



# CRICTE 2017

XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia



## ESTUDO DO IMPACTO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA ESTABILIDADE ANGULAR DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA COM O SOFTWARE ANATEM

**Marina Camponogara**

Acadêmica do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria  
camponogaramarina@gmail.com

**Daniel P. Bernardon, Dr.**

Professor/Pesquisador do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria  
dpbernardon@ufsm.br

**Resumo.** *Diversos benefícios são inerentes aos sistemas de geração distribuída (GD), de forma que estes sejam considerados uma solução para a melhora dos sistemas elétricos de potência (SEPs). Entretanto, a inserção destas unidades exige modificações na rede que contemplem aspectos como a estabilidade angular. A fim de analisar os efeitos da presença de GD no sistema elétrico, foram realizadas simulações de contingências de grande porte em uma rede IEEE 14 Barras modificada, utilizando os softwares ANAREDE e ANATEM. Os resultados obtidos apontam um aumento no tempo crítico para redes que comportem unidades de GD, contribuindo para a estabilidade do sistema. Além disto, por se tratar de uma rede robusta, a perda de unidades geradoras causa desvios de frequência dentro dos níveis definidos pelos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).*

**Palavras-chave:** Estabilidade angular. Geração distribuída. Sistemas elétricos de potência.

### 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de geração distribuída (GD) apresentam vários atrativos, como a

diversificação da matriz energética, a redução de perdas, alívio dos sistemas de transmissão e distribuição e postergação de investimentos. Por isso, são considerados como um recurso pertinente para a melhora do sistema elétrico de potência. Entretanto, a crescente inserção de GD produz impactos na rede convencional, exigindo uma preparação de todo o sistema para este novo cenário, conforme apontado por Bernardon *et al.* [1]. Dentre os aspectos mais relevantes a serem observados, a estabilidade do sistema se destaca, em função do perfil intermitente das fontes destas unidades.

A estabilidade de um sistema constituído por elementos dinâmicos interligados é a capacidade deste retornar às condições estáveis de operação após ter sido submetido à distúrbios, como conceituado por Weedy [2], sendo a estabilidade angular responsável pela manutenção do sincronismo destes elementos.

Perturbações de grande intensidade, como a ocorrência de curtos-circuitos e a perda de unidades geradoras influem diretamente na estabilidade angular transitória do SEP. Por isso, a avaliação dos impactos da inserção de sistemas de GD no SEP também deve ser realizada dentro do âmbito da estabilidade transitória, uma vez empreendimentos hidrelétricos são

considerados GD se sua capacidade é de até 30 MW, conforme estabelecido pelo Decreto Nº 5.163 [3].

Diante da problemática elucidada, o objetivo deste trabalho consiste em analisar os efeitos da inserção de uma unidade de GD na rede IEEE 14 Barras, através de simulações de três estudos de caso nos *softwares* Análise de Redes em Regime Permanente (ANAREDE) e Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM).

## 2. METODOLOGIA

O modelo de rede IEEE 14 Barras foi modificado de maneira a necessitar de uma unidade de GD. Para definir o ponto de operação da rede, a partir do fluxo de potência, é utilizado o *software* ANAREDE. Com o resultado desta simulação, perturbações são aplicadas ao sistema em estudo utilizando o ANATEM, a fim de observar a estabilidade angular do sistema.

Três estudos de caso tratam de três ocorrências em SEPs: em um primeiro estudo, investiga-se as implicações da presença de GD no tempo crítico para um curto-circuito temporário na linha que conecta a barra infinita e o gerador síncrono; no segundo caso, são examinadas as respostas da unidade de GD à perda do gerador síncrono conectado à barra 2; no terceiro e último estudo de caso, as reações do gerador síncrono conectado à barra 2 são averiguadas para a ocorrência de perda da unidade de GD.

### 2.1 Modelagem

**Rede IEEE 14 Barras.** A rede IEEE 14 barras é uma rede que representa o sistema elétrico americano da década de 1960. Seu modelo original é apresentado na Fig. 1. Esta rede foi modificada utilizando o *software* ANAREDE, de maneira a requerer uma unidade de GD, que foi alocada na barra 4.

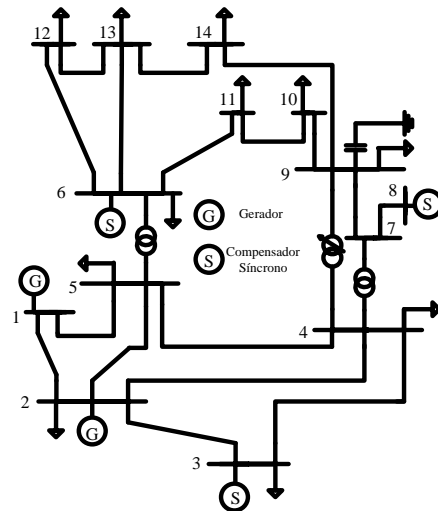


Figura 1. Rede IEEE 14 Barras.

**Modelos.** As equações eletromecânicas que descrevem os modelos de barra infinita e de máquina síncrona de polos salientes são apresentados no Manual do ANATEM [5]. A configuração da barra 1 no ANATEM utiliza o modelo clássico, enquanto para as máquinas síncronas (gerador da barra 2 e GD) usa-se modelo de polos salientes.

### 2.2 Simulações

**Contingência na LT.** Nesta etapa, o comportamento da rede é analisado frente à ocorrência de curto-circuito temporário na linha de transmissão (LT) que conecta as barras 1 e 2, através da obtenção dos valores de tempo crítico sem e com a presença de GD. A aplicação de curto-circuito no ANATEM é feita com o uso dos comandos *apcl* (aplica) e *rmcl* (remove).

**Perda do gerador síncrono principal.** Para investigar a resposta da unidade de GD à perda do gerador síncrono conectado à barra 2, este é removido no ANATEM utilizando o comando *rmgr* (remove geração). Aqui, o comportamento da frequência e do ângulo do gerador da GD são observados.

**Perda da unidade de GD.** A simulação da perda da unidade de GD busca analisar os efeitos da intermitência destas fontes na frequência de operação do sistema e no

ângulo do gerador síncrono conectado à barra 2.

### 3. RESULTADOS

O comportamento das variáveis eletromecânicas é exposto por meio de gráficos obtidos com a ferramenta PlotCepel.

**Contingência na LT.** Um curto-circuito temporário com a presença ou não de GD na rede é aplicado utilizando o ANATEM. Através da observação da curva de frequência, é possível determinar o tempo crítico para duas situações distintas. Os valores de tempo crítico obtidos são listados na Tabela 1.

Tabela 1. Tempos críticos.

Tipo/GD	Tempo (ms)
Temporário sem GD	147
Temporário com GD	152

A variação de frequência do gerador conectado à barra 2 é semelhante para o curto-circuito temporário sem e com GD, apresentando tempo de acomodação do transitório de 9 segundos nas duas situações, conforme apresentado na Tabela 2, cujos dados foram obtidos a partir das curvas entregues pelo *software* acessório PlotCepel. Entre as informações listadas, estão as frequências mínima  $f_{\min}$  e máxima  $f_{\max}$ , em hertz (Hz) e o tempo de acomodação,  $t_s$ , em segundos (s).

Tabela 2. Banda de frequência e tempo de extinção do transitório do gerador da barra 2.

Tipo/GD	$f_{\min}$ (Hz)	$f_{\max}$ (Hz)	$t_s$ (s)
Temporário sem GD	57,6	61,9	9
Temporário com GD	57,6	61,9	9

A unidade de GD também apresenta variações nos níveis de frequência, sendo

menores que aquelas ocorridas na frequência do gerador síncrono conectado à barra 2. A Tabela 3 comporta estes dados.

Tabela 3. Banda de frequência e tempo de extinção do transitório da GD.

Tipo/GD	$f_{\min}$ (Hz)	$f_{\max}$ (Hz)	$t_s$ (s)
Temporário	59,5	60,44	9,5

**Perda do gerador síncrono conectado à barra 2.** A remoção do gerador conectado à barra 2 causa oscilação de frequência com os valores apresentados na Tabela 4, os quais estão de acordo com os níveis indicados pelo ONS [6]. O comportamento do ângulo do rotor é apresentado na Fig. 2.

Tabela 4. Banda de frequência da GD com a perda do gerador conectado à barra 2.

$f_{\min}$ (Hz)	$f_{\max}$ (Hz)
59,92	60,05

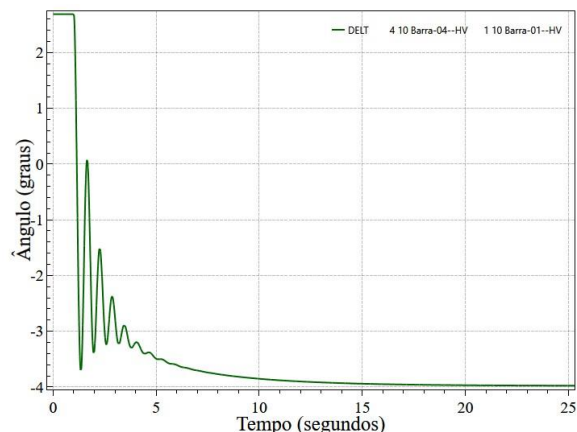


Figura 2. Ângulo do gerador da GD com a perda do gerador conectado à barra 2.

**Perda da unidade de GD.** A fim de simular a perda de um grande bloco de geração, utilizou-se um caso do ANAREDE onde a GD tem capacidade de 30 MW. O comportamento da frequência do gerador conectado à barra 2 é mostrado na Tabela 5, enquanto a variação do ângulo é apresentada na Fig. 3. Como na ocorrência do segundo estudo de caso, os níveis de frequência estão de acordo com os padrões estabelecidos pela Ref. [6].

Tabela 5. Banda de frequência do gerador conectado à barra 2 com perda da GD.

$f_{\min}$ (Hz)	$f_{\max}$ (Hz)
59,98	60,01

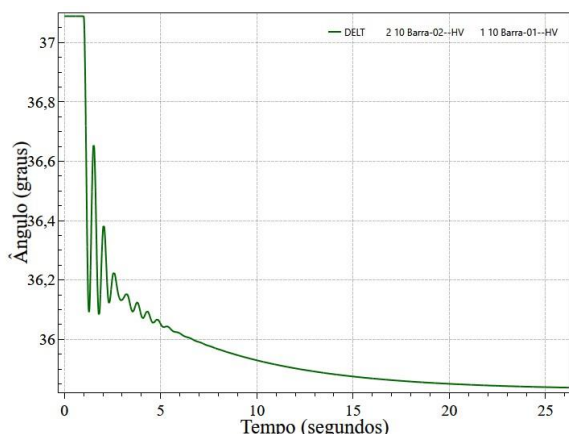


Figura 3. Ângulo do gerador conectado à barra 2 na ocorrência de perda da GD.

#### 4. CONCLUSÃO

A inserção de unidades de GD apresenta proveitos técnicos, ambientais e econômicos, podendo, porém, influir na estabilidade angular do SEP, principalmente em função da intermitência das fontes associadas a estes sistemas.

Três estudos de caso foram apresentados neste artigo, com o objetivo de avaliar os efeitos da presença de GD na estabilidade angular de uma rede IEEE 14 Barras modificada.

A implantação de unidades de GD contribui para o aumento dos tempos críticos, permitindo que haja um maior período para solução das faltas sem que o sistema entre em um estado de instabilidade. A banda de frequências para os três estudos de caso mantém-se de acordo com os níveis estabelecidos pelo ONS, fato o qual se deve à robustez da rede utilizada. É interessante que se faça, posteriormente, uma análise de estabilidade angular em redes de infraestrutura inferior, de modo a avaliar os níveis de frequência resultantes.

A estabilização tanto da frequência quanto do ângulo nos três estudos de caso

mostra que, mesmo em situações de falta, o sistema foi capaz de manter-se estável.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1] D. P. Bernardon *et al.*, Sistemas de distribuição no contexto das redes elétricas inteligentes - uma abordagem para reconfiguração de redes, Santa Maria, RS: 2015, p. 163.
- [2] B. M. Weedy, Sistemas elétricos de potência, São Paulo: 1973, p. 366.
- [3] ANEEL, *Decreto Nº 5.163*. 2004.
- [4] C. C. do Prado, D. Porto, D. R. Fagundes, M. J. S. Ramos e D. P. Bernardon, “Análise do Impacto da Geração Distribuída na Margem De Estabilidade De Tensão,” in XXII SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2016.
- [5] CEPEL, Análise de Transitórios Eletromecânicos 11.01.00, 2016, p. 363.
- [6] ONS, Submódulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos. 2016, p. 115.