

Uncertainty Analysis in Power System Protection using Python-based Web Tools

Brenda Honorato Pires, Wellington Maycon Santos Bernardes
Laboratory of Alternative Energies and Power System Protection (LEAPSE)
Faculty of Electrical Engineering (FEELT)
Federal University of Uberlândia (UFU), Uberlândia, MG, 38400-902, Brasil
Email: {brenda.pires, wmsbernardes}@ufu.br

Abstract—Uncertainty analysis is a crucial step in avoiding failures in electrical systems and ensuring their proper functioning. In this regard, the present article calculates the uncertainties of the equations for one of the protection devices, the relays. These equations govern the relays based on curves representing their operation. Two methods were employed to calculate the uncertainties of these equations: the analytical method and the Monte Carlo method. The first method uses mathematical operations such as derivatives, exponentiation, and roots to systematically arrive at measurement uncertainty. The Monte Carlo Method, on the other hand, employs probabilistic techniques to determine the measurement result, which requires significant computational effort. Both methods yield reliable results and can be used effectively. Python was used to implement these two techniques. Initially, the code was developed in the terminal. Later, using the Streamlit library, it was transcribed to create an interactive website. This tool is intuitive, allowing users to utilize it without complications, and it can be accessed from any device with internet access.

Index Terms—Relays, Uncertainty Analysis, Analytical Analysis, Monte Carlo, Python, Streamlit.

I. INTRODUÇÃO

Há inúmeros dispositivos dentro de um circuito elétrico e um deles, é o relé [1]–[3]. Ele funciona como uma chave controlando a abertura e fechamento do circuito em repostas às modificações de corrente ou tensão. A coordenação de relés de sobrecorrente é fundamental para realizar uma adequada proteção nas redes de distribuição, já que a proteção primária normalmente é baseada na detecção de sobrecorrente. Para realizar uma boa coordenação, algumas variáveis devem ser atendidas como a corrente de *pick-up* I_p , a corrente de operação e o *Time Dial Setting* (TDS) [4]–[7].

Para suportá-la, pode-se utilizar uma etapa muito relevante, chamada como análise de incertezas, minimizando grandes falhas e prejuízos aos equipamentos e sistema, quando não executada adequadamente [8]. Além disso, quando os profissionais realizam aquisição de dados por técnicas manuais, segundo [9], pode elevar o tempo de aquisição e aumenta a

probabilidade de erros. Com isso, ele não conhecerá profundamente o dimensionamento e erros envolvidos, e em razão disso, a determinação da incerteza se faz importante.

Segundo [2], existem dois princípios que são amplamente utilizados em sistemas elétricos, a confiabilidade baseada na margem e na incerteza. O primeiro afirma que o grau de confiabilidade do objeto é determinado pela diferença entre sua performance real e o mínimo exigido por normas e regras. Já o segundo fala que a margem de desempenho, juntamente com a degradação que o objeto pode sofrer, afetam no cálculo de incertezas. Uma maneira de determinar a confiabilidade do sistema é calcular a incerteza utilizando o método de Monte Carlo, sendo uma técnica amplamente utilizada [10].

A incerteza de medição é definida por [11] como o intervalo no qual o valor real do mensurando está contido. Além disso, afirma que o processo para determinar essa incerteza necessita de grande conhecimento, tanto da variável, quanto do processo, combinando as inúmeras incertezas de entradas. Há várias maneiras de realizar o cálculo da incerteza de medição, dentre as formas citadas no artigo, vale salientar a propagação de incertezas, na qual supõe-se que os erros sistemáticos são corrigidos durante o processo de medição. Outras necessitam avançados conhecimentos em Matemática, e o método de Monte Carlo, propriamente dito, sendo frequentemente empregado na resolução de modelos mais complicados [8], não lineares e com muitas variáveis aleatórias. Contudo, requer um alto tempo de computação.

Por exemplo, no artigo de [12], os autores realizaram os cálculos de forma analítica, e posteriormente, foram verificados através de simulações. Como conclusão, eles afirmam que os resultados analíticos realizados foram validados. O presente artigo pretende abordar a técnica analítica e a de Monte Carlo.

Ademais a utilização do *Python* é amplamente disseminada em confecções de *software* [13], devido a sua rápida atualização, modificação, reescrita, é uma linguagem dinâmica e amplamente documentada facilitando a melhoria, bem como, a adaptabilidade do sistema [9]. A referência [14] também utiliza essa linguagem em razão da variedade de bibliotecas, ferramentas, atendendo diferentes objetivos, estratégias, possui grande versatilidade em resolver problemas, e o código pode ser executado em diversos sistemas operacionais. Segundo [15], o *Python* é a linguagem dominante em computação científica, aprendizado de máquinas, nas faculdades [16] e

The authors have been supported by Minas Gerais Research Funding Foundation (FAPEMIG) (Demanda Universal APQ-02176-22, and APQ-04929-22), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (406881/2022-7), and the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brazil (CAPES) - Finance Code 001. We also thank the Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEELT) from the Federal University of Uberlândia (UFU).

indústrias. Todavia, não é uma linguagem perfeita, pois exige maior consumo de energia e grande demanda de memória, já que depende do gerenciamento de memória estática.

Uma das bibliotecas *Python* é o *NumPy* [17] que será utilizada neste trabalho. Ela usada para trabalhar com vetores, realizar operações matemáticas, amplamente utilizada em cálculos numéricos. Outra biblioteca usada é o *Pandas* [17], oferecendo ao usuário a possibilidade de ler, escrever, alterar, limpar, transformar e manipular estruturas de dados. As bibliotecas mencionadas anteriormente são amplamente utilizadas para manipulação de dados.

A linguagem de programação *Python*, segundo [18], apresentou um grande desenvolvimento nos últimos 11 anos. Uma das bibliotecas mencionadas pelo autor, foi o *Pandas*, mas especificamente *DataFrame*, ferramenta de notória ajuda neste projeto, pois organizam os dados e facilita sua manipulação. Segundo [19], os sistemas elétricos estão tendo uma crescente automação, em razão do aumento de sua complexidade. Consequentemente, se faz necessário a criação de novas ferramentas que permitam maior automação, objetivando realizar ações em tempo reais e aquisição de parâmetros que podem ser armazenados em *DataFrame*.

Por fim, a biblioteca *Streamlit* permite a escrita de uma interface *web*, fazendo com que a transferência do código no terminal seja mais simples e necessite de poucas modificações. Além disso, a biblioteca facilita a criação de aplicativos altamente personalizados, permite realizar Aprendizagem de Máquina e usufruir de técnicas de Ciência de Dados [20].

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. A Seção II expõe a metodologia geral apresentando a ordem que o projeto foi desenvolvido, afim de realizar o produto final. A Seção III demonstra o método analítico, bem como, explica como ele é aplicado e quais as equações dos relés foram utilizadas. Na Seção IV é apresentado o código implementado no produto final para realizar o método de Monte Carlo, bem como, uma função no *Python* necessária para garantir a assertividade do resultado final. A Seção V apresenta os resultados do projeto. Na Seção VI ocorre a discussão dos resultados apresentados anteriormente, deixando-os mais claros e devidamente explicados. Por fim, na Seção VII é possível visualizar a conclusão do artigo.

II. METODOLOGIA

Os sistemas elétricos podem apresentar falhas e acarretar em consequências desastrosas. Em razão disso, é de suma importância a isolamento desses defeitos. Para realizar tal ato, a utilização de dispositivos de proteção como os relés digitais são necessários. Seu funcionamento é regido por equações que modelam sua curva de funcionamento, e o presente trabalho calculará as suas incertezas. Ademais, se o sistema de medição não for devidamente corrigido, o erro sistemático não atenuado. Como produto final foi projetada uma página *web*, determinando a incerteza de medição das equações dos relés, extraídas da Tese de [21], por meio de um método analítico e o de Monte Carlo, comentados nas Seções III e IV. Uma das vantagens é que os profissionais do setor poderão

utilizar a ferramenta em qualquer local, tornando o cálculo mais automático e prático.

Em relação ao embasamento teórico, referências com uma delimitação temporal de até 3 anos anteriores foram buscadas, a fim de encontrar técnicas, explicações e abordagens recentes. Esses trabalhos forneceram um arcabouço para melhor entendimento sobre os sistemas elétricos de potência, filosofia da proteção, releamento, origem dos erros, importância para determinar as incertezas, e métodos de cálculos, tais como o analítico e o de Monte Carlo. Além disso, também pesquisou-se a respeito da linguagem de programação *Python*, aplicações, bibliotecas e recentes técnicas. A maioria dos artigos foram extraídos da plataforma *IEEEExplore* e *Elsevier*, sendo que as principais palavras procuradas foram: sistema elétrico de potência, cálculo de incerteza, método analítico, método de Monte Carlo, *Python*, *Pandas*, *Numpy* e *Streamlit*.

Para confeccionar o produto final, utilizou a linguagem de programação *Python* v.3.12.4 e principalmente a biblioteca *Streamlit*. O código foi inteiramente escrito no *software Visual Studio Code for Windows 10 / 11*. Além disso, utilizou o *GitHub* e *Google Drive* como repositório, bem como, o *Streamlit Community Cloud* (interface gráfica). Após a conclusão da etapa no terminal, foram executados vários testes, objetivando verificar seu funcionamento livre de erros, e se as saídas estavam de acordo com o planejado.

A configuração do computador usado é um Dell Inspiron 1530, Sistema Operacional Windows 11 23H2, Processador 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1255U 1,70 GHz, 16 GB RAM, e SSD 1 TB.

III. MÉTODO ANALÍTICO

No programa desenvolvido na linguagem *Python* é calculada a incerteza padrão combinada através do método analítico. Cada equação da curva do relé de sobrecorrente passa pelo mesmo processo, a fim de determinar sua incerteza. Para isso, o usuário deve fornecer algumas informações como o valor da corrente de falta I , a corrente de *pick-up* I_p , e o múltiplo de tempo MT , bem como a incerteza de medição expandida, o grau de liberdade e a probabilidade de abrangência de cada variável. As equações utilizadas foram extraídas do trabalho de [21].

A Equação 1 é uma das utilizadas neste trabalho. Suas curvas são mostradas na Tabela I. O gráfico dela se apresenta na Figura 1. Nele o valor de I varia de 11 até 10.000, com passo regular de uma unidade. Já I_p foi padronizado em 10 e o MT em 1.

$$T_i = \left[\frac{K_2}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{K_3} - K_4} + K_1 \right] \cdot MT \quad (1)$$

Abaixo será desenvolvido o passo a passo, do método analítico, referente a curva CO2 Inversa de Tempo Curto (P120). Observe que na Equação 2, os coeficientes foram substituídos pelos correspondentes valores.

Tabela I
VALORES DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO 1

Curva	K_1	K_2	K_3	K_4
CO2 Inversa de Tempo Curto (P120)	0,00242	0,00342	0,02	1
IEEE Moderadamente Inversa (P120)	0,114	0,0515	0,02	1
CO8 Inversa de Tempo Longo (P120)	0,18	5,95	2	1
IEEE Muito Inversa (P120)	0,491	19,61	2	1
IEEE Extremamente Inversa (P120)	0,1215	28,2	2	1

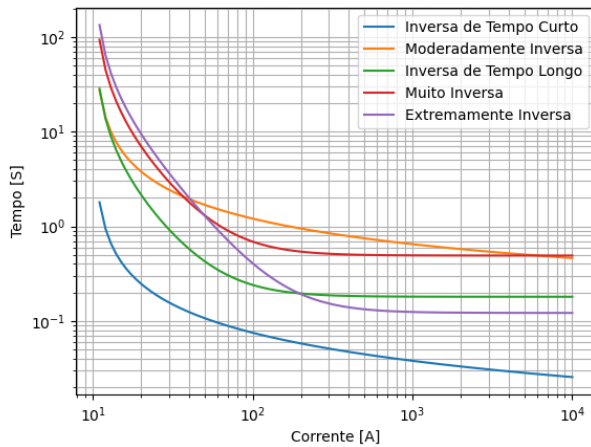


Figura 1. Curvas da Equação 1

$$T_i = \left[\frac{0,00342}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{0,02} - 1} + 0,00242 \right] \cdot MT \quad (2)$$

Primeiramente, com a probabilidade de abrangência e grau de liberdade é possível determinar o *t-Student* relacionados às variáveis I , I_p e MT . Em seguida, as incertezas de cada variável foram divididas pelo *t-Student* correspondente, como podem ser vistas nas Equações 3, 4, e 5. Esse processo foi realizado para descobrir a incerteza de medição expandida. O resultado final (T_i) é determinado utilizando a Equação 2, substituindo os valores advindos do meio externo nas variáveis correspondentes.

$$u_I = \frac{U_I}{t_I} \quad (3)$$

$$u_{I_p} = \frac{U_{I_p}}{t_{I_p}} \quad (4)$$

$$u_{MT} = \frac{U_{MT}}{t_{MT}} \quad (5)$$

A fim de calcular a incerteza do resultado final, é necessário realizar as derivadas parciais da Equação 2. Esse processo pode ser visualizado nas Equações 6, 7, 8. Em seguida, foi necessário aplicar a Equação Geral a fim de descobrir a

incerteza padrão combinada do resultado final (u_T), como pode ser observado na Equação 9.

$$\frac{\partial T_i}{\partial I} = \frac{-6,84 \times 10^{-5} \cdot MT \cdot \left(\frac{I}{I_p}\right)^{0,02}}{I \cdot \left[\left(\frac{I}{I_p}\right)^{0,02} - 1\right]^2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial I_p} = \frac{6,84 \times 10^{-5} \cdot MT \cdot \left(\frac{I}{I_p}\right)^{0,02}}{I_p \cdot \left[\left(\frac{I}{I_p}\right)^{0,02} - 1\right]^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial MT} = 0,00242 + \frac{0,00342}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{0,02} - 1} \quad (8)$$

$$u_T^2 = \left(\frac{\partial T_i}{\partial I} \cdot u_I\right)^2 + \left(\frac{\partial T_i}{\partial I_p} \cdot u_{I_p}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_i}{\partial MT} \cdot u_{MT}\right)^2 \quad (9)$$

Posteriormente, deve-se calcular o grau de liberdade efetivo (V_{ef}) da incerteza da Equação 2. Para obter esse valor, utilizou-se a Equação de Welch-Satterthwaite, que pode ser observada na Equação 10. Em sequência, basta substituir os resultados encontrados em suas respectivas variáveis.

$$\frac{\left(\frac{u_T}{T_i}\right)^4}{V_{ef}} = \frac{\left(\frac{u_I}{I}\right)^4}{t_I} + \frac{\left(\frac{u_{I_p}}{I_p}\right)^4}{t_{I_p}} + \frac{\left(\frac{u_{MT}}{MT}\right)^4}{t_{MT}} \quad (10)$$

Por fim, com o grau de liberdade efetivo (V_{ef}) e probabilidade de abrangência, fornecida pelo usuário, descobre-se o *t-Student* do resultado final (t_T). O ultimo passo é multiplicá-lo pela incerteza padrão combinada do resultado final (u_T) e consequentemente descobre a incerteza do resultado final, o qual aparece para o usuário conforme a Equação 11.

$$R_M = T_i \pm U_T \quad (11)$$

As Equações 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18 são também utilizadas no produto desenvolvido. As curvas e coeficientes correspondentes de cada equação podem ser visualizadas nas tabelas II, III, IV, V, VI, VII e VIII, respectivamente.

$$T_i = \left[\frac{k_1}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{K_2} - K_3} \right] \cdot MT \quad (12)$$

Tabela II
VALORES DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO 12

Curva	K_1	K_2	K_3
IEC Inversa Padrão (P120)	0,14	0,02	1
IEC Inversa de Tempo Curto (P120)	0,05	0,04	1
IEC Muito Inversa (P120)	13,5	1	1
IEC Extremamente Inversa (P120)	80	2	1
IEC Inversa de Tempo Longo (P120)	120	1	1

$$\text{Para } 1 < \frac{I}{I_p} < 1,5 \cdot I_p : \quad t = \frac{K_1}{\left(\frac{I}{I_p}\right) - 1} \cdot \frac{MT}{24000} \quad (13)$$

Tabela III
COEFICIENTES DA EQUAÇÃO 13

Curva	K_1
CO-2 (Inversa de Tempo Curto)	510
CO-5 (Inversa de Tempo Longo)	22705
CO-6 (Tempo Definido)	1475
CO-7 (Moderadamente Inversa)	2491
CO-8 (Inversa Padrão)	9200
CO-9 (Muito Inversa)	9342
CO-8 (Extremamente Inversa)	8875

Tabela VII
COEFICIENTES DA EQUAÇÃO 17

Curva (ANSI)	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
Inversa	0,0274	2,2614	0,3	-4,1899	9,1272
Muito Inversa	0,0615	0,7989	0,34	-0,284	4,0505
Extremamente Inversa	0,0399	0,2294	0,5	3,0094	0,7222
Moderadamente Inversa	0,1735	0,6791	0,8	-0,08	0,1271

Tabela VIII
COEFICIENTES DA EQUAÇÃO 18

Curva	K_1	K_2	K_3	K_4
Moderadamente Inversa	0,1597	0,8035	1	-0,6752

$$\text{Para } \frac{I}{I_p} > 1,5 \cdot I_p : \quad t = K_2 + \frac{K_3}{\left[\left(\frac{I}{I_p}\right) - K_4\right]^{K_5}} \cdot \frac{MT}{24000} \quad (14)$$

Tabela IV
COEFICIENTES DA EQUAÇÃO 14

Curva	k_2	K_3	K_4	K_5
CO2 Inversa de Tempo Curto (P120)	0,00242	0,00342	0,02	1
IEEE Moderadamente Inversa (P120)	0,114	0,0515	0,02	1
CO8 Inversa de Tempo Longo (P120)	0,18	5,95	2	1
IEEE Muito Inversa (P120)	0,491	19,61	2	1
IEEE Extremamente Inversa (P120)	0,1215	28,2	2	1

$$T_i = \frac{(K_1 \cdot MT) - K_2}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{K_3} - K_4} + K_5 \cdot MT - K_6 \quad (15)$$

Tabela V
COEFICIENTES DA EQUAÇÃO 15

Curva	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
<i>I-squared-T</i>	50,7	-10,14	2	0	0	0

$$T_i = MT[K_1 - K_2 \cdot \ln(I/I_p)] + K_3 \quad (16)$$

Tabela VI
COEFICIENTES DA EQUAÇÃO 16

Curva	K_1	K_2	K_3
IDG (k = 1,0)	5,8	1,35	0

$$T_i = MT \cdot \left[K_1 + \frac{K_2}{I/I_p - K_3} + \frac{K_4}{(I/I_p - K_3)^2} + \frac{K_5}{(I/I_p - K_3)^3} \right] \quad (17)$$

Por fim, ocorre o cálculo da equação utilizando os vetores aleatórios, que são armazenados na variável "T". A média "np.mean" e o desvio padrão "np.std" de "T" correspondem ao resultado final e à incerteza, respectivamente.

$$T_i = MT \cdot \left[\frac{K_1 + K_2}{I/I_p - K_3} + \frac{k_4}{(I/I_p)^2 - K_3} \right] \quad (18)$$

IV. MÉTODO DE MONTE CARLO

O método de Monte Carlo, também utilizado neste trabalho, calcula a incerteza do resultado de medição com base nas equações dos relés. Baseia-se em uma técnica que trabalha com probabilidade e simulação computacional. O Algoritmo 1 exemplifica a técnica aplicada na Equação 1 mencionada anteriormente na Seção III. O código requer o valor de I , I_p , e MT , a incerteza de cada variável, bem como o número de simulações a serem realizadas, sendo limitado a $1,0 \times 10^7$.

Posteriormente, cada variável recebe uma quantidade de números aleatórios gerados pelo comando "np.random.normal", respeitando a distribuição normal gaussiana, e variando em torno do valor central conforme a incerteza fornecida. Na Linha 26, a função "VerificaVetorMonteCarlo" é executada para garantir que todos os valores de I sejam maiores que os de I_p . Esta verificação é necessária, pois se essa regra não for respeitada, o resultado final pode ficar inconsistente, como pode ser observado na Tabela IX, em que o resultado-base (RB) está muito menor do que erro aleatório (neste caso, a precisão P).

Tabela IX
VALORES DO RESULTADO FINAL SEM A CORREÇÃO REALIZADA PELA FUNÇÃO "VerificaVetorMonteCarlo"

Numero da Simulação	Resultado de Medição (= $RB \pm P$)
1	1,6049658056642722 ± 3111,659604314681
2	6,560731850064698 ± 24226,115015356932
3	1,438468568817952 ± 14229,238386408148
4	0,0814656020652707 ± 9511,801350433085
5	1,4212183046013296 ± 6905,175993169547
6	0,07554690868901144 ± 7233,982470380403
7	3,0323574614718596 ± 8056,7878556361475
8	2,3633919835869266 ± 10141,451690937865
9	2,6248908025087103 ± 7364,635285742736
10	2,1104502608235953 ± 8721,336472824261

Os resultados variam conforme o número de simulações escolhido, sendo que quanto maior o número de simulações, maior é a assertividade e menor a incerteza. As Figuras 2 e

```

def CalculaIncertezaMonteCarlo(Equacao, k1, k2,
    ↪ k3, k4, k5, k6):
2   if(Equacao == 1):
3       limpar_terminal()
4
5       I = float(input("Digite o valor da
    ↪ corrente de falta: "))
6       IP = float(input("Digite o valor da
    ↪ corrente de pickup"))
7       MT = float(input("Digite o valor do
    ↪ multiplo de tempo"))
8       limpar_terminal()
9
10      U_I = float(input("Digite o valor da
    ↪ incerteza combinada da corrente de
    ↪ falta: "))
11     U_IP = float(input("Digite o valor da
    ↪ incerteza combinada da corrente de
    ↪ pickup: "))
12     U_MT = float(input("Digite o valor da
    ↪ incerteza combinada do multiplo de
    ↪ tempo: "))
13     limpar_terminal()
14
15     print("Digite o valor de n ate 10e6:")
16     TamanhoDosNumerosAleatorios =
    ↪ int(input())
17
18     if (TamanhoDosNumerosAleatorios > 1e7):
19         print("Valor máximo atingido.
    ↪ Limitado a 1e7")
20         TamanhoDosNumerosAleatorios =
    ↪ 10000000
21
22     I_Aleatorio =
    ↪ pd.Series(np.random.normal(I, U_I/2,
    ↪ TamanhoDosNumerosAleatorios))
23     IP_Aleatorio =
    ↪ pd.Series(np.random.normal(IP,
    ↪ U_IP/2, TamanhoDosNumerosAleatorios))
24     MT_Aleatorio =
    ↪ pd.Series(np.random.normal(MT,
    ↪ U_MT/2, TamanhoDosNumerosAleatorios))
25
26     VerificaVetorMonteCarlo(I_Aleatorio,
    ↪ IP_Aleatorio)
27     T = ((k2 / ((I_Aleatorio / IP_Aleatorio)
    ↪ ** k3 ) - k4)) + k1) * MT_Aleatorio
28     Media_T = np.mean(T)
29     DesvioPadrao_T = np.std(T)
30     limpar_terminal()
31     print("Resultado de medição", Media_T,
    ↪ '+', DesvioPadrao_T*2, "[s]")

```

Algoritmo 1: Cálculo de incerteza pelo método de Monte Carlo

3 apresentam dois histogramas, que no programa são gerados logo após a determinação do resultado final. O primeiro utilizou 5.000 simulações, enquanto o segundo utilizou 10.000.000 ($=1,0 \times 10^7$).

V. RESULTADOS DA ANÁLISE DE INCERTEZAS

Esta seção destina-se a mostrar os resultados advindos da análise de incertezas das principais curvas dos relés digitais usando os dois métodos, anteriormente citados. Os resultados finais indicam que ambas as técnicas apresentam respostas semelhantes, validando as técnicas. Consequentemente, os resultados são confiáveis e podem ser utilizados. Também

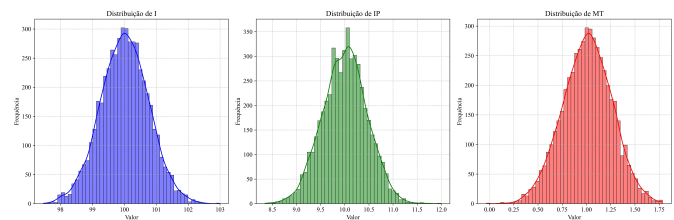


Figura 2. Histograma com 5.000 simulações

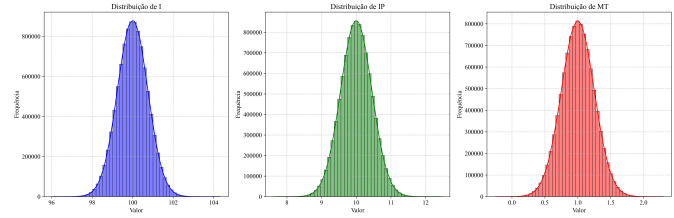


Figura 3. Histograma com $1,0 \times 10^7$ simulações

serão apresentadas as imagens da interface gráfica, em etapa de desenvolvimento.

Assim sendo, o objetivo é demonstrar que ambos os métodos podem ser utilizados para calcular a incerteza, criando uma ferramenta com cálculo automático e de acesso relativamente fácil para o usuário final realizar a execução.

A. Método de Monte Carlo

No método de Monte Carlo os resultados variam conforme o número de simulações N escolhido. Quanto maior essas simulações, melhor tende a ser a assertividade e menor a incerteza. As Tabelas X, XI, XII, XIII, XIV, XV e XVI apresentam os dados estatísticos do histograma conforme o valor de N . A equação utilizada foi a 1, com curva IEC Inversa de Tempo Curto (P120). Os valores de I , I_p e MT foram 100, 10 e 1 respectivamente, a incerteza em relação à I , I_p e MT foram 1,5, 0,9 e 0,5, respectivamente.

Em relação à Tabela X, os valores da média ficam em torno de 0,074. O desvio padrão tem uma faixa de 0,01264 a 0,02492, mostrando que os valores tem uma alta dispersão, consequência do pequeno número de amostras. A média da Tabela XI varia de 0,07309 a 0,07799, um intervalo menor que o da Tabela X e o desvio padrão é mais constante tendo uma variação entre 0,01639 a 0,01983.

Conforme o número de amostras aumentam, como pode ser visualizado nas Tabelas XII, XIII, XIV, XIV, XV e XVI, a média se estabiliza entre 0,07497 a 0,07515, o desvio padrão tem uma pequena variação em torno de 0,0188. Em suma, conforme o número de simulações aumentam a média fica mais estável e o desvio padrão menor, mostrando uma maior precisão nos resultados.

Em relação aos erros na Tabela X, há uma grande variação, sendo o erro absoluto das medidas entre 0,0005208571 até 0,0075108571 e percentual 0,6954% a 10,0277%, essa é a maior faixa e porcentagem entre as tabelas. Já na Tabela XVI o erro absoluto tem o intervalo entre 0,0000108571 a

0,0002491429 e o erro percentual 0,0145% a 0,3326%, esse é o melhor resultado. Por conseguinte, é visível que quando o numero de simulações é baixo há grande instabilidade no resultado final.

Tabela X

RESULTADOS ESTATÍSTICO DE 10 ENSAIOS COM $N = 1,0 \times 10^1$

Média = <i>RB</i>	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo
0,07438	0,02359	0,07878	0,03332	0,1046
0,07839	0,01427	0,07897	0,06012	0,10277
0,07736	0,01934	0,07293	0,04826	0,10924
0,07782	0,0183	0,07314	0,05336	0,11357
0,07371	0,01729	0,06846	0,05052	0,11186
0,06739	0,02492	0,06541	0,03259	0,10855
0,07788	0,01713	0,07871	0,04216	0,10456
0,06915	0,02308	0,0605	0,04198	0,11041
0,07139	0,01522	0,07113	0,03829	0,09794
0,07989	0,01264	0,08423	0,0557	0,09284

Tabela XI

RESULTADOS ESTATÍSTICO DE 10 ENSAIOS COM $N = 1,0 \times 10^2$

Média = <i>RB</i>	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo
0,07439	0,0177	0,07378	0,03995	0,12357
0,07385	0,01926	0,07132	0,03846	0,1245
0,07393	0,01721	0,07295	0,03336	0,12907
0,07561	0,01711	0,0734	0,03715	0,11672
0,07799	0,01828	0,07725	0,01948	0,11967
0,07397	0,01809	0,07194	0,03853	0,13258
0,07441	0,01639	0,07321	0,04496	0,12427
0,07502	0,01866	0,07509	0,0279	0,12614
0,07309	0,0182	0,07257	0,03314	0,11759
0,0759	0,01983	0,07402	0,02983	0,1295

Tabela XII

RESULTADOS ESTATÍSTICO DE 10 ENSAIOS COM $N = 1,0 \times 10^3$

Média = <i>RB</i>	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo
0,07515	0,0188	0,07487	0,01845	0,1371
0,07456	0,01916	0,07479	0,00797	0,14324
0,0755	0,01906	0,07524	0,0086	0,14003
0,0749	0,01914	0,07511	0,01003	0,14117
0,07479	0,01905	0,0744	0,00908	0,13085
0,07538	0,01798	0,07475	0,0219	0,13049
0,07504	0,01895	0,07495	0,01456	0,13517
0,07444	0,01892	0,07418	0,00749	0,13514
0,07312	0,01862	0,07293	0,00893	0,13537
0,07476	0,01963	0,07469	0,02258	0,13308

B. Comparação com Método Analítico

Na Tabela XVII, é possível emparelhar os resultados oriundos do método de Monte Carlo e o método analítico. Nela, utilizou-se as 8 equações apresentadas na Seção III. A distribuição de linhas nesta tabela corresponde à mesma ordem que as equações foram apresentadas na Seção III. Todavia, a fim de deixá-la mais intuitiva, foi elaborada a coluna “Eq.” destinada a identificar precisamente conforme feito no artigo.

Para realizar os testes e comparar os resultados dos dois métodos, definiu-se valores constantes para as variáveis, sendo: $I = 100$, $I_p = 10$, $MT = 1$, $UI = 1,5$, $UI_p = 0,9$,

Tabela XIII

RESULTADOS ESTATÍSTICO DE 10 ENSAIOS COM $N = 1,0 \times 10^4$

Média = <i>RB</i>	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo
0,07508	0,01894	0,07525	0,0002	0,14837
0,07508	0,01877	0,07483	0,00919	0,14007
0,07498	0,01908	0,07509	0,00202	0,14973
0,0751	0,0187	0,07489	0,00824	0,14022
0,07478	0,0186	0,07456	-0,00268	0,14234
0,07519	0,01882	0,07507	-0,00107	0,14404
0,07497	0,01888	0,07481	-0,00058	0,14358
0,07489	0,01889	0,07483	0,00628	0,16762
0,07513	0,01895	0,07521	-0,00199	0,15043
0,07515	0,01869	0,07533	0,00234	0,15002

Tabela XIV

RESULTADOS ESTATÍSTICO DE 10 ENSAIOS COM $N = 1,0 \times 10^5$

Média = <i>RB</i>	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo
0,07497	0,01882	0,07498	-0,00878	0,16191
0,07501	0,01876	0,07499	-0,00219	0,16474
0,07499	0,01875	0,07506	-0,00832	0,15341
0,075	0,01882	0,07496	-0,00534	0,15791
0,07497	0,01879	0,07498	-0,0065	0,15961
0,07504	0,01873	0,07501	-0,00868	0,15565
0,07481	0,01875	0,07478	-0,00889	0,15701
0,07499	0,01883	0,07501	-0,00227	0,15454
0,07495	0,0187	0,07493	-0,00364	0,16364
0,07511	0,01879	0,07514	0,0046	0,15897

Tabela XV

RESULTADOS ESTATÍSTICO DE 10 ENSAIOS COM $N = 1,0 \times 10^6$

Média = <i>RB</i>	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo
0,07499	0,01879	0,07497	-0,0127	0,16717
0,07497	0,0188	0,07498	-0,02175	0,15962
0,075	0,0188	0,07497	-0,01689	0,163
0,07499	0,01878	0,07495	-0,01605	0,16535
0,07495	0,01881	0,07492	-0,01516	0,16499
0,07498	0,01881	0,07497	-0,01904	0,17005
0,075	0,01881	0,07496	-0,01352	0,16673
0,07501	0,01882	0,07502	-0,01263	0,16547
0,07497	0,01879	0,07495	-0,01058	0,1735
0,07498	0,01882	0,07495	-0,0127	0,17527

Tabela XVI

RESULTADOS ESTATÍSTICO DE 10 ENSAIOS COM $N = 1,0 \times 10^7$

Média = <i>RB</i>	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo
0,07499	0,01881	0,07496	-0,0211	0,17851
0,07498	0,01881	0,07495	-0,02377	0,18266
0,07498	0,01881	0,07496	-0,03393	0,16984
0,07499	0,01881	0,07496	-0,02698	0,17578
0,075	0,0188	0,07496	-0,02477	0,17254
0,07499	0,01881	0,07495	-0,02674	0,1732
0,07498	0,01881	0,07495	-0,02554	0,17721
0,07499	0,01881	0,07496	-0,02216	0,18374
0,07498	0,01881	0,07497	-0,02792	0,17439
0,07499	0,01881	0,07496	-0,02325	0,18143

$UMT = 0,5$, probabilidade de abrangência igual a $0,95$, grau de liberdade igual a 10.000 e número de simulações igual a $1,0 \times 10^7$. Apenas a Equação 14 necessitou de mudanças na variável I , cujo valor foi ajustado para 1000 devido à requisitos técnicos. Como é possível observar na Tabela XVII, em ambos os métodos são apresentados valores muito próximos, tanto em relação ao Resultado-Base (RB) quanto na incerteza.

Tabela XVII
RESULTADOS ADVINDO DO MÉTODO DE MONTE CARLO E ANALÍTICO,
PARA AS 8 EQUAÇÕES DOS RELÉS

Eq	Curva	Análítico	Monte Carlo
1	Inversa de Tempo Curto	$0,07499 \pm 0,03761$	$0,07498 \pm 0,03760$
12	Inversa Padrão	$2,97060 \pm 1,49017$	$2,97033 \pm 1,49079$
13	Inversa de Tempo Curto	$0,00232 \pm 0,00118$	$0,00232 \pm 0,00119$
14	Inversa de Tempo Curto	$0,00497 \pm 0,00249$	$0,00497 \pm 0,00249$
15	I -Squared- T	$0,60840 \pm 0,27676$	$0,60967 \pm 0,27822$
16	IDG ($k = 1,0$)	$2,69151 \pm 1,35138$	$2,68974 \pm 1,35094$
17	ANSI Inversa	$0,22600 \pm 0,11418$	$0,22599 \pm 0,11424$
18	Moderadamente Inversa	$0,10020 \pm 0,05101$	$0,10022 \pm 0,05107$

Portanto, os resultados mostram que ambos os métodos são consistentes e podem ser utilizados para cálculos de incerteza em relés, proporcionando uma validação mútua e garantindo a precisão necessária para aplicações práticas.

C. Interface Gráfica Web

O site possui um código completamente escrito em *Python* e utiliza a biblioteca *Streamlit* para torná-lo intuitivo e dinâmico. Nas Figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9, é possível visualizar sua organização e a dinâmica para determinar o resultado e a incerteza final de medição.

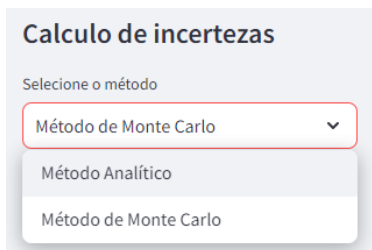


Figura 4. Escolha do método para realizar a análise da incerteza

VI. DISCUSSÃO

Visto anteriormente, nas Tabelas X, XI, XII, XIII, XIV, XV e XVI a média dos resultados ficou em torno de $0,075$ para qualquer valor de N . O desvio padrão se mantém relativamente constante entre $0,018$ e $0,019$. A mediana em todas as tabelas é muito próxima da média, indicando uma distribuição simétrica. No entanto, os valores mínimos e máximos apresentam grande variação, aumentando junto com o número de simulações, demonstrando que esse acréscimo impacta no tamanho do intervalo de valores. Em resumo, com base nos dados estatísticos, o método fornece resultados confiáveis e pode ser implementado.

Escolha uma das equações abaixo:

- $T = \left[\frac{K_2}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{K_3} - K_4} + K_1 \right] \cdot MT$
- $T = \left[\frac{k_1}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{K_2} - K_3} \right] \cdot MT$
- $T = \left[\frac{K_1}{\left(\frac{I}{I_p}\right) - 1} \cdot \frac{MT}{24000} \right]$ Para $1 < \frac{I}{I_p} < 1,5 \cdot I_p$
- $T = \left[K_2 + \frac{K_3}{\left[\left(\frac{I}{I_p}\right)^{K_4} - K_1\right]} \cdot \frac{MT}{24000} \right]$ Para $\frac{I}{I_p} > 1,5 \cdot I_p$
- $T = \left[\frac{(K_1 \cdot MT) - K_2}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{K_3} - K_4} + K_5 \cdot MT - K_6 \right]$
- $T = MT \cdot \left[K_1 - K_2 \cdot \ln(I/I_p) \right] + K_3$
- $T = MT \cdot \left[K_1 + \frac{K_2}{I/I_p - K_3} + \frac{K_4}{(I/I_p - K_3)^2} + \frac{K_5}{(I/I_p - K_3)^3} \right]$
- $T = MT \cdot \left[\frac{K_1 + K_2}{I/I_p - K_3} + \frac{k_1}{(I/I_p)^2 - K_3} \right]$

Você escolheu essa equação: $T = MT \cdot \left[\frac{K_1 + K_2}{I/I_p - K_3} + \frac{k_1}{(I/I_p)^2 - K_3} \right]$

Figura 5. Escolha da equação normalizada

	Curva	k1	k2	k3	k4
0	Inversa de tempo curto	0.0024	0.0034	0.0200	1
1	Moderadamente Inversa	0.1140	0.0515	0.0200	1
2	Inversa de Tempo Longo	0.1800	5.9500	2.0000	1
3	Muito Inversa	0.4910	19.6100	2.0000	1
4	Extremamente Inversa	0.1215	28.2000	2.0000	1

Escolha uma das curvas:

Inversa de tempo curto

Você escolheu a curva: Inversa de tempo curto

Figura 6. Escolha da curva relacionada às equações vistas na Figura 5

Analisando os dados fornecidos pela Tabela XVII, é possível afirmar que tanto os resultados obtidos pelo Método Analítico quanto o de Monte Carlo são semelhantes. Observando os resultados-base RB apresentados, a variação ocorre entre a segunda e a quarta casa decimal após a vírgula; no entanto, as diferenças são pequenas. Em relação à incerteza de medição, a variação se encontra entre a terceira e a quinta casa decimal após a vírgula, mostrando ainda mais semelhança. Portanto, pode-se afirmar que ambos os métodos são eficazes e confiáveis para calcular a incerteza das equações dos relés. Esta conclusão é importante, pois a precisão é crucial neste contexto, já que se a incerteza não for determinada adequadamente, pode resultar em erros significativos em sistemas elétricos.

A Figura 4 mostra a aba lateral do site, destinada à escolha do método para calcular a incerteza. Após essa etapa, o usuário deve decidir qual equação e curva correspondente serão utilizadas nos cálculos, conforme as Figuras 5 e 6, respectivamente. Por fim, ele deve preencher os valores solicitados; o método analítico possui mais campos, como pode ser visto nas Figuras 7 e 8, enquanto o método de Monte Carlo contém menos

Método Analítico

Digite o valor da corrente de falta:

 - +

Digite o valor da corrente de pickup:

 - +

Digite o valor do múltiplo de tempo:

 - +

Digite o valor da incerteza combinada da corrente de falta:

 - +

Digite o valor da incerteza combinada da corrente de pickup:

 - +

Digite o valor da incerteza combinada do múltiplo de tempo:

 - +

Digite o valor do Grau de liberdade da corrente de falta:

 - +

Digite o valor do Grau de liberdade da corrente de pickup:

 - +

Digite o valor do Grau de liberdade do múltiplo de tempo:

 - +

Figura 7. Inserção dos valores para utilizar o Método Analítico, Parte 1

Digite a probabilidade de abrangência da corrente de falta:

 - +

Digite a probabilidade de abrangência da corrente de pickup:

 - +

Digite a probabilidade de abrangência do múltiplo de tempo:

 - +

Digite a probabilidade de abrangência do resultado final:

 - +

Confirma

Figura 8. Inserção dos valores para utilizar o Método Analítico, Parte 2

campos, conforme a Figura 9.

A ferramenta desenvolvida, que utiliza a linguagem de programação *Python* e bibliotecas como *Streamlit*, *Numpy* e *Pandas*, oferece uma solução eficiente e acessível para engenheiros e técnicos. Seus resultados são confiáveis e permitem que os profissionais a utilizem em qualquer dispositivo com acesso à Internet.

VII. CONCLUSÃO

A análise de incertezas é uma etapa muito importante, porque pode evitar a propagação de erros em sistemas elétricos, sejam eles de mais distintas naturezas, como industriais, hospitalares ou residenciais. A fim de deixar o cálculo mais dinâmico e rápido, tornou-se necessário a criação de uma interface gráfica *web*. Na ferramenta é possível determinar a

Método de Monte Carlo

Digite o valor da corrente de falta:

 - +

Digite o valor da corrente de pickup:

 - +

Digite o valor do múltiplo de tempo:

 - +

Digite o valor da incerteza combinada da corrente de falta:

 - +

Digite o valor da incerteza combinada da corrente de pickup:

 - +

Digite o valor da incerteza combinada do múltiplo de tempo:

 - +

Digite o número de simulações

 - +

Confirma

Figura 9. Inserção dos valores para utilizar o Método de Monte Carlo

incerteza através dos dois métodos, o de Monte Carlo e o analítico.

Conforme os resultados obtidos, o método de Monte Carlo, que trabalha com probabilidades, forneceu valores precisos e consistentes em seu ensaio. Ademais, à medida que o número de simulações aumenta, a precisão do resultado final também se aprimora. Analisando a comparação dos dois métodos implementados nesse estudo, ambos apresentaram respostas semelhantes, dessa forma, um confirma a resolução do outro. Destarte, as duas vias podem ser utilizadas para determinar o cálculo de incertezas.

Além disso, o *site* conseguiu implementar os dois métodos eficientemente, bem como, a sua organização é intuitiva, tornando o uso simples. Em razão disso, conseguiu cumprir o objetivo desse trabalho, pois facilitou o análise de incerteza e seu acesso. O *site* permite que os técnicos utilizem a ferramenta em qualquer dispositivo com acesso à internet, favorecendo sua aplicação.

Pesquisas futuras nessa área podem desenvolver o *site* tornando-o mais rápido, automático, aplicando novas tecnologias e melhorando a interface do usuário. Além disso, novos métodos podem ser integrados a fim de realizar o análise de incertezas, bem como, novas equações dos relés podem ser adicionadas. Por fim, outras linguagens de programação devem ser exploradas ou outros *software* de confecção de *site*.

Em síntese, o estudo enfatiza a importância de métodos precisos para o cálculo de incerteza, destacando a precisão e confiabilidade das técnicas apresentadas, simplificando os processos e tornando viável para os profissionais.

REFERÊNCIAS

- [1] D. A. Nascimento and W. M. S. Bernardes, "Setting of distance relays on lines considering weather conditions from IEEE Standard 738,"

- in *IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2022)*, no. 1. Santa Maria, Rio Grande do Sul: SBA, 2022, pp. 1–8. [Online]. Available: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbse/article/view/2896/2426
- [2] X. Hao, C. Ying, W. Yujia, and K. Rui, “Belief reliability analysis of electrical performance based on analog behavior modeling,” in *2021 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Nanjing)*. Nanjing, China: IEEE, 2021, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9612655>
- [3] P. C. Arroyo Quispe, A. E. C. Momesso, and E. N. Asada, “An adaptive protection scheme for radial distribution networks under topology changes,” in *2022 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*, 2022, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9969760>
- [4] M. Singh, B. Panigrahi, and A. Abhyankar, “Optimal overcurrent relay coordination in distribution networks,” *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9548185>
- [5] W. M. S. Bernardes, F. M. P. Santos, E. N. Asada, S. A. Souza, and M. J. Ramos, “Ajuste otimizado de relés direcionais de sobrecorrente via Particle Swarm Optimization,” in *XIX Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2012)*. Campina Grande, Paraíba: SBA, 2012, pp. 4573–4580.
- [6] A. E. C. Momesso and E. N. Asada, “Improving recloser-fuse coordination with self-adaptive adjustment,” in *XXIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2020)*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: SBA, 2020, pp. 1–8. [Online]. Available: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/1161/1088
- [7] W. M. S. Bernardes, F. M. P. Santos, E. N. Asada, S. A. Souza, and M. J. Ramos, “Discrete metaheuristic for coordination of directional overcurrent relays in meshed systems,” in *2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA)*. São Paulo, São Paulo: IEEE, 2013, pp. 1–8. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6554477>
- [8] V. Singh, T. Moger, and D. Jena, “Uncertainty handling techniques in power systems: A critical review,” *Electric Power Systems Research*, vol. 203, p. 107633, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779621006143>
- [9] C. K. S. Sánchez, “Optical character recognition in equipment calibrations: a novel approach in Panama,” in *2022 IEEE 40th Central America and Panama Convention (CONCAPAN)*. Panama, Panama: IEEE, 2022, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://ieeexplore-ieee.org.ez34.periodicos.capes.gov.br/document/9997704>
- [10] M. T. Ahmed, M. R. Hassan, P. C. Ghosh, M. S. Huq, M. Islam, and A. S. N. Huda, “Monte Carlo simulation for reliability worth assessment of distribution system considering momentary interruptions,” in *2022 International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE)*, Dhaka, Bangladesh, 2022, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10044904>
- [11] H. Choudhary, D. Vaithyanathan, G. Moona, and H. Kumar, “An investigation of various methods for evaluating the measurement uncertainty,” in *2023 3rd International Conference on Innovative Sustainable Computational Technologies (CISCT)*, no. 3, Dehradun, India, 2023, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10351238>
- [12] A. Keshavarz-Haddad, A. Jamshidi, and S. Ghorbani, “Performance analysis of joint dual relay selection and physical layer network coding in two-way relay channels,” *Telecommunication Systems*, vol. 79, no. 4, pp. 529–539, 2022. [Online]. Available: <https://doi-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11235-021-00849-z>
- [13] M. R. Guedes, J. C. S. Junior, and W. M. S. Bernardes, “Calculating protection devices parameters by using open-source Pandapower software,” in *The XIV Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE 2022)*. Rio de Janeiro, RJ: UNESP, 2022, pp. 1–8.
- [14] Z. Deng, T. P. Mishra, W. Xie, D. A. Saeed, G. S. Gautam, and P. Canepa, “kMCPy: A Python package to simulate transport properties in solids with kinetic Monte Carlo,” *Computational Materials Science*, vol. 229, p. 112394, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927025623003889>
- [15] M. Katsaragakis, L. Papadopoulos, M. Konijnenburg, F. Catthoor, and D. Soudris, “A memory footprint optimization framework for Python applications targeting edge devices,” *Journal of Systems Architecture*, vol. 142, p. 102936, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383762123001157>
- [16] L. A. T. Passatuto, A. G. Souza, W. M. S. Bernardes, L. C. G. Freitas, and Ênio Costa Resende, “Assignment of responsibility for short-duration voltage variation via QGIS, OpenDSS and Python,” in *2024 International Workshop on Artificial Intelligence and Machine Learning for Energy Transformation (AIE)*. Vaasa, Finland: IEEE, 2024, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10561325/>
- [17] P. Bhardwaj, C. Choudhury, and P. Batra, “Automating data analysis with Python: A comparative study of popular libraries and their application,” in *2023 3rd International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS)*, 2023, pp. 1243–1248. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10390032>
- [18] Z. Guo, C. Li, and F. Qiu, “The satellite GNC subsystem rapid assemble test platform design based on Python,” in *2023 6th International Symposium on Autonomous Systems (ISAS)*, 2023, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10164623>
- [19] L. Thurner, A. Scheidler, F. Schäfer, J.-H. Menke, J. Dollichon, F. Meier, S. Meinecke, and M. Braun, “Pandapower — An open-source Python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 6510–6521, 2018. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8344496>
- [20] K. S. R. R. Nair, V. Mehra, and T. Babu, “A generalized framework for brain tumor and pneumonia detection using Streamlite application,” in *2023 4th International Conference for Emerging Technology (INCET)*. Belgium, India: IEEE, 2023, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://ieeexplore-ieee.org.ez34.periodicos.capes.gov.br/document/10170689>
- [21] W. M. S. Bernardes, “Análise da proteção de sistemas de energia elétrica utilizando técnicas modernas de otimização heurística,” Ph.D. dissertation, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.11606/T.18.2018.tde-10122018-134438>

BIOGRAFIA



Brenda Honorato Pires was born in Atibaia - São Paulo, Brazil. Undergraduate student in Biomedical Engineering at the Federal University of Uberlândia (UFU). She is familiar with Python language and Streamlit tool. Currently is a Scientific Initiation student and a member of the Laboratory of Alternative Energies and Power System Protection, supported by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) scholarship. Her research fields include uncertainty analysis, statistics, and programming.



Wellington Maycon Santos Bernardes was born in Goiânia - Goiás, Brazil. Professor at the Federal University of Uberlândia (UFU), coordinator of the Laboratory of Alternative Energies and Power System Protection (LEAPSE), *ad hoc* consultant for the State Funding Agency of Distrito Federal (FAPDF), and the National Institute of Educational Studies and Research Anísio Teixeira (INEP), Brasília - DF. BSc. in Electrical Engineering from UFU (2010), with Master's degree in Electrical Engineering from São Carlos School of Engineering (EESC) at the

University of São Paulo (USP) (2013), and with PhD's degree in Electrical Engineering at EESC, from USP (2018). He has undertaken a mobility period (Sandwich PhD) supported by the prestigious scholarship of the European Commission's Erasmus Mundus programme in the Faculty of Engineering at the University of Porto, Portugal. His research fields include power system protection, alternative energies, measurement and uncertainty analysis, optimization and applications of artificial intelligence in electrical networks, energy efficiency, and power quality.