

ESTUDO DE PROTEÇÃO DE MÉDIA TENSÃO PARA SUBESTAÇÃO MODULAR INDUSTRIAL

Bruno do Nascimento
Centro de Engenharias
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Mossoró, RN
brunonascimento777@gmail.com

Humberto Dionísio de Andrade
Centro de Engenharias
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Mossoró, RN
humbertodionisio@ufersa.edu.br

Resumo — Todo novo projeto de ampliação de uma rede elétrica necessita de uma avaliação da atual e futura infraestrutura elétrica e de seus sistemas de proteção. Um dos principais requisitos de um sistema de proteção elétrica industrial são os estudos de proteção e seletividade, devido ao fato desses ambientes envolverem corrente e tensões consideradas elevadas que em caso de falha da proteção pode ocasionar enormes danos a instalação. Através desses estudos é possível parametrizar equipamentos capazes de detectar e minimizar os efeitos causados pelas falhas elétricas oriundas de fatores como: erro humano, equipamentos defeituosos e envelhecimentos das instalações. Os dados obtidos por meio dos estudos de proteção e seletividade são implementados aos relés em processo denominado parametrização, e levam em conta os níveis de curto circuito, capacidade amperimétrica dos cabos e curvas de suportabilidade dos equipamentos envolvidos fornecendo uma proteção ao sistema através do relé de proteção. Por meio deste estudo foi possível coordenar a proteção geral de uma subestação modular industrial com uma derivação em média tensão, assim fornecendo parâmetros necessários para configurar um relé de proteção ABB modelo REF 610 para proteção de uma subestação abrigada de 300 kVA com extensão de rede nua.

Palavras-chave — *Proteção, Seletividade, Subestação modular, Relés, Industrial.*

I. INTRODUÇÃO

As instalações elétricas industriais se diferenciam das demais devido a sua complexidade e número de recursos inseridos na planta, dentre esses recursos encontram-se as subestações de energia elétrica. As subestações desenvolvem tarefas importantes nestes sistemas sendo elas responsáveis por conter os equipamentos como relés, barramentos e disjuntores que se destacam por exercer funções como seletividade e proteção dos equipamentos contra sobrecarga e curtos circuitos. Tais equipamentos devem ser dimensionados e configurados de acordo com a necessidade do processo em que o mesmo está inserido, para isto se faz necessário a elaboração de estudos e projetos por um responsável técnico.

O estudo de proteção e seletividade tem importância primordial na expansão de redes elétricas contribuindo com ajustes das proteções e coordenação dos seus diversos elementos, pois por eles é possível apresentar os ajustes recomendados para implantação dos dispositivos de proteção, subsidiar dados para cálculos de energia incidente através dos valores de tempo de atuação da proteção definidos nos ajustes

recomendados, dimensionamento e especificar equipamentos que compõem o sistema elétrico [1].

Diante do fato que as indústrias passam por constantes mudanças em seu layout para que seja possível atender o aumento crescente de sua demanda por energia elétrica, é importante reavaliar as condições de operação dos componentes do sistema de proteção para saber se estes podem atender os requisitos necessários para o correto funcionamento.

O presente trabalho tem o objetivo de analisar uma parte de um sistema elétrico industrial (6,6 kV) com a finalidade de fornecer parâmetros para a configuração de um cubículo com relé de proteção em conjunto com elo fusível protegerá uma subestação abrigada com extensão de rede. De acordo com o que foi exposto, o objetivo geral deste trabalho é a elaboração de um estudo de proteção para entrada de uma subestação de 300 kVA, com extensão de rede e transformador a seco 6,6/0,440 kV alimentada por outra subestação industrial com cubículo modular de média tensão.

Portanto este artigo visa apresentar uma análise do estudo de proteção e seletividade para uma futura ampliação do sistema elétrico de uma planta industrial com a finalidade de instalação de subestação para alimentação de bombas para drenagem de água.

II. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

No Rio Grande do Norte o período chuvoso se estabelece de novembro a maio do ano seguinte, neste período ocorrem problemas no setor de mineração, pois a água das chuvas e o fenômeno de rebaixamento do lençol freático dificulta a extração de matéria prima por máquinas de grande porte ocasionando vários problemas como [2]:

- Atolamento de equipamentos de escavação e transporte;
- Atraso na produção;
- Aumento do custo de transporte devido à umidade do terreno;
- Impedimento de acessos em razão de possíveis inundações;
- Menor vida útil de pneus de caminhões fora de estrada;

Com o processo de rebaixamento do lençol freático é característico que as empresas instalem bombas e tubulações para retirada da grande quantidade de líquido do interior das minas. Este processo de instalação de bombas requisitam toda uma infraestrutura devido a localização das minas serem distantes dos pontos da instalação elétrica. Com isto se faz necessário no local das bombas a instalação de redes de distribuição com subestação para levar uma tensão maior ao local e rebaixá-la para o nível de utilização.

III. COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE

A utilização dos melhores equipamentos ou dispositivos de proteção não é garantia de uma proteção adequada nas subestações industriais. O adequado funcionamento do sistema de proteção apenas é seguro caso exista a coordenação entre os dispositivos de proteção, em poucas palavras, os dispositivos precisam operar no momento correto e seccionar somente o circuito que se encontra com defeito, onde ocorreu a falha. O conceito de coordenação pode ser compreendido como a proteção irá agir durante um sinistro, considerando um sistema radial da carga para a fonte há uma escala crescente de tempos de operação dos dispositivos de proteção para que se permita uma seletividade no desligamento do sistema corretamente [3].

A seletividade é um dos atributos basilares de um sistema de proteção onde os dispositivos de proteção necessita atuar para desenergizar o circuito quando houver detecção de correntes atípicas no sistema. A Seletividade de um sistema de proteção pode ser realizada por meio de três diferentes configurações [1].

Seletividade amperimétrica: fundamenta-se no princípio de que as correntes de curto-circuito acendem à proporção que o ponto de defeito se aproxima da fonte. Comumente aplicado aos conjuntos de baixa tensão, nas quais as correntes de curto circuito nos condutores são significativas a curtas distâncias da fonte.

Seletividade cronológica: é baseada na forma de que a temporização proposital do equipamento de proteção próximo ao ponto de falha seja inferior à temporização intencional do dispositivo de proteção a montante. Este método é comumente aplicado em instalações industriais.

Seletividade lógica: A seletividade lógica consiste em um sistema lógico que combina um esquema de proteção de sobrecorrente com um esquema de comunicação utilizando fio piloto ou outro meio equivalente de forma a obter uma proteção com intervalos de tempo extremamente reduzidos, porém seletivos.

Neste estudo em particular irá se empregar a seletividade cronológica, na qual são coordenadas as parametrizações dos relés.

IV. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

A principal função exercida por um sistema de proteção é assegurar o seccionamento de todo um sistema elétrico ou parte dele que venha apresentar um defeito. E por

consequência disto o mesmo deve fornecer as informações aos administradores do sistema sobre a causa do sinistro para facilitar a identificação do problema [4].

Para garantir a segurança dos equipamentos de uma planta industrial vários dispositivos de proteção são utilizados. Eles têm por função proteger os equipamentos elétricos contra sinistros como curto-circuito, sobrecorrente, sobre e sub-tensões que possam ocasionar danos a instalação.

Os dispositivos citados adiante apresentam característica físicas e propriedades que os diferenciam, assim será dada uma breve descrição de cada um deles e seu princípio de funcionamento.

A. Transformador de corrente

ABNT NBR 6856 é a norma que especifica as características dos transformadores de corrente (TC's) para serviços de medição e proteção até 52 kV. Segundo a norma o TC é um transformador destinado a transmitir um sinal de informação para instrumentos de medição e dispositivos de controle ou proteção, em que sua corrente secundária é proporcional a corrente primária, divergindo dela em fase de um ângulo de aproximadamente zero para configurações apropriadas. A norma traz consigo a padronização dos métodos de cálculos para dimensionamento dos TC's que devem constar nas memórias descritivas, assim como suas relações de transformação [5].

Os transformadores de corrente remetem sinais de corrente para os aparelhos de medição e proteção com uma fração da corrente nominal. Na sua construção possuem um primário com poucas espiras e um secundário no qual sua corrente nominal é de 1 ou 5 A.

O seu princípio de funcionamento consiste na corrente que circula nos enrolamentos primários criarem um fluxo magnético alternado que induzem uma força eletromotriz no enrolamento secundário. Portanto os TC's cuja relação de transformação nominal (RTC) é 20, caso circule uma corrente de 200 A no seu primário obterá no seu secundário uma corrente de 10 A, ou seja: $200/20 = 10$ A [1].

Existem diversos tipos construtivos de transformadores de corrente para diferentes aplicações, porém com o mesmo princípio de funcionamento, por exemplo, TC tipo barra, tipo enrolado, janela, tipo bucha, núcleo dividido, vários enrolamentos primários, vários núcleos secundários, vários enrolamentos secundários, etc. A Figura 1 mostra um exemplo do circuito de um TC tipo enrolado.

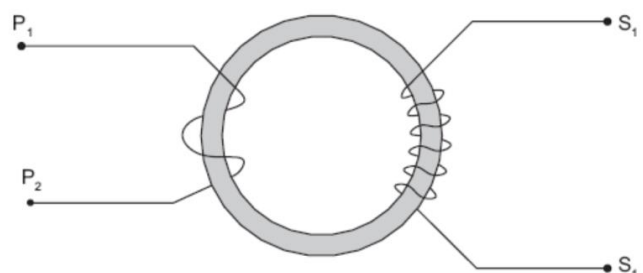


Fig. 1 - Transformador de Corrente tipo enrolado [1]

B. Transformador de potencial

Transformadores de potencial (TP) são dispositivos que permitem os instrumentos de medição adquirirem sinal de tensão sem que seja necessário possuir a tensão de isolamento correspondente a rede a qual estão interligados. ABNT NBR 1020 é a norma que especifica as características dos transformadores de potencial (TP) para serviços de medição e proteção até 36,2 kV [6].

Na sua forma construtiva os transformadores de potencial têm em seu enrolamento primário com muitas espiras e no seu secundário poucas espiras onde é adquirida a tensão adequada para os equipamentos de proteção e medição, normalmente as tensões padrões nos secundários são de 115 ou $115/\sqrt{3}$ V. Desta maneira os equipamentos interligados aos TP's podem ser construídos de forma compacta não necessitando de elevado isolamento dos seus elementos. Os TP's podem ser desmembrado em grupos, se diferenciando pela tensão de isolamento em seu primário podendo eles serem fechados em seu primário entre fase-fase (grupo 1) e fase-terra (grupo 2), outra característica extraordinária está em sua relação de transformação RTP que é apurada de maneira análoga aos dos TC's. A Figura 2 mostra um exemplo do circuito de um TP do grupo 1.

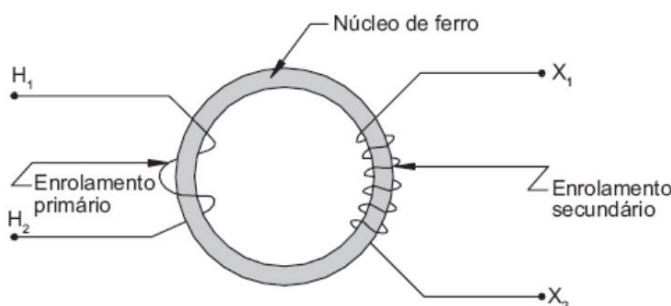


Fig. 2 - Esquema de ligação TP do grupo 1 [1]

C. Elo fusível

O elo fusível é o dispositivo de proteção contra sobrecorrente e curto circuito utilizado nas redes de distribuição primárias, eles são considerados aparelhos de ação muito lenta. Sua aplicação é mais utilizada nas proteções de transformadores. Seu funcionamento é caracterizado pela fusão de uma parte especialmente dimensionada que secciona o circuito e interrompe a corrente quando esta supera um valor especificado.

O elo fusível é rotulado segundo a sua taxa de velocidade (SR – speed ratio), também conhecida com relação de rapidez. Para tanto, por convenção, o SR é dado pela razão entre a corrente mínima de fusão do elo, em 0,1 segundos, e a corrente mínima de fusão em 300 segundos. Os elos fusíveis são designados como tipos H, K ou T de acordo com sua característica tempo x corrente de pré-arco [7].

A seguir são dadas informações adicionais sobre esses elos segundo a norma de distribuição de energia elétrica da Companhia Energética de Minas Gerais [8]:

Tipo K – elos fusíveis rápidos com SR variando entre 6 e 8. Possuem capacidade de sobrecarga de 50% do seu valor

nominal e, em geral, são aplicados na proteção de transformadores e ramais laterais de alimentadores.

Tipo T – elos fusíveis lentos com SR variando entre 10 e 13. Assim como o tipo K, os elos fusíveis tipo T também suportam uma sobrecarga de 50% e são igualmente aplicados na proteção de transformadores e ramais.

Tipo H – elos fusíveis especiais que suportam uma elevada sobrecorrente e, ainda assim, asseguram uma alta temporização de operação

A Figura 3 apresenta o comportamento da curva genérica das características de operação tempo x corrente em que o gráfico demonstra os tempos mínimos e máximo de fusão do elo, assim como o tempo total para extinção do arco.

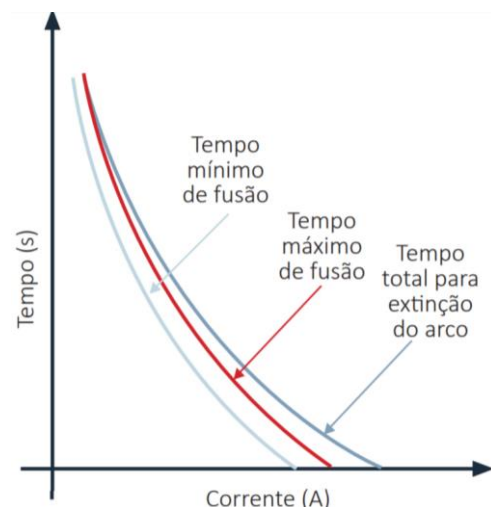


Fig. 3 - Curvas características de fusão do elo fusível [7]

D. Disjuntor de média tensão

Os disjuntores de média tensão são equipamentos eletromecânicos destinados a seccionar ou restabelecer correntes elétricas em um determinado circuito. Eles são construídos para proteger equipamentos de uma determinada parte da instalação contra sobrecargas e curtos-circuitos, com isso sua principal função torna-se interromper correntes de defeitos durante o menor espaço de tempo possível em condições adversas de operação.

O modo de funcionamento do disjuntor depende de suas características construtivas, porém todos seguem um princípio básico de qualquer interruptor de corrente, primeiro se faz necessário um mecanismo que separe seus respectivos contatos permitindo o seu fechamento. Durante os períodos de separação dos contatos há o surgimento de arco elétrico nas suas extremidades, que necessariamente precisam ser eliminados para que não ocorra danos ao sistema. O princípio de extinção do arco elétrico é o que caracteriza o disjuntor, para a extinção é necessário que se provoque o alongamento do arco por meios artificiais, reduza-se a temperatura e se substitua-se o meio ionizante entre os contatos por um isolante mais eficiente como ar, óleo, gás ou vácuo [4]. A Figura 4 abaixo demonstra o disjuntor de MT extraível a vácuo ZN63A-7.2 1250A/31.5kA utilizado no estudo.



Fig. 4 - Disjuntor de média tensão extraível a vácuo [9]

E. Relés de sobrecorrente (50/51)

Atualmente os relés digitais dominam o mercado devido as suas funções, com o advento da automação essas funcionalidades se tornaram uma grande aliada das indústrias. Estes relés são equipados com microcontroladores dedicados para processarem os sinais vindos dos transformadores de medida. Essas grandezas de sinais de corrente e tensão analógicas passam por conversores analógicos/digitais (A/D) e internamente passam por um processamento que realizam operações lógicas e aritméticas [1]. Em geral, os relés de sobrecorrente digitais são equipados com as funções ANSI 50/51 e ANSI 50/51N, função instantânea e temporizada de fase e de neutro, respectivamente.

Os ajustes nestes relés podem ser efetuados por meio de botões na sua parte frontal ou através de microcomputadores conectados por cabos de comunicação serial específico de cada fabricante. Os relés constituem o cérebro do sistema de proteção, de acordo com as configurações inseridas no equipamento eles enviam comandos para suas saídas digitais ou analógicas enviando informações para outros dispositivos como disjuntores de média tensão para abrir ou fechar seus contatos. A Figura 5 abaixo apresenta o relé de proteção geral do barramento da subestação modular.



Fig. 5 - Relé digital SIEMENS SIPROTEC 7SJ622 [10]

A Figura 6 apresenta o relé que será utilizado para proteção da derivação de MT utilizada para alimentar a nova subestação de 300 kVA.



Fig. 6 - Relé digital ABB REF 610 [11]

Estes relés obedecem a equações características para cada associação de normas técnicas IEC, IEEE, etc, com curvas normais inversa, muito inversa, extremamente inversa entre outras que comanda o seu comportamento de atuação em um gráfico de escala logarítmica de tempo versus corrente.

Curva de tempo instantâneo 51: Esta curva se baseia na proteção contra curto circuito captados pelos instrumentos de medição em que quando uma alta corrente i_{Limiar} é atingida levando um tempo de T_{min} para fechar seus contatos do disjuntor de proteção. A Figura 7 apresenta a curva de atuação instantânea e de tempo definido.

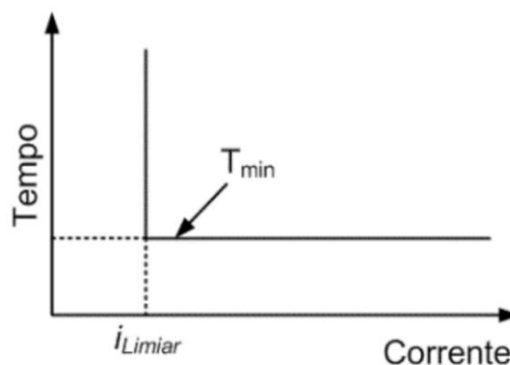


Fig. 7 - Operação de relé instantâneo [7]

Curva temporizada 50: Esta curva se baseia na proteção contra sobrecorrente ou sobrecargas captadas pelos instrumentos de medição em que quando uma determinada corrente i_{Limiar} pode ser suportada por um tempo variável de acordo com sua magnitude para fechar seus contatos do disjuntor de proteção. A Figura 8 apresenta a curva temporizada.

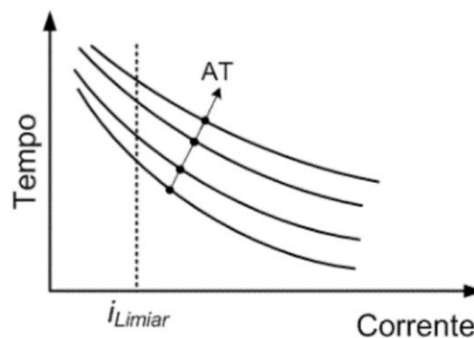


Fig. 8 - Relé temporizado [7]

Essas duas curvas trabalham em conjunto dando ao relé uma proteção contra sobrecarga 50/50N e curto circuito 51/51N muito comum na proteção de sistemas elétricos. Essas proteções são os requisitos mínimos da norma de instalações elétricas de média tensão, para instalações elétricas acima de 300 kVA de demanda, onde a mesma estabelece que todo circuito deve ser protegido por disjuntor de média tensão capaz de seccionar a circulação de corrente através de uma câmara de extinção de arco, com disjuntor acionado a partir de relé de proteção secundário. Para demandas menores ou iguais a 300 kVA a norma estabelece que no mínimo se deve possuir uma chave seccionadora com fusível em conjunto com disjuntor geral na baixa tensão [12].

F. Sistema modular

Os painéis elétricos englobam um conjunto de equipamentos propostos a proteção, comando, medição e controle acompanhados a acessórios instalados no interior do seu cubículo.

Os sistemas modulares são invólucros destinados a evitar contato direto a média tensão, com construção padronizada. Nas colunas são instalados equipamentos que exercer uma única função. A Figura 9 apresenta um modelo de painel de média tensão modular.

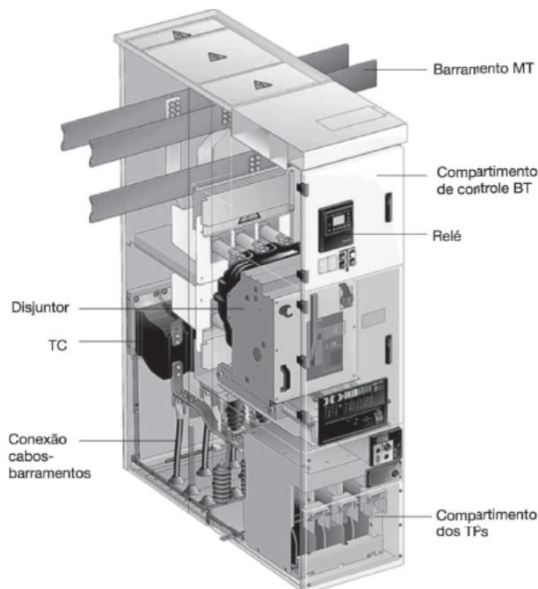


Fig. 9 - Parte interna de um painel de MT [4]

Os painéis de media tensão podem ser classificados segundo as seguintes funções [4].

Painel de comando: Utilizados para comportar equipamentos como disjuntores, contadores, chaves seccionadoras, chaves inversoras etc. para comando de manobra de baixa e média tensão

Painel de controle: Esses painéis são caracterizados por permitir dispositivos e circuitos propostos a executarem comandos de equipamentos de sinais enviados por outros sistemas.

Painel de medição: Como o nome já diz este painel é destinado conter equipamentos que realizam a medição de grandezas elétricas como consumo, demanda, corrente etc.

Painel para banco de capacitores: Estes tipos de painéis são construídos para controlar o fator de potência da instalação em questão, minimizando o consumo de energia reativa indutiva. Nele são instaladas células capacitivas, chaves de comando e controladores de fator de potência.

V. ESTUDO DE CASO

Durante a operação de uma planta industrial ocorrem diversas mudanças, como expansão das instalações elétricas que devem ser projetadas com as proteções adequadas. Com todo o exposto este trabalho que possui caráter de estudo de caso, analisado uma subestação modular industrial para

realização de estudo de proteção para alimentação de uma nova subestação. Adiante será demonstrado os dados das derivações em MT dos cubículos modulares que irá alimentar a nova instalação. Seguindo a análise, será apresentada uma avaliação de carregamento do alimentador. Por fim, será apresentado o estudo de proteção e seletividade com os componentes da subestação.

A. Diagrama unifilar simplificado

Devido à complexidade de uma grande instalação elétrica industrial, no presente artigo será apresentado um diagrama unifilar simplificado contendo as principais partes que irão contribuir para análise. A planta em questão é alimentada através de linhas de transmissão de média tensão de 69 kV, em que a mesma se utiliza de um transformador a óleo com ventilação forçada 69/6,6 kV, 20/25 MVA.

A partir do circuito equivalente de Thévenin no ponto de entrega da linha de transmissão LT-01 é possível calcular o nível de curto circuito em cada barra do sistema. Para cálculo utilizou-se no ponto de conexão da concessionária as correntes de curto-circuito simétrica monofásica 0,765 kA com relação X/R de 6,247 e para o defeito trifásico 2,64 kA com relação X/R de 2,810. O transformador da 69/6,6 kV alimenta diversas cargas como grandes motores de média e transformadores 6,6/0,440 kV. A Figura 10 demonstra o unifilar simplificado do objeto do nosso estudo.

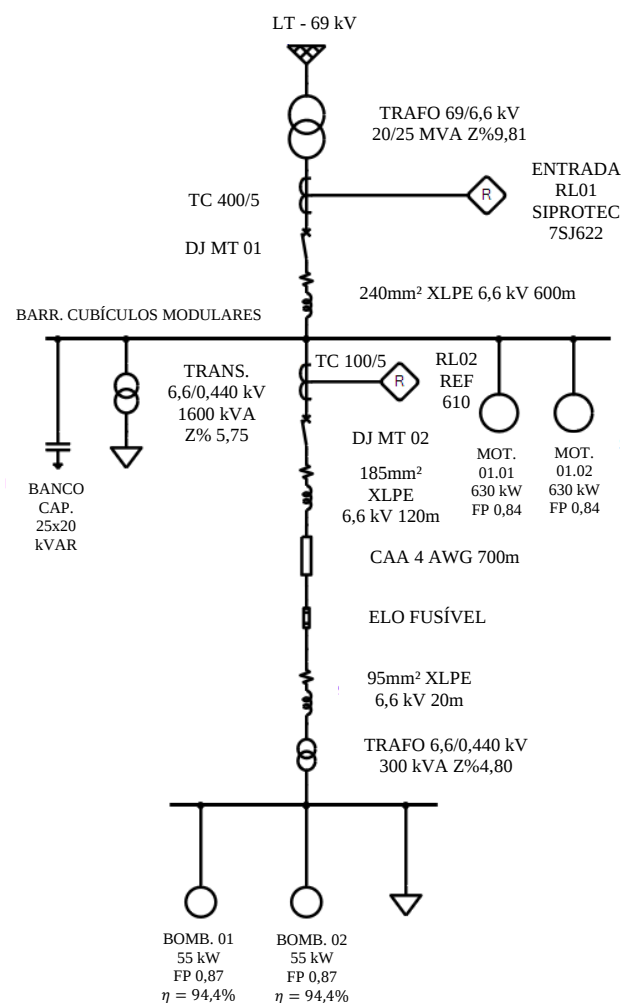


Fig. 10 - Diagrama unifilar simplificado

B. Ajuste da proteção geral RL01 SIPROTEC 7SJ622

Para elaboração do estudo de proteção é necessário verificar se o relé de proteção RL01 suporta a entrada de uma nova carga na barra do cubículo modular alimentado por ele sem atingir a corrente de partida de sobrecarga. Outra condição necessária é a verificação do critério de magnetização para que o transformador de 300 kVA não possa através da sua corrente de inrush tocar na curva de tempo instantâneo da derivação. Dessa maneira, deve-se verificar dois requisitos básicos das funções 50/51 sobrecarga e sobrecorrente respectivamente.

Para verificar o critério de sobrecarga foi elaborada a Tabela I, em que é possível através da potência ativa, reativa e módulo da potência aparente calcular a corrente total necessária para alimentação do barramento com todos os equipamentos ligados em sua potência nominal considerando-se um fator de potência de médio 0,8 ind. para cargas desconhecidas.

TABELA I – DADOS DOS EQUIPAMENTOS DE MÉDIA TENSÃO 6,6 kV

Equipamento	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)	Potência Aparente (kVA)	Corrente (A)
Banco de Capacitores 25x20 kVAr	0	-j500	500	43,74
Transformador 6,6/0,440 kV 1600 kVA	1280	j960	1600	139,96
Motor 01.01	630	j406,94	750	65,61
Motor 01.02	630	j406,94	750	65,61
Transformador 6,6/0,440 kV 300 kVA	240	j180	300	26,24
Total	2780	j1453,88	3137,22	274,43

Assim, o barramento de entrada dos cubículos modulares terá uma corrente nominal 274,43 A. Para analisar coordenação do RL01 de entrada é necessário obter os dados dos parâmetros de configuração do relé de proteção geral. Esses dados estão expostos logo a seguir no coordenograma da Figura 11, elaborados a partir do uso de *software* comercial específico. O mesmo possui as proteções fase 50/51 habilitadas e de neutro (desequilíbrio) desabilitadas.

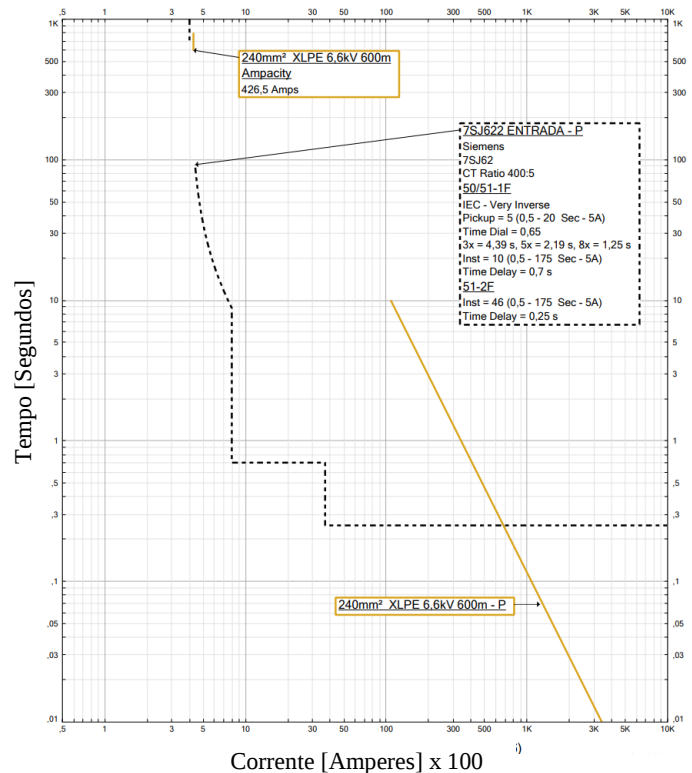


Fig. 11 - Coordenograma da proteção geral de fase

Os ajustes resumidos do relé que protege o alimentador do qual a subestação modular recebe energia da subestação principal são mostrados na Tabela II. O relé utilizado é do fabricante SIEMENS, modelo SIPROTEC 7SJ622.

TABELA II – AJUSTES DO RELÉ SIEMENS SIPROTEC 7SJ622

RL01 SIEMENS 7SJ622 (RTC 400-5)	
FASE	
Unid. 50	Tap: 5,0A, Curva 0,65 (MI) IEC
Unid. 51-1	Tap: 10 A, Tempo 0,7 s
Unid. 51-2	Tap: 46 A, Tempo 0,25 s
NEUTRO (DESABILITADO)	

Analisando o coordenograma é possível verificar que a corrente de partida de sobrecarga I_p no primário do TC pode ser calculada multiplicando-se o RTC 400:5 (80) e o valor de Pickup do relé 5 A, $I_p = 5 \cdot 80 = 400A$. Diante do coordenograma é possível ver que o cabo de 240 mm^2 suporta uma corrente de até 426,5 A.

VI. DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO

Com as informações levantadas sobre a infraestrutura do sistema é possível dimensionar os componentes que farão parte do sistema de proteção. Começando pelo dimensionamento do elo fusível para a proteção do transformador de 300 kVA, logo em seguida analisando as características necessárias para a aplicação dos TC's com o relé de derivação de média tensão. Finalizando o estudo com os ajustes dos relés de sobrecorrente.

A. Proteção com chave fusível

As chaves fusíveis são os elementos utilizados na proteção de redes de distribuição urbanas e rurais, por apresentar preços reduzidos e desempenho satisfatório para o nível de proteção que se deseja.

Como citado anteriormente, a indústria é atendida pela concessionária em média tensão $V_L = 69 \text{ kV}$. O transformador da subestação principal rebaixa a tensão para $V_L = 6,6 \text{ kV}$ para alimentar outras subestações. A subestação abrigada de 300 kV do escopo do estudo irá ser protegida por um elo fusível adequado ao seu transformador.

A proteção de transformadores de distribuição normalmente protegidos no lado primário por elos fusíveis instalados no cartucho das respectivas chaves fusíveis pode ser determinada facilmente, através dos valores das correntes nominais dos elos fusíveis aplicados na proteção de transformadores. A Tabela III fornece o elo fusível correto para aplicação da proteção [1].

TABELA III – ELOS FUSÍVEIS DOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO [1]

Potência (kVA)	Tensão nominal (kV)	Elo Fusível
300	13,8	15K
300	6,6	30K

Devido ao fato de o elo fusível 30K possuir uma curva de atuação muito próxima a curva de suportabilidade térmica do transformador optou-se uma coordenação em que o relé da derivação deve proteger todo o alimentador como uma proteção primária, em caso de falha do disjuntor de MT, o elo fusível atuará em retaguarda para proteção do transformador de 300 kVA .

B. Níveis de curto-circuito

Para realizar o ajuste do relé ABB REF 610 é necessário realizar os cálculos dos níveis de correntes de curto-circuito na subestação modular, esses cálculos dependem de diversos fatores como seção nominal e comprimento dos cabos de MT, nível de curto circuito da concessionária de energia e por fim as potências dos motores que alimentam as faltas durante os sinistros. Com informações citadas anteriormente inseridas em *software* foi possível calcular o nível de curto circuito no barramento da subestação modular, esses dados são apresentados na Tabela IV.

TABELA IV – NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO NA SUBESTAÇÃO MODULAR

Tipo de Curto-circuito	Corrente (A)
$I_{CC3\phi}$	10500
$I_{CC2\phi}$	9012
$I_{CC1\phi}$	382

C. Transformador de corrente

Para determinação dos transformadores de corrente serão utilizados os dados de curtos-circuitos calculados no barramento subestação modular descritos na seção anterior.

Considerando-se a corrente de partida ajustada nas proteções será adotado um TC 100:5 de classe de exatidão para 50 VA 10P30 que significa TC de baixa impedância com carga secundária de 50 VA , atendendo a uma classe de exatidão de 10%, para uma corrente de até 30 vezes a corrente nominal. Além disso, será adotado um cabo de $4,0 \text{ mm}^2$ de impedância de $5,5518 \Omega/\text{km}$ responsável por conectar os TC's e TP's ao relé de proteção enviando sinal de tensão e corrente. O percurso dos condutores tem um comprimento total considerado de 2 metros.

Para determinação do consumo do relé foi consultado o manual do relé ABB REF 610 que informa que o consumo total dos sensores de corrente é de $3,0 \text{ VA}$.

A corrente nominal esperada para a subestação de 300 kVA é de

$$I_n = \frac{S_{tr}}{\sqrt{3} \cdot V_L} = \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 6,6} = 26,24 \text{ A}$$

Segundo [13] a corrente nominal do TC deve satisfazer os seguintes critérios. A corrente máxima que o TC deve possuir para que o mesmo seja sensibilizado com a menor corrente do sistema.

$$ITC_{p \text{ máx}} \leq \frac{I_{min}}{0,1} = \frac{I_n}{0,1} = \frac{26,24}{0,1} = 262,43 \text{ A}$$

A corrente máxima para dimensionamento do primário do TC deve ser de $262,43 \text{ A}$.

A especificação mínima para que o TC não sature para corrente máxima de curto circuito do sistema.

$$V_{SAT_{calculada}} \leq V_{SAT_{nominal}}$$

Em primeiro instante, serão determinadas todas as impedâncias dos equipamentos conectados ao relé de proteção para cálculo da saturação do TC durante um curto circuito, conforme abaixo:

- Impedância do TC

$$R_{Burden} = \frac{FP \cdot S_{tc}}{(ITC_s)^2} = \frac{0,9 \cdot 50}{5^2} = 1,80 \Omega$$

$$X_{Burden} = \frac{Sen(Cos^{-1}(FP)) \cdot S_{tc}}{(ITC_s)^2} = \frac{0,43 \cdot 50}{5^2} = 0,8718 \Omega$$

$$Z_{Burden} = \sqrt{R_{Burden}^2 + X_{Burden}^2}$$

$$Z_{Burden} = \sqrt{1,8^2 + 0,8718^2} = 2,0 \Omega$$

- Resistência dos sensores

$$R_{relé} = \frac{S_{carga}}{(ITC_s)^2} = \frac{3,0 VA}{(5)^2} = 0,12 \Omega$$

- Resistência do cabo

$$R_{fiação} = 2 \times R_{condutor} \times Distância$$

$$R_{fiação} = 2 \cdot \frac{5,518}{1000} \cdot 2 = 0,0221 \Omega$$

- Resistência da carga

$$R_{carga} = Z_{sensores} + R_{fiação} = 0,12 + 0,0221 = 0,1421 \Omega$$

- Impedância total

$$Z_{Total} = \sqrt{(R_{carga} + 0,2R_{Burden})^2 + (0,2X_{Burden})^2}$$

$$= \sqrt{(0,1421 + 0,2 \cdot 1,8)^2 + (0,2 \cdot 0,8718)^2} = 0,5315 \Omega$$

De posse das impedâncias conectadas no transformador de corrente será determinado a tensão de saturação levando-se em conta, também, a maior contribuição de curto fornecida pelo barramento da subestação modular analisada. Considerando que a carga nos TC's de proteção (relés, cabos, etc.) é bem menor que sua carga nominal, partiremos da análise de um TC com relação 100/5A e classe de exatidão 10P30. Utiliza-se a corrente máxima de curto circuito trifásico calculado equivalente a 10500 A para o cálculo de saturação do TC.

$$V_{SAT_{calculada}} = \frac{I_{cc_{máx}}}{RTC} \times Z_{carga}$$

$$V_{SAT_{calculada}} = \frac{10500}{20} \cdot 0,5315$$

$$V_{SAT_{calculada}} = 279,03 V$$

$$V_{SAT_{nominal}} = I_s \cdot M \cdot Z_{burden}$$

$$V_{SAT_{nominal}} = 5 \cdot 30 \cdot 2 = 300 V$$

$$V_{SAT_{calculada}} = 279,03 V \leq V_{SAT_{nominal}} = 300 V$$

Dessa forma o TC selecionado não irá saturar para a pior condição de falta no sistema, portanto o TC utilizado 50VA 10P30 100:5A é adequado para a instalação.

D. Ajuste da unidade temporizada de fase 51F

O limite de corrente mínima de atuação da unidade temporizada de fase (I_{tf}) do relé deve ser superior a corrente máxima da carga multiplicada por um fator de crescimento da carga. Para o limite de corrente máxima deverá ser menor que a corrente de curto circuito bifásico dentro da zona de proteção do relé [14]. Desta maneira teremos a seguinte relação.

$$\frac{kI_{carga\ máxima}}{RTC} \leq I_{tf} \leq \frac{I_{CC2\phi(fim\ do\ trecho)}}{RTC}$$

Devido a instalação do estudo em questão ser uma futura ampliação foi atribuído um valor de sobrecarga típico de 1,10 com base em um crescimento anual de 2,00% ao ano em cinco anos.

$$k = \left(1 + \frac{a}{100}\right)^n = \left(1 + \frac{2,00}{100}\right)^5 \cong 1,10$$

Assim teremos a seguinte relação

$$\frac{1,10(26,24)}{20} \leq I_{tf} \leq \frac{2837}{20}$$

$$1,4487 \leq I_{tf} \leq 141$$

O valor escolhido para o relé foi $I_{tf} = 1,50 A$. Foi utilizada a curva IEC Muito Inversa para coordenar com a curva do elo fusível. A faixa de atuação do relé é de $(1,5-25)A \times RTC$.

A corrente primaria de acionamento equivale:

$$I_{atf} = I_{tf} \cdot RTC = 1,50 \cdot 20 = 30 A$$

A seleção do tipo de curva de temporização deve ser função do projeto de coordenação que se esteja implementando. A coordenação entre o relé do disjuntor e o elo fusível deve ocorrer quando, para qualquer defeito no trecho do alimentador protegido pelo elo fusível instalado no ponto, este atue antes do disjuntor. Considerando uma diferença de tempo de 0,2 s entre a atuação do elo fusível e do relé. Para nossa aplicação foi decidido inicialmente que o disjuntor atuante antes do elo fusível, neste caso para uma diferença de no mínimo 0,2 segundos para garantir seletividade [1].

Para ajuste da curva IEC Muito inversa será ajustado o valor $T_{ms} = 0,06$ para coordenar com o elo fusível. Logo abaixo é mostrado a equação da curva

$$T = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right) - 1} \cdot T_{ms}$$

I_{ma} – sobrecorrente máxima admitida;

I_{ac} – corrente de acionamento;

T_{ms} – multiplicador de tempo

E. Ajuste da unidade instantânea de fase 50-1F

A unidade instantânea de fase (I_{if}) do relé deverá ser maior que a corrente de magnetização do transformador do sistema para que não atuar durante a energização e menor que a corrente de curto circuito curto-circuito bifásica no barramento da subestação [14].

$$\frac{I_{mtr}}{RTC} \leq I_{if-1} \leq \frac{I_{CC2\phi \text{Assimétrico}}(\text{barra da SE})}{RTC}$$

A magnetização do transformador é dada por

$$I_{mtr} = 8 \cdot I_{ntr} = 8 \cdot (26,24) = 209,92 \text{ A}$$

A corrente de curto circuito bifásico assimétrica é dada pela multiplicação da corrente de curto simétrica e fator de assimetria. O fator foi determinado baseado na relação X/R no barramento da subestação. A relação X/R é a constante de tempo do circuito, que é função dos parâmetros X e R do circuito, que, por sua vez, dependem do local de falta e das componentes de sequência positiva, negativa e zero das impedâncias envolvidas no curto-circuito [14].

Para $X/R = 3,3$ tem-se um fator de assimetria igual a 1,32.

$$I_{CC2\phi \text{Assimétrico}}(\text{barra da SE}) = f_a I_{CC2\phi}(\text{barra da SE})$$

$$I_{CC2\phi \text{Assimétrico}}(\text{barra da SE}) = 1,32 \cdot 9012$$

$$I_{CC2\phi \text{Assimétrico}}(\text{barra da SE}) = 11895,84 \text{ A}$$

$$\frac{209,92}{20} \leq I_{if-1} \leq \frac{11895,8400}{20}$$

$$10,4973 \leq I_{if-1} \leq 594,7920$$

O valor escolhido foi para o relé $I_{if} = 12 \text{ A}$. A faixa de atuação do relé é de $(2,5-175)A \times RTC$.

A corrente primária de acionamento equivale:

$$I_{aif} = I_{if-1} \cdot RTC = 12 \cdot 20 = 240 \text{ A}$$

Para coordenar com o fusível, optou pelo menor tempo definido disponível do dispositivo de 0,04 s. A Figura 12 demonstra as curvas de “tempo x corrente” para os componentes do sistema de proteção da subestação modular. Onde teremos da fonte para a carga os componentes de proteção, relé SIEMENS SIPROTEC 7SJ622 na proteção geral das derivações de MT, relé ABB REF 610 para proteção do ramal estudado e o elo fusível de 30K para proteção de retaguarda do REF 610.

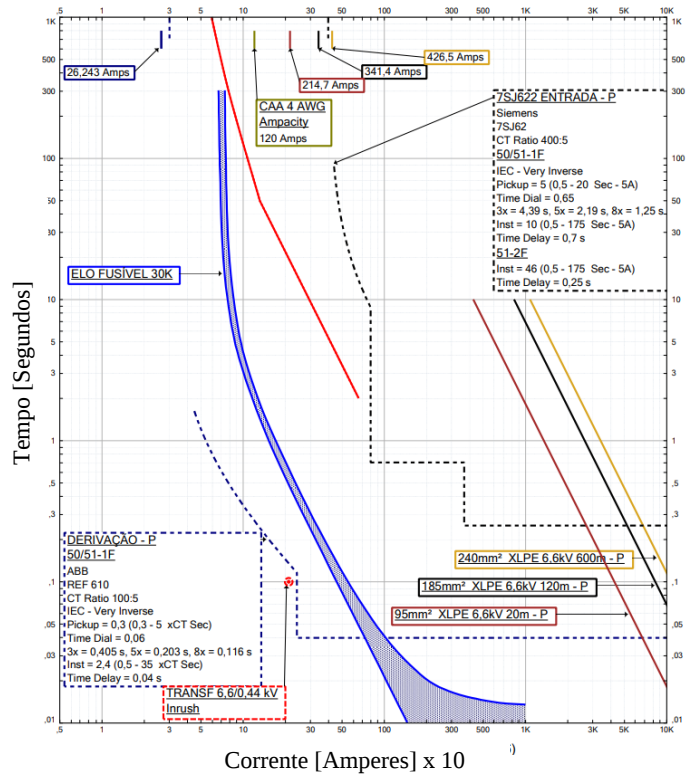


Fig. 12 - Coordenograma da proteção de fase da derivação

Na Figura 12 é possível visualizar que as curvas do elo fusível estão acima da curva de fase dos relés de proteção da derivação de média tensão. Nela são representados os todos os pontos mais importantes do estudo. A curva em vermelho designada por curva de suportabilidade térmica define o limite térmico do transformador, como ela se encontra acima da curva do relé o transformador se encontra protegido. Para sobrecargas e correntes de curto-circuito entre 30 A até um valor aproximadamente 300 A no trecho protegido pelo relé, este atuará como proteção principal. Para correntes de falta acima de 300 A no trecho protegido pelo elo de 30K, não se garante a seletividade entre os elos fusíveis de 30K e relé, no entanto, o relé da REF 610 atuará sempre antes do relé de entrada principal, atingindo assim o objetivo de coordenação para o sistema. O alimentador será protegido pelo relé REF 610, este irá atuar sempre como proteção principal, enquanto que o elo fusível será proteção de retaguarda para o transformador.

F. Ajuste da unidade temporizada de neutro 51N

Quando o sistema possuir cargas ligadas entre fase e terra ou neutro, o relé de neutro deverá ter a sua corrente mínima de atuação da unidade temporizada de neutro (I_{tn}) ajustada para um valor menor que a corrente de curto-circuito fase-terra mínimo dentro da sua zona de proteção. E deverá ser maior do que 10% a 30% da corrente de carga do circuito referente aos desequilíbrios admissíveis do sistema [14].

$$\frac{k_n I_{carga \text{ máxima}}}{RTC} \leq I_{tn} \leq \frac{I_{CC1\phi}(\text{mínimo})}{RTC}$$

$$(0,1 \leq k_n \leq 0,3)$$

Admitindo 15% de desequilíbrio, tem-se:

$$\frac{0,15 \cdot 26,24}{20} \leq I_{tn} \leq \frac{382}{20}$$

$$0,1968 \leq I_{tn} \leq 19,1000$$

O valor escolhido foi para o relé $I_{tn} = 0,25 \text{ A}$. A faixa de atuação do relé é de $(0,05-5)A \times RTC$.

A corrente primaria de acionamento equivale:

$$I_{afn} = I_{afn} \cdot RTC = 0,25 \cdot 20 = 5,0 \text{ A}$$

A coordenação entre o relé do disjuntor e o elo fusível deve ocorrer quando, para qualquer desequilíbrio ou defeito fase terra no trecho do alimentador protegido pelo elo fusível instalado no ponto, este atue antes do disjuntor. Considerando uma diferença de tempo de 0,3 s entre a atuação do elo fusível e do relé. Para nossa aplicação foi decidido inicialmente que o disjuntor atuante antes do elo fusível, com neste caso para uma diferença de no mínimo 0,3 segundos para garantir seletividade [1].

Para ajuste da proteção temporizada foi utilizada a curva IEC Muito Inversa com um ajuste de $T_{ms} = 1$ para coordenar com o elo fusível.

G. Ajuste da unidade instantânea de neutro 50-1N

Quando o sistema possuir cargas ligadas entre fase e terra ou neutro, a unidade instantânea do relé de neutro não deverá ser sensível às correntes de energização dessas cargas. A corrente mínima de atuação da unidade instantânea de neutro (I_{in}) deve ser maior que três a oito vezes a corrente de desequilíbrio do sistema e menor que a corrente de curto-circuito fase-terra no barramento da subestação [14].

$$\frac{(3 \text{ a } 8)I_{Deseq.}}{RTC} \leq I_{in-1} \leq \frac{I_{CC1\phi(\text{Barra da SE})}}{RTC}$$

$$I_{Deseq.} = (0,1 \text{ a } 0,2)I_{Carga \text{ máxima}} = 0,15(26,24) = 3,94 \text{ A}$$

$$I_{Deseq.} = 0,15(26,24) = 3,94 \text{ A}$$

$$\frac{5(3,94)}{20} \leq I_{in-1} \leq \frac{382}{20}$$

$$0,9841 \leq I_{in-1} \leq 19,10 \text{ A}$$

O valor escolhido foi $I_{in-1} = 1,00 \text{ A}$. A faixa de atuação do relé é de $(0,25-20)A \times RTC$.

A corrente primaria de acionamento equivale:

$$I_{ain} = I_{in-1} \cdot RTC = 1 \cdot 20 = 20 \text{ A}$$

Para coordenar com o fusível optou pelo menor tempo definido disponível do dispositivo de 0,04 s.

A Figura 13 apresenta as curvas “tempo x corrente” dos relés de neutro da derivação de média tensão ABB REF 610 e a curva do elo fusível. A curva de neutro do relé da SIEMENS SIPROTEC 7SJ622 não é mostrada devido a essa opção se encontrar inibida, pois devido a indústria ter diversos motores monofásicos ligando e desligando constantemente isso levaria a atuação intempestiva do disjuntor do alimentador paralisando a unidade. Neste estudo optou-se por ativar as curvas de 50/51N devido ao fato de haver uma parta de alimentação da subestação de 300 kVA em rede nua com cabo de alumínio nu com alma de aço, assim com o risco maior haver defeitos fase terra as curvas foram configuradas com alta sensibilidade.

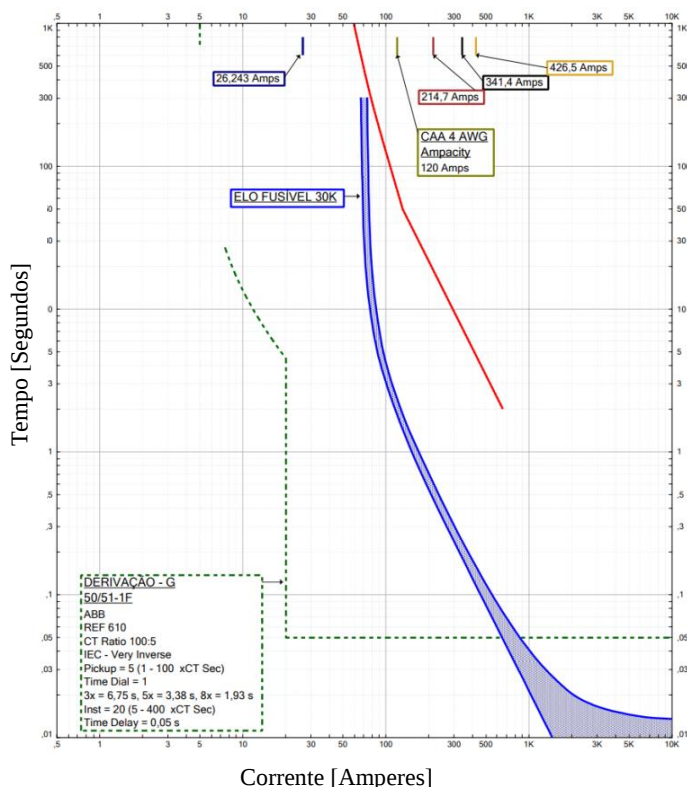


Fig. 13 - Coordenograma da proteção de neutro da derivação

Com a Figura 13 é possível observar que foi possível atingir coordenação e seletividade entre o elo fusível escolhido e a proteção de neutro do relé da derivação de média tensão. Dessa maneira o transformador está protegido contra desequilíbrio de fases, pois a sua curva de suportabilidade térmica se encontra acima da curva do relé e do elo fusível.

É possível resumir os ajustes de proteção contra sobrecorrente e curto circuito obtidos dos relés de proteção MT na Tabela V abaixo.

TABELA V – RESUMO DOS AJUSTES DOS RELÉS

GERAL E DERIVAÇÃO RESPECTIVAMENTE	
RELÉ SIEMENS SIPROTEC 7SJ622 (RTC 400-5)	
FASE	
Unid. 51	Tap: 5,0 A, Curva 0,65 (MI) IEC
Unid. 50	Tap: 10 A, Tempo 0,7 segundos
NEUTRO	
Unid. 51N	DESABILITADO
Unid. 50N	DESABILITADO
RELÉ ABB REF 610 (RTC 100-5)	
FASE	
Unid. 51	Tap: 1,5 A, Curva 0,06 (MI) IEC
Unid. 50	Tap: 12 A, Tempo 0,04 segundos
NEUTRO	
Unid. 51N	Tap: 0,25 A, Curva 1,00 (MI) IEC
Unid. 50N	Tap: 5 A, Tempo 0,05 segundos

VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho possibilitou a realização de um estudo de proteção em média tensão de uma subestação industrial utilizando o *software* comercial específico para simulações de curtos circuitos e elaboração de coordenogramas de curvas “tempo x corrente”. Com isso, pôde-se perceber a importância do sistema de proteção para o correto funcionamento do sistema elétrico industrial, que necessita de proteções configuradas adequadamente para oferecer com segurança confiabilidade e disponibilidade para operação da planta.

Para se atingir uma compreensão da possibilidade da ampliação da instalação da subestação de 300 kVA, definiram-se dois objetivos específicos. O primeiro, verificar e identificar a infraestrutura do alimentador seria adequada para o aumento de carga, que demandou a busca por diagramas unifilares em conjunto com a especificação dos equipamentos da subestação modular. Percebeu-se que a mesma possuía infraestrutura adequada para receber uma ampliação devido a robustez do cabo alimentador.

Após a confirmação da suportabilidade da infraestrutura a nova carga, recorreu-se à observação in loco das especificações dos relés de média tensão disponíveis para à aplicação no estudo de proteção. Os relés atendiam aos objetivos: funções básicas de sobrecarga e curto circuito 50/51 de fase e neutro com faixas de atuação dentro dos intervalos correspondentes disponíveis para parametrização.

Neste estudo observou-se um uso alternativo para coordenação entre o relé de MT e o elo fusível. Devido o elo fusível aceitar uma sobrecarga elevada próximo a curva térmica do transformador, foi definido a coordenação diferente da utilizada nas redes de distribuição estando o elo de 30K como retaguarda do disjuntor de MT para proteção do transformador. Isso permitiu um maior controle da sobrecarga aceitável para o transformador através da função temporizada de fase garantindo uma maior sensibilidade.

Com a análise dos dados, tem-se, de maneira geral, a visão que foram alcançados os objetivos estabelecidos inicialmente. Esta análise permitiu o dimensionamento dos equipamentos de proteção, obtendo-se resultado satisfatório. Onde foi possível realizar a coordenação entre a proteção geral, da derivação de média tensão e do elo fusível de 30K.

Com a familiaridade com a instalação elétrica, uma proposta para trabalhos futuros seria a criação de um diagrama unifilar completo da indústria para verificação de coordenação e seletividade entre os equipamentos ou estudo de energia incidente para dimensionamento de EPIs com categoria de proteção ATPV adequado aos níveis de curto circuito dos barramentos conforme previsto na NR 10.

REFERÊNCIAS

- [1] FILHO, João M. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Rio de Janeiro: Grupo GEN, p.01, 2020.
- [2] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. A gestão dos recursos hídricos e a mineração. p. 97-99 .2006.
- [3] SANTOS RAÚL, I. D. Proteção em instalações elétricas industriais: Relés e suas aplicações em subestações. 2012. 87f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.
- [4] FILHO, João M. Manual de Equipamentos Elétricos. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6856: Transformador de corrente com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kV - Especificação e ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, p. 7 ,2021.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 1020: Transformadores de Potencial de Tensão Máxima De 15 kV, 24,2 kV e 36,2 kV — Características Elétricas e Construtivas. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- [7] RODRIGO, FRAZÃO. F. Proteção do sistema elétrico de potência. Londrina: Educacional S.A, p.106-107, 2019.
- [8] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Norma de distribuição: proteção de sobrecorrentes do sistema de distribuição de média tensão da Cemig. Belo Horizonte, 2017.
- [9] CHINATCS. Manual: ZN63A(VS1)-12 Indoor M.V Vacuum Circuit Breaker, China.
- [10] SIEMENS. Manual: Multi-Functional Protective Relay with Local Control 7SJ62/64, Europa, 2012. 724 p.
- [11] ABB. Manual: Relé de Proteção REF 610 Manual de Instalação, Europa, 2013. 48 p.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR14039: Instalações elétricas de média tensão, de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro: ABNT, p28-30 ,2021.
- [13] MARDEGAN, Cláudio. Transformadores de corrente, potencial e bobinas de Rogowski para fins de proteção – Parte I. O Setor Elétrico, 2010. Disponível em<https://www.osetoreletrico.com.br/wpcontent/uploads/2010/04/E_d49_fevereiro_protecao_seletividade_capII.pdf>. Acesso em: 08 de maio. de 2022.
- [14] ALMEIDA, Marcos A. Dias. Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos. Natal, fevereiro de 2000