máquina síncrona, utilizando a técnica de controle *droop*, um conversor seguidor de rede, cargas locais e conexão com a rede principal.

Palavras-chave: microrredes; modelos de pequenos sinais; análise de estabilidade; conversores seguidores de rede; controle *droop*.

INTRODUÇÃO:

A busca recente por alternativas para substituir os combustíveis fósseis (BORAZJANI *et al.*, 2014) e diversificar as matrizes energéticas possibilitou o surgimento de conceitos como geração distribuída (GD), em que fontes, como fotovoltaica e eólica, fornecem energia elétrica para uma rede de distribuição local (VECHIU *et al.*, 2011), e microrredes, que correspondem a fontes, cargas e elementos de armazenamento operando em conjunto, como um único sistema (SAEED *et al.*, 2021).

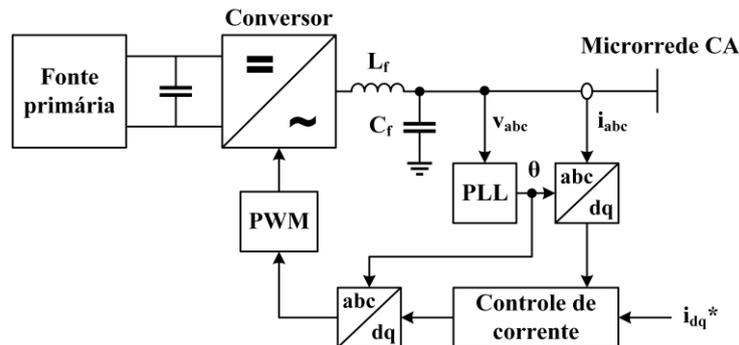
A aplicação desses conceitos só foi possível graças aos conversores de potência, que são as interfaces que permitem a conexão entre os diferentes elementos presentes (RAJ; GAONKAR, 2016), uma vez que os variados tipos de unidades geradoras podem apresentar diferentes formas de geração, como fontes de corrente alternada (CA) e fontes de corrente contínua (CC) (ZHONG; WEISS, 2011).

Na literatura, os conversores são comumente classificados de acordo com seu modo de operação, em que existem: formadores de rede, capazes de estabelecer níveis de tensão e frequência quando operam desconectados de uma rede principal; seguidores de rede, projetados para injetar potência na rede, e de suporte de rede, que regulam sua corrente/tensão de saída com o objetivo de manter frequência e amplitude da tensão da rede próximos dos valores estabelecidos (ROGABERT *et al.*, 2012; FERREIRA, 2020).

Os conversores seguidores de rede, também conhecidos como supridores de rede, atualmente, representam o tipo mais comum aplicado no contexto de GD (ROGABERT *et al.*, 2012) e, juntamente com os formadores de rede, são dominantes no cenário de microrredes (BORRELL *et al.*, 2020).

Considerando que a principal função do conversor seguidor de rede é injetar potência onde níveis de tensão e frequência já estão estabelecidos, sua estrutura de controle é composta principalmente por uma malha de controle de corrente e por um *Phase-Locked Loop* (PLL) (SHIN *et al.*, 2017), sendo o PLL responsável por sincronizar o conversor com a tensão da rede (ZHAO; FLYNN, 2020). A Figura 1 apresenta a estrutura mais comumente encontrada na literatura para esses conversores.

Figura 1 – Estrutura de potência e controle do conversor seguidor de rede.



Fonte: Adaptada de Zhou, Mohammed e Bahrani (2022).

A parte de potência na Figura 1 ilustra um conversor CC-CA, que recebe em sua entrada uma fonte primária e em sua saída possui um Filtro LC, para acoplamento com a microrrede. Na parte de controle do seguidor de rede, o PLL recebe a tensão V_{abc} e fornece o ângulo de fase θ ao bloco que transforma da referência abc para a referência dq, na entrada da malha de controle de corrente, e ao bloco que realiza a transformação oposta, onde é gerada a referência para o PWM. A malha de controle de corrente opera no referencial dq, recebendo em sua entrada a corrente medida e gerando a referência de tensão em sua saída. Essas transformações de referencial são realizadas através das transformadas de Clarke e Park.

Além da técnica de controle do seguidor de rede, existem várias outras técnicas aplicadas a conversores formadores e de suporte de rede. Dentre elas, as que emulam a máquina síncrona, como *droop* e *synchronverter*, representam uma possibilidade viável de controle descentralizado de microrrede, apresentando vantagens como o controle independente de injeção das potências ativa e reativa e facilidade no compartilhamento de potência (FERREIRA, 2020).

De forma geral, o contexto atual de microrredes envolve um cenário amplamente complexo, em que conversores, que podem operar de diferentes formas e com diferentes técnicas de controle, conectam diferentes fontes de geração, criando um sistema capaz de armazenar e fornecer energia para cargas locais, operando de forma isolada ou conectada a uma rede principal, que por sua vez pode receber potência injetada pela microrrede ou ajudar a microrrede na alimentação de uma carga (OLIVARES et al., 2014).

Neste sentido, modelos matemáticos capazes de reproduzir o comportamento de conversores reais são muito úteis na análise de estabilidade de microrredes. Grande parte dessas análises de estabilidade está associada a modelagem de pequenos sinais, no referencial dq, em conjunto com métodos de linearização, que representam a dinâmica do sistema em torno de pontos de operação (KONSTANTOPOULOS et al., 2014).

A maioria dos exemplos de modelagem de pequenos sinais no contexto de microrredes encontrados na literatura apresenta uma estrutura fixa de modelo, sem a possibilidade de realizar maiores modificações. Nesse aspecto, a modelagem desenvolvida por Ferreira et al. (2019) se difere da maioria, apresentando uma estrutura particionada de um conversor conectado à rede principal, aplicada a duas configurações distintas em relação ao método de controle. Esse modelo foi expandido no projeto de pesquisa “Modelagem, Simulação e Controle de Conversores em uma Microrrede de Geração Distribuída”, desenvolvido no IFMG, sendo proposto um modelo de pequenos sinais modular que possibilita diferentes configurações de microrredes. Porém, no modelo de pequenos sinais modular não foram contemplados os conversores seguidores de rede. Tendo em vista o cenário apresentado, o objetivo principal deste projeto de pesquisa consistiu no desenvolvimento da modelagem de pequenos sinais de conversores seguidores de rede voltada para a análise de estabilidade de microrredes compostas por esses conversores.

METODOLOGIA:

A modelagem de pequenos sinais do conversor seguidor de rede, realizada neste projeto, teve como referência o modelo apresentado em Ferreira et al. (2019), uma vez que, essa foi a base utilizada para o desenvolvimento do modelo de pequenos sinais de microrrede do projeto de pesquisa “Modelagem, Simulação e Controle de Conversores em uma Microrrede de Geração Distribuída”, realizado no IFMG.

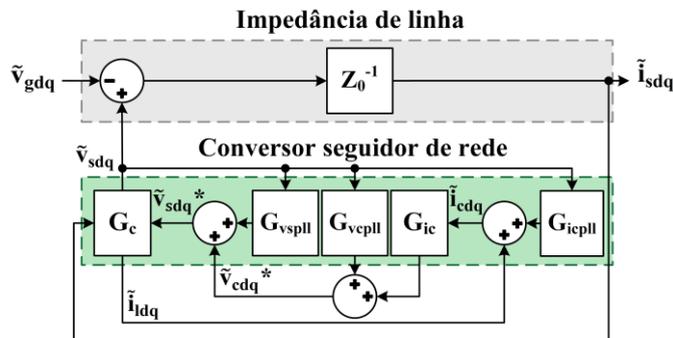
Em Ferreira *et al.* (2019) é desenvolvido um modelo composto por blocos de matrizes de transferência que, quando conectados, formam a estrutura de um conversor conectado à rede principal. Nele são propostas duas configurações distintas de microrredes, fazendo uso de duas técnicas de controle de conversores que emulam a máquina síncrona: *droop* em uma configuração e *synchronverter* em outra.

Dessa forma, a adaptação do modelo de Ferreira *et al.* (2019) em um conversor seguidor de rede consistiu em trocar a estrutura de controle, que passou a contar com a modelagem da técnica abordada nesta pesquisa, e modificar a representação do filtro LC, em que foi adicionado o acoplamento existente entre os eixos.

Apesar da estrutura de controle do seguidor de rede ser mais simples em comparação com as técnicas *droop* e *synchronverter*, a modelagem da influência do PLL nas transformações de referencial, como mostrado na Figura 1, representou um grande desafio, uma vez que o modelo foi desenvolvido totalmente no referencial dq, com o objetivo de manter fixos os pontos de operação. Nesse sentido, a modelagem desenvolvida em Wen *et al.* (2016) serviu para compreender uma forma viável de representar essas transformações. Em Wen *et al.* (2016), a ideia principal consiste em considerar que o modelo de pequenos sinais do conversor que possui PLL em sua estrutura de controle, apresenta dois quadros no referencial dq: um para o sistema, definido pela rede e que representa o referencial abc, e outro para a parte de controle, definido pelo PLL e que realmente representa o referencial dq.

Através da modelagem realizada, que levou em conta as considerações citadas, foi obtido o modelo de pequenos sinais do conversor seguidor de rede, apresentado na Figura 2. A parte da impedância de linha basicamente representa a impedância existente entre conversor e rede e, através de uma matriz de admitância no bloco Z_0^{-1} , fornece a corrente que flui pela linha ao receber em sua entrada a diferença de tensão entre conversor e rede. Na parte de controle do conversor seguidor de rede, G_{ic} representa o controlador de corrente, implementado como proporcional-integral (PI); os blocos G_{icpll} , G_{vcpll} e G_{vspll} , representam a influência do PLL nas transformações de abc para dq da corrente de realimentação e da tensão antecipada na saída do controle de corrente, e de dq para abc da tensão de referência gerada para o conversor, respectivamente, e G_c inclui o conversor juntamente com a modelagem do filtro LC.

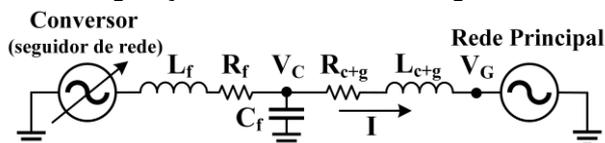
Figura 2 – Diagrama de blocos do modelo de pequenos sinais do conversor seguidor de rede.



Fonte: Adaptada de Ferreira *et al.* (2019).

O modelo de pequenos sinais apresentado na Figura 2 corresponde a configuração de conversor seguidor de rede e rede principal, como ilustrado na Figura 3, em que L_f , R_f e C_f compõem o filtro LC e R_{c+g} e L_{c+g} representam a impedância existente entre conversor e rede principal. Para validação desse modelo, seu comportamento foi comparado com o de um modelo dinâmico, simulado no MATLAB/Simulink, durante a aplicação de uma perturbação na tensão da rede principal. Além disso, análise de estabilidade foi realizada, com a avaliação da posição dos polos do sistema no plano complexo durante a variação individual do ganho proporcional da malha de controle de corrente e integral do PLL.

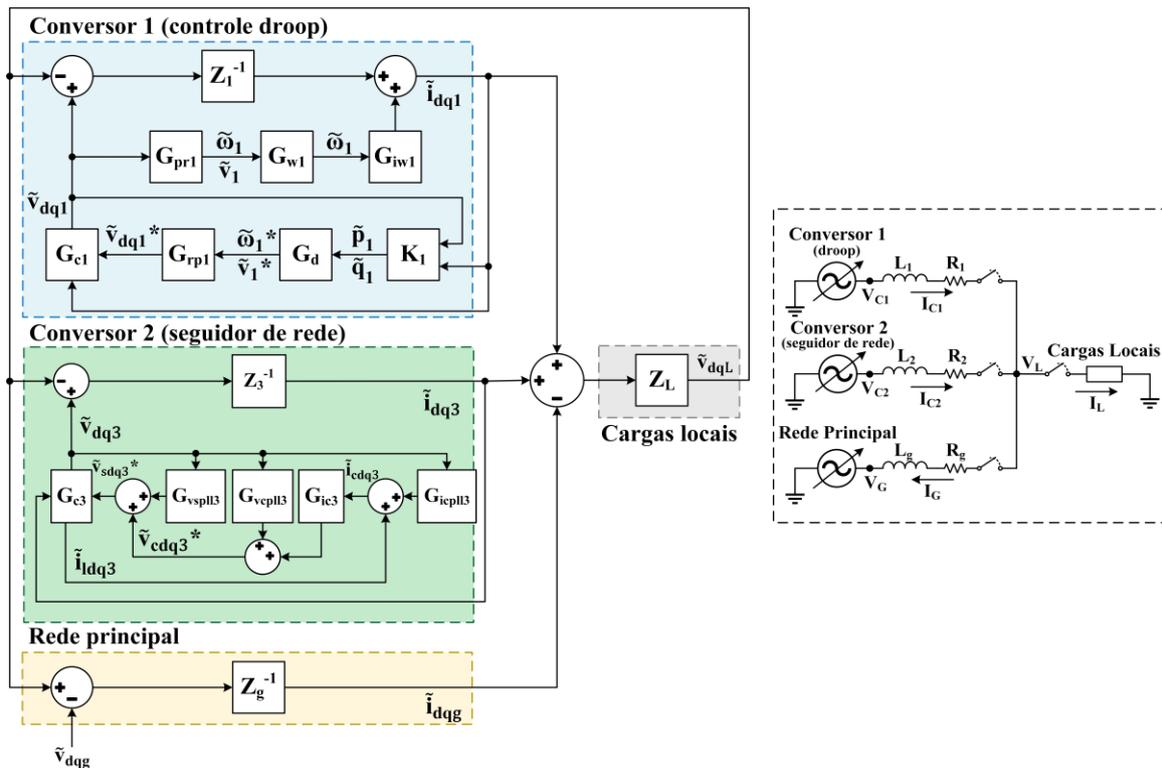
Figura 3 – Circuito da configuração de um conversor seguidor de rede e rede principal.



Fonte: Elaborada pelos autores.

O modelo de pequenos sinais do conversor seguidor de rede foi inserido na modelagem desenvolvida no projeto de pesquisa anterior, de uma microrrede modular, flexível em termos de modo de operação, quantidade de conversores, técnicas de controle e presença de cargas locais. Como esse modelo modular foi desenvolvido também com base na modelagem de Ferreira *et al.* (2019), sendo levantadas basicamente as equações relacionadas as correntes e tensões na microrrede, que são as variáveis de entrada e saída dos blocos, juntamente com as impedâncias, a inserção do seguidor nessa estrutura foi consideravelmente fácil, o que era o objetivo inicial da modelagem. A configuração proposta foi de um conversor que emula a máquina síncrona, com controle *droop*, um conversor seguidor de rede, cargas locais e conexão com a rede principal. A Figura 4 apresenta o diagrama de blocos dessa configuração, juntamente com seu circuito equivalente.

Figura 4 – Diagrama de blocos e circuito equivalente do modelo de pequenos sinais da microrrede proposta.



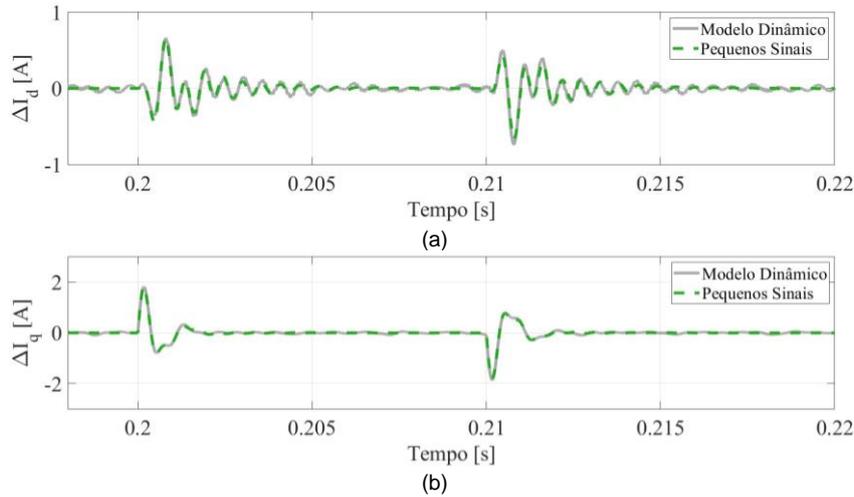
Fonte: Elaborada pelos autores.

Com o intuito de validar o modelo de pequenos sinais da microrrede, também foi implementado um modelo dinâmico dessa configuração, simulado no MATLAB/Simulink, com o objetivo de comparar os comportamentos durante a aplicação de uma perturbação na tensão da rede.

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

A Figura 5 apresenta os resultados de validação do modelo de pequenos sinais do conversor seguidor de rede, na configuração de conversor e rede principal. Na figura é mostrada a variação da corrente na saída do conversor frente a uma perturbação de 5%, durante 100 ms, na tensão de eixo em quadratura da rede, que corresponde a uma perturbação tanto na amplitude quanto no ângulo de fase dessa tensão.

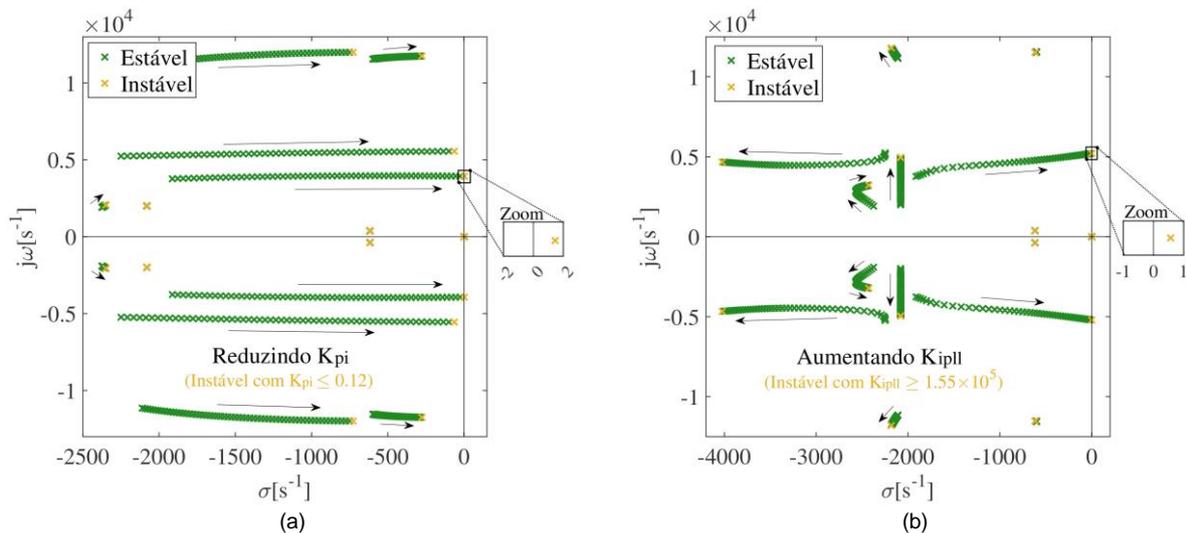
Figura 5 – Resultados de validação do modelo de pequenos sinais do conversor seguidor de rede.



Fonte: Elaborada pelos autores (MATLAB).

Como pode ser visto nas Figuras 5a e 5b, os resultados de modelo dinâmico e do modelo de pequenos sinais ficaram praticamente sobrepostos, com diferenças mínimas entre eles. Dessa forma, foi possível então validar a modelagem de pequenos sinais do conversor seguidor de rede, realizada neste projeto de pesquisa. A Figura 6 apresenta os resultados de análise de estabilidade, com a posição dos polos no plano complexo durante a variação do ganho proporcional da malha de controle de corrente, K_{pi} , e integral do PLL, K_{ipll} .

Figura 6 – Resultados de análise de estabilidade do modelo de pequenos sinais do seguidor de rede.



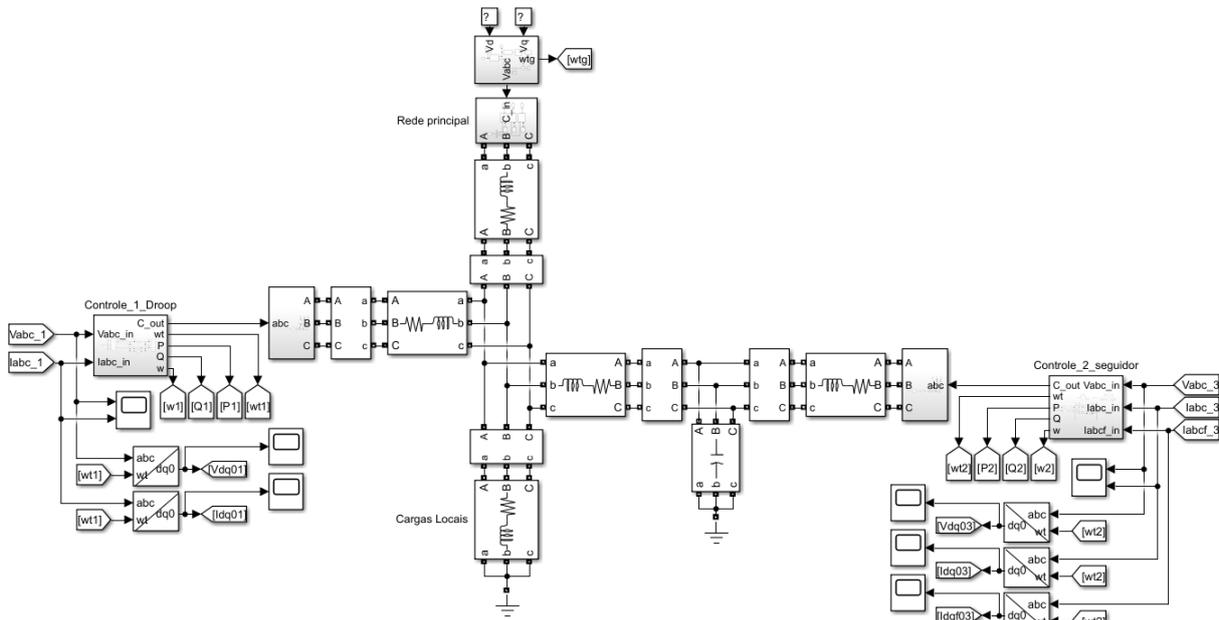
Fonte: Elaborada pelos autores (MATLAB).

Os polos em amarelo, nas Figuras 6a e 6b, indicam a instabilidade do modelo, apontada pela presença de algum polo no semiplano direito. Ao atingir a instabilidade, o valor indicado de cada um dos ganhos que estava sendo variado foi registrado, como mostrado nas figuras.

Os limites de estabilidade foram avaliados também no modelo dinâmico, simulado no MATLAB/Simulink, com o objetivo de avaliar a acurácia do modelo de pequenos sinais na determinação desses limites. O maior erro obtido foi de 5,38%, o que provou a capacidade do modelo em apontar devidamente a instabilidade.

A Figura 7 apresenta a estrutura do modelo dinâmico da microrrede, implementado no MATLAB/Simulink. Na figura é possível identificar o conversor com controle *droop*, na esquerda, o seguidor de rede, na direita, rede principal, no topo, e cargas locais, na parte inferior.

Figura 7 – Modelo dinâmico da configuração de microrrede definida.

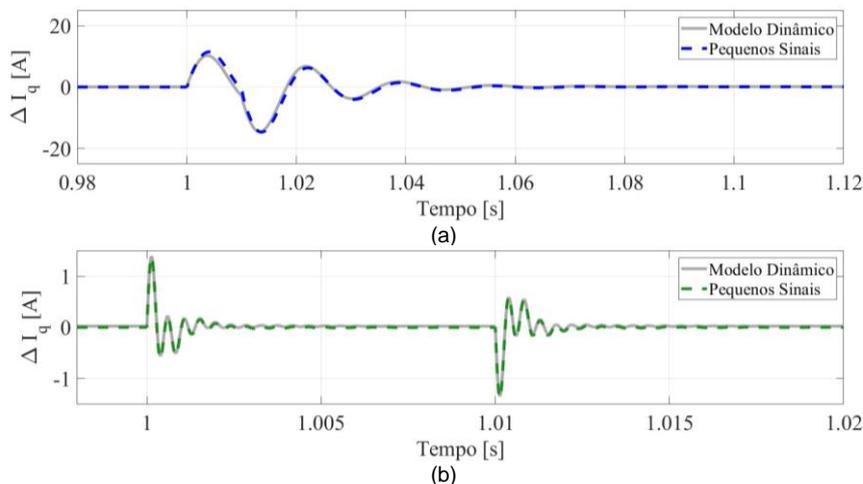


Fonte: Elaborada pelos autores (MATLAB).

Os resultados de validação do modelo de pequenos sinais da microrrede são apresentados na Figura 8, onde em 8a e 8b está o comportamento da corrente de eixo em quadratura na saída do conversor com controle *droop* e do conversor seguidor de rede, respectivamente, durante a aplicação de uma perturbação de 5% na tensão de eixo em quadratura da rede principal, no intervalo de 100 ms.

Os resultados apresentados na Figura 8 possibilitaram a validação do modelo de pequenos sinais da microrrede proposta, com a presença do conversor seguidor de rede modelado nesta pesquisa. O comportamento observado em ambos os modelos (dinâmico e de pequenos sinais) apresentou grande proximidade, com diferenças mínimas, justificadas pela linearização de comportamentos não lineares existentes na estrutura.

Figura 8 – Resultados de validação do modelo de pequenos sinais da microrrede: (a) corrente de eixo em quadratura no conversor com controle *droop* e (b) no seguidor de rede.



Fonte: Elaborada pelos autores (MATLAB).

CONCLUSÕES:

O desenvolvimento deste projeto de pesquisa permitiu a modelagem de pequenos sinais do conversor seguidor de rede voltada para a aplicação em um modelo modular de microrredes, e sua principal contribuição consistiu na ampliação desse modelo de pequenos sinais modular, que passou a contar com a possibilidade da representação de um método de controle consideravelmente relevante tanto no contexto de geração distribuída quanto no de microrredes.

Os resultados de validação obtidos com o modelo de pequenos sinais do conversor seguidor de rede mostraram que a modelagem realizada desempenha de forma apropriada a representação do comportamento desse método de controle. A análise de estabilidade possibilitou compreender melhor os limites de ganhos do PLL e da malha de controle de corrente, para os quais o modelo opera corretamente.

A validação do modelo de pequenos sinais da microrrede, com conversor que emula a máquina síncrona e conversor seguidor de rede, mostrou que o modelo representa devidamente a dinâmica da estrutura definida. A partir do modelo de pequenos sinais da microrrede já validado, é possível fazer uso de diversas ferramentas de análise de estabilidade disponíveis, úteis na determinação de parâmetros e compreensão do comportamento do modelo frente a diferentes condições de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- BORAZJANI, P.; WAHAB, N. I. A.; HIZAM, H. b.; SOH, A. B. C. A review on microgrid control techniques. In: **2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 749–753.
- BORRELL, Á. et al. Collaborative voltage unbalance elimination in grid-connected ac microgrids with grid-feeding inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 36, n. 6, p. 7189–7201, 2020.
- FERREIRA, R. V. **Comparative Analysis of Techniques to Emulate Synchronous Machines in Grid-connected Converters**. Tese (Doutorado)—Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.
- FERREIRA, R. V.; SILVA, S. M.; ANTUNES, H. M. A.; VENKATARAMANAN, G. Dynamic analysis of grid-connected droop-controlled converters and synchronverters. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, p. 741–753, 2019.
- KONSTANTOPOULOS, G. C.; ZHONG, Q.-C.; REN, B.; KRSTIC, M. Bounded droop controller for accurate load sharing among paralleled inverters. In: **2014 American Control Conference**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 934–939.
- OLIVARES, D. E. et al. Trends in microgrid control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 5, n. 4, p. 1905–1919, 2014.
- RAJ, D. C.; GAONKAR, D. N. Frequency and voltage droop control of parallel inverters in microgrid. In: **2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy Communication (CIEC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 407–411.
- ROCABERT, J.; LUNA, A.; BLAABJERG, F.; RODRÍGUEZ, P. Control of power converters in ac microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 11, p. 4734–4749, 2012.
- SAEED, M. H.; FANGZONG, W.; KALWAR, B. A.; IQBAL, S. A review on microgrids' challenges & perspectives. **IEEE Access**, v. 9, p. 166502–166517, 2021.
- SHIN, S.-S.; OH, J.-S.; JANG, S.-H.; CHA, J.-H.; KIM, J.-E. Active and reactive power control of ess in distribution system for improvement of power smoothing control. **Journal of Electrical Engineering and Technology**, v. 12, p. 1007–1015, 2017.
- VECHIU, I.; LLARIA, A.; CUREA, O.; CAMBLONG, H. 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.
- WEN, B.; BOROYEVICH, D.; BURGOS, R.; MATTAVELLI, P.; SHEN, Z. Analysis of d-q small-signal impedance of grid-tied inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 31, n. 1, p. 675–687, 2016.
- ZHAO, X.; FLYNN, D. Transient stability enhancement with high shares of grid-following converters in a 100% converter grid. In: **2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 594–598.
- ZHONG, Q.; WEISS, G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 4, p. 1259–1267, 2011.