

# Análise da Inserção de Geração Distribuída em Redes Ativas: Uma Abordagem Baseada em Fluxo de Potência Intervalar

Heitor M. Rodrigues Junior\* Igor D. Melo\*  
Erivelton G. Nepomuceno\*\*

\* Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), MG, (e-mail: heitormrjunior@hotmail.com, igor.delgado2008@engenharia.ufjf.br).

\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), MG, (e-mail: nepomuceno@ufs.edu.br)

**Abstract:** This paper presents a methodology based on an interval power flow using the current injection equations applied in active distribution systems. In the proposed approach, buses in which DG (distributed generation) units are considered are treated in the formulation in two different ways. The first one assumes that the distributed generation is able to control the voltage at the bus in which it is allocated through the injection of reactive power, being modeled as a PV bus in the power flow equations. The second model assumes that the DGs do not provide reactive power to the system. In this case, they are modelled as PQ buses without voltage control. By the formulation of an interval power flow using the Krawczyk operator, the state variables are obtained assuming uncertainties about the load and generation values. The impact of DGs and their models are investigated in this work by the sensitivities of the voltages obtained by the interval method. The United Kingdom 18 bus active system is used to conduct the simulations and comparative analyzes of case studies.

**Resumo:** Este artigo apresenta uma metodologia baseada em um fluxo de potência intervalar (FPI) usando as equações de injeção de correntes aplicadas em redes de distribuição ativas. Na abordagem proposta, barras com unidades de geração distribuída (GD) são tratadas de duas maneiras distintas. A primeira forma assume que a geração distribuída possibilita o controle de tensão na barra em que está alocada através da injeção de reativos, sendo modelada como uma barra PV nas equações de fluxo de potência. A segunda forma assume que as GDs não provêm reativos para o sistema. Neste caso, são modeladas como barras PQ sem controle de tensão. Através da formulação de um FPI usando o operador de Krawczyk, as variáveis de estados são obtidas assumindo incertezas sobre valores de carga e geração. O impacto das GDs e seus modelos são investigados neste artigo através da sensibilidade das tensões obtidas pelo método intervalar. O sistema ativo de 18 barras do Reino Unido é utilizado para a condução de simulações e análises comparativas de casos de estudo.

**Keywords:** Interval Power Flow; Interval Arithmetic; Distributed Generation; Krawczyk Operator; Active Power Systems.

**Palavras-chaves:** Fluxo de Potência Intervalar; Aritmética Intervalar; Operador de Krawczyk; Redes de Potência Ativas; Geração Distribuída.

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de geração distribuída (GD) em redes elétricas é de suma importância para o desenvolvimento de um sistema de energia mais sustentável e confiável do ponto de vista do planejamento e operação (Bollen e Hassan, 2011). Além de atender objetivos ambientais, a diversificação da matriz energética contribui com aspectos políticos, sociais, técnicos e econômicos (Ismael et al., 2019). Dentro do atual contexto da operação e planejamento de redes de distribuição, destacam-se novas metodologias que visam a inserção de GD considerando o tratamento de incertezas

de dados acerca da carga e geração e a qualidade de energia entregue aos consumidores.

Apesar de todos os benefícios associados à geração distribuída em sistemas de potência, como redução das perdas e melhorias no perfil de tensão, a inserção de GD pode interferir negativamente na operação de redes de distribuição. Por esse motivo, para a viabilização da inserção de GD em um sistema, as concessionárias devem levar em conta fatores como localização, quantidade, tipos de conexão e capacidade de hospedagem da rede (Rabiee e Mohseni-Bonab, 2017).

As redes de distribuição, especialmente de baixa e média tensão, são projetadas com base na ideia de fluxo unidirecional a partir de uma geração de energia centralizada,

\* Os autores agradecem o apoio da UFJF, CNPQ, CAPES e UFSJ para realização deste trabalho.

partindo da subestação em direção às cargas. Entretanto, com a inserção de GD, há uma quebra de paradigma em relação à essa forma de operação, fazendo com que os consumidores passem de um papel passivo, em que demandam energia, para um papel ativo, em que podem injetar potência no sistema, caracterizando o que é mencionado na literatura como rede ativa (Mohammadi e Mehraeen, 2017). Além da reversão de fluxo, entre os principais impactos negativos na qualidade de energia causados devido à excessiva penetração de GD estão o desequilíbrio, variações de tensão, introdução de harmônicos e diminuição da inércia das redes, o que resulta no aumento de incertezas associadas ao fluxo de potência (Dubey et al., 2015; Karimi et al., 2016).

Existem unidades de GD despacháveis e não despacháveis (Xu et al., 2017). A primeira representa bem o comportamento de geradores a diesel e micro-turbinas a gás, comumente utilizadas em redes ativas para efetuar melhorias como redução de perdas e controle de tensão em determinados pontos do sistema através da injeção de ativos/reativos. A segunda representa a geração solar e eólica, as quais não são despacháveis, isto é, possuem uma incerteza devido à sua natureza intermitente altamente dependente da irradiação solar e velocidade do vento, respectivamente. As unidades despacháveis podem ser modeladas como barras PV, usando equações de fluxo de potência em que a potência ativa e tensão são especificadas para a barra em que a GD é alocada, sendo a quantidade de reativos calculada para manter os níveis de tensão especificados. Já as unidades não despacháveis podem ser modeladas como barras PQ, especificando as potências geradas pelas unidades (Rese et al., 2013). Neste caso, não há controle de tensão na barra que fica sujeita à variabilidade da penetração de energia na rede, aumentando a incerteza acerca da possibilidade de sub e sobretensões.

Além das incertezas inerentes relacionadas ao fluxo de potência de um sistema de distribuição, ressalvas importantes devem ser consideradas para análises em alimentadores de média e baixa tensão, como suas características intrínsecas de radialidade além de incertezas inerentes à sua operação em tempo real, seja por falta de monitoramento ou imprecisão de dados coletados (Pereira e Costa, 2012).

Dentre as ferramentas que incorporam as incertezas nos dados de entrada do fluxo de potência, pode-se destacar abordagens com modelagem probabilística (Yu et al., 2009; Anastasiadis et al., 2019), métodos baseados na teoria *fuzzy* (Pourahmadi-Nakhli et al., 2013; Marin et al., 2014) e a aplicação da aritmética intervalar, que é utilizada neste trabalho.

A aritmética intervalar é uma ferramenta comumente utilizada para se levar em conta os efeitos de incertezas associadas a erros de análises numéricas. É uma aritmética baseada em operações intervalares, com o objetivo de calcular faixas de possíveis valores correspondentes a variáveis com incerteza. Dessa forma, os dados de entrada para o problema de fluxo de potência podem ser descritos por variáveis intervalares, que levam em consideração a natureza probabilística de cargas, geração e redes (Pereira et al., 2012). Na literatura, a utilização de métodos intervalares para se avaliar o estado operativo da rede é explorada em

referências como Pirnia et al. (2014), Zhang et al. (2016), Wang et al. (2017) e Araujo et al. (2018).

O propósito deste estudo é desenvolver uma metodologia baseada em um fluxo de potência intervalar (FPI) para analisar a inserção de geração distribuída em redes de distribuição ativas. Na abordagem proposta, barras com unidades de GD são formuladas de duas maneiras distintas: a primeira forma assume que as unidades de geração distribuída são despacháveis e possibilitam o controle de tensão na barra em que estão alocadas através da injeção de reativos, sendo modeladas como barras PV nas equações de fluxo de potência; a segunda forma assume que as GDs são não despacháveis e não provêm reativos para o sistema. Neste caso, são modeladas como barras PQ sem controle de tensão. No cálculo do FPI, é utilizado o método de injeção de correntes, inicialmente proposto em da Costa et al. (1999), em que o fluxo de potência possui variáveis de estados em coordenadas retangulares e o problema é resolvido via método de Newton-Raphson. Além disso, são também implementadas as técnicas de controle desenvolvidas em Garcia et al. (2001). Através da formulação de uma metodologia baseada no cálculo do FPI usando o operador de Krawczyk, as variáveis de estados são obtidas assumindo incertezas sobre valores de carga e geração. O impacto das GDs e seus modelos são investigados neste artigo através da sensibilidade das tensões obtidas pelo método intervalar.

## 2. FORMULAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

A fim de explicitar, de maneira adequada, a abordagem proposta, o método de injeção de correntes com controle de tensão por reativos será explicado primeiramente, seguido de breves noções sobre a aplicação da matemática intervalar e o uso do operador de Krawczyk aplicado à abordagem tratada, destacando os passos para implementação da metodologia desenvolvida

### 2.1 Método de Injeção de Correntes com Controle de Tensão

Diferentemente do método tradicional para cálculo de fluxo de potência em que as variáveis de estado são consideradas em sua forma polar (magnitude e ângulo), o método de injeção de correntes (MIC) é formulado em termos das tensões nodais ( $\hat{V}_k$ ) em coordenadas retangulares, sendo  $V_{r_k}$  e  $V_{m_k}$  as suas partes real e imaginária, respectivamente (da Costa et al., 2001; Ferreira et al., 2005).

Pode-se calcular as partes real e imaginária das correntes injetadas como apresentado pelas Equações (1) e (2), respectivamente. O índice  $\Omega_k$  representa o conjunto de barramentos diretamente conectados à barra  $k$  incluindo a mesma.  $G_{ki}$  e  $B_{ki}$  são, respectivamente, a condutância e susceptância do ramo conectando as barras  $k$  e  $i$ .

$$I_{r_k} = \sum_{i \in \Omega_k} (G_{ki} V_{r_i} - B_{ki} V_{m_i}) \quad (1)$$

$$I_{m_k} = \sum_{i \in \Omega_k} (G_{ki} V_{m_i} + B_{ki} V_{r_i}) \quad (2)$$

Os resíduos das partes real e imaginária dos valores respectivos calculados e especificados devem ser iguais a zero, como evidenciado nas Equações (3) e (4).

$$\Delta I_{r_k} = I_{r_k} - \frac{(P_{k,g}^{esp} - P_{k,d}^{esp})V_{r_k} + (Q_{k,g}^{esp} - Q_{k,d}^{esp})V_{m_k}}{(V_{r_k})^2 + (V_{m_k})^2} = 0 \quad (3)$$

$$\Delta I_{m_k} = I_{m_k} - \frac{(P_{k,g}^{esp} - P_{k,d}^{esp})V_{m_k} - (Q_{k,g}^{esp} - Q_{k,d}^{esp})V_{r_k}}{(V_{r_k})^2 + (V_{m_k})^2} = 0 \quad (4)$$

em que  $P_{k,g}^{esp}$  e  $Q_{k,g}^{esp}$  são as potências especificadas ativa e reativa geradas em uma barra  $k$ ;  $P_{k,d}^{esp}$  e  $Q_{k,d}^{esp}$  os seus correspondentes valores de potências demandadas.

Uma vez que o sistema contém equações não lineares, a solução é obtida de modo iterativo pelo método de Newton-Raphson, como representado no sistema matricial (5).

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{I}_m \\ \Delta \mathbf{I}_r \end{bmatrix} = [\mathbf{Jac}] \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{V}_r \\ \Delta \mathbf{V}_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

Pode-se efetuar o cálculo das potências ativas e reativas a partir das Equações (6) e (7), respectivamente considerando tensões e correntes em coordenadas retangulares:

$$P_k = V_{r_k} I_{r_k} + V_{m_k} I_{m_k} \quad (6)$$

$$Q_k = V_{r_k} I_{m_k} - V_{m_k} I_{r_k} \quad (7)$$

Barras com alocação de geração distribuída que possibilitam o controle de tensão através da injeção de reativos, podem ser modeladas como barras PV nas equações de fluxo de potência. Com isso, para manter a tensão de uma barra  $k$  em um valor especificado, a Equação (8) deve ser adicionada ao conjunto de Equações (5), fazendo com que a potência reativa correspondente  $Q_k$  se torne uma nova variável de estado na formulação do fluxo de potência.

$$V_k^2 = (V_{r_k})^2 + (V_{m_k})^2 \quad (8)$$

Linearizando (8), tem-se a Equação (9):

$$\Delta V_k = \frac{V_{r_k}}{V_{m_k}} \Delta V_{r_k} + \frac{V_{m_k}}{V_{r_k}} \Delta V_{m,k} \quad (9)$$

em que  $\Delta V_k$  é o resíduo de tensão e é calculado a cada iteração conforme mostrado em (10), sendo  $V_k^{esp}$  e  $V_k^{calc}$  os respectivos valores especificados e calculados da magnitude de tensão em que  $V_k^{calc}$  é dado pela equação (11).

$$\Delta V_k = V_k^{esp} - V_k^{calc} \quad (10)$$

$$V_k^{calc} = \sqrt{(V_{r_k})^2 + (V_{m_k})^2} \quad (11)$$

O novo sistema matricial se estabelece conforme a Equação (12) em que  $\mathbf{A}_1$  e  $\mathbf{A}_2$  são submatrizes que expressam as relações entre potência reativa gerada na barra com GD e a sua tensão nodal. Essas matrizes são compostas por elementos nulos, exceto nas posições referentes à barra  $k$  com GD.

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{I}_m \\ \Delta \mathbf{I}_r \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Jac} & \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{V}_r \\ \Delta \mathbf{V}_m \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (12)$$

As equações (13) e (14) mostram as derivadas da potência reativa injetada na barra  $k$  em relação às partes real e imaginária das correntes. As equações (15) e (16) mostram, respectivamente, as derivadas das partes real e imaginária em relação às potências reativas injetadas na barra com GD.

$$\frac{\partial Q_k}{\partial I_{r_k}} = \frac{V_{r_k}}{V_k} \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial I_{m_k}} = \frac{V_{m_k}}{V_k} \quad (14)$$

$$\frac{\partial I_{r_k}}{\partial Q_k} = \frac{V_{r_k}}{(V_k)^2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial I_{m_k}}{\partial Q_k} = -\frac{V_{r_k}}{(V_k)^2} \quad (16)$$

Desta forma, as estruturas das submatrizes  $\mathbf{A}_1$  e  $\mathbf{A}_2$  são, respectivamente, apresentadas em (17) e (18):

$$\mathbf{A}_1 = [0 \ 0 \ \dots \ -\frac{V_{r_k}}{(V_k)^2} \ \frac{V_{m_k}}{(V_k)^2} \ \dots \ 0 \ 0]^T \quad (17)$$

$$\mathbf{A}_2 = [0 \ 0 \ \dots \ \frac{V_{r_k}}{V_k} \ \frac{V_{m_k}}{V_k} \ \dots \ 0 \ 0] \quad (18)$$

A solução determinística é obtida a partir da inversão da Jacobiana estendida ( $\mathbf{J}_d$ ), sendo possível calcular os resíduos de tensão em coordenadas retangulares e as potências ativas em cada barra com GD conforme mostrado pelo sistema (19):

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{V}_r \\ \Delta \mathbf{V}_m \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = [\mathbf{J}_d]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{I}_m \\ \Delta \mathbf{I}_r \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (19)$$

A solução determinística é obtida a partir do método iterativo de Newton-Raphson, onde o vetor de variáveis é atualizado a cada iteração  $h$  assim como descrito nas Equações (20), (21) e (22):

$$(V_{r_k})^{(h+1)} = (V_{r_k})^{(h)} + (\Delta V_{r_k})^{(h)} \quad (20)$$

$$(V_{m_k})^{(h+1)} = (V_{m_k})^{(h)} + (\Delta V_{m_k})^{(h)} \quad (21)$$

$$(Q_k)^{(h+1)} = (Q_k)^{(h)} + (\Delta Q_k)^{(h)} \quad (22)$$

De maneira simplificada, pode-se reescrever o sistema matricial (19) como em (23), em que  $\Delta \mathbf{X}$  e  $\Delta \mathbf{Y}$  são vetores que incorporam os resíduos das variáveis a serem calculadas e as especificadas do problema, respectivamente.

$$[\Delta \mathbf{X}] = [\mathbf{J}_d]^{-1} [\Delta \mathbf{Y}] \quad (23)$$

## 2.2 Aritmética Intervalar

A partir de um modelo numérico simples, cada grandeza no domínio dos números reais pode ser representada por intervalos numéricos, sendo possível realizar adição, subtração, multiplicação, de tal modo que cada intervalo computado contém o valor desconhecido da grandeza.

Cada variável então pode ser definida como representado pela Equação (24), em que a variável intervalar  $X$  possui limites fechados mínimo  $\underline{X}$  e máximo  $\overline{X}$  (Moore et al., 2009).

$$X = [\underline{X}, \overline{X}] = \{x \in \mathbb{R} : \underline{X} \leq x \leq \overline{X}\} \quad (24)$$

Segundo Alefeld e Herzberger (2012) diz-se que um intervalo é degenerado se  $\underline{X} = \overline{X}$ . Assim, um número real pode ser representado por um intervalo degenerado como  $x = [x, x]$ . Além disso, se  $x \in [\underline{X}, \overline{X}]$ , define-se o tamanho e o ponto médio do intervalo pelas Equações (25) e (26).

$$\omega(X) = \overline{X} - \underline{X} \quad (25)$$

$$m(X) = \underline{X} + \frac{\omega(X)}{2} \quad (26)$$

A intersecção entre dois intervalos  $X$  e  $Y$  é o conjunto de números reais que pertence a ambos os intervalos. Essa intersecção é vazia tanto se  $\overline{Y} < \underline{X}$  ou  $\overline{X} < \underline{Y}$  e é denotada por  $X \cap Y = \emptyset$ . Se esse não for o caso, a intersecção é definida pela Equação (27):

$$X \cap Y = [\max\{\underline{X}, \underline{Y}\}, \min\{\overline{X}, \overline{Y}\}] \quad (27)$$

Ainda, a adição, subtração, multiplicação e divisão entre dois intervalos  $X$  e  $Y$  são computadas pelas Equações (28) a (31):

$$X + Y = [\underline{X} + \underline{Y}, \overline{X} + \overline{Y}] \quad (28)$$

$$X - Y = [\underline{X} - \overline{Y}, \overline{X} - \underline{Y}] \quad (29)$$

$$X \cdot Y = [\min\{S\}, \max\{S\}] \quad (30)$$

em que  $S = \{\underline{X} \cdot \underline{X}, \underline{X} \cdot \overline{Y}, \overline{X} \cdot \underline{Y}, \overline{X} \cdot \overline{Y}\}$ .

$$\frac{X}{Y} = X \cdot \frac{1}{Y} \quad (31)$$

em que  $1/Y = [1/\overline{Y}, 1/\underline{Y}]$ , assumindo que  $0 \notin Y$ .

Além dessas operações básicas que são utilizadas neste trabalho, outras podem ser definidas e encontradas na literatura (Moore et al., 2009; IEEE, 2015). Entretanto, por questão de espaço e a fim de manter o objetivo do trabalho não serão discutidas.

## 2.3 Algoritmo de Solução Proposto

Esta subseção apresenta os principais passos a serem realizados para a implementação da metodologia de verificação da sensibilidade da inserção de unidades de GD despacháveis e não despacháveis. A metodologia é baseada na execução do fluxo de potência intervalar por injeção de

correntes utilizando o operador de Krawczyk e cálculo da sensibilidade percentual de tensão, ao final.

- **Passo 1:** Obter o perfil de tensões do sistema elétrico a ser estudado, através do fluxo de potência determinístico (Eq. (23)).
- **Passo 2:** Definir variações percentuais de linha, potências demandadas e gerações distribuídas, definindo seus respectivos valores intervalares. No caso da geração de reativo das barras PV, as variações percentuais são calculadas no Passo 4.
- **Passo 3:** Calcular os resíduos intervalares de corrente, segundo as equações (32) e (33), em que os sobrescritos  $i$  e  $d$  denotam, respectivamente, grandezas intervalares e determinísticas. A tensão de uma barra  $k$  é dada por  $V_k^d = V_{r_k}^d + jV_{m_k}^d$ , o resíduo intervalar de corrente é  $\Delta I_{r_k}^i + j\Delta I_{m_k}^i$  e as potências intervalares ativas e reativas geradas e demandadas definidas no Passo 2 são, respectivamente,  $P_{g_k}^i$ ,  $Q_{g_k}^i$ ,  $P_{d_k}^i$  e  $Q_{d_k}^i$ .

$$\Delta I_{r_k}^i = I_{r_k}^d - \frac{(P_{g_k}^i - P_{d_k}^i) \cdot V_{r_k}^d + (Q_{g_k}^i - Q_{d_k}^i) \cdot V_{m_k}^d}{(V_k^d)^2} \quad (32)$$

$$\Delta I_{m_k}^i = I_{m_k}^d - \frac{(P_{g_k}^i - P_{d_k}^i) \cdot V_{m_k}^d - (Q_{g_k}^i - Q_{d_k}^i) \cdot V_{r_k}^d}{(V_k^d)^2} \quad (33)$$

- **Passo 4:** Inicializar o perfil intervalar de tensão do sistema através da Equação (34). Os raios das tensões intervalares são  $\Delta V_{r_k}^i + j\Delta V_{m_k}^i$ , com  $\mathbf{J}_d$  sendo a matriz Jacobiana calculada no ponto de convergência do fluxo de potência. No caso de barras PV, o vetor  $\Delta \mathbf{Q}_g^i$  é definido como os raios intervalares da geração de potências reativas e  $\Delta \mathbf{V}_{esp}$  representa os resíduos de tensão nessas barras, que devem ser zero, uma vez que  $\mathbf{V}_{esp}$  deve ser fixo com base nos resultados obtidos com o fluxo de potência convencional para as barras PV. Dessa forma, a inicialização das tensões é feita conforme as Equações (35) a (37).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{r_k}^i \\ \Delta V_{m_k}^i \\ \Delta Q_{g_k}^i \end{bmatrix} = (\mathbf{J}_d)^{-1} \begin{bmatrix} \Delta I_{r_k}^i \\ \Delta I_{m_k}^i \\ \Delta V_{esp} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$V_{r_k}^i = V_{r_k}^d + \Delta V_{r_k}^i \quad (35)$$

$$V_{m_k}^i = V_{m_k}^d + \Delta V_{m_k}^i \quad (36)$$

$$Q_{g_k}^i = Q_{g_k}^d + \Delta Q_{g_k}^i \quad (37)$$

- **Passo 5:** Aplicar o operador de Krawczyk como método de solução do conjunto de equações não-lineares através da Equação (38). Para uma dada iteração  $h$ ,  $\mathbf{X}$  é a solução intervalar do fluxo de potência,  $\mathbf{x}$  é o ponto médio do intervalo  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  corresponde aos resíduos de corrente e tensões controladas, localizados à direita na Equação (34),  $\mathbf{J}(\mathbf{X})$  é a matriz Jacobiana calculada no intervalo  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{C}$  é uma matriz de pré-condicionamento dada pela inversa do ponto médio de  $\mathbf{J}$  e  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade com as mesmas dimensões de  $\mathbf{C}$ . Ressalta-se que o operador é usado neste contexto para evitar a inversão da matriz Jacobiana intervalar, o que poderia resultar em soluções com intervalos superdimensionados.

$$\mathbf{K}(\mathbf{x}^h, \mathbf{X}^h) = \mathbf{x}^h - \mathbf{C}\mathbf{f}(\mathbf{x}^h) + [\mathbf{I} - \mathbf{C}\mathbf{J}(\mathbf{X}^h)](\mathbf{X}^h - \mathbf{x}^h) \quad (38)$$

- **Passo 6:** Após a aplicação do operador de Krawczyk, as tensões e gerações de reativo intervalares são atualizadas de acordo com a Equação (39). Lembrando que o cálculo de  $Q_g^i$  só é feito caso haja barras PV no sistema. Caso contrário, são calculadas apenas as tensões intervalares como solução do problema.

$$\begin{bmatrix} V_r^{i(h+1)} \\ V_m^{i(h+1)} \\ Q_g^{i(h+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r^{i(h)} \\ V_m^{i(h)} \\ Q_g^{i(h)} \end{bmatrix} \cap K(x^{(h)}, X^{(h)}) \quad (39)$$

- **Passo 7:** A convergência da solução é verificada através da Equação (40), em que  $\tau$  é uma tolerância pré-estabelecida. O processo iterativo deve ser repetido a partir do Passo 5 até que a condição seja satisfeita. Neste artigo, a tolerância adotada é de  $10^{-6}$ .

$$\frac{|\omega(X^{(h)}) - \omega(X^{(h-1)})|}{2} < \tau \quad (40)$$

- **Passo 8:** O impacto das GDs e seus modelos são investigados através do cálculo da sensibilidade percentual das tensões obtidas em cada barra pelo método intervalar, dada pela Equação (41). O tamanho do intervalo de tensão na barra é um indício de que há mais ou menos estabilidade de acordo com o tipo de GD inserida no sistema. Dessa forma, é possível indicar quais barras são mais sensíveis à introdução de GDs no sistema.

$$S_{V_k\%} = \frac{\omega(V_k^i)}{V_k^d} \cdot 100\% \quad (41)$$

### 3. TESTES E RESULTADOS

A metodologia intervalar desenvolvida foi aplicada ao sistema de distribuição ativo de 18 barras com unidades de GD despacháveis alocadas nas barras 7 e 14 (GD-1 e GD-2, respectivamente), conforme mostrado na Figura 1. Dados de carga nominal do sistema são apresentados no Apêndice A, modificados a partir da referência original (Ahmadi e Green, 2009).

O método de Monte Carlo foi usado para comparar os resultados obtidos com a metodologia intervalar desenvolvida. Para isso, foi considerada uma variação de 10% na carga e foram sorteados valores de geração dentro dos intervalos estabelecidos com a metodologia intervalar desenvolvida.

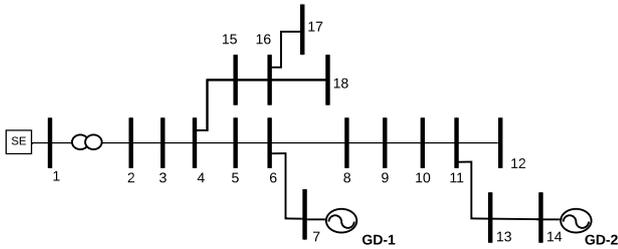


Figura 1. Sistema IEEE 18 barras estudado.

Foram feitas 10000 simulações e os valores mínimos e máximos de tensão (magnitude e fase) e geração de reativos nas barras PV foram comparados com os intervalos resultantes

da aplicação da metodologia desenvolvida. As Figuras 2, 3 e 4 mostram a comparação entre o FPI desenvolvido e o método de Monte Carlo nos cálculos de  $|V_k|$ ,  $\theta_k$  e  $Q_{gPV}$ , respectivamente.

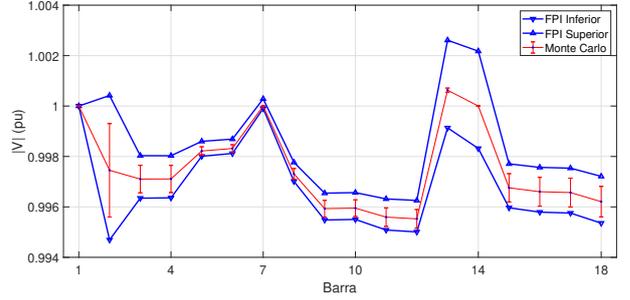


Figura 2. Intervalos de magnitudes das tensões calculados para o sistema IEEE 18 barras.

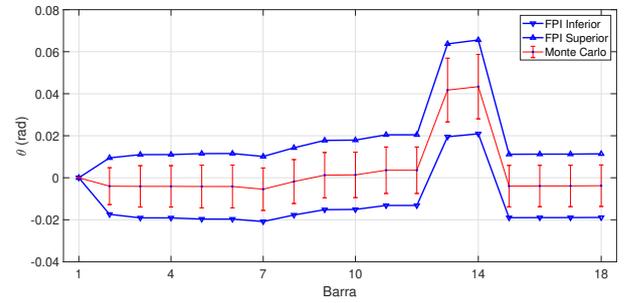


Figura 3. Intervalos dos ângulos das tensões calculados para o sistema IEEE 18 barras.

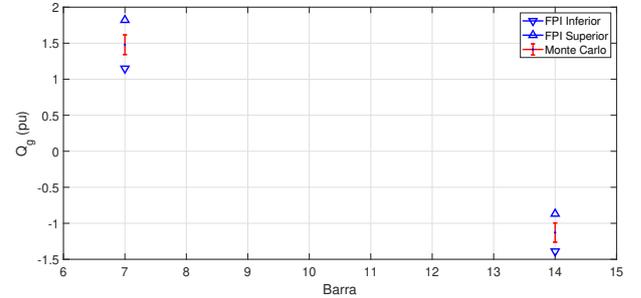


Figura 4. Intervalos das gerações de reativos nas barras PV calculados para o sistema IEEE 18 barras.

A partir das Figuras 2 a 4, nota-se que todos os resultados obtidos com a metodologia proposta englobam as respostas obtidas com o Monte Carlo, o que indica que a abordagem proposta permite uma análise adequada sobre a operação do sistema. Além disso, o tempo computacional para obter a solução no FPI é 168,7 vezes menor em relação às 10000 simulações necessárias para o método de Monte Carlo, considerando que as simulações foram conduzidas em um computador *IntelCore i7 8GB RAM, Windows 10* e implementado no *MATLAB*.

#### 3.1 Análises de Sensibilidade de Tensão Considerando GDs Despacháveis e Não Despacháveis

A partir do sistema ativo de distribuição de 18 barras mostrado na Figura 1, três cenários serão analisados:

- Cenário I: O sistema de 18 barras é avaliado desconsiderando a presença de GDs, a fim de verificar o perfil de tensão neste caso;
- Cenário II: As GDs são caracterizadas como fontes despacháveis, modeladas como barras PV, em que potência ativa e tensão terminal são especificadas;
- Cenário III: As GDs são modeladas como barras PQ sem controle de tensão, assumindo que as fontes não são despacháveis.

Para os três cenários, uma incerteza de 10% será atribuída aos valores de potência demandada pelas cargas e potências ativas geradas. No caso das potências reativas injetadas, serão calculadas através do Passo 4 da Seção 2.3 caso as GDs sejam despacháveis (Cenário II) ou será atribuída incerteza de 10% para GDs não despacháveis (Cenário III).

### 3.2 Cenário I: Sem Inserção de GDs

Desconsiderando a presença de GDs, o perfil de tensão é mostrado pela Figura 5, onde pode-se observar as tensões nas barras obtidas pelo fluxo de potência convencional, assim como os intervalos obtidos com a metodologia desenvolvida. Observa-se que boa parte das tensões estão abaixo de  $0,95pu$ , tanto em condições nominais, quanto para variações de carga de 10%.

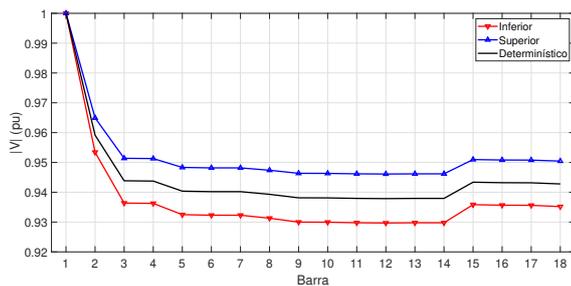


Figura 5. Perfil de Tensão no Cenário I.

O valor percentual da sensibilidade de tensão em cada barra do sistema avaliado, dado pela Equação (41), é mostrado na Figura 6. Pode-se observar que a tensão apresenta sensibilidade inferior a 1,0% em todas as barras.

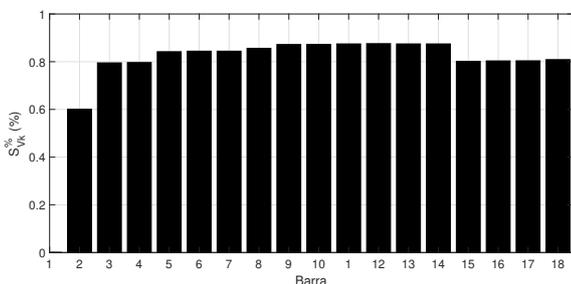


Figura 6. Sensibilidade de Tensão no Cenário I.

### 3.3 Cenário II: Inserção de GDs Com Controle de Tensão

Considerando que as unidades de geração distribuída sejam despacháveis, tem-se o perfil de tensão mostrado pela Figura 7. Neste caso, observa-se que as tensões de todas as

barras estão muito próximas a  $1,0pu$ , tanto em condições nominais, quanto para variações de carga e geração de potência ativa de 10%. Isso mostra que a inserção de barras com as GDs despacháveis torna o sistema mais estável tendo em vista os valores de tensão próximos ao unitário.

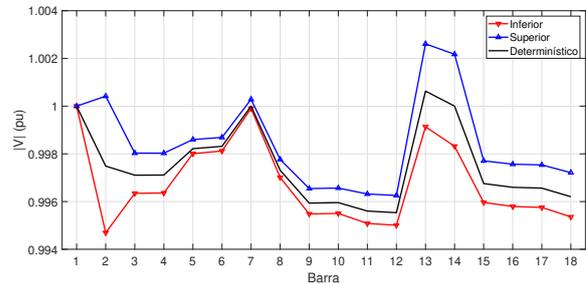


Figura 7. Perfil de Tensão no Cenário II.

A sensibilidade de tensão em cada barra é mostrado na Figura 8. Pode-se observar que a tensão apresenta sensibilidade inferior a 0,3% em todas as barras. Isso indica que variações na carga afetam muito menos a estabilidade do Cenário II em relação ao Cenário I.

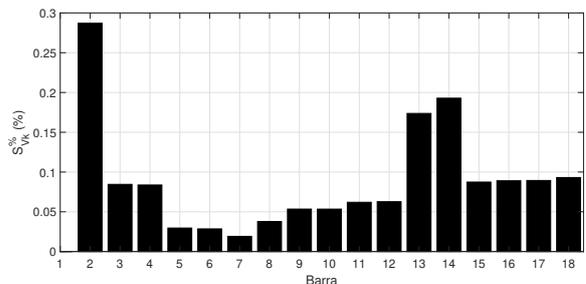


Figura 8. Sensibilidade de Tensão no Cenário II.

### 3.4 Cenário III: Inserção de GDs Sem Controle de Tensão

Considerando que as unidades de geração distribuída sejam não despacháveis, as tensões obtidas com a aplicação da metodologia são apresentadas na Figura 9. Neste caso, observa-se que o perfil de tensão é aparentemente melhor do que no Cenário I para condições nominais, uma vez que as tensões estão acima de  $0,95pu$ . No entanto, a sensibilidade de tensão, apresentada na Figura 8, mostra que variações de 10% na carga e geração podem afetar mais algumas barras nesse cenário em relação aos demais, visto que existem barras com  $S_{V_k}^{\%}$  bem próximas a 1,0%.

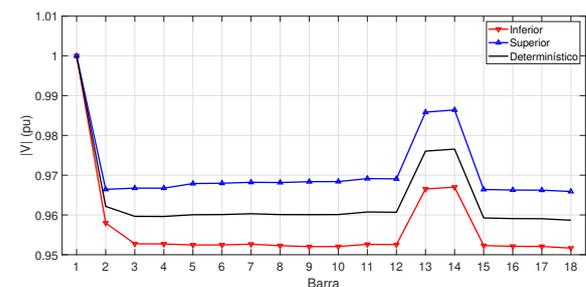


Figura 9. Perfil de Tensão no Cenário III.

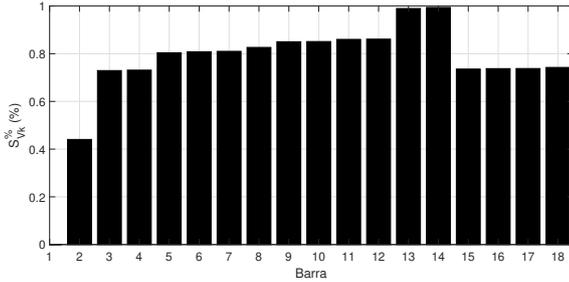


Figura 10. Sensibilidade de Tensão no Cenário III.

### 3.5 Análises Comparativas

Com o intuito de simplificar a análise, a Figura 11 mostra a sensibilidade de tensão em cada barra para os três cenários propostos com variações de 10% nas cargas e gerações. Como se pode observar, o Cenário II apresenta-se bem mais estável às variações as quais estão sujeitos em relação aos demais. Isso ocorre graças às unidades de geração distribuída despacháveis, que permitem o controle de tensão nessas barras.

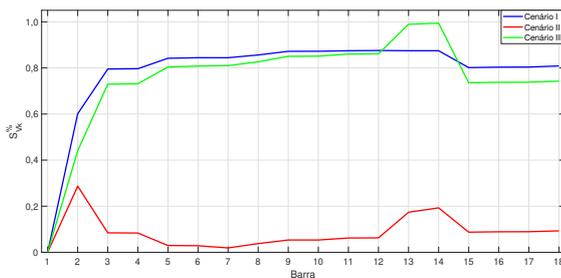


Figura 11. Comparação de  $S_{V_k}^{\%}$  no três cenários.

Embora existam níveis de sensibilidade de tensão mais altos no Cenário III, o Cenário I apresenta maior sensibilidade média diante da variação estipulada, como mostra a Tabela 1. Esse resultado já era esperado, visto que é o único sistema sem unidades de geração distribuída, o que tende a aumentar a sensibilidade diante de alterações na carga e geração.

Tabela 1. Sensibilidade média nos três cenários para variação de 10%.

Cenário	Média de $S_{V_k}^{\%}$
Cenário I	0,7800
Cenário II	0,0848
Cenário III	0,7505

A Tabela 2 mostra a sensibilidade média obtida considerando 20% de incerteza de carga e geração nos três cenários analisados. Percebe-se que todas as sensibilidades são maiores que o caso anterior. Entretanto, apesar de algumas barras no Cenário III atingirem valores mais altos, o Cenário I sempre se mantém com a sensibilidade média maior em relação aos demais devido ao fato de desconsiderar as unidades de GD. Mais uma vez, o Cenário II se mostra menor sensibilidade diante dos demais.

Tabela 2. Sensibilidade média nos três cenários para variação de 20%.

Cenário	Média de $S_{V_k}^{\%}$
Cenário I	1,5598
Cenário II	0,1794
Cenário III	1,5110

## 4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia baseada em fluxo de potência intervalar para avaliar a operação de redes de distribuição ativas. A metodologia proposta se vale de um fluxo de potência resolvido pelo método de injeção de correntes com Jacobiana estendida em que os estados operativos são calculados em coordenadas retangulares conjuntamente às potências reativas injetadas para controle de tensão em barras PV. Através da solução obtida via Newton-Raphson, o método de Krawczyk é aplicado para determinar os intervalos relativos aos perfis de tensão da rede. Os resultados mostraram que por de demandar tempo computacional muito menor (1,3s contra 218,8s) e englobar todas as respostas obtidas com Monte Carlo, o FPI desenvolvido pode ser estabelecido como uma ferramenta interessante no cálculo do fluxo de potência considerando incertezas na entrada.

Através do índice de sensibilidade, analisou-se as diferenças entre a modelagem das GDs despacháveis (tratadas como barras PV) e não despacháveis (tratadas como barras PQ). Conclui-se que, como esperado, a sensibilidade das tensões do alimentador de distribuição é bem maior quando GDs não despacháveis são inseridas em comparação às unidades despacháveis com controle de tensão.

O método proposto se mostra prático e útil em análises de planejamento e operação de redes ativas, em que se deseja avaliar a sensibilidade de tensões nos alimentadores assumindo incertezas associadas à carga e geração.

## 5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – (Brasil) CAPES – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFJF pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- Ahmadi, A.R. e Green, T.C. (2009). Optimal power flow for autonomous regional active network management system. In *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 1–7. IEEE.
- Alefeld, G. e Herzberger, J. (2012). *Introduction to interval computation*. Academic press.
- Anastasiadis, A.G., Kondylis, G.P., Papadimitriou, C., Polyzakis, A., Vokas, G., e Psomopoulos, C.S. (2019). Maximum power photovoltaic units penetration under voltage constraints criteria in distribution network using probabilistic load flow. *Energy Procedia*, 157, 578–585.
- Araujo, B.M.C. et al. (2018). New developments in the interval current injection power flow formulation. *IEEE Latin America Transactions*, 16(7), 1969–1976.
- Bollen, M.H. e Hassan, F. (2011). *Integration of distributed generation in the power system*, volume 80. John Wiley & sons.

- da Costa, V.M., Martins, N., e Pereira, J.L.R. (1999). Developments in the newton raphson power flow formulation based on current injections. *IEEE Transactions on power systems*, 14(4), 1320–1326.
- da Costa, V., Pereira, J., e Martins, N. (2001). An augmented newton–raphson power flow formulation based on current injections. *International journal of electrical power & energy systems*, 23(4), 305–312.
- Dubey, A., Santoso, S., e Maitra, A. (2015). Understanding photovoltaic hosting capacity of distribution circuits. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2015-Sept. doi:10.1109/PESGM.2015.7286510.
- Ferreira, C.A. et al. (2005). A second order power flow based on current injection equations. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 27(4), 254–263.
- Garcia, P.A.N., Pereira, J.L.R., e Carneiro, S. (2001). Voltage control devices models for distribution power flow analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(4), 586–594.
- IEEE (2015). Institute of electrical and electronics engineers standard for interval arithmetic. *IEEE Std 1788-2015*, 1–97. doi:https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7140721.
- Ismael, S.M., Abdel Aleem, S.H., Abdelaziz, A.Y., e Zobaa, A.F. (2019). State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation. *Renewable Energy*, 130, 1002–1020.
- Karimi, M., Mokhlis, H., Naidu, K., Uddin, S., e Bakar, A.H. (2016). Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 594–605.
- Marin, M., Defour, D., e Milano, F. (2014). Power flow analysis under uncertainty using symmetric fuzzy arithmetic. In *2014 IEEE PES General Meeting| Conference & Exposition*, 1–5. IEEE.
- Mohammadi, P. e Mehraeen, S. (2017). Challenges of PV Integration in Low-Voltage Secondary Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(1), 525–535. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2556692.
- Moore, R.E., Kearfott, R.B., e Cloud, M.J. (2009). *Introduction to interval analysis*, volume 110. Siam.
- Pereira, L. e Costa, V.d. (2012). Análise de incertezas em sistemas de energia elétrica via fluxo de potência intervalar. In *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática*, 4174–4179.
- Pereira, L., Da Costa, V., e Rosa, A. (2012). Interval arithmetic in current injection power flow analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1), 1106–1113.
- Pirnia, M., Cañizares, C.A., Bhattacharya, K., e Vaccaro, A. (2014). A novel affine arithmetic method to solve optimal power flow problems with uncertainties. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(6), 2775–2783.
- Pourahmadi-Nakhli, M., Seifi, A.R., e Taghavi, R. (2013). A nonlinear-hybrid fuzzy/probabilistic load flow for radial distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 47, 69–77.
- Rabiee, A. e Mohseni-Bonab, S.M. (2017). Maximizing hosting capacity of renewable energy sources in distribution networks: A multi-objective and scenario-based approach. *Energy*, 120, 417–430. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.095>.
- Rese, L., Costa, A.S., e e Silva, A.S. (2013). A modified load flow algorithm for microgrids operating in islanded mode. In *2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*, 1–7. IEEE.
- Wang, Y., Wu, Z., Dou, X., Hu, M., e Xu, Y. (2017). Interval power flow analysis via multi-stage affine arithmetic for unbalanced distribution network. *Electric Power Systems Research*, 142, 1–8.
- Xu, X., Yan, Z., Shahidehpour, M., Wang, H., e Chen, S. (2017). Power system voltage stability evaluation considering renewable energy with correlated variabilities. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(3), 3236–3245.
- Yu, H., Chung, C., Wong, K., Lee, H., e Zhang, J. (2009). Probabilistic load flow evaluation with hybrid latin hypercube sampling and cholesky decomposition. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(2), 661–667.
- Zhang, C., Chen, H., Ngan, H., Yang, P., e Hua, D. (2016). A mixed interval power flow analysis under rectangular and polar coordinate system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(2), 1422–1429.

#### Apêndice A. DADOS DO SISTEMA 18 BARRAS MODIFICADO

Dados de linha e de carga são apresentados na Tabela A.1 e A.2, respectivamente. O sistema de 18 barras original de Ahmadi e Green (2009) foi modificado pela multiplicação das cargas pelo dobro de seus respectivos valores originais. Este recurso foi usado para analisar melhorias de perfil de tensão e casos de subtensão, visto que o sistema original possui um perfil de tensão muito próximo a 1pu.

Tabela A.1. Dados de linha

De	Para	R (pu)	X (pu)
1	2	0,000	0,1000
2	3	0,0174	0,0085
3	4	0,001	0,0001
4	15	0,0025	0,0007
4	5	0,0052	0,0028
5	6	0,0003	0,0002
6	8	0,0017	0,0008
7	6	0,0010	0,0010

De	Para	R (pu)	X (pu)
8	9	0,0022	0,0011
9	10	0,0001	0,0000
10	11	0,0016	0,0008
11	13	0,0299	0,0081
11	12	0,0007	0,0003
14	13	0,0010	0,0010
15	16	0,0011	0,0003
16	18	0,0013	0,0004
16	17	0,0034	0,0009

Tabela A.2. Dados de carga

Barra	Pg(MW)	Qg(MVar)	Pd(MW)	Qd(MVar)
2			0,2	0,2
3			0,6	0,2
5			0,8	0,4
9			1,6	0,8
10			1,6	0,8
12			0,8	0,4
17			0,2	0,2
18			1,0	0,6
7 (GD-1)	2,0			
14 (GD-2)	5,0			