

Simulação Híbrida para Monitoramento de Tensão e Corrente em Redes de Distribuição com Geração Distribuída

Cleberton Reiz, Jônatas B. Leite.

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, São Paulo
(e-mail: Cleberton.reiz@unesp.br; jb.leite@unesp.br)*

Abstract: The power distribution system is the portion of the power grid that is most vulnerable to interruption events, caused by natural factors external or intrinsic to electrical equipment. In order to mitigate such events, real-time digital simulators are used to obtain the transients of the power system, however, this technique demands a large computational effort. In this context, a hybrid technique for transient simulation in distribution systems is proposed, combining the high sample rate of the time domain models for voltage and current monitoring with the processing speed of algorithms that operate the phasor models quasi-stationary or permanent. The proposed methodology allows to consider different technologies of distributed generators coupled in the grid. The results of the performed tests indicate consistency of the proposed methodology, representing the behavior of the transient in the electric power distribution system. All performed simulations are compared with specialized commercial software.

Resumo: O sistema de distribuição de energia elétrica é a parcela do sistema de potência mais vulnerável aos eventos de interrupção, originados por fatores naturais externos ou intrínsecos aos equipamentos elétricos. Na mitigação dos impactos desses eventos, simuladores digitais em tempo real são utilizados na obtenção dos transitórios do sistema elétrico, todavia, essa técnica demanda grande esforço computacional. Nesse contexto, propõe-se uma técnica híbrida para simulação do transitório em sistemas de distribuição, combinando a alta taxa de amostragem dos modelos no domínio do tempo para monitoramento de tensão e corrente com a velocidade de processamento dos algoritmos que operam os modelos fasoriais em regime quase-estacionário, ou permanente. A metodologia proposta também permite considerar diferentes tecnologias de geradores distribuídos acoplados na rede. Os resultados dos testes realizados indicam a consistência da metodologia proposta, representando o comportamento do transitório no sistema de distribuição de energia elétrica. Todas as simulações realizadas são comparadas com valores amostrais obtidos usando um *software* comercial especializado.

Keywords: Electric power distribution system, Distribution Networks Transients, Short-Circuit, Distributed Generation, Voltage and Current Monitoring.

Palavras-chaves: Sistema de Distribuição de Energia Elétrica, Transitórios em Redes de Distribuição, Curto-Circuito, Geração Distribuída, Monitoramento de Tensão e Corrente.

1. INTRODUÇÃO

A presença da geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) está crescendo significativamente nos últimos anos em função de suas vantagens econômicas e ambientais aliadas aos incentivos da legislação local. Em contrapartida, o acoplamento dos geradores distribuídos (GDs) eleva as correntes de curto-circuito e pode tornar o fluxo da rede bidirecional, criando um cenário mais complexo para as empresas concessionárias de distribuição. Considerações adicionais nos procedimentos de planejamento, operação e manutenção do SDEE serão necessárias diante desse cenário, visando assegurar a qualidade no fornecimento de energia.

A qualidade e continuidade do serviço de fornecimento de energia elétrica pode ser influenciada por interferências naturais ou de origem técnica. Tais interferências provocam transitórios eletromagnéticos, podendo danificar algum

equipamento do SDEE, afetar a coordenação entre os dispositivos de proteção, promover sobretensões na rede, entre outros (Theodoro *et al.*, 2018). Logo, faz-se necessário utilizar técnicas adequadas para compreender e solucionar tais problemas.

Os simuladores de transitórios são frequentemente utilizados, pois apresentam resultados precisos, mas demandam grande esforço computacional e tempo de processamento. Uma alternativa para atenuar tais desvantagens e garantir a qualidade dos resultados pode ser obtida por meio dos programas híbridos que combinam recursos dos simuladores de transitórios com programas baseados em séries temporais quase-estacionárias (QSTS). Os modelos híbridos têm grande relevância nos estudos de regulação de tensão, impacto da alta penetração de GDs no SDEE, entre outros (Theodoro *et al.*, 2019).

Diversos estudos realizaram uma análise do transitório eletromagnético utilizando um modelo equivalente simplificado do SDEE sem e com GDs conectados (Madruga *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2013; Lessa *et al.*, 2018). Entretanto, tais trabalhos utilizam *softwares* comerciais apresentando pouca ou nenhuma informação sobre os métodos e modelos utilizados nas simulações.

É extremamente complexo elaborar um modelo que descreva com precisão todas as dinâmicas da rede e, se for possível, a quantidade de parâmetros envolvidos tornaria o modelo inviável para aplicação (Andersson, 2008). Portanto, esse trabalho tem por objetivo fornecer um modelo simplificado para representar o transitório nos SDEEs com GDs conectados, permitindo avaliar a dinâmica do sistema em qualquer seção da rede com precisão garantida.

A metodologia proposta é dividida em duas partes. A primeira parte corresponde a um programa QSTS que utiliza o modelo polinomial de cargas elétricas e a matriz de impedância nodal do SDEE. Na segunda parte, calculam-se os valores transitórios usando modelos no domínio do tempo determinados pela impedância equivalente do SDEE com múltiplos GDs que é obtida através da simulação fasorial. No processo de validação, os resultados obtidos pela metodologia proposta em todas as simulações são comparados com aqueles obtidos por um *software* comercial.

2. METODOLOGIA

A metodologia proposta é esquematizada conforme a Fig. 1, que demonstra as técnicas para simulação do transitório no SDEE. A primeira linha representa a execução do programa QSTS através do cálculo do fluxo de potência e curto-circuito em cada intervalo de tempo, ΔT . A segunda linha representa a execução do modelo transitório equivalente no intervalo de tempo amostral, Δt , muito inferior ao ΔT .

2.1 Cálculo de Curto-Circuito em Regime Permanente

O SDEE pode ser representado matematicamente com a matriz de impedância nodal, que incorpora a impedância de todas as linhas da rede, apresentando em sua diagonal principal as impedâncias de Thévenin e fora dela as impedâncias de transferência. A técnica de construção da matriz de impedância nodal é descrita por Grainger e Stevenson (1997).

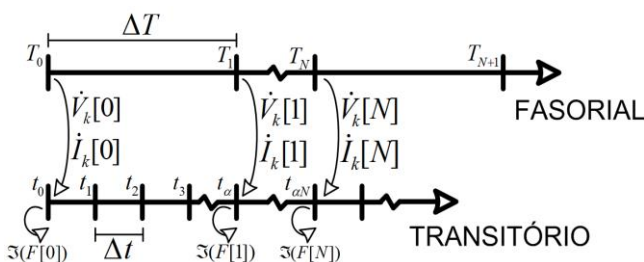


Fig. 1 Sequência de operações da metodologia proposta.

A corrente de curto-circuito pode ser obtida diretamente com as leis de Kirchhoff juntamente com a matriz de impedância nodal. A expressão (1) calcula a corrente de curto-circuito estimada no ponto da falta, J_f , multiplicando a tensão pré-falta na barra curto-circuitada, $V_f(0)$, com a admitância de Thévenin na mesma barra, Z_{ff}^B . Os valores de pré-falta são calculados usando o algoritmo de fluxo de potência, enquanto os diferentes tipos de faltas derivam das considerações adicionais em Zhang *et al.* (1995), por meio de pequenas modificações na expressão (1).

$$J_f = Z_{ff}^B{}^{-1} V_f(0) \quad (1)$$

Com as expressões (2) e (3), as tensões do sistema no estado normal de operação podem ser atualizadas para os valores em condição de curto-circuito, sendo ΔV_i a variação de tensão na i -ésima barra, Z_{if}^B é a impedância de transferência da barra i em relação à barra em falta f e $V_i(0)$ e $V_i(F)$ são as tensões da i -ésima barra no estado pré- e pós-falta, respectivamente. Por fim, as correntes em todas as linhas do SDEE podem ser atualizadas calculando a corrente nodal e realizando o processo de varredura *backward* descrito em Cheng *et al.* (1995).

$$\Delta V_i = Z_{if}^B J_f \quad (2)$$

$$V_i(F) = V_i(0) + \Delta V_i \quad (3)$$

Os GDs rotativos e seus efeitos na condição de curto-circuito são incorporados com auxílio da redução de Kron. A construção da matriz de impedância nodal é realizada até a barra na qual o GD encontra-se conectado. Nessa etapa, a redução de Kron atualiza todas as submatrizes de acordo com a expressão (4).

$$Z_{hi}^{atual} = Z_{hi} - \frac{Z_{h(N+1)} Z_{(N+1)i}}{Z_{kk} + Z_{GD}} \quad (4)$$

Na expressão (4), Z_{hi} refere-se a submatriz que terá seus valores atualizados, $Z_{h(N+1)}$ e $Z_{(N+1)i}$ são as impedâncias de transferência relacionadas com a linha do GD, $N+1$. Z_{kk} refere-se a impedância de Thévenin da barra na qual o GD encontra-se conectado, enquanto Z_{GD} representa a impedância equivalente do GD.

Os GDs acoplados à rede por meio de inversores apresentam impacto menor nas correntes de curto-circuito, quando comparados com os GDs rotativos (Thurner; Braun, 2018). No método proposto, a formulação utilizada insere os efeitos dessa tecnologia na variação da tensão provocada pelo curto-circuito, conforme expressões (5) e (6).

$$I_{SCGD} = [Z_{ff}^B]^{-1} \sum_{m=1}^n Z_{fm} I_{GD}^{inv,m} \quad (5)$$

$$\Delta V_i = Z_{if}^B J_f + \sum_{m=1}^n Z_{im}^B I_{SCGD} \quad (6)$$

Z_{ff} é a impedância de Thévenin na barra em falta, Z_{fm} é a impedância de transferência em relação ao GD m , enquanto $I_{GDinv,m}$ é a corrente do GD m na situação pré-falta, previamente multiplicado por um fator λ que realiza o ajuste dessa injeção de corrente durante o evento do curto-circuito. Na expressão (6) encontra-se o ajuste necessário da expressão (2) para incorporar os efeitos dos GDs acoplados por inversores, adicionando o produto da impedância de transferência do GD m com a corrente calculada em (5).

2.2 Determinação do Modelo Transitório

A essência do modelo proposto consiste em representar qualquer elemento do SDEE com um equivalente de Thévenin no domínio do tempo discreto. Métodos numéricos de diferenciação são usados para discretizar as equações de tensão nos componentes expressos em tempo contínuo. Na Fig. 2 é ilustrado um exemplo do modelo equivalente algébrico discreto para o indutor.

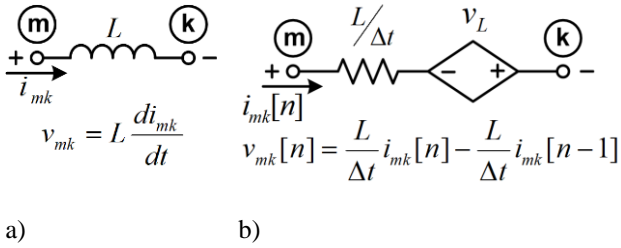


Fig. 2 Relação entre tensão e corrente do indutor: a) domínio do tempo contínuo b) domínio do tempo discreto.

A relação entre o valor da indutância e o intervalo de tempo amostral ($L/\Delta t$) é equivalente à resistência. O modelo QSTS fornece os valores de tensão e corrente por fase na k -ésima barra do SDEE, $\hat{V}_k[N]$, $\varphi_v[N]$, $\hat{I}_k[N]$ e $\varphi_I[N]$, respectivamente. Tais valores são utilizados na determinação da resistência $r_{xk}[N]$ e fonte de tensão controlada por corrente $v_{xk}[n]$ conforme (7) e (8), respectivamente, onde o operador $Im(\cdot)$ considera a parte imaginária da relação de tensão e corrente, enquanto o operador $sin(\cdot)$ utiliza somente o sinal resultante da relação angular de tensão e corrente.

$$r_{xk}[N] = \frac{Im(\hat{V}_k[N]/\hat{I}_k[N])}{(\omega\Delta t)sin(\varphi_v[N]-\varphi_I[N])} \quad (7)$$

$$v_{xk}[n] = sin(\varphi_v[N] - \varphi_I[N])r_{xk}[N]i_k[n-1] \quad (8)$$

Essa formulação é suficientemente genérica para suportar ambos os comportamentos, indutivo e capacitivo, da relação entre tensão e corrente. O valor da resistência é calculado para cada novo valor de $\hat{V}_k[N]$ e $\hat{I}_k[N]$ que são obtidos em

intervalos ΔT . Amostras indicadas por N e n tem origem dos modelos QSTS e transitório, respectivamente.

2.3 Cálculo do Transitório no SDEE

No sistema equivalente, a fonte na subestação comporta-se como única fonte de energia permitindo calcular rapidamente o transitório no SDEE. Na Fig. 3 encontra-se o circuito equivalente obtido usando o modelo equivalente algébrico discreto.

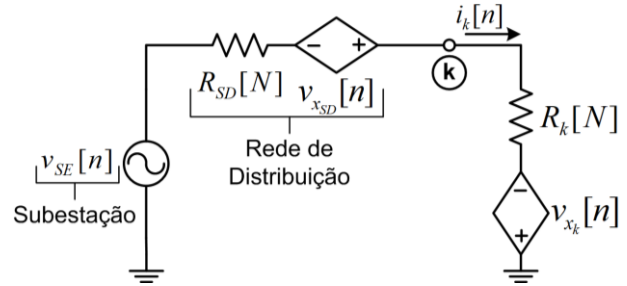


Fig. 3 Circuito equivalente de um alimentador do SDEE.

O valor de $R_k[N]$ concentra todas as resistências do modelo equivalente discreto para a k -ésima barra que é calculado como em (9), onde o operador $Re(\cdot)$ obtém a parte real.

$$R_k[N] = Re(\hat{V}_k[N]/\hat{I}_k[N]) + r_{xk}[N] \quad (9)$$

A impedância equivalente da rede de distribuição, $R_{SD}[N]$ e $v_{xSD}[n]$, é analogamente modelada no domínio do tempo discreto. Assim, assumindo os valores amostrais da tensão na subestação, é possível calcular as amostras de corrente fluindo pela k -ésima barra usando (10). Em (11), o valor amostral da tensão na k -ésima barra é formulado considerando a corrente amostral circulante pelo circuito equivalente.

$$i_k[n] = \frac{v_{SE}[n] + v_{xSD}[n] + v_{xk}[n]}{R_{SD}[N] + R_k[N]} \quad (10)$$

$$v_k[n] = R_k[N]i_k[n] - v_{xk}[n] \quad (11)$$

Em virtude de $v_{xk}[n]$ depender do valor da corrente amostral do último passo de tempo, $i_k[n-1]$, os fatores multiplicadores das correntes subtransitórias em curto-circuito disponibilizados em Gers (2004) podem ser utilizados.

3. ESTUDO DE CASO

Para avaliar os resultados da metodologia proposta o sistema de 69 barras de Baran e Wu (1989) é utilizado. Trata-se de parte de um SDEE trifásico equilibrado da *Pacific Gas and Electric Company*, com carga total de 3802,19 kW de potência ativa, 2694,60 kVar de potência reativa e tensão nominal de 12,66 kV. A topologia do sistema é indicada na Fig. 4.

As simulações de curto-circuito consideram primeiramente uma falta franca trifásica e posteriormente uma falta monofásica, ambas na barra 66. A análise do transitório ocorre

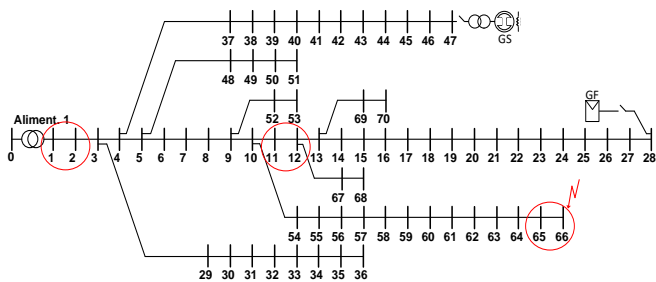


Fig. 4 Topologia do sistema de distribuição utilizado.

em três ramos distintos: próximo da subestação, 1-2; da falta, 65-66; e no ramo, 11-12. A corrente no ramo 11-12 possui fluxo de corrente exclusivo das cargas e do GD da barra 28, quando conectado. Para cada ramo realiza-se um teste com o sistema sem a conexão de GDs. Posteriormente são realizados dois testes com a presença de GDs: 1) um GD síncrono (GS) acoplado na barra 47; 2) acoplamento simultâneo do GS da barra 47 com um GD fotovoltaico (GF) na barra 28. O GS possui 1,2 MW de potência ativa e 300 kVAR de potência reativa, enquanto o GF possui 900 kW.

A atuação dos sistemas de proteção anti-ilhamento do GD costuma ocorrer em um período inferior a 2 ciclos, logo, a limitação da análise aos primeiros 10 ciclos é suficiente para

monitorar adequadamente as tensões e correntes do sistema. Além disso, para garantir a qualidade na representação do sinal senoidal são geradas 50 amostras por ciclo. Em todos os testes, os valores eficazes de corrente e tensão do método proposto e do *software* DigSILENT foram comparados usando os valores amostrais coletados. Os resultados do modelo proposto são correlacionados com os valores do *software* DigSILENT. Para cada simulação realizada o tempo de processamento foi igual ou inferior a 33 ms.

3.1 Simulação de Falta Trifásica sem GDs

Na Fig. 5 encontram-se os resultados de corrente do método proposto, correlacionados com os valores do *software* DigSILENT. O eixo das abcissas de cada gráfico equivale aos resultados do método proposto, enquanto o eixo das ordenadas compõe os valores obtidos pelo DigSILENT.

A correlação permite observar e determinar a intensidade da relação entre os conjuntos de dados. Se os resultados de ambas as técnicas de solução forem iguais, o comportamento dos resultados será equivalente a uma reta com coeficiente angular unitário. As amostras com maior diferença são destacadas e facilmente observadas no gráfico, pois suas posições no plano diferem do comportamento esperado.

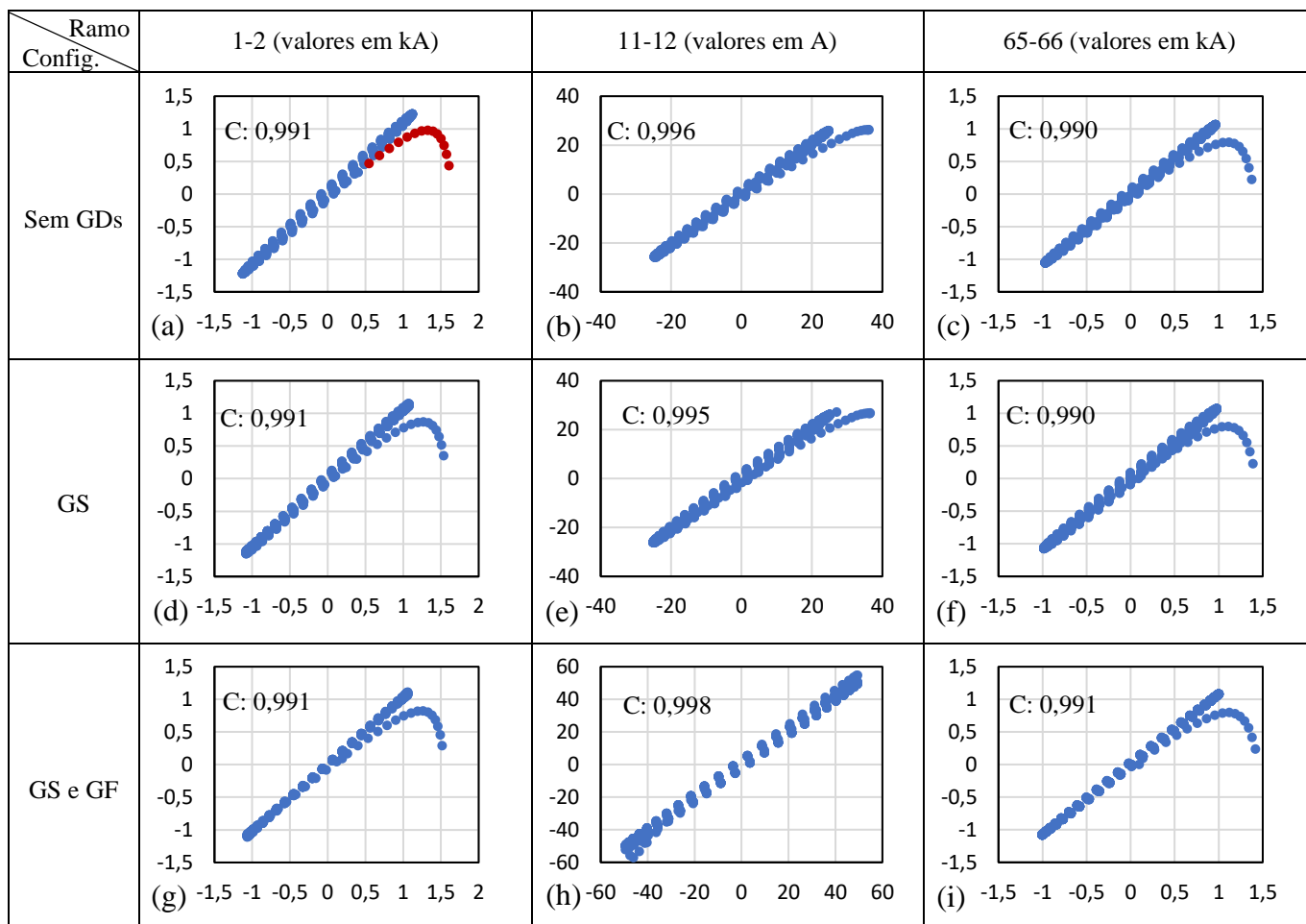


Fig. 5. Correlação da corrente.

Na Tabela 1 ilustra-se os valores de tensão e corrente RMS calculados com as amostras obtidas pelos métodos proposto e DigSILENT®. Esta tabela permite verificar a consistência dos resultados para todos os testes realizados.

Na análise da seção 1-2 indicada na Fig. 5 (a), é possível observar que a maior parte das amostras possui valores muito próximos, formando uma linha com correlação de 0,991. As amostras destacadas em vermelho apresentam maior diferença e estão relacionadas com o início curto-circuito. A diferença decorre do carregamento do indutor no início do curto-circuito, considerado pelo método proposto. Na condição pós-falta, o indutor encontra-se carregado e promove uma descarga súbita de energia, elevando os níveis de corrente em uma tentativa de sustentar a falta, que pode ser interpretada como uma grande carga. Apesar disso, verifica-se na Tabela 1 que os valores de tensão RMS são similares entre os métodos, enquanto a diferença de corrente RMS é 22,31 A. O comportamento observado na seção 1-2 e 65-66 é semelhante, com a diferença que a amplitude da corrente na seção 65-66 é menor.

A análise no ramo 11-12 permite verificar pequenas variações entre as técnicas de solução com e sem GDs, pois a corrente de curto-circuito não flui por esta seção. Na Fig. 5 (b) ilustram-se os resultados de corrente obtidos para o ramo 11-12 sem GDs. As amostras de corrente tem valores semelhantes entre as técnicas de solução, com correlação de 0,996. A maior diferença entre as amostras permanece no início do curto-circuito, decorrente da energia armazenada pelo indutor na condição de pré-falta. Todavia, os resultados de tensão e corrente RMS na Tabela 1 mostram a consistência e precisão da maioria das amostras, com diferença de 0,003 pu e 0,41 A, respectivamente.

3.2 Simulação de Falta Trifásica com GDs

A análise da seção 1-2 permite observar o comportamento transitório com ênfase na contribuição da subestação, mas também mostra a influência e impacto do GD nos resultados do respectivo ramo. Nas Fig. 5 (d) e (g) encontra-se a correlação dos testes com GDs para a respectiva seção. Verifica-se que em tais figuras a correlação da corrente permanece precisa, com valor de 0,991 e boa aproximação nos

valores de tensão e corrente RMS. A inclusão do GS na barra 47 promove uma pequena redução na corrente do ramo 1-2. Essa redução se eleva quando o GF também é conectado.

Nas Fig. 5 (e) e (h) ilustram-se os resultados de correlação do ramo 11-12 com um e dois GDs. A presença do GS na barra 47 praticamente não promove alteração nos resultados da seção 11-12. No entanto, a conexão do GF eleva em cerca de 50% a amplitude da corrente de curto-circuito no ramo 11-12, pois sua contribuição flui através da respectiva seção. A correlação obtida é de 0,995 e 0,998 para os testes com um e dois GDs, respectivamente. Além disso, As diferenças de tensão e corrente RMS para os testes com um e dois GDs são de 0,005 pu, 0,008 pu, 0,46 A e 0,80 A, respectivamente, indicando a consistência da metodologia proposta.

Testes realizados no ramo 65-66 permitem verificar a influência dos GDs próximo à barra em falta. Os resultados considerando GDs estão ilustrados nas Fig. 5 (f) e (i). O sistema teste com um GS na barra 47 promove um aumento na corrente de curto-circuito no ramo 65-66, onde a diferença em relação ao teste sem GD é de 9,86 A e 9,64 A, para o método proposto e DigSILENT, respectivamente.

A maior diferença de corrente RMS para todos os testes com falta trifásica ocorre no ramo 65-66 sem GDs, com valor de 23,91 A, representando uma diferença menor que 3,5% em relação ao DigSILENT. Nesse ramo, os resultados em todos os testes são consistentes com correlação igual ou superior a 0,99. A maior diferença de tensão RMS ocorre no ramo 11-12 com 2 GDs, divergindo em 0,008 pu. A correlação mínima e máxima em todos os testes que consideram uma falta trifásica é de 0,990 e 0,998 nos ramos 65-66 e 11-12 com zero e dois GDs, respectivamente.

3.3 Simulação de Falta Monofásica com GDs

Uma falta monofásica com a fase A envolvida é considerada na barra 66. Os testes realizados incluem a mesma configuração dos GDs utilizados nas simulações anteriores. A Fig. 6 ilustra a forma de onda da corrente do método proposto (Prop) e do DigSILENT (Dig). Os resultados nos ramos 1-2 e 65-66 apresentam um comportamento muito próximo do DigSILENT, com maior diferença no início da simulação transitória, decorrente da energia armazenada pelo indutor na condição pré-falta. Na Tabela 2 encontra-se os resultados de tensão e corrente RMS. A correlação das formas de onda ilustradas nas Fig. 6 (a) e (c) para cada fase é superior a 0,990 e 0,992, respectivamente. Os resultados de tensão e corrente RMS são próximos do DigSILENT, com maior diferença no ramo 65-66, fase A, divergindo em 22,51 A para as correntes e 0,010 pu no ramo 1-2, fase B e C, para os valores de tensão.

Na Fig. 6 (b) ilustra-se os resultados de corrente do ramo 11-12. A comparação das formas de onda entre as técnicas de solução indica semelhança nos resultados. No entanto, os

Tabela 1
Valores calculados de tensão e corrente RMS

Técnica		Método proposto			DigSILENT		
Ramo Config.							
		1-2	11-12	65-66	1-2	11-12	65-66
Corrente (A)	Sem GD	833,90	17,86	715,56	856,21	18,27	739,47
	GS	781,47	18,09	725,42	790,54	18,55	749,11
	GS e GF	760,05	34,90	740,50	760,36	35,70	755,73
Tensão (pu)	Sem GD	0,849	0,730	0,00	0,849	0,733	0,00
	GS	0,861	0,740	0,00	0,864	0,745	0,00
	GS e GF	0,866	0,751	0,00	0,866	0,759	0,00

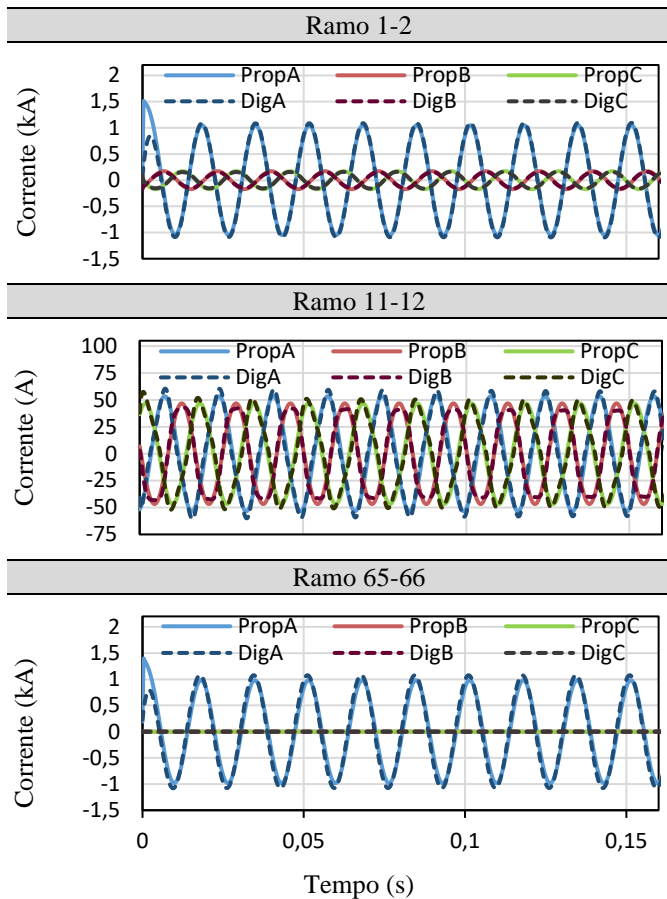


Fig. 6. Corrente considerando falta 1Ø com fase A envolvida.

Tabela 2

Valores calculadores de corrente e tensão RMS

Técnica		Método proposto			DigSILENT		
Config.	Ramo	1-2	11-12	65-66	1-2	11-12	65-66
Corrente (A)	A	764,83	38,18	731,92	765,78	38,00	754,43
	B	116,35	33,42	0,89	118,40	33,11	0,92
	C	116,35	33,42	0,89	118,86	33,62	0,92
Tensão (pu)	A	0,849	0,800	0,00	0,859	0,803	0,00
	B	0,964	0,954	0,91	0,973	0,964	0,91
	C	0,964	0,954	0,91	0,970	0,962	0,91

resultados do DigSILENT distorcem levemente a forma de onda devido a contribuição do GF na barra 28, além de fornecer valores RMS ligeiramente diferentes para as fases B e C. Uma falta monofásica em um sistema balanceado deveria resultar em valores RMS iguais de tensão e corrente nas fases não envolvidas na falta, como fornecido pelo método proposto.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho propõe um metodologia híbrida simplificada para simulação de transitórios no SDEE, combinando um programa QSTS com os recursos dos simuladores de transitório. Os resultados apontam a consistência e precisão da metodologia proposta ao comparar os resultados com um software comercial consolidado, além de apresentarem tempos de processamento muito baixos. A

metodologia permite realizar testes em sistemas com faltas simétricas e assimétricas, além de permitir a conexão de diferentes tecnologias de GDs.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da CAPES - Código Financeiro 001, FAPESP - processos 2015 / 21972-6 e 2019 / 07436-5.

REFERÊNCIAS

- Andersson, G. Modelling and analysis of electric power systems. ETH Zurich, p. 5-6, 2008.
- Baran, M. E.; WU, F. F. *Optimal capacitor placement on radial distribution systems*. IEEE Trans. on Power Del., v. 4, n. 1, p. 725-734, 1989.
- Cheng, C. S.; shirmohammadi, D. *A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis*. IEEE Trans. Power Syst., v. 10, n. 2, p. 671-679, 1995.
- Gers, J. M.; Holmes, E. J. Protection of electricity distribution networks. IET, 2004.
- Grainger, J. J.; Stevenson, W. D. Jr. *Power system analysis*. New York: McGraw-Hill, 1997.
- Lessa, T. S. et al. Simulation of a real distribution network with permanent and transient softwares. In: 2018 SBSE. IEEE, 2018. p. 1-4.
- Madruga, E. P. et al. *Analysis of transient stability in distribution systems with distributed generation*. Intern. J. Elect. Power & Ener. Syst., v. 99, p. 555-565, 2018.
- Theodoro, Thainan S. et al. A Hybrid Simulation Tool for Distributed Generation Integration Studies. In: 2018 - PSCC. IEEE, 2018. p. 1-8.
- Theodoro, Thainan S. et al. A flexible co-simulation framework for penetration studies of power electronics based renewable sources. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 113, p. 419-435, 2019.
- Turner, L.; Braun, M. Vectorized calculation of short circuit currents considering distributed generation-an open source implementation of IEC 60909. In: 2018 IEEE PES ISGT-Europe. IEEE, 2018. p. 1-6.
- Zhang, X. et al. A distribution short circuit analysis approach using hybrid compensation method. IEEE Trans. Power Syst., v. 10, n. 4, p. 2053-2059, 1995.
- Zhou, N. et al. Transient stability study of distributed induction generators using an improved steady-state equivalent circuit method. IEEE Trans. Power Syst., v. 29, n. 2, p. 608-616, 2013.