

# DESENVOLVIMENTO DE DASHBOARD PARA ESTUDOS DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE EM CABINES PRIMÁRIAS

DASHBOARD DEVELOPMENT FOR PROTECTION AND SELECTIVITY STUDIES IN PRIMARY CABINS

**Aurélio Vinícius Teixeira de Carvalho**

avtc@discente.ifpe.edu.br

**Herick Talles Queiroz Lemos**

herick.lemos@pesqueira.ifpe.edu.br

---

## RESUMO

A energia elétrica é essencial na vida moderna, pois ela permite o avanço tecnológico e nos conecta globalmente. Porém, está sujeita a diversas anomalias que podem interromper a distribuição dessa energia. Para contornar esses problemas, existem sistemas de proteção com o intuito de atuar de forma coordenada e seletiva, garantindo a integridade dos equipamentos que compõem a instalação elétrica e isolando apenas o componente com defeito da rede. Com base nisso, este trabalho apresenta uma ferramenta criada a partir do Microsoft Excel, para auxiliar no estudo de proteção e seletividade em cabines primárias, gerando coordenogramas de algumas funções de proteção com o intuito de verificar a coordenação dos equipamentos de proteção da subestação com a proteção da distribuidora. A interface permite que o usuário insira dados e simule diversos cenários. Além disso, é possível exportar um resumo dos resultados no formato .docx, possibilitando a inserção de dados em memoriais descritivos e técnicos para submissões de projetos nas concessionárias. Para validar a ferramenta desenvolvida, foi realizado um estudo de caso com uma subestação de 500 kVA com a finalidade de verificar a coordenação dos equipamentos conforme os dados fornecidos.

Palavras-chave: Proteção. Seletividade. Coordenação. Excel. Subestação. *Visual Basic*.

## ABSTRACT

Electrical energy is essential in modern life, because it enables technological advancement and connects us globally. However, it is subject to several anomalies that can interrupt the distribution of this energy. To overcome this, there are protection systems for the purpose of acting in a coordinated and selective manner to guarantee the integrity of the equipment that makes up the electrical installation and isolate only the faulty component of the network. In this context, this work presents a tool created from Microsoft Excel, to assist in the study of protection and selectivity in primary cabins, generating coordinate charts of some protection functions for the

purpose to verify the coordination of the substation's protection equipment with the power distribution company. The interface allows the user to enter data and simulate different scenarios. Besides, it is possible export a resume of the results in .docx format, making it possible to insert data into descriptive and technical reports for Project submissions at power distribution company. To validate the developed tool, a case study was carried out with a 500 kVA substation for the purpose to verify the coordination of the equipment according to the data provided.

Keywords: Protection. Selectivity. Coordination. Excel. Substation. Visual Basic.

---

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é indispensável na vida do ser humano, sendo de fundamental importância para o desenvolvimento das sociedades atuais. A partir de sua oferta, conseguimos conservar alimentos e convertê-la em outras formas de energia, tais como a energia luminosa, através das lâmpadas, a energia mecânica, através dos motores e a energia térmica, através do chuveiro e os fornos elétricos.

Diante dessa necessidade, os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) devem operar de forma contínua e confiável para manter o pleno fornecimento de energia elétrica. Entretanto, segundo André (2017), o SEP está constantemente exposto a anomalias tais como: falhas de operação, descargas atmosféricas, distúrbios de tensão, curtos-circuitos, dentre outros. Dessa forma, faz-se necessário um sistema de proteção eficiente e seletivo que assegure a confiabilidade e continuidade no suprimento de energia.

Segundo Mardegan (2020), o estudo de seletividade consiste em determinar os ajustes dos dispositivos de proteção de forma que, na ocorrência de um curto-circuito, opere apenas o dispositivo mais próximo da falta, de maneira a desenergizar somente as instalações localizadas no circuito afetado, no menor tempo possível e ainda protegendo os equipamentos ou sistemas.

Além da seletividade, outro atributo importante do sistema de proteção é a coordenação, que lida com a hierarquia de atuação dos dispositivos através do controle do tempo de disparo entre dois ou mais equipamentos de proteção. Se os tempos de atuação entre as proteções consecutivas forem muito pequenos, fazendo disparar os dois dispositivos de proteção de forma simultânea, podemos dizer que não há coordenação entre os tempos de disparos e, portanto, os dois elementos não estão coordenados e, como consequência, não há seletividade entre eles (MAMEDE FILHO, 2018).

Um exemplo de ocorrência no qual o SEP está exposto foi o apagão que ocorreu no dia 15 de agosto de 2023, que afetou 25 estados e o distrito federal. Segundo o Relatório de Análise de Perturbações (RAP), do Operador Nacional do Sistema (ONS), a perturbação teve início com a abertura da LT 500kV Quixadá – Fortaleza II que foi provocada pela atuação acidental da proteção de fechamento sob falta (*Switch Onto Fault – SOFT*) durante operação normal da linha. Também foi observada a atuação incorreta do seu esquema de religamento automático.

Para otimizar o estudo de seletividade dos equipamentos de proteção, faz-se necessário o uso de *softwares* específicos que possuem um custo de aquisição elevado. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma

ferramenta computacional, através de ferramentas disponíveis no programa de Planilha Eletrônica Microsoft Excel, como o *Visual Basic for Application* (VBA).

A ferramenta desenvolvida terá a capacidade de criar coordenogramas das funções de proteção 50/51 (sobrecorrente de fase instantânea e temporizada), 50N/51N (sobrecorrente de neutro instantânea e temporizada) e 51NS (neutro sensível). Por meio dos coordenogramas, será possível validar os ajustes das proteções e verificar a coordenação entre o relé do consumidor e o relé da concessionária de energia, bem como a coordenação entre o relé do consumidor e o elo fusível instalado no ponto de derivação da rede da concessionária. Além disso, serão implementadas opções para verificação da saturação do transformador de corrente e exportação dos coordenogramas e resumo dos ajustes no formato .docx, tornando-os prontos para inclusão em documentos de especificações técnicas e memorial descritivo.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Princípios gerais**

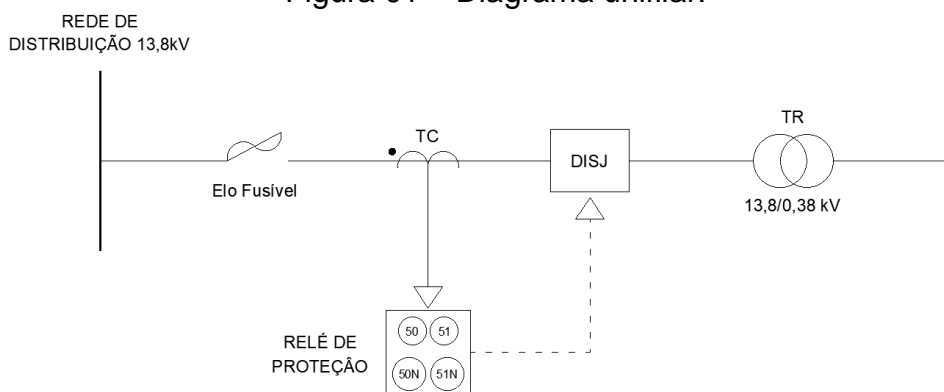
As cabines primárias, também conhecidas como subestações abrigadas ou plenas, são responsáveis por adequar o nível de tensão da rede elétrica de distribuição e é composta por dispositivos de manobra, controle, proteção e transformação, que ficam agrupados em cubículos.

A Neoenergia Pernambuco, através da norma de Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão de Distribuição à Edificação Individual (DIS-NOR-036), exige o uso de disjuntores de média tensão nos seguintes tipos de instalações:

- a) Subestação unitária com capacidade instalada maior que 300 kVA;
- b) Subestação abrigada com mais de uma unidade transformadora, independentemente da capacidade instalada;
- c) Instalação com circuito primário subterrâneo após a proteção geral;
- d) Instalação com um ou mais transformadores ao tempo com capacidade instalada total maior que 500 kVA;
- e) Instalação de geração em paralelo acima de 75 kVA.

Segundo Mamede Filho (2013), os disjuntores de média tensão são equipamentos destinados à interrupção e ao restabelecimento das correntes elétricas em um determinado ponto do circuito. Porém, os disjuntores devem ser instalados acompanhados de relés de proteção, que – após análise de características elétricas do circuito, como correntes, tensões e potência – podem enviar ou não a ordem de comando para o disjuntor. Os sinais de tensão e corrente do sistema elétrico são adquiridos pelo relé de forma indireta por meio de transformadores de tensão (TPs) e de corrente (TCs). A Figura 01 apresenta um diagrama unifilar ilustrando a ligação e operação do sistema de proteção de uma cabine primária típica.

Figura 01 – Diagrama unifilar.



Fonte: Autoria Própria.

Existem vários tipos de funções de proteção de relés e essas funções são especificadas de acordo com as funções de proteção necessárias para cada sistema elétrico. As funções de proteção possuem um código numérico padronizados pela norma *ANSI – American National Standards Institute*.

De acordo com o item 7.33.3.2 da DIS-NOR-036 o disjuntor deve ser acionado através de relés de proteção secundários com as funções de proteção contra sobrecorrentes, sub e sobretensão e inversão de fases. A Tabela 1 apresenta o código ANSI relacionado as funções de proteção que serão abordadas na ferramenta.

Tabela 1 - Funções de proteção.

Função de Proteção	Código ANSI
50	Sobre Corrente Instantâneo
50N	Sobre Corrente Instantâneo de Neutro
51	Sobre Corrente Temporizado
51N	Sobre Corrente Temporizado de Neutro
51NS	Proteção de Neutro Sensível

Fonte: American Standard C37.2-1991.

Além das funções de proteção atreladas ao relé, de acordo com o item 7.33.3.5 da DIS-NOR-036, devem ser previstas chaves fusíveis no ponto de conexão da distribuidora, com a função de proteção de retaguarda do disjuntor. Segundo Mamede Filho (2020), o elo fusível é um elemento metálico no qual é inserida uma parte sensível a correntes elétricas elevadas, fundindo-se e interrompendo o circuito em um intervalo de tempo inversamente proporcional à grandeza da referida corrente. A principal aplicação dos elos fusíveis é a proteção de sobrecorrentes de circuitos primários.

## 2.2 Determinação das correntes de curto-circuito

Uma parte importante do estudo de proteção e seletividade é a análise de curto-circuito. É padrão as concessionárias fornecerem as impedâncias equivalentes de Thévenin em componentes de sequência no ponto de entrega da unidade consumidora. Conhecendo-se essas impedâncias e as impedâncias dos equipamentos, pode-se determinar os níveis de curto-circuito no primário e secundário do transformador da subestação, a partir das Equações 1, 2 e 3.

$$I_{3F} = \frac{1}{Z_{1,eq}} \quad (1)$$

$$I_{2F} = -\frac{j\sqrt{3}}{2} I_{3F} \quad (2)$$

$$I_{1F} = \frac{3}{2Z_{1,eq} + Z_{0,eq} + 3Z_F} \quad (3)$$

Em que:

- $I_{3F}$  – corrente de curto-circuito trifásico franco em por unidade;
- $I_{2F}$  – corrente de curto-circuito bifásico franco em por unidade;
- $I_{1F}$  – corrente de curto-circuito monofásico em por unidade;
- $Z_{1,eq}$  – equivalente de Thévenin de sequência positiva no ponto de falta em por unidade;
- $Z_{2,eq}$  – equivalente de Thévenin de sequência negativa no ponto de falta em por unidade;
- $Z_{0,eq}$  – equivalente de Thévenin de sequência zero no ponto de falta em por unidade;
- $Z_F$  – impedância de falta em por unidade.

As Equações 1, 2 e 3 são válidas para sistemas com impedâncias de sequência positiva e negativa idênticas, submetidos a defeitos com tensão pré-falta de 1 pu. Desprezando-se as impedâncias dos cabos que interligam o ponto de entrega ao primário do transformador da subestação, têm-se que as impedâncias equivalentes assumirão os valores da Tabela 2, conforme o ponto de análise do defeito.

Tabela 2 - Impedâncias de sequência equivalentes.

Impedância	Falta no primário	Falta no secundário
$Z_{1,eq}$	$Z_{1,PE}$	$Z_{1,PE} + Z_{TR}$
$Z_{0,eq}$	$Z_{0,PE}$	$Z_{TR}$

Fonte: Silva (1997)

Na Tabela 2,  $Z_{1,PE}$  e  $Z_{0,PE}$  são, respectivamente, as impedâncias equivalentes de Thévenin de sequência positiva e negativa no ponto de entrega, fornecidas pela Neoenergia Pernambuco. Já  $Z_{TR}$ , é a impedância de curto-circuito do transformador da subestação, assumidamente com ligação delta-estrela-aterrada.

Para reflexão das correntes de curto-circuito no secundário para o primário, utiliza-se a Equação 4, cuja constante está apresentada na Tabela 3.

$$I_{iF,p} = k \times I_{iF,s} \quad (4)$$

Em que:

- $I_{iF,p}$  – corrente do curto-circuito  $i$  no secundário referida ao primário em por unidade;

- $I_{iF,s}$  – corrente do curto-circuito  $i$  no secundário em por unidade;
- $k$  – constante de reflexão da corrente de curto-circuito.

Tabela 3 - Constante de reflexão.

Curto-circuito	Constante $k$
Trifásico	1
Bifásico	$2/\sqrt{3}$
Monofásico	$1/\sqrt{3}$

Fonte: Adaptado de Silva (1997)

### 2.3 Critérios de avaliação da saturação do transformador de corrente

Segundo Madergan (2020), a saturação ocorre quando a tensão no secundário do TC, determinada pela Equação 5, excede o valor da tensão máxima secundária do equipamento definida através da ABNT NBR 6856 de 2021. Quando da ocorrência da saturação, segundo Silva (2020), verifica-se certa distorção na corrente secundária, podendo comprometer a leitura de seu valor eficaz por um relé, deixando assim o sistema de proteção instável.

$$V_s = (Z_{TC} + Z_{relé} + Z_{cabo}) \times \frac{I_{cc}}{RTC} \leq V_{s,máx} \quad (5)$$

Em que:

- $V_s$  – tensão secundária;
- $Z_{TC}$  – impedância do enrolamento secundário do TC em Ohms fornecida pelo fabricante ou estimada pela Equação 6;
- $Z_{relé}$  – impedância do relé em Ohm;  
 $Z_{cabo}$  – impedância do condutor em Ohm;
- $I_{cc}$  – corrente de curto-circuito em ampères;
- $RTC$  – relação de transformação do TC;
- $V_{s,máx}$  – tensão secundária máxima.

De acordo com Madergan (2020), quando  $Z_{TC}$  não for fornecido pelo fabricante, pode-se estimar seu valor por meio da equação a seguir:

$$Z_{TC} = 0,00234 \times RTC + 0,0262 \quad (6)$$

A impedância do cabo  $Z_{cabo}$  pode ser estimada por meio da Equação 7.

$$Z_{cabo} = 2 \times Z_c \times L \quad (7)$$

Em que:

- $L$  – distância em quilômetros;
- $Z_c$  – impedância do cabo de acordo com a Tabela 4.

A resistência e reatância por km, dos cabos de 2,5 a 10 mm<sup>2</sup>, estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Impedância dos cabos aplicados ao secundário dos TC's (70°).

Seção Cabo [mm <sup>2</sup> ]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	Z [Ω/km]
2,5	8,87	0,16	8,87
4	5,52	0,16	5,52
6	3,69	0,15	3,69
10	2,19	0,14	2,19

Fonte: Mardegan (2020).

Em relés numéricos, é comum o fornecimento da carga em VA ao invés da impedância de entrada do relé. A conversão do valor em VA para Ω pode ser feita por meio da Equação 8.

$$Z_{relé} = \frac{VA}{I^2} \quad (8)$$

A tensão secundária, calculada por meio da Equação 5, deverá ser inferior ou igual à tensão secundária máxima determinada pela equação a seguir:

$$V_{s,máx} = Z_n \times F_s \times I_{ns} \quad (9)$$

Em que:

- $Z_n$  – impedância normalizada do TC de acordo com a Tabela 8 da ABNT NBR 6856 de 2021;
- $F_s$  – fator de sobrecorrente, normalmente 20;
- $I_{ns}$  – corrente nominal no secundário do TC.

Para um TC com carga nominal  $C_n$  dada por:

$$C_n = Z_n \times I_{ns}^2 \quad (10)$$

Quando o TC possuir corrente nominal secundária de 5 A e fator de sobrecorrente de 20, a tensão máxima de saturação poderá ser determinada por:

$$V_{s,máx} = \left( \frac{C_n}{I_{ns}^2} \right) \times F_s \times I_{ns} = 4 \times C_n \quad (11)$$

Quando o TC possuir corrente nominal secundária de 1 A e fator de sobrecorrente de 20, a tensão máxima de saturação poderá ser determinada por:

$$V_{s,máx} = \left( \frac{C_n}{I_{ns}^2} \right) \times F_s \times I_{ns} = 20 \times C_n \quad (12)$$

O valor normalizado da carga  $C_n$  é definido conforme a Tabela 5 que é uma adaptação da Tabela 8 da ABNT NBR 6856.

Tabela 5 - Características das cargas no secundário do TC assumindo fator de potência de 0,9 e corrente secundária nominal de 5 A.

Potência Aparente (VA)	Resistência ( $\Omega$ )	Reatância indutiva ( $\Omega$ )	Impedância ( $\Omega$ )
2,5	0,09	0,044	0,1
5,0	0,18	0,087	0,2
12,5	0,45	0,218	0,5
22,5	0,81	0,392	0,9
45,0	1,62	0,785	1,8
90,0	3,24	1,569	3,6

Fonte: ANBT 6856 (2021)

A seguir serão explanados os critérios de ajuste das funções de proteção exigidas na Norma Técnica da Neoenergia Pernambuco.

## 2.4 Critérios de coordenação entre os elementos de proteção

A coordenação dos dispositivos de proteção da subestação com os dispositivos da concessionária é fundamental. Por exemplo, em um caso de um curto-circuito na instalação, a sequência de atuação pode ser a seguinte: primeiro, o disjuntor, comandado pelo relé do consumidor, entra em ação. Em seguida, em caso de falha no relé ou no disjuntor do consumidor, a chave fusível de retaguarda fica encarregada de interromper o defeito. Por fim, como último recurso, em caso de falha na chave fusível, o relé de proteção da concessionária com seu respectivo disjuntor deverá atuar para interromper o defeito.

A fim de assegurar a coordenação, a Neoenergia Pernambuco apresenta no item 7.33.3.6 da DIS-NOR-036 os critérios de ajuste a seguir para parametrização dos relés de sobrecorrente de fase:

- Atuar em valores (correntes e tempos) inferiores aos admissíveis na curva de carregamento máximo de curta duração do transformador, quando o consumidor possuir apenas um transformador;
- O elemento temporizado (51) deve ser sensível às menores correntes de efeito entre as fases no trecho sob sua supervisão e, se possível, às correntes de defeito no lado de baixa tensão, refletidas no lado de alta tensão;
- Caso a demanda contratada esteja abaixo da capacidade do transformador, ajustar a corrente de partida do relé em 1,3 vezes a corrente equivalente à demanda contratada respeitando as condições acima;
- As unidades temporizadas de fase (51) devem ter correntes de partida no máximo iguais a 80% dos respectivos valores das proteções dos equipamentos à montante, e seus tempos de atuação devem ser pelo menos 0,4 segundos mais rápidos;



- e) O elemento instantâneo (50) deve ser sensível às menores correntes de curto-circuito entre fases, ter ajuste no máximo igual a 80% dos respectivos valores das proteções dos equipamentos à montante e permitir a livre circulação da corrente transitória de magnetização;
- f) Os tempos de atuação da função 51 devem ser pelo menos 0,2 segundos mais rápidos que a curva do elo fusível proposto para a chave de proteção do ponto de conexão da distribuidora.

Já para as funções de sobrecorrente de neutro, a Neoenergia Pernambuco orienta no item 7.33.3.7 da DIS-NOR-036 os critérios a seguir:

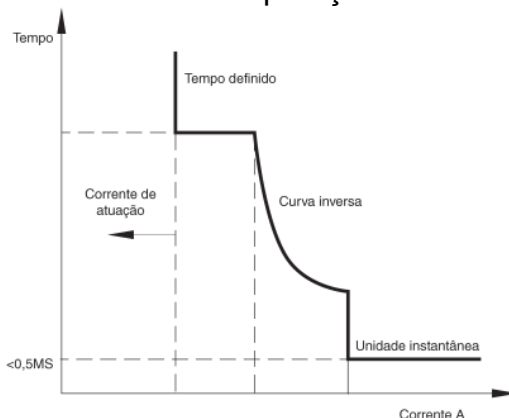
- a) O elemento temporizado (51N) deve ser sensível às menores correntes de defeito entre fase e terra sob sua supervisão;
- b) O neutro convencional (51N) deve ter corrente de partida, no máximo, igual a 80% dos respectivos valores das proteções dos equipamentos à montante e seu tempo de atuação deve, pelo menos, 0,4 segundos mais rápidos do que o tempo de elo fusível;
- c) O elemento temporizado do tipo tempo definido (51NS), deve ter o ajuste de corrente de partida referida no primário de 3 a 6 A, limitado a 80% da proteção 51NS à montante, e ajuste de tempo 0,05 a 1 segundo, sendo que deve ser pelo menos 0,4 segundo mais rápido;
- d) O elemento instantâneo (50N) deve ser sensível às menores correntes de curto-circuito entre fase e terra possíveis e ter ajuste no máximo em 80% dos respectivos valores das proteções dos equipamentos a montante;
- e) Na condição do subitem c) acima o elemento instantâneo (50N) deve permitir ajuste na faixa de 10 a 100 A referido ao primário.

Outro requisito importante é a garantia que a proteção não atue indevidamente durante a energização do transformador. A DIS-NOR-036 orienta, em seu Anexo 01, que a corrente de energização ou de *inrush* pode ser estimada como sendo 6 vezes o valor da corrente nominal do transformador, com duração de 0,1 segundos.

## 2.5 Característica tempo vs. corrente das unidades de sobrecorrente

A atuação dos relés de proteção pode se dar sem temporização intencional – conhecida atuação instantânea – ou com temporização intencional, que pode ser com tempo fixo ou definido, ou ainda com temporização inversamente proporcional à corrente de defeito. As unidades com atuação instantâneas usualmente são empregadas nas funções 50 de fase e de neutro, a fim de interromper o circuito na ocorrência de defeitos de grande nível de curto-circuito, como no caso de curtos-circuitos trifásicos ou monofásicos no barramento primário da subestação. Já as curvas com temporização intencional, por sua vez, são empregadas em funções destinadas a interromper o circuito na ocorrência de defeitos de menor nível de curto-circuito, como as funções 51 de fase e neutro e a função 51NS. A Figura 02 ilustra as características típicas das curvas sem temporização intencional e com temporização intencional.

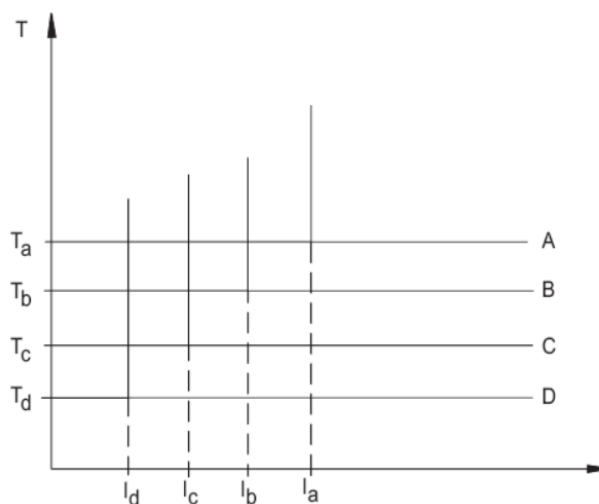
Figura 02 – Tipos de curvas de operação de um relé de proteção.



Fonte: Mamede Filho (2020)

Nas curvas de tempo definido, uma vez ajustado o tempo de atuação e a corrente mínima de atuação, o relé irá atuar neste tempo para qualquer valor de corrente superior ou igual à corrente de atuação ajustada. Um exemplo de função de proteção que utiliza a característica de tempo definido é a função 51NS. Na Figura 03 é possível ver um exemplo de gráfico de uma curva de tempo definido.

Figura 03 – Curva de tempo definido.



Fonte: Mamede Filho (2020).

Já nas curvas de tempo inverso, por outro lado, os tempos de atuação são decrescentes com o aumento da magnitude da corrente curto-circuito e a atuação da é garantida quando a corrente de defeito é superior à corrente mínima de atuação. As características das curvas de tempo inverso mais comuns são: a normalmente inversa (NI), a muito inversa (MI) e a extremamente inversa (EI). Para qualquer uma dessas curvas, o tempo de atuação do relé será determinado pela Equação 13.

$$t = \frac{k_1}{\left(\frac{I_{cc}}{I_p \times RTC}\right)^{k_2} - 1} \times D.T \quad (13)$$

Em que:

- $k_i$  – constantes características do tipo de curva, conforme Tabela 6;

- $t$  – tempo de atuação do relé (s);
- $I_{cc}$  – corrente de curto-circuito (A);
- $I_p$  – corrente de atuação ou pick-up do relé (A);
- $D.T$  – dial de tempo (s).

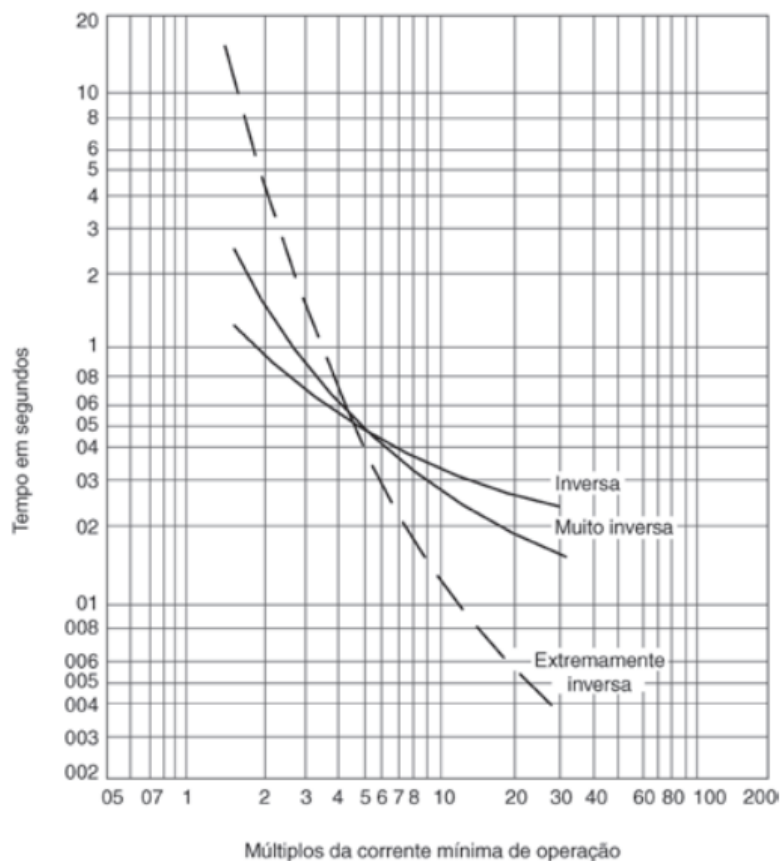
Tabela 6 - Constantes de tempo inverso

Tipo de curva	$K_1$	$K_2$
Normalmente inversa	0,14	0,02
Muito inversa	13,5	1
Extremamente inversa	80	2

Fonte: Mardegan (2020)

A corrente de pick-up ou de atuação do relé é a corrente a partir da qual ele irá atuar, ou seja, iniciará uma sequência de contagem do tempo com posterior envio do sinal de atuação para o disjuntor comandado. Já o dial de tempo é um parâmetro em segundos que possibilita ajustar a temporização do relé, elevando ou rebaixando sua curva em relação ao eixo do tempo. A Figura 04 ilustra as características das curvas NI, MI e EI.

Figura 04– Tipos de curvas características de operação.



Fonte: Mamede Filho (2020).

### 3 METODOLOGIA

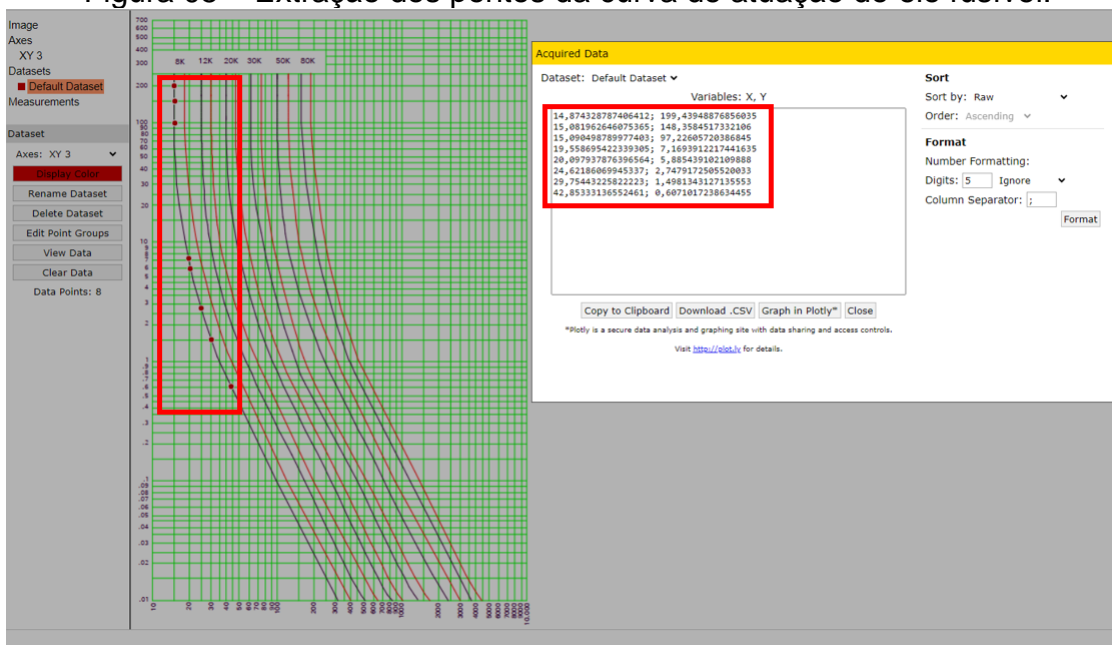
Esta seção apresentará a metodologia usada no desenvolvimento do presente trabalho. Inicialmente foi realizado uma pesquisa bibliográfica para o embasamento teórico acerca do tema. Para esta primeira etapa foram realizadas consultas em normas, livros, dissertações, artigos etc. Em seguida, foi realizado o levantamento de dados utilizados para geração dos gráficos de tempo x corrente dos elos fusíveis. Na sequência, foi realizado a implementação do dashboard no Excel e, por fim, implementado a interface gráfica e a funcionalidade de exportação dos dados.

#### 3.1 Obtenção dos dados dos elos fusíveis

Para o levantamento das curvas tempo x corrente de atuação dos elos fusíveis, foi utilizado o catálogo da fabricante Delmar, onde foi obtido os dados dos seguintes elos fusíveis: 1K, 2K, 3K, 5K, 6K 10K, 15K, 25K, 40K, 65K, 100K, 140K, 200K, 0.5H, 1H, 3H e 5H. A partir da curva de tempo x corrente, foi utilizado a plataforma WebPlotDigitizer para extração dos dados de cada ponto do gráfico.

A plataforma WebPlotDigitizer é uma ferramenta web utilizada para extração de dados de gráficos, imagens e mapas. Na Figura 05 é possível visualizar um exemplo de uso da aplicação para extração e exportação dos pontos do coordenograma.

Figura 05 – Extração dos pontos da curva de atuação do elo fusível.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Após a extração dos pontos, os dados foram formatados e inseridos na planilha no Excel para posterior aplicação nos coordenogramas. A Figura 06 ilustra a biblioteca de dados extraídos das curvas do fabricante Delmar.

Figura 06 – Dados das curvas de atuação dos elos fusíveis.

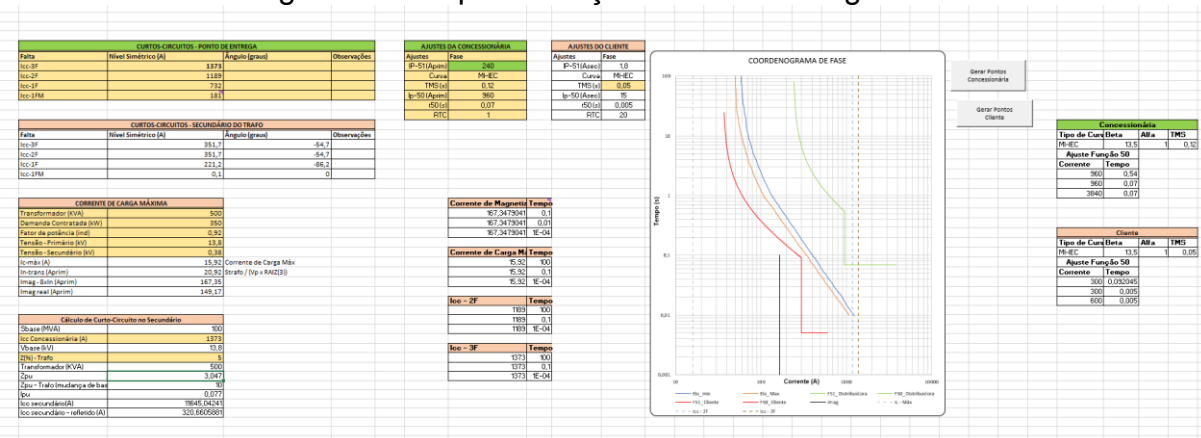
6K	Máxima		10K		15K		25K		40K		65K	
	Corrente	Tempo	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
16.252	11.7634	248.32	22.8274	244.7786	37.03	248.098	30.3062	248.098	59.342	249.068	50.4046	249.068
95.989	11.7634	196.024	23.0242	197.433	37.03	196.845	30.3062	196.845	59.342	197.462	50.4046	197.462
147.37	11.8853	148.228	23.2228	147.903	37.296	147.126	30.3062	147.126	59.342	147.149	50.4046	147.149
53.389	11.8853	97.469	23.0242	97.2945	37.03	96.1394	30.0901	96.8597	59.342	95.3959	50.4046	96.884
1.5025	11.8853	87.5352	22.8274	87.7766	37.03	87.2482	30.0901	87.2482	59.342	88.2912	50.4046	88.2912
3.6909	11.8853	76.9419	23.2228	76.5925	36.766	76.8501	29.8755	76.2785	59.342	76.8209	50.4046	76.8209
7.7191	11.8853	67.6305	23.0242	67.3886	37.03	67.6911	29.8755	67.1877	60.2291	67.8636	50.4046	66.8212
58.57	11.8853	58.8104	23.0242	58.9159	37.03	58.7402	30.0901	58.3034	60.2291	59.0385	51.1582	58.1317
36.173	11.7634	49.5178	23.0242	49.2523	36.766	49.4734	30.0901	49.4734	61.1296	49.7953	51.1582	49.7953
1.4995	11.8853	44.4711	23.4231	44.3227	37.03	44.2327	30.5238	43.9038	61.1296	43.9966	51.923	43.9966
1.2937	11.8853	39.5117	23.4231	39.3704	37.03	39.2523	30.7431	39.2523	62.0455	39.4778	51.923	39.4778
5.1576	11.7634	34.7301	23.4231	34.7301	37.296	34.5749	30.3062	34.5749	62.0455	34.8797	51.923	34.8797
3.2414	11.8853	29.5584	24.0344	29.5584	37.8336	29.5584	30.9639	29.5584	63.9124	29.4189	51.923	29.4189
1.1379	11.8853	24.3585	24.2427	24.2714	38.379	24.344	31.6358	24.344	64.8679	24.0567	52.6993	24.4319
3.2321	12.0084	19.8568	24.6616	19.7523	39.4955	19.6054	32.3223	19.3020	65.821	19.9787	54.2867	19.9787
1.6748	12.3894	14.6974	25.5235	14.6974	40.3506	14.5446	33.4998	14.5446	67.8211	14.4343	55.9221	14.6995
3.6931	13.0403	9.76882	26.8731	9.73889	42.7281	9.71936	35.7285	9.71936	71.9688	9.80249	59.342	9.80249
7.8858	13.1754	8.73232	27.5744	8.7184	43.3441	8.7549	36.2435	8.69739	73.0445	8.79588	61.1296	8.79588
7.7163	13.4498	7.7115	28.0521	7.7115	44.6027	7.65415	37.03	7.7115	75.2449	7.7142	62.0455	7.7142
4.7501	13.7398	6.83512	28.3138	6.8026	45.898	6.79245	37.8336	6.79245	77.5115	6.86637	63.9124	6.76081
8.6258	14.1009	5.89428	29.2828	5.89428	47.57	5.85044	39.2119	5.85044	79.8464	5.88162	65.8377	5.88162
9.4078	14.6056	4.96292	30.3062	4.97182	50.0137	4.9644	40.6404	5.0016	82.2517	4.96078	67.821	4.96078
4.7734	15.0642	4.50528	31.0971	4.46511	51.466	4.50528	42.1209	4.47178	84.7294	4.52081	69.864	4.52081
9.9356	15.3779	3.90006	32.4614	3.93884	53.724	3.90954	43.3441	3.90954	88.5867	3.92291	70.9085	3.92426
6.7501	16.0251	3.49082	33.9959	3.44961	55.2841	3.49441	44.6027	3.44961	91.2552	3.47484	73.0445	3.47484
9.5743	16.6994	2.93082	34.77	2.93082	57.2981	2.94397	46.2276	2.92208	92.4055	2.93082	77.5115	2.93082
4.2865	17.5824	2.41523	37.2427	2.4501	62.4361	2.42462	49.6571	2.42462	101.244	2.434	81.0402	2.39661
9.7384	18.7038	1.96907	39.5501	1.97610	67.5497	1.98204	53.724	1.95267	107.436	1.95977	85.9961	1.95977
4.9551	20.7341	1.48989	43.8482	1.48364	75.7445	1.47041	60.2415	1.48142	117.44	1.48321	94.0042	1.48321
9.7529	24.4507	0.98861	52.0597	0.97383	88.6597	0.96803	71.0198	0.98402	136.227	0.97656	109.042	0.98156
9.7017	25.7436	0.86989	55.2841	0.88245	92.5495	0.87851	75.2044	0.87198	144.558	0.87628	115.71	0.88282
7.7848	27.1048	0.77289	57.7096	0.77844	98.7065	0.77881	79.0677	0.77881	151.139	0.77422	122.787	0.77422
8.7848	28.538	0.67925	61.2851	0.68669	105.777	0.68669	83.7264	0.68669	162.78	0.68404	130.296	0.68404
5.6863	30.6727	0.58444	66.2096	0.59071	113.083	0.5827	89.9378	0.58700	172.734	0.58595	142.429	0.58595
4.9455	32.6291	0.49741	71.5299	0.49741	120.606	0.49445	96.61	0.49815	188.82	0.49421	153.399	0.49421
4.8816	34.3544	0.446271	75.3121	0.446771	128.807	0.446771	103.907	0.44538	197.415	0.44538	162.78	0.44538

Fonte: Elaborada pelos autores.

### 3.2 Implementação do dashboard no Excel

O desenvolvimento do dashboard de projeto teve início com a implementação das equações dos relés, das equações de curto-circuito, vinculação do banco de dados dos fusíveis e implementação das condições de verificação da saturação dos TCs. Na sequência, foram criados os modelos das curvas de coordenograma e vinculado os dados gerados para as curvas escolhidas para o relé e elo fusível. Na Figura 07 é possível observar uma parte da implementação necessária para geração dos coordenogramas.

Figura 07 – Implementação dos coordenogramas.



Fonte: Elaborada pelos autores.

### 3.3 Implementação dos recursos gráficos e de exportação de resultados

Nesta etapa, foi implementada a interface gráfica utilizando o Visual Basic for Applications – VBA no Microsoft Excel. Essa linguagem de programação consiste em um ambiente paralelo de programação integrado ao Excel, possibilitando a realização de cálculos ou procedimentos complexos, a automatização de ações e a personalização de soluções para análise de dados, incluindo a interação com outras aplicações como o Word (RODRIGUES, 2020).

A primeira etapa de implementação consistiu na criação de uma rotina, conhecida como macro, para geração dos pontos dos coordenogramas de fase e de neutro, tanto da concessionária, quanto do cliente. Para a inicialização da macro foram implementados botões. A Figura 08 ilustra a estrutura utilizada para gerar os pontos do coordenograma.

Figura 08 – Estrutura utilizada para gerar os pontos do coordenograma.

```

stepValue = 5 'intervalo entre os valores no vetor
lowerBound = Sheets("Coordenograma_Fase").Range("AE6").Value ' Corrente de Pickup da função 51
upperBound = Sheets("Coordenograma_Fase").Range("H10").Value ' Corrente de Pickup da função 50

numElements = (upperBound - lowerBound) / stepValue + 1 'quantidade de elementos do vetor

ReDim myArray(1 To numElements)

For i = 1 To numElements 'preenchimento do vetor
    myArray(i) = lowerBound + (i - 1) * stepValue
Next i

' Configurações para escrever o primeiro vetor na planilha
startRow = 7 ' Começar na linha 7 (célula AH7)

For i = LBound(myArray) To UBound(myArray)
    ' Escreve na coluna AH (coluna 31) na aba "Interface"
    Sheets("Coordenograma_Fase").Cells(startRow + i - 1, 31).Value = myArray(i)
Next i

```

Fonte: Autoria própria.

Na macro criada, os pontos são gerados entre o valor mínimo, a corrente de pick-up da função 51, e o valor máximo, a corrente de pick-up da função 50. O mesmo procedimento foi utilizado para a geração dos pontos das funções de proteção de neutro.

Para a exportação dos resultados, foi criado um modelo no formato .docx com valores referenciados que serão buscados através de um algoritmo e substituídos de acordo com os resultados obtidos no dashboard. A Figura 09 ilustra parte do modelo de relatório implementado em arquivo .docx, os quais serão preenchidos pelos dados obtidos no dashboard.

Figura 09 – Implementação do relatório resumo por meio de etiquetas referenciadas.

<b>Responsável Técnico:</b> #NOME_RESPONSÁVEL	
<b>Cliente:</b> #NOME_CLIENTE	
<b>Estudo de Proteção e Seletividade</b>	
Dados do Cliente	
<b>Demanda Contratada (kW)</b>	#DEMANDA_CONTR
<b>Transformador</b>	
Potência (kVA)	#POT_TRAFO
Tensão no Primário (kV)	#TENSAO1_TRAFO
Tensão no Secundário (kV)	#TENSAO2_TRAFO
Z (%)	#IMPEDANCIA_TRAFO

Fonte: Autoria própria.

Com a criação do modelo de relatório com a etiquetas, foi criado um algoritmo em VBA que executa um loop para varrer o arquivo .docx e substituir cada uma das etiquetas pelos dados do dashboard e, na sequência, salva o relatório em uma pasta determinada. A Figura 10 ilustra a implementação do algoritmo em VBA.



Figura 10 – Implementação do algoritmo de exportação no VBA.

```

Dim objWord As Object
'inicialização do Word
Set objWord = CreateObject("Word.Application")
objWord.Visible = True

Dim arqExportacao As Object
'Abertura do Modelo
Set arqExportacao = objWord.Documents.Open("D:\Engenharia Elétrica\2023.2\TCC 2\Proteção e Seletividade - Modelo.docx")

Dim conteudoDoc As Object
Set conteudoDoc = arqExportacao.Content

'loop para encontrar e substituir os valores
For i = 1 To 26
    With conteudoDoc.Find
        .Text = Sheets("Exportacao").Cells(1, i).Value
        .Replacement.Text = Sheets("Exportacao").Cells(2, i).Value
        .Execute Replace:=2
    End With
Next i

' Salvar o documento do Word
arqExportacao.SaveAs2 "D:\Engenharia Elétrica\2023.2\TCC 2\Exportacao - " & Sheets("Exportacao").Cells(2, 1).Value & ".docx"

```

Inicialização do Word e abertura do documento modelo

Loop para encontrar e substituir os valores

Fonte: Autoria própria.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

Esta seção apresenta a interface final e a demonstração de suas finalidades por meio de um estudo de caso.

### 4.1 Apresentação da interface

A ferramenta é composta por 6 menus. Na Figura 11 é possível observar a tela inicial da ferramenta, que é responsável por obter os dados do cliente e do responsável técnico pelo estudo, assim como os dados do transformador e da instalação. Em cada um dos menus, com exceção do menu de resultados, há campos a serem preenchidos manualmente pelo usuário.

Figura 11 – Tela inicial da ferramenta.

Responsável Técnico		Dados do Transformador e da Instalação	
Cliente		Potência (KVA)	Impedância (%)
Contato		Fator de Potência	Tensão no secundário (kV)
Funções de Proteção Disponíveis	50, 51, 50N, 51N, 51NS	Tensão no primário (kV)	Demanda Contratada (kW)
Versão	1.0		

Fonte: Autoria própria.

Após o preenchimento dos dados da tela inicial, o usuário deve fornecer os dados informados pela concessionária de energia por meio do menu DADOS – DISTRIBUIDORA, conforme a ilustrado na Figura 12. Nesta tela, é necessário informar as correntes de curto-circuito e as impedâncias equivalentes de Thévenin no ponto de entrega, bem como os ajustes da proteção da concessionária.

Figura 12 – Tela de inserção dos dados da distribuidora.

Fonte: Autoria própria.

Concluída a etapa de fornecimento de dados da concessionária, o usuário deve avançar para o menu DADOS – T.C. Nesta tela, conforme ilustrado na Figura 13, deverá ser informado as correntes nominais e a carga nominal do TC escolhido, os consumos em VA das unidades do relé, bem como a seção do cabo de interligação do TC ao relé. As correntes e a carga nominal do relé podem ser escolhidas por meio de uma lista de valores padronizados de acordo com a ABNT NBR 6856 de 2021. Na caixa RESULTADO, o usuário poderá verificar se o TC escolhido atingirá ou não a saturação. Caso seja verificado a saturação, o usuário poderá ajustar carga nominal até que a condição de não saturação seja alcançada.

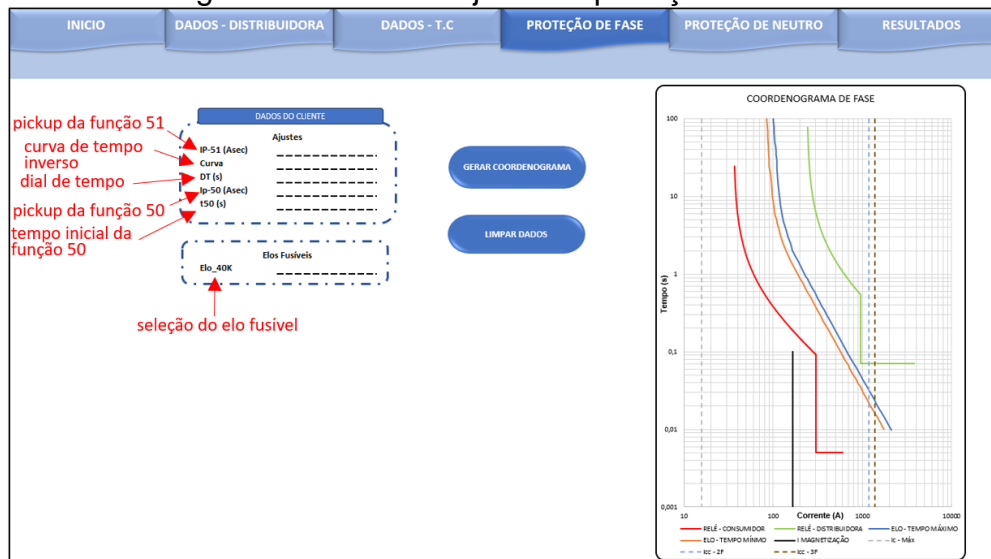
Figura 13 – Tela de avaliação do transformador de corrente.

Fonte: Autoria própria.

Na sequência, o usuário deverá informar os ajustes da proteção de fase do cliente na tela PROTEÇÃO DE FASE. Nesta tela, conforme ilustrado na Figura 14, o usuário deverá fornecer todos os parâmetros das funções 51 e 50, bem como do elo fusível de retaguarda instalado no ponto de derivação. Ao clicar no botão GERAR COORDENOGRAMA, o usuário poderá verificar as curvas dos relés do cliente e da concessionária, assim como do elo fusível. Por meio do coordenograma, o usuário poderá verificar os critérios de coordenação e, de forma interativa, definir os melhores ajustes para a proteção de fase. A qualquer momento, caso deseje, o usuário poderá limpar os dados preenchidos ao clicar no botão LIMPAR DADOS.



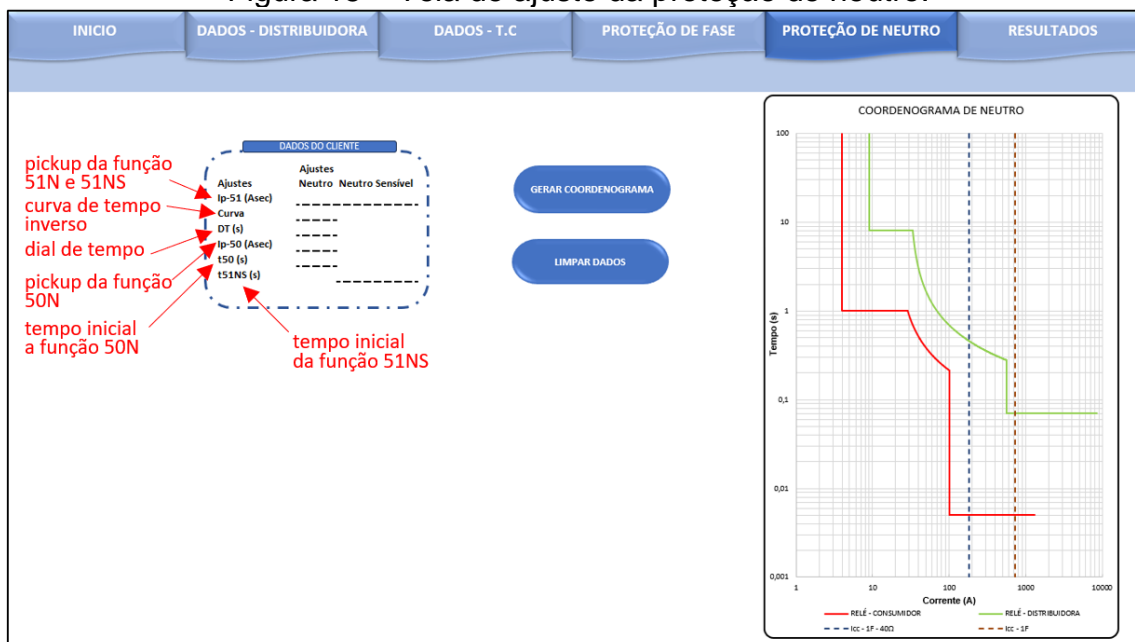
Figura 14 – Tela de ajuste da proteção de fase.



Fonte: Autoria própria.

Após fornecer os dados de ajuste da proteção de fase, o usuário deverá, de forma análoga, informar os dados de ajuste das proteções de neutro, conforme ilustrado na Figura 15. Nesta tela, serão fornecidos todos os parâmetros das funções 50N, 51N e 51NS, assim como o coordenograma com as curvas das funções de neutro do relé do cliente e da concessionária, ao clicar no botão GERAR COORDENOGRAMA. Por meio do coordenograma, o usuário poderá verificar os critérios de coordenação e, de forma interativa, definir os melhores ajustes para a proteção de neutro. A qualquer momento, caso deseje, o usuário poderá limpar os dados preenchidos ao clicar no botão LIMPAR DADOS.

Figura 15 – Tela de ajuste da proteção de neutro.

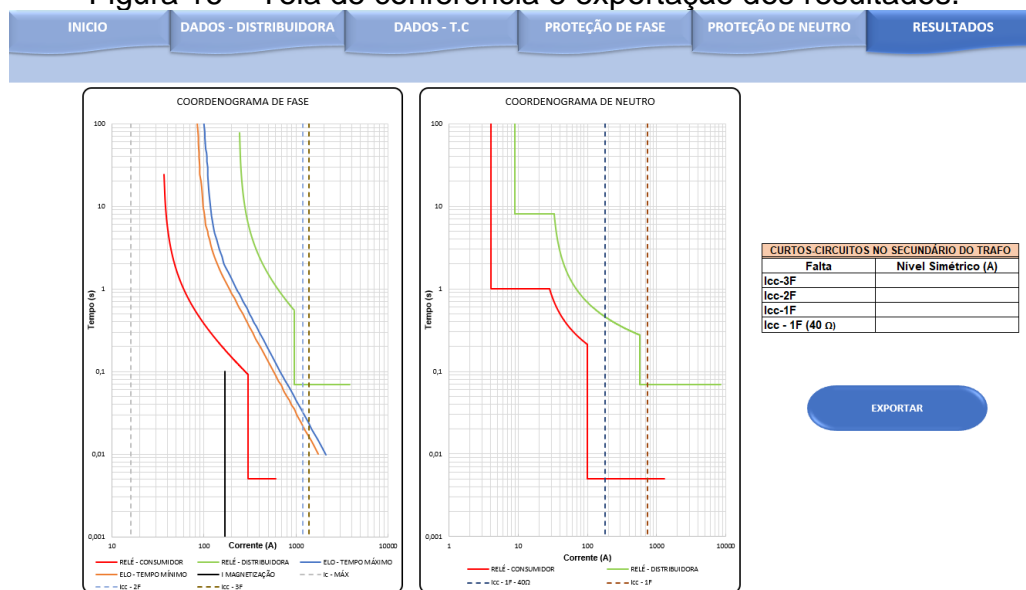


Fonte: Autoria própria.

Concluído os estudos nas telas anteriores, o usuário poderá conferir um resumo de todos os ajustes e resultados obtidos pelo dashboard na tela RESULTADOS. Ao

clicar no botão EXPORTAR, será gerado um arquivo .docx com os coordenogramas, um resumo dos ajustes das proteções do cliente e um resumo do estudo de curto-circuito. A Figura 16 apresenta a tela RESULTADOS.

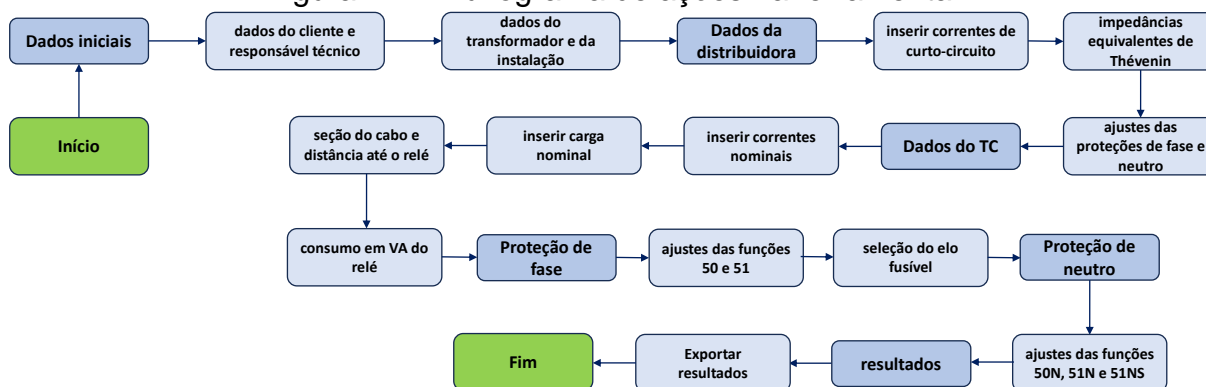
Figura 16 – Tela de conferência e exportação dos resultados.



Fonte: Autoria própria.

A fim de demonstrar o fluxo de execução do dashboard, foi elaborado o fluxograma da Figura 17. Por meio dele, o usuário pode compreender a sequência de etapas de utilização recomendadas para a aplicação desenvolvida.

Figura 17 – Fluxograma de ações na ferramenta.



Fonte: Autoria própria

## 4.2 Estudo de caso

A fim de demonstrar as funcionalidades do dashboard desenvolvido, esta seção apresenta um estudo de caso com uma subestação abrigada de 500 kVA.

### 4.2.1 Dados de entrada

A Tabela 7 apresenta os dados da subestação do consumidor utilizada no estudo de caso.

Tabela 7 - Dados da subestação.

Potência do Transformador	500 kVA
Demanda Contratada	350 kW
Fator de potência	0,92 ind.
Tensão no primário	13,8 kV
Tensão no secundário	380 V
Z (%)	5

Fonte: Autoria própria.

Para o ponto de entrega da subestação, a concessionária Neoenergia Pernambuco forneceu as correntes de curto-circuito, as impedâncias equivalentes de Thévenin e os ajustes de fase e neutro das proteções apresentadas nas Tabelas 8, 9, 10 e 11 respectivamente.

Tabela 8 - Dados de curto-circuito no ponto de entrega.

Tipo de curto-circuito	Corrente simétrica (A)
Trifásico	1373
Bifásico	1189
Monofásico	732
Monofásico mínimo (40Ω)	181

Fonte: Neoenergia PE.

Tabela 9 - Impedâncias equivalentes de Thévenin.

Seq. Positiva	1,0910 + j2,8451 pu
Seq. Zero	2,0283 + j0,9239 pu
Potência de base	100 MVA
Tensão de base	13,8 kV

Fonte: Neoenergia PE.

Tabela 10 - Ajustes da proteção de fase da concessionária.

$I_{pickup-51}$	240 A
Tipo de curva	Muito inversa
D.T.	0,12 s
$I_{pickup-50}$	960 A
Tempo de atuação da unidade 50	0,07 s
RTC	1

Fonte: Neoenergia PE.

Tabela 11 - Ajustes da proteção de neutro da concessionária.

Ajustes	Neutro	Neutro sensível
$I_{pickup-51}$	30 A	9 A
Tipo de curva	Normal inversa	
D.T.	0,12 s	
$I_{pickup-50}$	570 A	
Tempo de atuação da unidade 50	0,07 s	
Tempo de atuação da unidade 51NS	-	8 s
RTC		20

Fonte: Neoenergia PE.

A Figura 18 ilustra a tela inicial com os dados preenchidos.

Figura 18 – Tela inicial da ferramenta preenchida.

INICIO	DADOS - DISTRIBUIDORA	DADOS - T.C	PROTEÇÃO DE FASE	PROTEÇÃO DE NEUTRO	RESULTADOS
<b>BEM-VINDO(A) A FERRAMENTA DE CÁLCULO E ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE</b>					
<b>Responsável Técnico</b>	Aurélio Vinicius Teixeira de Carvalho	<b>Dados da do Transformador e da Instalação</b>			
<b>Cliente</b>	Aurélio Vinicius Teixeira de Carvalho	<b>Potência (KVA)</b>	500	<b>Impedância (%)</b>	5
<b>Contato</b>	879123456	<b>Fator de Potência</b>	0,92	<b>Tensão no secundário (kV)</b>	0,38
<b>Funções de Proteção Disponíveis</b>	50, 51, 50N, 51N, 51NS	<b>Tensão no primário (kV)</b>	13,8	<b>Demanda Contratada (kW)</b>	350
<b>Versão</b>	1.0				

Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.2 Avaliação da saturação do TC

No estudo de caso, foi selecionado um TC com correntes nominais de 100 / 5 A e carga nominal de 12,5 VA, interligado ao relé de proteção via cabo de 2,5 mm<sup>2</sup> com 20 m e utilizado um relé com consumos de 0,2 VA e 0,4 VA para as unidades de fase e neutro respectivamente. Para esses valores dimensionados, verifica-se que a saturação devido à corrente alternada é improvável, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Avaliação da saturação do transformador de corrente.

DADOS - DISTRIBUIDORA	DADOS - T.C	PROTEÇÃO DE FASE	PROTEÇÃO DE NEUTRO																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>DADOS DO T.C</th> <th>RESULTADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"><b>Dados do TC</b></td> </tr> <tr> <td>Iprim (A)</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>Isec (A)</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>RTC</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Carga Nominal (VA)</td> <td>12,5</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"><b>Dados do Condutor</b></td> </tr> <tr> <td>Seção Nominal (mm<sup>2</sup>)</td> <td>2,5</td> </tr> <tr> <td>Distância (m)</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"><b>Dados do Relé</b></td> </tr> <tr> <td>Carga de Fase (VA)</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>Carga de Neutro (VA)</td> <td>0,4</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"><b>RESULTADO</b></td> </tr> <tr> <td>Ztotal (Ω)</td> <td>0,4518</td> </tr> <tr> <td>Vs - Calculado (V)</td> <td>31,016</td> </tr> <tr> <td>Vs - TC (V)</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Validação</td> <td><u>NÃO SATURA</u></td> </tr> </tbody> </table>				DADOS DO T.C	RESULTADO	<b>Dados do TC</b>		Iprim (A)	100	Isec (A)	5	RTC	20	Carga Nominal (VA)	12,5	<b>Dados do Condutor</b>		Seção Nominal (mm <sup>2</sup> )	2,5	Distância (m)	20	<b>Dados do Relé</b>		Carga de Fase (VA)	0,2	Carga de Neutro (VA)	0,4	<b>RESULTADO</b>		Ztotal (Ω)	0,4518	Vs - Calculado (V)	31,016	Vs - TC (V)	50	Validação	<u>NÃO SATURA</u>
DADOS DO T.C	RESULTADO																																				
<b>Dados do TC</b>																																					
Iprim (A)	100																																				
Isec (A)	5																																				
RTC	20																																				
Carga Nominal (VA)	12,5																																				
<b>Dados do Condutor</b>																																					
Seção Nominal (mm <sup>2</sup> )	2,5																																				
Distância (m)	20																																				
<b>Dados do Relé</b>																																					
Carga de Fase (VA)	0,2																																				
Carga de Neutro (VA)	0,4																																				
<b>RESULTADO</b>																																					
Ztotal (Ω)	0,4518																																				
Vs - Calculado (V)	31,016																																				
Vs - TC (V)	50																																				
Validação	<u>NÃO SATURA</u>																																				

Fonte: Autoria própria.

### 4.2.3 Ajuste da proteção de fase

Feita a validação do dimensionamento do TC, iniciou-se a etapa de ajuste do da proteção de fase. Após sucessivas iterações, foi definido os ajustes de fase apresentados Tabela 12. Os ajustes foram determinados de modo a satisfazer os critérios da Neoenergia Pernambuco, explanados na Seção 2.4.

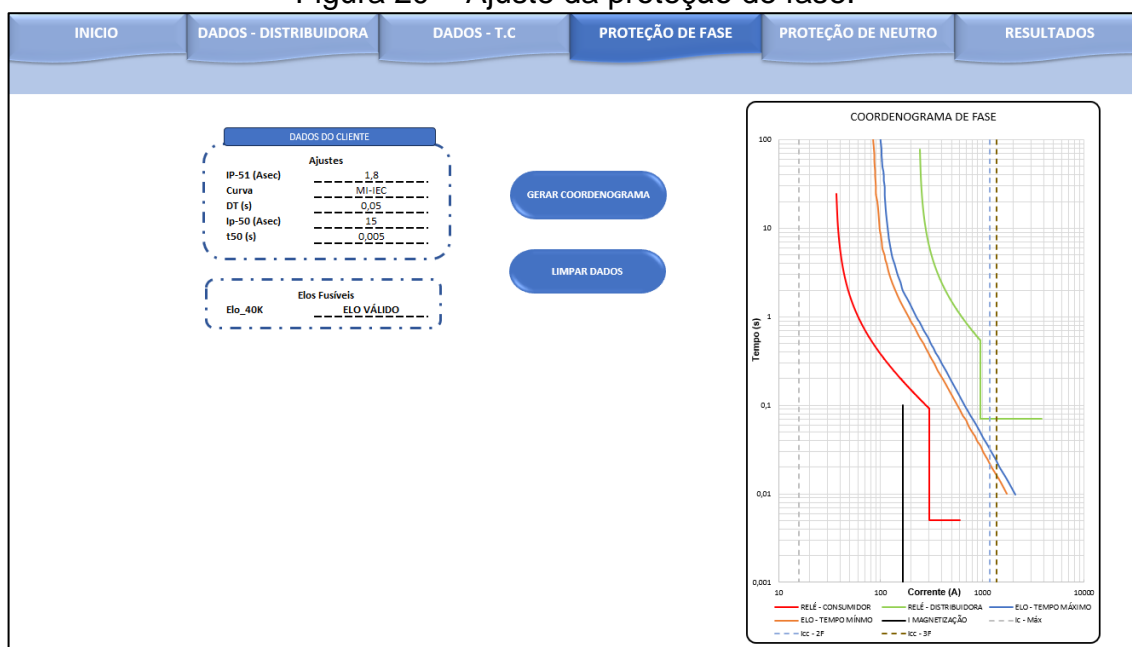
Tabela 12 - Ajustes de proteção de fase do consumidor.

$I_{pickup-51}$	1,8 A
Tipo de curva	Muito inversa
D.T.	0,05 s
$I_{pickup-50}$	15 A
Tempo de atuação da unidade 50	0,005 s
RTC	20

Fonte: Autoria própria.

A Figura 20 ilustra a tela de ajuste da proteção de fase com os dados preenchidos. No coordenograma gerado, é possível observar a coordenação entre o relé do consumidor e o relé da concessionária, bem como verificar que o elo fusível fornece proteção de retaguarda ao relé do consumidor.

Figura 20 – Ajuste da proteção de fase.



Fonte: Autoria própria.

### 4.2.4 Ajuste da proteção de neutro

Feito o ajuste da proteção de fase, iniciou-se a etapa de ajuste do da proteção de neutro. Após sucessivas iterações, foi definido os ajustes de neutro apresentados Tabela 13. Os ajustes foram determinados de modo a satisfazer os critérios da Neoenergia Pernambuco, explanados na Seção 2.4.

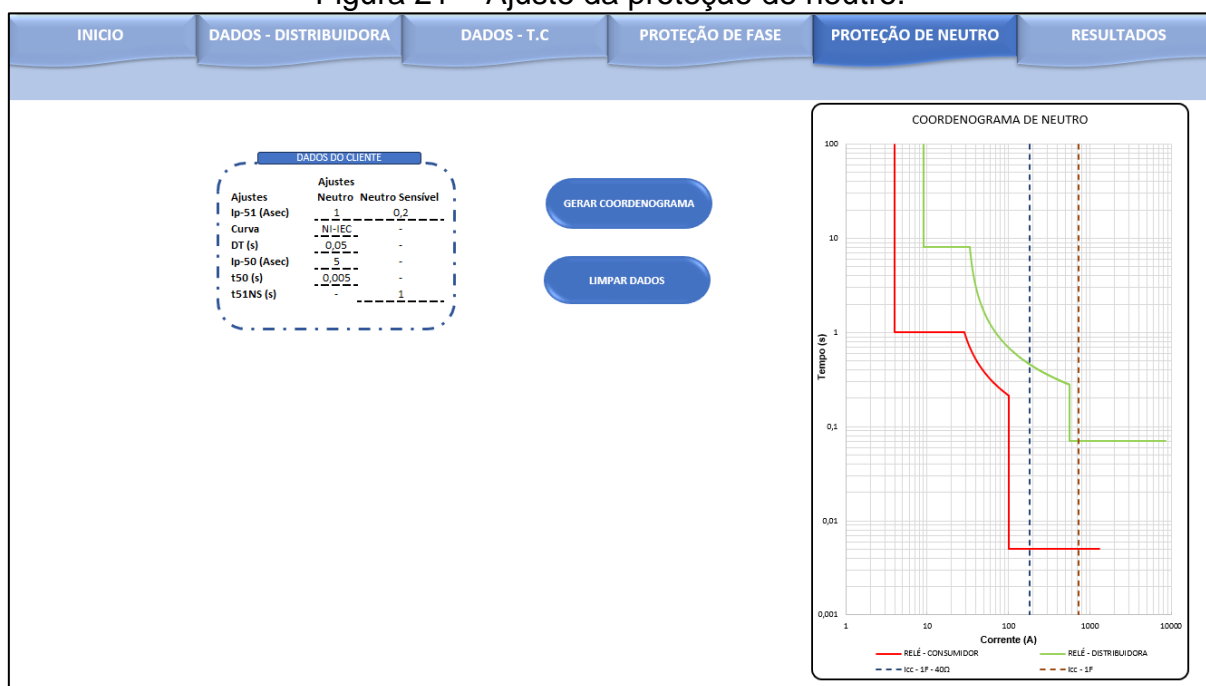
Tabela 13 - Ajustes de proteção de neutro do consumidor.

Ajustes	Neutro	Neutro sensível
$I_{pickup-51}$	1,0 A	0,2 A
Tipo de curva	Normal inversa	
D.T.	0,05 s	
$I_{pickup-50}$	5 A	
Tempo de atuação da unidade 50	0,005 s	
Tempo de atuação da unidade 51NS	-	1,0 s
RTC		20

Fonte: Autoria própria.

A Figura 21 ilustra a tela de ajuste da proteção de neutro com os dados preenchidos. No coordenograma gerado, é possível observar a coordenação entre o relé do consumidor e o relé da concessionária.

Figura 21 – Ajuste da proteção de neutro.

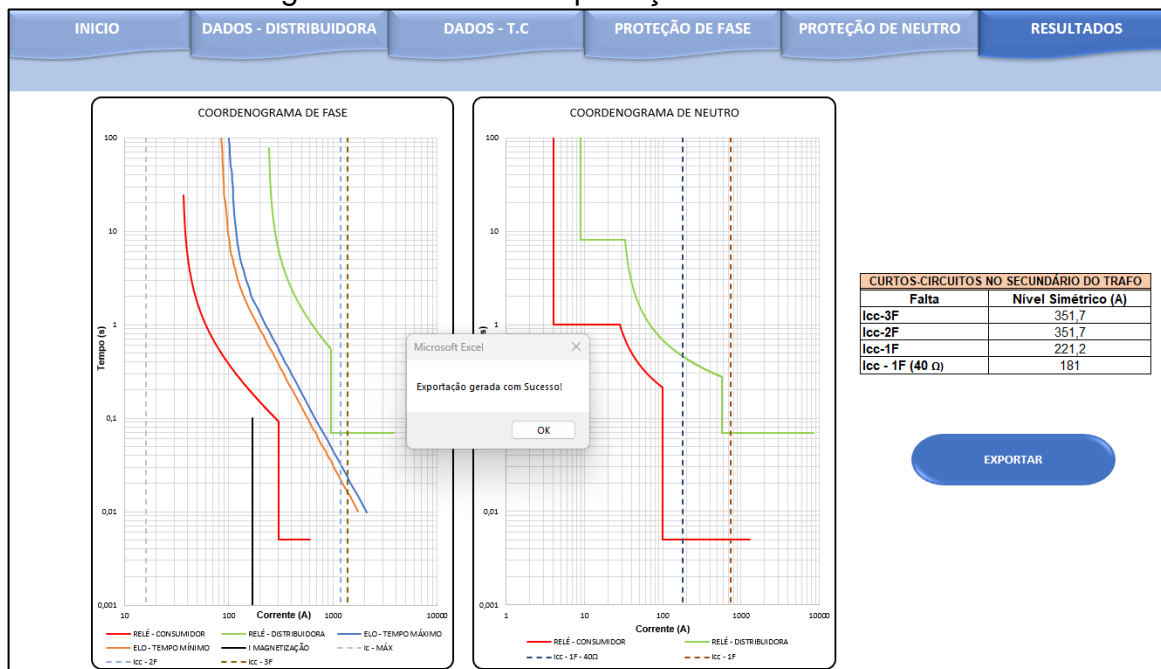


Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.5 Exportação dos resultados

Após a definição dos ajustes da proteção, iniciou-se a etapa de exportação dos resultados. Na Figura 22 pode observar os coordenogramas finais e um resumo dos dados de curto-circuito. Ao clicar no botão EXPORTAR, verificou-se a exportação bem-sucedida dos coordenogramas, do resumo dos ajustes da proteção e dos resultados do estudo de curto-circuito. A Figura 22 apresenta a tela de exportação dos resultados.

Figura 22 – Tela de exportação dos resultados.

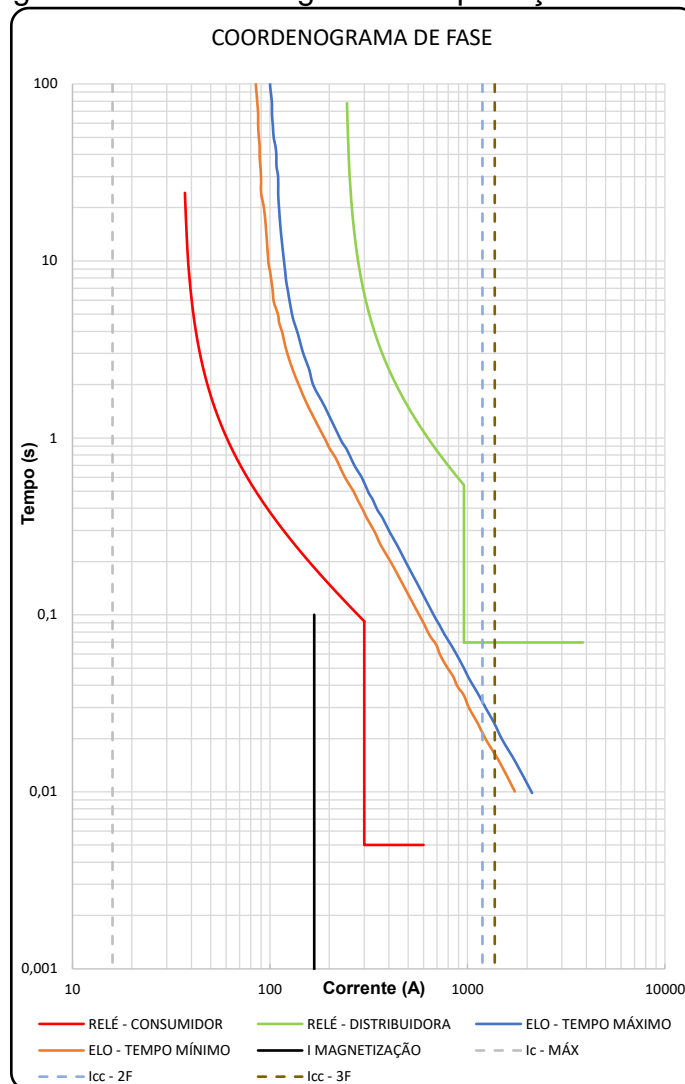


Fonte: Autoria própria.

A fim de explicar as informações presentes no coordenograma, as Figuras 23 e 24 apresentam os coordenogramas finais exportados pelo dashboard. Na Figura 23, os parâmetros da legenda são os seguintes:

- Relé - Distribuidora – curvas de atuação das funções 50 e 51 da distribuidora;
- Relé - Consumidor – curvas de atuação das funções 50 e 51 do consumidor;
- I Magnetização – corrente de magnetização do transformador;
- Elo – tempo máximo – tempo máximo de atuação do elo fusível;
- Elo – tempo mínimo – tempo mínimo de atuação do elo fusível
- I<sub>c</sub>-máx – corrente de carga máxima;
- I<sub>cc</sub>-2F – corrente de curto-circuito bifásica no primário da subestação;
- I<sub>cc</sub>-3F – corrente de curto-circuito trifásica no primário da subestação.

Figura 23 – Coordenograma das proteções de fase.



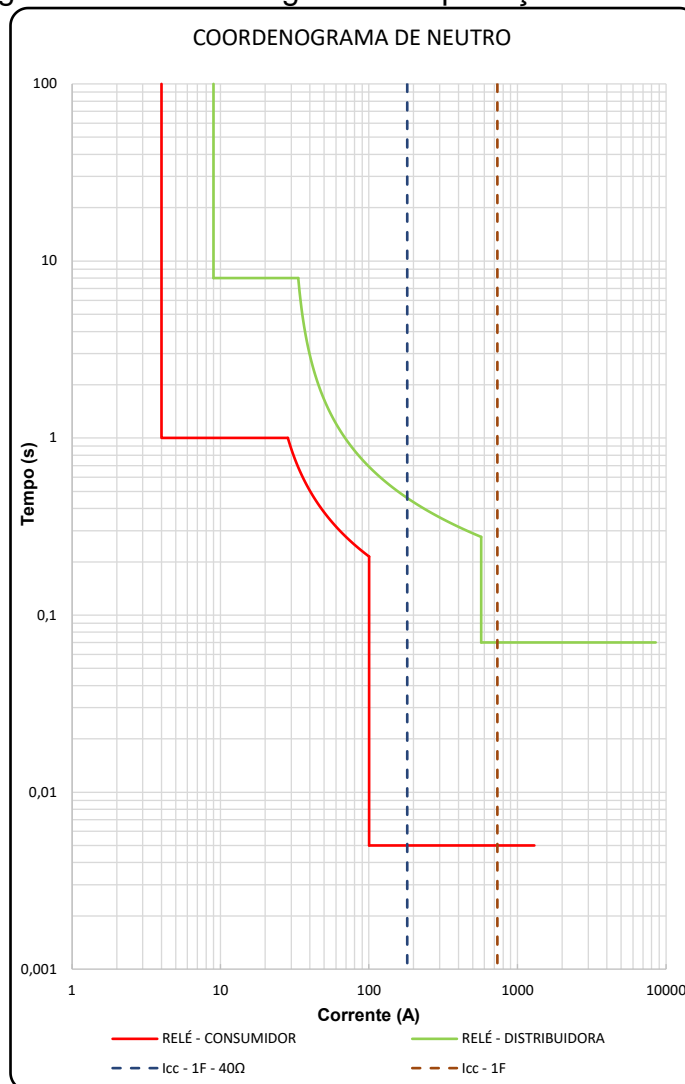
Fonte: Autoria própria.

Já na Figura 24, os parâmetros da legenda são os seguintes:

- Relé - Distribuidora – curvas de atuação das funções 50N, 51N e 51NS da distribuidora;
- Relé - Consumidor – curvas de atuação das funções 50N, 51N e 51NS do consumidor;
- $I_{cc-1F-40\Omega}$  – corrente de curto-circuito fase-terra mínimo com impedância de  $40\Omega$  no primário da subestação;
- $I_{cc-1F}$  – corrente de curto-circuito fase-terra franco no primário da subestação.



Figura 24 – Coordenograma das proteções de neutro.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 25 apresenta um *printscreen* do resumo dos ajustes da proteção e das correntes de curto-circuito calculadas no secundário da subestação exportado para arquivo .docx. A partir dos resultados obtidos, pode-se considerar concluído o estudo e satisfatório a usabilidade e eficiência da ferramenta desenvolvida para condução do estudo.

Figura 25 – Resultados exportados para arquivo .docx.

<b>Responsável Técnico:</b> Aurélio Vinícius Teixeira de Carvalho			
<b>Cliente:</b> Aurélio Vinícius Teixeira de Carvalho			
<b>Estudo de Proteção e Seletividade</b>			
Dados do Cliente			
<b>Demanda Contratada (kW)</b>	350		
<b>Transformador</b>			
Potência (kVA)	500		
Tensão no Primário (kV)	13,8		
Tensão no Secundário (kV)	0,38		
Z (%)	5		
Transformador de Corrente:			
<b>Corrente no Primário (A)</b>	<b>Corrente no Secundário (A)</b>	<b>Carga Nominal (VA)</b>	
100	5	12,5	
Correntes de curto-circuito:			
<b>CURTOS-CIRCUITOS NO SECUNDÁRIO DO TRAFÓ</b>			
<b>Falta (A)</b>	<b>Nível Assimétrico (A)</b>		
lcc-3F	351,7		
lcc-2F	351,7		
lcc-1F	221,2		
<u>lcc</u> - 1F (40 Ω)	181		
Elo Fusível:			
<b>Elo Fusível Utilizado</b>	Elo 40K		
Relés:			
<b>Função</b>	<b>Ajuste Secundário</b>	<b>Ajuste primário</b>	<b>Temporização</b>
51	1,8	36	0,05 s MI-IEC
51N	0,2	20	0,05 s NI-IEC
51NS	1	4	1 s TD
50	15	300	0,005 s TD
50N	5	100	0,005 s

Fonte: Autoria própria.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos de seletividade e proteção são de suma importância para o sistema elétrico de potência, pois, uma proteção bem coordenada permite que o sistema de proteção se torne mais eficiente e identifique rapidamente o componente com defeito

na rede, isolando-o sem afetar outras partes do sistema e reduzindo ao mínimo as interrupções para as cargas.

Apesar das diversas ferramentas comerciais para estudo de proteção existente no mercado, o custo elevado das licenças torna, muitas vezes, inacessíveis o uso dessas ferramentas para profissionais recém-formados e pequenas empresas de engenharia.

Nesse contexto, o presente trabalho buscou desenvolver um dashboard que visa auxiliar os estudos de proteção e seletividade em cabines primárias, de acordo com a DIS-NOR-036 da Neoenergia Pernambuco. A partir dessa ferramenta, é possível realizar a coordenação entre os dispositivos de proteção e avaliar a saturação do transformador de corrente em diferentes cenários.

A interface foi desenvolvida com o intuito de ser de fácil utilização com funcionalidades que possibilitam a exportação dos resultados em um documento no formato .docx que pode ser implementado em memoriais técnicos descritivos. Além disso, a acuracidade da ferramenta foi verificada por meio do estudo de caso, no qual foi comprovado a coordenação dos elementos de proteção da subestação de exemplo, fazendo com que o sistema trabalhe com o menor número de falhas possíveis.

Para trabalhos futuros, sugere-se a implementação da função de proteção 67, proteção contra sobrecorrente direcional de fase, visando atender subestações abrigadas ligadas a usinas fotovoltaicas de minigeração.

## REFERENCIAS

ANDRÉ, Thiago Borges. **Elaboração de um projeto de proteção de uma indústria de açúcar e álcool**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 14 de dez. de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 6856: Transformador de corrente com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kV – Especificação e ensaios**. Rio de Janeiro, 2021.

MAMEDE FILHO, João. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MARDEGAN, Cláudio Sérgio. **Proteção e seletividade em sistemas elétricos industriais**. 2. ed. São Paulo: Atitude Editorial, 2020.

NEOENERGIA PERNAMBUCO. **Fornecimento de energia elétrica em média tensão de distribuição à edificação individual**. Recife, 22 de fev. 2022.

RODRIGUES, Leonardo. **Excel VBA: o que é e como funciona**. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.voitto.com.br/blog/artigo/excel-vba>>. Acesso em: 27 set. 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **Análise da perturbação do dia 15/08/2023**. Relatório de análise de perturbação – RAP, Rio de Janeiro, 18 de out. 2023.

SILVA, Eliel Celestino da. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** Qualitymark Editora, 2020.

SILVA, Marcelo Soares. **Correção da saturação de transformadores de corrente para proteção utilizando redes neurais artificiais.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 7 de ago. 2020.