

## Capítulo XI

# Metodologia para análise da estabilidade angular em sistemas de distribuição com geração distribuída

Por Ederson Pereira Madruga, Daniel Pinheiro Bernardon, Rodrigo Padilha Vieira e Luciano Lopes Pfitscher\*

Com a conexão de várias fontes de geração distribuída (GD) nas redes de distribuição, torna-se necessário avaliar o impacto sobre a qualidade da energia e sobre a estabilidade transitória destes sistemas nesta nova realidade. Uma característica importante neste cenário é a peculiaridade dos sistemas de distribuição operarem com predominância de cargas desequilibradas e dispositivos de controle limitados. Para o controle Volt-Var, os principais equipamentos de controle são os bancos de capacitores e reguladores automáticos de tensão, já para proteção da rede, os religadores automáticos e as chaves fusíveis podem ser citados.

Estas condições combinadas com as variações bruscas e imprevisíveis da geração distribuída trazem a preocupação sobre o seu comportamento dinâmico e, conseqüentemente, o impacto sobre a qualidade de energia devido a esta diversidade de fontes.

Em sistemas de transmissão, a estabilidade a pequenos sinais e estabilidade transitória são estudos essenciais, que, por meio de métodos analíticos ou simulações no domínio do tempo, mostram a dinâmica dos geradores

e as respostas dos controles sobre eventos no sistema.

No entanto, a aplicação análoga destas análises nos sistemas de distribuição, pode não ser exequível, uma vez que as características diferem de sistemas de transmissão. Tradicionalmente, em sistemas de transmissão, para análise do sistema, a rede é considerada equilibrada e faz-se um equivalente entre a subestação e a GD. Em sistemas de distribuição, além da presença de cargas desequilibradas, existem muitas derivações (ramais), o que acarreta a necessidade de avaliação de eventos fora do tronco, bem como a análise da resposta dos dispositivos de proteção da GD e do sistema.

Há poucas pesquisas que exploram estudos de estabilidade transitória em sistemas de distribuição, a maioria só verifica a resposta de máquinas síncronas frente a carga em desequilíbrio, sem incluir as redes de distribuição. Além disso, estudos recentes consideram a rede simplificada não contemplando eventos em ramais, que são significativos para este tipo de rede.

Assim, este trabalho propõe uma metodologia para análise global de

estabilidade transitória em sistemas de distribuição com a presença de geração distribuída, incluindo geração a partir de fontes eólicas e hídricas, bem como cargas desequilibradas. A definição do conjunto de eventos e os critérios de avaliação de estabilidade também são propostos, que representam os principais cenários de estudos para as diferentes condições de funcionamento, reduzindo o número de análise.

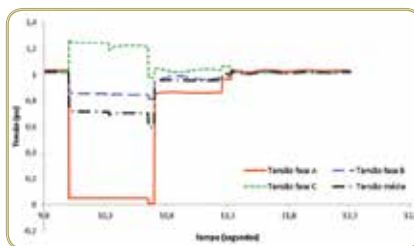
### ESTABILIDADE TRANSITÓRIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A principal preocupação em estudos de estabilidade transitória consiste em verificar a manutenção do sincronismo das máquinas num curto período de tempo após a ocorrência de um distúrbio, durante o qual as ações dos controladores não têm um efeito significativo, assim como o comportamento do sistema pós estes distúrbios.

O aumento da penetração da GD em um sistema de distribuição interligada não afeta significativamente a velocidade das máquinas em relação à velocidade síncrona, mas provoca um aumento

da frequência de oscilação depois de uma falha. Os geradores conectados aos sistemas de distribuição são geralmente pequenos e têm baixa inércia, o que resulta num sistema com uma maior probabilidade de perder o sincronismo e, conseqüentemente, a instabilidade. Por esta razão deve ser dada especial atenção aos sistemas de proteção, evitando sobretensões, sobrecorrentes e ilhamentos não intencionais.

Ao contrário dos sistemas de transmissão, em sistemas de distribuição, o desequilíbrio de cargas e as grandes extensões das redes devem ser consideradas nas simulações de transitórias, uma vez que estes podem causar interferências nas respostas das máquinas e na qualidade da energia. À medida que aumenta o desequilíbrio, no caso de um curto-circuito monofásico, sobretensões nas fases complementares são acentuadas, o que pode não ser detectada quando se realizam simulações



**Figura 1 - Tensão por fase e média em caso de um curto-circuito fase-terra.**

equilibradas.

Para ilustrar este fenômeno, a Figura 1 mostra as tensões de fase e a tensão média, no caso de um curto-circuito entre a fase A e a terra em uma barra do sistema. Observa-se que a tensão na fase C é superior a 1,2 pu, enquanto a tensão média se mantém em valores aceitáveis.

Outro ponto neste tipo de análise que tem sido pouco explorado é a representação dos ramais de rede. Devido ao grande número e à grande extensão das derivações, há uma maior exposição às intempéries, o que resulta em um maior

número de eventos nestes segmentos do sistema, se comparado com o tronco da rede. Embora o tempo de operação dos fusíveis que protegem estas derivações seja relativamente rápido, estes elementos devem ser avaliados pela possível descoordenação da proteção e reflexos na qualidade e estabilidade das máquinas.

## METODOLOGIA PROPOSTA

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para análise global da estabilidade transitória em sistemas de distribuição com a presença de geração distribuída e cargas desequilibradas. Os modelos e técnicas propostas incluem as peculiaridades dos sistemas de distribuição fornecendo uma análise representativa dentro da estabilidade transitória.

A Figura 2 mostra o fluxograma da metodologia proposta, que é detalhada nas seguintes seções:

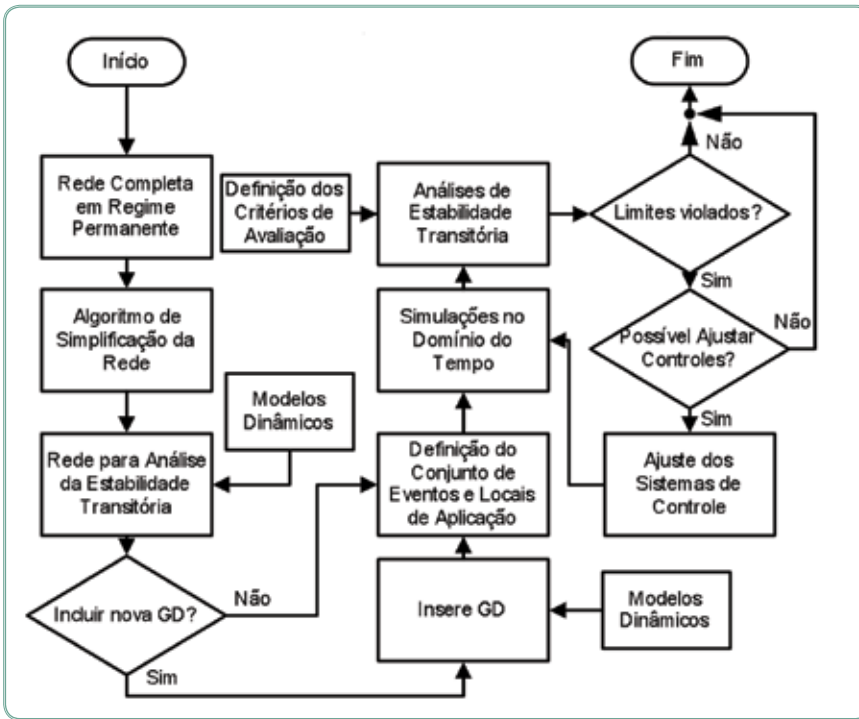


Figura 2 – Fluxograma da metodologia.

### DEFINIÇÃO DOS EVENTOS

A análise da estabilidade transitória depende diretamente das simulações de falhas no sistema em estudo, portanto, um conjunto de eventos, que representa os principais cenários de estudos para diferentes condições de operação, reduzindo o número de análises, é proposto neste trabalho.

Os principais eventos a serem analisados são curtos-circuitos e perda de carga em pontos críticos para a estabilidade.

As respostas transitórias das máquinas, o reflexo sobre as conexões com os sistemas interligados e da qualidade da energia fornecida às cargas são os principais interesses no estudo. Para avaliar a dinâmica a pequenos sinais, pequenas mudanças na carga são definidas, e para avaliar a estabilidade transitória, curtos-circuitos são simulados no tronco e nos ramais da rede.

A análise avalia o tempo crítico de eliminação dos defeitos para as máquinas síncronas, o efeito torcional nos eixos dos geradores, a frequência elétrica dos

barramentos do sistema e os níveis de tensão por fase.

A Tabela I mostra os eventos para avaliação da estabilidade transitória no sistema de distribuição para cargas mínima e máxima.

Como diferencial, este trabalho inclui eventos em ramais e avaliações de operação monopolar dos dispositivos de proteção para faltas fase-terra, característica esta utilizada apenas em sistemas de transmissão. Vale ressaltar que, quando ocorre um evento no sistema de distribuição, espera-se que a geração distribuída síncrona mantenha o sincronismo após a eliminação da falha temporária, mantendo os limites de operação em valores pré-estabelecidos.

### Crítérios de avaliação

Em sistemas de energia, diz-se que o sistema é estável se ele permanece ou retorna a um estado operacional normal e desejado após qualquer perturbação. Como um critério de avaliação da estabilidade transitória de sistemas de distribuição, espera-se que as várias GD cheguem a um ponto estável de operação após um evento. Além disso, espera-se que a qualidade da energia permaneça dentro de limites aceitáveis de operação e segurança, que são: i) os níveis de tensão e frequência em todas as barras do sistema não excedam os limites fixados para período transitório e regime permanente, e ii) os geradores não sejam

TABELA I – EVENTOS APLICADOS AOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO COM GD

Carreg. do Sistema	Evento	Tipo	Local	Elemento de proteção	Atuação
Carga Mínima e Carga Pesada	Rejeição da maior carga em ramal	Permanente	Ramal com maior carga	Chave Fusível	Abertura trifásica
	Curtos-circuitos fase-terra	Temporário e permanente	Próximo ao Sistema Interligado	Religador e/ou disjuntor	Desligamento e religamento monopolar
			Próximo às gerações		
	Curtos-circuitos trifásicos	Temporário e permanente	Ramal com maior corrente de curto-circuito	Chave fusível	Abertura monopolar
			Próximo ao Sistema Interligado	Religador e/ou disjuntor	Desligamento e religamento tripolar
			Próximo as Gerações		
			Ramal com maior corrente de curto-circuito	Chave fusível	Abertura tripolar

TABELA 2 – LIMITES OPERACIONAIS

Variável	Valores aceitáveis	Tipo
$\delta_i$	$< \delta_{\text{crítico}}$ $\leq 0,5$	Ângulo do rotor da máquina em regime permanente
$\Delta P$	$0,8 \text{ pu} \leq \text{VRT} \leq 1,1$	Esforço torcional
VRT	(normalizar para VRP em 10 segundos) $0,93 \leq \text{VRP} \leq 1,1$	Nível de tensão em regime transitório
VRP	$56,9\text{Hz} \leq \text{FRT} \leq 60,0\text{Hz}$ (normalizar para FRP em no	Nível de tensão em regime permanente
FRT	máximo 30 segundos) $59,9\text{Hz} \leq \text{FRP} \leq 60,1\text{Hz}$	Frequência em regime transitório
FRP		Frequência em regime permanente

submetidos a efeitos torcionais nocivos.

Estas condições serão cumpridas quando os limites das variáveis apresentadas na Tabela 2 são cumpridos.

O ângulo crítico de operação é obtido quando a derivada da potência sincronizante é zero, isto é, o ponto de transferência de potência máxima. O esforço torcional é obtido pela diferença da potência ativa gerada

imediatamente antes e imediatamente após a contingência, cuja razão não deve exceder 0,5 pu, de acordo com o que foi empiricamente proposto por um grupo de trabalho do IEEE [17] para salvaguardar o eixo dos geradores devido às interrupções na rede. Os valores de tensão e frequência em período transitório e permanente são definidos pelas agências reguladoras.

### Estudo de caso

Como estudo de caso, a metodologia proposta foi aplicada em um sistema de distribuição real, com 44,8 km de tronco, 6309 barras, uma PCH e uma fonte de geração de energia eólica. A Figura 3 mostra a rede de distribuição e a identificação das principais barras do sistema.

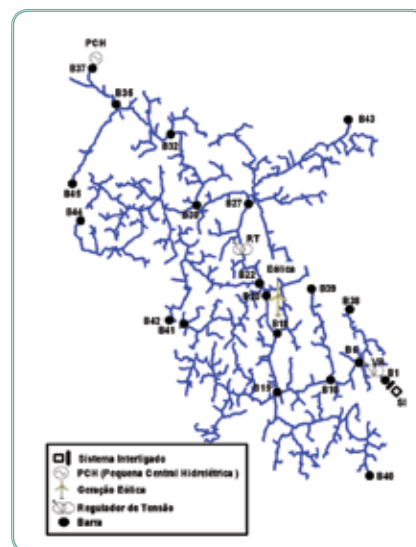
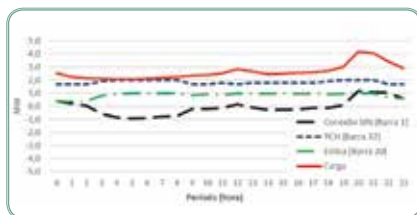


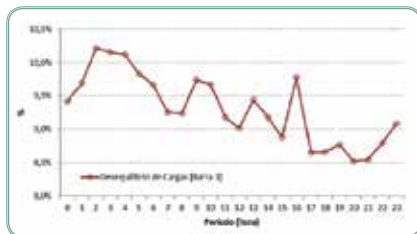
Figura 3 - Rede de distribuição simulada.

As curvas de carga e geração são ilustradas na Figura 4.



**Figura 4 - Curvas de carga do alimentador - Potência Ativa.**

O índice de desequilíbrio da carga é mostrado na Figura 5.



**Figura 5 - Desequilíbrio de cargas.**

Normalmente, o período de carga mínima é o mais crítico, uma vez que é o momento em que o sistema tem a menor inércia e a maior penetração de GD, podendo haver energia exportada do sistema de distribuição para o sistema interligado. Em todos os cenários estudados, espera-se que a GD permaneça conectada ao sistema de distribuição, sem perda de sincronismo e violação dos limites operacionais.

Neste trabalho será detalhado o estudo realizado para condição de carga leve, às 5h. O software Power Factory - DigSilent foi usado como ferramenta de simulação no domínio do tempo.

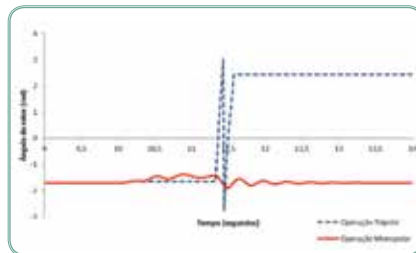
### Estudo de caso 1 - Falta temporária no tronco do alimentador

Este cenário contempla a aplicação de um curto-circuito fase-terra na barra 35, perto da PCH. Para a análise tradicional, o circuito tem cargas equilibradas e a operação dos elementos de proteção é tripolar. O método proposto considera as cargas desequilibradas e o religamento unipolar.

A falha no sistema ocorre no tempo 10 segundos e o disjuntor da PCH é a primeira

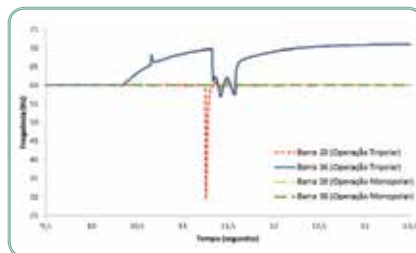
proteção a operar, abrindo o circuito em 10,328 segundos. No tempo 10,650 segundos, o disjuntor de interligação com o sistema interligado opera, eliminando todas as fontes de corrente de falha. Em 11,25 segundos, o sistema interligado fecha seus contatos e em 11,328 segundos o disjuntor da PCH é fechado.

A Figura 6 mostra a resposta transitória para máquina síncrona para operação tripolar de abertura e fechamento (utilizado em análises tradicionais) e para disparos monopolares, no método proposto.



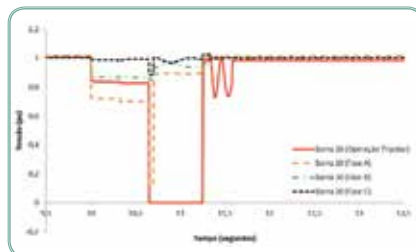
**Figura 6 - Ângulo do rotor da PCH.**

O método tradicional faz com que ocorra o desligamento da PCH, enquanto o religamento monopolar mantém a geração conectada. A Figura 7 mostra a frequência nas barras com geração.



**Figura 7 - Frequência nas barras com geração.**

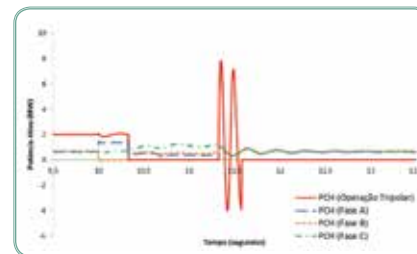
A Figura 8 ilustra as tensões sobre a barra 20, onde se percebe que a operação monopolar oferece quedas de tensões menos severas ao sistema. Para uma análise trifásica, falhas fase-terra podem resultar



**Figura 8 - Tensões nos principais bares da rede.**

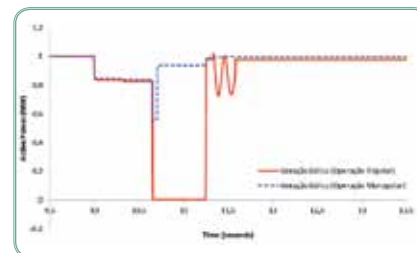
em um aumento de tensão nas demais fases, o que não pode ser visto em uma análise equilibrada.

A Figura 9 mostra a potência ativa gerada pela PCH, em que os valores elevados obtidos ocorrem na perda de sincronismo.



**Figura 9 - Potência ativa da PCH.**

Para o método tradicional, a potência ativa fornecida pelo gerador eólico também é interrompida durante a desconexão do sistema, pois a tensão é inferior ao mínimo permitido pelo conversor. Este limite não é atingido em uma operação monopolar. A Figura 10 mostra a potência ativa gerada pela fonte eólica, em que se observa a desconexão quando de abertura tripolar e o suporte de potência dado quando de uma operação monopolar.



**Figura 10 - Potência ativa da geração eólica.**

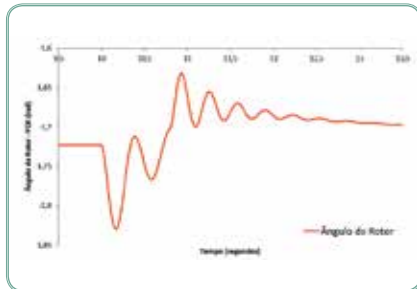
### Estudo de caso 2 - Falta permanente em derivação

Este estudo avalia a estabilidade transitória para um evento ocorrido em um ramal, que tradicionalmente não é observado, pois usa-se rede equivalente entre as subestações e a GD. A proteção primária para defeitos em ramais são os fusíveis, em que o tempo de operação depende do nível de curto-circuito do sistema.

Um curto-circuito trifásico foi aplicado a barra 43, que deriva da barra 27. O curto-circuito é da ordem de 400 A e o tempo

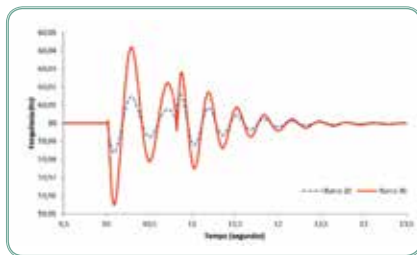


de resposta do fusível é de cerca de 680 ms. A Figura 11 ilustra o ângulo do rotor da máquina síncrona, em que se verifica uma convergência para um novo ponto de operação após a eliminação do defeito.



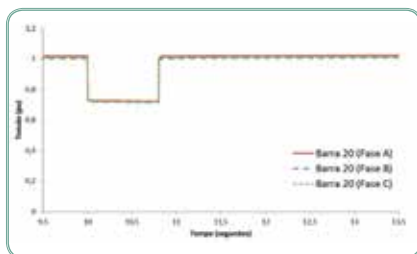
**Figura 11 - Rotor Ângulo da SHP com o novo ajuste.**

A Figura 12 mostra a frequência de oscilação dentro dos limites operacionais impostos.



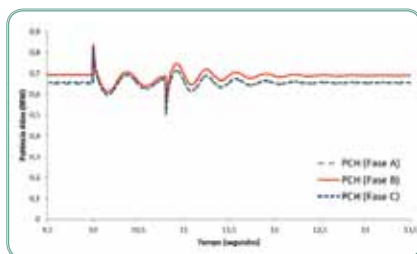
**Figura 12 - Frequência nas barras com geração.**

A Figura 13 apresenta um afundamento momentâneo de tensão, causado pelo curto-circuito. A duração deste SAG está ligada ao tempo de atuação do fusível, que irá isolar o circuito sob defeito.



**Figura 13 - Tensão Bar com geração eólica.**

A Figura 14 mostra a variação da potência ativa gerada por fase.



**Figura 14 - Potência ativa gerada pela PCH.**

Nesta simulação, foi verificado que eventos em ramais podem causar desconexão das GDs e violações de limites de qualidade da energia.

## CONCLUSÕES

Este trabalho traz uma metodologia para avaliar a estabilidade transitória em sistema de distribuição com carga desequilibrada e geração distribuída. Um conjunto de eventos é proposto e os resultados obtidos são comparados com limites aceitáveis. O trabalho mostra a importância de se considerar as cargas em desequilíbrio e a representação dos ramais em um sistema de distribuição. Falhas nas derivações podem levar à instabilidade dos sistemas de distribuição. A modelagem trifásica permite a detecção de violações significativas, que em uma representação equilibrada passa despercebida. O trabalho também indica as vantagens da aplicação da operação monopolar para sistemas de distribuição, em que as simulações mostraram sucesso na estabilidade transitória de geradores no caso de curtos-circuitos monofásicos, que são predominantes em sistemas de distribuição. A abertura e fechamento monopolar permite que as GD permaneçam em sincronismo com o sistema elétrico durante a eliminação da falta, contribuindo para o apoio da potência ativa e reativa no momento da oscilação do sistema, aumentando deste modo a qualidade da energia fornecida.

## REFERÊNCIAS

- [1] ACKERMANN . T., ANDERSSON . G., SÖDER . L. - Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, vol. 57, no. 3, pp. 195 – 204. 2001.
- [2] BOEMER, J. C., GIBESCU, M., KLING, W. L.; *Dynamic Models for Transient Stability Analysis of Transmission and Distribution Systems with Distributed Generation: an overview*. IEEE Bucharest Power Tech Conference, Romania, 2009;
- [3] NASR-AZADANI, E.; CAÑIZARES, C. A.; OLIVARES, D. E.; *Stability Analysis of Unbalanced Distribution Systems With Synchronous Machine and DFIG Based Distributed Generators*; IEEE Transactions on Smart Grid, Sep 2014;
- [4] RESENER, M.; SALIM, R. H.; BRETAS, A. S.; *Impacts of Excitation Control Modes of Distributed Generators on Distribution Systems Transient Stability: A case study*. IEEE, 2012;
- [5] KUNDUR, P. - *Power System Stability and Control*. Editora McGraw-Hill, New York, 1994.
- [6] ARRILLAGA, J., SMITH, B. - *AC-DC Power System Analysis*. Editora IEE, Londres, 1998.
- [7] ANDERSON, P.M.; FOUAD, A.A. *Power System Control and Stability*, 2nd dition. IEEE Press, Wiley Interscience, 2003;
- [8] SAADAT, H. *Power System Analysis*. PSA Publishing, 3rd edition, 2010;

[9] MONTICELLI, A.J.; GARCIA, A.; “Introdução a Sistemas de Energia Elétrica”. First Edition UNICAMP, São Paulo-SP, Brazil, 2003.

[10] NAZARI, M.H., ILIC, M.; *Dynamic modelling and control of distribution energy systems: comparison with transmission power systems*. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013.

[11] SALIM, R. H.; RAMOS, R. A.; BRETAS, N. G.; *Analysis of the Small Signal Dynamic Performance of Synchronous Generators under Unbalanced Operating Conditions*. IEEE, 2010;

[12] ABREU, L. V. L.; MARQUES, Frederico A. S.; MORÁN, Jesús ; FREITAS, Walmir ; SILVA, Luiz C. P. da . *Impact of Distributed Synchronous Generators on the Dynamic Performance of Electrical Power Distribution Systems*. In: IEEE/PES T&D 2004 Latin America, 2004, São Paulo, 2004.

[13] GRILO, A. P.; MOTA, A. A.; MOTA, L. T. M.; FREITAS, W. . *An Analytical Method for Analysis of Large-Disturbance Stability of Induction Generators*. IEEE Transactions on Power Systems, v. 22, p. 1861-1869, 2007.

[14] DIAS, I. C.; RESENER, M.; CANHA, L.N.; PEREIRA, P.R.S. *Transient Stability Study of an Unbalanced Distribution System with Distributed Generation*. IEEE, 2014.

[15] KAHNI, D.; YAZDANKHAH, A. S.; KOJABADI, H. M. *Impacts of distributed generations on power system transient and voltage stability*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems. [S.l.], v. 43, n. 1, p. 488-500, 2012.

[16] EDWARDS, F. V. et al. *Dynamics of distribution networks with distributed generation*. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2000, Seattle.

[17] IEEE Working Group Report. “IEEE Screening Guide for Planned Steady-State Switching Operations to Minimize Harmful Effects on Steam Turbine-Generators.” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, July/August 1980, pp. 1519-1521.

[18] DiGSILENT POWERFACTORY – Technical References, Version 14.1. Germany, 2011.

Ederson Pereira Madruga é mestre em engenharia elétrica pela UFSM e especialista em Sistemas de Transmissão pela Unifei. Atualmente, é aluno de Doutorado do PPGE da UFSM. Atua como gerente de distribuição da permissionária Certaja Energia e é ainda professor dos cursos de graduação em engenharia elétrica e controle e automação na Univates.

Luciano Lopes Pfitscher possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. É professor da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Araranguá, Departamento de Energia e Sustentabilidade.

Rodrigo Padilha Vieira é engenheiro eletricista, com mestrado e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. É professor da Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência.

Daniel Pinheiro Bernardon possui graduação, mestrado e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. É professor da Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência.

## CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Acompanhe todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)

Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para [redacao@atudeeditorial.com.br](mailto:redacao@atudeeditorial.com.br)