

Monitoramento em Tempo Real da Geração em Sistemas Ativos de Distribuição via Estimação de Estados

Cristina F. dos S. Hasler. Elizete M. Lourenço
Odilon L. Tortelli

*Universidade Federal do Paraná
Departamento de Engenharia Elétrica.
CP 19011 – Curitiba - PR (e-mail: cristinafsh@gmail.com,
elizete@eletrica.ufpr.br, odilon@eletrica.ufpr.br)*

Abstract: The insertion of Distributed Generation (DG) in the energy system is a complex task that requires changes not only in the topology of the distribution systems, but also in the way of planning, operating and maintaining these systems. The increase in distributed generation resources and their implications have made the attention of the industry and academia, formerly more focused on transmission systems, more focused on distribution systems. Research efforts which were mainly oriented to transmission systems, with the entry of distributed resources redirected the developments in the industry and academia to the distribution systems as well. In this sense, joint actions have been undertaken in an attempt to face the various challenges brought about by changes in the sector. Part of these challenges is associated with the operator's uncertainties regarding the availability of DG units, as well as the amount of energy generated by them. This article joins efforts in this direction and proposes a strategy to estimate, in real time, the location and the energy generated by the DG units, using open access computer programs and an easily implemented approach.

Resumo: Inserir Geração Distribuída (GD) no sistema de energia é uma tarefa complexa que exige mudanças tanto na parte física desses sistemas, como na forma de planejar, operar e manter os mesmos. O aumento crescente de recursos de geração distribuídos e suas implicações fizeram com que a atenção da indústria de desenvolvimento e da academia se voltasse de maneira mais incisiva aos sistemas de distribuição. Nesse sentido, ações conjuntas, vêm sendo realizadas na tentativa de tratar os diversos desafios trazidos pelas mudanças no setor. Parte desses desafios estão associados às incertezas do operador com relação à disponibilidade das unidades de GD, bem como da quantidade de energia gerada, em tempo real. Considerando este cenário, este artigo apresenta uma forma de estimar, em tempo real, a potência gerada por unidades de GD e a sua localização, utilizando programas computacionais de livre acesso e uma abordagem de fácil implementação.

Keywords: Distributed generation; Complex normalization; State estimation; Power Flow.

Palavras-chaves: Geração distribuída; Normalização Complexa; Estimação de Estados; Fluxo de Potência

1. INTRODUÇÃO

Apontada como uma relevante alternativa para as necessidades energéticas que acompanham o desenvolvimento do país, a Geração Distribuída (GD) traz, simultaneamente, solução e desafios que, se não tratados adequadamente podem acarretar problemas que afetam não somente a qualidade da energia elétrica ofertada, mas também a segurança da operação dos sistemas envolvidos. Diante deste cenário, esforços vêm sendo somados com a intenção de tratar os diversos desafios e otimizar o uso desse importante recurso.

O incremento das GD's faz com que o planejamento, operação e manutenção dos sistemas de energia se tornem bastante complexos. Níveis de curto circuito, sentido dos fluxos de potência, harmônicas e níveis de tensão estão entre

os pontos que devem ser analisados e tratados adequadamente.

Considerando estes pontos e entendendo a sua relevância, este artigo apresenta uma forma de estimar a potência gerada por unidades de GD bem como, a sua localização no Sistema de Distribuição (SD), utilizando, como base, ferramentas consagradas já existentes e de livre acesso. Além disso, uma ferramenta de fácil implementação, está sendo proposta para que o operador tenha as respostas necessárias para as decisões que ele necessita tomar no dia a dia desses ambientes.

2. FUNDAMENTAÇÃO E FERRAMENTAS UTILIZADAS

As ferramentas e soluções utilizadas na metodologia proposta deste artigo estão descritas a seguir. Pela relevância, normalização complexa e Estimação de Estados (EE), serão

descritas com mais detalhes. Fluxo de Potência (FP), por ser extensamente encontrado na literatura será apresentado brevemente.

2.1 Matpower

O Matpower (Zimmerman *et al.*, 2011) é um software livre que apresenta várias funções relacionadas ao problema de fluxo de potência, fluxo de potência ótimo e, mais recentemente, estimação de estados. Por ter código aberto, é amplamente utilizado para estudos e simulações em engenharia elétrica. Além disso, tem uma robusta base de dados, com diversos sistemas teste padrão do IEEE, que pode ser usada nas simulações, ou alterada convenientemente. Neste trabalho, está sendo usado Matpower versão 7.0 disponível para download em (Zimmerman, 2019), compatível com as plataformas Matlab e Octave.

A ferramenta Matpower é utilizada em duas etapas do processo de estimação da geração distribuída:

- Gerador de medidas perfeitas: consiste em um ambiente de simulações que utiliza a funcionalidade fluxo de potência do pacote, o qual possibilita validar a ferramenta proposta;
- Estimativa do estado atual da rede: obtida com a funcionalidade estimação de estados, a partir da qual será realizada a estimativa (e localização) da quantidade de geração fornecida por cada unidade de geração distribuída naquele momento de operação da rede.

Estas aplicações serão detalhadas na Seção 3.

2.2 Fluxo de Potência

O fluxo de potência é uma ferramenta fundamental para operação e planejamento de sistemas elétricos, cuja solução fornece o estado da rede, ou seja, magnitude e ângulos das tensões nas barras, quando os transitórios do sistema podem ser desprezados (Monticelli, 1983). Existem diversos métodos de solução do problema do FP, os mais utilizados, porém, por sua precisão e facilidade de implementação, são o método de Newton e os métodos desacoplados. Esses métodos apresentam bom desempenho nos sistemas de transmissão que possuem, devido às características físicas das linhas, uma elevada relação X/R (razão entre a reatância série e resistência série da linha). No entanto, uma característica típica dos sistemas de distribuição, foco do presente trabalho, é a baixa relação X/R. Para contornar este desafio e evitar problemas de convergência ou mau condicionamento numérico, será utilizada a normalização complexa por unidade (Tortelli *et al.*, 2015), descrita na sequência.

2.3 Estimação de Estados

O estimador de estados é uma das principais ferramentas utilizadas para monitoramento de sistemas pois seus resultados, possibilitam ações corretivas e de controle (Nogueira *et al.*, 2019). Para que isso seja possível, é necessário realizar um processamento apurado do conjunto de medidas provenientes do sistema, já que essas contêm ruídos inerentes ao processo de medição e, eventualmente, erros grosseiros, que podem comprometer as ações do operador.

Desta forma, a função do estimador é encontrar a melhor estimativa para o estado da rede a partir do processamento de um conjunto de medidas. A estimação de estados é comumente tratada como um problema de mínimos quadrados ponderados, ou seja, o vetor de estados é estimado de tal forma que a soma ponderada do quadrado dos resíduos de medição seja minimizada (Monticelli, 1999). Assim, uma estimativa para os valores das variáveis de estado é obtida minimizando a seguinte função objetivo:

$$J(\hat{x}) = [z_m - h_m(\hat{x})]^T R_m^{-1} [z_m - h_m(\hat{x})] \quad (1)$$

sendo o resíduo de medição dado por:

$$r_m = z_m - h_m(\hat{x}) \quad (2)$$

onde:

z_m é o vetor ($N_m \times 1$) de quantidades medidas que compõem o plano de medição e N_m é o número de medidas;

h_m é o vetor ($N_m \times 1$) de funções não lineares que relacionam as quantidades medidas às variáveis de estado x ;

\hat{x} é o vetor ($n \times 1$) de estados estimados, que compreendem as magnitudes e ângulos das tensões nas barras e;

R_m é a matriz de covariância dos erros de medição ($N_m \times N_m$).

Entre os diversos métodos disponíveis na literatura para resolver este problema de minimização, o método da Equação Normal está entre os mais utilizados. Nesse caso a condição necessária para o ótimo é aplicada e a solução obtida por um processo iterativo, onde o vetor de estados é atualizado a cada iteração, de forma que:

$$\hat{x}^{k+1} = \hat{x}^k + \Delta x \quad (3)$$

Sendo ε uma tolerância pré-estabelecida, o critério de parada do processo iterativo é definido por:

$$\max |\Delta x| \leq \varepsilon$$

Aplicando o método da Equação Normal o problema é linearizado e a função objetivo do problema passa a ser:

$$J(\Delta x) = [\Delta z - H(\hat{x}^k)\Delta x]^T R_m^{-1} [\Delta z - H(\hat{x}^k)\Delta x] \quad (4)$$

onde:

Δz é o vetor de resíduo de medição dado por $z_m - h_m(\hat{x}^k)$;

Δx é o vetor de variação dos estados e;

$H(\hat{x}^k)$ é a matriz Jacobiana das funções das medidas, dada por $\frac{\partial h_m(\hat{x}^k)}{\partial x^k}$.

Finalmente, impondo a condição de otimalidade de primeira ordem, obtém-se:

$$[H^T(\hat{x}^k)R_m^{-1}H(\hat{x}^k)]\Delta x = H^T(\hat{x}^k)R_m^{-1}\Delta z \quad (5)$$

Sendo (5) conhecida como Equação Normal de Gauss e que, resolvida através de um processo iterativo, determina o incremento do vetor de estados Δx . A formulação completa deste problema, pode ser encontrada em Monticelli (1999) e Monticelli (2000).

2.4 Normalização Complexa por Unidade

Conforme citado em 2.2, já existem soluções amplamente utilizadas para análise e operação do sistema elétrico de potência. A maior parte dessas ferramentas, entretanto, foi inicialmente concebida para o ambiente do Sistema de Transmissão (ST), em que foram investidos mais esforços de monitoramento e essas, quando aplicadas ao ambiente de distribuição não apresentam a mesma eficácia, quando não são totalmente ineficientes. Isso se deve ao fato de que esses ambientes possuem características físicas diferentes, o que se caracteriza em uma relação X/R mais baixa na distribuição. A normalização complexa por unidade (*cpu*) (Tortelli *et al.*, 2015) é uma estratégia de normalização mais abrangente que permite alterar artificialmente os parâmetros da rede durante o processamento numérico, o que possibilita o ajuste da relação X/R para níveis desejados e adequados ao uso eficiente das ferramentas disponíveis para análise de sistemas de transmissão. Essa estratégia, no entanto, não afeta o estado da rede, que permanece o mesmo da normalização *pu* convencional conforme será descrito à seguir.

Diferentemente da normalização *pu* convencional, na normalização *cpu*, uma potência complexa é adotada como base (Tortelli *et al.*, 2015):

$$\dot{S}_{base} = \left| \dot{S}_{base} \right| e^{-j\phi_{base}} \quad (6)$$

A tensão de base é mantida real, assim como é feito na normalização convencional:

$$\dot{V}_{base} = \left| \dot{V}_{base} \right| e^{j0} = V_{base} \quad (7)$$

Estas duas definições nos levam à uma impedância de base complexa, ou seja:

$$\dot{Z}_{base} = \frac{V_{base}^2}{\dot{S}_{base}^*} = \left| \dot{Z}_{base} \right| e^{-j\phi_{base}} \quad (8)$$

E os valores normalizados das impedâncias podem ser obtidos através de (9):

$$\dot{Z}_{cpu} = \frac{R_{\Omega} + jX_{\Omega}}{\dot{Z}_{base}} = \frac{\left| \dot{Z}_{\Omega} \right| e^{j\theta}}{\left| \dot{Z}_{base} \right| e^{-j\phi_{base}}} = \left| \dot{Z}_{pu} \right| e^{j(\theta+\phi_{base})} \quad (9)$$

Em (9) percebe-se que a magnitude do valor normalizado via *cpu* é a mesma obtida em *pu*, porém o ângulo da impedância varia de acordo com o ângulo de base adotado. Os parâmetros de linha são dados por:

$$R_{cpu} = \left| \dot{Z}_{pu} \right| \cos(\theta + \phi_{base}) \quad (10)$$

$$X_{cpu} = \left| \dot{Z}_{pu} \right| \sen(\theta + \phi_{base}) \quad (11)$$

Tem-se assim, uma nova relação X/R:

$$\frac{X_{cpu}}{R_{cpu}} = \tan(\theta + \phi_{base}) \quad (12)$$

Pela equação (12) é possível observar que essa relação pode ser ajustada a partir da escolha adequada do ângulo de base e esta escolha, pode ser feita por diferentes métodos (Nogueira, 2014). Nesta aplicação, a escolha do ângulo de base, tomou por princípio o conhecimento de que, quanto mais alta relação X/R melhor o desempenho da aplicação dos algoritmos inicialmente desenvolvidos para sistemas de transmissão. Uma forma mais simples consiste em, primeiramente, determinar o valor médio da relação X/R do sistema em análise:

$$\alpha_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n \tan^{-1}\left(\frac{X_i}{R_i}\right)}{n} \quad (13)$$

Como em alguns sistemas de distribuição existem grandes diferenças na relação X/R, é possível considerar estes desvios como feito em (14):

$$\gamma_{med} = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)_{MAX} + \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)_{MIN}}{2} \quad (14)$$

Assim, o ângulo de base pode ser determinado por (15):

$$\phi_{base} = \left(\frac{\Pi}{2} - \frac{\alpha_{med} + \gamma_{med}}{2} \right) \quad (15)$$

Com a adoção da cpu , à exemplo da normalização convencional, as potências devem igualmente ser normalizadas segundo a nova base de potência complexa. As equações (16) e (17) apresentam, respectivamente, potência ativa e reativa, em cpu :

$$P_{cpu} = \left| \dot{S}_{pu} \right| \cos(\delta + \phi_{base}) \quad (16)$$

$$Q_{cpu} = \left| \dot{S}_{pu} \right| \sin(\delta + \phi_{base}) \quad (17)$$

Conforme demonstrado em Tortelli *et al.*, (2015), a normalização complexa não altera o estado da rede preservando as relações entre as magnitudes das tensões (V) e os ângulos de fase das tensões (ϕ) nas duas normalizações, ou seja, $V_{pu} \equiv V_{cpu}$ e $\phi_{pu} \equiv \phi_{cpu}$. Além disso, é importante destacar que a normalização complexa preserva todos os benefícios obtidos com a normalização convencional.

3. ESTIMAÇÃO DE GERAÇÃO DISPONIBILIZADA POR UNIDADES DISTRIBUIDAS

Fontes de geração distribuída consistem em pontos de geração de energia elétrica ou térmica, conectadas diretamente no SD, mais próximo dos locais de consumo. Esse tipo de geração provém de fontes alternativas, as quais não apresentam um comportamento totalmente previsível. A intermitência e a variação na quantidade de energia gerada por essas fontes tornam mais complexa a operação dos sistemas elétricos e, conseqüentemente, o trabalho dos operadores, uma vez que estes necessitam conhecer o estado da rede de distribuição, em tempo real, para tomar ações e garantir a operação segura e confiável desses sistemas.

Essa é a razão pela qual diversos estudos vêm sendo realizados, com o objetivo de disponibilizar ferramentas e estratégias que atendam as necessidades operacionais dos SD's. No nível dos sistemas de transmissão, já existem diversas ferramentas que auxiliam nesta tarefa com altos níveis de confiabilidade. Essas ferramentas, entretanto, não podem ser aplicadas diretamente nos SD's porque esses possuem características diferentes, conforme já mencionado. Entre elas está a baixa relação X/R das linhas de transmissão

dos SD's quando comparadas aos ST's. Este trabalho utiliza a normalização complexa para adequar, através de artifícios matemáticos, os parâmetros da rede de distribuição, de tal forma tornar possível a utilização das ferramentas tradicionalmente desenvolvidas para redes de transmissão e, associa a funcionalidade da EE para estimar a potência (e localização) gerada pelas unidades de GD.

Os itens a) até d) apresentam a ideia central da metodologia proposta:

- a) Inicialmente, os dados do sistema em teste devem ser processados, via normalização complexa, para elevar a relação X/R para níveis compatíveis com os encontrados nos ST's. Esta ação permitirá a utilização das ferramentas utilizadas nos ambientes do sistema de transmissão com a mesma confiabilidade nos resultados;
- b) Após normalizados, esses dados servem de entrada para o FP no Matpower juntamente com um plano de medição previamente estabelecido. Esses dados são emulados de forma a criar um ambiente de simulação para avaliar a ferramenta proposta. Por essa razão, a funcionalidade do FP do Matpower, é considerada um gerador de medidas perfeitas e sua solução é obtida pelo método de Newton;
- c) As quantidades medidas e os parâmetros do sistema, em cpu , compõem a entrada para o estimador de estados, que fornecerá uma estimativa para o estado da rede. Novamente o Matpower é utilizado, porém desta vez com a funcionalidade EE;
- d) Finalmente, as quantidades estimadas para a magnitude e ângulo de fase, em cpu , são usadas na estimativa da localização e da potência gerada por cada unidade de GD. O procedimento dessa última etapa é descrito a seguir.

Os dados originais dos parâmetros das linhas de transmissão dos sistemas de distribuição, referidas daqui por diante por *linhas de distribuição* e do carregamento das barras do sistema, compõem os dados de entrada do estimador de GD, juntamente com o estado da rede fornecido pelo EE. Inicialmente são determinados os valores estimados dos fluxos de potência ativa nos dois extremos de todas as linhas de distribuição adjacentes às barras que possuem unidades de GD. Esses fluxos são obtidos a partir das equações clássicas de cálculo de fluxo de potência nas LT's, porém utilizando as quantidades estimadas de magnitude de tensão e ângulo de fase nas barras terminais, ou seja:

$$\hat{P}_{km} = g_{km} \hat{V}_k^2 - \hat{V}_k \hat{V}_m (g_{km} \cos \hat{\theta}_{km} + b_{km} \sin \hat{\theta}_{km}) \quad (18)$$

$$\hat{P}_{mk} = g_{km} \hat{V}_m^2 - \hat{V}_k \hat{V}_m (g_{km} \cos \hat{\theta}_{km} - b_{km} \sin \hat{\theta}_{km}) \quad (19)$$

sendo:

$\hat{V}_{k(m)}$ e $\hat{\theta}_{k(m)}$ são os valores estimados da magnitude e ângulo da tensão na barra k_m , respectivamente;

g_{km} e b_{km} são, respectivamente, a condutância e susceptância série em pu da linha k-m e;

$$\hat{P}_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km} \quad (20)$$

Finalmente, a potência gerada pela unidade de GD na barra k é dada por:

$$\hat{P}_{GD_k} = \hat{P}_k + P_D \quad (21)$$

onde:

\hat{P}_k é a injeção de potência das barras, estimadas a partir das equações de fluxo e;

P_D é a informação de potência demandada pela carga, nas barras.

O fluxograma apresentado na Fig. 1 ilustra a metodologia proposta para o estimador de geração distribuída proposto. Testes iniciais apresentados em Silveira (2019) indicam a viabilidade da metodologia proposta na Fig. 1.

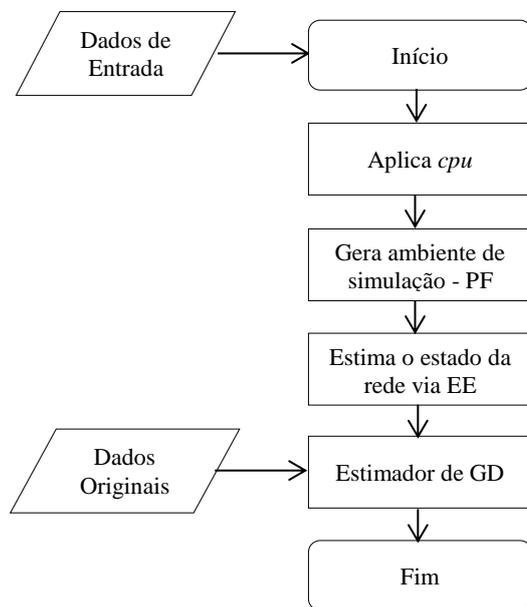


Fig. 1 Fluxograma da proposta da metodologia utilizada para o estimador de geração distribuída em tempo real.

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para efeito de demonstração e validação da ferramenta proposta, são apresentados os resultados obtidos por três situações distintas em um SD com 18 barras: sem incremento

de GD e com incremento de GD em aproximadamente 30% e 70% das barras, respectivamente. A Fig. 2 apresenta o diagrama do sistema, cujos dados de linha e de barra podem ser consultados na biblioteca do Matpower, versão 7.0.

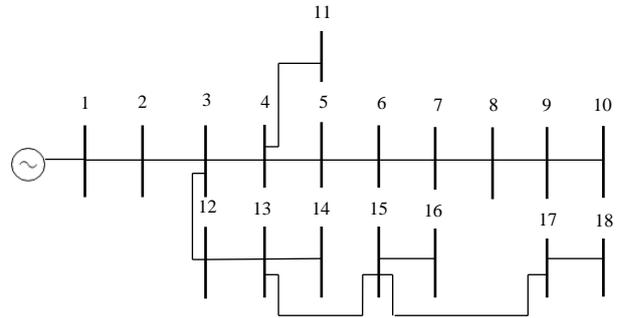


Fig. 2 Diagrama esquemático do sistema usado nas simulações.

Conforme descrito, a normalização complexa eleva a relação X/R para níveis compatíveis com os encontrados nos sistemas de transmissão. A Tabela 1 apresenta o quadro comparativo dos valores das relações X/R, dos parâmetros de linha, antes e depois da aplicação da normalização complexa por unidade.

Tabela 1. Quadro comparativo relação |X/R| em pu e cpu

Linha	X/R pu	X/R cpu	Linha	X/R pu	X/R cpu
1-2	7.0824	2.6358	4-11	1.2949	6.4114
2-3	21.644	2.0352	3-12	1.2948	6.4109
3-4	2.7937	6.2304	12-13	1.2948	6.4098
4-5	2.7902	6.2461	13-14	1.2946	6.4072
5-6	2.7908	6.2435	13-15	1.2948	6.4111
6-7	2.7924	6.2362	15-16	1.2948	6.4109
7-8	2.7934	6.2317	15-17	1.2324	5.5332
8-9	1.2326	5.5356	17-18	1.2319	5.5271
9-10	0.7501	2.2134	-	-	-

3.1 Sem Fontes de Geração Distribuída

A Tabela 2 mostra os resultados do processo sem incremento de fontes de GD. Optou-se por apresentar as tensões obtidas pelo FP em pu e cpu para validação da normalização complexa por unidade. Conforme descrito, o estado obtido da rede é o mesmo.

O ângulo de base, calculado para esta situação, pela equação (15) foi de 28.81°. Como o cálculo do ângulo de base considera apenas os parâmetros de linha, esse não sofre alterações nas simulações seguintes.

A última coluna apresenta a estimativa para as unidades de GD. O sinal negativo indica que existe um residual. Este valor, na ordem de 10^{-6} à 10^{-7} , está abaixo da tolerância adotada no processo iterativo. Como esperado, a ferramenta proposta estimou valores nulos de geração distribuída para todas as unidades de GD, indicando corretamente que não há unidades de GD operando no sistema nesse estudo de caso.

Tabela 2. Resultados da simulação sem GD

Bus	GD (MW)	Tensão (pu)		Tensão (cpu)		Pot GD (MW)
		Mag	Ang	Mag	Ang	
2	-	1.046	-0.1960	1.046	-0.1960	0.0000
3	-	0.982	-4.5419	0.982	-4.5419	0.0000
4	-	0.972	-4.9588	0.972	-4.9588	-0.0000
5	-	0.959	-5.4971	0.959	-5.4971	0.0000
6	-	0.953	-5.7688	0.953	-5.7688	-0.0000
7	-	0.939	-6.3697	0.939	-6.3697	0.0000
8	-	0.937	-6.4535	0.937	-6.4535	-0.0000
9	-	0.933	-6.5371	0.933	-6.5371	-0.0000
10	-	0.927	-6.5722	0.927	-6.5722	0.0000
11	-	0.971	-4.9938	0.971	-4.9938	0.0000
12	-	0.960	-5.0188	0.960	-5.0188	0.0000
13	-	0.947	-5.3022	0.947	-5.3022	-0.0000
14	-	0.945	-5.3449	0.945	-5.3449	0.0000
15	-	0.927	-5.7406	0.927	-5.7406	0.0000
16	-	0.925	-5.8062	0.925	-5.8062	-0.0000
17	-	0.919	-5.9256	0.919	-5.9256	-0.0000
18	-	0.918	-5.9351	0.918	-5.9351	0.0000

3.2 Com GD em Aproximadamente 30% das Barras

Para esta segunda simulação foram distribuídas, de forma aleatória, fontes de GD no sistema em teste. A localização e quantidade de potência distribuída gerada por cada unidade desse estudo de caso podem ser consultadas na segunda coluna da Tabela 3.

Nestas simulações, considerou-se desconhecida a informação da localização das GD's e, por esta razão, a geração de todas as barras foi calculada. Entretanto, a metodologia é facilmente aplicada para um conjunto de barras previamente estabelecidas quando a localização das GD's é conhecida. Essa situação pode ser bastante atrativa quando o sistema em avaliação possuem um grande número de barras, impactando em um esforço computacional maior e o consequente aumento no tempo de processamento de todos os dados.

Os resultados das tensões complexas, em *pu* e *cpu*, estão apresentadas na Tabela 3. Da mesma forma, o estado obtido da rede na normalização convencional é equivalente ao estado obtido na normalização complexa.

A última coluna da Tabela contém as estimativas das potências geradas em cada barra do sistema fornecidas pelo Estimador de GD. Observe que, neste caso, o estimador de GD consegue identificar os locais e as quantidades geradas pelas fontes de GD, com precisão bastante razoável. A diferença entre o valor estimado para potência das GD's e o valor verdadeiro está bem abaixo da tolerância especificada nos processos.

Tabela 3. Resultados da Simulação com GD em 30% das barras

Bus	GD (MW)	Tensão (pu)		Tensão (cpu)		Pot GD (MW)
		Mag	Ang	Mag	Ang	
2	-	1.046	-0.1755	1.046	-0.1755	0.0000
3	-	0.984	-4.0835	0.984	-4.0835	-0.0000
4	-	0.974	-4.4483	0.974	-4.4483	0.0000
5	-	0.962	-4.9120	0.962	-4.9120	0.0000
6	0.2	0.956	-5.1435	0.956	-5.1435	0.2000
7	0.3	0.942	-5.6605	0.942	-5.6605	0.3000
8	-	0.941	-5.7330	0.941	-5.7330	-0.0000
9	-	0.937	-5.7882	0.937	-5.7882	0.0000
10	0.2	0.932	-5.7829	0.932	-5.7829	0.2000
11	-	0.973	-4.4831	0.973	-4.4831	0.0000
12	0.2	0.963	-4.4670	0.963	-4.4670	0.1999
13	-	0.951	-4.7123	0.951	-4.7123	0.0000
14	-	0.949	-4.7547	0.949	-4.7547	0.0000
15	-	0.932	-5.0801	0.932	-5.0801	-0.0000
16	-	0.929	-5.1450	0.929	-5.1450	0.0000
17	0.2	0.924	-5.2020	0.924	-5.2020	0.2000
18	-	0.924	-5.2114	0.924	-5.2114	0.0000

3.3 Com GD em Aproximadamente 70% das Barras

Neste caso, foram mantidas as unidades inseridas no item anterior, e inseridas outras fontes em outras barras. Novamente, o estimador de GD consegue identificar os locais e as quantidades geradas pelas unidades e os resultados podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados da Simulação com GD em 70% das barras

Bus	GD (MW)	Tensão (pu)		Tensão (cpu)		Pot GD (MW)
		Mag	Ang	Mag	Ang	
2	-	1.046	-0.1521	1.046	-0.1521	-0.0000
3	-	0.986	-3.5670	0.986	-3.5670	0.0000
4	0.1	0.977	-3.8874	0.977	-3.8874	0.0999
5	0.2	0.965	-4.2979	0.965	-4.2979	0.2000
6	0.2	0.959	-4.5118	0.959	-4.5118	0.1999
7	0.3	0.945	-4.9784	0.945	-4.9784	0.3000
8	0.3	0.944	-5.0345	0.944	-5.0345	0.2999
9	-	0.940	-5.0894	0.940	-5.0894	0.0000
10	0.2	0.935	-5.0841	0.935	-5.0841	0.2000
11	-	0.975	-3.9220	0.975	-3.9220	0.0000
12	0.2	0.967	-3.8011	0.967	-3.8011	0.1999
13	0.2	0.956	-3.9282	0.956	-3.9282	0.2000
14	-	0.954	-3.9701	0.954	-3.9701	-0.0000
15	0.2	0.940	-4.1429	0.940	-4.1429	0.1999
16	0.2	0.938	-4.1577	0.938	-4.1577	0.2000
17	0.2	0.932	-4.2478	0.932	-4.2478	0.2000
18	0.05	0.932	-4.2525	0.932	-4.2525	0.0499

Nesta aplicação, o ambiente de simulação foi construído com medidas sem erros. Pretende-se dar continuidade a este trabalho inserindo erros de medição e, técnicas de processamento de erros grosseiros para avaliar a ferramenta proposta considerando um ambiente que reproduza um cenário mais realista e com maior nível de criticidade.

5. CONCLUSÕES

O incremento de unidades de GD, tendo em vista os seus benefícios, é um caminho que já começou a ser trilhado e não é mais passível de discussão. O mesmo não se pode dizer dos desafios que a participação destas unidades traz aos operadores do sistema elétrico. Cientes desta necessidade, a pesquisa que culminou na produção deste artigo, tem a intenção de somar esforços com todas as pesquisas anteriores e em andamento que buscam alternativas para preservar a qualidade e segurança do sistema elétrico de energia, bem como dos consumidores e operações, frente às mudanças já em andamento.

Neste sentido, este trabalho propõe uma metodologia para estimação em tempo real da localização e quantidade de potência gerada por cada unidade de GD em uma rede de distribuição. Para tanto, a abordagem proposta combina os conceitos e benefícios da normalização complexa por unidade com o processo de estimação de estados pelo método de mínimos quadrados ponderados.

A solução proposta leva também em consideração os elevados custos de investimento por parte das operadoras para adaptação dos sistemas e ferramentas de análise como um todo para o novo cenário de redes de distribuição ativas. Nesse sentido, a metodologia proposta permite sua aplicação à pacotes computacionais já disponíveis na indústria de potência e de acesso livre para a academia - inicialmente desenvolvidos para sistemas de transmissão, reduzindo assim os investimentos requeridos nesta adaptação.

REFERÊNCIAS

- Monticelli, A.J. (1983), *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo.
- Monticelli, A.J. (1999), *State Estimation in Electric Power Systems – A Generalized Approach*. Editora Springer, USA.
- Monticelli, A.J. (2000) “Electric power system state estimation”. *Proceedings of the IEEE*, v.88, n.2, p. 262-282.
- Nogueira, E. M. (2014), *Estimação de Estados para Sistemas de Distribuição Emergentes*, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Nogueira, E. M. et al. (2019) “Novel approach to power system state estimation for transmission and distribution systems”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 13(10), pp. 1970–1978.
- Silveira, E. L do C (2019), ‘Monitoração da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição via Estimação de Estados’, Trabalho de Graduação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Tortelli, O. L. et al. (2015) ‘Fast decoupled power flow to emerging distribution systems via complex PU normalization’, *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(3), pp. 1351–1358.
- Zimmerman, R. D.; Murillo-Sánchez-, C. E.; Gan, D.(2011). "MATPOWER, A MATLAB Power System Simulation Package". *IEEE Trans. Power Sys.*, v. 26, n. 1, p. 12–19.
- Zimmerman, R. D.; Murillo-Sanchez, C. E. (2019). MATPOWER (Version7.0) [Software]. Available: <https://matpower.org>