

# Impacto de Geradores Distribuídos em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - Análise Estática e Dinâmica

Wandry Rodrigues Faria<sup>1</sup> (PG), Marcelo Escobar de Oliveira<sup>1</sup> (PQ)

<sup>1</sup>Instituto Federal de Goiás, *Câmpus Itumbiara*.

**Área do Conhecimento: (3.04.04.02-9)**

**Engenharia Elétrica: Sistemas Elétricos de Potência: Distribuição da Energia Elétrica**

## Resumo

*Este trabalho analisa o impacto, em regime estático e dinâmico, da inserção maciça de geradores distribuídos aos sistemas de distribuição clássicos. Para a realização deste estudo o sistema teste de 33 barras do IEEE é representado nas plataformas OpenDSS e Simulight e são executadas rotinas de fluxo de potência, considerando a variação do grau de penetração da geração distribuída, e simuladas situações de curto circuito. Em regime estático são verificados os níveis de tensão e perdas técnicas de potência do sistema e, em regime dinâmico, são verificadas as estabilidades angular, de tensão e de frequência. São considerados 4 cenários: alimentação do sistema feita exclusivamente pelo barramento infinito, alimentação híbrida entre barramento infinito e dez geradores distribuídos, alimentação através de dez geradores distribuídos e sistema em ilha alimentado por um gerador. Para todos os cenários são simuladas três situações de curto circuito. Os resultados obtidos nas simulações são confrontados com as faixas de operação descritas no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Através da análise dos resultados de simulações em regime estático são verificadas melhorias, tanto na magnitude de tensão quanto nos níveis de perdas técnicas de potência elétrica, com alocação de geração distribuída ao sistema, desde que o grau de penetração seja controlado e, preferencialmente, exista um método eficaz de seleção do ponto de inserção do gerador descentralizado. A comparação entre os regimes dinâmicos do sistema teste com e sem geradores distribuídos aponta a maior sensibilidade de estabilidade dos geradores síncronos de polos lisos empregados em empreendimentos de cogeração industrial e reafirma a necessidade da execução de simulações de contingência para determinação dos parâmetros de proteção dos geradores instalados. Por fim, são elencadas recomendações de operação para os cenários abordados.*

**Palavras-chave:** Estudo de Estabilidade; Geração distribuída; Qualidade da Energia Elétrica; Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.

## Introdução

Nas últimas décadas um novo método de geração de energia elétrica tem sido inserido no Sistema Elétrico de Potência (SEP), alavancado pelo aumento de demanda, busca de fontes renováveis, unidades geradoras compactas, abertura do mercado de energia elétrica e crises energéticas. Apesar da aplicação recente, o conceito se baseia na característica inicial da geração de energia elétrica: produção próximo ao local de consumo. Esses empreendimentos de geração são comumente chamados Geração Distribuída (GD) e podem ser instalados na própria unidade consumidora, originando assim um consumidor-produtor de energia elétrica [1-2].

Os sistemas de distribuição são, caracteristicamente, constituídos de elementos passivos, isto é, as cargas não injetam potência na rede, apenas a absorvem. Baseado nisso, surge outro conceito clássico dos sistemas de distribuição: o fluxo unidirecional de corrente vindo da subestação (SE) para as cargas. Com a instalação de GD, os consumidores passam a ter a possibilidade de injetar corrente no sistema, o que levanta a preocupação dos efeitos do chamado “fluxo reverso de potência”, vindo da rede para a SE.

A circulação de corrente elétrica no sentido reverso em trechos do sistema de distribuição é uma situação de operação não prevista na etapa de projeto da rede no passado. Nos projetos das redes são definidas as topologias de operação das linhas visando perdas mínimas de potência e

níveis de tensão adequados em todas as unidades consumidoras [3]. Assim, inserir GD em uma rede projetada sem a previsão da circulação de corrente nos dois sentidos, e sem uma revisão de seus impactos ao sistema pode aumentar as perdas técnicas de potência e modificar os níveis de tensão dos consumidores a faixas inadequadas.

Somadas à questão de variação da topologia ótima de operação do sistema de distribuição existem precauções que devem ser tomadas no âmbito da proteção do sistema. Em geral os sistemas de distribuição não utilizam relés com sensibilização direcional, visto que esse tipo de proteção é aplicada em sistemas com alimentação em múltiplos terminais ou em anel [4], com a presença de GD o sentido do fluxo de potência deve ser levado em consideração para atuação ou não da proteção. Ainda na esfera de proteção de sistemas, no evento de um curto-circuito na rede de distribuição, os geradores distribuídos podem fornecer corrente à falha até que o sistema de proteção do gerador seja sensibilizado e atue, o que significa que os níveis de curto circuito podem ser potencializados e devem ser reavaliados.

Neste contexto, este projeto visa avaliar as consequências da instalação de diversos geradores distribuídos num sistema de distribuição de energia elétrica, levando em consideração os efeitos em regime estático (níveis de tensão e perdas técnicas de potência) e dinâmico (estabilidade mediante aplicação de curto circuito na rede).

## Material e Métodos

O cenário de pesquisas na área de análise de sistemas de potência apresenta resultados vindos de diversos softwares. Neste trabalho são aplicadas quatro das ferramentas mais comuns no meio acadêmico; ANAREDE, OpenDSS e Simulight para estudo da operação do sistema teste em regime permanente e dinâmico, e, para agregar todas as funções a uma única rotina computacional, é aplicado o software MATLAB.

As simulações de várias situações de operação executadas são para o sistema de distribuição teste do IEEE de 33 barras, disponível em [5]. O estudo do sistema em regime estático consiste na análise da magnitude da tensão nas barras e perdas técnicas de potência da rede de distribuição. São abordados 4 cenários de operação, conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1 – Cenários de Análise em Regime Permanente**

Cenário	Descrição
Cenário 1	Sistema de Distribuição Clássico: sem geradores distribuídos e alimentado pelo SIN
Cenário 2	Sistema de distribuição com inserção maciça de geração distribuída: dez geradores distribuídos alocados nas barras 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 31, 32 e 33 do Sistema Teste com a conexão ao SIN mantida
Cenário 3	Alimentador operando em ilha considerando uma única fonte de potência – dessa forma a característica de valores altíssimos de inércia observada no SIN não é aplicável
Cenário 4	Alimentador operando em ilha considerando dez fontes de potência alocadas nas barras 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 31, 32 e 33 do Sistema Teste

Fonte: Elaborado pelo Autor

O estudo em regime dinâmico é feito a partir da análise de estabilidade angular, da tensão e da frequência, que são verificadas mediante três situações de falta apresentadas na Tabela 2. As situações de contingência são aplicadas aos cenários 1, 2 e 4. O cenário 3 é excluído visto que a inércia do sistema é bastante reduzida e todas as falhas analisadas causam a perda de estabilidade do gerador.

**Tabela 2 – Situações de Contingência para Análise em Regime Dinâmico**

Situação	Descrição
Situação 1	Curto circuito na barra 3, representando uma falta próxima da Subestação
Situação 2	Curto circuito na barra 9, representando uma falta com distância mediana até a SE
Situação 3	Curto circuito na barra 29, representando um ponto defeituoso afastado da SE.

Fonte: Elaborado pelo Autor

## Resultados

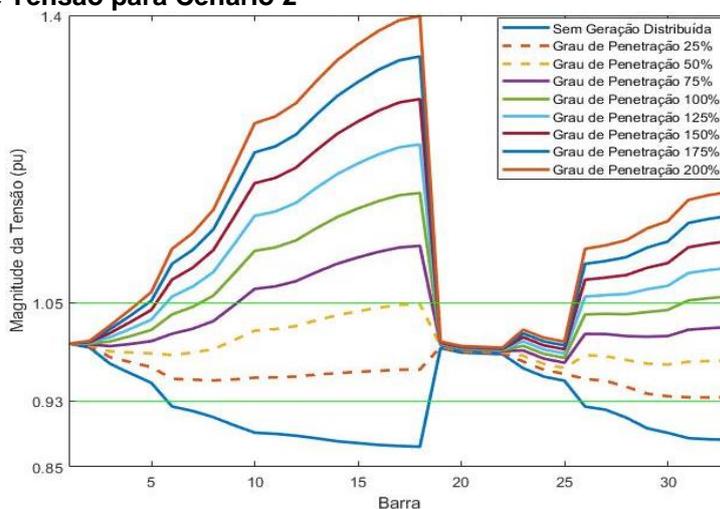
A partir da rotina de fluxo de potência foram calculadas as perdas técnicas de potência para todos os cenários de operação do sistema teste. Vale ressaltar que, quando considerada a curva de carga de um alimentador de um sistema de distribuição, o percentual de potência gerada de forma distribuída varia ao longo do dia. Assim, foi considerada a variação da participação dos geradores distribuídos. A tabela 3 apresenta os resultados de perdas técnicas de potência para os cenários simulados enquanto a figura 4 apresenta as curvas de tensão nas barras do alimentador para o cenário 2. Na figura 1, os traços horizontais em verde representam as limitações de qualidade propostas em [6].

**Tabela 3 – Perdas Técnicas de Potência**

	Percentual de Potência Gerada de Forma Descentralizada	Perdas Técnicas		Percentual de Potência Gerada de Forma Descentralizada	Perdas Técnicas
Cenário 1	0%	435 kW	Cenário 3	100% (Barra 1)	435 kW
	25%	142 kW		100% (Barra 8)	177 kW
	50%	100 kW		100% (Barra 18)	1288 kW
Cenário 2	75%	209 kW	Cenário 4	100%	724 kW
	100%	427 kW		125%	463 kW
	125%	732 kW		150%	382 kW
	150%	1105 kW		155%	380 kW
	175%	1536 kW		160%	383 kW
	200%	2017 kW		165%	387 kW
				175%	406 kW
		200%	502 kW		

Fonte: Elaborado pelo Autor

**Figura 1 – Curvas de Tensão para Cenário 2**



Fonte: Elaborado pelo Autor

Para os cenários 1, 2 e 4 foram simuladas faltas nas barras 3, 8 e 29. Visto que os cenários 2 e 4 apresentam diversas variações de grau de penetração, é importante ressaltar que as simulações em regime dinâmico foram executadas considerando as melhores situações de carregamento, isto é, 25% para o cenário 2 e 160% para o cenário 4. Os resultados foram transcritos para a tabela 4.

**Tabela 4 – Limites de Estabilidade**

	Condição de Operação Adotada	Limite de Tempo da Eliminação da Falha para Manter a Estabilidade dos Geradores do Sistema		
		Falta na Barra 3	Falta na Barra 8	Falta na Barra 29
Cenário 1	Inaplicável	> 6 ciclos	> 6 ciclos	> 6 ciclos
Cenário 2	Grau de penetração 25%	5 ciclos	6 ciclos	6 ciclos
Cenário 3	Gerador alocado na barra 8	<1 ciclo	<1 ciclo	<1 ciclo
Cenário 4	Grau de penetração 160%	3 ciclos	2 ciclos	2 ciclos

Fonte: Elaborado pelo Autor

A partir dos resultados em regime estático e dinâmico do sistema para os 4 cenários e as 3 situações de contingência as Tabelas 5 e 6 foram construídas. Nelas são feitas recomendações para melhorias da qualidade da energia fornecida (em regime permanente) e da robustez do sistema (em regime dinâmico).

**Tabela 5 – Recomendações Para Otimização do Sistema em Regime Estático**

	Melhores Condições de Operação	Tensão Crítica		Perdas Técnicas	Recomendações
		Mínima	Máxima		
Cenário 1	Inaplicável	0.8745 pu	1.0000 pu	435 kW	Reconfiguração topológica Inserção de reguladores de tensão Inserção de Geração Distribuída
Cenário 2	Grau de Penetração 25%	0.9345 pu	1.0484 pu	142 kW	Verificação e controle do grau de penetração Estudo dos pontos de alocação da geração distribuída
	Grau de Penetração 50%	0,9794 pu	1,0503 pu	100 kW	
Cenário 3	Alocação do Gerador na Barra 8	0.9402 pu	1.0000 pu	177 kW	Estudo do ponto de alocação do gerador
Cenário 4	Grau de Penetração da Geração em 160%	0.9223 pu	1.0484 pu	383 kW	Estudo dos pontos de alocação da geração distribuída

Fonte: Elaborado pelo Autor

**Tabela 6 – Recomendações Para Otimização do Sistema em Regime Dinâmico**

	Condição de Operação Adotada	Violações ao PRODIST			Recomendações e Limitações
		Falta na Barra 3	Falta na Barra 8	Falta na Barra 29	
Cenário 1	Inaplicável	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Inserção de geração distribuída para alimentação de consumidores em condições de contingência
Cenário 2	Grau de penetração 25%	Nenhuma	Frequência	Frequência	Empregar geradores mais robustos para evitar desligamento de cargas por oscilações de frequência. Utilizar equipamentos de proteção de rápida atuação

	Condição de Operação Adotada	Violações ao PRODIST			Recomendações e Limitações
		Falta na Barra 3	Falta na Barra 8	Falta na Barra 29	
Cenário 3	Gerador alocado na barra 8	Perda da Estabilidade e Angular	Perda da Estabilidade Angular	Perda da Estabilidade Angular	Empregar geradores mais robustos para evitar a perda de sincronismo das máquinas mediante situações de contingência
Cenário 4	Grau de penetração 160%	Nenhuma	Perda da Estabilidade Angular	Perda da Estabilidade Angular	

Fonte: Elaborado pelo Autor

## Conclusões

O cenário 1 apresenta pontos críticos de tensão onde os limites de tensão propostos pelo PRODIST são descumpridos; para o cenário 2 os níveis de tensão nas barras consumidoras depende do grau de penetração da geração distribuída, podendo melhorar ou piorar os índices observados no cenário 1; o cenário 3 apresenta níveis de tensão e perdas variando com o ponto de instalação do gerador; por fim, o cenário 4 apresenta grande volubilidade para a magnitude da tensão, de forma que pequenas oscilações do grau de penetração da GD correspondem a grandes variações de tensão.

Tangendo o estudo do dinamismo do sistema, os casos nos quais a conexão com o sistema nacional interligado foi mantida apresentaram menores índices de perda de estabilidade. Isto acontece porque a base da matriz energética do Brasil é constituída de grandes hidrelétricas, o que significa que as máquinas possuem constante de inercia de magnitudes colossais, somado a esse quesito existe o fato que os geradores síncronos das hidrelétricas são mantidos em movimento ininterruptamente. Assim as perturbações simuladas são insuficientes para causar variações bruscas de frequência, ângulo e tensão ao sistema.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao IFG, ao CNPq e ao NUPSE (Núcleo de Pesquisas em Sistemas de Energia) pelo auxílio no desenvolvimento do projeto.

## Referências Bibliográficas

- [1] ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**, v. 57, p. 195-204, 2001.
- [2] DUGAN, R.; MCDERMOTT, T. Distributed generation. **Industry Applications Magazine, IEEE**, v. 8, n. 2, p. 19-25, 2002.
- [3] FARIA, W. R.; OLIVEIRA, M. E. d.; HOJI, E. S.; VIAJANTE, G. P. Voltage control areas in transmission systems with distributed generation. **Renewable Energy & Power Quality Journal**, 2017. V. 1, n. 15, p. 362-367. ISSN 2172-038 X.
- [4] FERRARO, A. G.; ARTICO, M.; BIANCO, B. A. **Proteção de sistemas elétricos de potência com ênfase em linhas de transmissão**. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade São Francisco, Itatiba, Brasil, 2013.
- [5] GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1992. V. 7, n. 3, p. 1484-1491. ISSN 0885-8977.
- [6] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**, 2018. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo\\_8-Revis%C3%A3o\\_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9](http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9). Acesso em: 10-04-2018.