

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**



**Universidade  
Federal de  
Uberlândia**

**JEAN CARLOS BORGES FILHO**

**Desenvolvimento de aplicativo para parametrização e coordenação de relés de  
sobrecorrente**

Uberlândia

2023

JEAN CARLOS BORGES FILHO

**Desenvolvimento de aplicativo para parametrização e coordenação de relés de  
sobrecorrente**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Uberlândia como  
requisito parcial para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Elétrica

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. José Rubens Macedo Junior

---

Assinatura do orientador

Uberlândia

2023

## AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso foi uma jornada marcada pela generosidade e apoio de diversas pessoas, às quais gostaria de expressar minha profunda gratidão:

Primeiramente, agradeço a Deus, cuja orientação e cuidado me mantiveram no caminho correto e me concederam saúde e força ao longo de todos esses anos de estudo. Sou grato também por ter sido abençoado com pessoas extremamente leais, amorosas e solidárias ao meu redor.

Aos meus pais, Jean Carlos Borges e Delane Lichfett Borges, devo imensa gratidão por me ensinarem os valores da perseverança, do trabalho árduo e da paciência. Seu amor incondicional e apoio incansável foram essenciais em cada passo da minha jornada acadêmica. Sem vocês, eu não estaria onde estou hoje.

Às minhas irmãs, Ana Paula Lichfett Borges e Luísa Aparecida Lichfett Borges, agradeço por serem fontes constantes de inspiração, incentivando-me a buscar sempre minha melhor versão.

À minha namorada, Isabela Ribeiro Martins, meu mais profundo agradecimento por seu constante apoio, amor e motivação ao longo dos últimos quatro anos. Sua presença em minha vida me impulsionou não apenas a ser um estudante ou um profissional dedicado, mas também a cultivar virtudes que transcendem o mercado de trabalho e o meio acadêmico.

Expresso minha gratidão ao meu orientador, Prof. José Rubens Macedo Junior, pela confiança depositada em minha proposta de projeto, bem como por seu apoio e orientação durante todo o processo. Sua motivação e incentivo foram fundamentais para minha jornada acadêmica.

A todos os amigos, tanto do curso de graduação como fora dele, que compartilharam comigo os desafios enfrentados ao longo desta jornada, agradeço de coração. Sua colaboração, amizade e apoio foram imprescindíveis para superar os obstáculos e celebrar as conquistas.

Àqueles que não foram mencionados, saibam que cada gesto de apoio e encorajamento foi profundamente valorizado e apreciado. Esta conquista não teria sido possível sem o suporte e o amor de cada um de vocês. Muito obrigado.

## RESUMO

A análise das parametrizações e coordenações de equipamentos de proteção em sistemas elétricos frequentemente revela erros significativos, como falhas na coordenação entre relés, resultando em interrupções desnecessárias de energia para consumidores. Esses erros são comuns e podem ser exacerbados pela falta de informações ou dificuldades de acesso a dados. Para enfrentar esses desafios, foi desenvolvido um aplicativo iOS usando SwiftUI e a biblioteca Charts, que facilita a análise e ajuste dos relés de sobrecorrente ANSI 50 e ANSI 51. O aplicativo, que funciona sem necessidade de conexão Wi-Fi, oferece uma interface amigável e funcionalidades avançadas para plotar gráficos e resultados, simplificando a instalação e dimensionamento dos relés e proporcionando flexibilidade de uso em qualquer local.

**Palavras-chave:** ANSI 50, ANSI 51, Aplicativo iOS, Coordenação, Parametrização e Relés de Sobrecorrente.

## **ABSTRACT**

The analysis of parameterizations and coordinations of protection equipment in electrical systems often reveals significant errors, such as failures in relay coordination, resulting in unnecessary power outages for consumers. These errors are common and can be exacerbated by a lack of information or difficulties in accessing data. To address these challenges, an iOS application was developed using SwiftUI and the Charts library, facilitating the analysis and adjustment of ANSI 50 and ANSI 51 overcurrent relays. The application, which operates without the need for a Wi-Fi connection, offers a user-friendly interface and advanced features for plotting graphs and results, simplifying the installation and sizing of relays and providing flexibility for use in any location.

**Keywords:** ANSI 50, ANSI 51, Coordination, iOS application, Overcurrent relays and Parameterization.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	10
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	12
2.1. SISTEMA ELÉTRICO RADIAL E EM ANEL.....	13
2.2. ZONAS DE PROTEÇÃO .....	17
2.3. TRANSFORMADORES DE CORRENTE (TC).....	19
2.4. RELÉS .....	25
2.5. RELÉS DE SOBRECORRENTE – ASPECTOS CONSTRUTIVOS (Relés Eletromecânicos).....	28
2.6. RELÉS DE SOBRECORRENTE – ASPECTOS CONSTRUTIVOS (Relés de Estado Sólido ou Estáticos) .....	31
2.7. RELÉS DE SOBRECORRENTE – ASPECTOS CONSTRUTIVOS (Relés Digitais).....	33
2.8. RELÉS DE SOBRECORRENTE – ATUAÇÃO DIRETA E INDIRETA .....	35
2.9. RELÉS DE SOBRECORRENTE –ATUAÇÃO INSTANTÂNEA.....	36
2.10. RELÉS DE SOBRECORRENTE – TEMPORIZADO .....	36
2.11. PARAMETRIZAÇÃO E COORDENAÇÃO ENTRE RELÉS ANSI 50 E 51 .....	39
2.12. XCODE .....	47
2.13. SWIFT & SWIFTUI.....	49
2.14. SWIFT CHARTS .....	51
3. METODOLOGIA.....	53
3.1. BASE TEÓRICA PARA O DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO.....	53
3.2. ESTRUTURA DO CÓDIGO .....	58
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	75
5. CONCLUSÃO.....	84
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	86

## LISTA DE FIGURAS:

Figura 1: Sistema Elétrico Radial Simples .....	13
Figura 2: Sistema Elétrico Radial com Recurso .....	14
Figura 3: Sistema Elétrico em Anel ou Anelar.....	16
Figura 4: Exemplo de Zonas de Proteção - Sistema Radial Simples .....	17
Figura 5: Exemplo Zonas de Proteção - Sistema em Anel .....	18
Figura 6: Transformador de Potencial (TP) .....	19
Figura 7: Transformadores de Corrente .....	20
Figura 8: Relés Eletromecânicos.....	28
Figura 9: Esquemático de um Relé Eletromecânico (Atração Eletromagnética) .....	29
Figura 10: Relé Eletromecânico CDG12 (Indução Eletromagnética) .....	30
Figura 11: Relé de Estado Sólido.....	32
Figura 12: Relés Digitais .....	35
Figura 13: Lugar Geométrico – Curvas Inversas (ANSI 51) .....	38
Figura 14: Parametrização e Coordenação de relés ANSI 50 e ANSI 51.....	40
Figura 15: Tela Principal Xcode.....	48
Figura 16: Logo da linguagem Swift.....	50
Figura 17: Logo do Framework SwiftUI .....	51
Figura 18: Exemplo de gráficos realizados com a biblioteca Charts .....	52
Figura 19: Curvas ANSI 50/51 seguindo os resultados da tabela 5 .....	55
Figura 20: Exemplificação do tempo de coordenação .....	55
Figura 21: Aplicativo final desenvolvido .....	73
Figura 22: Exercício para homologação de resultados do aplicativo.....	75
Figura 23: Curvas ANSI 50/51 seguindo os resultados da tabela 6 .....	79
Figura 24: Homologação dos resultados no aplicativo – coordenação entre 3 relés ANSI 50/51 .....	79
Figura 25: Homologação dos resultados no aplicativo – coordenação entre 2 relés ANSI 50/51 (I <sub>cc</sub> = 1440 [A]).....	81
Figura 26: Homologação dos resultados no aplicativo – coordenação entre 2 relés ANSI 50/51 (I <sub>cc</sub> = 5200 [A]).....	81
Figura 27: Ícone do Aplicativo .....	83

## **LISTA DE TABELAS:**

Tabela 1 - Relação Nominal ou Relação de Transformação de Corrente (RTC).....	22
Tabela 2 - Características entre tipos de curvas inversas (ANSI 51) – Curvas IEC.....	37
Tabela 3 - Curvas IEC Adaptadas .....	38
Tabela 4 - Resultados para as funções ANSI 51 .....	45
Tabela 5 - Resultados para as funções ANSI 51 e ANSI 50 .....	46
Tabela 6 - Resultados para as funções ANSI 51 e ANSI 50 para o Exercício representado pela figura 23.....	78

## 1. INTRODUÇÃO

Ao analisar as parametrizações, coordenações e instalações de equipamentos de proteção em sistemas elétricos, nos deparamos com uma série de potenciais falhas que podem acarretar diversas consequências adversas. A inadequação na coordenação entre os dispositivos de proteção, como os relés, pode resultar em interrupções no fornecimento de energia para um número substancial de consumidores. Isso vai contra a principal prerrogativa da proteção de sistemas elétricos, que é garantir a rápida interrupção de falhas elétricas, como curtos-circuitos, para minimizar a quantidade de consumidores afetados.

Erros humanos são intrínsecos a qualquer atividade laboral. Contudo, no contexto do sistema de proteção elétrica, tais falhas podem ter impactos diretos na segurança e bem-estar de uma vasta população. O desalinhamento na coordenação dos relés muitas vezes resulta de ajustes inadequados realizados nestes dispositivos. Essa falha pode ser atribuída à falta de informações completas durante o ajuste, como a configuração do tempo, ou à dificuldade do técnico ou engenheiro eletricista em acessar facilmente tais informações.

A limitada disponibilidade de ferramentas práticas durante esse processo, somada à eventual falta de conectividade Wi-Fi em algumas localidades, torna o desafio ainda mais complexo. Portanto, é imperativo desenvolver uma solução que não só corrija os erros na coordenação dos relés, mas também forneça uma interface de usuário amigável e acessível em qualquer circunstância.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar a concepção e implementação de um aplicativo iOS para a parametrização e coordenação de relés de sobrecorrente ANSI 50 e ANSI 51. Para alcançar esse objetivo, o aplicativo foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Swift e a biblioteca Charts para construir a interface de usuário (UI). A UI desempenha um papel crucial como o meio através do qual os usuários interagem com o aplicativo.

Os objetivos específicos do trabalho incluem:

- a) Capacitar os usuários a conduzirem análises detalhadas e efetuarem ajustes abrangentes e instrutivos nos relés de sobrecorrente.

- b) Oferecer recursos para visualização de gráficos, tabelas e resultados, simplificando a complexidade do tema e agilizando o processo de instalação e dimensionamento dos relés.
- c) Desenvolver uma interface intuitiva e de fácil interpretação, facilitando a navegação e tornando a análise e parametrização dos relés mais acessíveis.
- d) Criar uma ferramenta de cálculo que permita aos usuários inserir dados e obter resultados precisos com facilidade.
- e) Proporcionar flexibilidade através de uma solução móvel, que pode ser acessada a qualquer momento, inclusive durante a instalação dos relés no sistema elétrico.
- f) Superar as limitações de acesso em locais remotos ou sem sinal, ao não depender de conexão Wi-Fi para seu funcionamento.

Com esses objetivos, o aplicativo visa não apenas melhorar a precisão na coordenação dos relés, mas também proporcionar uma ferramenta prática e eficiente para técnicos e engenheiros eletricitas no campo, contribuindo para a segurança e confiabilidade dos sistemas elétricos.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A proteção de sistemas elétricos é uma área de extrema importância na engenharia elétrica, pois garante a continuidade e segurança do fornecimento de energia. Com a crescente demanda por energia e a complexidade dos sistemas elétricos modernos, torna-se vital o desenvolvimento de métodos e ferramentas que assegurem a eficiência e precisão na proteção desses sistemas. Neste contexto, os relés de sobrecorrente desempenham um papel essencial na identificação e interrupção de falhas, minimizando impactos adversos e garantindo a integridade da rede elétrica.

Destarte, a proteção dos sistemas elétricos é fundamentalmente conduzida pelos relés, desempenhando um papel crucial na garantia da integridade e confiabilidade desses sistemas. A função primordial dos relés é analisar, identificar e localizar defeitos ao longo da rede elétrica. Esses dispositivos alertam os operadores do sistema por meio de alarmes e sinalizações e, em situações críticas, podem enviar um sinal de "trip" para acionar a abertura dos disjuntores.

Os relés são o coração da proteção dos sistemas elétricos, atuando como sensores sensíveis a eventos como curtos-circuitos. A rapidez com que esses relés respondem é crucial, pois sua principal função é eliminar rapidamente curtos-circuitos ou sobrecorrentes, minimizando assim o impacto no fornecimento de energia e reduzindo o número de consumidores sem eletricidade.

A correta parametrização dos relés é um fator crítico para garantir sua eficácia. A eficiência na configuração dos parâmetros não só determina a capacidade dos relés em identificar e reagir a falhas, mas também influencia diretamente na seletividade dos dispositivos. Uma parametrização eficaz permite coordenar os relés de maneira precisa, garantindo que apenas os dispositivos relevantes respondam a eventos específicos. Dessa forma, a seletividade otimizada contribui para minimizar ainda mais o número de consumidores afetados em casos de falhas no sistema elétrico, reforçando a eficiência global do sistema de proteção.

Os relés de sobrecorrente são dimensionados e configurados de acordo com o tipo de sistema elétrico em que são utilizados, seja ele radial ou em anel. No entanto, é importante observar que os relés de sobrecorrente convencionais (funções instantâneas ou temporizadas)



No cenário mencionado, se houver uma falha na barra "B2" e o disjuntor "3" entrar em ação, todos os consumidores situados a jusante desse disjuntor serão afetados, resultando na interrupção do fornecimento de energia. Esses consumidores são identificados pelas letras C, D, E, F, G, IPICK-UP, I, J, K e L. Essa situação não apenas prejudica os consumidores, mas também tem implicações para a concessionária de energia elétrica, especialmente no contexto da distribuição de energia elétrica.

Isso ocorre porque a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece requisitos de continuidade para as concessionárias, com o objetivo de garantir a qualidade na prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, como a Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.

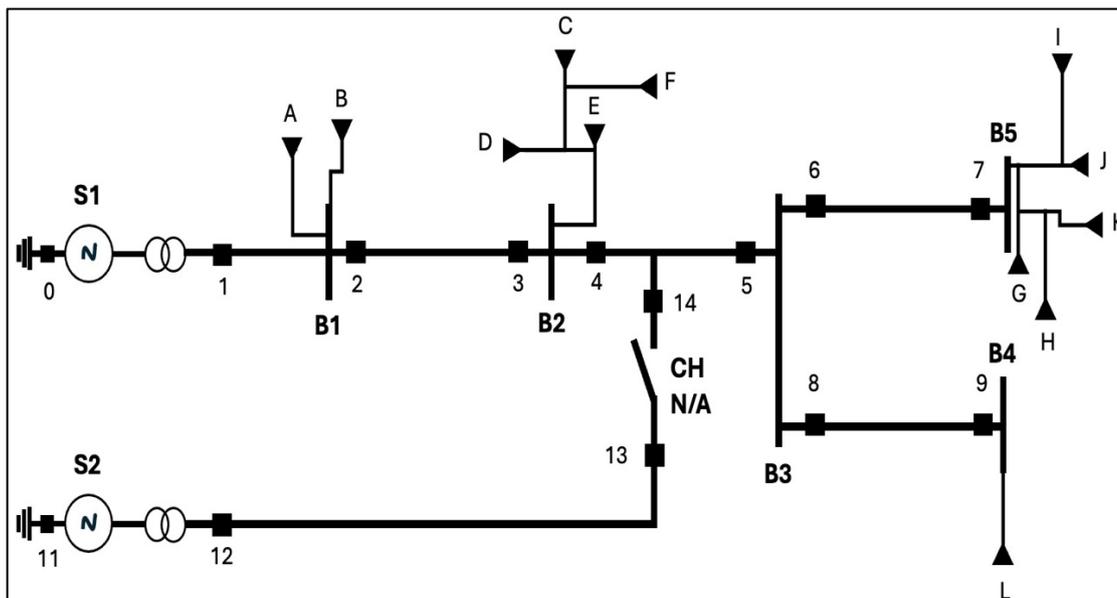
- Sistema radial com recurso:

O sistema radial com recursos adicionais consiste em uma única fonte de energia que supre várias cargas. No entanto, ele também inclui recursos de reserva para garantir que cargas críticas, como hospitais, não fiquem sem energia em emergências. Isso é viabilizado pela presença de chaves seccionadoras, que entram em ação para introduzir outra fonte de energia no circuito quando cargas específicas não estão sendo alimentadas pela fonte principal devido a uma atuação de proteção.

O sistema apresenta as seguintes características:

- i. Este sistema é caracterizado pela presença de interligações normalmente abertas entre alimentadores adjacentes, sejam eles provenientes da mesma subestação ou de subestações diferentes.
- ii. Sua concepção inclui uma reserva de capacidade em cada circuito, de modo a absorver a carga de outro circuito em caso de falha.
- iii. Essa abordagem tem como objetivo limitar o número de clientes afetados por falhas e reduzir o tempo de interrupção em comparação com um sistema radial simples.

## **Figura 2: Sistema Elétrico Radial com Recurso**



Fonte: Próprio Autor

Ao examinar a figura acima como exemplo, podemos notar que, no caso de uma falha na barra "B2", o disjuntor "3" entra em ação, interrompendo o fornecimento de energia para os consumidores C, D, E, F, G, IPICK-UP, I, J, K e L.

Para garantir o fornecimento contínuo de energia para esses consumidores, a interligação que normalmente está aberta é fechada, restabelecendo assim o fornecimento de energia para esses consumidores.

Nessa situação, após o fechamento da interligação normalmente aberta ("CH N/A"), o disjuntor "4" também é acionado, isolando o curto-circuito em "B2" do restante do circuito. Como resultado, apenas as cargas C, D, E e F são interrompidas, enquanto os demais consumidores continuam a receber energia elétrica.

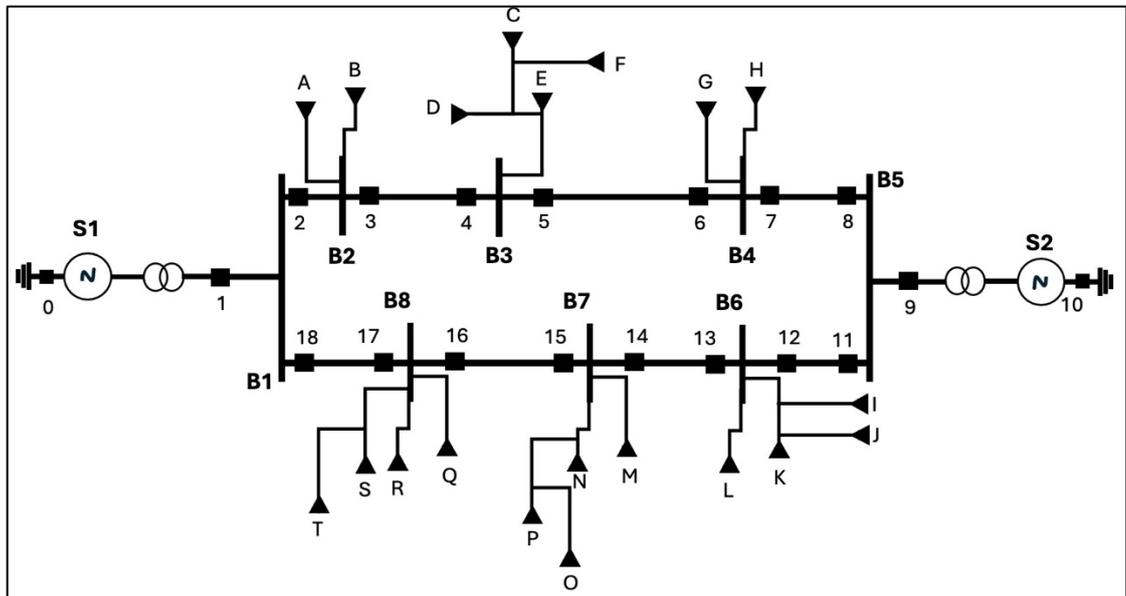
Após discutirmos o sistema elétrico radial, é pertinente explorarmos agora o sistema elétrico em anel, conhecido também como sistema anelar.

### **Sistemas Elétricos em Anel (ou malha):**

O sistema em anel, também referido como sistema em malha, é reconhecido por sua alta confiabilidade na provisão contínua de energia elétrica aos consumidores. Essa

característica é atribuída à presença de múltiplas fontes de energia elétrica, conforme exemplificado a seguir:

**Figura 3: Sistema Elétrico em Anel ou Anelar**



**Fonte: Próprio Autor**

Analisando a figura acima e considerando um cenário de curto-circuito na barra "B4", os disjuntores "6" e "7", devidamente coordenados, entrarão em operação para isolar a falha. Como resultado dessa proteção, apenas as cargas G e IPICK-UP sofreriam interrupção no fornecimento de energia elétrica, enquanto as demais permaneceriam alimentadas.

Entretanto, é importante destacar que esse sistema enfrenta um desafio significativo em situações de falha, uma vez que o curto-circuito pode atingir valores absolutos mais elevados. Isso ocorre devido à configuração em que múltiplas fontes de energia alimentam o circuito, sem a separação proporcionada por interligações normalmente abertas, contribuindo simultaneamente para a ocorrência da falha.

Comparativamente, a instalação desse sistema é mais custosa do que a do sistema radial com recursos, que por sua vez é mais dispendiosa do que a do sistema radial simples. Esse aumento de custos não se limita apenas à necessidade de uma quantidade significativa de equipamentos de proteção de sistemas, como relés, disjuntores, transformadores de potencial e transformadores de corrente, mas também à

demanda por cabos de maior espessura. Portanto, os condutores devem ter bitolas adequadas para garantir a transferência eficiente de energia, com margens de segurança apropriadas.

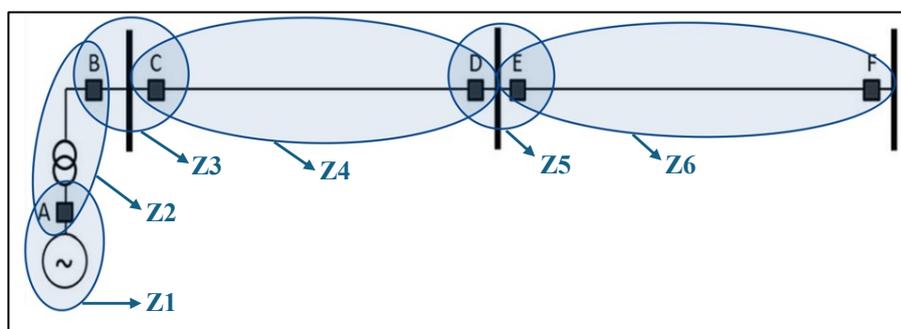
Após explorarmos os diferentes tipos de sistemas elétricos, como os sistemas elétricos radiais e os sistemas elétricos em anel, é crucial agora compreendermos como a proteção desses sistemas é organizada e executada. No próximo tópico, vamos adentrar no estudo das zonas de proteção de sistemas elétricos, analisando suas características, funções e importância na garantia da segurança e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. Ao entendermos as zonas de proteção, estaremos mais bem preparados para compreender o funcionamento dos dispositivos e equipamentos empregados na proteção de sistemas elétricos.

## 2.2. ZONAS DE PROTEÇÃO

Agora que entendemos como os sistemas elétricos funcionam na prática e qual é o seu papel, vamos examinar mais detalhadamente a proteção de sistemas elétricos, com ênfase especial nas zonas de proteção e na coordenação entre elas.

Primeiramente, vamos analisar as zonas de proteção, que são áreas nos dispositivos de proteção destinadas a isolar um curto-circuito e, assim, reduzir o número de consumidores afetados pela interrupção do sistema causada por esse evento.

**Figura 4: Exemplo de Zonas de Proteção - Sistema Radial Simples**

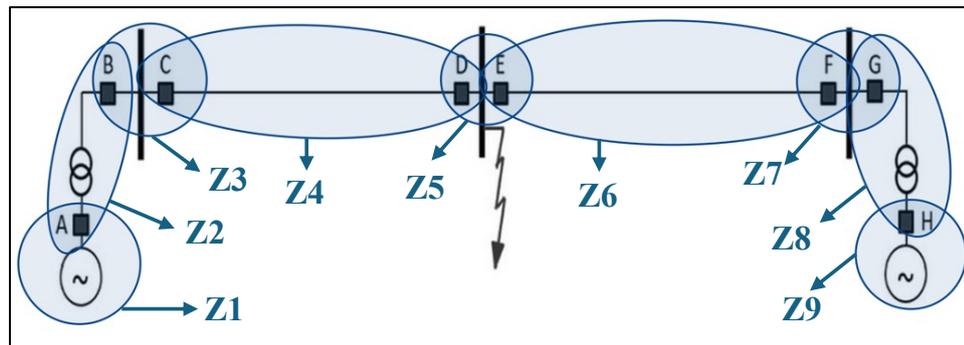


Fonte: Próprio Autor

Ao analisarmos a figura acima e considerarmos um cenário de curto-circuito ocorrendo após o disjuntor F ou no barramento à direita de F, é crucial que a zona de proteção 6 (Z6) atue de forma adequada, iniciando pelo disjuntor F. No entanto, caso haja uma falha nesse disjuntor, a proteção secundária entra em ação, acionando o disjuntor E em seguida. Esse processo continua até que o último disjuntor na sequência, o disjuntor A, correspondente à primeira zona de proteção (Z1), entre em operação.

Essas zonas de proteção funcionam devidamente graças à coordenação entre os equipamentos de proteção, ou seja, os relés. Os disjuntores necessitam receber um comando para operar, e esse comando é fornecido pelos relés, conhecidos como "trip". Essa coordenação assegura que o disjuntor mais próximo do local do curto-circuito seja acionado primeiro, impedindo que mais consumidores sejam afetados. A figura subsequente ilustrará ainda mais esse conceito.

**Figura 5: Exemplo Zonas de Proteção - Sistema em Anel**



**Fonte: Próprio Autor**

Ao analisarmos a figura acima, que mostra exclusivamente os disjuntores e as zonas de proteção, podemos identificar a presença de dois geradores, indicando a configuração de um sistema elétrico em anel. Essa configuração torna as zonas de proteção mais complexas, demandando uma coordenação precisa entre os disjuntores.

Seguindo a premissa central da proteção de sistemas elétricos, que visa minimizar o número de consumidores afetados por um curto-circuito, os disjuntores D e E, correspondentes à quinta zona de proteção (Z5), deveriam atuar para conter o evento. Entretanto, caso o disjuntor E falhe, o disjuntor F, designado como a proteção de retaguarda da sexta zona de proteção (Z6), entraria em ação.

Após uma análise detalhada dos sistemas elétricos radiais e em anel, bem como das zonas de proteção e da coordenação entre os equipamentos de proteção, torna-se fundamental aprofundarmos nossa investigação sobre a proteção de sistemas elétricos, com foco especial nos transformadores de corrente. Esses componentes desempenham um papel crucial na garantia da segurança e eficiência dos sistemas elétricos, sendo essencial compreender seu funcionamento para uma melhor compreensão de todos os diferentes tipos de relés. Assim, no próximo tópico, abordaremos os transformadores de corrente.

### 2.3. TRANSFORMADORES DE CORRENTE (TC)

Os Transformadores de Medição, também conhecidos como Transformadores para Instrumentos (TIs), desempenham um papel crucial na eficiência operacional dos dispositivos de medição e proteção em sistemas elétricos. Eles desobrigam esses instrumentos de serem dimensionados com correntes e tensões nominais correspondentes à carga e à tensão do circuito principal.

Esses transformadores desempenham várias funções essenciais. Em primeiro lugar, eles reproduzem com precisão as condições reais de um sistema elétrico. Além disso, mantêm a integridade das grandezas medidas, como forma de onda e defasagem, e transformam o módulo da grandeza a ser medida sem alterar sua natureza. Eles também isolam o circuito primário do secundário, caracterizando-se como circuitos magneticamente acoplados. Existem diversos tipos de transformadores, sendo os principais os Transformadores de Potencial (TPs) e os Transformadores de Corrente (TCs), cujas características são seguidas por todos os outros tipos de transformadores.

**Figura 6: Transformador de Potencial (TP)**



Fonte: A.cabine

**Figura 7: Transformadores de Corrente**



Fonte: Próprio Autor

No contexto dos relés de sobrecorrente, dedicamos nossa atenção aos transformadores de corrente, projetados especialmente para refletir a corrente fluindo em um sistema elétrico em seu secundário, proporcionando proteção para equipamentos de medição, controle e segurança. Um transformador de corrente é um tipo de transformador de instrumentos, com o enrolamento primário conectado em série com o circuito elétrico e o enrolamento secundário destinado a alimentar bobinas ou entradas analógicas de corrente em instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção.

Na Figura 7, são apresentados cinco tipos diferentes de transformadores de corrente. O primeiro é o transformador de corrente com núcleo enrolado (superior, esquerdo), onde o primário e o secundário são fisicamente enrolados no mesmo núcleo de ferro. Em seguida, temos o TC do tipo janela (inferior, esquerdo), onde o secundário é enrolado no núcleo, deixando espaço para que o primário passe pelo centro na forma de um fio. O terceiro tipo é o TC de núcleo dividido (inferior, central), semelhante ao tipo janela, mas com a capacidade de dividir o núcleo para envolver qualquer cabo por onde circula corrente elétrica. Este tipo é comumente usado em medições de amperagem e tem um formato semelhante a um amperímetro do tipo alicate. O TC do tipo barra (superior, central) difere dos anteriores por não possuir um cabo com núcleo ao redor, mas sim uma barra de ferro. Este tipo é frequentemente usado em série com uma linha de transmissão ou um transformador de potência, associado a tensões nominais elevadas e encontrado em subestações. Por fim, temos o TC do tipo bucha (lado

extremo direito), instalado diretamente na bucha de equipamentos como transformadores de força e disjuntores.

O enrolamento primário de um transformador de corrente geralmente possui poucas espiras e um condutor de grande seção transversal, resultando em baixa impedância devido à relação inversa entre essas grandezas. Por outro lado, o enrolamento secundário é composto por muitas espiras de condutor fino, aumentando a impedância e, conseqüentemente, protegendo os equipamentos de medição, controle e segurança.

É crucial destacar que o enrolamento secundário de transformadores de corrente nunca deve operar aberto, pois isso pode resultar na explosão do TC e causar graves acidentes. Durante a operação normal, a corrente no secundário do equipamento circula sem problemas. No entanto, quando o equipamento está aberto, uma corrente excessiva circula pelo ramo de magnetização do TC, podendo induzir uma tensão muito elevada nos terminais secundários, resultando em falha no isolamento e aumento excessivo de temperatura, podendo até mesmo causar a explosão do equipamento.

Em casos de TCs com isolamento em epóxi, a explosão pode resultar na projeção de estilhaços, enquanto em TCs a óleo, a caixa do equipamento pode se romper, projetando óleo a altas temperaturas. Esses danos podem afetar outros equipamentos na subestação ou representar perigo para as pessoas no ambiente.

Ao focarmos mais nos transformadores de corrente, vamos agora examinar cuidadosamente cada uma de suas especificações. Isso nos fornecerá uma base sólida para a parametrização e coordenação dos relés de sobrecorrente. As especificações incluem:

#### **- Relações Nominais (Correntes Primárias e Secundárias):**

A relação de transformação de corrente (RTC) descreve a relação entre a corrente que atravessa o circuito primário e a corrente correspondente no circuito secundário do transformador. Em essência, indica que, para cada unidade de corrente que flui pelo primário, há uma proporção específica de corrente no secundário. Essa proporção é determinada pela RTC, conforme detalhado na **Tabela 1**.

**Tabela 1 - Relação Nominal ou Relação de Transformação de Corrente (RTC)**

<b>Corrente Primária Nominal [A]</b>	<b>Relação Nominal (1)</b>	<b>Relação Nominal (2)</b>	<b>Corrente Secundária Nominal [A]</b>
50	50:5	10:1	5
100	100:5	20:1	5
200	200:5	40:1	5
300	300:5	60:1	5
400	400:5	80:1	5
500	500:5	100:1	5
600	600:5	120:1	5

**Fonte: Próprio Autor**

**- Tensão Nominal:**

Refere-se à tensão máxima de operação do sistema à qual a tensão nominal do transformador de corrente deve corresponder. Por exemplo, se a tensão máxima de operação do sistema for de 25 kV, então a tensão nominal do transformador de corrente também deve ser equivalente a 25 kV.

**- Frequência Nominal:**

Esta especificação é dependente da frequência do sistema elétrico. No Brasil, por exemplo, a frequência do sistema é de 60 Hz, sendo o único país da América Latina a adotar essa frequência. Na década de 1960, essa decisão foi tomada, enquanto a maioria dos outros países da região, assim como a maioria do mundo, adotam uma frequência de 50 Hz.

**- Cargas Nominais:**

No contexto de um transformador de corrente, a carga secundária refere-se à impedância total resultante dos dispositivos conectados ao seu circuito secundário, incluindo os condutores de interconexão. A carga secundária nominal, por sua vez, representa a impedância conectada

aos terminais secundários do TC, cujo valor corresponde à potência para garantir a precisão sob corrente nominal.

De maneira geral, a carga nominal de um transformador, independente de ser destinado à medição ou à proteção, pode ser calculada de acordo com a seguinte equação:

$$C_{tc} = \sum Cap + lc + zc + Is^2 \quad (1)$$

Onde:

- $\sum Cap$  é o somatório de cargas interligadas ao secundário do TC.
- $lc$  é o comprimento do fio condutor em metros.
- $zc$  é a impedância do condutor em ohms por metro.
- $Is$  é a corrente nominal do secundário do TC, geralmente igual a 5 A.

#### - Fator de Sobrecorrente (FS):

Equivale a um parâmetro importante que representa a quantidade de vezes que a corrente nominal primária do TC deve ser multiplicada para obter a máxima corrente de curto-circuito permitida pelo equipamento. Ele também é conhecido como fator de segurança. Se a corrente de curto-circuito exceder o produto do fator de sobrecorrente pela corrente nominal, o transformador em questão corre o risco de ser danificado, o que pode limitar significativamente ou até mesmo encerrar sua vida útil. O valor padrão para o Fator de Sobrecorrente é frequentemente definido como FS=20.

#### - Tensão secundária:

A tensão nos terminais secundários dos transformadores de corrente é influenciada pela saturação do núcleo. Apesar disso, ainda há o risco de ocorrerem tensões secundárias elevadas, especialmente quando o primário dos TCs é exposto a correntes excepcionalmente altas ou quando há uma carga secundária conectada com valor superior à nominal do TC. A tensão secundária pode ser calculada de acordo com a seguinte equação:

$$Vs = FS \times Zc \times Is \quad (2)$$

### **- Classificação dos TCs de Proteção quanto a Impedância:**

Existem duas classificações:

- **Classe A:**

Possui alta impedância interna, o que significa que quando o TC alimenta uma carga, a reatância de dispersão do enrolamento secundário tem um valor significativo em relação à impedância total do circuito secundário.

- **Classe B:**

Possui baixa impedância interna, o que indica que quando o TC alimenta uma carga, a reatância de dispersão do enrolamento secundário tem um valor insignificante em relação à impedância total do circuito secundário.

### **- Serviço Medição e/ou Proteção:**

Os Transformadores de Corrente (TCs) podem ser empregados tanto para medição quanto para proteção. Em outras palavras, se o engenheiro encarregado deseja verificar a corrente que chega a uma carga sem danificar o amperímetro, recorre-se a um TC. Da mesma forma, são utilizados para dispositivos de proteção, como nos relés de sobrecorrente.

### **- Classe de Exatidão:**

Especifica o valor máximo de erro, expresso em percentagem, que um TC pode introduzir. Em outras palavras, todos os transformadores apresentam um erro na relação de transformação, o que é inerente à construção do equipamento. Existem diferentes classes de exatidão, dependendo do serviço para o qual o TC será utilizado:

- Para serviços de medição, as classes de exatidão são:  
0,3%, 0,6%, 1,2%, 3%.
- Para serviços de proteção, as classes de exatidão são:  
2,5%, 10%.

#### **- Número de Núcleos e Finalidade (Medição e/ou Proteção):**

Para fins de medição, são utilizados Transformadores de Corrente (TCs) de núcleo fino. Isso significa que o núcleo de ferro desses transformadores possui uma menor seção transversal. Como resultado, durante um curto-circuito, o núcleo tende a saturar, o que limita a sobretensão aplicada nos medidores.

Por outro lado, para fins de proteção, a situação é oposta. Os TCs utilizados para proteção possuem núcleo grosso. Isso é feito para evitar a saturação durante um curto-circuito.

#### **- Nível Básico de Isolamento (NBI):**

Padronizado de acordo com o nível de tensão primária do sistema. Para um sistema de 13,8 kV, o TC de subestação apresenta um NBI equivalente a 110 kV, enquanto para o sistema de distribuição, o NBI é de 95 kV. Para sistemas de 69 kV, o TC de subestação tem um NBI de 350 kV, enquanto para distribuição é de 325 kV.

#### **- Fator Térmico (FT):**

Representa a corrente máxima que um TC pode suportar em regime permanente, operando dentro das condições normais, sem ultrapassar os limites de elevação de temperatura associados à sua classe de isolamento, conforme estabelecido pelas normas pertinentes. Os valores padronizados de FT pela ABNT são 1,0; 1,2; 1,5; 2,0. Entre essas opções, o mais comumente utilizado pelas empresas é o de 1,2.

Agora compreendemos como os transformadores de corrente podem ser instrumentos úteis para os relés de sobrecorrente. No próximo tópico, aprofundaremos nossa compreensão sobre a proteção de sistemas elétricos e examinaremos o papel dos relés em conjunto com os transformadores de corrente.

## **2.4. RELÉS**

Conforme estabelecido pela ABNT, um relé é um dispositivo utilizado para operar um equipamento elétrico em resposta a variações nas condições desse equipamento ou no circuito ao qual está associado.

Na área de proteção elétrica, quando se trata de relés, é importante retratarmos alguns termos em inglês que são empregados cotidianamente por engenheiros e técnicos e também serão utilizados ao longo deste trabalho de conclusão de curso. São eles:

- **Trip:** Este termo é utilizado de forma genérica para descrever a emissão de um sinal por parte do relé para um disjuntor. Quando ocorre essa emissão, dizemos que o relé enviou um "trip" para o disjuntor, levando-o a ser ativado e isolando o erro no sistema.
- **Pick-up:** Trata-se do termo genérico utilizado para descrever a corrente mínima capaz de atrair magneticamente a alavanca responsável por fechar os terminais do circuito de corrente contínua do relé de sobrecorrente. Isso, por sua vez, resulta no envio de um sinal de trip para o disjuntor. No contexto dos relés que estamos analisando, o pick-up pode ser compreendido como o limiar de operação específico para esses casos.
- **Drop-out:** Este termo genérico refere-se à desativação do relé. Imagine que um relé estava prestes a operar, mas devido à redução de corrente no secundário do transformador de corrente (TC), ele não opera mais. Isso é conhecido como "Drop-out" ou desistência do relé.

Os relés são classificados com base em diversas características distintas. Inicialmente, essas classificações englobam suas diferentes formas de atuação, que podem ser mecânicas, térmicas, ópticas, entre outras. Além disso, a classificação dos relés também leva em consideração a natureza da grandeza à qual respondem, abrangendo variáveis como corrente, tensão, potência, frequência, pressão e temperatura, entre outras.

Outro critério de classificação importante é o tipo construtivo, que varia desde relés eletromecânicos (de indução), mecânicos, eletrônicos até estáticos, entre outros. Além disso, os relés podem ser categorizados de acordo com sua função, abrangendo desde proteção contra sobrecorrente e subcorrente, controle de tensão e potência, direcionalidade de corrente ou potência, diferenciação, distância, até outros aspectos, como a forma de conexão do elemento

sensor, como a aplicação específica, que pode incluir geradores, transformadores, linhas de transmissão, entre outros sistemas elétricos. Além disso, inclui-se a classificação quanto à temporização, que pode ser instantânea, temporizada ou temporizada inversamente.

Nesse contexto, discutiremos os relés de sobrecorrente, os quais, conforme as classificações mencionadas, podem ser categorizados da seguinte forma:

- **Grandeza à qual respondem:** Corrente.
- **Tipo construtivo:** Todos os tipos.
- **Função:** Proteção contra sobrecorrentes.
- **Aplicação específica:** Abrangente em todas as áreas.
- **Temporização:** Instantânea e Temporizada Inversamente.

Os relés de sobrecorrente também apresentam uma subclassificação, essa subclassificação pode ser realizada da seguinte maneira:

1. **Aspectos construtivos:**

- Relés eletromecânicos.
- Relés eletrônicos ou estáticos.
- Relés digitais.

2. **Atuação na abertura do disjuntor do circuito a proteger:**

- Atuação direta.
- Atuação indireta.

3. **Instalação:**

- Relé primário (lado referente ao transformador de corrente).
- Relé secundário (lado referente ao transformador de corrente).

4. **Tempo de atuação:**

- Relés instantâneos.
- Relés temporizados:
  - Tempo definido.

- Tempo inverso:
  - ⇒ Pouco Inverso.
  - ⇒ Normalmente Inverso.
  - ⇒ Muito Inverso.
  - ⇒ Extremamente Inverso.

Nos próximos tópicos abordaremos os pontos mais relevantes desta subclassificação.

## 2.5. RELÉS DE SOBRECORRENTE – ASPECTOS CONSTRUTIVOS (Relés Eletromecânicos)

Os relés eletromecânicos (Electro-Mechanical Relays - EMR), pioneiros na proteção de sistemas elétricos, são elaborados com movimentos mecânicos provenientes de acoplamentos elétricos e magnéticos, desempenhando um papel fundamental na detecção e proteção contra sobrecorrentes.

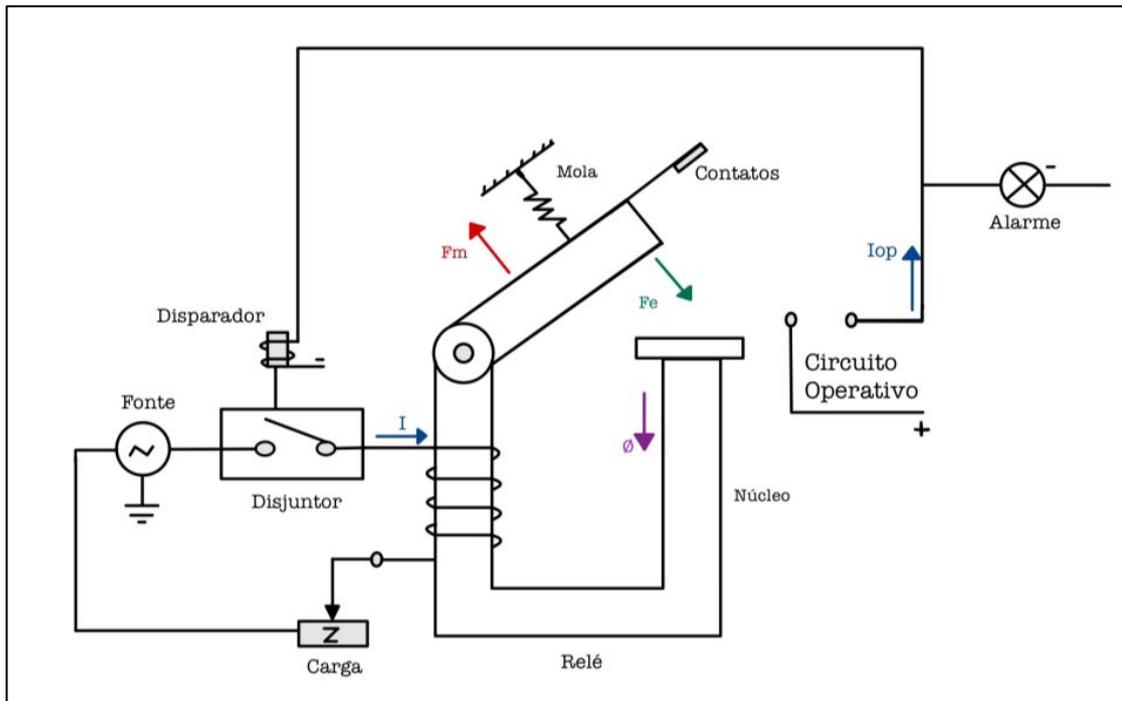
**Figura 8: Relés Eletromecânicos**



Fonte: Proteção do Sistema Elétrico de Potência | Facebook

Sua concepção e construção são baseadas principalmente em movimentos mecânicos, acionados pela presença de campos magnéticos gerados pelo fluxo de corrente elétrica através de uma bobina indutora. Portanto, os principais elementos constituintes desse tipo de relé são a atração eletromagnética e a indução eletromagnética.

**Figura 9: Esquemático de um Relé Eletromecânico (Atração Eletromagnética)**



**Fonte: Próprio Autor**

Os elementos fundamentais de um relé de sobrecorrente eletromecânico foram previamente abordados, contudo, o seu funcionamento detalhado ainda não foi elucidado. Utilizando a Figura 9 como referência, podemos compreender o funcionamento deste relé da seguinte maneira: quando uma corrente ( $I$ ) atravessa a bobina, um fluxo magnético ( $\phi$ ) é gerado no núcleo. Esse fluxo magnético induz uma força de atração eletromagnética ( $F_e$ ) entre a peça móvel e o núcleo. Se a corrente  $I$  for suficientemente alta para que a força eletromagnética supere a força da mola, os terminais do circuito operativo se fecharão, permitindo que uma corrente de operação seja estabelecida. Isso acionará um alarme e disparará um disjuntor que normalmente está fechado (NF), forçando assim a sua abertura. Caso contrário, o circuito permanecerá como mostrado na Figura 9.

Para complementar a explicação anterior sobre o funcionamento do relé de sobrecorrente eletromecânico, vejamos o seguinte cenário:

Quando configuramos o relé para atuar ao detectar uma corrente de 5 amperes e até que essa corrente alcance o valor ajustado, o campo magnético gerado na bobina do relé pode não ser suficientemente forte para atrair a haste metálica, única peça móvel do sistema. A

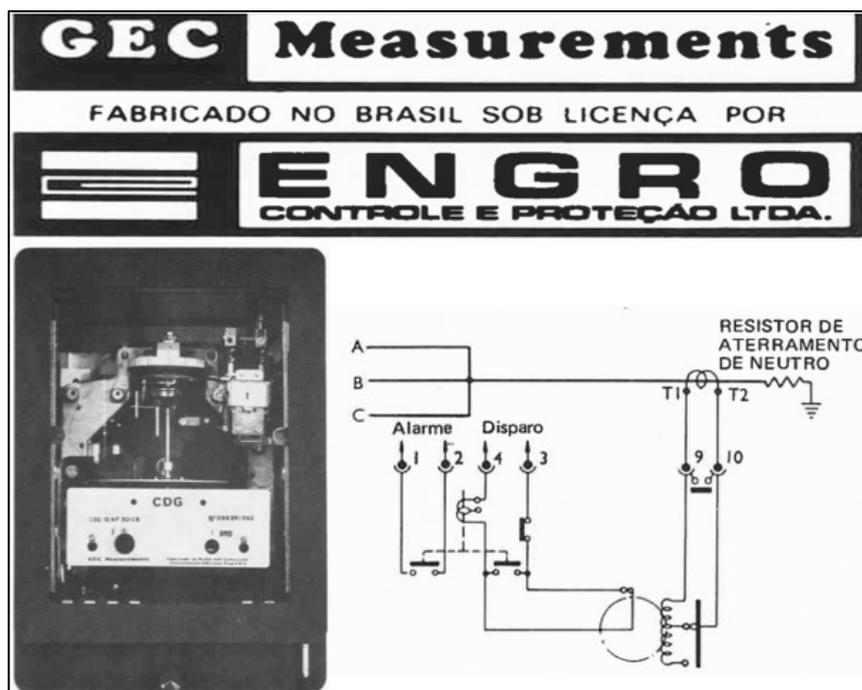
capacidade de ajuste dessa corrente de atuação do relé é limitada, geralmente não oferecendo uma ampla gama de opções de ajuste.

No entanto, se a corrente analisada exceder a corrente ajustada, o campo magnético ganhará força suficiente para atrair a haste, acionando assim o circuito de abertura ou fechamento do disjuntor presente no relé. Esse circuito pode ser construído de várias maneiras, mas geralmente é projetado para operar com corrente contínua, garantindo um controle independente das variações e flutuações nas tensões e correntes do sistema elétrico.

Além do relé eletromecânico por atração eletromagnética, outro tipo comum é o relé de indução eletromagnética, que opera de maneira semelhante a um motor de indução. Nesse caso, o rotor é geralmente um disco e o estator é um circuito indutor, onde um campo magnético é gerado. Esse campo magnético induz a rotação do disco, que, por sua vez, fecha o circuito responsável por acionar a bobina do disjuntor.

Foi com este tipo de relé que surgiram as curvas de atuação normalizadas, como as curvas normalmente inversas, muito inversas etc. Essas curvas descrevem a relação entre a corrente e o tempo de atuação do relé, fornecendo informações valiosas sobre seu desempenho e comportamento em diferentes situações.

**Figura 10: Relé Eletromecânico CDG12 (Indução Eletromagnética)**



**Fonte: GEC Measurements – CDG12**

A Figura 10 mostra um exemplar do relé de sobrecorrente eletromecânico CDG12, produzido no Brasil pela empresa GEC Measurements sob a licença da ENGRO. Esse dispositivo é empregado para proteger contra sobrecorrente em resistores de aterramento e em outras situações, como a proteção contra sobrecorrente em fases. O CDG12 opera com base no tempo, usando uma unidade de disco de indução com uma característica de operação de tempo longo inverso. É especialmente útil em aplicações que demandam uma relação específica entre tempo e corrente. Sua bobina de operação consome pouca energia e é enrolada de modo a manter curvas características paralelas em duas derivações selecionáveis por meio de um pino de inserção. A remoção desse pino automaticamente seleciona a derivação de corrente mais alta, possibilitando ajustes durante a carga e garantindo a continuidade do secundário do transformador de corrente. O elemento móvel possui alta segurança e baixo sobrecurso, mesmo em condições adversas de operação. O ajuste da temporização é feito por um dial mecânico acoplado ao disco, com uma escala graduada em múltiplos de tempo.

Relés eletromecânicos têm suas vantagens e desvantagens. Suas principais vantagens incluem durabilidade e confiabilidade. Reconhecidos como os mais robustos, esses relés têm uma longa vida útil, garantindo a resistência das peças e a durabilidade do equipamento. Sua confiabilidade é notável, operando de acordo com a Lei de Faraday, desde que mantenham uma manutenção adequada. Porém, têm desvantagens como custo elevado, complexidade de manutenção e instalação, além de restrições de aplicabilidade.

Visando superar as limitações dos relés eletromecânicos, surgiram novas tecnologias que restringem esses dispositivos a grandezas elétricas ou eletrônicas. Os relés estáticos são um exemplo disso, minimizando erros e aumentando a precisão, uma vez que não dependem mais de movimentos mecânicos.

## **2.6. RELÉS DE SOBRECORRENTE – ASPECTOS CONSTRUTIVOS (Relés de Estado Sólido ou Estáticos)**

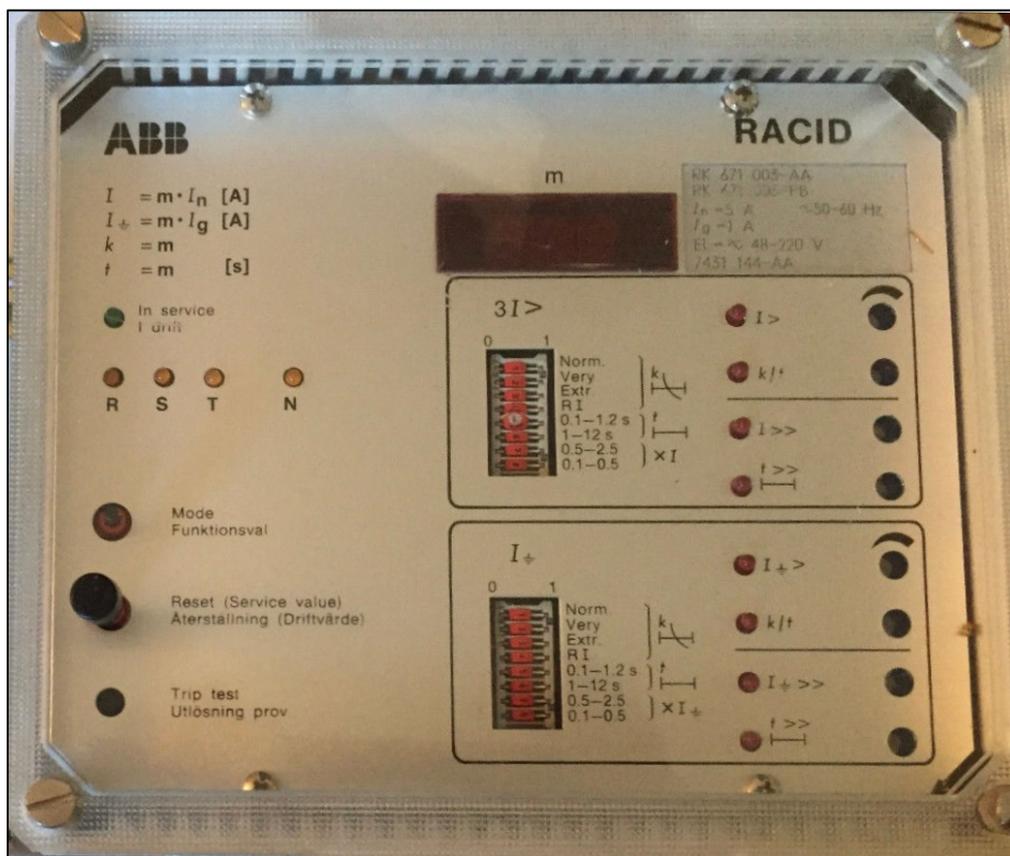
Ao contrário dos relés eletromecânicos, que dependem de bobinas, campos magnéticos, molas e contatos mecânicos para realizar comutar uma fonte de energia, os relés de estado sólido (Solid State Relays – SSR) operam sem peças móveis. Eles baseiam-se na eletrônica

analógica, utilizando circuitos transistorizados compostos por transistores e diodos para desempenhar funções lógicas e de temporização.

As vantagens dos relés de estado sólido em comparação com os relés eletromecânicos tradicionais são notáveis. Geralmente têm custo mais acessível, oferecem velocidades de operação mais rápidas devido à natureza dos circuitos analógicos em comparação com os eletromecânicos e consomem menos energia. Além disso, sua capacidade de carga no circuito secundário do transformador é menor, reduzindo o risco de saturação e tornando-os mais eficientes em várias aplicações.

Contudo, os relés de estado sólido também apresentam algumas desvantagens. São mais suscetíveis a interferências elétricas, especialmente em ambientes desafiadores como subestações, onde os circuitos eletrônicos podem ser danificados. Além disso, sua vida útil tende a ser mais limitada em comparação com os relés eletromecânicos, o que pode afetar sua confiabilidade a longo prazo.

**Figura 11: Relé de Estado Sólido**



**Fonte: ebay - ABB RK 671 003-AA,ABB RACID RK 671203AA,RK671003PB OVERCURRENT PROTECTION,BW**

A Figura 11 apresenta um exemplo desse tipo de relé: o modelo RACID 1MRK 507 002-BEN, um relé de proteção contra sobrecorrente de fase e neutro fabricado em 1999. Este modelo é composto por três placas de circuito impresso, uma unidade de alimentação e transformadores de entrada, todos alojados em um invólucro de alumínio. Ele oferece proteção contra interferências externas e possui uma unidade de alimentação que isola as tensões interna e externa, podendo ser alimentado tanto por tensão AC quanto DC. O relé possui um relé de disparo e três relés de alarme programáveis, com várias versões disponíveis que oferecem diferentes configurações de conexão e instalação. Sua configuração é realizada através de interruptores e potenciômetros, enquanto LEDs indicadores fornecem informações sobre o status de operação. Ele é capaz de detectar falhas internas ou interrupções de alimentação, exibindo a corrente de disparo no visor. Apesar de suas vantagens, como a proteção contra interferências elétricas, sua vida útil é mais limitada em comparação com os relés eletromecânicos.

Os primeiros relés estáticos enfrentaram uma série de desafios ao serem adotados nos sistemas elétricos, incluindo operações incorretas, resultando na substituição de muitos deles pelos confiáveis relés eletromecânicos convencionais. Essa substituição foi principalmente motivada pela sensibilidade excessiva dos relés estáticos a transientes e distúrbios elétricos comuns no sistema de potência. No entanto, a aplicação de filtros apropriados contribuiu para mitigar esses problemas em certa medida. Todavia, quando pareciam estar prestes a recuperar sua posição de destaque no mercado de proteção de sistemas elétricos, o avanço acelerado da tecnologia eletrônica possibilitou o desenvolvimento de relés digitais microprocessados, acarretando assim o declínio prematuro dos relés estáticos.

## **2.7. RELÉS DE SOBRECORRENTE – ASPECTOS CONSTRUTIVOS (Relés Digitais)**

À medida que a tecnologia avançou, os dispositivos de proteção elétrica acompanharam esse progresso. Durante anos, temos confiado em relés estáticos e eletromecânicos para salvar redes elétricas. Agora, com o advento dos microprocessadores, esses dispositivos evoluíram ainda mais.

Os relés digitais, também conhecidos como relés numéricos, representam a versão aprimorada dos modelos estáticos e eletromecânicos. Esses dispositivos têm a função de medir parâmetros elétricos em uma rede e transformá-los em dados numéricos, que são então submetidos a análises matemáticas e lógicas para determinar a necessidade de desligamento.

A preferência pelos relés numéricos se deve, em grande parte, às suas características versáteis. Um único relé desse tipo pode monitorar diversos parâmetros, como corrente, tensão, frequência, tempo de início e fim, entre outros. Além disso, é capaz de identificar e monitorar diversas falhas, como sobrecorrente e sobretensão, oferecendo um amplo espectro de operações, tais como as definidas pelos padrões ANSI 50, 51, 67, 87, e outros.

Os relés numéricos são amplamente empregados em estações geradoras e subestações para a proteção automatizada de vários componentes, incluindo alimentadores, motores, geradores, linhas de transmissão, transformadores e barramentos.

Esses dispositivos são oferecidos por diferentes fabricantes, como Siemens, ABB, Schneider Electric, Alstom, Texas Instrumentations, entre outros. Cada empresa disponibiliza seu próprio software para interação e programação dos relés, permitindo a personalização dos algoritmos de proteção de acordo com as necessidades específicas de cada sistema elétrico.

Entretanto, é importante destacar que os relés numéricos tendem a ter um preço mais elevado em comparação com outros tipos de relés, o que pode representar um ponto negativo em sua adoção.

**Figura 12: Relés Digitais**



**Fonte: twdeng – Parametrização e aferição de relés de proteção**

Todos os tipos de relés abordados anteriormente, têm a capacidade de serem instalados para atuar de maneira direta ou indireta nos sistemas elétricos. Abordaremos esse tema com mais detalhes no próximo tópico.

## **2.8. RELÉS DE SOBRECORRENTE – ATUAÇÃO DIRETA E INDIRETA**

Relé de atuação direta refere-se ao tipo de relé que opera diretamente no mecanismo de destravamento da mola ou válvula do disjuntor. Em outras palavras, é o próprio relé que libera a energia necessária para desativar o disjuntor.

Por outro lado, os relés de atuação indireta conforme sugere seu nome, o relé não executa diretamente a função de destravar o disjuntor. Sua operação é indireta: ele fecha um contato que, por sua vez, ativa, energiza ou transfere para outro circuito a responsabilidade de realizar a destrava da mola ou a abertura da válvula do sistema pneumático ou hidráulico para liberar o disparo do disjuntor.

A instalação de relés de sobrecorrente é essencial em várias partes de um transformador de corrente, independentemente de sua atuação direta ou indireta na abertura do disjuntor. No próximo tópico, discutiremos as características da instalação de um relé de sobrecorrente no primário de um transformador.

## **2.9. RELÉS DE SOBRECORRENTE – ATUAÇÃO INSTANTÂNEA**

Os relés de sobrecorrente de atuação instantânea recebem esse nome devido ao fato de que ele atuará instantaneamente para qualquer corrente maior que a corrente de ajuste parametrizada para o relé em questão. Obviamente, nada em termos físicos consegue ser instantâneo, no entanto independente de qual seja o tipo do relé, isto é, eletromecânico ou digital, ele emitirá um sinal, isolando a falha rapidamente.

Segundo a simbologia padronizada pela ANSI (American National Standards Institute) / IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) os relés de sobrecorrente instantâneos são conhecidos pelo número 50.

Esse tipo de relé é considerado o menos sensível de todos, isto é, ele possui a maior corrente de pick-up, ou seja, o maior limiar de operação, uma vez que se enviado um sinal de trip, o relé não poderá mais exercer drop-out. Logo, podemos concluir que ele é utilizado para operações que envolvem falhas elétricas, ou correntes extremamente elevadas.

## **2.10. RELÉS DE SOBRECORRENTE – TEMPORIZADO**

Os relés de sobrecorrente de atuação temporizada podem ser divididos em dois tipos, os relés de atuação temporizada inversa e os relés de atuação temporizada definida.

O relé de atuação temporizada definida é mais sensível que o relé ANSI 50, embora não seja tão sensível quanto o relé de atuação temporizada inversa. Isso se deve ao fato de que ele possui uma corrente de pick-up intermediária entre os dois tipos mencionados anteriormente.

A sensibilidade desse relé se manifesta quando identifica uma corrente igual ou superior à corrente ajustada para sua atuação (pick-up). No entanto, ele só emitirá o “trip” para ativação do disjuntor (ANSI 52), após um tempo definido, o que o difere do relé ANSI 50, já que este sim, ainda obtém a chance de drop-out.

O relé de atuação temporizada inversa, designado pelo número 51 na simbologia padrão da ANSI (Instituto Nacional Americano de Padrões) / IEEE (Instituto de Engenheiros

Eletricistas e Eletrônicos), é reconhecido por sua alta sensibilidade. Em comparação com os outros dois tipos de relés, ele possui a corrente de pick-up mais baixa. Essa característica decorre do fato de que esse tipo de relé realiza uma análise cuidadosa do aumento gradual de corrente.

O funcionamento do relé ANSI 51 é o seguinte: uma vez que a corrente em análise atinge ou ultrapassa sua corrente de pick-up, o relé se torna sensível. No entanto, ele só emite um sinal de trip após um período específico. Até esse ponto, ele se assemelha ao relé de tempo definido em todos os aspectos.

A distinção crucial reside no fato de que o relé ANSI 51 é parametrizado com base em uma curva descrita pela seguinte equação:

$$t = \frac{K \times TMS}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^E - 1} \quad (3)$$

Em termos simplificados, o termo "I" representa a corrente nominal do sistema em relação ao secundário do Transformador de Corrente (TC), conforme especificado pelo relé em análise. Por sua vez, "Is" indica a corrente de pick-up ou corrente de ajuste, também referida ao secundário do TC do mesmo relé. A variável "TMS" corresponde ao dial de tempo, que pode ser ajustado para modificar o atraso de tempo. Aumentar o TMS resulta em um deslocamento vertical positivo da curva inversa em questão, enquanto diminuir o TMS corresponde a um deslocamento vertical negativo da mesma curva.

As constantes "K" e "E" não são fixas e variam de acordo com o tipo de curva escolhida. Diferentes curvas respondem a diferentes normas. Neste caso, a norma escolhida é a da IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional). É importante notar que a curva "Pouco Inversa" não foi considerada para essa norma e, portanto, não será utilizada neste trabalho. Abaixo estão os parâmetros dessas constantes conforme especificados pela norma IEC.

**Tabela 2 - Características entre tipos de curvas inversas (ANSI 51) – Curvas IEC**

<b>Curvas Inversas</b>	<b>K</b>	<b>E</b>
Normalmente Inversa	0,14	0,02

Muito Inversa	13,5	1,00
Extremamente Inversa	80,0	2,00
Pouco Inversa	0,050	0,040

Fonte: KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência - V.1.** Editora: UFSC

Para alinhar-nos com a abordagem de muitos autores contemporâneos e obras literárias, optaremos por substituir "K" por " $\beta$ " e "E" por " $\alpha$ ". Dessa forma, temos:

$$t = \frac{\beta \times TMS}{\left(\frac{I}{I_S}\right)^\alpha - 1} \quad (4)$$

**Tabela 3 - Curvas IEC Adaptadas**

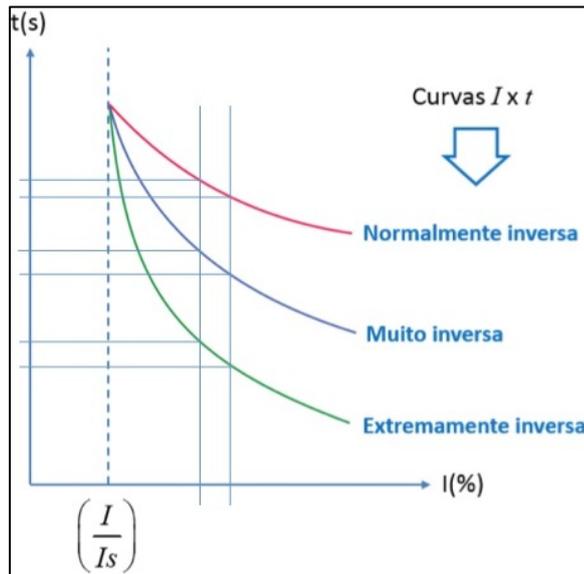
<b>Curvas Inversas</b>	<b><math>\beta</math></b>	<b><math>\alpha</math></b>
Normalmente Inversa	0,14	0,02
Muito Inversa	13,5	1,00
Extremamente Inversa	80,0	2,00
Pouco Inversa	0,050	0,040

Fonte: Próprio Autor

Essas três curvas podem ser interpretadas da seguinte maneira: quanto mais a curva for inversa, menor será a variação de corrente necessária para que o relé acione o disjuntor, resultando em um sinal de "trip". Em outras palavras, o relé aciona o disjuntor mais rapidamente.

Portanto, se quisermos uma proteção mais conservadora, ou seja, com menor sensibilidade, optamos por uma curva mais inversa. Por outro lado, se buscamos maior sensibilidade, escolhemos uma curva menos inversa, conforme ilustrado na figura abaixo.

**Figura 13: Lugar Geométrico – Curvas Inversas (ANSI 51)**



Fonte: Disponibilizado pelo Professor Orientador José Rubens Macedo Junior

É crucial destacar que, na maioria das vezes, os relés ANSI 50 e ANSI 51 são utilizados em conjunto, cada um complementando o outro. Essa associação é tão comum que, frequentemente, fabrica-se um único relé incorporando ambas as funcionalidades. Portanto, é comum encontrar referências a esse conjunto como ANSI 50/51 em literatura técnica, e adotaremos essa nomenclatura ao longo deste documento.

Após explorarmos todas as classificações dos relés de sobrecorrente, é pertinente discutir as características do ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) que será utilizado para criar nosso aplicativo, bem como as bibliotecas e a linguagem de programação associadas. Esses aspectos serão detalhados no próximo tópico.

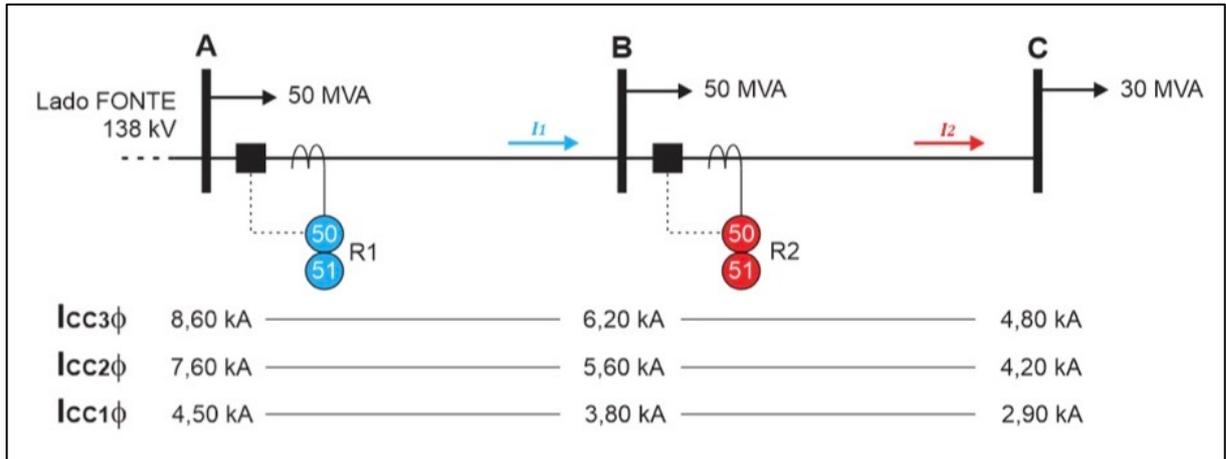
Para obter uma compreensão aprofundada dos relés de sobrecorrente ANSI 50 e ANSI 51, é fundamental não apenas analisar seu funcionamento na prática, mas também compreender os processos de parametrização e coordenação entre esses relés. O próximo tópico deste estudo tem como objetivo elucidar esses aspectos.

## 2.11. PARAMETRIZAÇÃO E COORDENAÇÃO ENTRE RELÉS ANSI 50 E 51

Neste capítulo, serão discutidos os procedimentos para a parametrização e coordenação entre relés de sobrecorrente ANSI 50 e ANSI 51, com o objetivo de implementar a proteção

adequada em uma linha de transmissão. Será apresentado um exemplo ilustrativo para elucidar os conceitos abordados.

**Figura 14: Parametrização e Coordenação de relés ANSI 50 e ANSI 51**



Fonte: Próprio Autor

A ilustração acima discute a aplicação de dois relés de sobrecorrente ANSI 50 e 51, destinados à proteção de uma linha de transmissão específica. Notavelmente, esses relés estão inseridos em um sistema radial e são classificados como secundários, indicando que estão instalados no secundário de um transformador de corrente. Além disso, eles são caracterizados como relés de atuação direta, o que implica que exercem controle direto sobre a abertura dos disjuntores. Ademais, a figura apresenta as correntes máximas de curto-circuito para essa linha, abrangendo cenários trifásicos, bifásicos e monofásicos, bem como as cargas do sistema.

O primeiro passo para iniciar qualquer processo de parametrização de relés é realizar o cálculo das correntes nominais do sistema em questão. É importante destacar que cada zona de proteção possui uma corrente nominal específica, influenciada pelas características das cargas e podendo variar ao longo das diferentes zonas de proteção. O cálculo das correntes nominais pode ser realizado da seguinte maneira:

$$I_n = \frac{\sum \text{Cargas [VA]}}{\sqrt{3} \times \text{Fonte [kV]}} \quad (5)$$

Substituindo os valores na equação 5 temos:

$$I_n(z1) = \frac{\sum Cargas [VA]}{\sqrt{3} \times Fonte [kV]} = \frac{(50 + 30) \times 10^6}{\sqrt{3} \times 138 \times 10^3} = 334,7 [A]$$

$$I_n(z2) = \frac{\sum Cargas [VA]}{\sqrt{3} \times Fonte [kV]} = \frac{(30) \times 10^6}{\sqrt{3} \times 138 \times 10^3} = 125,51 [A]$$

Com os valores das correntes nominais em mãos, torna-se viável proceder ao dimensionamento de ambos os transformadores de corrente. Este processo pode ser conduzido da seguinte maneira:

O primeiro passo é arredondar os valores das correntes nominais que fluem pelo primário dos transformadores para a centena mais próxima. Isto é:

$$I_{\text{primário}} (TC1) \cong 400,0 A$$

$$I_{\text{primário}} (TC2) \cong 200,0 A$$

Dessa forma, estabelecemos um fator de sobrecorrente para o transformador de corrente a ser utilizado, sendo comum que a maioria dos fabricantes adote um fator de sobrecorrente equivalente a 20.

Com esse valor definido, procedemos à multiplicação desse fator pelas correntes que fluem pelos primários dos transformadores previamente calculadas. O resultado dessa multiplicação deve exceder ou igualar o valor da maior corrente de curto-circuito observada no primário, ou seja, para o primeiro relé,  $I_{cc3\phi} = 8,60 \text{ kA}$ , e para o segundo relé,  $I_{cc3\phi} = 6,20 \text{ kA}$ . Caso exceda, o dimensionamento do transformador de corrente está concluído, e teremos o valor do RTC para o transformador em questão. Se por sua vez o valor não exceda a corrente trifásica de curto-circuito, então deve-se realizar uma nova multiplicação com a próxima maior centena. Em termos de equacionamento, temos:

$$I_{\text{primário}} (TC1) \times FS \geq 8.600 A \rightarrow 8.000 A < 8.600 A$$

$$I_{\text{primário}} (TC2) \times FS \geq 6.200 A \rightarrow 4.000 A < 6.200 A$$

Logo, deve-se realizar uma nova inequação, aumentando o valor da corrente nominal para ambas as zonas:

$$I_{\text{primário}}'(TC1) \cong 500 \text{ A} \rightarrow I_{\text{primário}}'(TC1) \times FS \geq 8.600 \text{ A} \rightarrow 10.000 \text{ A} > 8.600 \text{ A}$$

$$I_{\text{primário}}'(TC2) \cong 300 \text{ A} \rightarrow I_{\text{primário}}'(TC2) \times FS \geq 6.200 \text{ A} \rightarrow 6.000 \text{ A} < 6.200 \text{ A}$$

Ao estabelecermos o novo valor da corrente que circula pelo primário do primeiro transformador de corrente e ao multiplicá-lo pelo fator de sobrecorrente predefinido, constatamos que esse valor excede o maior valor de curto-circuito registrado pelo primário do transformador de corrente correspondente à primeira zona de proteção. Essa análise nos permite determinar a relação de transformação de corrente para o primeiro relé.

Após a análise da Tabela 1, presente na vigésima segunda página do documento, determinamos que a RTC (Relação de Transformação de Corrente) para o primeiro transformador será de 500 A : 5 A ou 100 A : 1 A, ou seja, 100. No entanto, o novo valor estabelecido para a corrente que flui no primário do segundo transformador, multiplicado pelo fator de sobrecorrente, ainda não excede a maior corrente de curto-circuito trifásica que afeta o segundo transformador. Portanto, é necessário realizar uma nova iteração.

$$I_{\text{primário}}''(TC2) \cong 400 \text{ A} \rightarrow I_{\text{primário}}''(TC2) \times FS \geq 6.200 \text{ A} \rightarrow 8.000 \text{ A} > 6.200 \text{ A}$$

Agora que a inequação é verdadeira, podemos determinar o valor da relação de transformação de corrente do segundo transformador. Analisando a mesma tabela encontrada na página vinte e dois, definimos o segundo Relé de Transformador de Corrente (RTC) como sendo 400 A para 5 A ou 80 A para 1 A, ou seja, 80.

Com os valores das relações de transformação de ambos os transformadores em mãos, juntamente com as correntes nominais que por eles passam, estamos aptos a definir as correntes de pick-up ANSI 51 dos relés. Essas correntes representam o limiar para que o relé 51 entre em operação. O cálculo desse valor é derivado da seguinte inequação:

$$\frac{I_{\text{ajuste}}(\text{primário})}{RTC} < I_{\text{pickup}} < \frac{I_{cc2\phi}(\text{no final do circuito})}{RTC} \quad (6)$$

A corrente de ajuste é definida como 1,5 vezes a corrente nominal. Este valor de 1,5 representa o fator de carga, um parâmetro crucial para evitar que o relé 51 seja acionado devido a flutuações de carga insignificantes no circuito.

Realizaremos os cálculos das correntes de pick-up de maneira separada, começando pelo primeiro relé:

$$\frac{I_{ajuste (primário)_1}}{RTC_1} < I_{pickup_1} < \frac{I_{cc2\phi(no\ final\ do\ circuito)_1}}{RTC_1}$$

$$\frac{334,7 \times 1,5}{100} < I_{pickup_1} < \frac{5.600}{100} \rightarrow 5,02\ A < I_{pickup_1} < 56\ A$$

Com base nessa equação, determinamos o valor da corrente de atuação (corrente de pick-up) para o primeiro relé 51 como sendo o próximo valor inteiro maior que a primeira parcela da equação, ou seja, 6 A. Essa prática é amplamente aceita na literatura especializada. O mesmo procedimento é seguido para o cálculo da corrente de atuação do segundo relé, como demonstra os cálculos a seguir:

$$\frac{I_{ajuste (primário)_2}}{RTC_2} < I_{pickup_2} < \frac{I_{cc2\phi(no\ final\ do\ circuito)_2}}{RTC_2}$$

$$\frac{125,51 \times 1,5}{80} < I_{pickup_2} < \frac{4.200}{80} \rightarrow 5,02\ A < I_{pickup_2} < 52,5\ A$$

Portanto, conclui-se que o valor da corrente de pick-up para o segundo relé é de 3 A. É importante ressaltar que esses valores são referentes ao secundário do transformador de corrente. Isso implica que o primeiro relé 51 atuará quando identificar uma corrente de seis amperes fluindo por seus terminais, equivalente a uma corrente de 600 amperes no primário do transformador. Da mesma forma, o segundo relé atuará ao detectar uma corrente de três amperes em seus terminais, equivalente a uma corrente de 300 amperes no primário do transformador. Essa análise é de suma importância, visto que alguns autores ilustram as curvas em relação ao espaço geográfico referido ao secundário, enquanto outros as referem ao primário. No caso do

aplicativo que será analisado posteriormente, as curvas são apresentadas em escalas referentes ao primário, o que é mais comum na literatura.

Com os valores de corrente de pick-up referentes ao secundário dos transformadores definidos, podemos agora proceder à coordenação entre os dois relés de sobrecorrente temporizados, utilizando as seguintes premissas:

- As curvas dos relés serão do tipo Normalmente Inversa (ainda que possam ser Muito Inversa ou Extremamente Inversa, a escolha dependerá do critério de cada eletricitista responsável).
- O dial de tempo, ou TMS (conceito abordado na página 39 do documento), para o segundo relé será definido como 0,20 segundos.
- O tempo de coordenação entre os relés será de 500 milissegundos.

O tempo de coordenação entre os relés mencionado acima refere-se ao intervalo no qual o segundo relé enviará o sinal de disparo para seu disjuntor correspondente, caso o primeiro disjuntor ainda não tenha aberto o sistema, evitando assim a ocorrência de falta. Sugere-se que a coordenação "manual" seja realizada iniciando-se pela proteção de retaguarda, razão pela qual é determinado o valor do dial de tempo para o segundo relé. Com base nessas premissas, é possível determinar o dial de tempo do primeiro relé, o qual corresponde a uma proporcionalidade direta a diferença de tempo de 500 milissegundos entre o tempo de disparo do primeiro relé e o tempo de disparo do segundo relé, conforme será demonstrado nos cálculos a seguir.

Ao definir uma corrente três vezes maior do que a corrente de acionamento do primeiro relé para análise de coordenação, obtemos:

$$I_{cc \text{ secundário}} = I_{pickup_1} \times 3 A \rightarrow I_{cc \text{ secundário}} = 18 A$$

Como a falta não ocorre no secundário do transformador e sim no primário, temos:

$$I_{cc \text{ primário}} = I_{cc \text{ secundário}} \times RTC_2 \rightarrow 18 A \times 80 \rightarrow I_{cc \text{ primário}} = 1.440 A$$

Agora que temos o valor da corrente de curto estabelecido para calcular a coordenação entre relés, procederemos ao cálculo do tempo no qual o segundo relé entrará em operação. Esse cálculo será realizado conforme a equação especificada na página trinta e nove do documento, resultando nos tempos correspondentes.

$$t_2 = \frac{0,14 \times 0,20}{\left(\frac{1.440/80}{3}\right)^{0,02} - 1} = 0,76 \text{ s}$$

Conforme estabelecido nas premissas, o tempo de coordenação entre os relés foi definido como 500 milissegundos, ou seja, 0,5 segundos. Assim, podemos determinar o tempo de atuação do primeiro relé:

$$t_1 = t_2 + \text{coordenação} \rightarrow t_1 = 0,76 + 0,5 \rightarrow t_1 = 1,26 \text{ s ou } 1260 \text{ ms}$$

Com o tempo de atuação do primeiro relé determinado, é possível ajustar o dial de tempo correspondente, visto que é este parâmetro que influencia a diferença de tempo de coordenação entre os dispositivos.

$$1,26 = \frac{0,14 \times TMS_1}{\left(\frac{1.440/100}{6}\right)^{0,02} - 1} \rightarrow TMS_1 = 0,1590 \text{ s}$$

Temos, portanto, a seguinte tabela de resultados para as funções ANSI 51:

**Tabela 4 - Resultados para as funções ANSI 51**

	<b>Primeiro Relé</b>	<b>Segundo Relé</b>
<b>RTC</b>	100	80
<b>I pick-up 51 [A]</b>	6	3
<b>TMS [s]</b>	0,159	0,2

**Fonte: Próprio Autor**

Após determinarmos os valores para as funções ANSI 51, é necessário estabelecer a corrente de atuação para o relé de sobrecorrente instantâneo, conhecido como ANSI 50. Esse processo é conduzido por meio da seguinte equação:

$$I_{pickup} (ANSI 50) \geq \frac{I_{cc3\phi \text{ até } 80\% \text{ do final do trecho}}}{RTC} \quad (7)$$

A corrente de curto-circuito trifásica, até oitenta por cento do final do trecho, corresponde à zona de proteção que o relé em questão pode monitorar para detectar um aumento significativo de corrente, como é o caso da função 50. No caso esse relé conseguirá monitorar uma elevação abrupta de corrente por todo seu trecho e mais 80% do próximo trecho. Logo, para o primeiro relé 50, temos:

$$I_{pickup} (ANSI 50)_1 \geq \frac{I_{cc3\phi_1 \text{ até } 80\% \text{ do final do trecho}}}{RTC_1}$$

$$I_{pickup} (ANSI 50)_1 \geq \frac{(8.600 - 6.200) \times (1 - 0,8) + 6.200}{100}$$

$$I_{pickup} (ANSI 50)_1 = 66,8 \rightarrow \rightarrow I_{pickup} (ANSI 50)_1 = 67 A$$

Realizando o mesmo processo para o segundo relé 50, temos:

$$I_{pickup} (ANSI 50)_2 \geq \frac{I_{cc3\phi_2 \text{ até } 80\% \text{ do final do trecho}}}{RTC_2}$$

$$I_{pickup} (ANSI 50)_2 \geq \frac{(6.200 - 4.800) \times (1 - 0,8) + 4.800}{100}$$

$$I_{pickup} (ANSI 50)_2 = 63,5 \rightarrow \rightarrow I_{pickup} (ANSI 50)_2 = 64 A$$

Assim, chegamos à tabela final de resultados:

**Tabela 5 - Resultados para as funções ANSI 51 e ANSI 50**

	<b>Primeiro Relé</b>	<b>Segundo Relé</b>
<b>RTC</b>	100	80
<b>I pick-up 51 [A]</b>	6	3
<b>TMS [s]</b>	0,159	0,2
<b>I pick-up 50 [A]</b>	67	64

**Fonte: Próprio Autor**

O exemplo destacado ressalta a importância da parametrização e coordenação dos relés de sobrecorrente instantâneos e temporizados inversamente. É fundamental notar que esse exemplo foi apresentado com o objetivo específico de facilitar a compreensão dos relés de sobrecorrente ANSI 50 e ANSI 51. No entanto, ao longo do aplicativo, esses dados serão previamente calculados e utilizados, sem premissas fixas. Isso permite ao engenheiro ajustar livremente os parâmetros conforme necessário, como aumentar ou diminuir o dial de tempo, ajustar a relação de transformação de corrente do TC ou modificar as correntes de pick-up das funções ANSI.

Agora que exploramos a teoria básica de proteção de sistemas elétricos, deve-se discutir o desenvolvimento do aplicativo em si. Para isso, é essencial compreender também a IDE (Integrated Development Environment) ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado utilizado para criar o aplicativo. Esse aspecto será abordado no próximo tópico.

## **2.12. XCODE**

O ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) escolhido para o desenvolvimento do aplicativo em questão é o Xcode. Ele é uma plataforma robusta utilizada para criar software destinado aos ecossistemas da Apple, como Mac, iPhones, iPads, Apple Watch e Apple TV. O Xcode oferece aos desenvolvedores uma ampla gama de ferramentas para projetar, desenvolver, analisar, testar e implantar suas aplicações de forma eficiente.

A história do Xcode remonta aos primeiros estágios do Mac OS X. Naquela época, a Apple estava no processo de desenvolvimento de um sistema operacional baseado em Unix e viu a necessidade de uma ferramenta que facilitasse a criação de aplicativos para esse sistema.

Assim, o Project Builder foi concebido, inicialmente como uma ferramenta integrada de desenvolvimento incluída no Mac OS X.

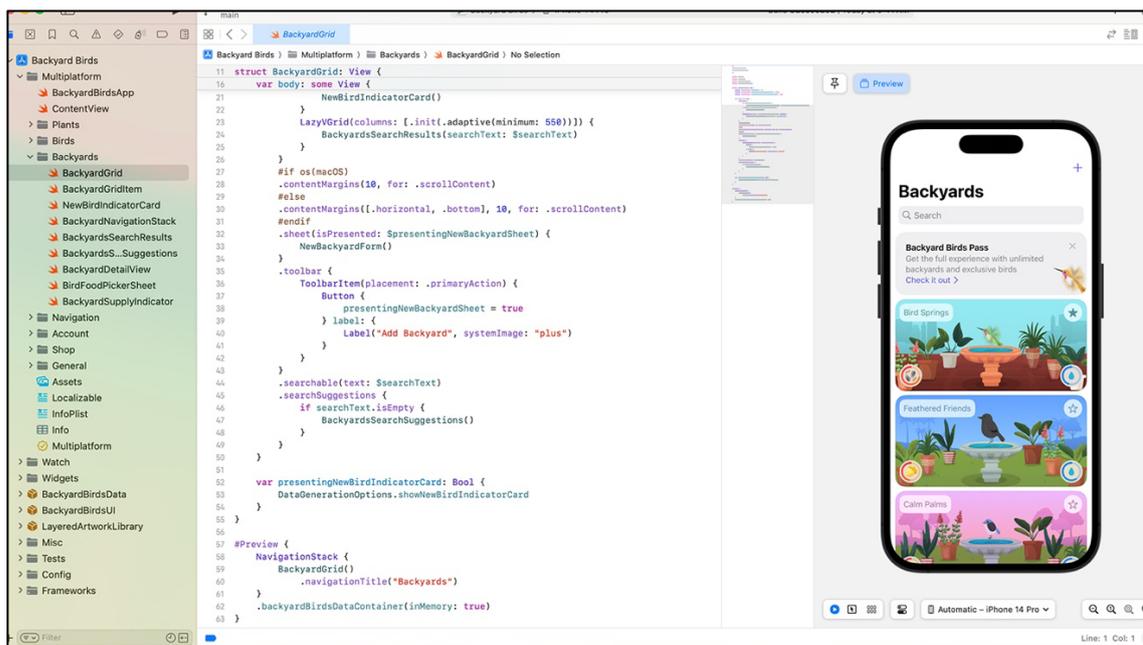
Com o passar do tempo, o Project Builder foi evoluindo até se transformar no Xcode. A primeira versão do Xcode foi lançada em 2003 junto com o Mac OS X 10.3 "Panther". Desde então, o Xcode tem sido a principal escolha para o desenvolvimento de aplicativos para os dispositivos da Apple, passando por diversas atualizações e melhorias ao longo dos anos.

Algumas das principais características do Xcode incluem:

- Um editor de código avançado, que oferece destaque de sintaxe, autocompletar, trechos de código e outras funcionalidades para facilitar a escrita de código.
- Um construtor de interface visual, que permite aos desenvolvedores projetar interfaces de usuário de forma intuitiva e esquematizar interações de forma visual.
- Ferramentas de depuração e análise de código, além de perfilamento de desempenho, para ajudar os desenvolvedores a identificar e corrigir problemas em seus aplicativos.
- Suporte para uma ampla variedade de linguagens de programação e frameworks, como Swift, Objective-C, C++, Java e Python, permitindo que os desenvolvedores escolham a melhor linguagem para suas necessidades específicas.

Em resumo, o Xcode continua sendo uma das ferramentas de desenvolvimento mais populares e abrangentes disponíveis para a criação de aplicativos para as plataformas da Apple, proporcionando aos desenvolvedores as ferramentas necessárias para criar aplicativos de alta qualidade de forma eficiente.

**Figura 15: Tela Principal Xcode**



Fonte: Site oficial Apple

O Xcode foi selecionado como a plataforma de desenvolvimento principal devido à sua capacidade de conduzir testes abrangentes, executar simuladores de forma eficiente e gerar gráficos de maneira mais rápida. Além disso, destaca-se pela sua habilidade de criar animações de alta qualidade de maneira intuitiva. A familiaridade com Swift e SwiftUI, em comparação com outras linguagens, frameworks e IDEs, também teve influência na decisão, proporcionando uma curva de aprendizado mais suave e maximizando a eficiência do desenvolvimento.

Como mencionado anteriormente, o Xcode oferece suporte a diversas linguagens de programação. No próximo segmento, discutiremos algumas informações pertinentes sobre a linguagem mencionada.

## 2.13. SWIFT & SWIFTUI

Swift e SwiftUI são duas tecnologias fundamentais para o desenvolvimento de aplicativos para dispositivos Apple. O Swift é uma linguagem de programação moderna e poderosa, enquanto o SwiftUI é um framework declarativo e intuitivo para criação de interfaces de usuário.

Swift foi desenvolvido pela Apple Inc. e foi anunciado pela primeira vez em 2014 durante a Worldwide Developers Conference (WWDC). Ele foi projetado para ser uma

alternativa mais segura e mais eficiente ao Objective-C, a linguagem de programação tradicionalmente usada para desenvolver aplicativos para dispositivos Apple. Swift foi criado para ser interoperável com Objective-C, permitindo que os desenvolvedores usem ambos os idiomas em seus projetos.

**Figura 16: Logo da linguagem Swift**



**Fonte: O bom programador: iPad**

As principais características da linguagem Swift são:

- **Segurança:** Swift foi projetado com foco na segurança, eliminando muitas das vulnerabilidades comuns encontradas em outras linguagens de programação.
- **Desempenho:** Swift é altamente otimizado para desempenho, oferecendo tempos de execução mais rápidos do que o Objective-C.
- **Facilidade de Aprendizado:** Com uma sintaxe moderna e concisa, Swift é mais fácil de aprender e ler do que o Objective-C, tornando-o mais acessível para iniciantes e desenvolvedores experientes.

O SwiftUI, por outro lado, é um framework que foi introduzido pela Apple em 2019 durante a WWDC. Ele foi projetado para simplificar o processo de criação de interfaces de usuário para aplicativos iOS, macOS, watchOS e tvOS. SwiftUI é construído sobre o Swift e usa sua sintaxe concisa e expressiva para definir a estrutura e o comportamento das interfaces de usuário.

**Figura 17: Logo do Framework SwiftUI**



**Fonte:** linkedin - A magia do Codable no SwiftUI

As principais características do framework SwiftUI são:

- **Declarativo:** SwiftUI adota uma abordagem declarativa para a construção de interfaces de usuário, onde os desenvolvedores especificam como a interface deve ser exibida e o SwiftUI cuida do resto.
- **Reatividade:** As interfaces de usuário criadas com SwiftUI são altamente reativas, o que significa que elas respondem automaticamente a mudanças nos dados subjacentes.
- **Multiplataforma:** SwiftUI é projetado para ser usado em todas as plataformas da Apple, permitindo que os desenvolvedores criem interfaces de usuário consistentes em diferentes dispositivos.

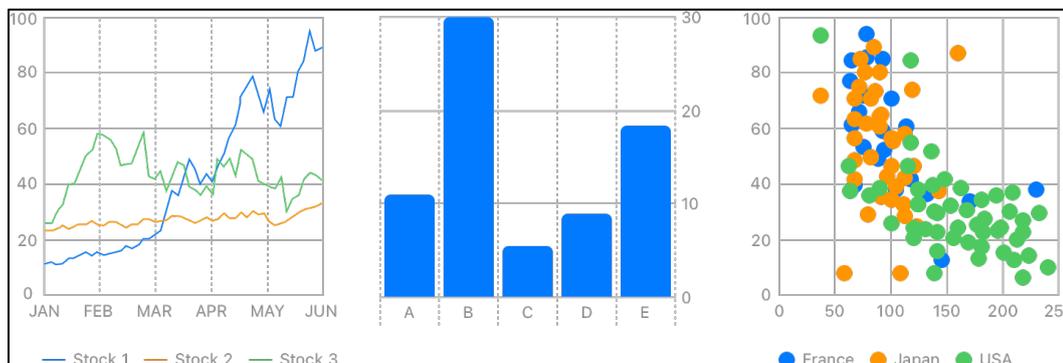
Após discorrermos sobre os aspectos teóricos da IDE, da linguagem e do framework empregados no desenvolvimento do aplicativo de coordenação e parametrização de relés de sobrecorrente ANSI 50 e ANSI 51, é igualmente pertinente abordar de forma sucinta e teórica a biblioteca "Charts" utilizada no código. Tal abordagem visa oferecer ao leitor uma orientação mais completa ao explicar o código.

## **2.14. SWIFT CHARTS**

O Swift Charts é uma biblioteca do SwiftUI, desenvolvida para traduzir dados em visualizações informativas. Esta ferramenta possibilita a criação de gráficos personalizados e eficientes, exigindo uma quantidade média de código. Dotada de uma série completa de

recursos essenciais, como marcadores, escalas, eixos e legendas, esta biblioteca permite a combinação desses elementos para elaborar uma vasta gama de gráficos guiados pelos dados.

**Figura 18: Exemplo de gráficos realizados com a biblioteca Charts**



**Fonte: icehousecorp - Exploring The New Swift Charts from WWDC**

Existem diversas abordagens para utilizar eficientemente o Swift Charts a fim de visualizar padrões ou tendências nos dados. É possível criar uma ampla variedade de gráficos, tais como gráficos de linha, gráficos de barras e gráficos de dispersão, como exemplificado na figura anterior. Ao empregar esta biblioteca para gerar um gráfico, ela automaticamente configura escalas e eixos que se ajustam aos dados.

O Swift Charts oferece suporte a recursos de localização e acessibilidade. Adicionalmente, é viável personalizar os gráficos substituindo o comportamento padrão por meio de modificadores de gráfico. Por exemplo, é possível proporcionar uma experiência dinâmica ao adicionar animações aos gráficos.

Nos tópicos subsequentes, serão demonstradas de maneira prática todas as teorias previamente discutidas, desde os princípios fundamentais dos sistemas elétricos até a análise detalhada da biblioteca Charts. Todos os conceitos até então apresentados foram aplicados de forma direta ou indireta no desenvolvimento do aplicativo, e essa relação será explorada adiante. Além disso, o código em si será abordado, explicando de maneira prática os resultados obtidos.

### **3. METODOLOGIA**

Com base nas teorias previamente discutidas, foi viabilizada a elaboração de um aplicativo destinado à parametrização e coordenação de relés de sobrecorrente ANSI 50/51, através da aplicação de exercícios sugeridos. Este aplicativo foi submetido a testes de validação, visando assegurar sua precisão de forma consistente. Neste contexto, nos próximos subtópicos, serão detalhadas todas as etapas percorridas para o desenvolvimento do referido aplicativo.

#### **3.1. BASE TEÓRICA PARA O DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO**

Como mencionado anteriormente, a operação rápida e seletiva dos relés é de extrema importância. O Tempo de Coordenação representa a diferença mínima de tempo necessária entre dois relés mais próximos na cadeia de proteção, assegurando uma coordenação adequada. Isso implica que o relé mais próximo do ponto de falha deve responder para eliminar o curto-circuito, enquanto garantimos que o relé a montante não seja acionado, evitando assim a abertura desnecessária do disjuntor.

Para facilitar a rápida coordenação dos relés de sobrecorrente, propomos o desenvolvimento de um software que funcione como uma calculadora, onde o usuário insere valores e obtém os parâmetros necessários para ajudá-lo a realizar a coordenação entre seus relés de sobrecorrente. Para a coordenação eficaz, é essencial fornecer ao usuário as curvas características de cada relé, juntamente com a diferença temporal entre elas. Isso permitiria ao usuário ajustar as curvas conforme necessário, alterando o dial de tempo para deslocar verticalmente a curva, ajustando a corrente de pick-up para estender ou retrair a curva e ajustando a relação de transformação de corrente para deslocar a curva horizontalmente.

Considerando essas diversas possibilidades, realizamos cálculos matemáticos para padronizar o aplicativo, permitindo que ele responda a uma variedade de comandos e resolva problemas de diferentes maneiras. Isso capacita o usuário a coordenar seus próprios relés, auxiliando-o na tomada das decisões necessárias para seu sistema específico, independentemente de ser um sistema anelar ou radial, simples ou complexo.

O aplicativo apresenta campos para inserção de dados essenciais para cada relé. É importante notar que o aplicativo possui um limite de coordenação de dois a três relés. É

possível visualizar a curvatura de cada relé de forma separada ou em conjunto. Os campos de inserção incluem:

- Tipo de curva desejada: Normalmente Inversa (NI), Muito Inversa (MI) ou Extremamente Inversa (EI). Essas opções influenciam na inclinação da curva, conforme demonstrado na página 41 do documento.
- Relação de transformação de corrente.
- Dial de tempo (TMS).
- Corrente de pick-up ANSI 50 referente ao secundário do TC.
- Corrente de pick-up ANSI 51 referente ao secundário do TC.

Ao analisarmos cada campo descrito acima, podemos observar que a tabela 5 da página 49 do documento contém a maioria desses parâmetros. Isso não é coincidência, pois o aplicativo foi desenvolvido para receber dados previamente parametrizados.

Para uma compreensão mais profunda da metodologia teórica mencionada anteriormente, iremos detalhar todos os cálculos efetuados, utilizando os resultados apresentados na tabela 5 como base de dados. Dessa forma, podemos descrever a curva inversa do primeiro relé 51, instalado no secundário do primeiro transformador, por meio da seguinte equação:

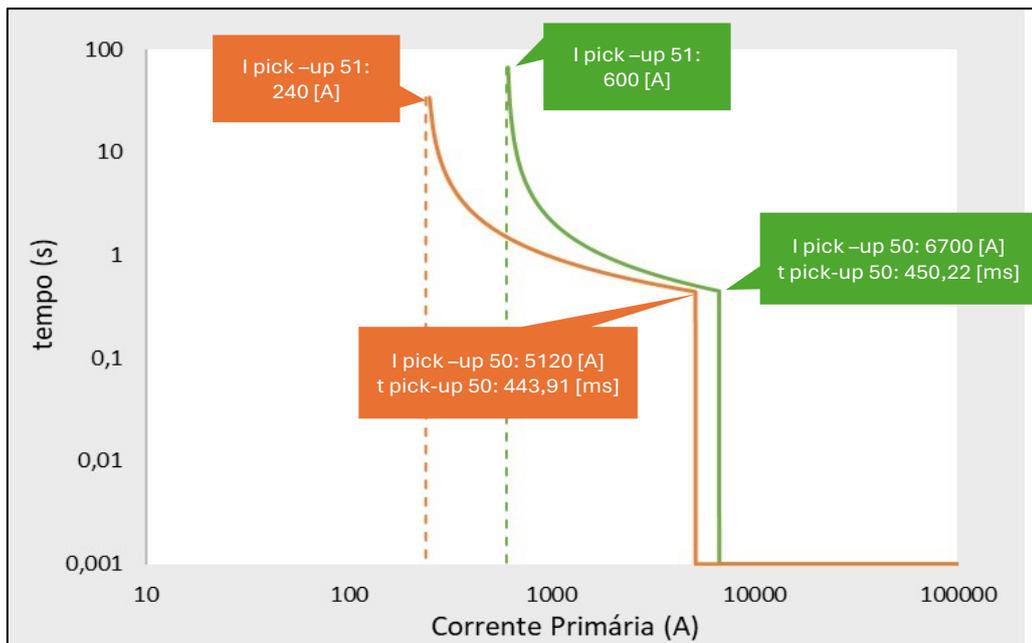
$$t = \frac{\beta \times TMS}{\left(\frac{I}{I_{pickup\ 51}}\right)^\alpha - 1} \quad (8)$$

Ao calcular  $I_{pick-up\ 51} = 6$  [A] e especificar a curva como normalmente inversa com beta e alpha definidos em 0,14 e 0,02, respectivamente, nos deparamos com a incógnita de "t" e "I". Ao estabelecer o intervalo para "I" de 0 ao infinito, percebemos que "t" pode assumir valores negativos, positivos, nulos e indeterminados (este último ocorrendo apenas quando o denominador da equação (8) é zero, ou seja, quando  $I = 6$  [A]). No entanto, uma vez que o tempo não pode ser negativo nem indeterminado, e considerando que estamos lidando com um relé de sobrecorrente temporizado inversamente, que não pode ter tempo zero, optamos por considerar apenas os valores de "t" maiores que zero.

No caso do relé de sobrecorrente instantâneo, estabelecemos que para  $I = I_{\text{pick-up } 50} = 67 \text{ [A]}$ , " $t$ " é igual a zero, resultando em uma reta vertical em  $I = 67 \text{ [A]}$ . Para o segundo relé ANSI 50/51, aplicamos as mesmas considerações, onde sua curva normalmente inversa começa em  $I = 3 \text{ [A]}$  e termina em  $I = 64 \text{ [A]}$ , onde também está localizada a reta vertical que representa a parametrização do relé de sobrecorrente instantâneo.

Para relacionar todos esses conceitos ao primário do transformador de corrente, multiplicamos o eixo x, representado por " $I$ ", pela relação de transformação de corrente de cada relé. Ou seja, o primeiro relé ANSI 50/51 terá seus valores de corrente multiplicados por 100, e o segundo por 80. Quando plotados juntos, esses dados resultam no seguinte gráfico em escala logarítmica.

**Figura 19: Curvas ANSI 50/51 seguindo os resultados da tabela 5**



Fonte: Próprio Autor

Após definirmos o espaço geométrico das curvas, é imprescindível coordenar visualmente os relés. Para alcançar esse objetivo, é essencial compreender matematicamente o conceito de coordenação. Essa coordenação refere-se à diferença ordenada entre duas curvas, ou seja, a diferença absoluta entre os pontos  $[y_1, x]$  e  $[y_2, x]$ . Essa diferença pode ser mais bem compreendida conforme ilustrado na Figura 20.

**Figura 20: Exemplificação do tempo de coordenação**



$$t1 = \frac{0,14 \times 0,159}{\left(\frac{1440/100}{6}\right)^{0,02} - 1} = 1,2602 \text{ s}$$

Logo o tempo de coordenação dos dois relés para  $I = 1440$  amperes é de:

$$| t2 - t1 | = 0,4928 \cong 500 \text{ ms}$$

Tomando outro valor de  $I$ , como exemplo temos para  $I = 5120$  amperes:

$$t2 = \frac{0,14 \times 0,2}{\left(\frac{5120/80}{3}\right)^{0,02} - 1} = 0,4439 \text{ s}$$

Observe que o valor obtido na equação anterior corresponde ao valor indicado na Figura 20. Isso ocorre porque estamos empregando o valor de ativação da função ANSI 50 do segundo relé. Ao aplicar esse mesmo valor na equação original da curva para o relé 1, encontramos o valor de  $t1$  em segundos para o mesmo valor de corrente ( $I$ ).

$$t1 = \frac{0,14 \times 0,159}{\left(\frac{5120/100}{6}\right)^{0,02} - 1} = 0,5081 \text{ s}$$

Portanto o tempo de coordenação dos dois relés para  $I = 5120$  amperes é de:

$$| t2 - t1 | = 0,06556 \cong 65,56 \text{ ms}$$

Neste cenário, o segundo relé dispararia um sinal de desarme para o seu disjuntor ANSI 52, antes mesmo de o primeiro relé conseguir enviar o sinal de disparo para o disjuntor (uma ação que geralmente leva cerca de 150 ms) e antes do primeiro disjuntor conectado diretamente ao primeiro relé abrir (uma média de 50 ms para a abertura). Isso resulta na desconexão de mais cargas do sistema, o que pode afetar os indicadores de qualidade de energia, evidenciando uma má coordenação entre os relés.

Para garantir uma coordenação eficaz, é necessário aumentar o valor do dial de tempo o primeiro relé, o que resultará em uma maior diferença temporal para um mesmo valor de corrente.

Ao compararmos os dois exemplos calculados acima, observamos que, para um exemplo com  $I = 1440$  [A], a coordenação foi bem-sucedida, enquanto para o outro caso, com  $I = 5120$  [A], a coordenação não foi bem-sucedida. Isso nos indica mais uma vez a necessidade de intervenção técnica humana. Assim, no próximo tópico, abordaremos o código do aplicativo desenvolvido com base nos exemplos demonstrados anteriormente. Veremos que o aplicativo foi projetado para auxiliar o engenheiro responsável a tomar decisões de acordo com suas necessidades.

### **3.2. ESTRUTURA DO CÓDIGO**

Neste subtópico, exploraremos a estrutura do software e como a página foi interligada através de ramificações, que são suportadas por funções. É importante destacar que este é um exemplo de programação orientada a objetos, um paradigma que organiza o código em torno de objetos.

Esses objetos podem conter dados, como campos (também conhecidos como atributos ou propriedades), e código, na forma de métodos, funções ou sub-rotinas. Cada objeto é uma instância de uma classe, que define o comportamento e as características dos objetos.

Uma característica importante desse paradigma é a minimização da repetição de código, substituindo-a por funções únicas que recebem parâmetros. Essas funções são então acionadas quando o usuário interage com a interface, através do pressionamento de botões, por exemplo, o que permite uma dinâmica variável na interface de acordo com as ações do usuário.

Compreendendo os princípios e o funcionamento da programação orientada a objetos, estamos aptos a analisar o código de forma mais detalhada, como o código é extenso (911 linhas totais), discutiremos apenas as partes importantes do código. Iniciaremos examinando as importações de bibliotecas e a estrutura do banco de dados.

```
import SwiftUI
import Charts

struct ChartData: Identifiable {
    let id: String
    let tipo: String
    let y_time: Double
    let x_current: Double
}
```

O trecho de código acima começa com as duas primeiras linhas, as quais garantem a importação dos frameworks SwiftUI e Charts, essenciais para a construção de interfaces de usuário e gráficos em aplicativos iOS, respectivamente. A partir da quarta linha, até a nona, é estabelecida a estrutura `ChartData` que servirá como a fonte de dados, onde os dados do usuário serão armazenados para possibilitar diversas análises. Com propriedades como `id`, `tipo`, `y\_time` e `x\_current`, essa estrutura organiza os dados de forma a permitir a identificação única de cada instância e a representação dos valores ao longo dos eixos y e x do gráfico. Essa abordagem proporciona uma base sólida para a manipulação e visualização eficiente dos dados coletados, permitindo a realização de análises profundas e relevantes para os usuários do aplicativo.

```
struct ContentView: View {

    @State private var chartData: [ChartData] = []

    @State private var infos: [String : Double] = [ : ]

    @State private var selectedRecord: Double = 0.0
    @State private var selectedCurve: Double = 0.0
    @State private var selectedCurve2: Double = 0.0
    @State private var selectedCurve3: Double = 0.0
```

```

@State private var curva1: String = ""
@State private var rtc1: String = ""
@State private var tms1: String = ""
@State private var i_50_1: String = ""
@State private var i_51_1: String = ""

@State private var curva2: String = ""
@State private var rtc2: String = ""
@State private var tms2: String = ""
@State private var i_50_2: String = ""
@State private var i_51_2: String = ""

@State private var curva3: String = ""
@State private var rtc3: String = ""
@State private var tms3: String = ""
@State private var i_50_3: String = ""
@State private var i_51_3: String = ""

@State private var selectedX: Double?

```

A estrutura `ContentView` representa a visualização principal da interface do aplicativo. Nesta estrutura, são declaradas propriedades de estado (`@State`) para armazenar os dados do gráfico (`chartData`) e as informações dos relés (`infos`). Também são declaradas propriedades de estado para armazenar valores selecionados no gráfico, como o registro selecionado (`selectedRecord`) e as curvas selecionadas (`selectedCurve`, `selectedCurve2`, `selectedCurve3`). Além disso, há propriedades de estado para armazenar os dados inseridos nos campos de texto, como os parâmetros das curvas de relé (curva1, rtc1, tms1, i\_50\_1, i\_51\_1, curva2, rtc2, tms2, i\_50\_2, i\_51\_2, curva3, rtc3, tms3, i\_50\_3, i\_51\_3). Essas propriedades de estado são atualizadas conforme o usuário interage com a interface gráfica.

```

func plotar(){
chartData = []
infos.removeAll()

```

```
let rtc_1 = Double(rtc1) ?? 0.0
let tms_1 = Double(tms1) ?? 0.0
let i_50_1_ = Double(i_50_1) ?? 0.0
let i_51_1_ = Double(i_51_1) ?? 0.0
let rtc_2 = Double(rtc2) ?? 0.0
let tms_2 = Double(tms2) ?? 0.0
let i_50_2_ = Double(i_50_2) ?? 0.0
let i_51_2_ = Double(i_51_2) ?? 0.0
let rtc_3 = Double(rtc3) ?? 0.0
let tms_3 = Double(tms3) ?? 0.0
let i_50_3_ = Double(i_50_3) ?? 0.0
let i_51_3_ = Double(i_51_3) ?? 0.0
```

```
var beta1 = 0.0
var alpha1 = 0.0
var beta2 = 0.0
var alpha2 = 0.0
var beta3 = 0.0
var alpha3 = 0.0
```

```
if curva1.uppercased() == "NI" {
beta1 = 0.14
alpha1 = 0.02
} else if curva1.uppercased() == "MI" {
beta1 = 13.5
alpha1 = 1
} else if curva1.uppercased() == "EI" {
beta1 = 80.0
alpha1 = 2
}
if curva2.uppercased() == "NI" {
beta2 = 0.14
alpha2 = 0.02
} else if curva2.uppercased() == "MI" {
```

```

beta2 = 13.5
alpha2 = 1
} else if curva2.uppercased() == "EI" {
beta2 = 80.0
alpha2 = 2
}
if curva3.uppercased() == "NI" {
beta3 = 0.14
alpha3 = 0.02
} else if curva3.uppercased() == "MI" {
beta3 = 13.5
alpha3 = 1
} else if curva3.uppercased() == "EI" {
beta3 = 80.0
alpha3 = 2
}

for x in Int((i_51_1_+1)*rtc_1)...Int((i_50_1_+1)*rtc_1) {
let time1 = (beta1 * tms_1) / (pow(((Double(x)/rtc_1) / i_51_1_), alpha1) - 1)
let time1_ = time1 < 0.0 ? 0.0 : time1
let time1_final = i_50_1_*rtc_1 == Double(x) ? 0.0 : time1_
let data1 = ChartData(id: "Relé 1", tipo: "Curva", y_time: time1_final, x_current: Double(x))
chartData.append(data1)
}

let x_min1 = Double((i_51_1_+1)*rtc_1)
let y_min1 = (beta1 * tms_1) / (pow(((Double(i_51_1_ + 1) / i_51_1_), alpha1) - 1)
let data1_mins_reta = ChartData(id: "Relé 1", tipo: "Reta", y_time: y_min1, x_current:
x_min1)
let data1_mins_ponto = ChartData(id: "Relé 1", tipo: "Ponto", y_time: y_min1, x_current:
x_min1)
chartData.append(data1_mins_reta)
chartData.append(data1_mins_ponto)

```

```

let x_max1 = Double(i_50_1_ * rtc_1)
let y_max1 = (beta1 * tms_1) / (pow((Double(i_50_1_+0.0001) / i_51_1_), alpha1) - 1)
let data1_maxs = ChartData(id: "Relé 1", tipo: "Ponto", y_time: y_max1, x_current: x_max1)
chartData.append(data1_maxs)

```

```

for x in Int((i_51_2_+1)*rtc_2)...Int((i_50_2_+1)*rtc_2) {
let time2 = (beta2 * tms_2) / (pow(((Double(x)/rtc_2) / i_51_2_), alpha2) - 1)
let time2_ = time2 < 0.0 ? 0.0 : time2
let time2_final = i_50_2_*rtc_2 == Double(x) ? 0.0 : time2_
let data2 = ChartData(id: "Relé 2", tipo: "Curva", y_time: time2_final, x_current: Double(x))
chartData.append(data2)
}

```

```

let x_min2 = Double((i_51_2_+1)*rtc_2)
let y_min2 = (beta2 * tms_2) / (pow((Double(i_51_2_ + 1) / i_51_2_), alpha2) - 1)
let data2_mins_reta = ChartData(id: "Relé 2", tipo: "Reta", y_time: y_min2, x_current:
x_min2)
let data2_mins_ponto = ChartData(id: "Relé 2", tipo: "Ponto", y_time: y_min2, x_current:
x_min2)
chartData.append(data2_mins_reta)
chartData.append(data2_mins_ponto)

```

```

let x_max2 = Double(i_50_2_ * rtc_2)
let y_max2 = (beta2 * tms_2) / (pow((Double(i_50_2_ + 0.0001) / i_51_2_), alpha2) - 1)
let data2_maxs = ChartData(id: "Relé 2", tipo: "Ponto", y_time: y_max2, x_current: x_max2)
chartData.append(data2_maxs)

```

```

for x in Int((i_51_3_+1)*rtc_3)...Int((i_50_3_+1)*rtc_3) {
let time3 = (beta3 * tms_3) / (pow(((Double(x)/rtc_3) / i_51_3_), alpha3) - 1)
let time3_ = time3 < 0.0 ? 0.0 : time3
let time3_final = i_50_3_*rtc_3 == Double(x) ? 0.0 : time3_
let data3 = ChartData(id: "Relé 3", tipo: "Curva", y_time: time3_final, x_current: Double(x))
chartData.append(data3)

```

```
}
```

```
let x_min3 = Double((i_51_3_+1)*rtc_3)
```

```
let y_min3 = (beta3 * tms_3) / (pow((Double(i_51_3_ + 1) / i_51_3_), alpha3) - 1)
```

```
let data3_mins_reta = ChartData(id: "Relé 3",tipo: "Reta" , y_time: y_min3, x_current:  
x_min3)
```

```
let data3_mins_ponto = ChartData(id: "Relé 3",tipo: "Ponto" , y_time: y_min3, x_current:  
x_min3)
```

```
chartData.append(data3_mins_reta)
```

```
chartData.append(data3_mins_ponto)
```

```
let x_max3 = Double(i_50_3_ * rtc_3)
```

```
let y_max3 = (beta3 * tms_3) / (pow((Double(i_50_3_ + 0.0001) / i_51_3_), alpha3) - 1)
```

```
let data3_maxs = ChartData(id: "Relé 3",tipo: "Ponto" , y_time: y_max3, x_current: x_max3)  
chartData.append(data3_maxs)
```

```
infos["Relé 1 -> I pick-up 51:"] = x_min1
```

```
infos["Relé 2 -> I pick-up 51:"] = x_min2
```

```
infos["Relé 3 -> I pick-up 51:"] = x_min3
```

```
infos["Relé 1 -> T51:"] = y_min1
```

```
infos["Relé 2 -> T51:"] = y_min2
```

```
infos["Relé 3 -> T51:"] = y_min3
```

```
infos["Relé 1 -> I pick-up 50:"] = x_max1
```

```
infos["Relé 2 -> I pick-up 50:"] = x_max2
```

```
infos["Relé 3 -> I pick-up 50:"] = x_max3
```

```
infos["Relé 1 -> T50:"] = y_max1
```

```
infos["Relé 2 -> T50:"] = y_max2
```

```
infos["Relé 3 -> T50:"] = y_max3
```

```
}
```

A função `plotar()` tem a responsabilidade de plotar os dados no gráfico. Primeiramente, a função limpa os dados existentes nas variáveis `chartData` e `infos` para preparar para a nova plotagem.

Em seguida, a função converte os valores dos campos de texto para números de ponto flutuante e os armazena em variáveis correspondentes. Depois, são calculados os valores de beta e alpha para cada curva, dependendo do tipo de curva especificado.

Posteriormente, a função itera sobre os valores de corrente de cada relé, calculando os respectivos tempos de atuação e os adicionando à matriz `chartData`. Além disso, são calculados os pontos mínimos e máximos de cada curva e também são adicionados à matriz `chartData`.

Por fim, os valores mínimos e máximos de corrente e tempo para cada relé são adicionados ao dicionário `infos`, onde a chave é uma string que descreve o valor e o valor é o próprio valor correspondente.

Essa função é essencial para atualizar o gráfico com os novos dados inseridos pelo usuário, garantindo que as curvas e informações apresentadas sejam sempre precisas e atualizadas.

```
func deletar(){
  curva1 = ""
  curva2 = ""
  curva3 = ""
  rtc1 = ""
  rtc2 = ""
  rtc3 = ""
  tms1 = ""
  tms2 = ""
  tms3 = ""
  i_50_1 = ""
  i_50_2 = ""
  i_50_3 = ""
```

```

i_51_1 = ""
i_51_2 = ""
i_51_3 = ""
chartData = []
infos.removeAll()
    }

```

A função `deletar()` é responsável por limpar os campos e os dados armazenados. Ela redefine todas as variáveis associadas aos valores dos campos de entrada para uma string vazia, removendo assim qualquer entrada anterior. Além disso, ela também redefine as variáveis `chartData` e `infos`, limpando os dados do gráfico e as informações armazenadas. Essa função é útil quando o usuário deseja redefinir ou limpar todos os dados inseridos, permitindo que eles comecem uma nova entrada do zero, garantindo um estado limpo e inicial para o aplicativo.

Uma parte crucial do código a ser destacada é a seção responsável pelo plot de gráficos. Após definir todas as funções e estruturas essenciais do código, esta seção entra em cena para visualizar os dados de forma gráfica.

```

let maior_valor_y = chartData.map({ $0.y_time }).max() ?? 9

```

```

RoundedRectangle(cornerRadius: 2)
.stroke(Color.black, lineWidth: 1)
.background(Color.white)
.overlay {
Chart {
ForEach(chartData) { dados in
if dados.tipo == "Curva" {
LineMark(x: .value("Corrente", dados.x_current), y: .value("Tempo", dados.y_time))
.foregroundColor(by: .value("Relé", dados.id))
}
else if dados.tipo == "Ponto" {
PointMark(x: .value("Corrente", dados.x_current), y: .value("Tempo", dados.y_time))
.foregroundColor(by: .value("Relé", dados.id))
}
}
}

```

```

else if dados.tipo == "Reta" {
RuleMark(x: .value("Corrente", dados.x_current),
yStart: .value("Tempo", 0.0),
yEnd: .value("Tempo", dados.y_time))
.foregroundColorStyle(by: .value("Relé", dados.id))
.lineStyle(StrokeStyle(lineWidth: 2 ,dash: [5,10]))
}
}

if selectedRecord != 0.0 {
RuleMark(x: .value("Corrente", selectedRecord))
.foregroundColorStyle(Color.black.opacity(0.2))
.annotation (position: .trailing, alignment: .top, spacing: 5) {
RoundedRectangle(cornerRadius: 2)
.stroke(Color.black, lineWidth: 1)
.background(Color.gray.opacity(0.05))
.frame(width: 125,height: 25)
.overlay(
LazyVStack (spacing: 2) {
LazyHStack (spacing: 0){
Text("Δ ")
.font(.system(size: 10))
Circle()
.fill(Color.black)
.frame(width: 6, height: 6)
Text(" t1-t2 ")
.font(.system(size: 10))
Circle()
.fill(Color.black.opacity(0.6))
.frame(width: 6, height: 6)
Text(" : ")
.font(.system(size: 10))
let diferenca1 = (selectedCurve-selectedCurve2) < 0 ? (selectedCurve-selectedCurve2) * -1 :
(selectedCurve-selectedCurve2)
Text("\ (String(format: "%.0.2f",diferenca1*1000))[ms]"))
}
}
}
}

```

```

.font(.system(size: 10))
}
LazyHStack (spacing: 0){
Text("Δ ")
.font(.system(size: 10))
Circle()
.fill(Color.black.opacity(0.6))
.frame(width: 6, height: 6)
Text(" t2-t3 ")
.font(.system(size: 10))
Circle()
.fill(Color.black.opacity(0.2))
.frame(width: 6, height: 6)
Text(" : ")
.font(.system(size: 10))
let diferenca2 = (selectedCurve2-selectedCurve3) < 0 ? (selectedCurve2-selectedCurve3) * -1
: (selectedCurve2-selectedCurve3)
Text("\(String(format: "%.2f",diferenca2*1000))[ms]")
.font(.system(size: 10))
}
}
)
}
}
if selectedCurve != 0.0 {
PointMark(x: .value("Corrente", selectedRecord), y: .value("Tempo", selectedCurve))
.foregroundColor(Color.black)
}
if selectedCurve2 != 0.0 {
PointMark(x: .value("Corrente", selectedRecord), y: .value("Tempo", selectedCurve2))
.foregroundColor(Color.black.opacity(0.6))
}
if selectedCurve3 != 0.0 {
PointMark(x: .value("Corrente", selectedRecord), y: .value("Tempo", selectedCurve3))

```

```

.foregroundColor(Color.black.opacity(0.2))
}

}
.chartYScale(domain:0...maior_valor_y+1,type: .symmetricLog)
.chartXScale(domain:90...100000, type: .symmetricLog)
.chartOverlay { proxy in
GeometryReader { geometry in
Rectangle()
.fill(Color.clear)
.contentShape(Rectangle())
.gesture(
DragGesture()
.onChangeed { value in
var beta1 = 0.0
var alpha1 = 0.0
var beta2 = 0.0
var alpha2 = 0.0
var beta3 = 0.0
var alpha3 = 0.0

if curva1.uppercased() == "NI" {
beta1 = 0.14
alpha1 = 0.02
} else if curva1.uppercased() == "MI" {
beta1 = 13.5
alpha1 = 1.0
} else if curva1.uppercased() == "EI" {
beta1 = 80.0
alpha1 = 2.0
}
if curva2.uppercased() == "NI" {
beta2 = 0.14

```

```

alpha2 = 0.02
} else if curva2.uppercased() == "MI" {
beta2 = 13.5
alpha2 = 1.0
} else if curva2.uppercased() == "EI" {
beta2 = 80.0
alpha2 = 2.0
}
if curva3.uppercased() == "NI" {
beta3 = 0.14
alpha3 = 0.02
} else if curva3.uppercased() == "MI" {
beta3 = 13.5
alpha3 = 1.0
} else if curva3.uppercased() == "EI" {
beta3 = 80.0
alpha3 = 2.0
}

```

```

let location = value.location

```

```

if let x_geral: Double = proxy.value(atX: location.x) {
selectedRecord = x_geral

```

```

let y_curva1 = (beta1 * tms_1) / (pow(((Double(x_geral)/rtc_1) / i_51_1_), alpha1) - 1)
var foundMatch1 = false // Flag para indicar se um ponto correspondente foi encontrado
for data in chartData {
if data.id == "Relé 1" {
if Int(y_curva1.isInfinite || y_curva1.isNaN ? 0.0 : y_curva1) == Int(data.y_time.isInfinite ||
data.y_time.isNaN ? 0.0 : data.y_time) {
selectedCurve = y_curva1
foundMatch1 = true
break // Saia do loop assim que encontrar um ponto correspondente
}
}
}

```

```

}
if !foundMatch1 {
selectedCurve = 0 // Define selectedCurve para 0 se nenhum ponto correspondente for
encontrado
}

let y_curva2 = (beta2 * tms_2) / (pow(((Double(x_geral)/rtc_2) / i_51_2_), alpha2) - 1)
var foundMatch2 = false // Flag para indicar se um ponto correspondente foi encontrado
for data2 in chartData {
if data2.id == "Relé 2" {
if Int(y_curva2.isInfinite || y_curva2.isNaN ? 0.0 : y_curva2) == Int(data2.y_time.isInfinite ||
data2.y_time.isNaN ? 0.0 : data2.y_time) {
selectedCurve2 = y_curva2
foundMatch2 = true
break // Saia do loop assim que encontrar um ponto correspondente
}
}
}
if !foundMatch2 {
selectedCurve2 = 0 // Define selectedCurve para 0 se nenhum ponto correspondente for
encontrado
}

let y_curva3 = (beta3 * tms_3) / (pow(((Double(x_geral)/rtc_3) / i_51_3_), alpha3) - 1)
var foundMatch3 = false // Flag para indicar se um ponto correspondente foi encontrado
for data3 in chartData {
if data3.id == "Relé 3" {
if Int(y_curva3.isInfinite || y_curva3.isNaN ? 0.0 : y_curva3) == Int(data3.y_time.isInfinite ||
data3.y_time.isNaN ? 0.0 : data3.y_time) {
selectedCurve3 = y_curva3
foundMatch3 = true
break // Saia do loop assim que encontrar um ponto correspondente
}
}
}
}

```

```

}
if !foundMatch3 {
selectedCurve3 = 0 // Define selectedCurve para 0 se nenhum ponto correspondente for
encontrado
}
}
}
}
.onEnded { _ in
// redefina o estado quando o gesto terminar
selectedRecord = 0
}
)
}
}

.padding(.all,2)
.padding(.top,5)
}
.padding(.all, 7)
.padding(.bottom, 5)

```

Este trecho de código, primeiramente calcula o maior valor encontrado nos dados do gráfico no eixo vertical (Y) utilizando a função `map` para extrair todos os valores do atributo `y\_time` de cada item em `chartData`, e em seguida, utiliza a função `max()` para encontrar o valor máximo. Se nenhum valor máximo for encontrado, ele utiliza 9 como um valor padrão.

Em seguida, ele desenha o contêiner do gráfico, que é um retângulo arredondado com uma borda preta e um fundo branco. Dentro desse contêiner, o gráfico é desenhado usando a estrutura `Chart`. Esta parte do código itera sobre os dados em `chartData` e desenha diferentes tipos de marcas, como Curva, Ponto ou Reta, dependendo do tipo de dado presente nos itens.

Cada tipo de dado tem sua própria representação visual no gráfico, utilizando as coordenadas X e Y dos dados para posicionar as marcas apropriadamente.

Por fim, o código torna o gráfico interativo. Permite aos usuários arrastar o dedo pelo gráfico para explorar os dados. Quando o usuário interage com o gráfico, o código atualiza os valores selecionados com base na posição do toque. Isso possibilita aos usuários explorar os dados do gráfico e ver detalhes adicionais, como diferenças de tempo entre os pontos selecionados, proporcionando uma experiência de visualização dinâmica e envolvente.

Agora que as principais partes do código foram entendidas e explicadas, e juntando-as com códigos de design para o aplicativo (que não serão apresentadas), temos o resultado conforme Figura 21.

### **Figura 21: Aplicativo final desenvolvido**



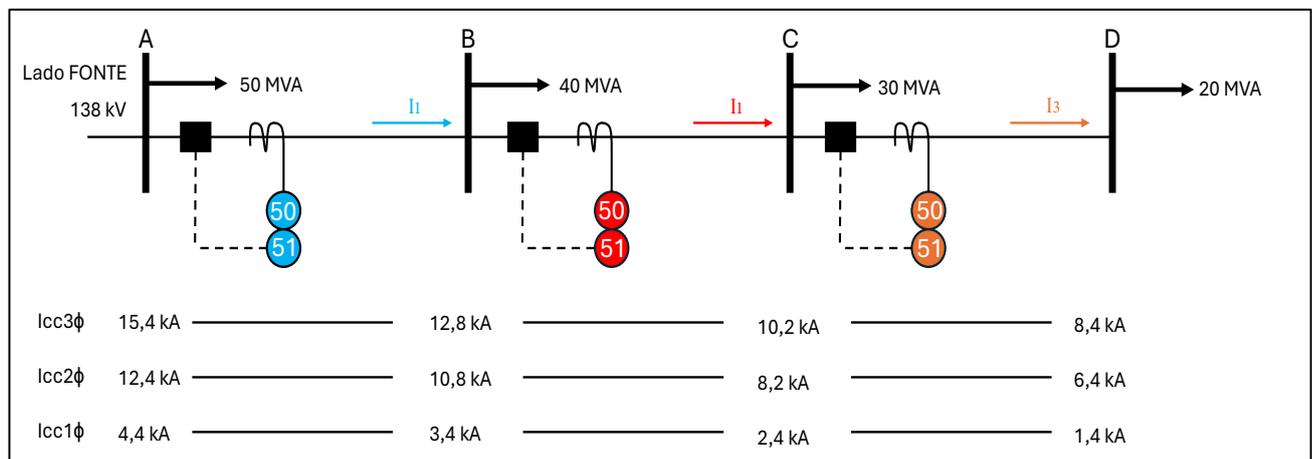
**Fonte: Próprio Autor**

Assim, concluímos a seção sobre metodologia e desenvolvimento do aplicativo. Para validar o trabalho realizado até o momento, iremos agora adentrar ao próximo tópico. Nele, vamos analisar e discutir os resultados obtidos no aplicativo à luz dos exemplos teóricos previamente apresentados neste documento.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para aprimorarmos o aplicativo e torná-lo mais preciso, foram realizados diversos exercícios, incluindo os dois exercícios fundamentais destacados na metodologia deste documento. No entanto, esses dois exemplos descrevem a coordenação entre apenas dois relés, enquanto o aplicativo tem a capacidade de simular a coordenação de até três relés de sobrecorrente com funções ANSI 50/51, como descrito no tópico anterior. Portanto, é necessário incluir um exercício fundamental que envolva três relés para homologar os resultados. Assim, propomos o seguinte exercício:

**Figura 22: Exercício para homologação de resultados do aplicativo**



Fonte: Próprio Autor

Primeiramente, as correntes nominais I1, I2 e I3 são calculadas utilizando a equação 5 presente neste documento. Com isso, obtém-se:

$$I_n (1) = \frac{\sum Cargas [VA]}{\sqrt{3} \times Fonte [kV]} = \frac{(40 + 30 + 20) \times 10^6}{\sqrt{3} \times 138 \times 10^3} = 376,5327 [A]$$

$$I_n (2) = \frac{\sum Cargas [VA]}{\sqrt{3} \times Fonte [kV]} = \frac{(30 + 20) \times 10^6}{\sqrt{3} \times 138 \times 10^3} = 209,1848 [A]$$

$$I_n (3) = \frac{\sum Cargas [VA]}{\sqrt{3} \times Fonte [kV]} = \frac{(20) \times 10^6}{\sqrt{3} \times 138 \times 10^3} = 83,6739 [A]$$

Com base nas correntes nominais, calculam-se agora as relações de transformação de corrente para cada transformador correspondente.

Para o primeiro transformador de corrente, a relação de transformação de corrente (RTC) equivale a 160; para o segundo, é de 130; e para o terceiro, é de 110, considerando um fator de sobrecorrente de 20. Esses valores foram calculados conforme descrito na página 44 do documento em questão.

Com os valores de RTC e corrente nominal para cada zona de proteção em mãos, determinam-se as correntes de pick-up para os relés de sobrecorrente com função ANSI 51. Utilizando a inequação 6 do documento, obtemos para o primeiro relé de sobrecorrente:

$$\frac{I_{ajuste}(\text{primário})_1}{RTC_1} < I_{pick-up}(51)_1 < \frac{I_{cc2\phi}(\text{no final do circuito})_1}{RTC_1}$$

Substituindo os valores de acordo com a figura 23, temos:

$$\frac{376,5327 \times 1,5}{160} < I_{pick-up}(51)_1 < \frac{10.800}{160} \rightarrow I_{pick-up}(51)_1 = 4 [A]$$

Utilizando a mesma inequação para as outras zonas de proteção, temos:

$$\frac{209,1848 \times 1,5}{130} < I_{pick-up}(51)_1 < \frac{8.200}{140} \rightarrow I_{pick-up}(51)_1 = 3 [A]$$

$$\frac{83,6739 \times 1,5}{110} < I_{pick-up}(51)_1 < \frac{6.400}{120} \rightarrow I_{pick-up}(51)_1 = 2 [A]$$

Com os valores de corrente de pick-up referentes ao secundário dos transformadores definidos, podemos agora proceder à coordenação entre os três relés de sobrecorrente temporizados, utilizando as seguintes premissas:

- As curvas dos relés serão do tipo Muito Inversa (ainda que possam ser Normalmente Inversa ou Extremamente Inversa, a escolha dependerá do critério de cada eletricista responsável).

- O dial de tempo, ou TMS (conceito abordado na página 39 do documento), para o terceiro relé será definido como 0,5 segundos.
- O tempo de coordenação entre os relés será de 700 milissegundos.
- A corrente de curto-circuito a qual servirá como parâmetro de coordenação terá uma magnitude de 20 [A] referidos ao secundário dos transformadores.

O curto não se manifesta no secundário do transformador, mas sim no primário. Supondo que essa ausência tenha ocorrido a jusante o terceiro relé de sobrecorrente, temos:

$$I_{cc \text{ primário}} = I_{cc \text{ secundário}} \times RTC_3 \rightarrow 20 \text{ A} \times 110 \rightarrow I_{cc \text{ primário}} = 2.200 \text{ A}$$

Com isso, calcula-se o tempo de atuação do terceiro relé de sobrecorrente ANSI 51:

$$t_3 = \frac{13,5 \times 0,50}{\left(\frac{2.200/110}{2}\right)^1 - 1} = 0,75 \text{ s}$$

Considerando o tempo de atuação do terceiro relé já calculado, é necessário agora determinar o tempo de atuação do relé de retaguarda, isto é, o relé de sobrecorrente ANSI 51 que atua na segunda zona de proteção. Assim, prosseguimos com o cálculo do mesmo.

$$t_2 = t_3 + t_{\text{coordenação}} \rightarrow t_2 = 1,45 \text{ s}$$

E com isso é possível calcularmos o dial de tempo para o segundo relé de sobrecorrente:

$$TMS_2 = \frac{\left\{\left(\frac{2.200/130}{3}\right)^1 - 1\right\} \times 1,45}{13,5} = 0,4984$$

Reutilizando o mesmo processo e aplicando-o para a primeira zona de proteção, ou seja, o primeiro relé de sobrecorrente ANSI 51, temos:

$$t_1 = t_2 + t_{\text{coordenação}} \rightarrow t_1 = 2,15 \text{ s} ;$$

$$TMS_1 = \frac{\left\{ \left( \frac{2.200/160}{4} \right)^1 - 1 \right\} \times 2,15}{13,5} = 0,3882$$

Agora que determinamos todos os parâmetros dos três relés de sobrecorrente temporizados, o próximo passo é encontrar as correntes de pick-up correspondentes aos relés de sobrecorrente instantâneos, também conhecidos como ANSI 50. Isso pode ser feito utilizando a Equação 7 do documento. Portanto, para cada uma das três zonas de proteção, ou seja, para os três relés de sobrecorrente instantâneos, temos o seguinte:

$$I_{pick-up} (ANSI 50)_1 \geq \frac{(15.400 - 12.800) \times (1 - 0,8) + 12.800}{160}$$

$$\rightarrow I_{pickup} (ANSI 50)_1 = 84 [A]$$

$$I_{pick-up} (ANSI 50)_2 \geq \frac{(12.800 - 10.200) \times (1 - 0,8) + 10.200}{130}$$

$$\rightarrow I_{pickup} (ANSI 50)_2 = 83 [A]$$

$$I_{pick-up} (ANSI 50)_3 \geq \frac{(10.200 - 8.400) \times (1 - 0,8) + 8.400}{110}$$

$$\rightarrow I_{pickup} (ANSI 50)_3 = 80 [A]$$

A partir dos cálculos acima temos os seguintes resultados:

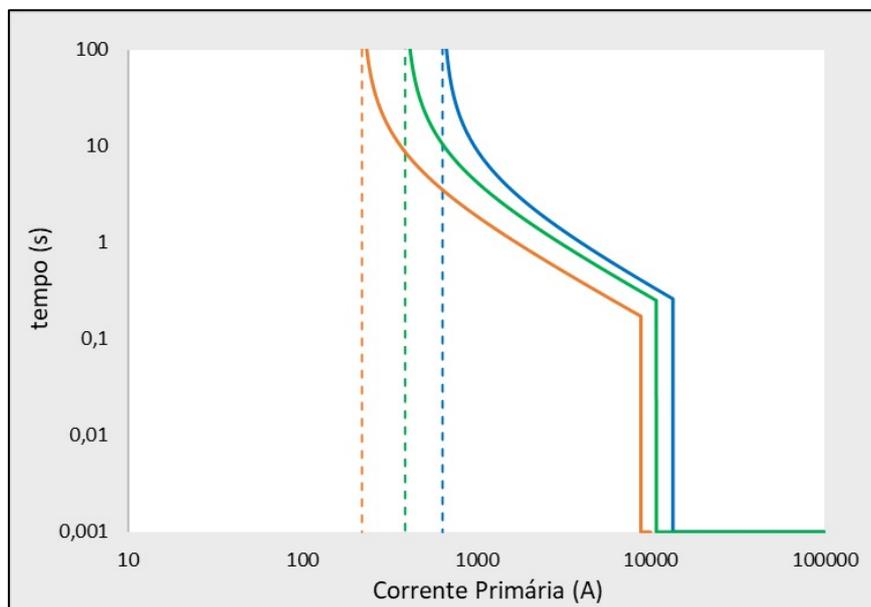
**Tabela 6 - Resultados para as funções ANSI 51 e ANSI 50 para o Exercício representado pela figura 23**

	Primeiro Relé	Segundo Relé	Terceiro Relé
<b>RTC</b>	160	130	110
<b>I pick-up 51 [A]</b>	4	3	2
<b>I pick-up 50 [A]</b>	84	83	80
<b>TMS [s]</b>	0,3882	0,4984	0,5

**Fonte: Próprio Autor**

A partir desses resultados as curvas podem ser geradas:

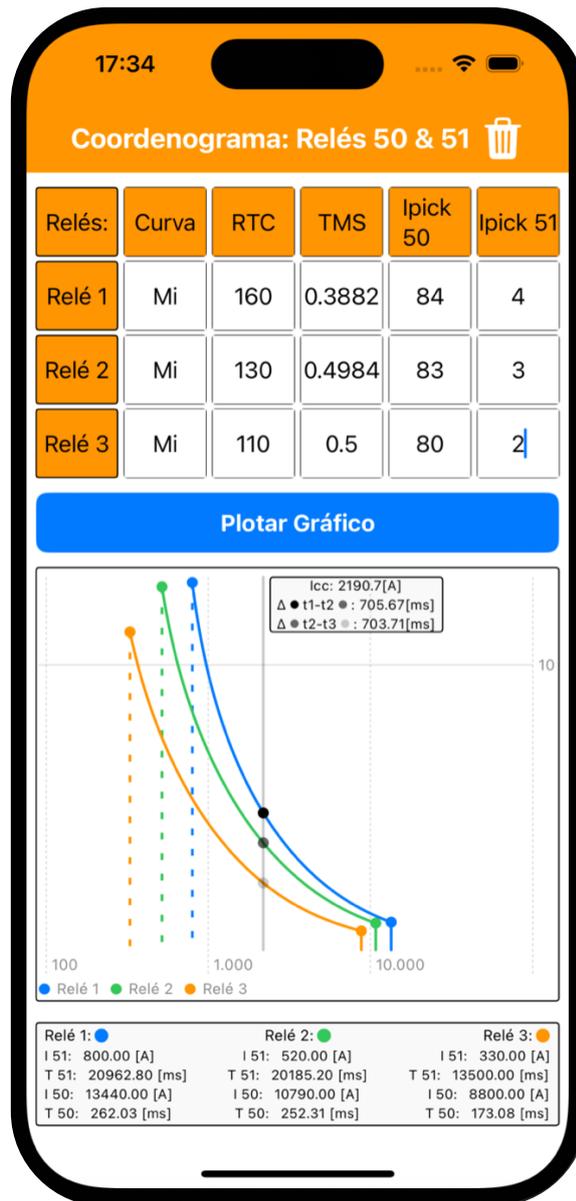
**Figura 23: Curvas ANSI 50/51 seguindo os resultados da tabela 6**



**Fonte: Próprio Autor**

Após as curvas terem sido plotadas, inserimos os valores encontrados acima em nosso aplicativo, como mostra a figura abaixo. Para que possamos validar as curvas geradas e a coordenação entre os relés para a corrente de curto-circuito em questão (2,2 kA).

**Figura 24: Homologação dos resultados no aplicativo – coordenação entre 3 relés ANSI 50/51**



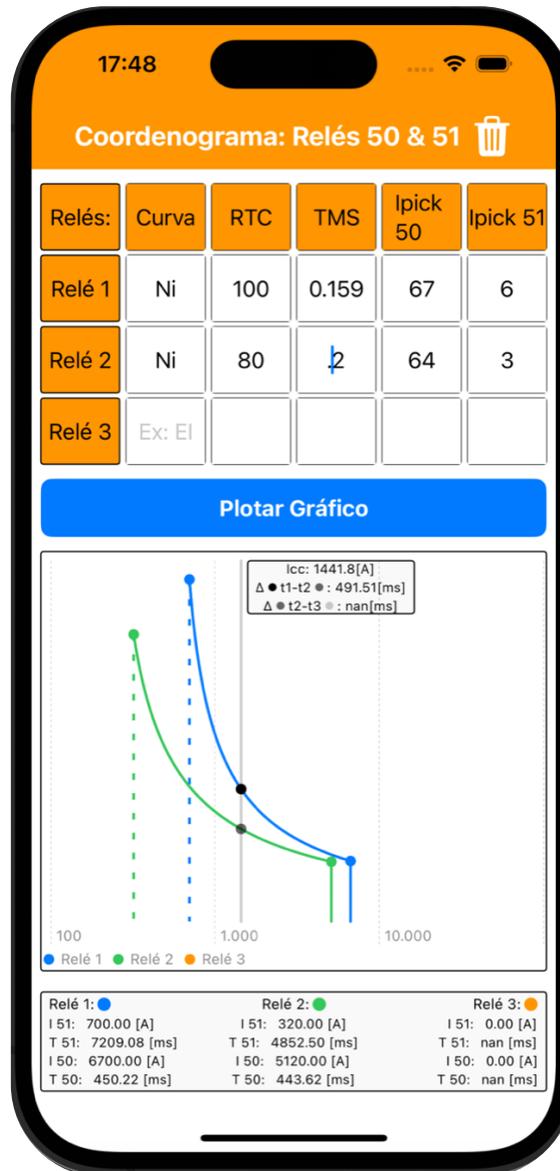
Fonte: Próprio Autor

Assim, ao analisarmos o valor da corrente de curto-circuito de cerca de 2200 [A], observamos que as curvas exibem um tempo de coordenação entre elas de aproximadamente 700 ms, conforme estipulado nas premissas do exercício.

Além disso, os dois resultados de coordenação para o exercício de coordenação entre dois relés, introduzido anteriormente neste documento também foi homologado no aplicativo, como retratado a seguir.

Para o valor de curto-circuito de 1440 [A], tem-se:

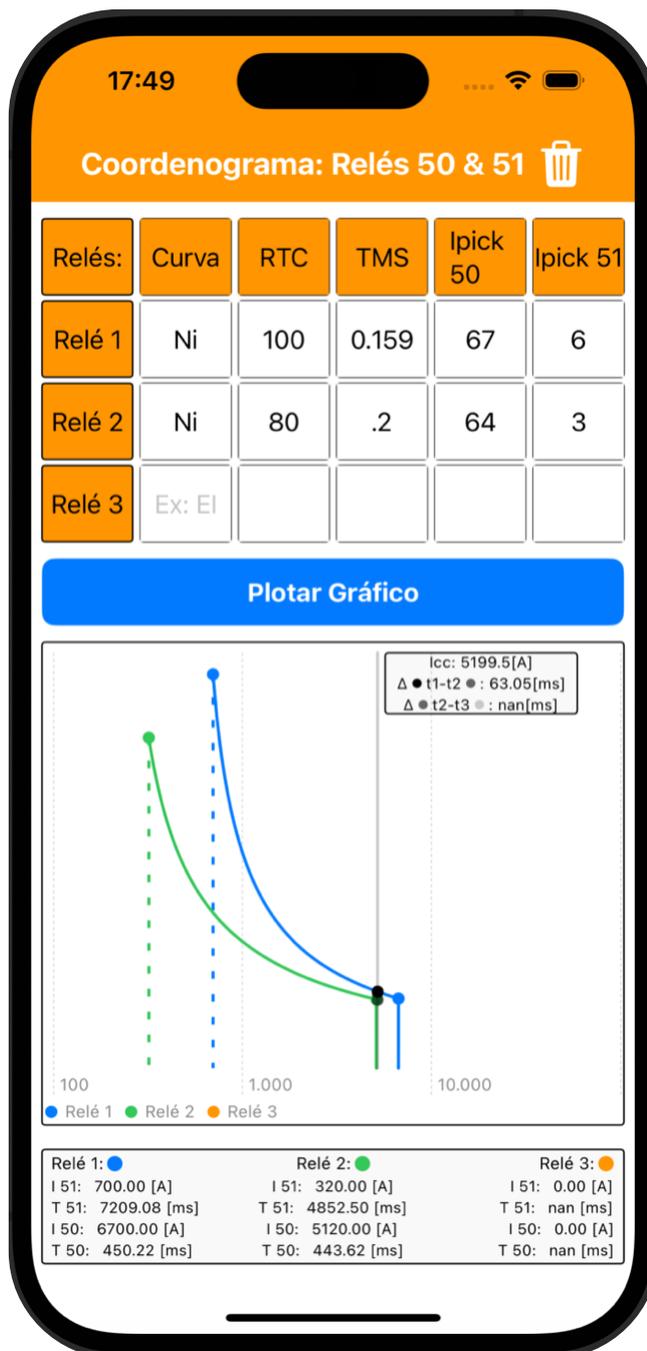
**Figura 25: Homologação dos resultados no aplicativo – coordenação entre 2 relés ANSI 50/51 ( $I_{cc} = 1440$  [A])**



Fonte: Próprio Autor

Para o valor da corrente de pick-up instantânea do segundo relé de sobrecorrente, tem-se:

**Figura 26: Homologação dos resultados no aplicativo – coordenação entre 2 relés ANSI 50/51 ( $I_{cc} = 5200$  [A])**



Fonte: Próprio Autor

Nota-se também que os valores de tempo de coordenação obtidos no aplicativo apresentam uma proximidade de 0,0001 segundos em relação aos resultados anteriormente mencionados neste documento, especificamente na página 60.

**Observação sobre o aplicativo:**

O aplicativo é completamente personalizado, desde a seleção cuidadosa da paleta de cores até o ícone exibido no celular. O ícone foi concebido para refletir uma atividade relacionada à engenharia elétrica, enquanto o design geral do aplicativo foi pensado para evocar a simplicidade e funcionalidade de uma calculadora. O ícone do aplicativo é o seguinte:

**Figura 27: Ícone do Aplicativo**



**Fonte: Próprio Autor**

## 5. CONCLUSÃO

Após uma análise abrangente dos resultados obtidos através da utilização do aplicativo desenvolvido para parametrização e coordenação de relés de sobrecorrente em sistemas elétricos, é evidente que o software atende e até supera as expectativas estabelecidas. Este aplicativo, desenvolvido para dispositivos móveis iOS, se destaca por sua eficácia, acessibilidade e precisão, proporcionando uma solução abrangente para os desafios enfrentados na instalação e manutenção de equipamentos de proteção elétrica.

Uma das principais vantagens destacadas durante a avaliação do aplicativo é a sua capacidade de operar independentemente de conexão Wi-Fi, o que elimina as restrições de acessibilidade em áreas remotas ou com sinal intermitente. Esta característica torna o aplicativo altamente versátil e aplicável em uma variedade de cenários operacionais, garantindo que os técnicos e engenheiros tenham acesso às ferramentas necessárias quando e onde precisarem.

Além disso, a interface intuitiva e amigável do aplicativo oferece uma experiência de usuário agradável e facilita a navegação através das funcionalidades disponíveis. Isso é crucial, pois simplifica o processo de análise e parametrização dos relés, permitindo que os usuários realizem tarefas complexas de forma eficiente e instrutiva.

A precisão dos resultados gerados pelo aplicativo é outro destaque significativo. Os testes comparativos demonstraram que o aplicativo é tão preciso quanto, ou até mesmo mais preciso do que, softwares convencionais desenvolvidos com MATLAB por exemplo. Essa precisão é fundamental para garantir a confiabilidade das análises realizadas e a segurança dos sistemas elétricos em que o aplicativo é empregado.

Além de corrigir erros na coordenação dos relés, o aplicativo oferece uma ampla gama de funcionalidades avançadas, incluindo recursos para visualização de gráficos, tabelas e resultados, simplificando assim um tema intrincado e agilizando o processo de instalação e dimensionamento dos relés mencionados. Essas características adicionais aumentam ainda mais a utilidade e o valor do aplicativo para os profissionais do setor elétrico.

Em resumo, os resultados obtidos a partir da aplicação do aplicativo para parametrização e coordenação de relés de sobrecorrente demonstram claramente sua eficácia e

utilidade na otimização de sistemas elétricos. Com sua combinação de acessibilidade, precisão e funcionalidade, o aplicativo se estabelece como uma ferramenta indispensável para os profissionais que buscam maximizar a eficiência e a segurança em suas operações. Sua capacidade de operar em qualquer lugar, sua interface amigável e sua precisão comparável a softwares convencionais garantem que ele permaneça na vanguarda das soluções disponíveis para a parametrização e coordenação de relés de sobrecorrente em sistemas elétricos modernos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARAÚJO, Carlos. Proteção de Sistemas Elétricos. Interciência, 2011.
- [2] CAMINHA, Amadeu. Introdução à proteção dos sistemas elétricos. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1977
- [3] COURY, Denis Vinícius. Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência. Dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes. EDUSP, 1a Edição. 2007.
- [4] GONEN, T. Electric Power Distribution System Engineering, CRC Press, Second Edition, 2007.
- [5] GEC Measurements – CDG12
- [6] KINDERMANN, Geraldo. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência - V.1. Editora: UFSC.
- [7] KINDERMANN, Geraldo. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência - V.2. Editora: UFSC.
- [8] KINDERMANN, Geraldo. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência - V.3. Editora: UFSC.
- [9] MAMEDE Filho, João. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. LTC Livros Técnicos e Científicos Ltda, 2011.
- [10] SATO, Fujito; FREITAS, Waldir. Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia Elétrica. Elsevier, Editora Ltda. 2014.
- [11] SILVA, Eliel Celestino da Silva. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Quality Mark, 1a Edição. 2014.