

Estudo do Uso da Estimação de Estados para a Apuração de Indicadores de Conformidade do Nível de Tensão em Regime Permanente em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Tales Valias de Paiva, Fernanda C. L. Trindade, Walmir Freitas

*Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, SP
(e-mail: t229964@dac.unicamp.br, fernanda@dsee.fee.unicamp.br, walmir@unicamp.br)*

Abstract: Among the recent investments made by the electricity distribution companies, the replacement of electromechanical meters with smart meters stands out. In addition to the measurement data, useful information are needed for both utilities and the regulatory agency. One of ANEEL's concerns regarding the supervision of utilities service refers to the calculation of voltage transgression indicators, which is based exclusively on measurements made at consumer units and whose values are sent by the utility itself. According to ANEEL, such values are subject to errors and manipulation, leading to inaccurate calculation of such indicators. In this context, this work studies the use of three-phase state estimation to determine the steady-state voltage compliance indicators in real power distribution systems. The state estimation formulation based on the admittance matrix was used and the results show that it can contribute to the determination of voltage compliance indicators even by tampering with values and in the presence of adverse conditions such as power theft.

Resumo: Entre os investimentos recentemente realizados pelas distribuidoras de energia elétrica destaca-se a substituição de medidores eletromecânicos por medidores inteligentes. Além dos dados de medição disponibilizados, almejam-se soluções que os transformem em informações úteis tanto para as distribuidoras quanto para a agência reguladora. Uma das preocupações da ANEEL em relação à fiscalização das distribuidoras refere-se ao cômputo dos indicadores de transgressão de tensão, que é baseado exclusivamente nas medições realizadas nas unidades consumidoras e cujos valores são enviados pela própria distribuidora. Segundo a ANEEL, tais valores estão sujeitos a erros e manipulações, levando ao cálculo impreciso de tais indicadores. Neste contexto, este trabalho estuda a utilização da estimação de estados trifásica para a apuração dos indicadores de conformidade de tensão em regime permanente em redes reais de distribuição de energia. Utilizou-se a formulação de estimação de estados baseada em matriz admitância e os resultados mostram que a estimação de estados pode contribuir para a apuração dos indicadores de conformidade de tensão mesmo mediante adulteração dos valores e na presença de condições adversas como furto de energia.

Keywords: Compliance indicators; electric power distribution system; smart meters; state estimation; steady-state voltage.

Palavras-chaves: Estimador de estados; indicador de conformidade; medidores inteligentes, sistemas de distribuição de energia elétrica; tensão em regime permanente.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as empresas responsáveis pela distribuição de energia elétrica têm investido em modernos equipamentos e soluções que permitam melhorias na qualidade e confiabilidade da energia fornecida (Costa, 2014). Entre estes investimentos, destaca-se a substituição de medidores eletromecânicos por medidores inteligentes, uma vez que estes são indispensáveis para a viabilização dos avanços pretendidos. A exemplo, o município de Jaguariúna-SP é a primeira cidade do grupo CPFL Santa Cruz que recebe um investimento de R\$25 milhões para que 100% dos consumidores residenciais tenham a tecnologia (Assessoria de Imprensa CPFL, 2019). A Enel Distribuição São Paulo planeja instalar 1 milhão de medidores inteligentes até 2021

com o objetivo de melhorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica e reduzir em 30% o custo operacional por cliente da distribuidora (Estadão, 2018).

A instalação dos medidores inteligentes tipicamente vem acompanhada por uma Infraestrutura Avançada de Medição (do inglês, *Advanced Metering Infrastructure*, AMI), responsável pela medição e comunicação de dados em duas vias. Além dos dados de medição disponibilizados, almejam-se soluções que os transformem em informações úteis tanto para as distribuidoras (concessionárias, permissionárias ou autorizadas) quanto para a fiscalização pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Uma das preocupações da ANEEL, conforme questionamento levantado pelo Tribunal de Contas da União, em relação à

fiscalização das distribuidoras refere-se ao cômputo dos indicadores de transgressão de tensão, que é baseado exclusivamente nas medições realizadas nas unidades consumidoras (UCs) e cujos valores são enviados pela própria distribuidora. Por conseguinte, segundo a ANEEL, tais valores estão sujeitos a erros e manipulações (Neto, 2018), levando ao cálculo impreciso de indicadores de qualidade de transgressão de tensão.

É neste contexto que a estimação de estados pode contribuir por ser uma ferramenta que utiliza um conjunto de medidas disponibilizados pela Infraestrutura Avançada de Medição e permite fornecer informações mais precisas e até mesmo auxiliar na identificação de manipulações das medidas. Como resultado, é possível sistematizar o monitoramento de todos os consumidores e obter maior precisão nos cálculos de indicadores de transgressão de tensão. O objetivo deste estudo é analisar a utilização do estimador de estados baseado em matriz admitância (AMB, do inglês, *Admittance Matrix-Based*) trifásico, de modo a auxiliar a apuração dos indicadores de transgressão de tensão diante de dados de medição com incoerências técnicas na tensão, seja por erros inerentes à medição, por erros na comunicação entre medidor e central ou por manipulação/alteração das medidas com intuito de camuflar índices, deixando o cálculo dos indicadores de qualidade de conformidade de tensão em regime permanente mais robustos, confiáveis e justos.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

Os índices e procedimentos técnicos do sistema de distribuição são descritos no documento Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que normatiza e padroniza o funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição. Os critérios referentes à qualidade no fornecimento de energia elétrica são tratados no Módulo 8 e entre os indicadores de qualidade destacam-se os índices de violação de tensão em regime permanente: Duração Relativa da Transgressão para tensão Precária (DRP) e para tensão Crítica (DRC). Atualmente, tais índices são calculados por meio de amostras em UCs específicas e os dados são enviados à ANEEL pela própria distribuidora. As medições são realizadas em UCs sob solicitação dos proprietários, escolhidas por sorteio a cada três meses ou em UCs que possuem medidor eletrônico permanentemente (PRODIST, 2018).

Estes dois índices são alvo da Audiência Pública (AP) 060/2018 da ANEEL, motivada por demanda do Tribunal de Contas da União, com o objetivo de aumentar a confiabilidade na forma de obtenção dos mesmos. O problema relatado nessa AP é a falta de confiabilidade da prática posterior ao sorteio até o recebimento dos dados pela ANEEL, uma vez que estes dados dependem unicamente das informações coletadas pelas distribuidoras, sem possibilidade de auditoria ou confronto com outras evidências pela fiscalização, conforme mostrado na Fig. 1. Não há garantia que o medidor foi instalado no local definido pela ANEEL, além da possibilidade de manipulação das medições previamente ao momento de envio destes para a agência (Neto, 2018). O problema é ainda mais evidenciado através

de 205 ações de fiscalização entre 2009 e 2016 que resultou em sanções da ordem de R\$129 milhões (Neto, 2018).



Fig. 1 Etapas da medição amostral. Adaptado de Neto (2018).

Por esse motivo, o próprio diretor da ANEEL, Sandoval de Araújo Feitosa Neto, indica em Neto (2018) a necessidade de estudos e pesquisas sobre o uso da estimação de estados na rede de distribuição para contribuir na apuração dos níveis de tensão nos consumidores, seja para confronto dos indicadores calculados, como para sinalizar áreas para realização de fiscalização pela Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Eletricidade (SFE), ou instituir campanhas de medição. A estimação de estados auxilia, ainda, na mitigação de erros inerentes à medição ou erros de comunicação, uma vez que no cálculo são utilizadas medidas redundantes (Almeida, 2007).

De forma a não onerar excessivamente a população, nessa AP, a ANEEL propõe uma alternativa que requisita a certificação ISO 9000 em conjunto com a instalação de medidores descritos na resolução normativa REN nº502/2012 de forma permanente nos consumidores sorteados, aumentando gradativamente a base de medição amostral a cada ano, uma vez que são sorteados em média 40 mil UCs por ano (Neto, 2018). O incremento da quantidade de medidores na distribuição se faz necessário diante do cenário de mudanças no sistema de distribuição (Costa, 2014), e, com isso, possibilita a utilização do estimador de estados, que pode auxiliar a distribuidora em diversos processos, conforme discutido em Raggi (2018).

2.1 Definição de Transgressão de Tensão

O PRODIST define para cada faixa de tensão um limite de amplitude adequada em relação a uma tensão de referência, T_R . Extrapolando esse limite, tanto superior como inferior, são definidas faixas precárias. Para medições superiores ou inferiores a essas faixas precárias, são definidas as faixas críticas, conforme visto na Fig. 2, em que: Δ_{ADINF} e Δ_{ADSUP} representam variação inferior e superior da faixa adequada com relação à tensão de referência, respectivamente; Δ_{PRINF} e Δ_{PRSUP} representam a variação inferior e superior da faixa precária com relação à faixa adequada, respectivamente.

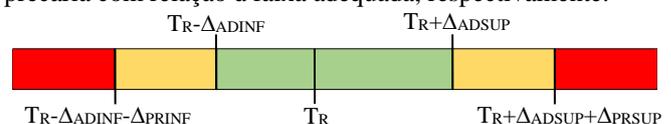


Fig. 2 Faixas de tensão com relação à tensão de referência. Adaptado de PRODIST (2018).

Com base nos limites apresentados na Fig. 2, os índices DRP e DRC possuem o propósito de identificar a duração em que a tensão permanece na faixa precária e crítica, respectivamente, durante o período de medição em um determinado consumidor, sendo este compensado em sua fatura caso os índices ultrapassem os limites estabelecidos. Primeiramente, realiza-se a medição conforme item 2.5.1.1 do Módulo 8 do PRODIST, sendo necessários 1.008 registros de leituras válidas, obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos, salvo que sejam expurgadas medidas conforme item 9.1.10.2 do mesmo módulo. As condições de expurgo de medidas se resumem a medidas nas quais ocorreram variações de tensão de curta duração ou interrupções de longa duração. A norma ainda prevê que para medições permanentes, cada conjunto de 1.008 leituras válidas compõe um indicador DRP e um DRC, sendo considerada a média de todos os conjuntos de leituras apurados dentro do mês civil.

Após a obtenção do conjunto de medidas, calcula-se o DRP e DRC seguindo as expressões (1) e (2) contidas no PRODIST:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100[\%] \quad (2)$$

sendo nlp e nlc o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precária e crítica, respectivamente.

O limite do valor de DRP é de 3% e o limite do indicador DRC é de 0,5% (PRODIST, 2018). Os valores das faixas das tensões precárias e crítica para cada classe de tensão é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Faixas de tensão adequada, precária e crítica

Classe de tensão [kV]	69 a 230	1 a 69	Até 1 (127/220 [V])
Faixa adequada [pu]	0,95-1,05	0,93-1,05	0,92-1,05
Faixa precária [pu]	0,93-0,95 e 1,05-1,07	0,90-1,05	0,87-0,92 e 1,05-1,06
Faixa crítica [pu]	< 0,93 e > 1,07	< 0,90 e > 1,05	< 0,87 e > 1,06

3. ESTIMADOR DE ESTADOS BASEADO EM MATRIZ ADMITÂNCIA

O estimador de estado obtém o estado mais provável do sistema a partir de um conjunto de medidas e do modelo da rede (Abur e Expósito, 2004). Nos sistemas de potência, tipicamente o estado é composto por magnitudes e ângulos das tensões nas barras da rede (Monticelli, 1999). Neste trabalho, utiliza-se o estimador de estados baseado em matriz admitância (AMB) em modelagem trifásica devido à sua simplicidade de implementação e ao reduzido custo computacional comparado a outros estimadores (Lu, Teng e Liu, 1995). Esse baixo custo computacional se deve ao fato de que as matrizes Jacobiana (\mathbf{H}) e de ponderação (\mathbf{W}) serem constantes durante as iterações, sendo necessário montá-las e

fatorá-las apenas uma vez. Eq. (3) define o AMB de acordo com Almeida e Ochoa (2015).

$$\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{H} \cdot \Delta x = \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{W} \cdot [z(x^n) - h(x^n)] \quad (3)$$

sendo: \mathbf{H} , a matriz Jacobiana; \mathbf{W} , a matriz de pesos; Δx , o vetor da variação do estado anterior com o novo estado; $z(x^n)$, o vetor de medidas convertidas com o estado anterior; e $h(x^n)$, o vetor de funções de medição calculadas através do estado anterior.

Considerando a modelagem linear, de acordo com Almeida e Ochoa (2016) pode-se simplificar (3) conforme (4).

$$\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{H} \cdot x^{n+1} = \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{W} \cdot z(x^n) \quad (4)$$

sendo: x^{n+1} , o vetor de estados calculados da iteração.

O estimador AMB possui algumas peculiaridades comparado ao estimador convencional conforme explicado em Laburú (2018). Primeiramente, os valores numéricos, tanto de entrada como de saída, são dados em números complexos na forma retangular. Outra diferença é que as medidas de potência devem ser convertidas em correntes, usando valores de tensão calculados na iteração anterior. De acordo com Almeida e Ochoa (2016), deve-se ainda considerar uma rotação angular das fases que não possuem ângulo próximo de zero. A maior diferença está na matriz Jacobiana, que é formada exclusivamente por valores da matriz admitância nodal (Lu, Teng e Liu, 1995), justificando a rapidez do método em âmbito computacional. Pode-se representar o funcionamento do estimador através do diagrama da Fig. 3.

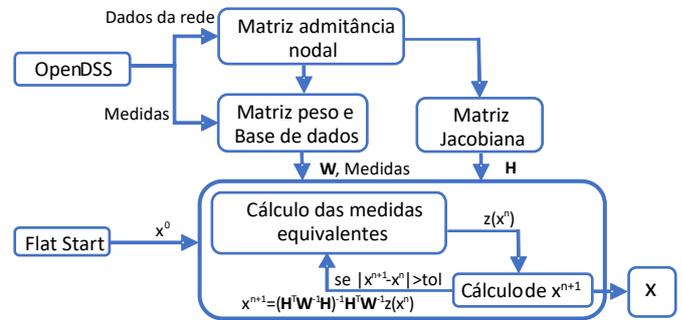


Fig. 3 Diagrama de blocos do funcionamento do estimador de estados AMB.

O cálculo da inversa da variância das medidas pode ser obtido por (5). O valor calculado é posicionado na matriz diagonal \mathbf{W} na posição correspondente da medida na matriz.

$$(\sigma_{zi}^2)^{-1} = \left[\left(\frac{z_i^{FC} \times \%erro}{3 \times 100} \right)^2 \right]^{-1} \quad (5)$$

sendo: σ_{zi}^2 a variância da medida, z_i^{FC} o valor da medida calculado pelo fluxo de carga, e $\%erro$ representa a porcentagem de erro da medida.

Ressalta-se que o foco deste trabalho não é a metodologia de estimação de estados, mas o estudo do potencial do uso do estimador no cômputo dos valores de DRP e DRC. Portanto,

esta seção não objetiva exaurir a teoria de estimação de estados, mas apenas justificar a escolha e apresentar aspectos gerais da metodologia escolhida.

4. ESTUDOS DE CASO

Para o estudo, utilizou-se um alimentador real (média tensão (MT) e baixa tensão (BT)), que possui 1.574 nós e 630 consumidores (divididos em UCs do tipo B1-residencial, B3-demais classes BT e A4-Atendimento em tensão de 2,3 kV a 44 kV). O diagrama unifilar georreferenciado do sistema de média tensão do alimentador é mostrado na Fig. 4.

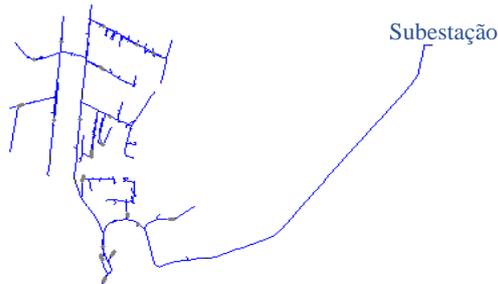


Fig. 4 Diagrama unifilar georreferenciado do sistema de média tensão do alimentador.

A modelagem do alimentador referido foi feita no simulador de sistemas de distribuição OpenDSS. O programa é responsável por realizar o cálculo de fluxo de carga e oferecer ao estimador de estados os dados da rede (matriz admitância) e as medidas de magnitude de tensão e potência ativa e reativa na subestação e nas UCs, assumindo-se que todos os consumidores possuem medidores inteligentes capazes de medir e enviar as medidas para um centro de controle. Com essas informações, o estimador realiza a montagem das matrizes necessárias e calcula as variáveis de estado, conforme mostrado na Fig. 3, sendo o resultado a parte real e imaginária da tensão em todas as barras do sistema, convertido para a forma polar para análises.

Neste trabalho, três estudos de caso, além do caso base, são realizados com o objetivo de analisar a eficácia do uso da estimação de estados na obtenção dos índices DRP e DRC mediante: (1) erros de medição; (2) manipulações propositalmente das medidas diante da fragilidade fiscal destes dados; (3) perdas não técnicas (PNTs) do tipo furto de energia. A descrição de cada estudo é apresentada a seguir.

4.1 Caso base

No caso base não é inserido nenhum erro de medição, sendo as medidas utilizadas na estimação exatamente iguais às medidas calculadas no fluxo de carga. Simulam-se os sete dias de medição, e a cada medição é realizada uma estimação de estados permitindo comparar os valores calculados pelo fluxo de carga (simulando as medidas reais) com os valores calculados pela estimação de estados, além de comparar os valores dos indicadores DRP e DRC para cada consumidor.

4.2 Erros inerentes da medição

Neste caso, adicionam-se erros aleatórios nos valores advindos do cálculo de fluxo de carga, tanto de tensão como

de potência, seguindo distribuição normal com média nula. O desvio padrão é obtido com base na classe de exatidão dos medidores. Conforme a NBR14519 (ABNT, 2000), a RTM587/2012 (INMETRO, 2012), informações de um medidor inteligente da linha SMW/WEG (WEG, 2019) e considerando os valores utilizados em Raggi (2018), adotou-se classe de exatidão de medidas de tensão de 1% e de medidas de potência (ativa e reativa) de 2,5%. Realiza-se um conjunto de simulações Monte Carlo, cujos cenários consistem em diferentes conjuntos de erros aleatórios atribuídos às medidas e para cada cenário realiza-se a estimação do estado da rede e compara-se o resultado obtido com o resultado do cálculo de fluxo de carga.

4.3 Erros por manipulação das medidas de tensão

Nos valores de medição do caso anterior (erros de medição), são adicionados erros simulando manipulação dos valores. O objetivo desta análise consiste em avaliar a possibilidade de detecção de alterações em medidas de tensão, seja pela manipulação dos dados ou por erro de comunicação, que podem levar a alterações nos indicadores DRP e DRC. Assim, às 10 UCs com os piores valores de DRP e DRC (não simultaneamente) soma-se ao valor da medida de tensão o valor necessário para que toda vez que a medida de tensão entrar na faixa precária ou crítica, volte para a faixa adequada normalizada pelo PRODIST. Ao final da estimação do estado obtém-se a diferença entre a tensão estimada e a tensão medida (resíduo de medição), caso esta diferença seja maior que determinada tolerância, entende-se que pode ter havido manipulação das medidas ou erro grosseiro no processo de medição. Assim, o cômputo de DRP e DRC só é válido para as leituras associadas a resíduos menores que a tolerância.

4.4 Consideração de PNT

Analisa-se a interferência de perdas não técnicas, mais especificamente casos de furto de energia, no resultado das tensões na estimação de estados, que consequentemente pode interferir no cálculo dos indicadores DRP e DRC. Para isso, simula-se um caso com perdas não técnicas em um consumidor de média tensão, e outra simulação com PNT em 3 consumidores de BT vizinhos. Compara-se o resultado da estimação de estados com os valores das medidas.

5. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados das simulações propostas na seção anterior. No sistema da Fig. 4, realizou-se a redução de barras de passagem com a utilização do recurso do próprio OpenDSS, reduzindo o sistema de 1.574 nós para 1.043 nós. Dado que o estudo enfatiza os indicadores de DRP e DRC e estes são calculados somente nas UCs, os gráficos evidenciam somente os nós de interesse (560 nós).

5.1 Caso base

O caso base se resume na comparação dos valores de magnitude de tensão (V) do fluxo de carga com o resultado da estimação sem fazer qualquer alteração nas medidas. Sendo assim, realiza-se um fluxo de carga e uma estimação para cada medida realizada durante o dia com duração dos sete

dias previstos no PRODIST, ou seja, não são expurgados nenhuma medição. O histograma da Fig. 5 apresenta a distribuição dos valores de erro entre o resultado da estimação de estados em comparação com o resultado do fluxo de carga do OpenDSS ($V^{\text{fluxo}} - V^{\text{estimação}}$) em cada nó. 99,95% dos resultados possuem diferença menor que 0,1%. O maior valor da diferença é de 0,13%. Assim, os valores de DRP e DRC são obtidos satisfatoriamente.

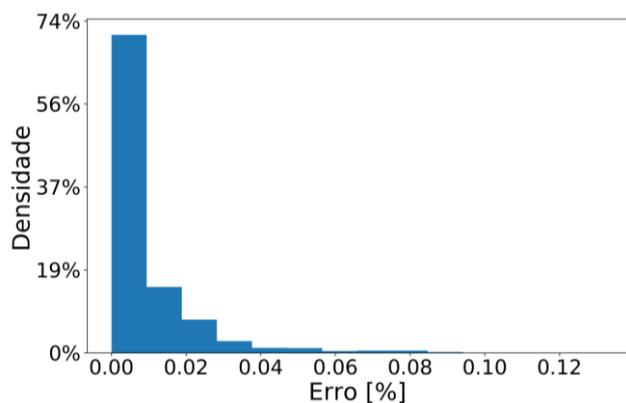


Fig. 5 Histograma do erro entre resultados do fluxo de carga e estimação de estados.

5.2 Erros inerentes da medição

Para observar o efeito dos erros inerentes da medição na estimação de estados, realizam-se 5.472 simulações pelo método de Monte Carlo comparando o resultado da estimação de estados com o do fluxo de carga. O histograma da Fig. 6 apresenta a distribuição dos erros obtidos.

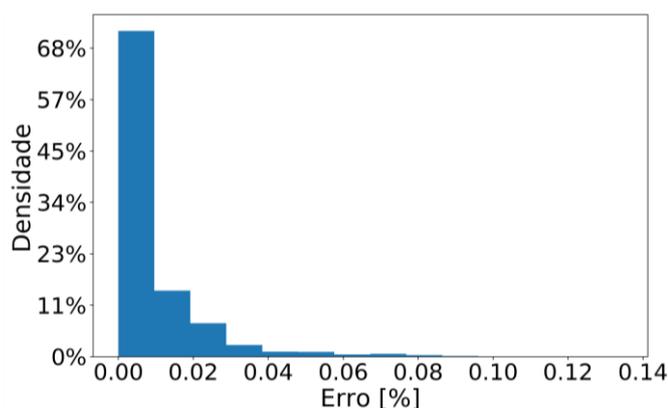


Fig. 6 Histograma do erro entre resultado do fluxo de carga e estimação de estados com erros inerentes da medição.

Nota-se uma grande semelhança com relação ao caso base, resultando em valor máximo de diferença de 0,1345% e 99,95% dos resultados menores que 0,1%.

Com base nesses resultados, obtém-se a tolerância discutida na Subseção 4.3 para que se destaquem os indicadores DRP ou DRC com possíveis erros/manipulações. Neste trabalho, a tolerância adotada de 0,15%. Assim, os valores de DRP e DRC calculados pelo estimador de estados são idênticos aos valores calculados pelo fluxo de carga.

5.3 Erros por manipulação das medidas de tensão

Conforme citado na Subseção 4.3, manipulam-se as medidas dos 10 consumidores com piores indicadores de DRP e DRC (não simultaneamente). Ao realizar uma adição no valor de tensão medido, o estimador tenta corrigir o estado utilizando outras medidas, como medidas de potência do consumidor ou medidas vizinhas, e como resultado gera-se uma diferença maior entre a tensão estimada e a tensão medida (ou seja, um resíduo maior) na UC com valores alterados. Um exemplo é mostrado na Fig. 7, no qual foi adicionado 0,0158 pu elevando a medida de tensão em duas fases de conexão do consumidor para 0,92 pu saindo da faixa precária. O estimador acusa diferenças entre 0,6% e 0,7% (maiores que a tolerância de 0,15% tracejado na Fig. 7), indicando alteração destas medidas.

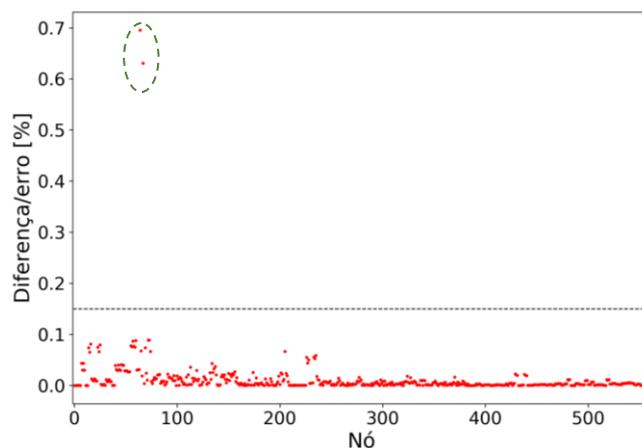


Fig. 7 Erro entre resultados do fluxo de carga e estimação de estados com manipulação de medidas.

A Tabela 2 mostra os resultados das 10 simulações com manipulação de cada um dos consumidores com piores indicadores DRP e DRC. A primeira coluna identifica o consumidor cujos valores de tensão foram manipulados e a segunda coluna enumera taxa de sucesso na identificação das adulterações. 100% de sucesso equivale a identificar 100% das medidas adulteradas ao longo do período de 7 dias.

Tabela 2. Resultado das simulações com manipulação de medidas

Consumidor	Taxa de sucesso
1	76%
2	48%
3	76%
4 a 10	100%

Em 3 casos não foi possível identificar todas as medidas manipuladas. Isso deve-se ao fato de que nesses casos a medida manipulada teve uma alteração muito pequena, a ponto de que o resíduo de medição não viola a tolerância adotada. De acordo com simulações, foi possível concluir que a abordagem proposta permite identificar somente manipulações maiores que 0,5%.

Ressalta-se que este processo pode ser aperfeiçoado pelo uso de técnicas de tratamento de erro grosseiro, como será proposto como continuação deste trabalho.

5.4 Consideração de PNT

Simulou-se a inclusão de PNT, mais especificamente furto de energia, em consumidores de média e baixa tensão com o objetivo de observar a influência deste fator no resultado da estimação e conseqüentemente no cálculo de DRP e DRC. Primeiramente modela-se PNT em um consumidor de média tensão. Posteriormente, modela-se PNT em três consumidores de baixa tensão vizinhos. As PNTs foram adicionadas em 2 níveis, 10% e 30% de redução da potência ativa e reativa medida nos consumidores. A Tabela 3 apresenta valores dos histogramas da diferença do resultado entre as magnitudes de tensão obtidas pela estimação de estados e as medições. Nota-se que a existência de PNT pouco impacta nos resultados devido ao método de estimação de estados implementado em conjunto com os valores assumidos na matriz **W**. A ponderação na matriz **W** possui peso maior para medidas de tensão, sendo as potências menos influentes no resultado final.

Tabela 3. Resultado das simulações com inserção de PNT

Consumidor	Porcentagem de PNT em relação à carga total	Quantidade de consumidores com PNT	Porcentagem de casos com erro menor que 0,1%	Maior valor de erro [%]
Média tensão	10%	1	99,95%	0,1325
	30%	1	99,95%	0,1332
Baixa tensão	10%	3	99,95%	0,1324
	30%	3	99,95%	0,1327

6. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o uso do estimador de estados como ferramenta para a apuração dos índices de conformidade de tensão em regime permanente. O cenário avaliado considera que todos os consumidores possuem medidor inteligente e que o uso da estimação de estados pode ser justificado, entre outros fatores, por auxiliar na detecção de manipulação nos valores medidos, conforme preocupação exteriorizada pela ANEEL. Os resultados mostraram que o estimador de estados apresenta desempenho satisfatório na apuração dos indicadores DRP e DRC mesmo diante de perdas não técnicas no sistema. Além disso, permite identificar manipulações nos valores de magnitude de tensão. Contudo, como continuação deste trabalho, almeja-se aprimorar a técnica de identificação de manipulação dos valores medidos para considerar adulterações em vários consumidores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), processo 88887.342082/2019-00, e da CPFL Energia através do programa P&D ANEEL, processo PD-00063-3047/2018.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2000). *NBR14519: Medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) - Especificação*.
- Abur, A. e Expósito, A. G. (2004). *Power System State Estimation: Theory and Implementation*. New York: Marcel Dekker.
- Almeida, M. (2007). *Estimação de Estado Generalizada Trifásica*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas.
- Almeida, M. e Ochoa, L. (2015). Assessing the Statistical Consistency of the AMB State Estimator in Distribution Systems. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America*.
- Almeida, M. e Ochoa, L. (2016). An Improved Three-Phase AMB Distribution System State Estimator. *IEEE Transactions on Power System*, pp.1463-1473.
- Assessoria de Imprensa CPFL. (2019). *CPFL Energia*. [online] Acessível em: <http://www.cpfl.com.br/releases/Paginas/cpfl-energia-implementara-tecnologia-de-medidores-inteligentes-para-clientes-de-jaguariuna-no-estado-de-sao-paulo.aspx>. [Acesso em 29 Novembro 2019].
- Costa, S. A. H (2014). *Os desafios da implantação da Smart Grid no modelo de negócios do setor elétrico: proposta de configuração de uma rede inteligente*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia.
- Estadão (2018). *Enel quer instalar 1 milhão de medidores inteligentes em SP*. [online] Acessível em: <https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,enel-quer-instalar-1-milhao-de-medidores-inteligentes-em-sp,70002631759> [Acesso em 29 Novembro 2019].
- INMETRO (2012). *RTM587/2012 – Regulamento Técnico Metrológico da portaria INMETRO n.º 587/2012*.
- Laburú, F. (2018). *Perspectivas do uso do estimador de estado baseado em matriz admitâncias no tratamento de faltas em redes de distribuição*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Campinas.
- Lu, C., Teng, J. e Liu, W. (1995). Distribution system state estimation. *IEEE Transactions on Power System*, 10(1), pp.229-240.
- Monticelli, A. (1999). *State Estimation in Electric Power System: A Generalized Approach*. Kluwer.
- Neto, S. (2018). *Proposta de Abertura de Audiência Pública com Vistas a colher Subsídios e Informações Adicionais para o Aprimoramento da Regulamentação de Tensão em Regime Permanente*. [ebook] Brasília: ANEEL. Acessível em: <https://www.aneel.gov.br/audiencias-publicas-antigas> [Acesso em 11 Novembro 2019].
- PRODIST – Procedimentos de Distribuição. (2018). *Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica (Revisão 10)*.
- Raggi, L. (2018). *Aplicações de estimação de estados em sistemas de distribuição de energia elétrica com medidores inteligentes*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas.
- WEG (2019). *Manual do usuário: SMW – Smart Meter WEG*. [online] Acessível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h95/hb2/WEG-smart-meter-SMW-10004264978-manual-do-usuario-pt.pdf>.