

ANÁLISE E SIMULAÇÃO DAS CURVAS DE PROTEÇÃO DE RELÉS DE DISTÂNCIA UTILIZANDO O MATLAB.

Walkerlan da Silva Rêgo ^[1], Ednardo Pereira da Rocha ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; walker1lan@outlook.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; ednardo.pereira@ufersa.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; adrianoaron@hotmail.com

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a construção de um código capaz de simular e resolver questões relacionadas a relés de distância do tipo impedância. A pesquisa se baseou na exploração do funcionamento desse tipo de dispositivo e nas possíveis questões que surgem nas disciplinas universitárias de proteção de sistemas elétricos, nas quais esses componentes são estudados. Após essa etapa, o trabalho concentra-se em explicar qual parte do código desempenha cada função na resolução dos problemas. Após a apresentação do código, foi demonstrada uma solução para um problema específico, a fim de avaliar a eficácia do código na resolução de questões práticas. O resultado mostrou-se eficiente, com os valores de Z_{sec} (impedância no secundário do relé dada em Ohms) divergindo em menos de 1% em relação aos obtidos na literatura. Quaisquer discrepâncias observadas ainda podem ser atribuídas ao arredondamento de valores, que não é incorporado ao programa, ao contrário do que é praticado na literatura.

Palavras-chave: Relés de distância, proteção de sistemas, coordenação de relés, Matlab, Código, impedância no secundário do relé.

1 INTRODUÇÃO

Os relés são equipamentos elétricos cuja função principal é proteger redes de energia. Eles fazem isso com base em sua capacidade de controlar a abertura/fechamento de disjuntores quando condições predefinidas são atendidas. Esse controle do relé sobre o disjuntor é essencial para prevenir danos aos sistemas de energia pelos quais são responsáveis. O relé de função ANSI 21, também conhecido como relé de distância, é utilizado em situações em que as linhas de transmissão se tornam muito extensas para a aplicação de outros tipos de relés, como o relé de função ANSI 50 e 51. Estes últimos apresentam desafios, tais como tempos de atuação variados em diferentes pontos de curto-circuito, longos tempos de atuação devido à necessidade de coordenação com outros relés, e várias outras complexidades que impedem sua utilização. O relé de distância, por sua vez, possui um tempo de atuação proporcional à distância entre sua localização e o ponto de falha. Além disso, ele é alimentado pela corrente e tensão do circuito protegido e tem a capacidade de monitorar a impedância da linha protegida [1].

Até o momento, não existem muitos modelos prontos e de fácil aplicação de relés que possam representar com precisão as características mencionadas anteriormente. Portanto, o objetivo deste trabalho foi modelar e implementar a função ANSI 21 (distância) de um relé de sobrecorrente no ambiente do software Matlab®, desenvolvido pela MathWorks®. Este software é uma ferramenta que permite a modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos, além de oferecer a possibilidade de criar novos modelos, ampliando as opções disponíveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Um relé, como exemplificado na Figura 1, pode ser definido como um dispositivo que controla a operação de um equipamento, frequentemente representado na proteção de sistemas elétricos por um disjuntor, em resposta a mudanças nas condições desse equipamento. Na proteção de sistemas elétricos, esses dispositivos desempenham a função de controlar a abertura do disjuntor quando detectam irregularidades, como variações na corrente, tensão, frequência, potência ou outros parâmetros. Eles avaliam e determinam se a atuação é necessária ou não [2].

Figura 1 – Variações de Relés de Distancia

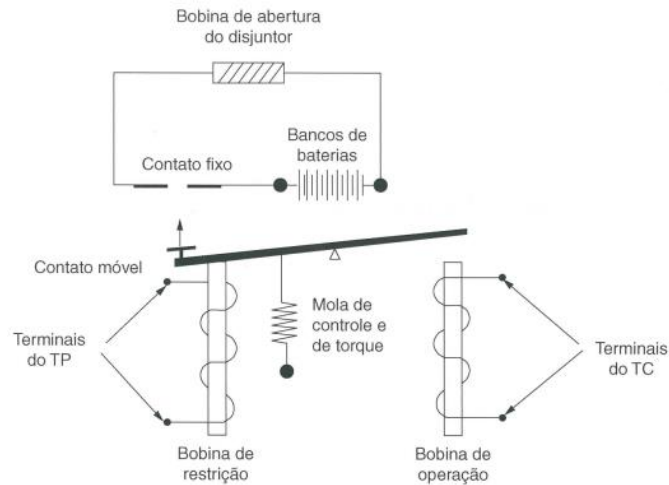


Fonte: [3].

2.1 Relé de Distância

Os relés de distância são dispositivos que operam monitorando a impedância de toda a rede que foram configurados para proteger. Eles são alimentados pela tensão e corrente do circuito protegido, o que faz com que seu tempo de resposta seja proporcional à distância entre o ponto de falha e a localização do dispositivo. Uma vez que a tensão no ponto de falha é praticamente nula, e à medida que nos afastamos desse ponto em direção à fonte, a tensão aumenta devido à queda de tensão na linha de transmissão (LT), o relé de distância processa a tensão em seus terminais através dos transformadores de potência (TP) e a corrente de defeito que circula nesse ponto. Isso resulta em uma expressão V/I , que fornece um valor de impedância unitária que permite determinar a distância relativa a um trecho a partir do alimentador. Se a impedância relativa ao local da falha for menor que a configurada no relé de distância, ele atuará, cortando o fornecimento de energia para aquele local [5]. O funcionamento simplificado do relé pode ser observado na Figura 2, onde ele é composto por uma bobina de operação e outra de restrição. A bobina de operação está diretamente ligada aos terminais do transformador de corrente (TC), recebendo a corrente modular do sistema, que gera uma força magnética sobre a haste, forçando-a para baixo. Em caso de atuação, a força cessa e a haste sobe. Quanto à bobina de restrição, a grandeza relevante é a tensão, que é medida pelo TP. Enquanto não há necessidade de atuação, ela aplica uma força magnética com um sentido semelhante à bobina de operação. Se a força produzida pela bobina de operação superar a produzida pela bobina de restrição, o contato móvel se conecta com a bateria de tensão auxiliar na bobina de abertura, realizando a operação [1].

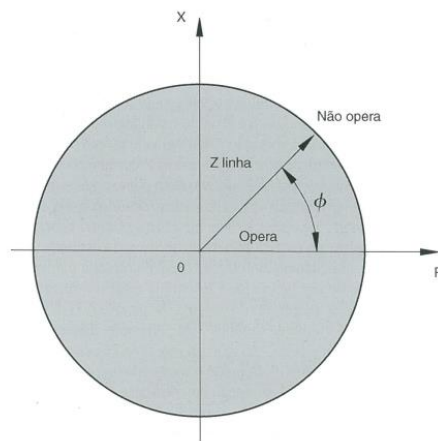
Figura 2 – Princípio de funcionamento de um relé de distância.



Fonte: [1].

As características de atuação dos relés de distância podem ser representadas por planos R-X, como ilustrado na Figura 3. A zona de atuação é definida como um lugar geométrico com uma impedância constante, representada por um círculo com centro em (0,0). Assim, para valores de tensão e corrente cuja impedância resultante esteja dentro do círculo, o relé atuará. Portanto, o círculo é a representação da área de atuação do relé [1].

Figura 3 – Características dos relés de distância.



Fonte: [1].

2.2 Coordenação entre os Relés de Distância

Os relés de distância operam com base na impedância do sistema e respondem a qualquer direção de corrente, detectando curtos-circuitos tanto a montante quanto a jusante do local onde o dispositivo está instalado. No entanto, em muitos casos, essa característica não é desejada. Portanto, são instaladas unidades direcionais que permitem selecionar a direção na qual o relé detectará as correntes de curto-circuito. Após a definição da direção de operação, o relé deve ser ajustado para apresentar um torque positivo quando a impedância estiver abaixo do valor ajustado, com esse valor ajustado como um parâmetro determinado como uma porcentagem da linha de transmissão à qual ele está associado [5].

Para ilustrar a coordenação entre relés, considere o sistema apresentado na Figura 4, com 6 LTs (L1 a L6) e 4 relés (R1 a R4), e uma falha P que ocorre na L3. Conforme

mostrado na Figura 4, após a ocorrência da falha, temos tensões e impedâncias nulas no ponto da falha P, que aumentam proporcionalmente à medida que nos afastamos desse ponto e ocorre uma interrupção nas correntes a montante e a jusante, embora essas correntes mantenham valores constantes ao longo da LT. A coordenação dos relés após a ocorrência da falha deve seguir os seguintes passos:

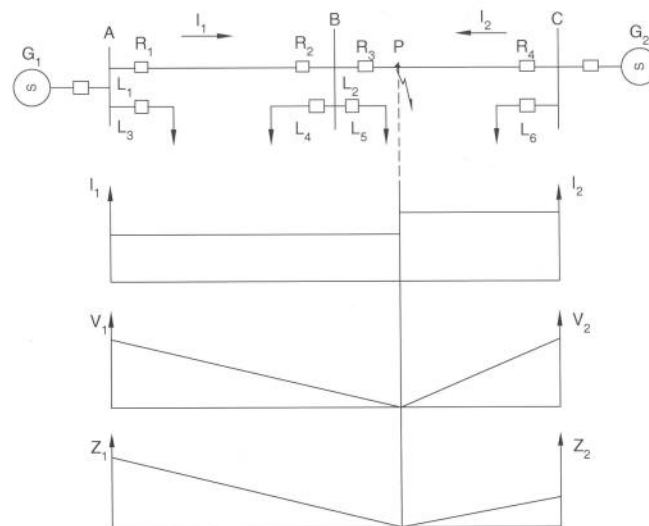
- Inicia-se uma contagem de tempo predefinida pelo projetista.
- As unidades direcionais e de medição são ativadas.
- As unidades direcionais recebem os valores de corrente e tensão, e com base nessas informações, os contatos do relé são abertos ou fechados, permitindo sua operação.

Após esses passos, os relés atuarão da seguinte forma:

- O primeiro relé a atuar deve ser o R3, devido à sua proximidade com o ponto de falha e à menor impedância vista pelos relés.
- Em seguida, o R4 deve atuar, seguindo o mesmo princípio do relé anterior, isolando assim a falha.
- O relé R1 atua como uma retaguarda caso o R3 não funcione, enquanto o R2 é ajustado para não atuar nessa falha, o que é determinado pela unidade direcional.

Se tudo ocorrer conforme planejado, essa deve ser a sequência de atuação do sistema de relés de distância no exemplo. No entanto, em casos raros, os curtos-circuitos podem ocorrer em pequenas distâncias dos polos do TP, e se não houver formação de arcos durante o processo, a tensão pode chegar à nulidade, o que pode fazer com que o relé, que é alimentado por essas tensões, não funcione corretamente, gerando falhas na atuação. Geralmente, é necessário um mínimo de 4% da tensão nominal para garantir o pleno funcionamento do relé nessas situações [1].

Figura 4 – Sistema de Ponteia Protegido por relés de distância.



Fonte: [1].

2.3 Tipos de relés de distância

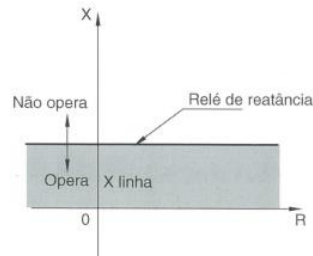
Os relés de distância são categorizados com base em suas características operacionais em determinadas aplicações, sendo divididos em três famílias principais:

- **Impedância:** Este é o tipo de relé mais comumente utilizado e é adequado para proteger linhas de transmissão (LTs) de comprimento médio para sua

tensão nominal. As características de operação desse tipo podem ser visualizadas na Figura 3.

- **Reatância:** Relés desse tipo são indicados para a proteção de LTs de comprimento curto em relação à sua tensão nominal. As características de operação podem ser vistas na Figura 5.

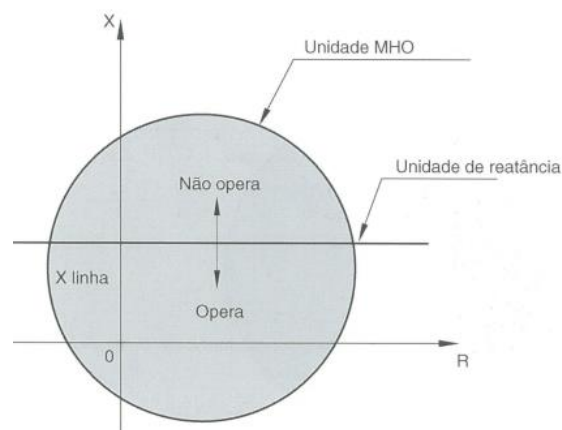
Figura 5 – Características do Relé de reatância.



Fonte: [1].

- **Admitância ou MHO:** Esses relés são apropriados para proteger LTs de comprimento longo em relação à sua tensão nominal. Funcionam como relés direcionais, detectando curtos-circuitos em apenas uma direção, ao contrário dos relés de reatância e impedância que detectam curtos em todos os 4 quadrantes. Devido a essas diferenças, há necessidade de variações em sua zona de operação, podendo ser classificados como MHO, impedância deslocada, MHO deslocado para acomodar R em faltas muito elevadas, MHO deslocado invertido e MHO com unidade de reatância [4]. Suas características de operação podem ser vistas na Figura 6.

Figura 6 – Características do Relé de admitância.



Fonte: [1].

3 METODOLOGIA NA CONSTRUÇÃO DO CÓDIGO

Após apresentar as características básicas dos relés mais utilizados, podemos avançar para a construção de um modelo de código que simule uma das variações dos relés, com finalidade didática. O modelo foi desenvolvido para resolver os tipos mais comuns de problemas encontrados em cursos relacionados aos relés de distância. A escolha do problema a ser resolvido é definida pelo usuário no início do código, atribuindo um valor à variável NUM. Dependendo do valor atribuído, o código iniciará a resolução de um tipo específico de problema. Antes de resolver o problema escolhido,

são solicitados dados comuns a todas as resoluções, conforme demonstrado na parte do código apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Início do Código.

```
clc;
num = input('O que deseja calcular? 1 - para Zsec 2 - distancia de falta 3 - para Zsec em 3 zonas de proteção: ');
L_Linha1 = input('Comprimento da LT (Km): ');
L_Linha2 = input('Comprimento da LT (Km): ');
V_TT = input('Tensão do Transformador (kV): ');
Zt = input('Impedância do TT em KVA: ');
RTC = input('Relação de Transformação do TC: ');
RTP = input('Relação de Transformação do TP: ');
```

Fonte: Autoria Própria.

O primeiro tipo de problema mais comum relacionado aos relés de distância, associado a NUM = 1, envolve questões de proteção de linha simples com um único dispositivo. Nesse caso, a porcentagem da linha que precisa ser protegida é definida de acordo com o enunciado, assim como a impedância total da LT em Ohms. Preenchendo os valores quando solicitados e somando-os aos valores obtidos no início do programa, é possível calcular a Zsec, que representa a impedância vista no secundário pelo relé. Essa impedância deve ser ajustada para que o relé detecte faltas na zona de proteção especificada, conforme a parte do código exemplificada na Figura 8.

Figura 8 – Código referente a questões de LT simples.

```
if num == 1
% Entrada das variáveis
L_Linhapcent = input('porcentual de proteção Z1 da LT: ');
Z_LT = input('Impedância da Linha (Ohms): ');
% Cálculo da Z secundaria
Zsec = (L_Linhapcent/100)*Z_LT *L_Linha1*(RTC/RTP);
% Exibição dos resultados
disp('--- Resultados ---');
disp(['Z rele de Distancia: ' num2str(Zsec)]);
```

Fonte: Autoria Própria.

O segundo tipo de problema, associado a NUM = 2, é utilizado para determinar a localização de uma falta em uma linha. São solicitados dados como tensão, impedância, potência e fator de potência de alimentação da LT, bem como a impedância do relé. Esses valores são usados para calcular a tensão e corrente no relé, a partir dos quais é possível obter a distância da falta em quilômetros, como demonstrado no código apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Código referente ao cálculo de distância da falta em LT simples.

```
elseif num == 2
% Entrada das variáveis
V_source = input('Tensão da fonte (kV): ');
Z_source = input('Impedância da fonte (Ohms): ');
P_load = input('Potência do dispositivo de carga (kW): ');
pf = input('Fator de potência: ');
Z_relay = input('Impedância do relé (Ohms): ');

% Cálculo da distância de interrupção
S_load = P_load / pf; % Potência aparente do dispositivo de carga
I_load = S_load / (sqrt(3) * V_source); % Corrente do dispositivo de carga
V_drop = I_load * (Z_source + Z_relay); % Queda de tensão total (fonte + relé)
V_relay = V_source - V_drop; % Tensão no relé
I_relay = V_relay / Z_relay; % Corrente no relé
Distance = abs(V_source / I_relay); % Distância de interrupção

% Exibição dos resultados
disp('--- Resultados ---');
disp(['Distância de Interrupção: ' num2str(Distance) ' km']);
plot(I_load, S_load, 'LineWidth', 2);
xlabel('Corrente (A)');
ylabel('Tensão de Saída');
title('Simulação de um Relé de Distância');
grid on;
```

Fonte: Autoria Própria.

O terceiro tipo de problema, associado a NUM = 3, diz respeito a situações em que existem várias LTs e três zonas de proteção, implementadas por vários relés de distância. Nesse cenário, é necessário determinar a Zsec para a configuração dos relés. Além dos dados comuns, são solicitados os valores de resistência e reatância das duas LTs. Como esse tipo de questão pode exigir a correção da impedância devido à variação de temperatura das linhas, o usuário é questionado se o enunciado requer essa correção, o que é determinado atribuindo um valor à variável NUM1. Se NUM1 for igual a 1, ocorrerá a correção da impedância pela temperatura; se for igual a 2, a correção não será necessária, e a impedância total da linha será apenas a resistência por quilômetro multiplicada pelo comprimento total de cada LT em quilômetros. Essa parte do código pode ser vista na Figura 10, onde são solicitados dados de temperatura, incluindo a temperatura inicial em que os dados de impedância estão corretos e a temperatura à qual os cabos estão submetidos.

Figura 10 – Código referente ao cálculo das impedâncias totais em LT1 e LT2.

```
elseif num == 3
    RL1 = input('Resistencia da Linha 1: ');
    RL2 = input('Resistencia da Linha 2: ');
    XL1 = input('Reatancia da Linha 1: ');
    XL2 = input('Reatancia da Linha 2: ');
    num1 = input('As impedancias tem correção por temperatura? 1 - Sim 2 - Não: ');
    if num1 == 1
        TempF = input('Temperatura final: ');
        TempP = input('Temperatura Inicial: ');
        RL1F = RL1*(1+0.00393*(TempF-TempP));
        RL2F = RL2*(1+0.00393*(TempF-TempP));
        ZL1 = (abs((RL1F+1j*XL1)*L_Linha1));
        ZL2 = (abs((RL2F+1j*XL2)*L_Linha2));
    else num1==2
        ZL1 = RL1*L_Linha1;
        ZL2 = RL2*L_Linha2;
    end
```

Fonte: Autoria Própria.

Após definir as impedâncias totais das LTs, verifica-se a necessidade de considerar a impedância percentual do transformador (TT) no cálculo da impedância média em ohms da LT. Para NUM2 = 1, essa consideração é necessária, enquanto para NUM2 = 2, não é requerida. A parte do código que aborda essa verificação pode ser visualizadas na Figura 11 e a equação que ela representa, pode ser vista na Equação 1.

Figura 11 – Código referente ao cálculo da impedância media Ôhmica e sua versão da bibliografia.

```
num2 = input('A impedancia do TT é considerada? 1 - Sim 2 - Não: ');
if num2 == 1
    Ztpercent = input('impedancia percentual do TT em %: ');
    Zm = (10*(V_TT)^2*Ztpercent)/Zt;
else num2==2
end
```

Fonte: Adaptado de [1].

$$Z_m = \frac{10 \cdot V_{nt}^2 \cdot Z_{tr}}{P_{nt}} \quad \text{eq.1}$$

Prosseguindo para a última verificação, avalia-se se a corrente máxima do cabo (Imc) interfere na relação de transformação de corrente (RTC). Caso seja necessário, o ajuste é realizado com base nos dados fornecidos pelo enunciado. Esse ajuste pode ser observado na Figura 12 e as equações que ela representa podem ser vistas na Equação 2

(cálculo do RTP) e 3 (cálculo de ajuste do RTC). Com esses pequenos ajustes concluídos, partimos para o cálculo das impedâncias ajustadas para as três zonas de proteção: Z1, Z2 e Z3. Solicitamos os valores das porcentagens protegidas da LT1 pelo relé 1 e da LT2 pelo relé 2. Esses valores são utilizados nas equações do código, conforme apresentado na Figura 13, para determinar o comprimento em quilômetros das zonas de proteção.

Figura 12 – Código referente ao cálculo de ajuste do RTC e cálculo do RTP e sua versão da bibliografia.

```
RTP = (V_TT*sqrt(3))/(115/1000);
disp(['RTP no secundario do rele de Distancia: ' num2str(RTP)]);
num3 = input('RTC depende da corrente maxima do cabo? 1 - Sim 2 - Não: ');
if num3 == 1
    Imc = input ('i maxima do tipo de cabo: ');
    Impercent = input ('i maxima percentual do cabo em %: ');
    IM = Imc*Impercent;
    RTC = IM/5;
else
end
```

Fonte: Adaptado de [1].

$$RTP = \frac{V_p}{V_s} = \frac{V_p}{115/\sqrt{3}} \quad \text{eq.2}$$

$$RTC = \frac{I_p}{I_s} = \frac{0,75 * I_{Max \text{ do cabo}}}{5} \quad \text{eq.3}$$

Figura 13 – Código referente ao cálculo do tamanho das zonas de proteção.

```
%Calculo do Ajuste das impedancias de cada Zona no relé
L_Linhapcent = input ('porcentual de proteção Z1 da LT1 em fração: ');
L_Linhapcent2 = input ('porcentual de proteção da Z2 somente na LT2 em fração: ');
Z1=(L_Linhapcent*ZL1)*(RTC/RTP);
Z2=(ZL1+L_Linhapcent2*ZL2)*(RTC/RTP);
Z3=(ZL1+ZL2+Zm)*(RTC/RTP);
disp('--- Resultados ---');
disp(['Z1 no secundario do rele de Distancia: ' num2str(Z1)]);
disp(['Z2 no secundario do rele de Distancia: ' num2str(Z2)]);
disp(['Z3 no secundario do rele de Distancia: ' num2str(Z3)]);
```

Fonte: Autoria Própria.

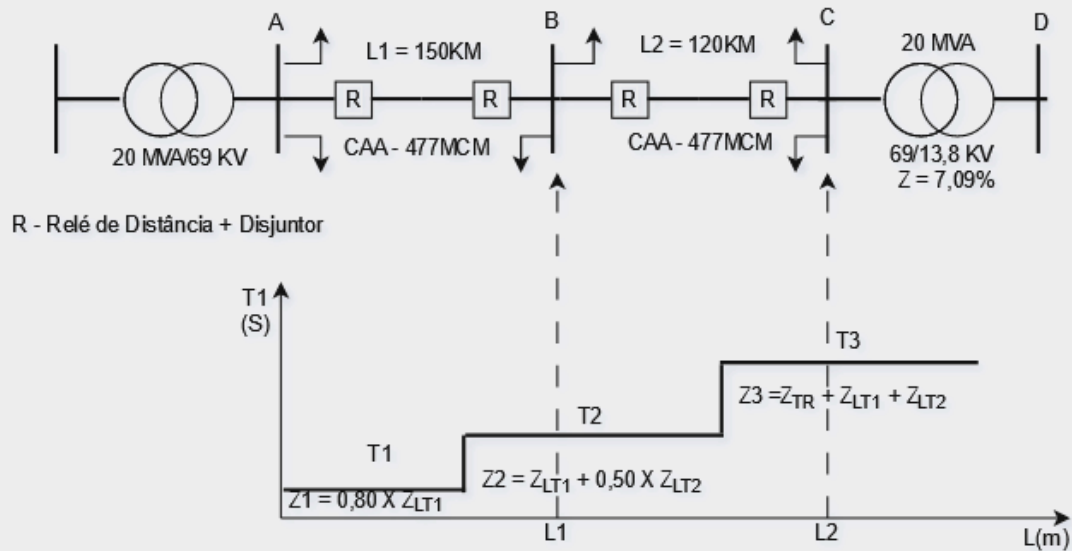
Com a explicação do código feita, pode-se partir para um teste em que se pode realizar a verificação da funcionalidade e eficiência do código em relação à literatura e quantificar isso.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Após explicar a construção do código, pode-se realizar um teste de eficiência. Usando como referência o Exemplo 3.1 do Livro [1], conforme mostrado na Figura 14. Esse exemplo se enquadra no tipo de questão associada a NUM = 3, sendo as mais complexas contidas no código, o que permite testar a funcionalidade da programação.

Figura 14 – Exemplo de teste de Código.

Considerando o sistema mostrado no circuito a seguir. Calcular os ajustes dos relés de distância à impedância instalados na subestação A A carga máxima das linhas L₁ e L₂ está limitada a 75% da capacidade de condução de corrente dos condutores.



Fonte: Adaptada de [1].

Conforme apresentado, os dados fornecidos incluem a tensão da LT de 69 kV, a potência de 20 MVA, o comprimento das duas LTs de 150 km e 120 km, e a impedância percentual do transformador, que é de 7,09%. Restam apenas informações sobre o tipo de cabo, que podem ser obtidas a partir da Tabela 1. Essas informações incluem a Corrente Nominal de 670 A, a Resistência CC a 20°C de 0,1195 Ω/km e a Reatância Indutiva de 0,2672 Ω/km.

Tabela 1 – Características dos cabos CAA – cabos de alma de aço.

Código	Seção	Seção		Formação		Peso kg/km	Corrente nominal A	Carga de ruptura	Resistência c.c a 20° C Ohm/km	Reatância indutiva Ohm/km	Reatância capacitiva MOhm/km
	AWG/MCM	mm ² Al	mm ² Aço	Al	Aço						
Swan	4,0	21,1	3,53	6	1	85,4	140	830	1,35400	0,4995	0,08421
Sparrow	2,0	33,6	5,6	6	1	135,9	180	1265	0,85070	0,3990	0,00793
Raven	1/0	53,4	8,92	6	1	216,6	230	1940	0,53510	0,4077	0,07557
Quail	2/0	67,4	11,2	6	1	272,6	270	2425	0,42450	0,3983	0,07346
Pigeon	3/0	85	14,2	6	1	343,3	300	3030	0,33670	0,3959	0,07128
Penguin	4/0	107	17,9	6	1	433,3	340	3820	0,26710	0,3610	0,06917
Partridge	266,8	135	22	26	7	546,3	460	5100	0,21370	0,2989	0,06675
Ostrich	300,0	152	24,7	26	7	614,8	490	5730	0,19000	0,2846	0,06569
Linnet	336,6	171	27,8	26	7	689,2	530	6357	0,16940	0,2802	0,06457
Ibis	397,5	201	32,7	26	7	814,3	590	7340	0,14340	0,2740	0,06308
Hawk	477,0	242	39,2	26	7	978,0	670	8820	0,11950	0,2672	0,0614
Dove	556,5	282	45,9	26	7	1140,0	730	1019	0,10250	0,2610	0,05997
Grosbeak	636,0	322	52,5	26	7	1299,0	789	1104	0,08969	0,2570	0,05789
Drake	795,0	403	65,4	26	7	1629,0	900	1417	0,07170	0,2479	0,05668

Fonte: [1].

Com os dados já coletados, podemos prosseguir com a resolução do problema utilizando o código desenvolvido. A janela de comando (Command Window) do software Matlab® exibe o processo de execução do programa e os resultados obtidos, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Execução da Programação.

```

Command Window
O que deseja calcular? 1 - para Zsec 2 - distancia de falta 3 - para Zsec em 3 zonas de proteção: 3
Comprimento da LT (Km): 150
Comprimento da LT (Km): 120
Tensão do Transformador (kV): 69
impedancia do TT em KVA: 20000
Relação de Transformação do TC: 0
Relação de Transformação do TP: 0
Resistencia da Linha 1: 0.1195
Resistencia da Linha 2: 0.1195
Reatancia da Linha 1: 0.2672
Reatancia da Linha 2: 0.2672
As impedancias tem correção por temperatura? 1 - Sim 2 - Não: 1
Temperatura final: 75
Temperatura Inicial: 20
ZL1 no secundario do rele de Distancia: 45.6248
ZL2 no secundario do rele de Distancia: 36.4999
A impedancia do TT entra na conta? 1 - Sim 2 - Não: 1
impedancia percentual do TT em %: 7.09
Zm no secundario do rele de Distancia: 16.8777
RTP no secundario do rele de Distancia: 1039.2305
RTC depende da corrente maxima do cabo? 1 - Sim 2 - Não: 1
i maxima do tipo de cabo: 670
i maxima percentual do cabo em %: 0.75
RTC no secundario do rele de Distancia: 100.5
porcentual de proteção Z1 da LT1 em fração: 0.8
porcentual de proteção da Z2 somente na LT2 em fração: 0.5
--- Resultados ---
Z1 no secundario do rele de Distancia: 3.5298
Z2 no secundario do rele de Distancia: 6.1771
Z3 no secundario do rele de Distancia: 9.5741
fx >>

```

Fonte: Autoria Própria.

A partir dos resultados gerados pelo código, podemos realizar uma comparação com os valores fornecidos pela literatura, identificando as diferenças entre eles e as razões para essas discrepâncias. Essa análise é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação entre os dados obtidos pelo código com os da literatura.

Variável	Código	Livro	Erro (%)
ZL1	45,625	45,500	0,275
ZL2	36,499	36,400	0,272
Zm	16,877	16,800	0,458
RTP	1039,231	1039,200	0,003
RTC	100,500	100,000	0,500
Z1	3,529	3,500	0,829
Z2	6,177	6,120	0,931
Z3	9,574	9,490	0,885

Fonte: Autoria Própria.

Ao examinar os resultados de erro percentual na Tabela 2, podemos concluir que o código demonstra uma eficácia considerável em seus resultados, uma vez que nenhum valor de erro ultrapassa 1%. Isso valida o código como uma sólida referência para a verificação de resultados em questões desse tipo.

5 CONCLUSÃO

As diferenças entre os resultados obtidos por meio da programação e aqueles fornecidos pela literatura são mínimas, na maioria dos casos, resultando de arredondamentos não realizados pelo programa. Essas pequenas discrepâncias, no entanto, não prejudicam o propósito acadêmico do código, que serve como um auxílio no

estudo e aprendizado de estudantes em questões relacionadas a relés de distância de impedância. Dado que os erros são inferiores a 1%, o código pode ser considerado um sucesso em relação ao seu objetivo original.

Vale ressaltar que o código atualmente abrange apenas um pequeno conjunto de tipos de relés de distância, limitando-se aos relés indutivos. No entanto, existe a possibilidade de expansão da programação em trabalhos futuros, seja pelo próprio autor ou por terceiros, para incluir diversos tipos de relés de distância, como os de reatância e admitância (MHO e suas variações), ou até mesmo para outros tipos de relés, como diferencial e sobretensão, entre outras variações existentes.

REFERÊNCIAS

- [1] MAMEDE FILHO, Joao; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTENCIA**. 3. ed. Fortaleza: Grupo Editorial Nacional, 2011. 622 p. OLIVEIRA, Lincoln Társio Silva.
- [2] Modelagem e implementação de um relé de sobrecorrente em ambiente Matlab-Simulink para simulações de sistemas elétricos no domínio do tempo. 2019. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27816>. Acesso em: 28 jan. 2023. VIANA, Melissa do Nascimento Rebouças. Modelagem e simulação do sistema de proteção de um alimentador de distribuição de média tensão utilizando PS Simul. 2019. 50 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- [3] BOLETIM DA INDUSTRIA (México). **RELE DE DISTANCIA DE FASE Y TIERRA**. 2023. Disponível em: <https://www.boletinindustrial.com/producto-imagen.aspx?pid=95166>. Acesso em: 12 ago. 2023.
- [4] LEAL, Mariana Garcia. **PROTEÇÃO CONTRA PERDA DE SINCRONISMO UTILIZANDO SINCROFASORES – APLICAÇÃO NO SISTEMA ACRE - RONDÔNIA**. 2013. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2013062701.pdf>. Acesso em: 11 set. 2023.
- [5] ANDERSON, P. M. *et al.* **Power System Protection**. 2. ed. Eua: Ieee Press Series, 2022. 1456 p. (POWER ENGINEERING). CD-ROM.