

Estimação de parâmetros de linhas de transmissão: uma abordagem utilizando medições fasoriais e representação em quadripolos

Vinícius Curcio de Moraes
Departamento de Energia
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil
vinicius.curcio@engenharia.ufjf.br

Leticia Lacerda Santos de Sousa
Departamento de Energia
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil
leticia.lacerda@engenharia.ufjf.br

Igor Delgado de Melo
Departamento de Energia
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil
igor.delgado2008@engenharia.ufjf.br

Carlos Augusto Duque
Departamento de Circuitos
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil
carlos.duque@engenharia.ufjf.br

Matheus Alberto de Souza
Departamento de Energia
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil
matheus.alberto@engenharia.ufjf.br

Braulio César de Oliveira
Depto de Engenharia Elétrica - POLI/COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, Brasil
braulio.oliveira@poli.ufjf.br

Resumo—A estimação de parâmetros de linhas de transmissão representa uma questão importante para os estudos de operação e planejamento de sistemas elétricos de potência. Com o advento da tecnologia dos sincrofasores, novas metodologias foram desenvolvidas com base em medições coletadas nos terminais de uma linha de transmissão utilizando as unidades de medição fasorial denominadas PMUs (*Phasor Measurement Units*). Este artigo apresenta uma nova abordagem baseada na formulação de um problema de otimização para a estimação de parâmetros de linhas de transmissão em que a equação dos mínimos quadrados é usada como uma função objetivo a ser minimizada, sujeita a um conjunto de restrições associadas aos parâmetros de impedância de uma linha de transmissão. A linha de transmissão é modelada a partir de quadripolos com seções PI em série com a inclusão de um modelo intermediário de falta de alta impedância. Como solução do problema de otimização proposto, os parâmetros de impedância de uma determinada linha de alta tensão podem ser estimados com erros reduzidos, bem como a distância referente à falta e a sua impedância. A principal contribuição deste trabalho é a representação de um modelo explícito de linhas de transmissão em um problema de otimização formulado em coordenadas retangulares para determinar parâmetros de linhas aéreas em tempo real com o auxílio de PMUs. Para comprovar a aplicabilidade do método proposto, são realizados testes computacionais e simulações *hardware-in-the-loop* com o RTDS (*Real Time Digital Simulator*).

Palavras chaves—estimação de parâmetros; otimização; simulação; sistemas de potência.

I. INTRODUÇÃO

O conhecimento dos parâmetros de impedância das linhas de transmissão é de fundamental importância para a análise de redes efetuada pelos operadores dos sistemas de potência [1], [2]. A partir dessa informação, todos os algoritmos que permitem avaliar a operação, segurança e estabilidade são executados, fornecendo as condições operativas do sistema e subsidiando tomadas de decisão em tempo real [3].

Apesar de comumente serem considerados invariantes no tempo, os valores de impedância de uma linha de transmissão (LT) se alteram ao longo do tempo devido à diferença de temperatura, pressão e umidade. Além disso, esses valores também sofrem alterações devido à mudança de carregamento, frequência, e estão sujeitos aos efeitos pelicular e efeito Corona [4]. Falhas de alta impedância podem ocorrer devido a eventos intempestivos que podem comprometer a estrutura e geometria dos cabos aéreos, bem como sua operação [5].

O monitoramento dos parâmetros das LTs é essencial para o conhecimento das impedâncias representativas das mesmas, visando aperfeiçoar os modelos utilizados em algoritmos como fluxo de potência e análise de estabilidade [4].

Diversas metodologias foram propostas na literatura para a estimação em tempo real dos parâmetros das linhas [6]. Contudo, com o advento das medições fasoriais sincronizadas por GPS (do inglês *Global Positioning System*), conhecidas pela sigla PMUs (do inglês *Phasor Measurement Units*), metodologias mais eficazes e menos custosas do ponto de vista computacional foram desenvolvidas [7].

Através da alocação de PMUs em ambas as extremidades de uma linha de transmissão (do lado da subestação próximo à geração e na subestação do lado da carga), é possível estimar as variações de seus parâmetros ao longo do tempo [8].

A referência [2] destaca a necessidade de estimação em tempo real dos parâmetros de impedância, comumente vistos como fixos, usando PMUs. Enquanto [9] detecta falhas de alta impedância em estado permanente, [10] utiliza PMUs para análises dinâmicas e detecção de falhas através da técnica de componentes simétricas.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma nova formulação para estimação de parâmetros de linhas de transmissão. A equação de mínimos quadrados é utilizada como função obje-

tivo a ser minimizada no problema de otimização, atendendo a um conjunto de restrições associadas à impedância, com modelagem em coordenadas retangulares a partir da representação em quadripolos e medições em tempo real via PMUs. A solução é obtida pelo método de pontos interiores.

Este artigo é estruturado em quatro seções, incluindo esta introdução. Na segunda seção, a metodologia proposta é detalhada. A terceira seção discute as simulações e os resultados obtidos para validar o método e, na última seção, as conclusões são apresentadas.

II. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PROPOSTO

A. Obtenção das grandezas de sequência positiva

Os fasores de tensão nas fases a, b, c, representados por V_a , V_b , V_c , respectivamente, podem ser medidos em uma determinada subestação do sistema através de PMUs [11]. Baseado nesses valores e utilizando-se a matriz de transformação do teorema de Fortescue, é possível determinar as componentes simétricas de sequência positiva (V_1), negativa (V_2) e zero (V_0) com base em (1), em que o termo α é igual a $1 \angle 120^\circ$ pu.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

A Equação (1) pode ser reescrita em forma compacta, conforme (2):

$$V^{012} = T^{-1} \cdot V^{abc} \quad (2)$$

Observe que, com base na matriz de transformação T^{-1} , é possível determinar os valores correspondentes trifásicos das correntes, bem como das impedâncias dos elementos da rede.

B. Modelo da linha

Considera-se o circuito de sequência positiva de uma linha de transmissão (LT), modelada como uma seção π (PI), conforme apresentado pela Figura 1, em que o parâmetro R corresponde ao valor da resistência, X representa a reatância, Z refere-se à impedância longitudinal do sistema e Y corresponde à admitância *shunt* considerando os terminais k e m de uma determinada linha aérea.

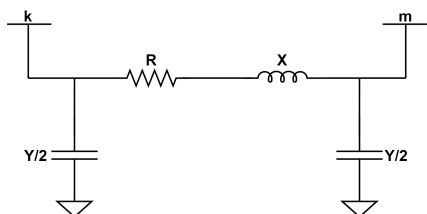


Figura 1. Seção PI para linha de transmissão

Para uma seção PI, as Equações (3) e (4) apresentam o cálculo da impedância longitudinal e admitância *shunt* da linha, respectivamente, em que G é a condutância e S é a susceptância.

$$Z = R + jX \quad (3)$$

$$Y = G + jS \quad (4)$$

Com base na análise em quadripolo, a linha de transmissão pode ser analisada de acordo com a Figura 2, em que os parâmetros de impedância da linha podem ser representados pelas constantes denominadas A , B , C e D . Além disso, as variáveis associadas à extremidade transmissora, responsáveis pela entrada de tensão e corrente são denotadas por V e I respectivamente, e as tensões e correntes correspondentes ao final da linha, conhecida como receptora, são representadas por v e i respectivamente.

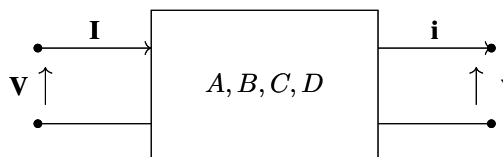


Figura 2. Quadripolo representativo da LT

O modelo de quadripolo da Figura 2, permite correlacionar as tensões e correntes fasoriais nos terminais do elemento modelado, conforme (5) e (6).

$$V = A \cdot v + B \cdot i \quad (5)$$

$$I = C \cdot v + D \cdot i \quad (6)$$

Com base em (5) e (6), o sistema linear (7) é definido.

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ i \end{bmatrix} \quad (7)$$

As constantes generalizadas para uma linha aérea de comprimento médio são definidas por (8) à (11) segundo a referência [12].

$$A = 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \quad (8)$$

$$B = Z \quad (9)$$

$$C = Y \cdot \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{4} \right) \quad (10)$$

$$D = 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \quad (11)$$

As constantes podem ser expressas em forma retangular, onde são decompostas em suas partes real e imaginária, como mostrado em (12) à (15).

$$A = a' + ja'' \quad (12)$$

$$B = b' + jb'' \quad (13)$$

$$C = c' + jc'' \quad (14)$$

$$D = d' + jd'' \quad (15)$$

A Equação (5), apresentada anteriormente, pode ser decomposta em parte real (V_r) e imaginária (V_m) utilizando-se das Equações (12) e (13), resultando em (16) e (17). Por reciprocidade, a Equação (6), pode ser decomposta em (18) e (19). Vale destacar que, na prática, a parte real (r) e a parte imaginária (m) das tensões e correntes de ambos os

lados podem ser medidas por PMUs alocadas em ambas as extremidades da linha de transmissão.

$$V_r = a' \cdot v_r - a'' \cdot v_m + b' \cdot i_r - b'' \cdot i_m \quad (16)$$

$$V_m = a' \cdot v_m + a'' \cdot v_r + b' \cdot i_m + b'' \cdot i_r \quad (17)$$

$$I_r = c' \cdot v_r - c'' \cdot v_m + d' \cdot i_r - d'' \cdot i_m \quad (18)$$

$$I_m = c' \cdot v_m + c'' \cdot v_r + d' \cdot i_m + d'' \cdot i_r \quad (19)$$

Havendo uma falha (falta) em qualquer parte da LT, a mesma análise pode ser estendida e, neste caso, assume-se dois circuitos de seção PI em série com uma admitância intermediária Y_f associada à falta e tem-se a representação em quadripolos mostrada na Figura 3.

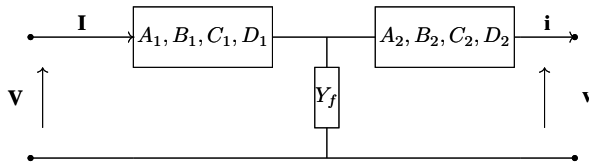


Figura 3. Duas seções PI com Y_f intermediário

Neste cenário, as constantes generalizadas da associação dos quadripolos podem ser determinadas, sendo expressas por (20) à (23) conforme a referência [12], em que os subscritos 1 e 2 estão relacionados às partes da linha de transmissão antes e depois da localização da falta (Y_f), respectivamente.

$$A = A_1 \cdot A_2 + C_1 \cdot B_2 + A_1 \cdot B_2 \cdot Y_f \quad (20)$$

$$B = B_1 \cdot A_2 + D_1 \cdot B_2 + B_1 \cdot B_2 \cdot Y_f \quad (21)$$

$$C = A_1 \cdot C_2 + C_1 \cdot D_2 + A_1 \cdot D_2 \cdot Y_f \quad (22)$$

$$D = B_1 \cdot C_2 + D_1 \cdot D_2 + B_1 \cdot D_2 \cdot Y_f \quad (23)$$

Considerando $Z \gg Y$, uma premissa útil, que é de fato adotada para linhas aéreas de médio porte, algumas simplificações podem ser adotadas e aplicando-se as Leis de Kirchhoff para o circuito representado pela Figura 3 é possível obter as Equações (24) e (25) que determinam os valores das impedâncias Z_1 e Z_2 , que representam o segmento da LT antes e após a localização da falta, respectivamente.

A Equação (26), também é derivada dessa análise e apresenta o valor da admitância de falta Y_f .

$$Z_1 = \frac{A - 1}{Y_f} \quad (24)$$

$$Z_2 = \frac{D - 1}{Y_f} \quad (25)$$

$$Y_f = C \quad (26)$$

Uma vez obtidas as impedâncias de antes e depois da localização da falha, é possível estimar a distância da mesma em relação a ambas extremidades, podendo assim, o local da falha ser determinado pela Equação (27) a partir da proporção entre as impedâncias vistas antes (Z_1) e depois da falha (Z_2).

$$p = \frac{|Z_1|}{|Z_1| + |Z_2|} \cdot 100\% \quad (27)$$

C. Problema de otimização

Assumindo que as PMUs estão instaladas nas duas extremidades das linhas é possível obter fasores de tensão e corrente em tempo real, o método proposto é formulado como um problema de otimização sendo o vetor de variáveis a ser calculado apresentado em (28) o qual é composto por partes real e imaginária das constantes generalizadas do modelo de quadripolo da linha de transmissão.

$$\hat{\mathbf{x}} = [a', a'', b', b'', c', c'', d', d'']^T \quad (28)$$

A função objetivo descrita por (29) está sujeita às restrições de igualdade representadas por (30) à (33).

$$\min J(\hat{\mathbf{x}}) = \sum_{j=1}^N \left[(V_{r_j} - \hat{V}_{r_j})^2 + (V_{m_j} - \hat{V}_{m_j})^2 + (I_{r_j} - \hat{I}_{r_j})^2 + (I_{m_j} - \hat{I}_{m_j})^2 \right] \quad (29)$$

sujeito a:

$$\hat{V}_{r_j} = a' \cdot v_{r_j} - a'' \cdot v_{m_j} + b' \cdot i_{r_j} - b'' \cdot i_{m_j} \quad (30)$$

$$\hat{V}_{m_j} = a' \cdot v_{m_j} + a'' \cdot v_{r_j} + b' \cdot i_{m_j} + b'' \cdot i_{r_j} \quad (31)$$

$$\hat{I}_{r_j} = c' \cdot v_{r_j} - c'' \cdot v_{m_j} + d' \cdot i_{r_j} - d'' \cdot i_{m_j} \quad (32)$$

$$\hat{I}_{m_j} = c' \cdot v_{m_j} + c'' \cdot v_{r_j} + d' \cdot i_{m_j} + d'' \cdot i_{r_j} \quad (33)$$

A função objetivo minimiza a soma da diferença quadrática entre os valores medidos e estimados que são indicados com um acento circunflexo acima da variável ($\hat{\mathbf{x}}$). Considera-se um total de N amostras a serem obtidas pelas PMUs em um pequeno intervalo de tempo para evitar variações expressivas dos parâmetros.

Considerando as medições fornecidas por PMUs com altas taxas de amostragem (tradicionalmente são 2880 amostras por segundo), pode-se considerar um número maior que 60 amostras por segundo a serem obtidas em um centro de controle, por exemplo.

As partes reais e imaginárias correspondentes das tensões e correntes podem ser estimadas pelas Equações (30) à (33). A solução é alcançada iterativamente pelo método de pontos interiores, utilizando a *toolbox fmincon* do *software* MATLAB.

III. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A linha de transmissão, ilustrada na Figura 4, é modelada utilizando o *software* MATLAB para emular o comportamento real da mesma considerando uma carga nominal trifásica de 80,5MW e 40,5Mvar.

SE1 = Subestação de Grendon
SE2 = Subestação de Staythorpe

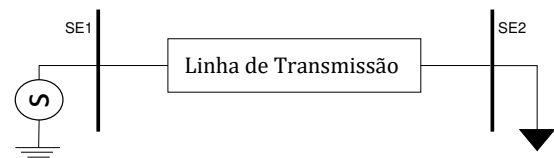


Figura 4. Esquemático da linha de transmissão

Os parâmetros reais de R , X e S , resistência, reatância e susceptância, respectivamente, estão apresentados na Tabela I e são referentes à linha de transmissão de 400kV, localizada em *East Midlands*, Inglaterra, entre as subestações *Grendon* e *Staythorpe* com o comprimento de 102 km de acordo com a referência [13].

Tabela I
PARÂMETROS DA LT

Parâmetros	Valores Reais
$R (\Omega)$	2,96
$X (\Omega)$	32,4
$S (\Omega^{-1})$	$3,69 \cdot 10^{-4}$

Os fasores de tensão e corrente são medidos por PMUs alocadas nas extremidades da linha de transmissão. Essas medidas inicialmente foram obtidas através da modelagem da linha no MATLAB segundo [12].

A. Inclusão de Erro Aleatório

Neste estudo de caso, um número de 50 amostras é utilizado e com o intuito de emular as imperfeições inerentes ao sistema de instrumentação, um erro aleatório de 5% é inserido em cada uma das 50 medições simuladas a partir do modelo desenvolvido no MATLAB, dessa forma, incertezas são inseridas na medição. Os valores reais são comparados com os valores obtidos pelo algoritmo de otimização e são apresentados na Tabela II.

O erro ϵ é obtido através da diferença percentual dos resultados estimados em relação aos parâmetros reais. Ressalta-se que, para este estudo de caso, o método proposto foi executado e os resultados fornecidos foram determinados pela solução do problema de otimização.

Tabela II
VALORES ESTIMADOS PARA ERRO ALEATÓRIO DE 5%

Parâmetros	Valores Reais	Valores Estimados	ϵ (%)
$R (\Omega)$	2,9600	2,9599	$3,40 \cdot 10^{-3}$
$X (\Omega)$	32,4000	32,3998	$6,17 \cdot 10^{-4}$
$S (\Omega^{-1})$	$3,69 \cdot 10^{-4}$	$3,6169 \cdot 10^{-4}$	7,31

Neste cenário, é possível perceber uma ótima aproximação dos parâmetros visto que os erros foram relativamente pequenos. No entanto, o valor estimado para a susceptância tem o erro maior quando comparado aos resultados para a resistência e reatância série da LT. Entretanto, o mesmo é muito menor em comparação aos outros parâmetros.

B. Validação dos Resultados Usando RTDS

Na simulação precedente, adotou-se o modelo matemático para a linha de transmissão conforme proposto por [12]. No entanto, com o intuito de validar a abordagem sugerida, a linha de transmissão foi modelada usando o *software* denominado RSCAD, parte integrante do simulador RTDS (do inglês *Real Time Digital Simulator*).

O simulador RTDS possibilita a análise em tempo real da operação da linha de transmissão, levando em consideração as variações de carga ao decorrer do tempo. Para uma melhor



Figura 5. O hardware do RTDS

compreensão, o RTDS é composto pelo *software* RSCAD e pelo *hardware* alojado em cubículos, ilustrado na Figura 5.

Esquemáticos de sistemas elétricos de potência podem ser modelados no RSCAD a partir de uma vasta biblioteca que contém blocos representativos de linhas, carga, geração, transformadores, medidores e outros equipamentos elétricos [5].

A simulação não é executada diretamente no computador. Essa é efetuada pelo *hardware* do RTDS o qual possui, em cada cubículo, placas e dispositivos que permitem a simulação em tempo real de sistemas de potência [14]. Os resultados podem ser acompanhados pelo usuário através de seu computador, permitindo monitorar variações dinâmicas de sinais elétricos a partir de simulações de variações de carga, aplicação de curtos circuitos e chaveamento de dispositivos de controle. Essa ferramenta permite verificação de simulação HIL (*hardware-in-the-loop*) consistindo em um poderoso recurso de simulação que fornece resultados realistas [14].

No RSCAD, a linha foi modelada a partir de seus parâmetros PI concentrado. Nas duas extremidades (subestações do lado da fonte de geração (SE1) e carga (SE2) da Figura 4) uma PMU foi considerada em cada subestação a fim de coletar medições fasoriais em ambos terminais da linha.

Na Figura 6, tem-se o esquemático da linha de transmissão modelada no RSCAD, mostrando geração e carga bem como a possibilidade de simular faltas e acompanhar as amostras dos sinais de tensão e corrente em tempo real.

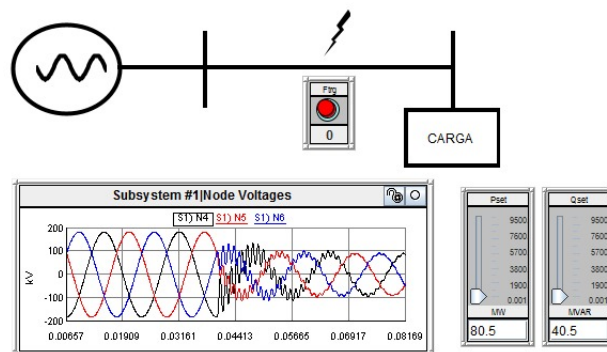


Figura 6. Linha de transmissão no RSCAD

Neste caso, além dos parâmetros da linha, a carga foi modelada a partir dos valores de potência ativa e reativa nominais. Dessa forma, introduziu-se variações de carga ao longo do tempo a fim de permitir coletar várias amostras de tensões e correntes fasoriais ao longo de um curto intervalo de tempo. A partir das variações de carga, várias amostras de magnitudes e ângulos foram obtidas pelas PMUs.

Para essas simulações, um *firmware* que simula o comportamento real de uma PMU foi utilizado durante as simulações no RTDS, sendo representado na Figura 7. Neste caso, as PMUs fornecem fasores de tensão e corrente a partir de sincronismo garantido por GPS. O sincronismo é garantido nas simulações efetuadas pelo RTDS pois no *hardware* é instalado uma placa que permite sincronizar medições através de um receptor GPS dando mais veracidade às simulações segundo [14].

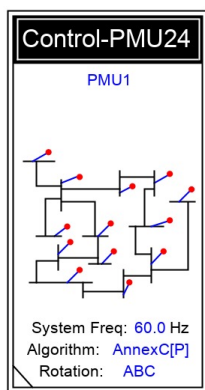


Figura 7. O *firmware* da PMU

Os dados amostrais obtidos pela simulação no RTDS foram utilizados como entrada para a metodologia proposta a ser executada a partir das medições. Ao todo, um total de 20 amostras foram obtidas modificando os valores da carga (potências ativas e reativas) em relação ao seu valor nominal. Neste estudo de caso, a resposta do algoritmo é apresentada na Tabela III comparativamente ao valor real.

Tabela III
VALORES ESTIMADOS A PARTIR DA MEDIÇÕES DAS PMUS

Parâmetros	Valores Reais	Valores Estimados	ϵ (%)
R (Ω)	2,9600	2,3242	21,48
X (Ω)	32,4000	32,3585	0,13
S (Ω^{-1})	$3,69 \cdot 10^{-4}$	$3,6361 \cdot 10^{-4}$	1,46

Ao analisar os dados obtidos da Tabela III é possível perceber que houve uma boa aproximação dos valores reais. Entretanto, ao comparar as respostas com o estudo de caso da subseção A, os erros das estimativas dos parâmetros de impedância série aumentaram e os da susceptância diminuíu. Ressalta-se que, na subseção A, as 50 amostras de medições foram geradas com um erro de 5% para a estimação dos parâmetros no MATLAB. Diferente do caso B, em que a carga foi variada em 20 vezes no RTDS e consequentemente gerou-se 20 amostras, das quais foram inseridas como informações de entrada no MATLAB para a estimação dos parâmetros. No entanto, em ambos os casos a metodologia proposta foi capaz de estimar os parâmetros de linha corretamente.

C. Análise de sensibilidade

Percebe-se que, devido aos erros aleatórios associados às medições fasoriais, cada vez que o método de otimização é resolvido, uma resposta ligeiramente diferente é obtida sendo importante analisar a resposta do método proposto não apenas a partir de uma única execução, mas utilizando uma abordagem estocástica em que o problema de otimização será executado diversas vezes a fim de se avaliar estatisticamente os resultados de estimação através do erro médio e desvio padrão respectivo, a fim de mostrar a assertividade do método. Neste viés, 100 simulações foram conduzidas a fim de se avaliar a resposta da estimação considerando os erros aleatórios.

O erro médio (ϵ_m) das 100 simulações executadas é apresentado na Tabela IV bem como o desvio padrão (σ) do erro associado aos dados obtidos.

Tabela IV
VALORES MÉDIOS ESTIMADOS PARA ERRO ALEATÓRIO DE 5%

Parâmetros	Valores Reais	Valores Estimados	ϵ_m (%)	σ
R (Ω)	2,9600	2,9599	$3,40 \cdot 10^{-3}$	$4,57 \cdot 10^{-19}$
X (Ω)	32,4000	32,3998	$6,17 \cdot 10^{-4}$	0
S (Ω^{-1})	$3,69 \cdot 10^{-4}$	$4,20 \cdot 10^{-4}$	13,82	3,88

A partir da Tabela IV, nota-se que os valores estimados de resistência e reatância são próximos dos valores reais e estão associados a reduzidos erros de estimação e o desvio padrão indica que os erros que relacionam os valores reais dos estimados são uniformes em relação ao conjunto, uma vez que os valores de σ são baixos, indicando que há uma pequena dispersão entre os erros encontrados pela metodologia denotando sua assertividade sob o ponto de vista estatístico.

A Figura 8 mostra o histograma da susceptância estimada, em que pode ser notada a dispersão dos valores estimados. Escolheu-se este parâmetro pois o mesmo é o menor de todos em termos do valor da grandeza. Portanto, sua estimação fica mais sujeita aos erros aleatórios dos medidores, resultando em erros de estimação expressivos. Note que, a cada vez que o método de otimização é executado, uma resposta diferente é obtida em função dos erros aleatórios inseridos na instrumentação. Entretanto, percebe-se uma tendência de seguir um valor médio esperado. Dessa forma é possível identificar o valor médio na distribuição dos dados, o qual foi apresentado na Tabela IV.

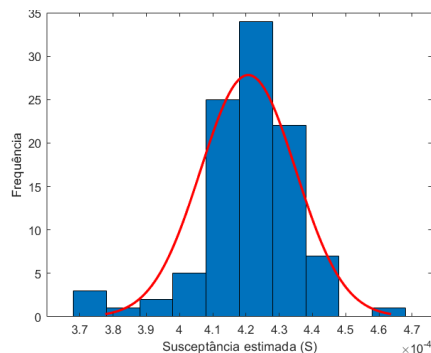


Figura 8. Histograma da susceptância estimada

D. Estimação da Impedância de Falta

Conforme apresentado na metodologia proposta, considerando dois circuitos de seção PI em série com uma impedância de falta intermediária, os valores de impedância de cada lado da linha de transmissão, sendo designados por Z_1 e Z_2 , podem ser estimados bem como o valor da admitância de falta. A partir desses valores, a distância da ocorrência de defeito também pode ser estimada conforme explicado na segunda seção deste artigo.

Atribuindo o valor para a admitância de falta ($Y_f = 2\Omega^{-1}$), e definindo a localização (p) da falta à 80% do comprimento da linha de transmissão, o método proposto será executado a fim de testar sua capacidade em estimar não apenas os parâmetros da linha mas também o da falta.

O algoritmo foi implementado levando em consideração os dados preliminarmente apresentados, utilizando-se de 100 amostras com erro aleatório associado às medições de 5% e os resultados da solução do problema de otimização são exibidos na Tabela V.

Tabela V
ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS E DA LOCALIZAÇÃO DA FALTA

Parâmetros	Valores Reais	Valores Estimados	$\epsilon(\%)$
R1 (Ω)	2,3680	2,3883	$8,58 \cdot 10^{-1}$
X1 (Ω)	25,9200	26,0243	$4,02 \cdot 10^{-1}$
R2 (Ω)	0,5920	0,5866	$9,15 \cdot 10^{-1}$
X2 (Ω)	6,4800	6,4832	$4,91 \cdot 10^{-2}$
Y_f (Ω^{-1})	2,0000	1,9914	$4,92 \cdot 10^{-1}$
p (%)	80,0000	80,2824	$3,53 \cdot 10^{-1}$

Pode-se observar uma excelente acurácia para estimação dos parâmetros da linha de transmissão quando é considerada uma falta no sistema. O valor estimado encontrado foi muito próximo ao valor real. Portanto, a localização e admitância associada à falta foram estimadas satisfatoriamente.

IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma nova abordagem para a estimação de parâmetros de impedância em linhas de transmissão. Na metodologia proposta, os parâmetros da linha foram modelados pela sua representação em quadripolos sendo as equações expressas em coordenadas retangulares. Os parâmetros são calculados a partir da solução de um problema de otimização que minimiza os erros quadráticos entre valores medidos e estimados. Restrições de igualdade e desigualdade são incorporadas a fim de fornecer um modelo realista da operação da linha de transmissão correlacionando tensões e correntes em ambas as extremidades da linha.

As medições fasoriais são obtidas através de PMUs, estando sujeitas à erros aleatórios associados à instrumentação. Seus impactos na estimação dos parâmetros são avaliadas através de análises estatísticas e testes de sensibilidade.

Não apenas os parâmetros da linha podem ser estimados satisfatoriamente como também a impedância e localização de faltas, considerando modelos apropriados.

A maior contribuição deste trabalho é a nova abordagem baseada em otimização para estimar os parâmetros de impedância da linha de transmissão considerando medições fasoriais obtidas por PMUs em coordenadas retangulares.

Os resultados são validados por simulações *hardware-in-the-loop* usando o RTDS e um *firmware* que emula a medição de uma PMU sincronizada por GPS de forma realística.

O tempo computacional associado à metodologia é muito baixo sendo menor que um minuto em todas as simulações conduzidas permitindo seu uso em tempo real e aplicabilidade em centros de controle.

Trabalhos futuros envolvem a estimação de faltas assimétricas, uso de outras técnicas de otimização e uso de PMUs comerciais junto ao RTDS.

AGRADECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer à UFJF, CAPES, CNPq e INERGE pelo apoio a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Dashtdar, A. Hussain, H. Z. Al Garni, A. A. Mas' ud, W. Haider, K. M. AboRas, and H. Kotb, "Fault location in distribution network by solving the optimization problem based on power system status estimation using the pmu," *Machines*, vol. 11, no. 1, p. 109, 2023.
- [2] J.-W. Chang, G.-S. Lee, and S. Oh, "Bus impedance matrix estimation using non-pmu measurements," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 2, pp. 1743–1746, 2023.
- [3] R. S. Singh, H. van den Brom, S. Babaev, S. Cobben, and V. Čuk, "Estimation of impedance and susceptance parameters of a 3-phase cable system using pmu data," *Energies*, vol. 12, no. 23, p. 4573, 2019.
- [4] V. Milojević, S. Čalića, G. Rietveld, M. V. Aćanski, and D. Colangelo, "Utilization of pmu measurements for three-phase line parameter estimation in power systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, no. 10, pp. 2453–2462, 2018.
- [5] J. L. Pereira, I. D. Melo, B. C. de Oliveira, A. M. Variz, M. P. Antunes, M. A. de Souza, J. S. Mingorça, É. L. Junior, A. D. Fávoro, and L. F. Passos, "Análise do impacto da qualidade de energia na operação de relés de proteção utilizando simulações digitais em tempo real," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [6] D. Shi, D. J. Tylavsky, K. M. Koellner, N. Logic, and D. E. Wheeler, "Transmission line parameter identification using pmu measurements," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 21, no. 4, pp. 1574–1588, 2011.
- [7] P. K. Mansani, A. Pal, M. Rhodes, and B. Keel, "Estimation of transmission line sequence impedances using real pmu data," in *2018 North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1–6, IEEE, 2018.
- [8] A. G. Phadke and T. Bi, "Phasor measurement units, wams, and their applications in protection and control of power systems," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 619–629, 2018.
- [9] G. Paramo, A. Bretas, and S. Meyn, "High-impedance non-linear fault detection via eigenvalue analysis with low pmu sampling rates," in *2023 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, pp. 1–5, IEEE, 2023.
- [10] M. Q. Khan, M. M. Ahmed, and A. M. Haidar, "An accurate algorithm of pmu-based wide area measurements for fault detection using positive-sequence voltage and unwrapped dynamic angles," *Measurement*, vol. 192, p. 110906, 2022.
- [11] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized phasor measurements and their applications*, vol. 1. Springer, 2008.
- [12] R. D. Fuchs, "Transmissão de energia elétrica: Linhas aéreas (vol. 1)," *Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora*, 1977.
- [13] U. Nat. Grid, Warwick, "National grid plc, electricity ten year statement, uk electricity transmission." Appendix B—System Data, 2014.
- [14] M. P. Antunes, I. D. de Melo, J. L. R. Pereira, M. A. de Souza, and N. de Lima Silva, "Voltage sag detection methods based on synchronized phasor measurements using rtds," in *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 180–185, IEEE, 2017.