



Artigo

Determinação de Erros Máximos Contidos em Parâmetros Elétricos de Linhas de Transmissão Estimados a Partir de Medidas de Tensão e Corrente

Nikolas I. F. de Oliveira ^[1], Cleydson A. de C. Nascimento ^[2], Iggor B. da Silva ^[3], Melinda C. S. da Cruz ^[4]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; nikolas.oliveira@ufersa.edu.br

^[2] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará; cleydson.adller@ifce.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; iggor.silva@ufersa.edu.br

^[4] Universidade Federal Rural do Semi-Árido ; melinda@ufersa.edu.br

Recebido: 20/11/2020;

Aceito: 17/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: Esse artigo apresenta uma análise estatística para determinar os erros máximos contidos na estimação dos parâmetros de linhas de transmissão obtidos a partir de medidas de tensão e corrente. As tensões e correntes nos sistemas elétricos são medidas por transformadores de instrumentos, que podem inserir erros nas medições a partir de sua classe de exatidão. Portanto, o objetivo desse trabalho é utilizar a teoria da propagação de erros para determinar os limites dos erros dos parâmetros elétricos das linhas de transmissão, com 95% de probabilidade de sucesso. Para obter os resultados, uma linha de transmissão foi simulada usando o software ATPDraw® e um algoritmo foi desenvolvido para estimação de parâmetros e determinação dos erros máximos.

Palavras-chave: Estimação de parâmetros; Linha de transmissão; Teoria de propagação de erros.

Abstract: This article presents a statistical analysis that was performed to determine the maximum errors contained in transmission line parameters estimated from voltage and current measurements. The voltages and currents in an electrical system are measured by instrument transformers, which can insert errors in measured quantities from their accuracy class. Thus, the objective of this work is use theory of errors propagation to determine the limits of error of line parameters, with 95% of success probability. In order to obtain the results, a transmission line was simulated using the software ATPDraw® and an algorithm was developed to parameter estimation and determination of maximum erros.

Key-words: Parameter estimation; Transmission line; Theory of erros propagation.

1. INTRODUÇÃO

UM sistema elétrico de potência pode ser dividido em três segmentos: geração, transmissão e distribuição. O transporte de energia entre a geração e os centros de consumo é feito por linhas de transmissão (LTs), que são cabos condutores que operam em elevados níveis de tensão.

Com o contínuo crescimento da demanda de eletricidade, se torna necessário intensificar os estudos e a implementação de novas tecnologias relacionadas às linhas de transmissão, com o intuito de melhorar a capacidade de transporte e a confiabilidade na condução de grandes blocos de potência, bem como auxiliar operadores do sistema elétrico na tomada de decisões [1].

Uma das áreas de estudo em linhas de transmissão é a estimação dos parâmetros elétricos (resistência, reatância e susceptância *shunt*) que a caracterizam. A obtenção correta desses valores é importante, pois estes são usados em diversas aplicações, como por exemplo, na localização de faltas na rede, correta parametrização do sistema de proteção, conhecimento das características de propagação na linha, entre outros [2]

Uma série de fatores influenciam no cálculo convencional dos parâmetros elétricos longitudinais e transversais de uma linha de transmissão (LT), inserindo erros nesses dados como: condições atmosféricas

diárias (temperatura, umidade, etc.), e condições geográficas do local onde a linha de transmissão está inserida (relevos, tipo e rugosidade do solo, etc.) [3].

As metodologias de estimação de parâmetros que dependem de medidas de tensão e corrente, apesar de não serem sensíveis a fatores como erro humano, condições climáticas e localização da torre de transmissão, podem indicar parâmetros imprecisos, se as medidas de entrada forem imprecisas [2]. Assim, o objetivo deste trabalho é estabelecer o erro máximo, ou limite de erro, associado aos parâmetros elétricos de linhas de transmissão, calculados a partir de tensões e de correntes que podem conter erros originados da classe de exatidão de transformadores de potencial e transformadores de corrente.

O trabalho é dividido em duas etapas. A primeira consiste em calcular valores de parâmetros, a partir de um algoritmo de estimação baseado em fasores pré-falta. A segunda etapa consiste em determinar as variâncias ou limites de erro de cada parâmetro, usando a teoria de propagação de incertezas, a fim de estabelecer o erro máximo contido em cada estimativa. A partir do erro máximo obtido, pode-se concluir se a medida é confiável ou não para ser usada nas mais diversas aplicações que fazem uso desse dado.

Para obtenção dos resultados, usou-se o software *ATPDraw*® para simulação de uma linha de transmissão, e foram implementados algoritmos para estimação de parâmetros e determinação dos erros máximos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Teoria de Erros

O objetivo da maioria dos experimentos na ciência física é combinar diferentes variáveis em uma única quantidade. O erro no valor combinado é uma função dos erros constituintes. Como a soma de probabilidades não é linear, simplesmente somar os erros dos termos constituintes fornece uma superestimativa para o erro da variável combinada [4].

Todo processo experimental que envolve medição de grandezas está susceptível a introdução de erros na obtenção dos valores, pois nem sempre o valor medido é o valor verdadeiro dessa grandeza. O objetivo durante uma medição é garantir que os erros sejam os menores possíveis de forma a obter uma estimativa confiável de sua dimensão.

Existem dois tipos de erros que podem estar presentes em um mesmo processo de medição: erro aleatório e erro sistemático.

Os erros aleatórios (ou estatísticos), conforme [5] são aqueles que resultam em variações aleatórias nos resultados obtidos, causados por fatores que não podem ser controlados dentro de um processo de medição. Para [5], é possível observar o aparecimento das incertezas aleatórias com a repetição das medições.

A maioria dos experimentos físicos se preocupa em reduzir os erros aleatórios. A característica marcante de erros aleatórios em um experimento é que repetidas medições são dispersadas dentro de uma escala. Quanto menor a incerteza aleatória, menor será a dispersão dos dados dentro dessa escala, e conseqüentemente, mais precisas se tornam as medições [4]. Uma fonte comum de erros aleatórios são pequenos erros de julgamento feito pelo observador (quando interpolando); pequenos distúrbios nos aparelhos (como vibrações mecânicas); problemas de definição; entre outros [6].

Os erros sistemáticos, segundo [5], são a diferença entre o valor obtido através da medição e o valor real, sendo o erro repetido a cada nova medição, ou seja, leva o resultado sempre para a mesma direção. A causa mais óbvia de erros sistemáticos são instrumentos mal calibrados, como um relógio que gira mais lentamente, uma régua que esticou ou um medidor incorretamente zerado [6].

Ao contrário dos erros aleatórios, não existe uma técnica de estatística padrão para qualificar os erros sistemáticos. Depende do experimentador elaborar outros conjuntos de medidas que possam fornecer algum conhecimento da origem das discrepâncias sistemáticas [4].

Após um processo de medição, é necessário quantificar o grau de incertezas nos valores obtidos. Para isso, existem diversos parâmetros estatísticos que podem ser encontrados para auxiliar na determinação do grau de incertezas, como variância, desvio padrão e limite de erro. Esse último, é definido por [6] como sendo o intervalo de t-desvios padrão do valor real que forneça a probabilidade que uma medição de valor x pertença a esse intervalo, onde t é qualquer número real. Por exemplo, a probabilidade que um valor medido esteja dentro de um intervalo de desvio padrão com valor σ é 68%. A Figura 1 mostra o gráfico da probabilidade versus t , para obter a probabilidade de um dado se encontrar em um determinado intervalo dependendo do limite de confiança de qualquer conjunto de medidas que possua uma distribuição do tipo Gaussiana.

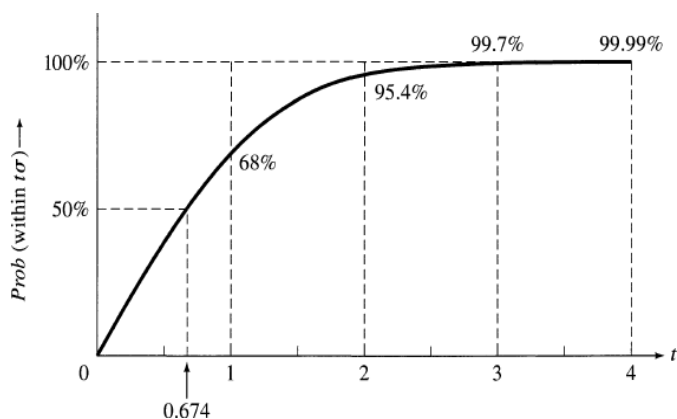


FIGURA 1. Probabilidade em função do limite de confiança.

2.2. Teoria da Propagação de Erros

Pseudomedida é uma grandeza cujo valor pode ser obtido através da combinação dos valores medidos de duas ou mais grandezas.

A Teoria da propagação de erros (ou incertezas), bastante utilizada na análise de pseudomedidas, segundo [5] tem como objetivo determinar o melhor valor possível para a grandeza a partir das medições, determinando a diferença entre o melhor valor obtido e o valor real. As regras para a propagação de erros se referem a uma situação em que são encontradas quantidades, x, \dots, z com incertezas $\sigma_x, \dots, \sigma_z$ e então se utiliza esses valores para calcular uma certa quantidade q . As incertezas em x, \dots, z se propagam através dos cálculos e causam uma incerteza em q [6]. A Equação 1 mostra como obter a variância de uma grandeza cuja função depende de múltiplas variáveis.

$$\sigma_q^2 = \left(\frac{\partial q}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 \quad (1)$$

Onde σ_q^2 é a variância da grandeza q , σ_x^2 e σ_z^2 a variância das grandezas x e z , respectivamente.

Nos estudos de estatística e confiabilidade é comum utilizar o limite de confiança como sendo 2σ , como utilizado por [7], pois de acordo com a Figura 1, possibilita um grau de confiabilidade de 95,4%. Assim, o limite de confiança em função da classe de exatidão de instrumento de medição e do valor médio de suas medidas realizadas é dado pela Equação 2, como mostrado por [6].

$$L_r = \left(\frac{\text{classe de exatidão}}{100}\right) \times V_{\text{médio}} \quad (2)$$

As variâncias das grandezas independentes podem ser expressas como uma função dependente da classe de exatidão dos instrumentos de medição. A Equação 3 é obtida ao adotar o limite de confiança como sendo 2σ e assumindo que o valor médio fornecido pelos instrumentos é o próprio valor por eles medido.

$$\sigma_r^2 = \left(\frac{\text{classe de exatidão}}{200}\right)^2 \times V_{\text{medido}}^2 \quad (3)$$

2.3. Transformadores de Medidas

Para a realização de qualquer tipo de medição são necessários instrumentos adequados para medir essas grandezas. Em um sistema elétrico de potência, devido à presença de altos níveis de tensão e corrente, se torna necessário a utilização de transformadores capazes de reduzir o nível dessas grandezas. Para isso, utiliza-se os transformadores de medidas, definido por [8] como equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionar adequadamente sem a necessidade de trabalhar na corrente que flui pela carga ou estar conectado à tensão nominal do sistema.

Para um sistema elétrico, utiliza-se o transformador de corrente (TC) e o transformador de potencial (TP) como transformadores de medidas.

Os transformadores de corrente, na sua forma mais simples, possuem um primário, geralmente de poucas espiras, e um secundário, no qual a corrente nominal transformada é, na maioria dos casos, igual a 5 A. Dessa

forma, os instrumentos de medição e proteção são dimensionados em tamanhos reduzidos devido aos baixos valores de correntes secundárias para os quais são projetados. Os TCs transformam, por meio do fenômeno de conversão eletromagnética, correntes elevadas, que circulam no seu primário, em pequenas correntes secundárias, segundo uma relação de transformação [8].

Os erros presentes nos transformadores de corrente podem ser de duas naturezas: erro de relação de transformação que é o erro na leitura da corrente secundária medida com um TC, que não corresponde exatamente ao produto da corrente primária pela relação de transformação nominal; e erro de ângulo de fase que é o ângulo que mede a defasagem entre a corrente vetorial primária e o inverso da corrente vetorial secundária. Os TCs possuem classe de exatidão, que englobam os dois tipos de erros, sendo especificados dependendo da aplicação. De acordo com [8], para medição podem ser utilizados os TCs com precisão de 0,3%; 0,6% ou 1,2%. Para utilização em sistemas de proteção, podem ser empregados os TCs com classe de exatidão de 2,5%; 5% ou 10%.

O transformador de potencial (TP) é definido por [9] como um transformador especial com o objetivo de fornecer o sinal de tensão a instrumentos de medição, controle e proteção. Ainda segundo o mesmo, a tensão no secundário do TP, geralmente normalizada em 115 volts, deve ser uma réplica da tensão do sistema elétrico conectada ao primário do TP.

Os TPs devem ser capazes de reproduzir em seu secundário a tensão no primário com o menor erro possível. Porém, assim como nos TCs, erros estão presentes nesse processo e podem ser classificados como erro de relação de transformação que é originado na medição de tensão com o TP, na qual a tensão registrada no secundário não corresponde ao produto da tensão do primário pela relação de transformação de potencial nominal; e erro do ângulo de fase que é obtido a partir do ângulo que mede a defasagem angular entre a tensão vetorial no primário e a tensão vetorial no secundário de um TP. Segundo [8], os TPs podem apresentar classe de exatidão de 0,1%; 0,3%; 0,6% e 1,2%, que englobam os dois tipos de erros presentes nos TPs. A classe de exatidão de 0,1% é utilizada para calibração de equipamentos em laboratório. TPs com classe de exatidão de 0,3% são indicados para medição de grandezas para fins de faturamento. Com precisão de 0,6%, os TPs são úteis para medições de grandezas sem fins de faturamento. Já os transformadores de potencial com precisão de 1,2% são utilizados em sistemas de proteção.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção detalha as etapas que foram seguidas para elaborar os algoritmo de determinação de erros máximos de parâmetros, proposto nesse trabalho.

3.1. Obtenção das equações para determinação dos parâmetros elétricos de linhas de transmissão

Para o cálculo dos parâmetros elétricos longitudinais e transversais de uma linha de transmissão, Resistência (R), Reatância (X), Condutância (G) e Susceptância (B), utiliza-se equações que relacionam esses parâmetros com os valores de tensão e corrente nos terminais da linha. Assim, a partir da linha de transmissão da Figura 2, será possível obter as equações usadas para calcular os parâmetros elétricos da LT.

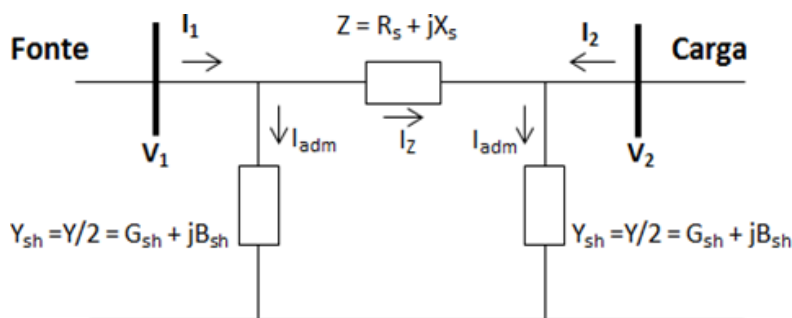


FIGURA 2. Representação do circuito π da linha de transmissão analisada.

3.1.1. Equação da admitância *shunt*

Para o cálculo da admitância *shunt*, utiliza-se as Leis de Kirchhoff para obter as relações de corrente no circuito da linha de transmissão apresentado na Figura 2. Assim, as Equações 4 e 5, mostram a corrente I_Z em função das outras correntes no circuito.

$$I_Z = I_1 - I_{adm} \quad (4)$$

$$I_Z = I_{adm} - I_2 \quad (5)$$

A corrente I_{adm} pode ser calculada, em cada ramo, através das Equações 6 e 7.

$$I_{adm} = V_1 * \frac{Y}{2} \quad (6)$$

$$I_{adm} = V_2 * \frac{Y}{2} \quad (7)$$

Assim, igualando as Equações 4 e 5 e substituindo as equações que representam as correntes de admitância, é possível obter o valor total da admitância *shunt* em função das medidas nos terminais da linha através da Equação 8.

$$Y = 2 * \left(\frac{I_1 + I_2}{V_1 + V_2} \right) \quad (8)$$

Por se tratar de fasores, a Equação 8 pode ser expressa utilizando a forma fasorial para explicitar que a admitância é uma função também dependente dos ângulos das grandezas dos terminais da linha. A Equação 9 apresenta a admitância *shunt* na forma fasorial.

$$Y = 2 * \left(\frac{I_1 e^{j\theta_{I1}} + I_2 e^{j\theta_{I2}}}{V_1 e^{j\theta_{V1}} + V_2 e^{j\theta_{V2}}} \right) \quad (9)$$

A Equação 9 é da forma complexa, ou seja, é composta por uma parte real e uma parcela imaginária. Utilizando das devidas ferramentas algébricas, é possível expandir essa equação de modo que seja possível obter a Equação 10, que se refere a parte real da admitância Y e representa a condutância da linha. Enquanto a Equação 11 é a parte imaginária de Y , representando a susceptância *shunt* da linha de transmissão.

$$G_{sh} = \frac{2[V_1 I_1 \cos(\theta_{I1} - \theta_{V1}) + V_2 I_1 \cos(\theta_{I1} - \theta_{V2})] + 2[V_1 I_2 \cos(\theta_{I2} - \theta_{V1}) + V_2 I_2 \cos(\theta_{I2} - \theta_{V2})]}{V_1^2 + 2V_1 V_2 \cos(\theta_{V1} - \theta_{V2}) + V_2^2} \quad (10)$$

$$B_{sh} = \frac{2[V_1 I_1 \sin(\theta_{I1} - \theta_{V1}) + V_2 I_1 \sin(\theta_{I1} - \theta_{V2})] + 2[V_1 I_2 \sin(\theta_{I2} - \theta_{V1}) + V_2 I_2 \sin(\theta_{I2} - \theta_{V2})]}{V_1^2 + 2V_1 V_2 \cos(\theta_{V1} - \theta_{V2}) + V_2^2} \quad (11)$$

3.1.1. Equação da impedância série

Para obter a expressão que representa a impedância da linha de transmissão, é preciso novamente analisar o circuito da Figura 2. Aplicando as leis de Kirchhoff, é possível obter as Equações 12 e 13 que fornecem a corrente que percorre a impedância.

$$I_Z = \frac{V_1 - V_2}{Z} \quad (12)$$

$$I_Z = V_2 * \frac{Y}{2} - I_2 \quad (13)$$

Substituindo a Equação 8 na Equação 13 e igualando o resultado com a Equação 12, é possível obter a expressão que permite encontrar o valor da impedância série, sendo apresentada através da Equação 14.

$$Z = \frac{(V_1)^2 - (V_2)^2}{V_2 I_1 - V_1 I_2} \quad (14)$$

Por se tratar de fasores, a Equação 14 é dependente dos módulos e dos ângulos das tensões e correntes em ambos terminais. Por isso, a Equação 15 apresenta a impedância série na forma fasorial.

$$Z = \frac{(V_1 e^{j\theta_{V1}})^2 - (V_2 e^{j\theta_{V2}})^2}{V_2 e^{j\theta_{V2}} I_1 e^{j\theta_{I1}} - V_1 e^{j\theta_{V1}} I_2 e^{j\theta_{I2}}} \quad (15)$$

Analisando a Equação 15, percebe-se que, assim como a equação da admitância, se trata de uma equação complexa, possuindo uma parte real e uma parte imaginária. Portanto, utilizando as devidas manipulações

algébricas é possível extrair duas expressões. A parte real da impedância série Z , que corresponde a resistência série da linha de transmissão, pode ser obtida pela Equação 16. Já a parte imaginária corresponde à reatância indutiva série da linha de transmissão, pode ser calculada através da Equação 17.

$$R_S = \left(\frac{V_1^2 V_2 V_1 \cos(2\theta_{V1} - \theta_{V2} - \theta_{I1}) - V_1^3 I_2 \cos(\theta_{V1} - \theta_{I2})}{(V_2 I_2)^2 - 2V_1 V_2 I_1 I_2 \cos(\theta_{V2} + \theta_{I1} - \theta_{V1} - \theta_{I2}) + (V_1 I_2)^2} \right) + \left(\frac{V_2^2 V_1 I_2 \cos(2\theta_{V2} - \theta_{V1} - \theta_{I2}) - V_2^3 I_1 \cos(\theta_{V2} - \theta_{I1})}{(V_2 I_2)^2 - 2V_1 V_2 I_1 I_2 \cos(\theta_{V2} + \theta_{I1} - \theta_{V1} - \theta_{I2}) + (V_1 I_2)^2} \right) \quad (16)$$

$$X_S = \left(\frac{V_1^2 V_2 V_1 \sin(2\theta_{V1} - \theta_{V2} - \theta_{I1}) - V_1^3 I_2 \sin(\theta_{V1} - \theta_{I2})}{(V_2 I_2)^2 - 2V_1 V_2 I_1 I_2 \cos(\theta_{V2} + \theta_{I1} - \theta_{V1} - \theta_{I2}) + (V_1 I_2)^2} \right) + \left(\frac{V_2^2 V_1 I_2 \sin(2\theta_{V2} - \theta_{V1} - \theta_{I2}) - V_2^3 I_1 \sin(\theta_{V2} - \theta_{I1})}{(V_2 I_2)^2 - 2V_1 V_2 I_1 I_2 \cos(\theta_{V2} + \theta_{I1} - \theta_{V1} - \theta_{I2}) + (V_1 I_2)^2} \right) \quad (17)$$

3.2. Simulação da linha de transmissão

O estudo proposto neste trabalho foi realizado considerando uma linha de transmissão que opera com 230 kV em regime permanente, e que possui 180 km de comprimento, inserida em um sistema elétrico semelhante ao da Figura 3.

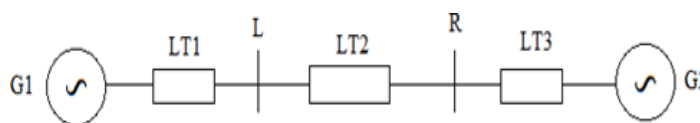


Figura 3. Sistema elétrico analisado.

Nesse sistema, analisa-se a linha de transmissão LT2 para determinação de seus parâmetros elétricos com base nas medidas de tensão e corrente nas barras L e R. Os geradores e as demais linhas de transmissão a montante e a jusante de LT2, representam um equivalente de Thevenin do restante do sistema.

Com intuito de verificar o comportamento do sistema elétrico em condições normais de operação em regime permanente e obter os fasores de tensão e corrente nas barras L e R, faz-se necessário simular o sistema utilizando o software *ATPDraw*® (*Alternative Transient Program*), no qual foram utilizados, como parâmetros das linhas de transmissão, dados típicos de uma linha da Eletrosul [10] conforme a Tabela 1.

TABELA 1. Dados do Sistema elétrico analisado.

<i>G1</i>	<i>LT1, LT2 e LT3</i>		<i>G2</i>
	$R1 = 0,09127 \Omega/\text{km}$	$R0 = 0,44016 \Omega/\text{km}$	
	$X1 = 0,51879 \Omega/\text{km}$	$X0 = 1,5659 \Omega/\text{km}$	
230kV	$C = 8,47 \text{ nF}/\text{km}$	$C0 = 6,10 \text{ nF}/\text{km}$	230kV
60Hz	Comprimento da linha LT1 = 20 km		60Hz
	Comprimento da linha LT2 = 180 km		
	Comprimento da linha LT3 = 20 km		

3.3. Algoritmo de determinação de erros

O algoritmo desenvolvido tem como objetivo a determinação dos erros máximos contidos nos parâmetros elétricos de uma linha de transmissão, considerando que os erros nas medidas foram originados da classe de exatidão dos transformadores de instrumentos (TC e TP) e dos relés registradores.

O algoritmo desenvolvido utilizou-se das equações previamente demonstradas dos parâmetros elétricos de linhas de transmissão em função dos módulos de tensão e corrente em ambos terminais da linha. A partir dos dados de um ciclo dos sinais de tensão e corrente obtidos através do *ATPDraw*®, tornou-se possível a extração dos fasores da componente fundamental desses sinais utilizando a Transformada Discreta de Fourier com uma taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo.

Para realizar o cálculo da variância das grandezas medidas, é necessário introduzir na Equação 3 os erros originados a partir dos transformadores de instrumentos e relés registradores, tanto de relação de transformação, quanto de ângulo de fase, em ambos dispositivos. Assim, o limite do erro para cada fasor é a soma dos limites dos erros introduzidos por cada dispositivo. A Equação 18 apresentada por [7], mostra como obter a variância para os módulos de tensão e corrente.

$$\sigma_{(v,i)}^2 = \left(\frac{c_exat_{(TI)} V_{med(TI)} + c_exat_{(reg)} V_{med(reg)}}{200} \right)^2 \quad (18)$$

Onde $c_exat_{(TI)}$ é a classe de exatidão dada em porcentagem dos transformadores de instrumento e $c_exat_{(reg)}$ é a classe de exatidão dada em porcentagem do relé registrador. O termo $V_{med(TI)}$ é o módulo de tensão ou corrente medido pelo transformador e $V_{med(reg)}$ é o valor de tensão ou corrente registrado pelo relé.

O mesmo procedimento é adotado por [7] para calcular a variância dos ângulos dos fasores de tensão e corrente, ou seja, o limite do erro para os ângulos é a soma dos erros máximos de fase introduzidos pelos transformadores de instrumentos e relés registradores, como mostrado através da Equação 19.

$$\sigma_{(\theta v, \theta i)}^2 = \left(\frac{\varepsilon_{\theta(TI)} + \varepsilon_{\theta(reg)}}{2} \right)^2 \quad (19)$$

Onde $\varepsilon_{\theta(TI)}$ e $\varepsilon_{\theta(reg)}$ são os erros máximos de fase, dado em graus, introduzidos pelos transformadores de instrumentos e relés registradores, respectivamente.

A Tabela 2 resume os valores adotados nesse trabalho para classe de exatidão e erros máximos de ângulo de fase dos dispositivos. Vale salientar que os erros máximos de fase são encontrados a partir da análise dos paralelogramas característicos da classe de exatidão de cada dispositivo medidor, apresentados por [7]. Esses valores foram escolhidos devido serem dados típicos de classe de exatidão de equipamentos utilizados em sistema de proteção.

TABELA 2. Valores adotados para os dispositivos.

<i>Dispositivo</i>	<i>Classe de exatidão</i>	<i>Erro máximo de ângulo de fase</i>
Relé registrador	0,6%	0,52°
TC	10%	8,67°
TP	1,2%	1,04°

Para a aplicação da fórmula genérica da Teoria de Propagação de Erros, expressa através da Equação 1, implementou-se um algoritmo auxiliar com o objetivo de calcular separadamente as variâncias presentes na Equação 1 para todos os parâmetros elétricos da linha de transmissão. Esse algoritmo auxiliar foi desenvolvido principalmente para reduzir o tempo de processamento do algoritmo principal, uma vez que a equação da propagação de erros envolve cálculos complexos de derivadas parciais das expressões dos parâmetros em relação aos módulos e fase dos fasores de tensão e corrente de ambos os terminais da linha.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados iniciais foram obtidos a partir da análise da linha de transmissão trifásica de 230 kV, operando na tensão nominal e em regime permanente, com comprimento de 180 km, com frequência nominal de 60 Hz. A partir das formas de onda de tensão e corrente nos terminais da LT utilizando o *ATPDraw®* e aplicando a metodologia proposta, os parâmetros longitudinais e transversais foram estimados conforme Tabela 3, que também apresenta uma comparação com os valores reais. Vale ressaltar que utilizou-se apenas os fasores de tensão e corrente de uma das fases, uma vez que a LT é equilibrada.

TABELA 3. Valores estimados obtidos.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valores</i>	
	<i>Reais (Ohm)</i>	<i>Estimados (Ohm)</i>
Bsh	5,747E-04	5,774E-04
Rs	16,429	16,128
Xs	93,382	92,584

Considerando os resultados da Tabela 3, percebe-se que a estimativa ficou bem próxima dos valores reais da linha. Porém, sabendo que em um sistema elétrico os dados de tensão e corrente são coletados através de TPs, TCs e relés em cada terminal da linha, deve-se verificar o quanto de erro a classe de exatidão desses dispositivos podem introduzir nos parâmetros da LT. Assim, aplicando as equações para encontrar as variâncias das grandezas medidas e utilizando a equação da Teoria de Propagação de Erros, é possível determinar a variância, e consequentemente o desvio padrão e limite de erro, para quantificar as incertezas presentes na estimação dos parâmetros da linha como é mostrado na Tabela 4. É admitido o limite do erro como 2σ para que os valores médios dos parâmetros elétricos tenham 95,4% de probabilidade de estarem dentro do intervalo de confiança.

TABELA 4. Medidas de dispersão para o TC da classe 10 e TP da classe 1,2.

<i>Parâmetro</i>	<i>Variância (σ^2)</i>	<i>Desvio Padrão (σ)</i>	<i>Limite do erro</i>
Bsh	2,892E-08	1,701E-04	3,401E-04
Rs	99,74	9,987	19,996
Xs	167,22	12,931	25,868

Os resultados da Tabela 4 indicam que o limite do erro obtido possui um valor elevado quando comparado ao valor da grandeza. Ao verificar o limite superior e inferior do intervalo de confiança, que são dados pelo valor da grandeza acrescido do limite do erro e o valor da grandeza subtraído do limite do erro, respectivamente, percebe-se que o intervalo possui uma margem elevada e apresenta inconsistências, como por exemplo, valor negativo para resistência em seu limite inferior. Assim, tendo em vista que o valor estimado de Rs para a referida linha foi de 16,128 ohm, estabelecer um erro máximo de 19,996 ohm (conforme Tabela 4) é inviável, tendo em vista que no estudo realizado, as medidas sequer continham erros.

Com intuito de analisar a sensibilidade das equações utilizadas no processo de estimação dos parâmetros, foram obtidos outros resultados diminuindo a classe de exatidão do TC e mantendo constante a classe de exatidão do TP e relé registrador. Os resultados das grandezas estatísticas para as classes de exatidão do TC de 2,5% e 0,3% são apresentados na Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente. É importante frisar que essas novas classes de exatidão de TCs não são indicadas para aplicação em sistemas de proteção, e está sendo adotada nesse estudo apenas para fins de análise.

TABELA 5. Medidas de dispersão para o TC de classe 2,5 e TP de classe 1,2.

<i>Parâmetro</i>	<i>Variância (σ^2)</i>	<i>Desvio Padrão (σ)</i>	<i>Limite de erro</i>
Bsh	2,490E-09	4,990E-05	9,980E-05
Rs	73,993	8,602	17,204
Xs	155,110	12,454	24,909

TABELA 6. Medidas de dispersão para TC de classe 0,3 e TP de classe 1,2.

<i>Parâmetro</i>	<i>Variância (σ^2)</i>	<i>Desvio Padrão (σ)</i>	<i>Limite de erro</i>
Bsh	2,219E-05	1,490E-05	2,979E-05
Rs	71,783	8,472	16,945
Xs	154,073	12,412	24,825

Nota-se que os valores das medidas de dispersão acompanham a redução na classe de exatidão do TC, havendo uma redução mais acentuada nos valores dos resultados quando houve transição do TC de 10% para o de 2,5%, do que na transição do TC de 2,5% para o de 0,3%.

Também foi analisada apenas a influência da mudança na classe de exatidão do TP com relação aos parâmetros estatísticos que caracterizam as incertezas nos parâmetros da linha. Para isso, a classe do TP foi alterada para 0,3%, enquanto a classe do TC foi mantida no valor inicial de 10%, e não houve qualquer alteração na classe de exatidão do relé. É sabido que a classe de exatidão de 0,3% para TPs não são adequadas para uso em sistemas de proteção, e foi utilizada nesse trabalho apenas para verificar sua influência no equacionamento. A Tabela 7 apresenta os dados obtidos a partir da redução da classe de exatidão do TP.

TABELA 7. Medidas de dispersão para TC de classe 10 e TP de classe 0,3.

<i>Parâmetro</i>	<i>Variância (σ^2)</i>	<i>Desvio Padrão (σ)</i>	<i>Limite de erro</i>
Bsh	2,891E-08	1,700E-04	3,401E-04
Rs	46,053	6,786	13,572
Xs	51,743	7,193	14,386

É possível perceber pelos resultados mostrados na Tabela 7, que diminuir a classe de exatidão do TP provoca uma redução mais acentuada na variância do que diminuir a classe de exatidão do TC. Isso pode ser visto comparando os resultados da Tabela 6 com a Tabela 7.

Apenas de forma hipotética, a Tabela 8 apresenta os resultados obtidos se a classe de exatidão de TC e TP fossem para 0,3%, tendo o relé permanecido em sua classe de exatidão de 0,6%.

TABELA 8. Medidas de dispersão para TC de classe 0,3 e TP de classe 0,3.

<i>Parâmetro</i>	<i>Variância (σ^2)</i>	<i>Desvio Padrão (σ)</i>	<i>Limite de erro</i>
Bsh	2,116E-10	1,049E-05	2,909E-05
Rs	18,098	4,254	8,508
Xs	38,589	6,21	12,424

A Tabela 8 mostra que apesar de o TC e TP estarem com classes de exatidão que inserem baixos erros nas medidas, a variância ainda não fornece um limite de erro que gere um limite de confiança factível.

Linhas de transmissão com outros níveis de tensão foram simuladas com intuito de verificar o desempenho do algoritmo de determinação de erros máximos proposto. Foram duas linhas com dados típicos da Eletrosul [8], uma operando em 138 kV e outra em 500 kV, sendo que ambas apresentaram resultados de medidas de dispersão dos parâmetros elétricos compatíveis com o mesmo perfil dos resultados apresentados para a linha de 230 kV.

Uma outra análise foi realizada para verificar qual parcela da Equação 1 possui maior influência na variância dos parâmetros. Viu-se que as parcelas que envolvem a derivada da equação dos parâmetros em relação às tensões, são as que mais contribuem para o elevado valor das variâncias dos parâmetros elétricos da linha.

5. CONCLUSÃO

Esse estudo buscou verificar os erros máximos contidos nos parâmetros elétricos de linhas de transmissão, baseando-se na teoria de propagação de incertezas, e na modelagem de erros a partir da classe de exatidão de TPs, TCs e relés registradores. A estimação dos parâmetros elétricos de linhas de transmissão se torna importante pois esses dados possuem importância pois são utilizados em diversas etapas de análise e operação do sistema elétrico, por exemplo, em algoritmos de localização de faltas.

Os resultados mostraram que, mesmo inicialmente admitindo medidas de tensão e de corrente sem erros, em nenhuma das situações, a variância dos parâmetros gerou um valor factível para o limite de erro, fazendo com que o intervalo de confiança encontrado não fosse adequado para ser utilizado, pois compreendia uma faixa de variação muito grande para os valores dos parâmetros.

Foi possível verificar que o equacionamento é fortemente influenciado pelo valor das tensões e isso explica a maior sensibilidade das equações à variação na classe de exatidão do TP do que na classe de exatidão do TC.

Em suma, é possível afirmar que, para o equacionamento mostrado na seção 3, a estimativa dos limites de erro dos parâmetros elétricos longitudinais e transversais de linhas de transmissão não é confiável, quando modelada a partir da teoria de propagação de incertezas, e quando utiliza dados da classe de exatidão de TPs, TCs, e relés registradores.

REFERÊNCIAS

- [1] LI, Changgang; ZHANG, Yaping; ZHANG, Hengxu; WU, Qiuwei; TERZIJA, Vladimir. Measurement-Based Transmission Line Parameter Estimation With Adaptive Data Selection Scheme. Ieee Transactions

- On Smart Grid, [S.L.], v. 9, n. 6, p. 5764-5773, nov. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- [2] COSTA, Eduardo Coelho M.; KUROKAWA, Sérgio. Estimation of transmission line parameters using multiple methods. *Iet Generation, Transmission & Distribution*, [S.L.], v. 9, n. 16, p. 2617-2624, 3 dez. 2015. Institution of Engineering and Technology (IET).
- [3] PINEDA, J. T. R.; et. al. Método de Estimação de Parâmetros de Linhas de Transmissão baseado em Dados de Faltas. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Natal, Brasil, 2016.
- [4] HUGHES, Ifan G.; HASE, Thomas P. A. *Measurements and their Uncertainties: A Practical Guide to Modern Error Analysis*. New York: Oxford University Press, 2010. 137 p.
- [5] VUOLO, José Henrique. *Fundamentos da Teoria de Erros*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1996. 240 p.
- [6] TAYLOR, John R.. *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. 2. ed. Sausalito: University Science Books, 1997. 331 p.
- [7] CRUZ, Melinda Cesianara Silva da. Metodologia de estimação de estados para tratamento de medições errôneas e registros não sincronizados em algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão. 2015. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e da Computação, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- [8] MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos, 2013.
- [9] KINDERMANN, Geraldo. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 3. ed. Florianópolis: Labplan, 2012. 1 v.
- [10] CAMARGO, C. Celso de Brasil. *Transmissão de Energia Elétrica: aspectos fundamentais*. 4. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2009. 277 p.