



**SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC  
Curso Superior de Graduação Bacharelado em Engenharia Elétrica**

**Bruno de Freitas Foloni  
Caio Souza Feriance  
Daniel Reis de Jesus Pinha  
Rubens José Teixeira Machado Neto**

**ESTUDO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE**

Salvador

2018

**Bruno de Freitas Foloni**  
**Caio Souza Feriãnce**  
**Daniel Reis de Jesus Pinha**  
**Rubens José Teixeira Machado Neto**

## **ESTUDO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE**

Projeto TheoPrax apresentado ao Centro Universitário De Tecnologia SENAI CIMATEC e a empresa GE Renewable Energy, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Salvador  
2018

## **AGRADECIMENTOS**

A empresa GE Renewable Energy pela oportunidade de realizar o projeto, trazendo a equipe à possibilidade de aplicar os conhecimentos técnicos apreendidos durante o curso de engenharia elétrica, bem como a concessão do espaço físico e tempo para realizar visitas técnicas e reuniões.

Aos gestores do Núcleo TheoPrax e a coordenadora do curso de engenharia elétrica da Centro Universitário De Tecnologia SENAI CIMATEC pelo suporte e orientação oferecidos durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao orientador técnico Frederico Cesário Ramos pelo suporte técnico que viabilizou a entrega do projeto dentro do prazo estipulado.

## RESUMO

O projeto apresentado tem como objetivo a elaboração de um estudo de coordenação e seletividade do sistema elétrico da unidade de Camaçari da GE Renewable Energy. Ele consiste em definir os ajustes dos dispositivos de proteção do sistema elétrico, com auxílio dos dados nominais e curvas de dano dos equipamentos elétricos a partir de gráficos “tempo versus corrente” fornecidas pelo software ETAP. Inicialmente foi feito o levantamento dos dados necessários, tais como informações da concessionária, diagrama unifilar, especificações dos dispositivos de proteção existentes e determinação das cargas do sistema. Posteriormente, foi feita a modelagem do sistema elétrico no software, utilizando os dispositivos existentes da unidade. Com o sistema elétrico modelado, foram realizadas as simulações de curto-circuito para todos os tipos de falta, e ajustado os parâmetros dos dispositivos para garantir a coordenação e a seletividade do sistema de proteção. Por fim, foram gerados os relatórios de curto-circuito e parametrização dos dispositivos de proteção.

Palavras-chave: *Proteção de Sistemas Elétricos; Coordenação e Seletividade; Proteção contra faltas;*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Características de disjuntor termomagnética (FILHO, 2017)	17
Figura 2 - Disjuntor Power Breaker e disjuntor de caixa moldada (SOUZA, 2013)	18
Figura 3 - Fusíveis de Baixa Tensão (LEÃO, 2018)	19
Figura 4 - Fusíveis de Alta tensão (LEÃO, 2018)	19
Figura 5 - Características tempo x corrente dos fusíveis Am (FILHO, 2017)	21
Figura 6 - Esquema TP/TC - Relé – Disjuntor (SOUZA, 2013)	22
Figura 7 - Transformador de Corrente em Estrutura de Concreto Armado (MAMEDE FILHO, 2000)	23
Figura 8 - Transformador de Potencial (SOUZA, 2013)	24
Figura 9 - Transformador de Potencial 230Kv (MAMEDE FILHO, 2000)	24
Figura 10 - Transformador de Potência (FRONTIN, 2013)	25
Figura 11 - Motor de indução trifásico (FILHO, 2017)	26
Figura 12 - Curva do limite térmico do cabo (SOARES, 2009)	27
Figura 13 - Região de ajuste, alerta e dano do cabo (SOARES, 2009)	27
Figura 14 - Modelo de uma máquina síncrona em componente de sequência positiva (ARAÚJO, 2013)	29
Figura 15 - Diagrama unifilar e curvas características de um sistema elétrico .	34
Figura 16 - Diagrama unifilar de um circuito radial.	36
Figura 17 - Fluxograma dos procedimentos do projeto (autoria própria).	<b>Erro!</b>
<b>Indicador não definido.</b>	
Figura 18 - Distribuição do sistema elétrico (autoria própria).	43
Figura 19 - Coordenação de dispositivos - Alimentação da concessionária (autoria própria).	45
Figura 20 - Coordenograma - Alimentação da concessionária (autoria própria).	46
Figura 21 - Coordenação de dispositivos - Circuito vestiário (autoria própria).	47
Figura 22 - Coordenograma – Circuito vestiário (autoria própria).	48
Figura 23 - Coordenação de dispositivos – Circuito área nova (autoria própria).	49
Figura 24 - Coordenograma – Circuito área nova (autoria própria).	50
Figura 25 - Coordenação de dispositivos – Circuito novo galpão (autoria própria).	51

Figura 26 - Coordenograma – Circuito novo galpão (autoria própria).	52
Figura 27 - Coordenação de dispositivos – Carga setor 1 (autoria própria).	53
Figura 28 - Coordenograma – Carga setor 1 (autoria própria).	54
Figura 29 - Coordenação de dispositivos – Circuito banco de capacitor (autoria própria).	55
Figura 30 - Coordenograma – Circuito banco de capacitor (autoria própria).	56
Figura 31 - Coordenação de dispositivos – Circuito QGBT (autoria própria).	57
Figura 32 - Coordenograma – Circuito QGBT (autoria própria).	58
Figura 33 - Coordenação de dispositivos – Carga setor 2-5 (autoria própria).	59
Figura 34 - Coordenograma – Carga setor 2-5 (autoria própria).	60

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Dados de ajustes do alimentador (COELBA).	40
Tabela 2 - Divisão do sistema elétrico em setores (autoria própria).	42

## LISTA DE SIGLAS

AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
COELBA	Companhia de Eletricidade do Estado de Bahia
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
RTC	Relé de Tensão Contínua

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos do trabalho	11
1.2 Justificativa	11
1.3 Organização do projeto	12
2 EMPRESA GE RENEWABLE ENERGY	13
2.1 Descrição da empresa	13
2.2 Descrição técnica das instalações elétricas	13
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1 Dispositivos de Proteção de Sobrecorrente	14
3.1.1 Disjuntor	15
3.1.1.1 Disjuntores de Baixa Tensão	16
3.1.1.2 Disjuntores de Alta tensão	17
3.1.2 Fusível	18
3.1.3 Relé	21
3.1.4 Transformadores de Corrente	22
3.1.5 Transformadores de Potencial	23
3.2 Elementos do Sistema Elétrico a serem protegidos	25
3.2.1 Transformadores	25
3.2.2 Cargas Motóricas	25
3.2.3 Cargas não Motóricas e cabeamento elétrico	26
3.3 CURTOS-CIRCUITOS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS	28
4 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	31
4.1 Cargas do Sistema	31
4.2 Características desejáveis em um sistema de proteção	31
4.2.1 Sensibilidade	32
4.2.2 Seletividade	32

4.2.3 Velocidade de atuação	32
4.2.4 Confiabilidade	33
4.3 Tipos de Seletividade em um sistema de proteção	33
4.3.1 Seletividade cronométrica	33
4.3.2 Seletividade amperimétrica	34
4.3.3 Seletividade lógica	35
5 METODOLOGIA DO ESTUDO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE	38
5.1 Documentação necessária	39
5.1.1 Dados fornecidos pela concessionária	39
5.1.2 Dados fornecidos pela empresa	40
5.2 Análise das instalações elétricas da empresa	41
5.3 Modelagem Computacional das instalações elétricas	44
5.3.1 Introdução ao ETAP	44
5.3.2 Modelo da instalação	44
5.3.3 Parametrização dos dispositivos	44
6 RESULTADOS	45
6.1 Simulações de curto-circuito	45
6.1.1 Alimentação da concessionária	45
6.1.2 Circuito Vestiário	47
6.1.3 Circuito área nova	49
6.1.4 Circuito novo galpão	51
6.1.5 Carga Setor 1	53
6.1.6 Circuito banco de capacitor (BC)	55
6.1.7 Circuito quadro geral de baixa tensão (QGBT)	57
6.1.8 Carga Setor 2-5	59
7 CONCLUSÃO	61
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 Objetivos do trabalho**

O trabalho tem como objetivo realizar o estudo de coordenação e seletividade da planta da produção existente da GE, de modo a reduzir os prejuízos operacionais e o tempo de parada do processo produtivo da empresa para mitigação das possíveis faltas, garantindo assim a máxima disponibilidade de energia na instalação, além de complementar as documentações técnicas das instalações elétricas. Pode-se dividi-lo em:

- Modelar computacionalmente o sistema elétrico da planta em diagrama unifilar, utilizando os parâmetros reais dos componentes dos sistemas e, quando necessário, parâmetros recorrentes;
- Realizar as simulações computacionais do comportamento do sistema elétrico da planta no caso de faltas em qualquer ponto;
- Analisar, com base nas simulações, quais os erros de seletividade dos equipamentos de proteção das instalações elétricas da planta;
- Elaborar relatório apresentando os ajustes necessários na coordenação dos equipamentos de proteção das instalações elétricas para garantir a seletividade correta do sistema.

### **1.2 Justificativa**

O Sistema de fornecimento da GE Renewable Energy é fornecido através de uma linha com tensão de fornecimento de 13,8kV, possuindo uma carga instalada maior que 300 kVA. A proteção deste sistema deve ser realizada por disjuntor acionado através de relés secundários com funções de proteção contra sobrecorrente instantânea e temporizada, ou seja, relés 50 e 51 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 14039, 2005).

A GE não possui um estudo de proteção e seletividade das suas instalações elétricas, sendo que é um documento necessário e exigido pelo programa Manual de Instalações Elétricas nos elementos de auditoria da Empresa.

O estudo de coordenação e seletividade irá prover as informações necessárias para adequação dos dispositivos de proteção do sistema elétrico visando a redução

de prejuízos operacionais, garantindo a máxima disponibilidade de energia do sistema. Dessa forma, limitado segundo características de disparo do elemento de proteção, bem como do valor da energia de passagem do elemento a montante, apenas os circuitos a jusante serão interrompidos pelos equipamentos de proteção, permitindo o funcionamento dos demais circuitos que estão em condições normais de operação.

### **1.3 Organização do projeto**

O projeto possui quatro stakeholders, tendo cada um sua função e participação claramente definida. A empresa GE Renewable Energy, representada por Jorge Benjamin de Araujo, é responsável por providenciar documentação necessária para realização do estudo de coordenação, bem como, providenciar acesso às instalações. A equipe, composta dos alunos de graduação de engenharia elétrica Bruno Foloni, Caio Feriãnce, Daniel Pinha e Rubens Teixeira, são responsáveis por informar quais informações são necessárias para elaboração do estudo de coordenação e seletividade, bem como, realizar o estudo e concluir se os dispositivos de proteção estão dimensionados corretamente para o sistema elétrico existente.

O Senai-Cimatec, representado por Rossana dos Santos, se responsabiliza por prover suporte no gerenciamento do projeto, bem como, auxiliar na comunicação entre a equipe e a empresa GE. O orientador técnico, Frederico Ramos Cesário, provê suporte técnico para a equipe no desenvolvimento do estudo de coordenação e seletividade, bem como, validar tecnicamente os resultados do estudo desenvolvido pela equipe.

## **2 EMPRESA GE RENEWABLE ENERGY**

### **2.1 Descrição da empresa**

A GE Renewable Energy, criada em 2015, é uma divisão da General Electric, com sede em Paris, França com o foco na geração de energia a partir das fontes renováveis eólica, solar e hidrelétrica.

A sede localizada em Camaçari-Bahia realiza a montagem dos aerogeradores para torres eólicas. Possuindo 2 linhas para cada tipo de máquina, sendo elas a linha responsável pela Machine Head e outra pelo HUB.

Atualmente, a GE Energias Renováveis-Camaçari atende os principais parques eólicos situados na Bahia e em outros estados, com um portfólio de montagem de aerogeradores de aproximadamente 2,7MW de potência.

### **2.2 Descrição técnica das instalações elétricas**

A entrada de energia da COELBA é entregue em poste particular que segue subterrâneo até o cubículo de entrada, localizado na subestação, próxima a portaria dos caminhões, em 13,8 kV, onde são feitas as medições em alta tensão. Após os disjuntores de 15 kV a vácuo da subestação de entrada, há uma saída que alimentará a subestação transformadora localizada próxima ao tanque de água.

O transformador de 1000 kVA atende ao QGBT 2, que alimenta a área nova do galpão e vestiário. O transformador de 750 kVA atende ao QGBT 1, que alimenta à área administrativa, cozinha e área antiga do galpão.

A unidade tem potência instalada de 1.750 kVA com dois transformadores a seco: Um de 1.000 kVA/440-254V e outro de 750 kVA/380-220 V. Possui duas subestações, sendo uma instalada próxima a portaria de caminhões e a outra instalada próxima ao tanque de água. A proteção dos transformadores é feita por dois disjuntores a vácuo instalados em cubículos blindados e chave seccionadora com fusíveis e corte em carga nos transformadores.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os dispositivos de proteção têm como objetivo, na presença de anormalidades, isolar a porção defeituosa do sistema garantindo a integridade dos equipamentos e a continuidade, sempre que possível, do fornecimento de energia para a região não defeituosa (WORTMANN, 2016),

Esses dispositivos são capazes de interromper o fluxo de corrente através do seccionamento do circuito, por temperatura ou campo magnético. Atualmente, existem dispositivos com uma alta sensibilidade devido a existência de elementos micro processados capazes de identificar elevação de corrente elétrica, possuindo uma rápida capacidade de atuação.

A seguir serão apresentados os equipamentos presentes nesse estudo: fusíveis, disjuntores de baixa tensão, relés de proteção, transformadores de potência e medição (TP e TC), assim como os dispositivos a serem protegidos. Cada um desses dispositivos apresenta características construtivas e de operação, diferenciando um dos outros (MATTOS, 2010).

#### 3.1 Dispositivos de Proteção de Sobrecorrente

As proteções contra sobrecorrentes referem-se as proteções contra sobrecargas e contra curtos-circuitos. Para as proteções contra sobrecargas, considera-se a implementação de dispositivos capazes de proteger os condutores elétricos contra correntes moderadas resultantes da operação de cargas, cuja soma das correntes supera a capacidade dos condutores que as alimentam. Entretanto, para as proteções contra curtos-circuitos, considera-se os dispositivos que atuam em caso de circulação de elevadas correntes nos condutores elétricos resultantes de um defeito entre fases ou entre qualquer dos condutores fase-terra (FILHO, 2017)

As prescrições gerais dos dispositivos das proteções contra sobrecorrentes são (FILHO, 2017):

- Os dispositivos utilizados na proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos devem ser capazes de proteger os circuitos e os equipamentos a eles conectados contra os efeitos térmicos, resultantes das correntes de sobrecarga devido à elevação de temperatura nas isolações,

conexões etc., e contra os efeitos mecânicos de correntes dos esforços dinâmicos nos barramentos, chaves etc. provocados pelas elevadas correntes de curto-circuito;

- Os dispositivos de proteção contra curtos-circuitos não protegem termicamente os equipamentos submetidos a faltas internas;
- Os condutores de fase (condutores vivos) devem ser protegidos por um ou mais dispositivos de seccionamento automático capaz de isolar a parte do circuito defeituoso da fonte de alimentação. As proteções contra sobrecorrentes devem ser detectadas em todos os condutores de fases e provocar obrigatoriamente o seccionamento do condutor em que ocorreu a falta. Em geral, o seccionamento deve ser nas três fases;
- As proteções contra sobrecarga e curtos-circuitos devem ser dimensionadas de forma a serem seletivas e poderem coordenar entre si.

### **3.1.1 Disjuntor**

Os disjuntores são dispositivos destinados a interromper a corrente elétrica em circuitos. Uma das principais funções do disjuntor é a extinção do arco elétrico. O arco elétrico pode ser formado quando há a interrupção da corrente elétrica em um circuito, no qual a corrente elétrica continua a circular através do ar ou meio isolante. Uma vantagem da utilização dos disjuntores é a sua capacidade de ser rearmado após uma atuação, podendo ser remoto ou local.

Em virtude da maior rigidez dielétrica deste meio, a passagem da corrente elétrica provoca uma elevação na temperatura, da ordem de milhares de graus. O arco elétrico tem características de uma explosão, com liberação elevada de energia térmica e acústica. Dessa forma, é necessária a extinção do arco elétrico nos disjuntores. As diferentes tecnologias empregadas para extinguir o arco é o que caracteriza cada tipo disjuntor, tais como: óleo, gás ou vácuo.

Um dos tipos de disjuntores mais utilizados em redes de baixa tensão é os termomagnéticos, capazes de seccionar o circuito antes que efeitos térmicos danifiquem a rede e equipamentos, possuindo também a função de sobrecarga (MATTOS, 2010).

### 3.1.1.1 Disjuntores de Baixa Tensão

São dispositivos destinados à proteção de circuitos elétricos, os quais devem atuar quando percorridos por uma corrente de valor superior ao estabelecido para funcionamento normal.

Estes disjuntores são facilmente encontrados em instalações elétricas prediais e residenciais, possuindo várias funções tais como proteção contra sobrecarga, contra curtos circuitos, contra contatos indiretos, realizando o seccionamento do circuito.

Os disjuntores de baixa tensão podem ser somente térmicos, somente magnéticos, termomagnéticos entre outros, assim como possuem ajuste ou regulação das correntes de disparos referentes às unidades térmicas, como da magnética. Na figura 1 tem-se a curva característica de um disjuntor termomagnético.

Os disjuntores de baixa tensão mais comuns são: os disjuntores de potência de baixa tensão e disjuntores de caixa moldada.

Os disjuntores de caixa moldada são compostos por uma caixa isolante semelhante a uma unidade integral, que aloja internamente todos os componentes do disjuntor. Sua desvantagem é a manutenção devido ao acesso interno ser bastante restrito, por essa dificuldade há uma maior troca deste equipamento.

Os Disjuntores de potência são abertos, facilitando o acesso as partes internas caso haja a necessidade de manutenção.

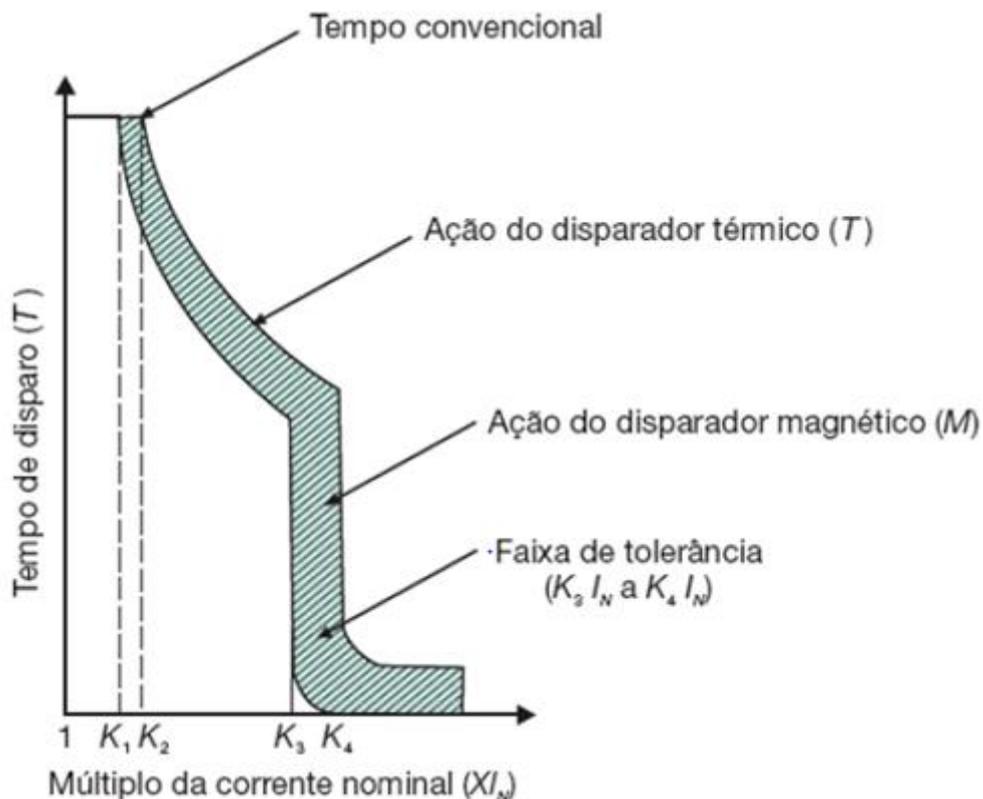


Figura 1 - Características de disjuntor termomagnética (FILHO, 2017)

### 3.1.1.2 Disjuntores de Alta tensão

Com relação à média tensão, outras opções de meios de interrupção do arco aparecem. Enquanto na baixa tensão os disjuntores à vácuo são a solução adotada na grande maioria dos casos, para tensões de interrupção maiores do que 15 kV soluções com gás SF6 ganham também relevância.

Devido a classe de isolamento, esses dispositivos possuem tamanhos maiores que os utilizados em baixa tensão, assim como são mais caros. Eles podem interromper o fluxo de corrente através do óleo mineral, gás SF6 e no Vácuo.



Figura 2 - Disjuntor Power Breaker e disjuntor de caixa moldada (SOUZA, 2013)

### 3.1.2 Fusível

São dispositivos destinados à proteção dos circuitos elétricos e que se fundem quando percorridos por uma corrente de valor superior àquela para o qual foram projetados.

Os fusíveis são relativamente baratos e isentos de manutenção. Por estas razões, eles são largamente usados por muitas concessionárias de distribuição para proteger transformadores e ramais de alimentadores laterais.



Figura 3 - Fusíveis de Baixa Tensão (LEÃO, 2018)

Os fusíveis de sistemas de potência são montados em chaves com contatos fixos e móveis além do elo fusível que protege o circuito contra correntes de faltas.

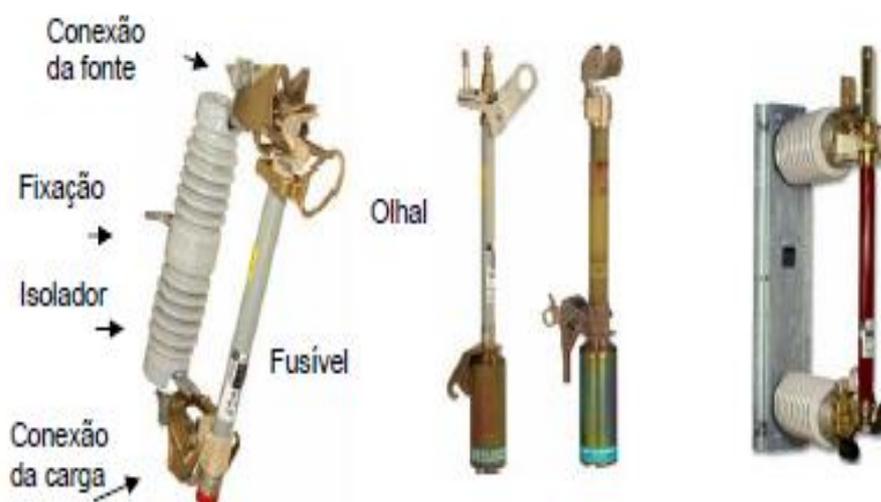


Figura 4 - Fusíveis de Alta tensão (LEÃO, 2018)

O fusível executa a função de proteção contra curto-circuito ou sobrecorrente pela queima do elo interno, sendo considerado um equipamento de proteção não restaurativo, uma vez que, ao romper o elo para realizar a proteção o mesmo não pode ser reconstituído tendo que ser realizado a troca do fusível por um novo.

Os fusíveis atuam dentro de determinadas características de tempo de fusão  $\times$  corrente. As curvas de tempo inverso são fornecidas dependendo do modelo e fabricante, na Figura 5 está um tipo de curva característica.

Há três diferentes tipos de fusíveis (FILHO, 2017):

- Tipo gG: utilizados na proteção contra correntes de sobrecarga e curto-circuito;
- Tipos gM e aM: utilizados apenas na proteção contra correntes de curto-circuito, sendo indicados para proteção de circuitos de motores. Os fusíveis aM são dotados das seguintes características:
  - Um fusível aM não deve fundir para correntes menores ou iguais a  $K1 \times I_n$ ;
  - Um fusível aM pode fundir para correntes entre  $K1 \times I_n$  e  $K2 \times I_n$ , desde que o tempo de fusão seja superior ao valor indicado na curva de tempo mínimo de fusão;

- Um fusível aM deve fundir para correntes maiores que  $K_2 \times I_n$ , desde que o tempo de fusão seja inferior ao valor indicado na curva de tempo máximo de interrupção corrente.

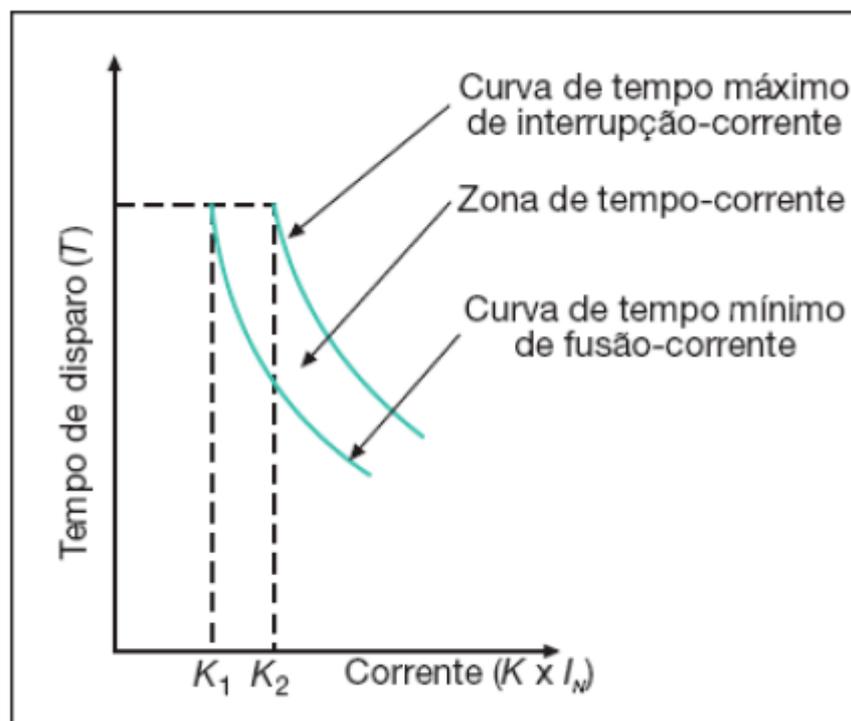


Figura 5 - Características tempo x corrente dos fusíveis Am (FILHO, 2017)

### 3.1.3 Relé

O relé é definido como sendo um dispositivo sensor que comanda a abertura do disjuntor quando surgem anomalias no sistema elétrico.

O modo de operação típico de um relé pode ser separado em quatro etapas:

**Etapa de monitoramento:** o relé monitora a situação elétrica do sistema protegido sob a forma de corrente, tensão, frequência ou uma combinação dessas grandezas (potência e impedância).

**Etapa de detecção:** Ao surgir alguma perturbação no sistema dentro da faixa de sensibilidade do relé, o mesmo deve atuar conforme sua especificação.

**Etapa de atuação:** O relé deve enviar um sinal que funcionará como alarme, bem como, bloqueio ou abertura de um disjuntor.

**Etapa de disparo:** A abertura ou bloqueio do disjuntor irá promover o isolamento da parte defeituosa do sistema.

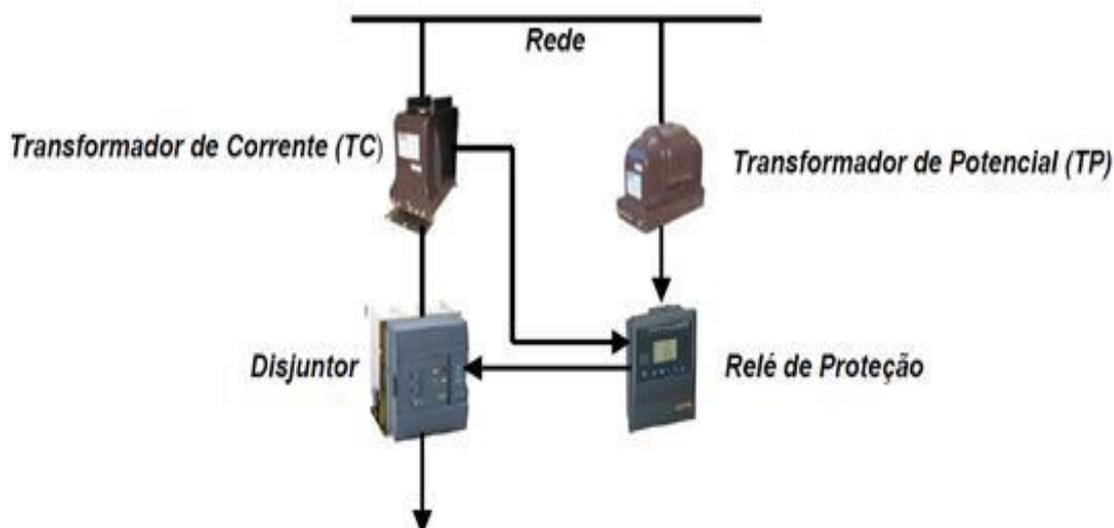


Figura 6 - Esquema TP/TC - Relé – Disjuntor (SOUZA, 2013)

### 3.1.4 Transformadores de Corrente

É um dispositivo que visa reproduzir, nos enrolamentos do secundário do seu transformador interno, uma corrente proporcional a do primário, com posição fasorial adequada para o equipamento (KINDERMANN, 2012).

O transformador de corrente visa isolar os equipamentos de medição dos circuitos de alta tensão, fornecendo uma corrente de dimensões adequadas para os sistemas de medição (KINDERMANN, 2012).

Vários arranjos de transformadores de corrente foram desenvolvidos para diferentes aplicações, entre elas o “Tipo Primário Bobinado” caracterizado por enrolamentos convencionais de cobre envoltos no núcleo sendo utilizadas em subestações de até 11 kV (RUSH, 2011).

Existem também os transformadores de corrente de bucha, possuindo núcleo em formato de anel e enrolamentos do secundário formando um toróide que ocupa todo o perímetro do núcleo, menos um pequeno espaço para o isolamento (RUSH, 2011).

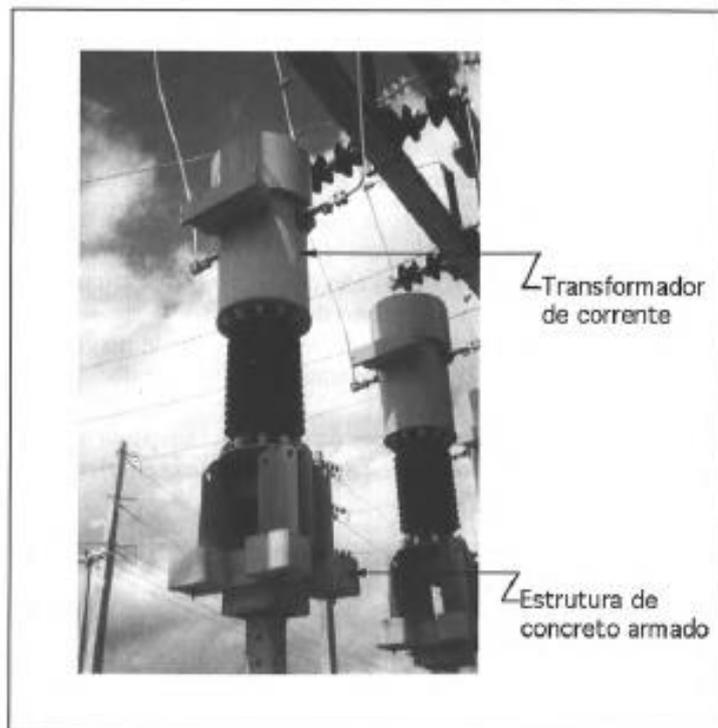


Figura 7 - Transformador de Corrente em Estrutura de Concreto Armado (MAMEDE FILHO, 2000)

### 3.1.5 Transformadores de Potencial

O transformador de potencial são unidades monofásicas que visam entregar um valor de tensão, no enrolamento secundário, proporcional a tensão do enrolamento primário com o menor erro possível (KINDERMANN, 2012).

O Transformador entrega tensão no enrolamento do secundário menor que a do primário permitindo os dispositivos de proteção terem isolação menor que o da linha permitindo componentes menores e mais baratos (COSTA, 2011).



Figura 8 - Transformador de Potencial (SOUZA, 2013)

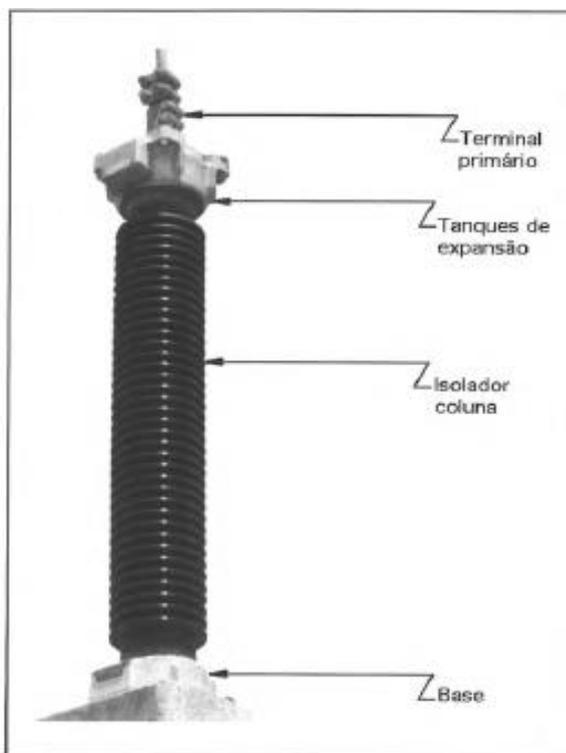


Figura 9 - Transformador de Potencial 230Kv (MAMEDE FILHO, 2000)

## 3.2 Elementos do Sistema Elétrico a serem protegidos

### 3.2.1 Transformadores

Um transformador é um dispositivo desenvolvido para transmitir energia elétrica ou potência elétrica de um circuito a outro, transformando a corrente e tensões em um circuito de corrente alternada ou modificando os valores de impedâncias do circuito elétrico (FRONTIN, 2013).



Figura 10 - Transformador de Potência (FRONTIN, 2013)

Para proteger um transformador algumas características devem ser respeitadas, tais como a corrente nominal de operação, sua corrente de energização e os limites de suportabilidade às correntes de curto-circuito tanto no lado primário quanto no lado secundário (MATTOS, 2010).

### 3.2.2 Cargas Motóricas

Para proteger cargas motóricas, os dispositivos de atuação instantânea devem ser utilizados para proteção contra curto-circuitos e dispositivos de atuação temporizada para proteção contra sobrecarga (SOARES, 2009).

Para realizar a proteção de cargas motóricas, também, deve-se respeitar as condições de operação do equipamento e o sistema não deve atuar em eventos de surtos de corrente inerentes do dispositivo a se proteger (MATTOS, 2010).

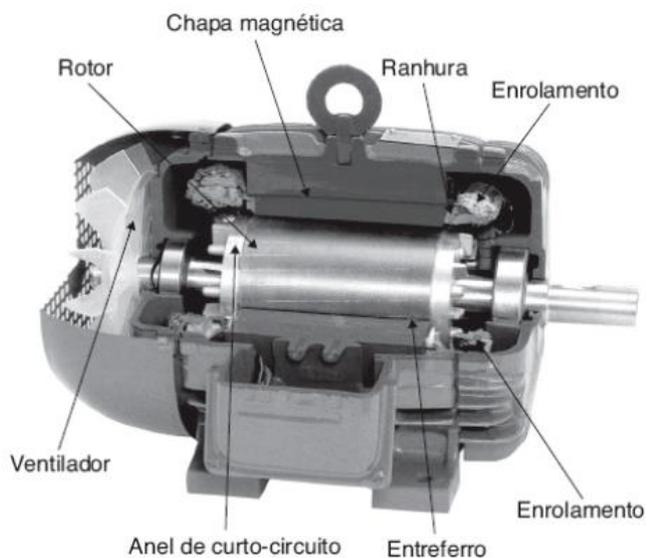


Figura 11 - Motor de indução trifásico (FILHO, 2017)

### 3.2.3 Cargas não Motóricas e cabeamento elétrico

Cabos precisam ser protegidos contra curtos circuitos que acontecem nos condutores. Na ocorrência de surto de corrente a temperatura do condutor se eleva e posteriormente a temperatura do material isolamento eleva-se, também, podendo danificar o cabo caso não seja resolvido rapidamente (SOARES, 2009).

A curva típica que descreve o limite térmico do cabo pode ser visto na Figura 12. A partir dessa curva podemos definir região em que o cabo sofrerá dano, região em que o cabo fica na iminência de sofrer dano, conhecido como região de alerta e uma região de trabalho do cabo, região de ajuste. Essas regiões podem ser vistas na Figura 13.

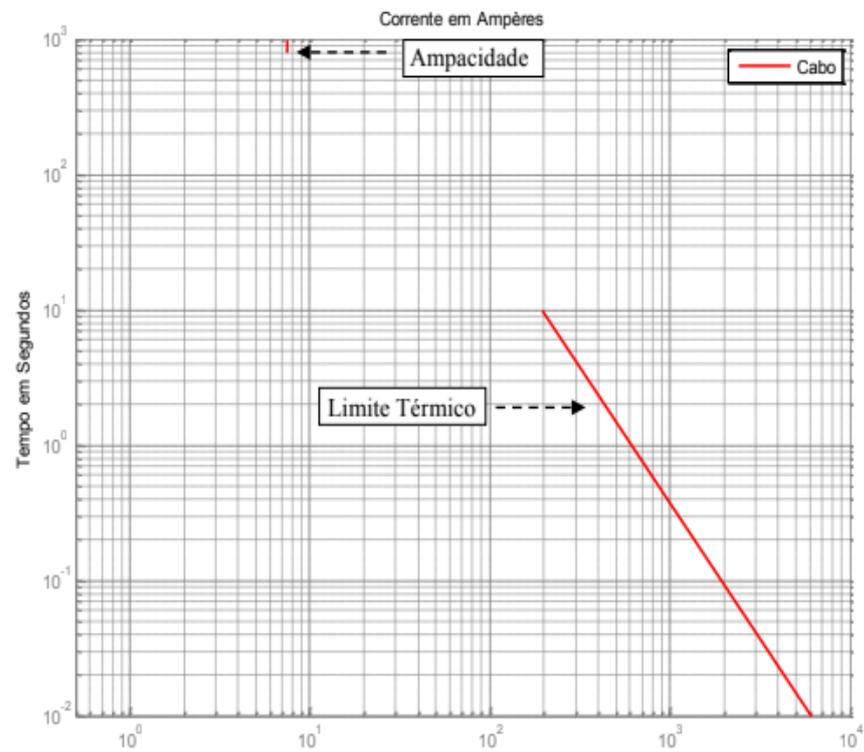


Figura 12 - Curva do limite térmico do cabo (SOARES, 2009)

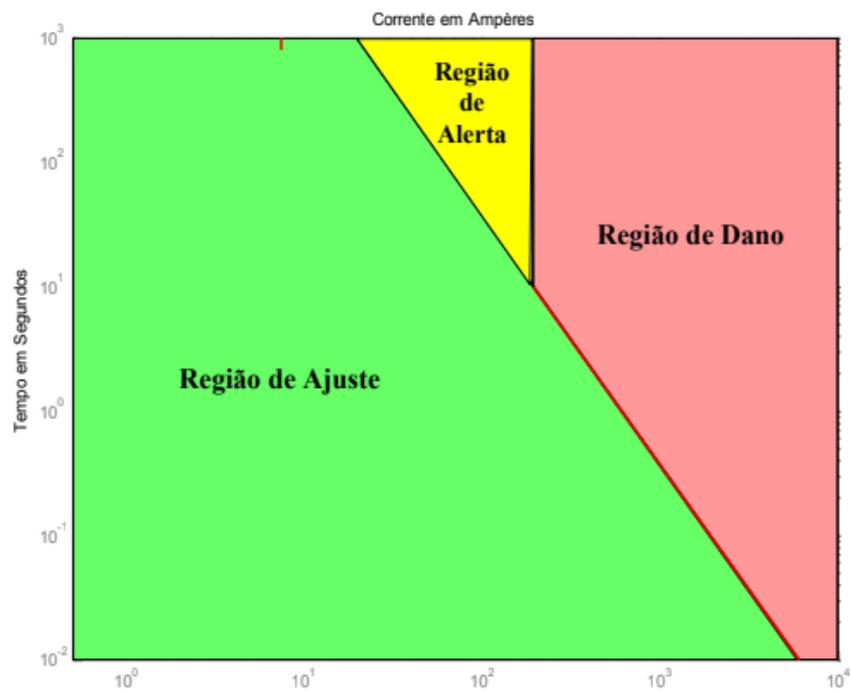


Figura 13 - Região de ajuste, alerta e dano do cabo (SOARES, 2009)

### 3.3 CURTOS-CIRCUITOS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Curto-circuito é definido como um funcionamento falho de um sistema elétrico, que acontecem com o contato entre dois ou três condutores entre si ou com o terra.

As fontes de curto-circuito são componentes elétricos interligados com o sistema, que possam contribuir com a amplitude da corrente elétrica, esses dispositivos são os geradores, condensadores síncronos e motores de indução (FILHO, 2017). Para se determinar esta potência matematicamente, calcula-se o Equivalente Thevenin de todo o sistema visto no ponto da falta.

#### 3.3.1 Fontes de curto-circuito em um sistema industrial

Neste capítulo serão abordados as principais fontes que contribuem para a intensidade da corrente elétrica quando ocorre um curto-circuito.

##### 3.3.1.1 Motores SÍNCRONOS

Quando ocorre uma falta, a tensão do sistema cai e o motor síncrono passa a receber menos potência elétrica da rede para acionar sua carga. Ao mesmo tempo, a tensão interna faz com que a corrente circule para a falta.

A inércia e a carga do motor agem neste momento como máquina motriz, mantida a excitação do campo, o motor passa a agir como gerador alimentando a corrente de falta.

Para o motor síncrono utiliza-se um circuito equivalente composto de uma fonte de tensão constante em série com uma reatância que assume valores de  $X_d''$ ,  $X_d'$  e  $X_d$ .

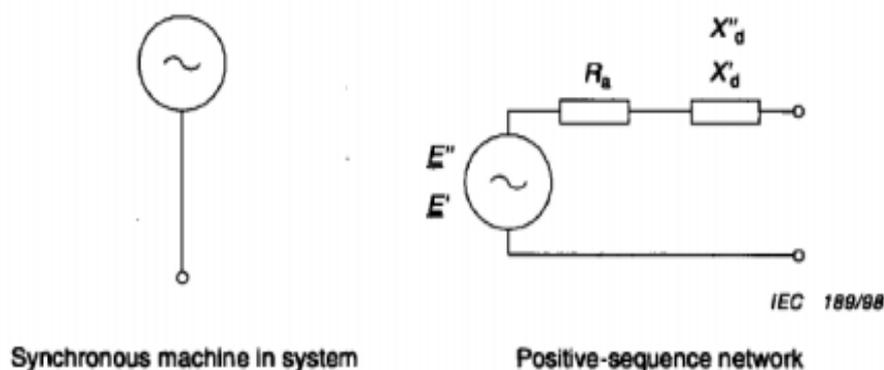


Figura 14 - Modelo de uma máquina síncrona em componente de sequência positiva (ARAÚJO, 2013)

Para efeito de cálculo da corrente de contribuição do motor, pode-se utilizar três valores de reatância que normalmente são fornecidos pelo fabricante do motor síncrono: a subtransitória ( $X_d''$ ), a transitória ( $X_d'$ ) e a síncrona ( $X_d$ ).

A reatância subtransitória ( $X_d''$ ) determina a corrente durante o primeiro ciclo após a falta. Decorrido cerca de 0,1 segundo ela aumenta seu valor e passa a ser  $X_d'$  (reatância transitória) e na sequência após 0,5 a 2 segundos, esta reatância aumenta ainda mais sendo chamada de reatância síncrona ( $X_d$ ), que determina a corrente de curto-circuito em condições de regime permanente.

### 3.3.1.2 Motores de INDUÇÃO

A contribuição do motor de indução na ocorrência de um curto-circuito externo aos seus terminais é causada por uma tensão eletromotriz gerada pela inércia (fluxo do rotor), havendo uma limitação devido a impedância interna do motor (Impactos da Contribuição de Curto-Circuito da Máquina de Indução em Instalações Elétricas (MOTA, KOPCAK, *et al.*, 2014).

As contribuições das correntes dos motores de indução no momento da falta não possuem influência no regime permanente, apenas contribuem no regime transitório, sendo utilizada para o dimensionamento dos equipamentos do sistema, tais como: disjuntores, chaves e barramentos (SANTOS, 2015).

### **3.3.1.3 Sistema da Concessionária**

Assim como é feito o cálculo de curto-circuito em instalações, para avaliação do sistema de proteção e dimensionamento dos equipamentos, a concessionária de energia também realiza seus cálculos, tendo como obrigação informar ao consumidor a potência de curto-circuito no ponto de entrega de energia.

Além das fontes de contribuição de correntes de curto-circuito, outros fatores essenciais para a análise de curto-circuito são os elementos que, devido suas impedâncias, atenuarão as correntes de curto-circuito, sendo os transformadores, cabos, reatores pertencentes deste grupo de elementos (SANTOS, 2015).

## 4 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Um sistema de coordenação necessita de um dispositivo protetor, próximo da carga, realizando a proteção primária, e um dispositivo de proteção para retaguarda, que aciona na ocorrência da falha dispositivo protetor (MASCARENHAS, 2016) . Para os dispositivos serem considerados coordenados, na eventualidade de uma falta deve ocorrer o acionamento do dispositivo mais próximo do ponto de defeito e a montante.

A coordenação dos dispositivos é realizada através do ajuste da temporização de acionamento para a mesma corrente de curto-circuito. Esse ajuste da temporização garante uma seletividade na abertura dos disjuntores, minimizando o impacto de uma possível falta, mantendo o menor número de pontos sem energia.

### 4.1 Cargas do Sistema

No sistema em análise tem-se diversos equipamentos elétricos funcionando como carga:

- Tomadas;
- Máquinas de *Test Stand*;
- Pontes rolantes;
- Talhas elétricas;
- Bombas dos poços de água;
- Iluminação.

As principais cargas consideradas para o estudo de coordenação e seletividade são os motores das pontes rolantes, talhas elétricas, gruas, bem como, as bombas dos poços de água e a máquina de *Test Stand*.

### 4.2 Características desejáveis em um sistema de proteção

O principal objetivo dos equipamentos de proteção do sistema elétrico é isolar uma área do sistema com problema, minimizando os danos causados (SANTOS, 2015).

Os equipamentos de proteção elétrica são ditos como reativos, pois atuam após determinadas situações se instaurarem, e não agem na prevenção da falha. No entanto, seu papel é fundamental para diminuir os danos nas instalações elétricas,

tirando os equipamentos com defeitos no menor tempo possível e permitindo que os equipamentos em bom estado continuem funcionando, se possível. O sistema de proteção deve ter as seguintes características: Sensibilidade, seletividade, velocidade de atuação e confiabilidade.

#### **4.2.1 Sensibilidade**

A sensibilidade do sistema de proteção se refere a sua capacidade em responder a determinadas anormalidades nas condições de operação para os quais foi projetado. Dentre essas anormalidades, podemos citar os curtos-circuitos (monofásico-terra, trifásico, etc) e sobrecorrentes (SANTOS, 2015).

#### **4.2.2 Seletividade**

A seletividade se refere a capacidade do sistema de proteção em reconhecer e selecionar quais os dispositivos de proteção devem entrar em ação e quais sua atuação deve ser retardada. Ela garante que os relés não irão operar durante faltas para os quais não foram projetados, definindo assim o índice de segurança dos relés. Como já ressaltado anteriormente, o relé deve isolar apenas a menor porção necessária do sistema, permitindo que os restantes das instalações elétricas da unidade continuem em operação normal.

#### **4.2.3 Velocidade de atuação**

Em virtude dos grandes danos que as faltas podem causar nos equipamentos de um sistema elétrico, além dos possíveis danos à integridade física das pessoas, a velocidade de atuação é bastante desejada. No entanto, a depender da configuração do circuito, em especial onde a seletividade é necessária, operações muito rápidas podem ser complicadas de se obter (SANTOS, 2015).

Uma proteção extremamente rápida pode resultar em um grande número de operações indesejadas, tais como a interrupção no fornecimento de energia em outras áreas críticas de uma planta industrial, que podem resultar em prejuízos financeiros, além de potenciais perigos para os trabalhadores daquela unidade. Dessa forma, em um estudo de coordenação e seletividade, embora uma alta velocidade de atuação

seja desejada, ela não é prioridade, estando a correta seletividade do sistema em primeiro lugar.

Obter uma velocidade de atuação boa que não atrapalhe na seletividade tem muitos benefícios:

- Diminuir a extensão dos danos;
- Auxiliar a manutenção das estabilidades das máquinas operando em paralela;
- Melhorar as condições para resincronização de motores;
- Assegurar a manutenção de condições normais de operação nas partes sadias do sistema;
- Diminuir o tempo total de paralisação dos consumidores de energia;
- Diminuir o tempo total de não liberação de potência, durante a verificação de dano.

#### **4.2.4 Confiabilidade**

A confiabilidade, sob o ponto de vista da manutenção, é a probabilidade de um equipamento operar dentro de suas condições normais em um determinado período de tempo. Esse conceito, quando voltado para a proteção de sistemas elétricos, tem dois atributos: confiável e seguro. O sistema será dito confiável quando os equipamentos entrarem em operação para as condições previstas. Este sistema será dito seguro se estes equipamentos não entrarem em operação para qualquer outra situação que venha a ocorrer sobre o sistema (SANTOS, 2015).

### **4.3 Tipos de Seletividade em um sistema de proteção**

A seletividade pode ser feita através de ajustes de diferentes parâmetros dos dispositivos de proteção. Os diferentes tipos de seletividade são necessários em virtude das peculiaridades que cada sistema elétrico tem. Um sistema de proteção pode utilizar mais de um tipo de seletividade para garantir o seu correto funcionamento (MARDEGAN, 2013).

#### **4.3.1 Seletividade cronométrica**

A seletividade cronométrica, também chamada de cronológica, é aquela realizada com a aplicação de intervalos de tempo entre os dispositivos de proteção

situados à jusante e à montante, garantindo a operação destes de forma seletiva e coordenada (MARDEGAN, 2013). De modo geral, se retarda o funcionamento da proteção à montante para que a proteção à jusante tenha tempo de isolar a falta. Este tempo é chamado intervalo de coordenação, variando entre 0,2 e 0,5 segundos (SANTOS, 2015).

A figura 15 mostra um exemplo de diagrama unifilar de um sistema, com curvas das proteções de sobrecorrente instantânea e sobrecorrente temporizadas.

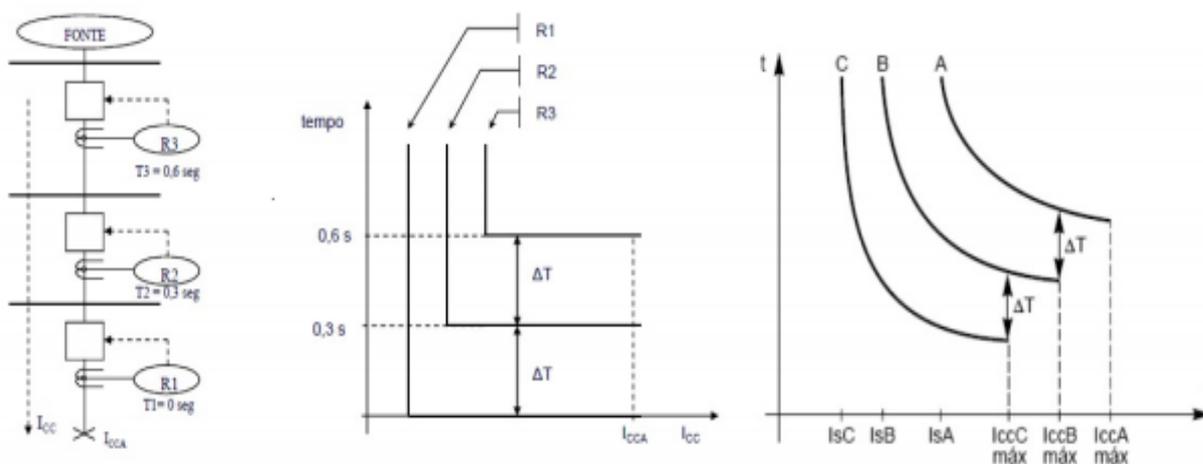


Figura 15 - Diagrama unifilar e curvas características de um sistema elétrico .

Esta forma de seletividade é bastante confiável e utilizada em indústrias, no entanto, possui algumas desvantagens:

- Tempo de atuação da proteção mais elevados à medida que os relés se aproximam da fonte;
- Maior exposição dos equipamentos aos curtos-circuitos;
- Maiores danos aos equipamentos e instalações;
- Superdimensionamento térmico dos equipamentos;
- Maior duração dos afundamentos de tensão decorrentes de faltas.

#### 4.3.2 Seletividade amperimétrica

A seletividade amperimétrica é aquela utilizada quando existe uma impedância muito alta entre os pontos em que se está fazendo a seletividade. Neste caso, a corrente de falta “vista” pelo dispositivo de proteção à montante é muito maior do que aquela vista pelo dispositivo de proteção instalado à jusante (MARDEGAN, 2013).

Esta forma de seletividade é comumente utilizada nos dispositivos instantâneos instalados no primário de transformadores. Devido à impedância do transformador, o nível de corrente de falta se altera substancialmente entre o primário e o secundário, e assim, pode-se ajustar o tempo de atuação desta proteção do primário sem nenhuma dependência do tempo de atuação da proteção no secundário. Percebe-se imediatamente que, com essa seletividade, a velocidade de atuação pode ser alta sem prejudicar a seletividade do sistema.

### 4.3.3 Seletividade lógica

A seletividade lógica é aplicada por meio de relés digitais que permitam que as unidades situadas mais próximas da falta possam eliminá-la em um período muito pequeno, entre 50 a 100 ms. Esse esquema de seletividade possui as vantagens dos dois outros tipos de seletividades citados e nenhum dos seus inconvenientes, ou seja, excelente discriminação dos pontos de defeito com ótimos tempos de atuação (MARDEGAN, 2013).

Sua aplicação se dá bastante em circuitos radiais, nos quais a corrente de falta percorre o trecho entre a fonte e o ponto de defeito e as seguintes premissas são aplicadas:

- Todas as proteções à montante do defeito são sensibilizadas;
- As proteções à jusante do defeito não são sensibilizadas;
- Somente a primeira proteção à montante do defeito deve atuar e abrir o respectivo disjuntor;
- Cada proteção deve estar apta a, além de comandar a ordem de abertura do disjuntor, receber um sinal de bloqueio proveniente da proteção imediatamente à sua jusante e enviar um sinal de bloqueio para a proteção imediatamente à montante;
- Todas as proteções são ajustadas para uma mesma temporização, que usualmente é de 50 a 100 ms.

Como exemplo, temos o diagrama unifilar abaixo.



- Ajustar o pick-up dos relés da seletividade lógica acima da somatória de corrente de carga acrescida da corrente de partida do maior motor da barra;
- Ajustar o pick-up dos relés da seletividade lógica acima da corrente de contribuição para o curto circuito dos motores que se encontram à jusante do relé, no nível de tensão do motor, e verificar o valor no primário do transformador;
- Ajustar o pick-up dos relés da seletividade lógica acima da corrente *inrush* dos transformadores;
- Habilitar as funções de sobrecorrente utilizadas na seletividade lógica com característica de tempo definido;
- Utilizar o pick-up da unidade temporizada para bloquear a função >>t da proteção à montante;
- Utilizar a temporização para desligar o disjuntor mais próximo da falta;
- Utilizar o breaker failure para retirar o bloqueio do relé correspondente;
- Utilizar todos os contatos dos relés de saída vinculados à seletividade lógica com selamento ajustado para *unlatched*;
- Quando os relés não permitem a programação do desligamento pelo pick-up e pela temporização, constitui-se um bom procedimento para que se possa fazer seletividade lógica, utilizar relés com três unidades de sobrecorrente de fase e três de terra, pois, assim, utiliza-se uma unidade para a seletividade convencional, uma unidade para bloqueio e outra para trip. Quando isso não for possível, é interessante que o relé possua break failure;
- Utilizar as funções l> e t> para fazer a seletividade convencional bem como l>>>, quando disponível.

## 5 METODOLOGIA DO ESTUDO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE

Para realização do estudo de coordenação e seletividade, a primeira etapa é conhecer algumas informações imprescindíveis para o correto ajuste e dimensionamento dos dispositivos de proteção que compõem o quadro geral do cliente (MASCARENHAS, 2016).

Ao início do projeto, foi realizado o levantamento de dados do cliente, tais como as informações no ponto de entrega da rede elétrica, o qual pode-se adquirir os níveis de curto circuito e as impedâncias em pu, a tensão base e a potência base. Estes dados regem as características de entrada do estabelecimento do cliente.

Foi também disponibilizado os diagramas das instalações elétricas da GE, o qual foi possível levantar a relação e quantidade de transformadores, dispositivos de proteção e cargas, sejam elas motóricas ou não-motóricas. Com estas informações pode-se destrinchar os circuitos primários e secundários do sistema elétrico, assim como os valores de tensão nos barramentos.

Tendo em mãos estes dados, fazendo-se uso de um *software* de análise de fluxo de carga e de coordenação e seletividade, criou-se um modelo das instalações elétricas do cliente. Com os recursos fornecidos pelo *software*, os dispositivos foram ajustados conforme os modelos de fabricantes e redimensionados para em seguida realizar a coordenação entre os diversos relés, disjuntores e fusíveis do sistema. Este procedimento possibilitou tornar o modelo mais fiel a realidade e garantir que as simulações se aproximem ao máximo do que aconteceria em caso de faltas reais e permitindo que a seletividade fosse feita, fazendo com que os dispositivos mais próximos atuem primeiro, em detrimento de outros.

Todo o passo a passo está resumido na imagem 17 abaixo. Os dados e todas as informações levantadas, juntamente com o estudo das instalações elétricas da empresa e o modelo computacional de análise e simulação serão detalhados nos tópicos seguintes deste capítulo.

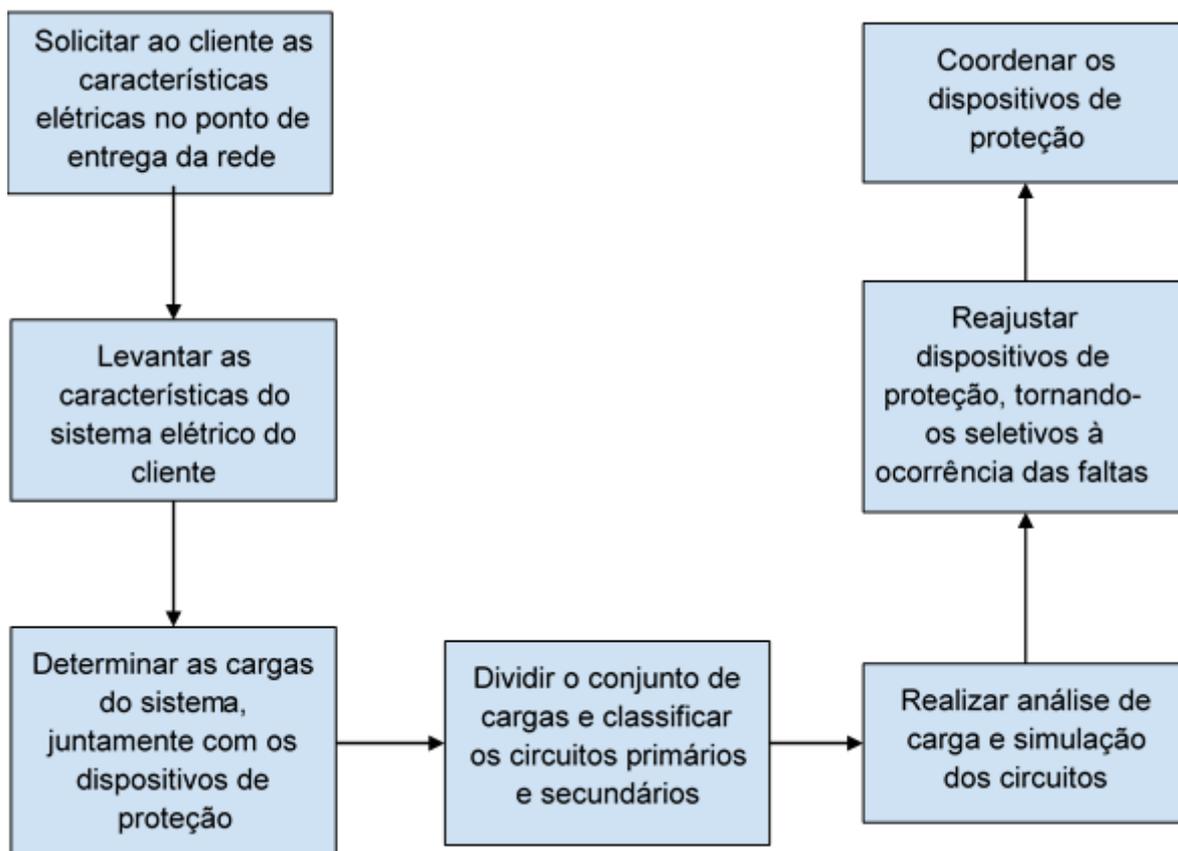


Figura 17 - Fluxograma dos procedimentos do projeto (autoria própria).

## 5.1 Documentação necessária

### 5.1.1 Dados fornecidos pela concessionária

Os dados foram fornecidos pela Coelba e encaminhados pela empresa. Segue abaixo os dados referentes aos níveis de curto-circuito no ponto de entrega do cliente para elaboração do estudo de seletividade e coordenação do sistema:

- $I_{cc3fassim}=4.358$  A;
- $I_{cc3f}=3.909$  A;
- $I_{ccftmax}=2.013$  A;
- $I_{ccftmin}=194$  A;
- $Z_1=(0,3807+j1,004)$  pu;
- $Z_0=(0,6229+j4,0787)$  pu;
- Tensão Base: 13,8 kV;
- Potência Base: 100 MVA.

Ajustes de proteção do Alimentador 01X7/CMT: conforme tabela 1.

Tabela 1 - Dados de ajustes do alimentador (COELBA).

Relé	Fase	Neutro
Tipo	351 P-3	351 P-3
RTC	400	400
Pick-up (A)	450	40
Curvas	C3	C3
Time Dial	0,08	0,5
Inst. (A)	4500	2800

Os religamentos são dois, sendo um em 5 segundos e outro em 15 segundos. Esses dados são referentes ao relatório do dia 06 de Junho de 2018.

### 5.1.2 Dados fornecidos pela empresa

Para a elaboração do estudo de coordenação e seletividade foram fornecidas as seguintes informações pela GE:

- Diagramas unifilares:
  - 430.10.EX-ELE-00.401-DGU01DWG-R03;
  - 430.10.EX-ELE-00.401-DGU01DWG-R04;
  - 430.10.EX-ELE-40.201-SUB01DWG-R01;
  - 430.10.EX-ELE-00.402-QDE01DWG-R01;
  - 430.10.EX-ELE-00.403-QDE02DWG-R01;
  - 430.10-EX-ELE-00.404-QDE03DWG-R01;
  - 800-FBL-SUB-PEX-ELE-R02;
  - 801-FBL-SUB-PEX-ELE-R01;
  - 802-FBL-SUB-PEX-ELE-R00;
  - 803-FBL-SUB-PEX-ELE-R01;
  - 804-FBL-SUB-PEX-ELE-R00;
  - 805-FBL-SUB-PEX-ELE-R02.

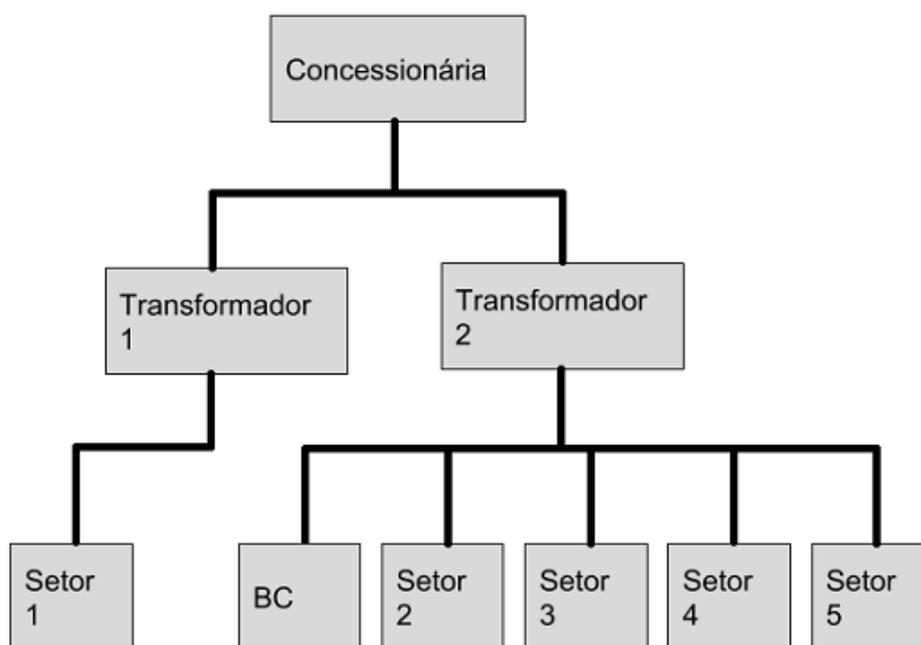
- Memorial descritivo e especificações técnicas (430.10-PB-ELE-001-BPDOC-R01);
- Relatório de manutenção preventiva da subestação (GE Energy - Relatório de manutenção preventiva Sub);
- Folha de especificação dos equipamentos da cabine de entrada (1621-DATA SHEET-CabDeEntrada-R00);
- Folha de especificação dos equipamentos da cabine transformadora (1621-DATA SHEET-CabTransformadora-R00);
- Folha de especificação dos equipamentos do transformador de média tensão (1621-DATA SHEET-TRAFO-R00);
- Estudo de curto-circuito e energia incidente;

## **5.2 Análise das instalações elétricas da empresa**

Para realizar a análise foi adotada a estratégia de dividir o sistema elétrico em 6 setores. O setor 1 é alimentado pelo transformador 2 (1000 kVA), enquanto os setores 2 a 5 são alimentados pelo transformador 1 (750 kVA) juntamente com o sexto setor, representado pelo banco de capacitor de 80 kVAr. Cada setor corresponde a um conjunto de cargas, representados na tabela 2, com os respectivos códigos de descrição.

Tabela 2 - Divisão do sistema elétrico em setores (autoria própria).

TRAFO 1000 kVA			TRAFO 750 kVA		
	ID	DESCRIÇÃO		ID	DESCRIÇÃO
SETOR 1	70.07	5T GANTRY CRANE	BC	-	Banco Capacitor
	70.08	TEST STAND I	SETOR 2	10.01	PROD I
	70.09	JIB CRANE I		10.02	PROD II
	70.10	JIB CRANE II		10.03	ADM II
	70.11	5T ASSEMBLY MACH		10.04	ADM I
	70.12	IND. HEATER		10.05	COZ
	70.13	BRIDGE CRANE I		20.01	PORT I
	70.14	BRIDGE CRANE II		30.01	PORT II
	70.15	5T JIB CRANE	40.04	MANUT	
	70.16	BED PLATE F. MACH	SETOR 3	00.01	GRUA
	70.17	40T BRIDGE CRANE		10.21	PR1
	70.18	TEST STAND II		10.22	PR2
	70.19	BRIDGE CRANE		10.23	PR3
	-	Vestiário		10.24	QD
	-	Novo Galpão	SETOR 4	00.02	ETE
				40.02	COMP
		40.03		POÇO	
		60.01		ETAP	
		SETOR 5	10.31	ELEV	
			10.11	VE I	
			10.12	AC	
			10.13	VE II	



**Figura 18 - Distribuição do sistema elétrico (autoria própria).**

Os diagramas unifilares das instalações elétricas da GE mostram dois transformadores adicionais, um que fornece energia ao vestiário do estabelecimento e outro para o galpão novo da expansão. Durante o estudo, as cargas destes dois espaços são representadas como o próprio quadro geral de cada um.

Esta decisão foi tomada devido ao fato de estarem incorporados algumas cargas menores como iluminação e tomadas de uso geral (TUGs) e específicas (TUEs). Pelo fato de tais cargas, ao sofrerem uma falta, causarem impactos pequenos ou insignificantes no sistema elétrico da GE, verificou que não havia necessidade de dimensionar dispositivos de proteção para cada uma dessas cargas, além de tornar o estudo mais complexo. A mesma tratativa foi adotada para cargas provenientes do *back-office* do estabelecimento.

Unidas estas informações, foi desenvolvido um modelo computacional preliminar para simulação do circuito. Através de simulações realizou-se a análise de carga do sistema e levantou dados a respeito do tempo de atuação dos dispositivos de proteção. A próxima etapa é ajustar os dispositivos de proteção de modo que estes atuem em primeira instância conforme as respectivas cargas a jusante sofram uma possível falta ou curto-circuito. Em seguida, os outros dispositivos de proteção a

montante tiveram seus tempos de atuação ajustados para que estes atuem após o dispositivo a jusante atue.

### **5.3 Modelagem Computacional das instalações elétricas**

#### **5.3.1 Introdução ao ETAP**

Para análise de sistemas elétricos de potência devido ao grande número de elementos presentes se faz necessário o uso de ferramentas computacionais capaz de processar grandes volumes de dados.

O *Electrical Power System Analysis & Operation Software*, conhecido comumente como ETAP, é um software que permite a análise de fluxo de potência, análise de falta, corrente de curto-circuito, cálculo de energia incidente, coordenação e seletividade para dispositivos de proteção, entre outras funcionalidades.

#### **5.3.2 Modelo da instalação**

O modelo da instalação foi analisado a partir dos diagramas unifilares disponíveis pela GE. Além disso, visitas técnicas foram realizadas à área operacional da GE para levantamento de dados e análise dos quadros de cargas e especificações dos dispositivos de proteção. Com base nestas informações, um modelo equivalente das instalações elétricas da empresa foi desenvolvido no *software* ETAP, podendo ser visto no anexo II.

#### **5.3.3 Parametrização dos dispositivos**

Os equipamentos e cabos presentes no sistema foram dimensionados de acordo com as documentações fornecidas pela GE, memorial descritivo e especificações técnicas, relatório de manutenção preventiva da subestação, folha de especificação dos equipamentos da cabine de entrada, folha de especificação dos equipamentos da cabine transformadora, folha de especificação dos equipamentos do transformador de média. A configuração utilizada na ferramenta ETAP pode ser vista no anexo I.

## 6 RESULTADOS

O estudo de coordenação e seletividade tem como função neste escopo caracterizar a hierarquia de atuação dos dispositivos de proteção na ocorrência de uma falta ou curto-circuito. Nesta seção será apresentada trechos de circuitos do modelo computacional dimensionado no ETAP, sua descrição e em seguida suas respectivas curvas tempo x corrente (p.u) para tipos de curto-circuito diferentes.

### 6.1 Simulações de curto-circuito

#### 6.1.1 Alimentação da concessionária

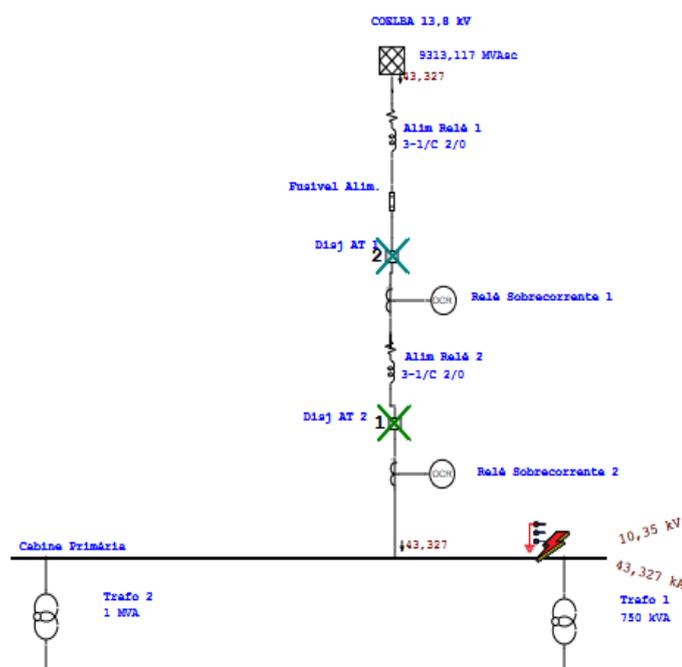


Figura 19 - Coordenação de dispositivos - Alimentação da concessionária (autoria própria).

A Figura 19 acima retrata o circuito primário de alimentação AT do estabelecimento da GE. Na ocorrência de um curto-circuito monofásico-terra nos transformadores ou no barramento da cabine primária, o relé de sobrecorrente 2 detecta a anomalia na corrente, fazendo com que o disjuntor AT 2 dispare. Em um segundo momento, o mesmo procedimento acontecerá ao relé de sobrecorrente 1, disparando o disjuntor AT 1 logo em seguida.

No gráfico tempo x corrente (p.u) apresentado na Figura 20 pode-se observar a curva dos relés de sobrecorrentes, tanto a função de sobrecorrente temporizada 51

quanto a instantânea 50. É possível perceber a ordem de atuação de cada um dos relés como definido na premissa.

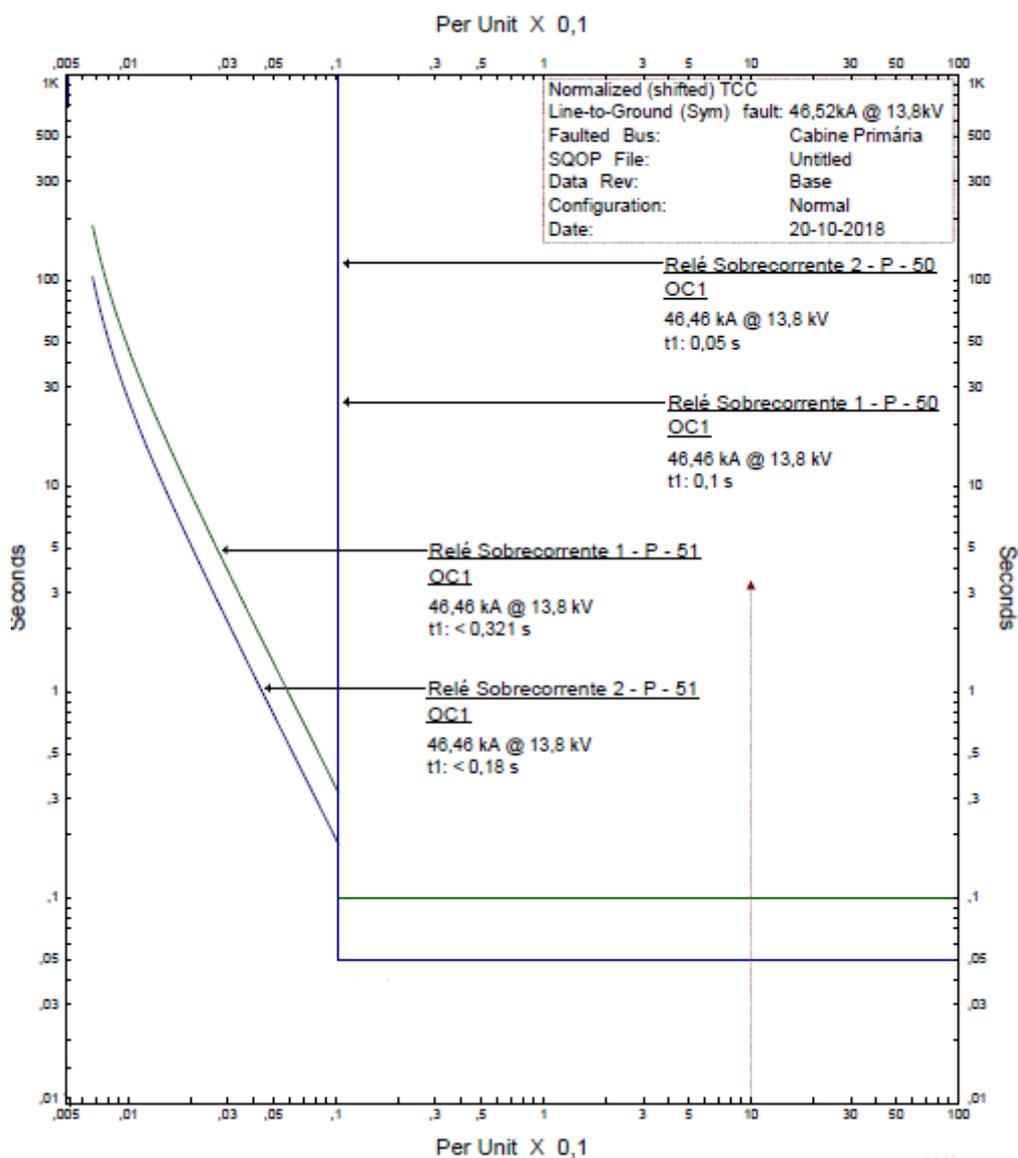


Figura 20 - Coordenograma - Alimentação da concessionária (autoria própria).

### 6.1.2 Circuito Vestiário

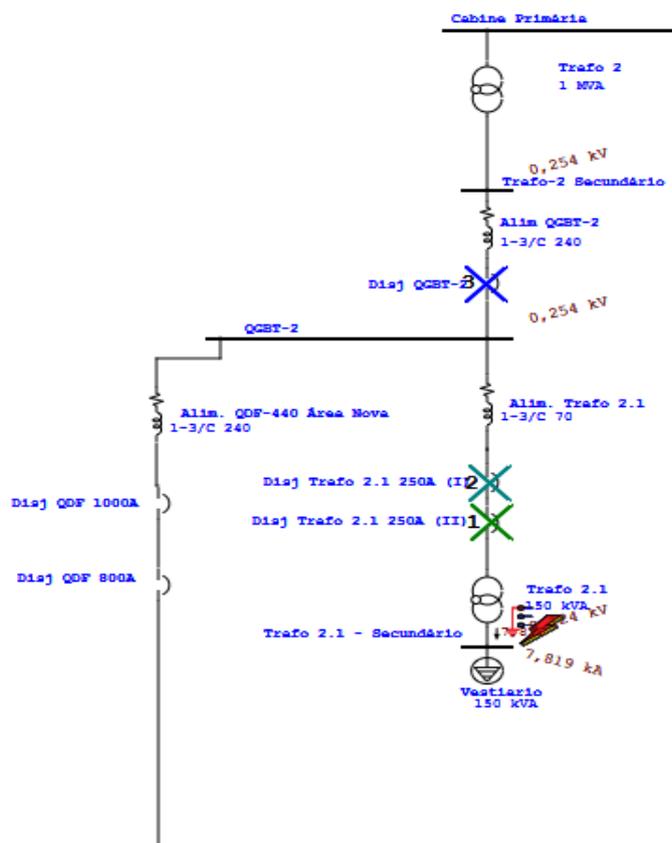


Figura 21 - Coordenação de dispositivos - Circuito vestiário (autoria própria).

Agora é apresentado um dos circuitos secundários do setor 1, referente à carga do vestiário. Mais uma vez para um curto-circuito monofásico-terra, o dispositivo de proteção a montante mais próximo deve atuar, no caso o disjuntor Trafo 2.1 250A (I). A ordem de dispositivos a atuarem após o primeiro segue conforme a imagem, assim como no gráfico tempo x corrente (pu) abaixo.

É possível visualizar que os dois disjuntores próximos ao trafo possuem tempo de atuação similares. Isso se deve ao fato do disjuntor Trafo 2.1 250A (I) estar próximo ao disjuntor Trafo 2.1 250A (II), além de possuírem especificações idênticas de fabricante.

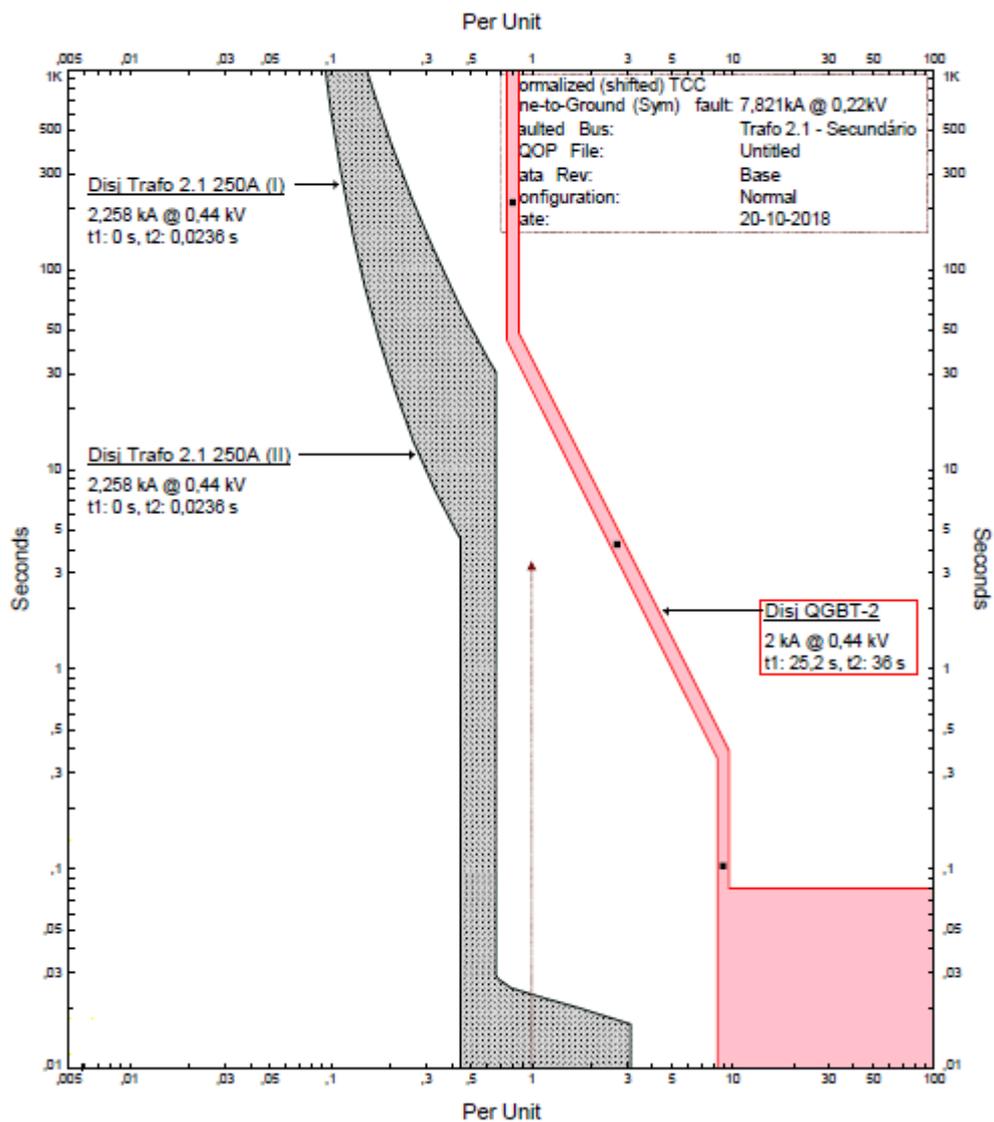


Figura 22 - Coordenograma – Circuito vestiário (autoria própria).

### 6.1.3 Circuito área nova

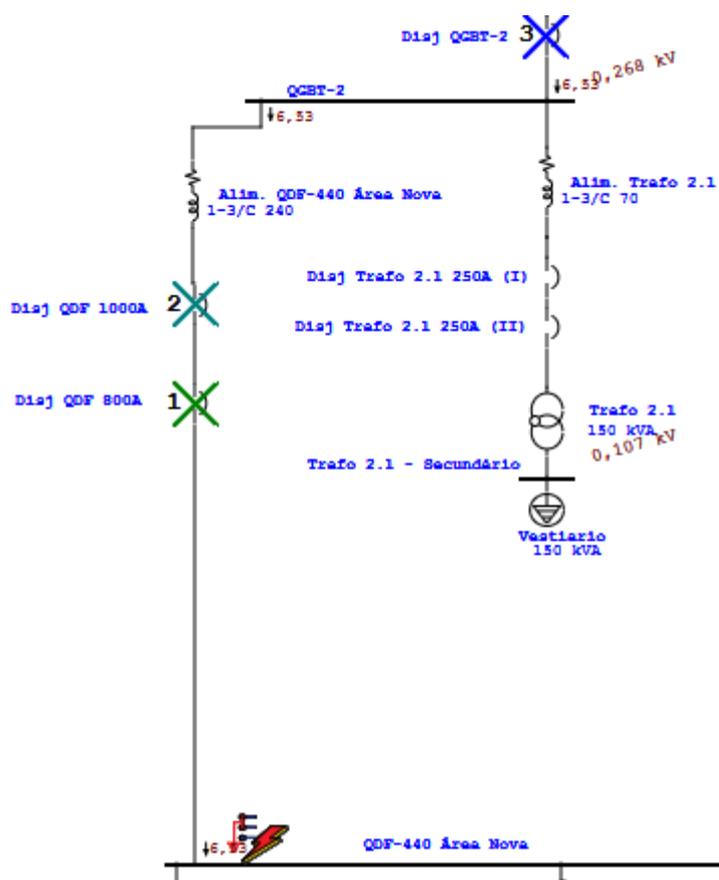


Figura 23 - Coordenação de dispositivos – Circuito área nova (autoria própria).

Este circuito secundário é referente à área operacional da GE, onde se concentram uma grande variedade das cargas do estabelecimento. Desta vez tendo como premissa um curto-circuito bifásico-terra no barramento QDF-440 Área Nova, os ajustes nos dispositivos de proteção assumem a ordem de atuação observada na figura X acima, sendo o disjuntor QDF 800A o primeiro a disparar.

No gráfico tempo x corrente (p.u) abaixo mostra que os três dispositivos possuem parâmetros similares para ajuste da curva, sendo a única diferença a configuração deles para atuarem conforme a ordem estabelecida como premissa.

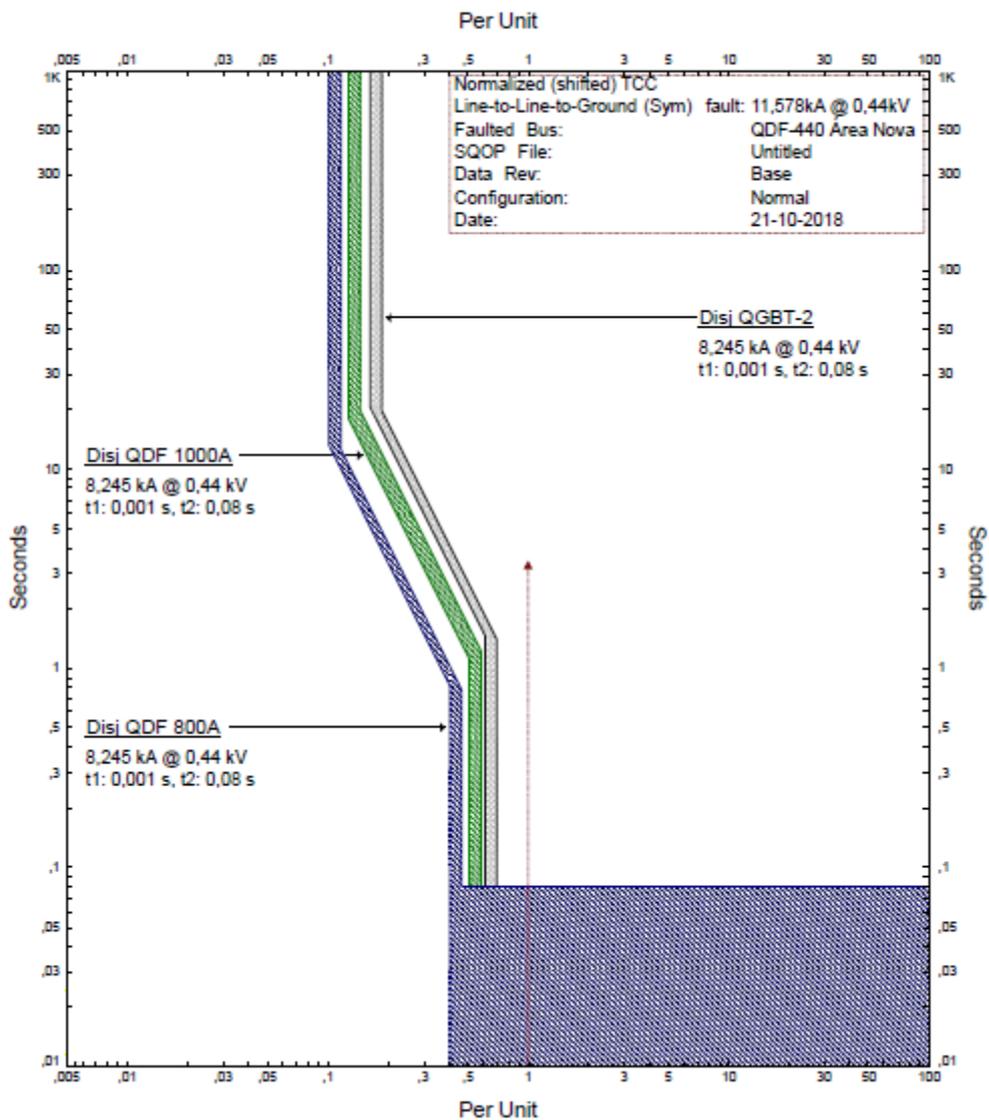


Figura 24 - Coordenograma – Circuito área nova (autoria própria).

### 6.1.4 Circuito novo galpão

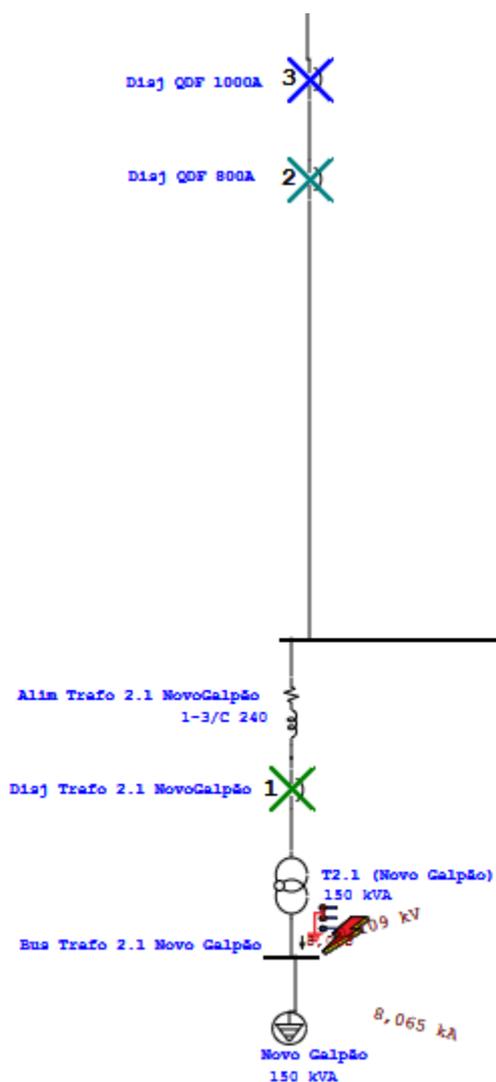


Figura 25 - Coordenação de dispositivos – Circuito novo galpão (autoria própria).

Para este caso, o estudo de coordenação e seletividade contempla o transformador T2.1 (Novo Galpão) e o barramento do mesmo. Na ocorrência de um curto circuito-bifásico-terra, o disjuntor Trafo 2.1 do NovoGalpão é justamente o primeiro dispositivo a atuar após a falta. A ordem de atuação é seguida pelos disjuntores do quadro de distribuição de força (QDF) que possuem valores de corrente de 800A e 1000A respectivamente.

No coordenograma abaixo, pode-se ver as curvas dos disjuntores em relação a falta, revelando suas respectivas atuações na ordem previamente estabelecida.

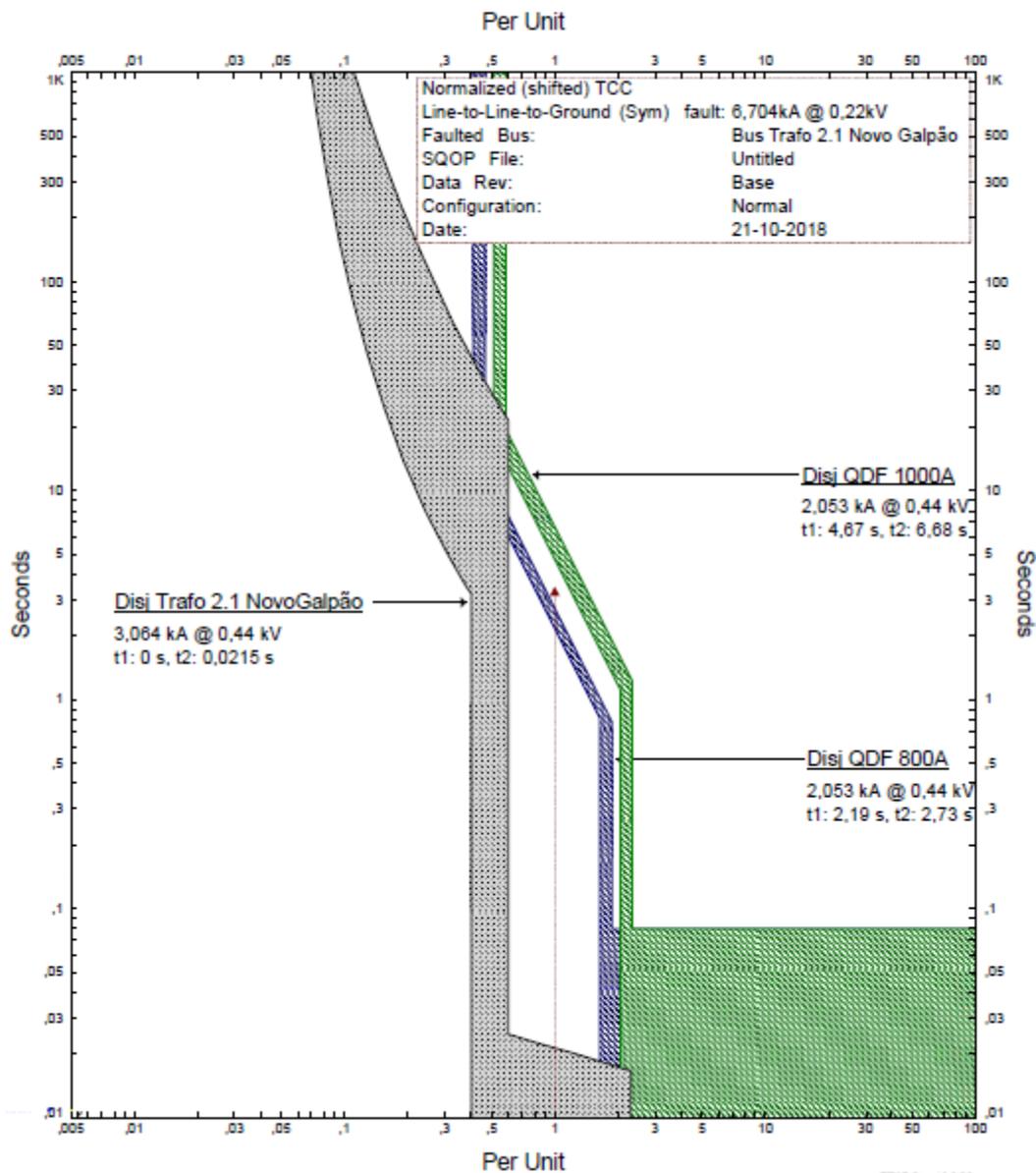


Figura 26 - Coordenograma – Circuito novo galpão (autoria própria).

### 6.1.5 Carga Setor 1

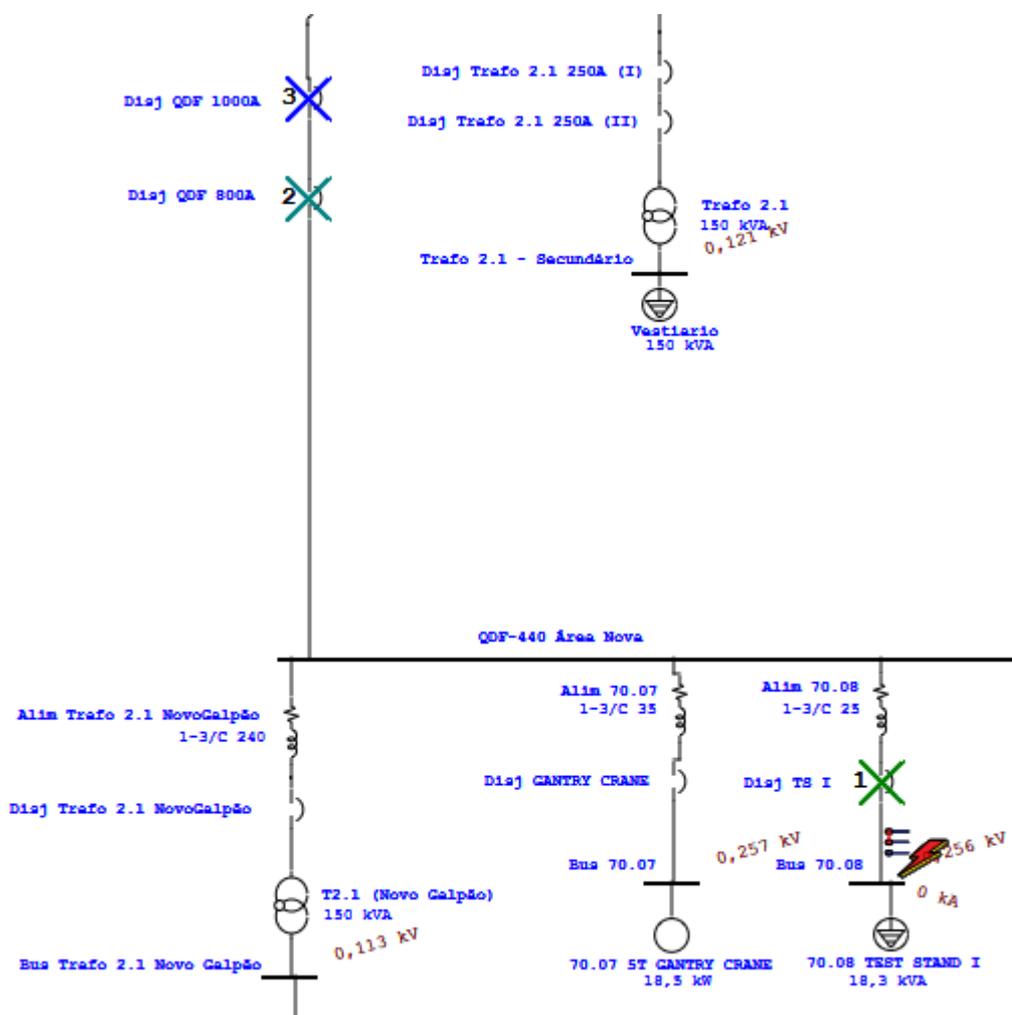


Figura 27 - Coordenação de dispositivos – Carga setor 1 (autoria própria).

A imagem acima mostra a ocorrência de um curto-circuito de natureza bifásica em uma das cargas motóricas do estabelecimento da GE. A configuração de coordenação e seletividade para este caso está estabelecida primeiramente a atuação do disjuntor mais próximo a carga. A falta no Test Stand especificamente é apenas para fins de exemplificação, pois este mesmo resultado da imagem se aplica às outras cargas do setor 1.

No coordenograma abaixo, o disjuntor TS I atua no menor tempo após a falta, seguido pela mesma ordem dos disjuntores do QDF de 800A e 1000A, conforme o tópico 6.1.4.

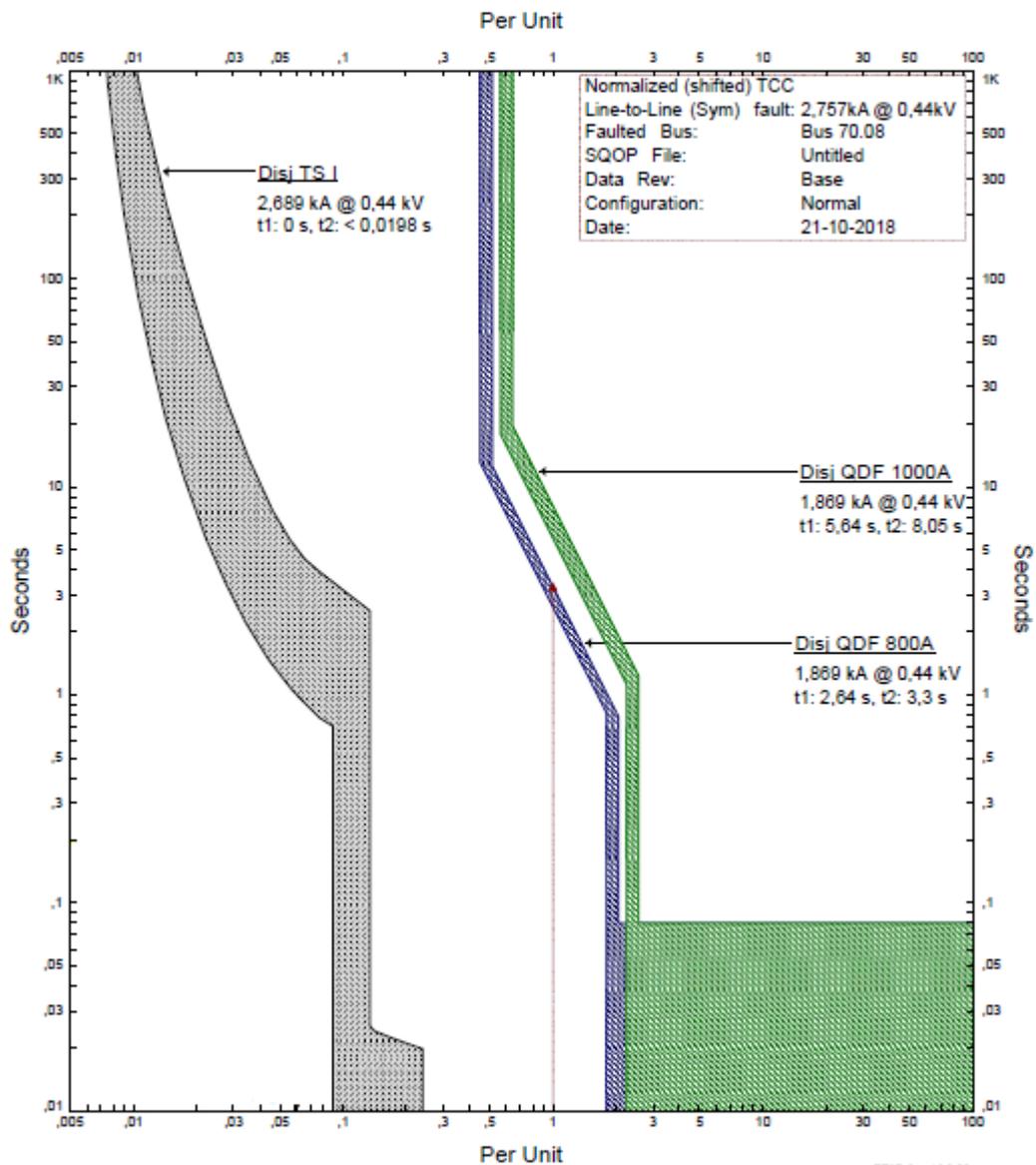


Figura 28 - Coordenograma – Carga setor 1 (autoria própria).

### 6.1.6 Circuito banco de capacitor (BC)

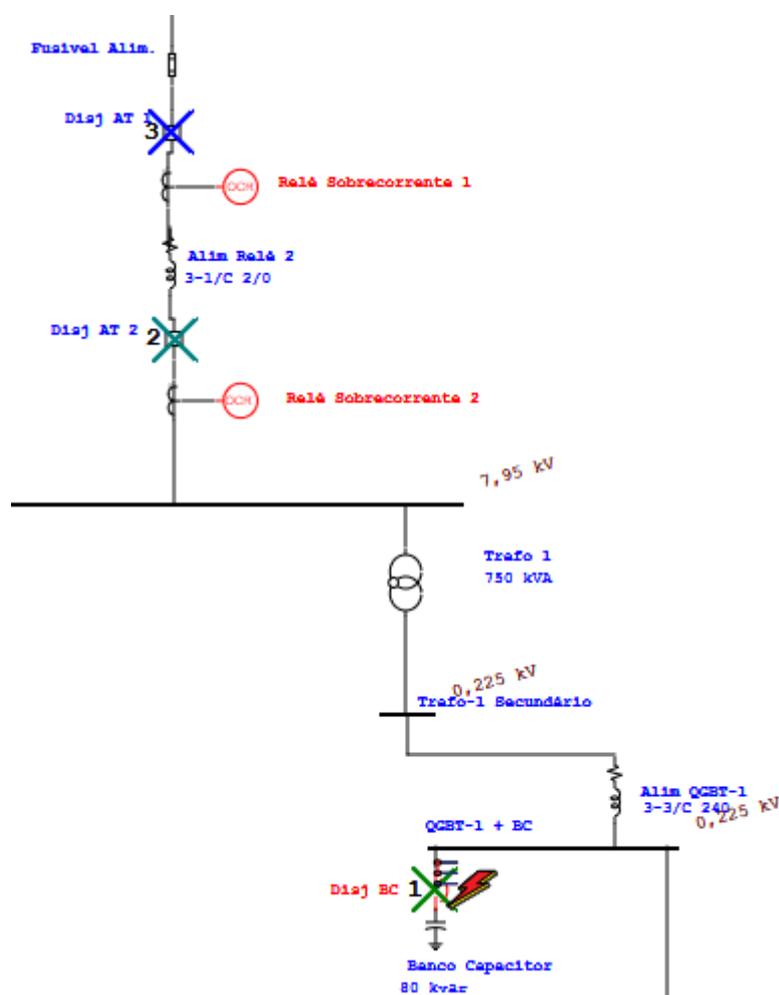


Figura 29 - Coordenação de dispositivos – Circuito banco de capacitor (autoria própria).

Aqui há a representação da segunda ramificação do circuito da GE, o circuito secundário que contempla as cargas dos setores 2 a 5, juntamente com o banco de capacitor. Neste caso há a ocorrência de um curto-circuito bifásico no próprio banco de capacitor. O primeiro dispositivo a atuar é o disjuntor BC após a falta, seguido da ordem de atuação semelhante observado no tópico 6.1.1.

Na curva tempo x corrente abaixo, após a atuação do disjuntor BC, os relés, na necessidade de atuarem, detectarão a falta ainda na curva de sobrecorrente temporizada.

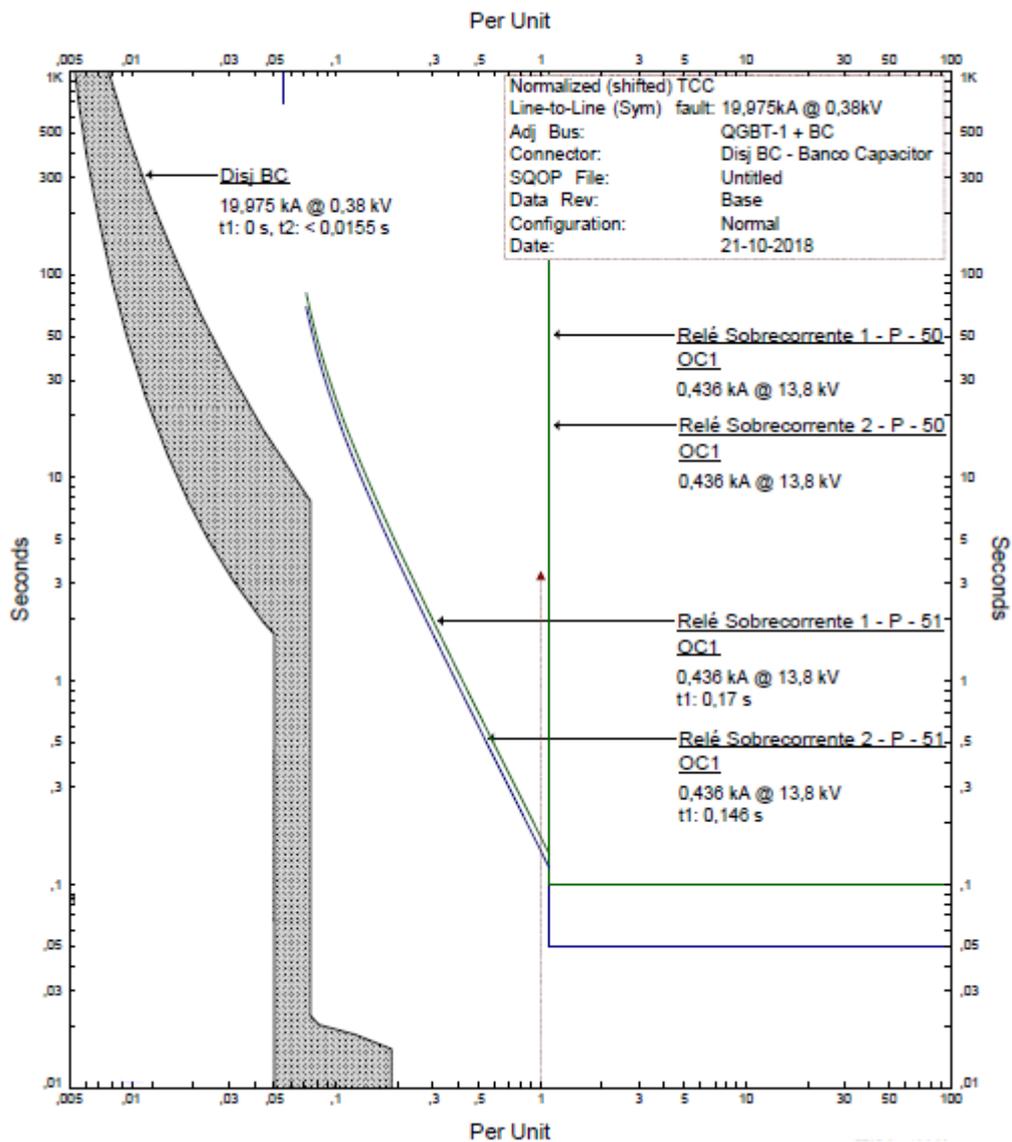


Figura 30 - Coordenograma – Circuito banco de capacitor (autoria própria).

### 6.1.7 Circuito quadro geral de baixa tensão (QGBT)

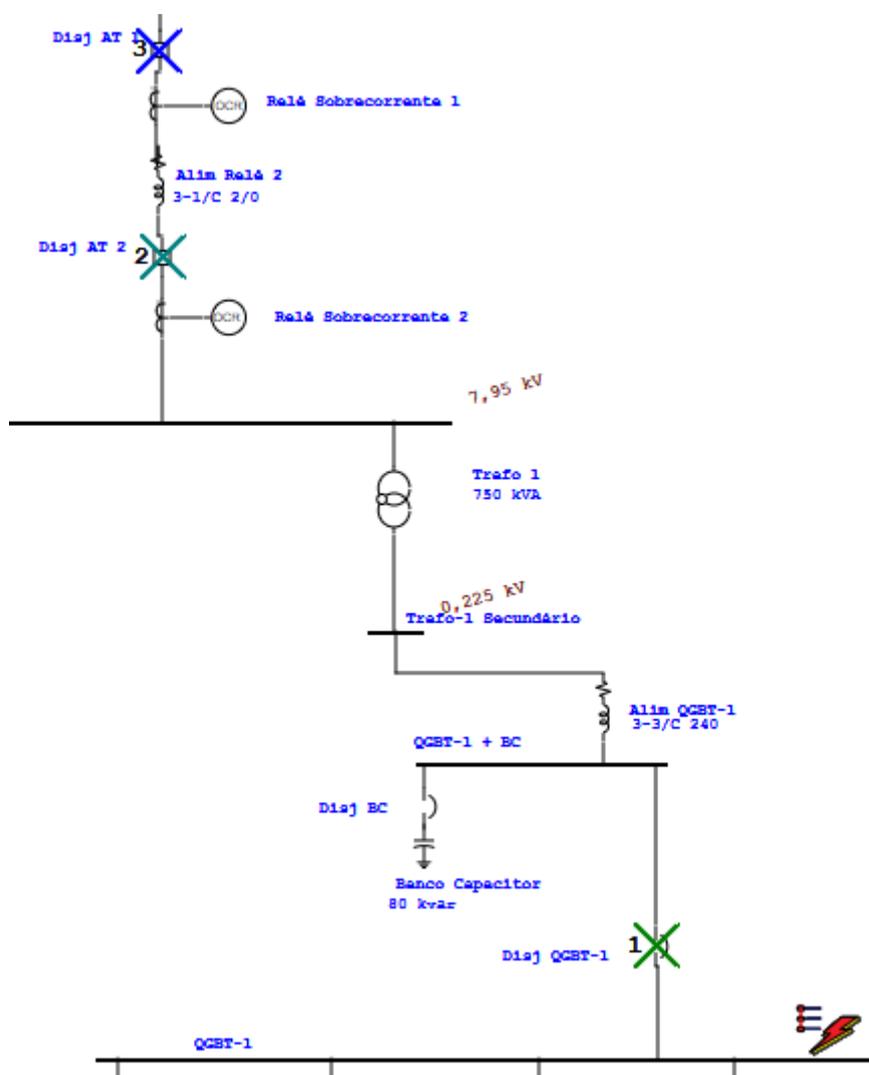


Figura 31 - Coordenação de dispositivos – Circuito QGBT (autoria própria).

Diferente do tópico anterior, este caso de falta contempla as cargas desde o setor 2 ao setor 5, incluindo cargas tanto motóricas quanto não-motóricas. Será feita a exemplificação da ocorrência de um curto-circuito trifásico no barramento QGBT-1, mostrando o disjuntor QGBT-1 atuando primeiramente em relação aos demais. A ordem de atuação seguinte é a mesma observada no tópico 6.1.6.

O coordenograma baixo mostra as curvas dos relés bastante semelhantes à curva do tópico 6.1.6 citado anteriormente, enquanto que a curva do disjuntor é diferente, mas ainda assim atendendo à premissa do estudo.

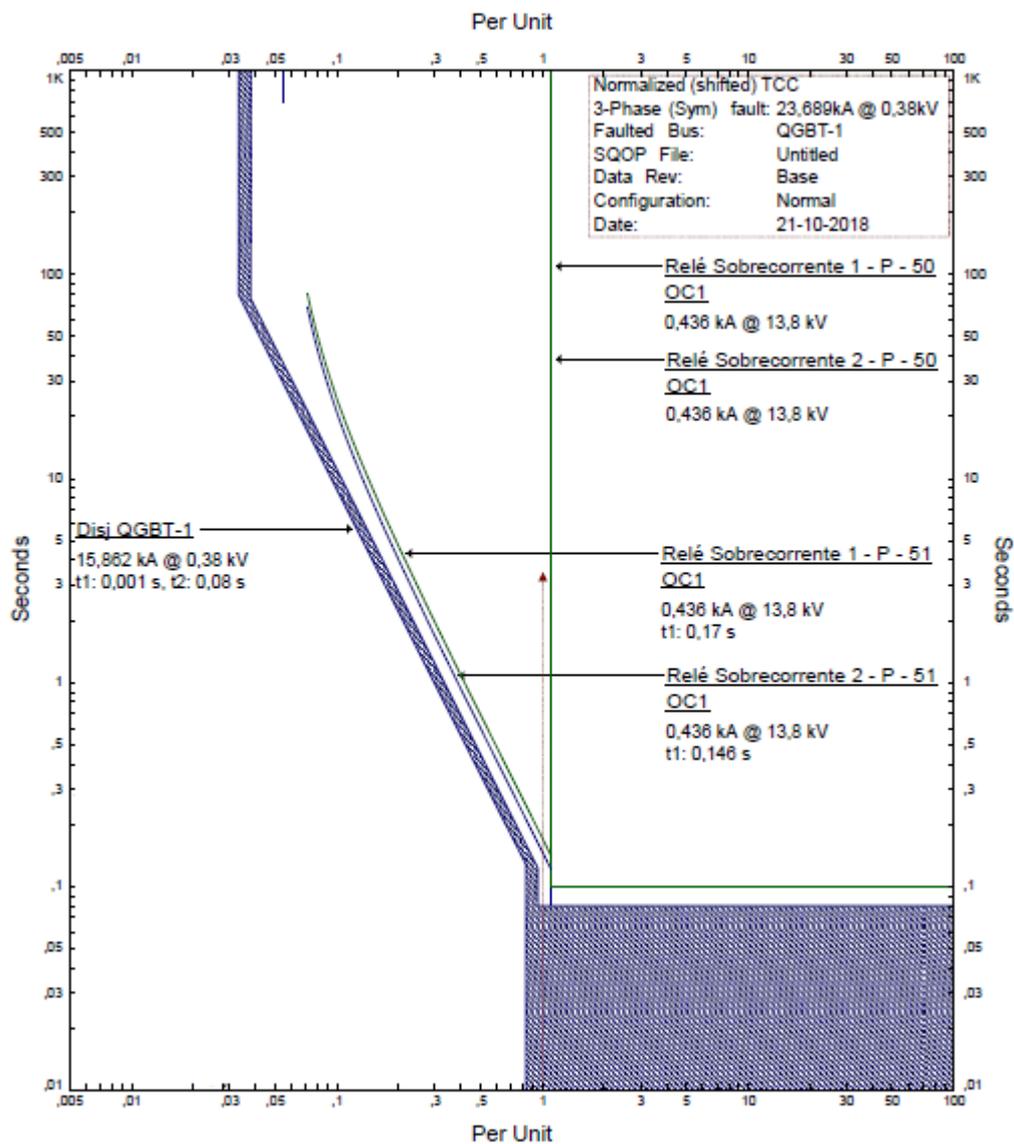


Figura 32 - Coordenograma – Circuito QGBT (autoria própria).

## 6.1.8 Carga Setor 2-5

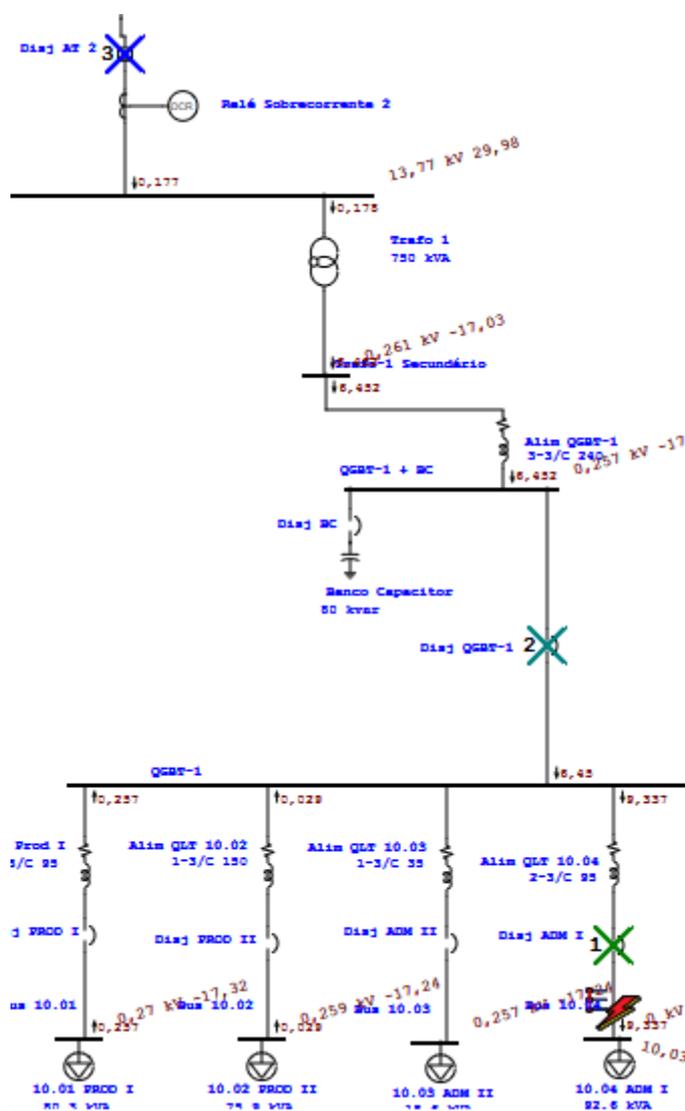


Figura 33 - Coordenação de dispositivos – Carga setor 2-5 (autoria própria).

Este tópico trata a análise da ocorrência de um curto-circuito trifásico para qualquer uma das cargas do setor 2 ao setor 5, podendo ser tanto em uma carga motórica quanto não motórica. Da mesma forma observada no tópico 6.1.5, a configuração de coordenação e seletividade para este caso está estabelecida primeiramente a atuação do disjuntor mais próximo a carga, ou seja, a imagem acima serve de exemplo para todas as cargas dos setores aqui mencionados.

Observando o coordenograma abaixo, o resultado está condizente com a premissa, visto que o primeiro dispositivo a atuar é o disjuntor do quadro ADM I, seguido pelo disjuntor do quadro geral e, por fim, pelo relé de sobrecorrente 2.

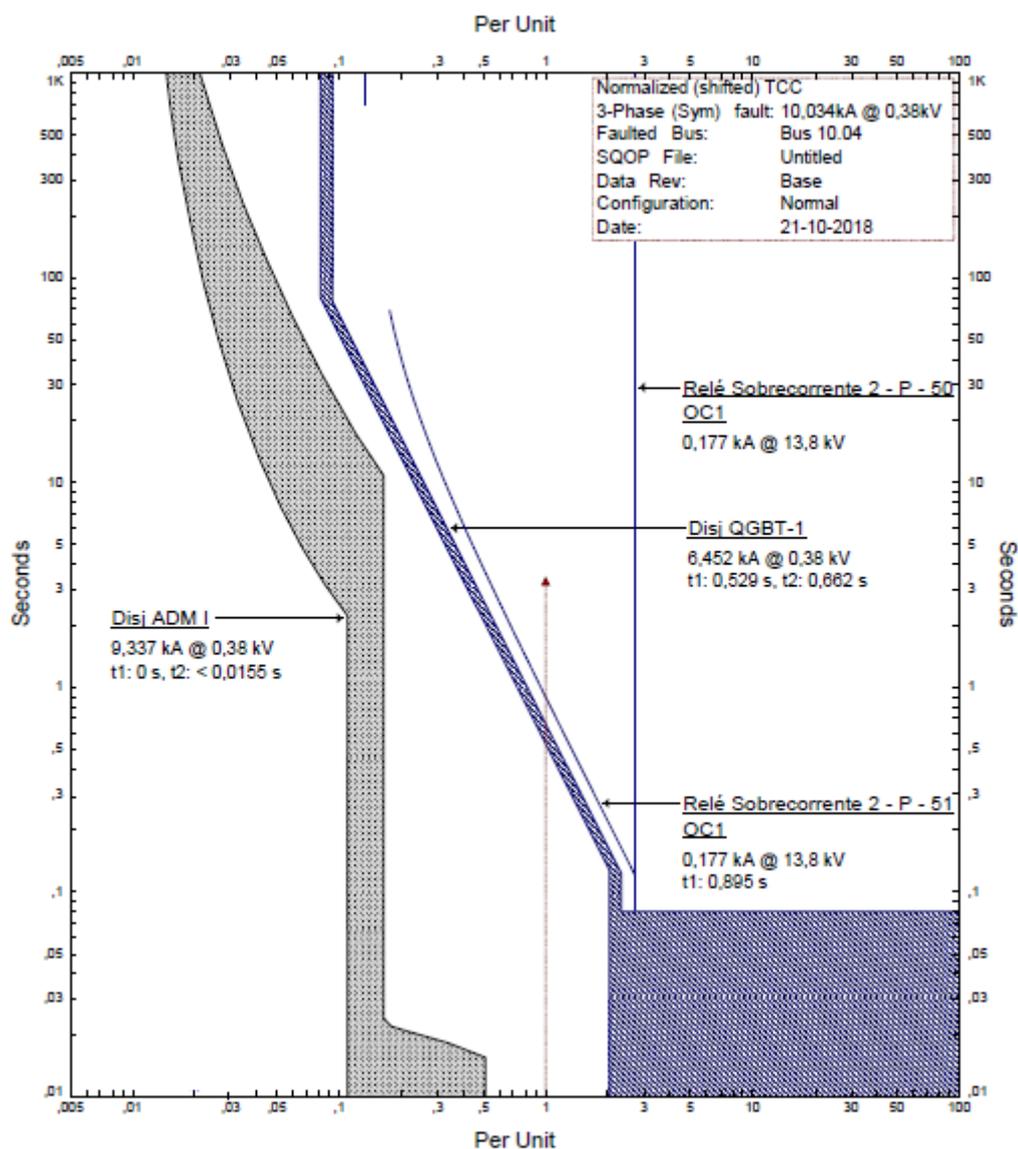


Figura 34 - Coordenograma – Carga setor 2-5 (autoria própria).

## 7 CONCLUSÃO

O trabalho TheoPrax apresentado propõe uma solução de engenharia no que diz respeito à coordenação e seletividade para as instalações da empresa GE Renewable Energy, trazendo juntamente uma abordagem para melhor compreensão do assunto através da aplicação através do uso de software de análise de circuitos.

O propósito do estudo realizado visa a proteção mais flexível do SEP da GE, visto que na ocorrência de um curto-circuito a premissa é ajustar os dispositivos de proteção para que somente a região próxima da falha esteja isolada da energia elétrica, mantendo o funcionamento de outros circuitos e assim garantindo a segurança tanto das cargas do sistema quanto, principalmente, dos funcionários e operadores que trabalham neste sistema.

Através da análise dos dados e informações fornecidos pelo cliente, foram levantados os parâmetros necessários para a realização de simulações de ocorrência de curtos-circuitos. Os resultados obtidos mostram que os dispositivos de proteção precisam seguir a parametrização definida para garantir a coordenação e seletividade do sistema elétrico atual da planta.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 14039. **Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.

ARAÚJO, B. M. C. **Estudo de Cálculo de Curto Circuito em Instalações Offshore utilizando a norma IEC-61363**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, p. 106. 2013.

COSTA, J. C. D. O. **Equipamentos Elétricos em Subestações. DEL GIUDICE ASSESSORIA TÉCNICA LTDA**. Brasília, p. 45. 2011.

FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. 9ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

FRONTIN, S. D. O. **Equipamentos de alta tensão - prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. Brasília: Goya Editoria LTDA, 2013.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 3ª. ed. Florianópolis: [s.n.], v. I, 2012.

MASCARENHAS, L. R. **Uma Metodologia para o Dimensionamento da Proteção Contra Sobrecorrente de Subestações Superiores a 300kVA**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO. Juazeiro, p. 2016. 2016.

LEÃO, R. **Subestações - Distribuição de Energia Elétrica**. USP. [S.I.], p. 59. 2018.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. [S.I.]: Grupo Gen-LTC, 2000.

MARDEGAN, C. **Proteção e seletividade em sistemas elétrico industriais**. Barueri: Engpower, 2013.

MASCARENHAS, L. R. **Uma metodologia para o dimensionamento da proteção contra sobrecorrente de subestações superiores a 300 kVA**. Juazeiro, 2016. 106.

MATTOS, F. M. D. **Estudo de Caso de Coordenação e Seletividade Contra Sobrecorrentes em um Sistema Elétrico Industrial**. Universidade São Paulo. São Carlos, p. 77. 2010.

MOTA, I. L. et al. **Impactos da Contribuição de Curto-Circuito da Máquina de Indução em Instalações Elétricas**. V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz de Iguaçu, 22-25 Abril 2014. 6.

RUSH, P. **Proteção e automação de redes: conceito e aplicação**. 1ª. ed. São Paulo: Blucher: Schneider Electric, 2011.

SANTOS, S. J. G. **Utilização do Protocolo IEC61850 para Implementação de Seletividade Lógica em um Sistema de 13,8 kV com Múltiplas Fontes e Topologia em Anel**. Universidade Federal do Pará. Belém, p. 82. 2015.

SOARES, A. H. M. **Metodologia Computacional para Coordenação Automática de Dispositivos de Proteção contra Sobrecorrente em Sistemas Elétricos Industriais**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 240. 2009.

SOUZA, T. D. C. D. **Estudo de Coordenação e Seletividade da Proteção de uma Planta Industrial**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 60. 2013.

WORTMANN, L. L. **Proteção de Sistemas Elétricos Industriais Contra Sobrecorrentes**. Porto Alegre, 2016. 109.

## ANEXO I – PARAMETRIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS

**Tabela 1. Dados gerais dos disjuntores com microprocessador Micrologic 2.0**

Protective Device Settings						
LVCB ID	Manufacturer	Breaker Model	Trip Device Model	Sensor/ Frame	Rating Plug	Function
Disj QGBT-1	Schneider Electric	S7H (1250A)	Micrologic 2.0 (TheoPrax)	1250	1250	Phase
Disj QDF 800A	Schneider Electric		Micrologic 2.0 (TheoPrax)	800	800	Phase
Disj QDF 1000A	Schneider Electric		Micrologic 2.0 (TheoPrax)	1000	1000	Phase
Disj QGBT-2	Schneider Electric		Micrologic 2.0 (TheoPrax)	1600	1600	Phase

**Tabela 2. Dados gerais dos disjuntores com microprocessador Micrologic 2.0 - Continuação**

Protective Device Settings					
Long Time				Inst. / Maintenance	
Pickup		Delay		Pickup	
Setting	Trip (Amps)	Curve	Band	Setting	Trip (Amps)
LT1	500		LTB1-7,2	INST 7	12500
LT7	800		LTB1-6	INST 5	3200
LT7	1000		LTB1-1,5	INST 5	4000
LT5	1280		LTB1-6	INST 4	4800

## ANEXO I – PARAMETRIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS

**Tabela 3. Dados gerais dos disjuntores das cargas**

Protective Device Settings							
LVCB ID	Manufacturer	Breaker		Thermal		Magnetic (Inst.)	
		Model	Size	Setting	Trip (Amps)	Setting	Trip (Amps)
Disj Trafo 2.1 250A (I)	Schneider Electric	NSX250 - F	250	70%	175,000	5X	1250,000
Disj Trafo 2.1 250A (II)	Schneider Electric	NSX250 - F	250	70%	175,000	5X	1250,000
Disj 100 BRIDGE CRANE	Schneider Electric	NSX160 - B	160	70%	112,000	Fixed	1280,000
Disj BRIDGE CRANE I	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	70,000	Fixed	800,000
Disj GANTRY CRANE	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	28,000	Fixed	480,000
Disj TS I	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	17,500	Fixed	300,000
Disj Trafo 2.1 NovoGalpão	Schneider Electric	NSX250 - B	250	70%	175,000	6,144X	1536,050
Disj PROD I	Schneider Electric	NSX160 - B	160	70%	112,000	Fixed	1280,000
Disj PROD II	Schneider Electric	NSX160 - B	160	70%	112,000	Fixed	1280,000
Disj ADM II	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	44,100	Fixed	504,000
Disj ADM I	Schneider Electric	NSX160 - B	160	70%	112,000	Fixed	1280,000
Disj COZ	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	28,000	Fixed	480,000
Disj PORT (I)	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	28,000	Fixed	480,000

Disj PORT (II)	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	17,500	Fixed	300,000
Disj MANUT	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	17,500	Fixed	300,000
Disj GRUA	Schneider Electric	NSX250 - B	250	70%	140,000	10X	2000,000
Disj PR1	Schneider Electric	NSX160 - B	160	70%	87,500	Fixed	1250,000
Disj PR2	Schneider Electric	NSX160 - B	160	70%	112,000	Fixed	1280,000
Disj PR3	Schneider Electric	NSX160 - B	160	70%	87,500	Fixed	1250,000
Disj QD	Schneider Electric	NSX250 - B	250	100%	250,000	10X	2500,000
Disj ETE	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	22,400	Fixed	400,000
Disj COMP	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	44,100	Fixed	504,000
Disj POÇO	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	22,400	Fixed	400,000
Disj ETAP	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	17,500	Fixed	300,000
Disj ELEV	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	17,500	Fixed	300,000
Disj VE (I)	Schneider Electric	NSX250 - B	250	70%	175,000	5X	1250,000
Disj AC	Schneider Electric	NSX250 - B	250	70%	140,000	5X	1000,000
Disj VE (II)	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	28,000	Fixed	480,000
Disj BC	Schneider Electric	NSX160 - B	160	70%	87,500	Fixed	1250,000

Disj jIB CRANE I	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	28,000	Fixed	480,000
Disj jIB CRANE II	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	28,000	Fixed	480,000
Disj ASSEMBLY MACH	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	28,000	Fixed	480,000
Disj IND HEATER	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	28,000	Fixed	480,000
Disj BRIDGE CRANE II	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	70,000	Fixed	800,000
Disj 5T jIB CRANE	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	28,000	Fixed	480,000
Disj BED PLATE	Schneider Electric	NSX100 - B	100	100%	25,000	Fixed	300,000
Disj 40T BRIDGE CRANE	Schneider Electric	NSX100 - B	100	100%	100,000	Fixed	800,000
Disj TS II	Schneider Electric	NSX100 - B	100	70%	17,500	Fixed	300,000

## ANEXO I – PARAMETRIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS

**Tabela 4. Parametrização dos relés de sobrecorrente**

Protective Device Settings						
Relay ID	Manufacturer	Model	PT / CT Ratio	Device Function	Trip Element	Level /Stage
Relé Sobrecorrente 1	ABB	PR-512	120:5	Overcurrent	Phase	OC1
Relé Sobrecorrente 1	ABB	PR-512	120:5	Overcurrent	Ground	OC1
Relé Sobrecorrente 2	ABB	PR-512	120:5	Overcurrent	Phase	OC1
Relé Sobrecorrente 2	ABB	PR-512	120:5	Overcurrent	Ground	OC1

**Tabela 5. Parametrização dos relés de sobrecorrente - Continuação**

Protective Device Settings						
Curve	OCR (51, 51V), OLR (49, Acc.)			OCR (50), OLR (50, Jam)		
	Pickup	Prim. Amps	Time Delay	Pickup	Prim. Amps	Time Delay
Extremely Inverse	0,200	24,000	0,700	20,000	480,00	0,1 s
Extremely Inverse	0,100	12,000	0,200	14,000	168,00	0,1 s
Extremely Inverse	0,200	24,000	0,600	20,000	480,00	0,05 s
Extremely Inverse	0,100	12,000	0,100	20,000	240,00	0,05 s

### ANEXO I – MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO GE

One-Line Diagram - OLV1 (Edit Mode)

