## DETERMINAÇÃO DA BARRA CRÍTICA DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO, ATRAVÉS DO VETOR TANGENTE E Função Auxiliar de Energia, Considerando a inserção de Renováveis.

JOAO ALVES DA SILVA NETO<sup>1,2</sup> BRUNO DE N. NASCIMENTO<sup>1,2</sup> ELIANE N. DE LORENCI<sup>1</sup> ANTONIO C. Z. SOUZA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil, <sup>2</sup>Centro Universitário de Itajubá, MG, Brasil,

*E-mails*: joaovilhenaneto@hotmail.com, nadaibruno@gmail.com, edelorenci@gmail.com, zambroni@unifei.edu.br

**Abstract**— This paper presents the Tangent Vector and Auxiliary Energy Function method for determining the critical bus in a Distribution System. The intermittent generations of solar panels allocated throughout the system, as well as the variation of load in each bus are considered. The high relation between resistance and reactance brings problems for the process of convergence of Newton-Raphson method, used in the solutions of power flow to obtain the points of operation and low voltage. Therefore, the axis rotation method is used to obtain convergence. Thus, before each defined time interval, the critical buses are monitored, obtaining important information in view of the need to perform possible control actions.

Keywords— Tangent Vector method, Auxiliary Energy function, critical bus, intermittent generation.

**Resumo**— Este artigo apresenta o método do Vetor Tangente e Função Auxiliar de Energia para determinação da barra crítica em um Sistema de Distribuição. São consideradas as gerações intermitentes de painéis solares alocadas ao longo do sistema, bem como a variação de carga em cada barra. A alta relação entre resistência e reatância traz problemas para o processo de convergência do método de Newton-Raphson, utilizado nas soluções de fluxo de potência para obter os pontos de operação e baixa tensão. Diante disso, utiliza-se o método da rotação de eixos para obter a convergência. Assim, diante de cada intervalo de tempo definido, as barras críticas são monitoradas, obtendo informações importantes diante da necessidade de atuação das possíveis ações de controle.

Palavras-chave--- Método Vetor Tangente, função Auxiliar Energia, barra crítica, geração intermitente.

## 1 Introdução

A inserção de Geração Distribuída (GD) nos Sistemas de Distribuição (SD) tem crescido nos últimos anos, em diversos países do mundo. Vários fatores explicam essa tendência, podendo-se destacar as preocupações ambientais e o interesse por fontes de energia diversificadas. Desse modo, surge a necessidade em avaliar a Estabilidade de Tensão (ET) desses sistemas. A conexão de GD, diante da intermitência de algumas fontes renováveis, altera a configuração de fornecimento de energia para a distribuição, sendo necessária uma avaliação da ET, através do prévio conhecimento da barra crítica que pode levar o sistema ao colapso.

A ET é a capacidade do sistema em manter níveis adequados de tensão, podendo ser dividida em duas categorias: grandes perturbações e pequenas (Kundur,1993). perturbações As grandes perturbações estão intrinsecamente ligadas com a capacidade do sistema em manter os valores apropriados de tensão após a ocorrência de um grande distúrbio, tal como uma falta, por exemplo. Essa análise utiliza técnicas não lineares de simulação no domínio do tempo ou da frequência. Por outro lado, a análise a pequenas perturbações é a capacidade do sistema em manter tensões em regime após uma pequena perturbação, como uma variação de carga (Morison, 1993).

Muito embora a análise de ET seja dinâmica, as ferramentas estáticas podem ser utilizadas na abordagem do problema. Essas são baseadas em equações de fluxo de potência, não utilizando equações diferenciais, associadas a cada ponto de equilíbrio. De acordo com (Morison,1993), a análise do problema por abordagens dinâmicas ou estáticas, levam a resultados bastante próximos. Por meio da abordagem estática, obtêm-se importantes informações sobre o sistema, principalmente a barra crítica, que caracteriza por experimentar grandes variações de tensão e ângulo face às variações de carregamento do sistema.

A barra crítica afeta as barras vizinhas, formando, dessa forma, uma área crítica, que pode levar o sistema ao colapso de tensão. O termo se aplica à situação na qual as magnitudes de tensão decaem de forma abrupta e descontrolada em uma área do sistema. A identificação da barra crítica é de suma importância, pois indica quais áreas/barras necessitam de ações de controle. Diferentes metodologias têm sido usadas para a determinação dessas barras, dentre elas os métodos do Vetor Tangente (Zambroni,1996) e da Função Auxiliar de Energia (Pesoti,2017).

No método do Vetor Tangente, a componente de maior valor absoluto do vetor indica a barra mais sensível às variações de carga no sistema. A barra crítica no ponto de colapso é identificada com certa antecedência, ainda em um ponto de operação.

A metodologia da Função Auxiliar de Energia avalia o perfil de vulnerabilidade das barras à instabilidade de tensão. O método atribui a cada unidade do sistema um valor escalar, a partir do qual é possível agrupar as barras em áreas de maior e menor vulnerabilidade; além de apontar a barra mais crítica. O trabalho em (Pesoti,2017) aplica a técnica da Função Auxiliar em um setor do sistema elétrico brasileiro (sistema São Paulo 440 kV) para identificar as barras mais robustas, auxiliando no processo de tomada de decisão durante a recomposição (*Black Start*).

O método do Vetor Tangente faz uso da solução convencional do fluxo de potência. A determinação da barra crítica pelo método da Função Auxiliar requer, além da solução operativa do sistema, o cálculo de uma solução alternativa, conhecida como solução de baixa tensão (SBT). A solução das equações que compõem o problema de fluxo de potência pode ser obtida através de métodos iterativos matriciais, como o Método de Newton-Raphson (MNR)

No entanto, quando aplicado em SD, o método MNR tem o processo de convergência comprometido, devido à alta relação entre resistência (R) e reatância (X) dos SD. O problema ocorre tanto na versão completa do MNR, como em suas versões desacopladas (Zambroni, 2009). No presente trabalho, é utilizado o método de rotação de eixos (Monticelli, 1984) como forma de contornar esse problema.

O problema de colapso de tensão, normalmente estudado em sistemas de transmissão, também é investigado nos sistemas de distribuição. Nesse contexto, este trabalho propõe a aplicação das técnicas do Vetor Tangente e da Função Auxiliar de Energia para a determinação da barra crítica em um sistema de distribuição com inserção de geração intermitente solar.

Além dessa seção introdutória, o trabalho é dividido em: Seção II apresenta a avaliação da barra crítica do SD. Na Seção III, são detalhados a variação de cargas, geração despachável e não despacháveis do sistema. Na Seção IV são apresentados os resultados e discussões. Por fim, na Seção V, as devidas conclusões.

## 2 Determinação da Barra Crítica do Sistema de Distribuição

Considerando-se que o colapso de tensão é um fenômeno que se inicia localmente (Zambroni, 2000), a determinação da barra crítica, antes do ponto de bifurcação, é um procedimento importante no estudo de ET.

Neste trabalho, os métodos do Vetor Tangente e da Função Auxiliar Energia são empregados para a determinação da barra crítica em um sistema de distribuição, considerando-se variações de cargas e de geração distribuída não despachável.

## 2.1 Vetor Tangente

Com a mudança do ponto de operação do sistema em função do parâmetro de variação  $\lambda$ , o modelo de fluxo de cargas é dado por:

$$f(x,\lambda) = 0 \tag{1}$$

Sendo *x* as variáveis de estado que se modificam em função do parâmetro  $\lambda$ . Para o sistema linearizado, isolando-se as equações de estado, temse:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta g \\ \Delta \theta l \\ \Delta V l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P g \\ \Delta P l \\ \Delta Q l \end{bmatrix}$$
(2)

Onde  $\Delta \theta g$ ,  $\Delta \theta l$ ,  $\Delta V l$  são os vetores que contêm as correspondentes variações incrementais nos ângulos e módulos das tensões nodais.  $\Delta P g$ ,  $\Delta P l$  possuem, respectivamente, as variações de potência ativa das barras de tensão controlada e de carga. O vetor  $\Delta Q l$  a variações de potência reativa das barras de carga. As variações de carga e geração são dadas por:

$$Pg_{k+1} = Pg_k (1 + \Delta \lambda) \tag{3}$$

$$Pl_{k+1} = Pl_k \left(1 + \Delta \lambda\right) \tag{4}$$

$$Ql_{k+1} = Ql_k (1 + \Delta\lambda) \tag{5}$$

Com  $P_{lk+l}$ ,  $P_{gk+l}$  e  $Q_{lk+l}$  são as potências no momento seguinte à variação e  $P_{lk}$ ,  $Q_{lk}$  e  $P_{gk}$ , são as potências de operação.

Finalmente, o Vetor Tangente é obtido através do produto da inversa da matriz Jacobiana pelo vetor carga/geração nos pontos de operação.

$$VT = \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta_g}{\Delta \lambda} \\ \frac{\Delta \theta_l}{\Delta \lambda} \\ \frac{\Delta Vl}{\Delta \lambda} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} Pgk \\ Plk \\ Qlk \end{bmatrix}$$
(6)

O Vetor Tangente (VT) mostra como as variáveis do sistema mudam com relação à variação do parâmetro  $\lambda$ . A barra do sistema associada à componente de maior valor absoluto do VT é considerada a barra crítica.

#### 2.2 Função Auxiliar de Energia

A função atribui a cada barra um valor escalar, indicando uma medida de vulnerabilidade em cada unidade do sistema. Para uma dada barra *i*, a função auxiliar é definida como:

$$vi(X^{s}, X^{u}) = Q_{i} \ln(V_{i}^{u}) + P_{i}\theta_{i}^{u}$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{j=1; j \neq i}^{n} V_{i}^{u} V_{j}^{u} B_{ij} \cos(\theta_{i}^{u} - \theta_{j}^{u})$$

$$- \sum_{j=1; j \neq i}^{n} V_{i}^{s} V_{j}^{s} G_{ij} \cos(\theta_{i}^{s} - \theta_{j}^{s})\theta_{i}^{u}$$

$$- \sum_{j=1; j \neq i}^{n} V_{j}^{s} G_{ij} \sin(\theta_{i}^{s} - \theta_{j}^{s})V_{i}^{u}$$

$$(7)$$

Com  $X^s = (V^s, \theta^s)$  corresponde à solução convencional do fluxo de potência;  $X^u = (V^u, \theta^u)$  é a solução de baixa tensão de interesse;  $G_{ij}$  e  $B_{ij}$ , são, respectivamente, a condutância de transferência e susceptância da linha que liga as barras i e j.

## 2.3 Fluxo de Potência para Determinar as Soluções Estáveis e Instáveis

Resolve o conjunto de equações do fluxo de potência através do processo iterativo de MNR, obtendo as tensões e ângulos no ponto de operação através do produto da matriz Jacobiana inversa pelas potências ativas e reativas de cada barra.

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta i \\ \Delta V i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P i \\ \Delta Q i \end{bmatrix}$$
(8)

Ângulos e tensões atualizados, respectivamente, por:

$$\theta_{i_{k+1}} = \theta_{i_k} + \Delta \theta_i \tag{9}$$

$$Vi_{k+1} = Vi_k + \Delta Vi \tag{10}$$

A SBT de interesse, em cada ponto de operação em estudo, corresponde à solução de baixa tensão do fluxo de potência associada à barra crítica indicada pelo método do VT, ou seja, a SBT apresenta nível baixo de tensão na barra crítica. O cálculo desta solução inicia-se com uma estimativa inicial baixa de magnitude de tensão da barra crítica, por exemplo, 0,4 pu. As demais barras têm estimativa inicial em torno de 1 pu. O problema do fluxo de potência para a SBT é resolvido através do MNR com controle de passo para incrementos de variáveis, na seguinte forma (De Lorenci,2016):

$$x_{k+1} = x_k + \rho \Delta x \tag{11}$$

O parâmetro  $\rho$  implementa o controle de passo, utilizado para prevenir que a solução do método iterativo não escape da área de atração da SBT.

### 2.4 Rotação de Eixos

Diante da alta relação R/X de um SD, o processo de convergência do MNR para a obtenção das soluções do fluxo de potência fica comprometido, tanto o método clássico como o desacoplado. Neste trabalho, com o objetivo de contornar o problema é utilizada a técnica de rotação de eixos (Monticelli, 1984).

Essa ferramenta modifica a razão R/X do sistema, aumentando a reatância frente à resistência, sem que a topologia do sistema seja alterada. Os valores de resistência e reatância são rotacionados por um ângulo  $\theta rot$ , com relação à referência original na seguinte forma:

$$R_{rot} = R\cos(\theta_{rot}) - Xsen(\theta_{rot})$$
(12)

$$X_{rot} = Rsen(\theta_{rot}) + X\cos(\theta_{rot})$$
(13)

*Rrot* são os valores rotacionados de resistência e *Xrot* de reatância.  $\theta rot$  é o ângulo ótimo que a partir de todos os ramos define um único ângulo.

$$\theta_{k-m} = 90^\circ - \tan^{-1} \frac{X}{R} \tag{14}$$

$$\theta_{rot} = \sum_{i=1}^{nr} \frac{\theta_{ki-mi}}{nr}$$
(15)

Sendo  $\theta k$ -*m* o ângulo rotacionado do ramo *k* a *m* e *nr* o número de ramos do sistema.

Através da rotação de eixos, tem-se a necessidade em rotacionar as injeções de potência ativa ( $P_{rot}$ ) e reativa ( $Q_{rot}$ ) para que o resultado do algoritmo não perca a validade. Assim, tais valores são rotacionados da mesma forma, como mostrado.

$$P_{rot} = P\cos(\theta_{rot}) - Qsen(\theta_{rot})$$
(16)

$$Q_{rot} = Psen(\theta_{rot}) + Q\cos(\theta_{rot})$$
(17)

Onde  $P_{rot}$  e  $Q_{rot}$  são, respectivamente, as potências ativa e reativa associadas ao sistema rotacionado.

Para barras do tipo PV (potência ativa e tensão especificadas), a potência ativa ( $P_{rotPV}$ ) é atualizada a cada iteração do MNR, uma vez que a potência reativa de tais barras não é conhecida.

$$P_{rotPV} = \frac{P_{PV} - Q_{rotPV}.sen(\theta_{rot})}{\cos(\theta_{rot})}$$
(18)

Para a primeira iteração do MNR é definida uma estimativa inicial de  $Q_{rotPV}$ . Ao final do processo iterativo, a rotação inversa para a potência ativa e reativa para cada barra.

$$\begin{bmatrix} Pi\\Qi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{rot} & sen\theta_{rot}\\ -sen\theta_{rot} & \cos\theta_{rot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{rot}\\Q_{rot} \end{bmatrix}$$
(19)

### 3 Variação de Carga, Geração Despacháveis e não Despacháveis

Face à variação de carga e a intermitência das fontes renováveis inseridas no SD, as barras críticas podem ser alteradas, necessitando-se a modelagem desses fatores.

Nesta seção, são apresentados os modelos para variação de carga e gerações despachável e não despachável.

### 3.1 Variação de Carga

O trabalho utiliza o modelo de cargas com potência constante. Entretanto, as cargas variam de acordo com a respectiva curva dos consumidores.

$$P(t) = k(t) * Pbase \tag{20}$$

$$Q(t) = k(t) * Qbase \tag{21}$$

Sendo P(t) e Q(t) as potências ativa e reativa da carga no instante de tempo determinado,

respectivamente. k(t) fator multiplicativo dependendo qual tipo de consumidor está sendo considerado na barra. *Pbase* e *Qbase* as potências ativa e reativa do caso base, respectivamente.

#### 3.1 Geração Despachável

Considera-se geração despachável todas as fontes que podem ter a quantidade de potência de saída controlada, onde a energia primária está disponível a todo instante. Da mesma forma, a tensão terminal é mantida, pois usam conversores em modo VSI (*Voltage Source Inverter*). Como exemplo, as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) (Xue, 2007).

#### 3.2 Geração Não Despachável

A potência da geração não despachável não pode ser totalmente controlada. Essa geração é dada principalmente por fontes renováveis intermitentes, indicando que a potência injetada pode alcançar diferentes valores ao longo do dia (Parhizi, 2015). Na formulação do fluxo de potência, essa geração é modelada como uma injeção negativa de potência, devida ao fato de usarem conversores eletrônicos em modo PQ, ou seja, injetam quantidades definidas de potência (Lopes, 2006).

## 3.2.1 Energia Solar

O modelo utilizado para representação da geração fotovoltaica é o exponencial simples, detalhado em (Bellia, 2014), de acordo com a Figura 1.



(Bellia, 2014)

Pela lei de Kircchoff, tem-se:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{22}$$

Com  $I_d$  e  $I_{sh}$  igual a:

$$I_{d} = I_{e} e^{\frac{q(V_{pv} + RsI_{pv})}{AK_{B}T}}$$
(23)

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}}$$
(24)

Sendo *Ipv*, *Iph*, *Id*, *Io* corrente fornecida à carga, corrente gerada a partir do efeito fotoelétrico,

corrente do diodo, corrente de saturação do diodo, respectivamente. Rs, Rsh resistência série e shunt da célula, respectivamente. Vpv, tensão da carga; A, fator de qualidade da junção p-n; KB, constante de Boltzmann. T, temperatura da junção e q, carga do elétron.

A metodologia utilizada para determinação dos parâmetros não conhecidos da Equação (22) é a mesma aplicada em (Chan, 1987).

#### 4 Resultados e Discussões

O sistema teste utilizado é o IEEE 34 barras (IEEE Distribution System, 2018). Esse sistema é real, localizado no Arizona, estado norte americano. O sistema é considerado conectado, sendo a barra 1 definida como Barra *swing* (ângulo e tensão especificados). São inseridas gerações despacháveis nas barras 5 e 20. Como descrito em (Mwakabuta, 2007), na perspectiva de operação e planejamento, o sistema teste é modificado. Assim, o modelo de cargas é considerado trifásico, equilibrado e constante durante o intervalo de tempo. Foram omitidos o transformador e o regulador de tensão. Das várias configurações de condutores, admite-se apenas a descrita na Tabela I.

Tabela I –	Configuração	do Condutor
------------	--------------	-------------

Configuração	R [ohm/milha]	X [ohm/milha]
300	1.3368	1.3343



A variação de cargas em cada barramento e a inserção de potência gerada por cada fonte renovável é considerada em um período de observação de 24 horas, com intervalos de tempo de 10 minutos. Assim, espera-se 144 pontos de monitoramento da barra crítica.

# 4.1 Avaliação da Barra Crítica sem a Inserção de Renováveis

Monitorando a barra crítica através do Vetor Tangente, considerando o sistema sem a inserção de geração de energia intermitente, observa-se, através da Figura 3, que durante o período considerado, a Barra 33 é a barra crítica em todos os pontos analisados.



Do mesmo modo, para a Figura 4, tem-se uma análise quantitativa da barra crítica através da função

Auxiliar de Energia. Em todo período, a Barra 33 possui o menor valor da função, ou seja, apresenta o maior nível de vulnerabilidade, caracterizando-a como barra crítica.



Figura 4: Determinação da barra crítica pela função Auxiliar de Energia – Sem inserção de renováveis

## 4.2 Avaliação da Barra Crítica com a Inserção de Energia Solar

Considera-se agora a inserção de geração intermitente no SD, através da conexão de geração fotovoltaica na Barra 33. A figura 5 mostra a geração de energia solar ao longo de 24 horas. Observe que a geração é expressiva no período compreendido entre os pontos 48 e 96.



Figura 5: Potência ativa gerada pela fonte de energia solar

A Figura 6 mostra a barra crítica apontada pelo método do Vetor Tangente ao longo do período. Note

que, entre os pontos 48 e 96, quando a geração fotovoltaica na Barra 33 é significativa, esta deixa de ser a barra crítica do sistema. Neste intervalo, a Barra 23 se torna a barra crítica.



Figura 6: Cálculo da barra crítica pelo Vetor Tangente – Inserção de renovável na barra 33

A análise quantitativa da Função Auxiliar de Energia, mostrada na Figura 7, confirma o resultado obtido pelo método do Vetor Tangente. No período compreendido entre os pontos 48 e 96, o valor da Função Auxiliar associado à Barra 33 se eleva, comparativamente ao período anterior ao ponto 48 e posterior ao 96. Por outro lado, o valor associado à Barra 23, entre os pontos 48 e 96, reduz-se ao menor nível apresentado dentre as barras do sistema, caracterizando-a como barra crítica.



Figura 7: Cálculo da barra crítica pela função Auxiliar de Energia – Inserção de renovável na barra 33

4.3 Avaliação da Barra Crítica com a Inserção de Duas Fontes de Energia Solar.

Considera-se, nesta análise, a inserção de geração intermitente no SD através da conexão de geração fotovoltaica nas Barras 23 e 33. Neste cenário, a Barra 33 é a barra crítica do sistema quando:

- i) não há geração nas Barras 23 e 33;
- ii) a potência gerada é menor que 50kW.

A Figura 8 mostra a barra crítica informada pelo método do Vetor Tangente. Na figura, as situações descritas por (i) e (ii) correspondem aos intervalos 0<período<52 e período>94, nos quais a Barra 33 é a barra crítica. Em 52<período<94, a geração fotovoltaica nas Barras 23 e 33 ultrapassa o valor de 50 kW. Neste período, a Barra 33 deixa de ser a barra crítica, que passa a ser a Barra 25 ou a Barra 34. Observa-se que em 52<período<94, as Barras 25 e 34 alternam-se como barra crítica.



Figura 8: Cálculo da barra crítica pelo Vetor Tangente – Inserção de renovável nas barras 23 e 33

A informação obtida pelo método do Vetor Tangente é coerente com os valores de Função Auxiliar de Energia para as barras do sistema, como mostra a Figura 9. Em 0<período<52 e período>94, a Barra 33 apresenta o menor valor de Função Auxiliar dentre as barras do sistema, o que caracteriza como barra mais vulnerável. Em 52<período<94, quando a geração fotovoltaica nas barras 23 e 33 ultrapassa 50 kW, o nível de vulnerabilidade da Barra 33 decai, ou seja, o valor de Função Auxiliar associado se eleva. No mesmo período, as Barras 25 e 34 alternam-se apresentando os menores valores de Função Auxiliar dentre as barras do sistema.



Figura 9: Cálculo da barra crítica pela Função Auxiliar de Energia – Inserção de renovável nas barras 23 e 33

Verifica-se, através dos resultados, que quando a fonte intermitente de energia solar é conectada à barra crítica do sistema (Barra 33), a partir de um certo nível de geração, esta deixa de ser crítica, tornando-se mais robusta, e uma outra barra/áreas assume a criticidade. Pode-se constatar que as fontes intermitentes alteram de maneira direta a análise dos SD.

## 4 Conclusões

Esse trabalho apresenta a avaliação de barras críticas através do Vetor Tangente e da função Auxiliar de Energia em um SD, considerando a inserção de fontes intermitentes de energia. Durante um período de 24 horas, as cargas nas barras são modificadas de acordo com o seu perfil, bem como a geração proveniente de fontes renováveis. A avaliação do sistema quanto à barra crítica é feita em intervalos de 10 minutos.

Para a análise da barra crítica é necessário, a cada ponto de interesse, que sejam calculadas solução operativa do sistema (solução convencional do fluxo de potência) e um solução de baixa tensão particular. O fluxo de potência é resolvido por meio do MNR. No entanto, devido à baixa relação X/R do sistema, o método apresenta problemas de convergência. Para contornar esse problema, utiliza-se o método de rotação de eixos, artifício matemático utilizado para aumentar a relação X/R.

O SD analisado é o IEEE 34 barras. Em um cenário que não considera a inserção de fontes renováveis, verifica-se que a Barra 33 é a crítica ao longo do período total de análise. Inserindo-se uma fonte de energia solar nesta barra, tem-se que a partir de um dado nível de geração, a Barra 23 passa a ser a barra crítica do sistema.

Em outro cenário que considera fontes de energia solar conectadas às Barras 23 e 33, a Barra 33 deixa de ser a barra crítica do sistema durante o período em que a geração renovável atinge um valor significativo. Neste período, as Barras 25 e 34 alternam-se como barras críticas do sistema

Os resultados mostram que a geração intermitente modifica o sistema de acordo com o seu nível de geração, podendo alterar a barra crítica do sistema. Essa informação é importante, pois indica quais áreas ou barras necessitam de ações de controle.

Os resultados obtidos validam a metodologia utilizada indicando que os métodos do Vetor Tangente e a função Auxiliar de Energia são ferramentas de análise de ET também em sistemas de distribuição.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Ensino e Pesquisa de Itajubá – FEPI, Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento – CNPq e Instituto Nacional de Energia Elétrica – INERGE pelo suporte financeiro.

#### **Referências Bibliográficas**

- Bellia, H., Youcef, R. e Fatima, M. (2014). A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. NRIAG J. Astron. Geophys., vol. 3, no. 1, pp. 53–61.
- Chan, D. S. H. e Phang J. C. H. (1987). Analytical methods for the extraction of solar-cell singleand double-diode model parameters. IEEE Trans. Electron Devices, vol. 34, no. 2, pp. 286– 293.
- De Lorenci, E.V., Zambroni, A.C.S. e Lopes, B.I.L. (2016). Energy function applied to voltage stability studies - Discussion on low voltage solutions with the help of tangent vector. Electric Power Syst. Research, vol. 141, pp. 290-299.

- Kundur, P. (1993). Power System Stability and Control, Nova York, EUA: McGraw-Hill.
- Lopes, J. A. P., Member, S., Moreira, C. L. e Madureira, A. G. (2006). Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation. IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 2, pp. 916–924.
- Monticelli, A., Garcia, A.V., Franca, A.L.M., Tanaka, M.R. e Murari, C.A.F. (1984). Automation of distribution of electrical energy: simulation using the fast decoupled power flow. SQ CBA, Campina Grande, Brasil, pp. 256-261.
- Morison, G.K., Gao, B. e Kundur, P. (1993). Voltage stability analysis using static and dynamic approaches. IEEE Transactions on Power Systems, v.8, n.3, p.1159-1171.
- Mwakabuta, N. e Sekar, A. (2007). Comparative study of the IEEE 34 node test feeders under practical simplifications. Power Symposium, NAPS '07, 39th North American, pp 484.
- Parhizi, S., Lotfi H., Khodaei, A. e Bahramirad, S. (2015) State of the art in research on microgrids: A Review. IEEE Access, vol. 3, Denver, pp. 890–925.
- Pesoti, P.M., De Lorenci, E.V., Zambroni, A.C.S., Lo, K.L. e Lopes, B.I.L. (2017). Robustness areas technique developing guidelines for power system restoration, Energies, vol. 10(1), 99.
- Radial Test Feedes, IEEE Distribution System Analysis SubCommettee <ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index. html> Acesso em: 22/03/2018.
- Xue, Y., Chang L. e Meng, J. (2007). Dispatchable Distributed Generation Network – A New Concept to Advance DG Technologies. Power Engineering Society General Meeting, vol. 3, pp. 1–5.
- Zambroni, A.C.S., Canizares, C.A. e Quintana V.H. (1996). Critical bus and point of collapse determination using tangent vectors, 28th North American Power Symp., Cambridge, MA, pp. 329–333.
- Zambroni, A.C.S. (2000). Discussion on some voltage collapse indices. Electric Power Systems Research, 53 (1) pp. 53-58.
- Zambroni, A.C.S., Lopes, B.I.L., Carpinteiro O.A.S. e Leme, R.C. (2009). Determination of optimal point for reactive power compensation in distribution systems, 20Th Int. Conf. Electr. Distrib., no. 179, pp. 8-11.