



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica

GUILHERME FERNANDES RIBEIRO

**ESTUDO DA SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO DE UMA
SUBESTAÇÃO DE 13,8KV/380V**

Uberlândia
2019

GUILHERME FERNANDES RIBEIRO

**ESTUDO DA SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO DE UMA
SUBESTAÇÃO DE 13,8KV/380V**

Trabalho apresentado como requisito parcial de
avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de
Curso do Curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia

Uberlândia
2019

Dedico este trabalho à minha família e
colegas de curso por toda ajuda,
estímulo e compreensão

RESUMO

Este trabalho apresenta a especificação básica dos componentes elétricos de uma subestação, como disjuntores, para-raios, transformadores de corrente e transformadores de potencial. Porém, seu foco principal está no estudo da seletividade entre as proteções de sobrecorrente presentes nos lados de baixa e alta tensão, apresentando os parâmetros e considerações necessárias para se efetuar um estudo adequado da seletividade da proteção presente na subestação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico considerado nos cálculos.....	14
Figura 4.2 – Esquema unifilar da subestação com arranjo primário seletivo.....	15
Figura 5.1 – Curva dos ajustes de Retardo Longo, Retardo Curto e Instantâneo do relé PR332/P.....	23
Figura 5.2 – Curva do ajuste de falta à terra do relé PR332/P.....	23
Figura 5.3 – Curva Extremamente Inversa padrão IEC do ajuste de Retardo Longo do relé PR332/P.....	24
Figura 6.1 – Curva do disjuntor ABB Tmax T8 2000 com relé PR332/P.....	32
Figura 6.2 – Família de curvas IEC Extremamente Inversa.....	33
Figura 6.3 – Curva das funções 50 e 51 do relé SEL 751.....	36
Figura 6.4 – Coordenograma do sistema.....	37
Figura 6.5 – Coordenograma do sistema com os pontos ANSI e Corrente de Inrush do transformador.....	38
Figura 6.6 – Coordenograma do sistema levando em consideração o ponto para a partida do motor.....	39
Figura 6.7 – Curva do disjuntor ABB Tmax T8 2000 com relé PR332/P.....	42
Figura 6.8 – Curva dos ajustes 51 e 50 do relé SEL.....	44
Figura 6.9 – Coordenograma do sistema para a opção 2 de ajustes do disjuntor ABB.....	45
Figura 6.10 – Coordenograma do sistema para a opção 2 de ajustes do disjuntor ABB com pontos Inrush, ANSI e partida do motor.....	45
Figura 6.11 – Curva do ajuste de falta à terra para o disjuntor ABB na baixa tensão.....	46
Figura 6.12 – Curva dos ajustes 51N/50N do relé SEL.....	48
Figura 6.13 – Curva dos ajustes 51N/50N do relé SEL com os pontos ANSI de neutro e <i>Inrush</i> de neutro.....	49
Figura 6.14 – Esquema unifilar da subestação com arranjo primário seletivo.....	50
Figura 6.15 – Coordenograma Fusível NH 250 A e disjuntor ABB – Opção 1.....	51
Figura 6.16 – Coordenograma Fusível NH 250 A e disjuntor ABB – Opção 2.....	51
Figura 6.17 – Coordenograma Fusível NH 250 A e disjuntor ABB – Opção 1.....	53

Figura 6.18 – Coordenograma Fusível NH 250 A e disjuntor ABB – Opção 2.....	53
Figura 6.19 – Coordenograma final do sistema - Opção 1.....	55
Figura 6.20 – Coordenograma final do sistema - Opção 2.....	56
Figura 7.1 – Curva de Retardo Longo do disjuntor WEG ACW1600H-AG1 1600-3.....	64
Figura 7.2 – Curva de Retardo Curto do disjuntor WEG ACW1600H-AG1 1600-3.....	65
Figura 7.3 – Curvas ajuste Instantâneo e de Falta à terra do disjuntor WEG ACW1600H-AG1 1600-3	66
Figura 7.4 – Curva do disjuntor WEG ACW1600H-AG1 1600-3.....	68
Figura 7.5 – Curva das Funções 50 e 51 do relé SEL.....	71
Figura 7.6 – Coordenograma do sistema para o disjuntor WEG no lado de BT.....	72
Figura 7.7 – Ajuste de falta à terra do disjuntor WEG.....	73
Figura 7.8 – Curva de Retardo Longo (Função L) do disparador ETU45B.....	76
Figura 7.9 – Curva de Retardo Curto (Função S) do disparador ETU45B.....	77
Figura 7.10 – Curva Instantânea (Função I) do disparador ETU45B.....	78
Figura 7.11 – Curva de falta à terra (Função G) do disparador ETU45B.....	79
Figura 7.12 – Curva dos ajuste L/S/I escolhidos para o disjuntor Siemens e disparador ETU45B.....	81
Figura 7.13 – Curva das Funções 50 e 51 do relé SEL.....	84
Figura 7.14 – Coordenograma do sistema para o disjuntor Siemens 3WL no lado de BT.....	85
Figura 7.15 – Ajuste de falta à terra do disjuntor Siemens 3WL.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Valores das impedâncias do sistema para os diferentes valores de potência de curto-circuito analisados.....	19
Tabela 5.2 – Valores das correntes de curto-circuito simétricas e assimétricas para os diferentes valores de potência de curto-circuito analisados.....	19
Tabela 5.3 – Dados e características do disjuntor CGMCOSMOS-V.....	21
Tabela 5.4 – Parâmetros e faixas de ajustes do relé PR332/P.....	22
Tabela 5.5 – Relação de transformação dos TC's para os diferentes valores de potência de curto-circuito analisados.....	26
Tabela 5.6 – Especificação sumária do TC escolhido.....	28
Tabela 5.7 – Especificação sumária do TP escolhido.....	29
Tabela 6.1 – Equações das curvas do Relé SEL 751 (Retirada do manual do produto)	33
Tabela 6.2 – Resultados para o novo ajuste da função temporizada 51 do relé SEL.....	55
Tabela 6.3 – Parâmetros e ajustes do disjuntor ABB Tmax T8 2000 – Opção 1.....	58
Tabela 6.4 – Valores dos ajustes realizados para o disjuntor ABB Tmax T8 2000 – Opção 1...59	
Tabela 6.5 – Parâmetros e ajustes do disjuntor ABB Tmax T8 2000 – Opção 2.....	60
Tabela 6.6 – Valores dos ajustes realizados para o disjuntor ABB Tmax T8 2000 – Opção 2...60	
Tabela 6.7 – Parâmetros e ajustes para a função de falta à terra do disjuntor ABB Tmax T8 2000.....	61
Tabela 6.8 – Valores dos ajustes para a função de falta à terra do disjuntor ABB Tmax T8 2000.....	61
Tabela 7.1 – Parâmetros e faixas de ajustes do disjuntor WEG ACW1600H-AG1 1600-3.....	63
Tabela 7.2 – Parâmetros e faixas de ajustes do disparador Siemens ETU45B.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BT – Baixa tensão

AT – Alta tensão

TC – Transformador de corrente

TP – Transformador de potencial

DT – Dial de tempo

EI – Extremamente Inversa

NTD – Norma técnica de distribuição

CEB – Companhia Energética de Brasília

ANSI – American National Standards Institute

CBT – Cubículo de baixa tensão

SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Justificativas.....	12
3. Objetivos.....	13
4. Apresentação da subestação a ser especificada.....	14
5. Especificação dos componentes elétricos da subestação.....	16
6. Estudo da seletividade da proteção da subestação.....	31
7. Estudo da seletividade da proteção para outros modelos de disjuntor no lado BT.....	62
8. Conclusões	87
9. Referências.....	88

1. Introdução

Pode-se definir uma subestação como um conjunto de equipamentos de transformação, medição, proteção, controle e manobras, concentrados em um determinado local, posicionada normalmente nas extremidades das linhas de transmissão e distribuição.

As subestações são fundamentais para o funcionamento dos sistemas elétricos de potência, pois é o elemento que interliga as etapas de geração, transmissão, distribuição e os consumidores.

Uma coordenação eficiente e seletiva dos elementos de proteção de uma subestação com outros elementos do sistema busca garantir a continuidade e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, de modo que, na ocorrência de uma falha, os elementos de proteção atuem o mais rápido possível, evitando maiores danos aos componentes do sistema, e também de modo que, a proteção não seja ativada indevidamente, comprometendo a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

2. Justificativas

Uma subestação busca garantir a continuidade e a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica para os consumidores, desta forma, a especificação e ajuste correto dos elementos elétricos que irão transformar, seccionar, proteger e comandar a subestação é de extrema importância.

Portanto, busca-se parametrizar os elementos de proteção de maneira correta, de forma a proteger os outros elementos e cargas da subestação, além de evitar a interrupção indevida do fornecimento de energia elétrica.

3. Objetivos

Especificar os componentes básicos de uma subestação, sendo estes, para-raios, disjuntores, chaves seccionadoras, transformadores de corrente (TCs), transformadores de potencial (TP), relé micro processado na alta tensão e com os dados e parâmetros destes, realizar o ajuste da proteção de Sobrecorrente tanto do lado de alta tensão quanto do lado de baixa tensão, de forma que estes estejam obedecendo os critérios de seletividade exigidos.

4. Apresentação da subestação a ser especificada

A subestação a ser especificada possui um transformador de 1 MVA, 13,8 kV / 380 V e impedância percentual de 7%. Esta subestação é uma Estação Transformadora (ET) com arranjo de primário seletivo e é destinada ao fornecimento de energia elétrica a consumidores residenciais.

Como os valores de potência de curto-circuito e relação X/R na entrada não foram fornecidos pela concessionária responsável, considerou inicialmente nos cálculos realizados os valores de 50 MVA e relação de curto-circuito de curta duração de 2,55.

Para a proteção na média tensão, considerou-se um disjuntor comandado pelo relé SEL 751(SEL, 2019), tal como mostrado no diagrama unifilar da Figura 4.1.

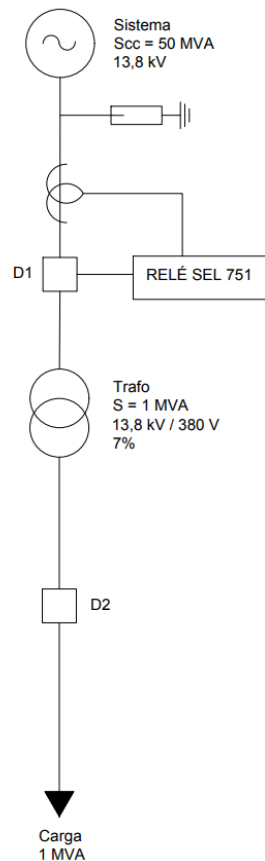


Figura 4.1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico considerado nos cálculos.

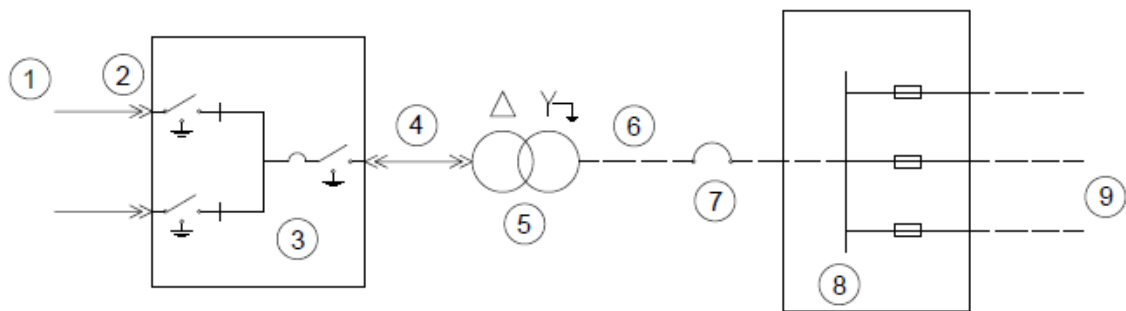


Figura 4.2 – Esquema unifilar da subestação com arranjo primário seletivo

5. Especificação dos componentes elétricos da subestação

Para a especificação dos equipamentos elétricos da subestação, é necessário conhecimento dos valores nominais de corrente e valores das correntes de curto-circuito. Sabendo que a subestação possui apenas um transformador de 1 MVA e 7% de impedância percentual, realiza-se os cálculos necessários.

5.1 - Cálculo das correntes nominais e correntes de curto-circuito

- Corrente nominal no lado de média tensão (I_{NPT}):

$$I_{NPT} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot V_{NPT}}$$

$$I_{NPT} = \frac{1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 13,8 \cdot 10^3}$$

$$I_{NPT} = 41,84 A$$

Onde: S_T é a potência nominal do transformador e V_{NPT} é a tensão nominal do primário do transformador.

- Corrente nominal no lado de baixa tensão (I_{NST}):

$$I_{NST} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot V_{NST}}$$

$$I_{NST} = \frac{1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 380}$$

$$I_{NST} = 1519,34 A$$

Onde: V_{NST} é a tensão nominal do secundário do transformador.

- Reatância de entrada do sistema referida ao lado de média tensão (X'_e):

$$X'_e = \frac{(V_{NPT})^2}{S_{cc}}$$

$$X'_e = \frac{(13,8 \cdot 10^3)^2}{50 \cdot 10^6}$$

$$X'_e = 3,8088 \Omega$$

Onde: S_{cc} é a potência de curto-circuito na entrada do sistema.

- Reatância do transformador referida ao lado de média tensão (X_T):

$$X_T = \frac{Z_T \%}{100} \cdot \frac{(V_{NPT})^2}{S_T}$$

$$X_T = \frac{7}{100} \cdot \frac{(13,8 \cdot 10^3)^2}{1 \cdot 10^6}$$

$$X_T = 13,3308 \Omega$$

Vale ressaltar que os valores ôhmicos das impedâncias do sistema e do transformador foram considerados como sendo apenas os das respectivas reatâncias, ou seja, $Z'_e = X'_e = 3,8088 \Omega$ e $Z_T = X_T = 13,3308 \Omega$, respectivamente.

- Corrente de curto-circuito no lado de média tensão (I_{CCMT}):

$$I_{CCMT} = \frac{V_{NPT}/\sqrt{3}}{Z'_e}$$

$$I_{CCMT} = \frac{13,8 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 3,8088}$$

$$I_{CCMT} = I''_{kMT} = 2091,85 A$$

$$I_{SMT} = 2,55 \cdot I''_{kMT} = 5334,22 A$$

Onde: I''_{kMT} é a corrente de curto-circuito simétrica e I_{SMT} é a corrente de curto-circuito assimétrica (valor de pico) para o lado de média tensão.

- Reatância de entrada do sistema referida ao lado de baixa tensão (X_e''):

$$X_e'' = \frac{(V_{NST})^2}{S_{cc}}$$

$$X_e'' = \frac{(380)^2}{50 \cdot 10^6}$$

$$X_e'' = 0,002888 \Omega$$

- Reatância do transformador referida ao lado de baixa tensão (X'_T):

$$X'_T = \frac{Z_T\%}{100} \cdot \frac{(V_{NST})^2}{S_T}$$

$$X'_T = \frac{7}{100} \cdot \frac{(380)^2}{1 \cdot 10^6}$$

$$X'_T = 0,010108 \Omega$$

Vale ressaltar que os valores ôhmicos das impedâncias equivalentes do sistema e do transformador, referidos ao lado de baixa tensão, foram considerados como sendo apenas os das respectivas reatâncias, ou seja, $Z_e'' = X_e'' = 0,002888 \Omega$ e $Z'_T = X'_T = 0,010108 \Omega$, respectivamente.

- Corrente de curto-circuito no lado de baixa tensão (I_{CCBT}):

$$I_{CCBT} = \frac{V_{NST}/\sqrt{3}}{Z_e'' + Z'_T}$$

$$I_{CCBT} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot (0,002888 + 0,010108)}$$

$$I_{CCBT} = 16881,59 A$$

$$I_{CCBT} = I''_{kBT} = 16881,59 A$$

$$I_{SBT} = 2,55 \cdot I''_{kBT} = 43048,05 A$$

Onde: I''_{kBT} é a corrente de curto-circuito simétrica e I_{SBT} é a corrente de curto-circuito assimétrica (valor de pico), para o lado de baixa tensão.

Como o valor de 50 MVA para a potência de curto-circuito na entrada da subestação é apenas um valor estimado, os cálculos das correntes de curto-circuito nos lados de média e baixa tensão foram refeitos também para os valores de 80 e 100 MVA, obtendo os resultados apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2.

Potência de curto-circuito na entrada (MVA)	Impedância de entrada referida ao lado de MT X'_e (Ω)	Impedância de entrada referida ao lado de BT X''_e (Ω)	Impedância do transformador referida ao lado de MT X_T (Ω)	Impedância do transformador referida ao lado de BT X'_T (Ω)
50	3,80880	0,002888	13,33080	0,010108
80	2,38050	0,001805	13,33080	0,010108
100	1,90440	0,001444	13,33080	0,010108

Tabela 5.1 – Valores das impedâncias do sistema para os diferentes valores de potência de curto-circuito analisados

Potência de curto-circuito na entrada (MVA)	Corrente de curto-circuito eficaz no lado de MT I_{CCMT} (A)	Corrente de curto-circuito assimétrica (valor de pico) para o lado de MT I_{SMT} (A)	Corrente de curto-circuito eficaz no lado de BT I_{CCBT} (A)	Corrente de curto-circuito assimétrica (valor de pico) para o lado de BT I_{SBT} (A)
50	2.091,85	5.334,21	16.881,59	43.048,05
80	3.346,96	8.534,74	18.416,28	46.961,51
100	4.183,70	10.668,43	18.991,79	48.429,05

Tabela 5.2 – Valores das correntes de curto-circuito simétricas e assimétricas para os diferentes valores de potência de curto-circuito analisados

5.2- Especificação dos disjuntores

Nesta seção, são especificados os disjuntores a serem empregados nos lados de média e baixa tensão, segundo os critérios correspondentes. No caso

do disjuntor de média tensão, analisado em primeiro lugar, as condições que devem ser atendidas são os seguintes:

$$\text{Critérios para } 13,8kV \begin{cases} I_{ND1} > I_{NPT} \\ I''_{kD1} > I''_{kMT} \\ I_{SD1} > I_{SMT} \end{cases}$$

Onde:

- I_{ND1} : corrente nominal do disjuntor;
- I''_{kD1} : corrente admissível nominal de curta duração do disjuntor;
- I_{SD1} : corrente admissível nominal de curta duração (valor de pico) do disjuntor.

Substituindo-se os valores calculados anteriormente para a maior potência de curto-circuito na entrada admitida, tem-se:

$$I_{ND1} > 41,82 A$$

$$I''_{kD1} > 4183,70 A$$

$$I_{SD1} > 10668,43 A$$

Utilizando o Disjuntor CGMCOSMOS-V como escolha para a média tensão, tem-se os dados para esse equipamento, mostrados na Tabela 5.3. Como todos os critérios foram atendidos, esse equipamento mostrou-se adequado para a utilização no sistema estudado.

$$I_{ND1} = 400 A \quad OK!$$

$$I''_{kD1} = 16 kA \quad OK!$$

$$I_{SD1} = 40 kA \quad OK!$$

Tensão nominal	24 kV
Número de fases	3F
Frequência nominal'	50/60 Hz
Corrente de curta duração (1s)	16 / 20 kA
Corrente admissível nominal de curta duração (circuito principal) Valor tk = (x)	16 / 20* (1/3 s) / 25 (1s) kA
Corrente admissível nominal de curta duração (circuito principal) Valor de pico	40 / 52* / 62,5 kA
Capacidade de corte de corrente principalmente ativa.	400 / 630 A
Capacidade de Corte em Curto Circuito	16 / 20 / 25 A
Capac. De Corrente Capacitiva (50Hz).Banco de Capacitores	400 A
Sequencia de Manobra nominal sem Religamento.	CO-15 s-CO CO-3 min-CO
Sequência de Manobra nominal com Religamento.	O-0,3 s-CO-15 s-CO O-0,3 s-CO-3 min-CO
Resistência mecânica (classe de manobra)	2000 - M2

Tabela 5.3 – Dados e características do disjuntor CGMCOSMOS-V

No caso do disjuntor de baixa tensão, os critérios que devem ser atendidos são:

$$\text{Critérios para } 380 \text{ V} \begin{cases} I_{ND2} > I_{NST} \\ I''_{kD2} > I''_{kBT} \\ I_{SD2} > I_{sBT} \end{cases}$$

Onde:

- I_{ND2} : corrente nominal do disjuntor de baixa tensão;
- I''_{kD2} : corrente admissível nominal de curta duração do disjuntor de baixa tensão;
- I_{SD2} : corrente admissível nominal de curta duração (valor de pico) do disjuntor de baixa tensão.

Substituindo-se os valores calculados anteriormente, tem-se:

$$I_{ND2} > 1519,34 \text{ A}$$

$$I''_{kD2} > 18991,79 \text{ A}$$

$$I_{SD2} > 48429,05 \text{ A}$$

Como o fabricante do disjuntor de baixa tensão ainda não foi definido, considerou-se, neste momento, o Disjuntor ABB Tmax T8 2000 como escolha para a baixa tensão, tem-se os seguintes dados para esse equipamento, de acordo com o catálogo do fabricante.

$$I_{ND2} = 2000 A \quad OK!$$

$$I''_{kD2} = 85 kA \quad OK!$$

$$I_{sD2} = 187 kA \quad OK$$

O Disjuntor ABB Tmax T8 possui diversos modelos de relés compatíveis para utilização, dentre as opções foi escolhido a princípio o relé PR332/P. Os ajustes disponíveis para este modelo de relé encontrados no catálogo, são vistos na Tabela 5.4.

Parâmetro	Função / Faixa de ajuste
I1	Ajuste da corrente de sobrecarga (função de proteção L para as curvas $t=k/I^2$ e IEC 60255-3) 0,4 - 1 x I_n com step = 0,01
t1	Tempo de retardo da corrente I1 (3 – 144 s) @ 3 x I_1 com step = 3 s
I2	Corrente de disparo por curto-circuito temporizado (Função de proteção S para as curvas $t=k/I^2$ ou $t=k$) 0,6 - 10 x I_n com step = 0,1
t2	Tempo de retardo da corrente I2 (0,05 – 0,8 s) @ 10 x I_n com step = 0,01
I3	Corrente de disparo por curto-circuito instantâneo (Função de proteção I) 1,5 - 15 x I_n com step = 0,1
I4	Corrente de disparo por falta à terra (Função de proteção G para as curvas $t=k/I^2$ ou $t=k$) 0,2 – 1 x I_n com step = 0,02
t4	Tempo de retardo da corrente I4 (0,1 – 1 s) com step = 0,05

Tabela 5.4 – Parâmetros e faixas de ajustes do relé PR332/P

Curvas dos ajustes de Retardo Longo, Retardo Curto e Instantâneo do relé PR332/P retiradas do catálogo:

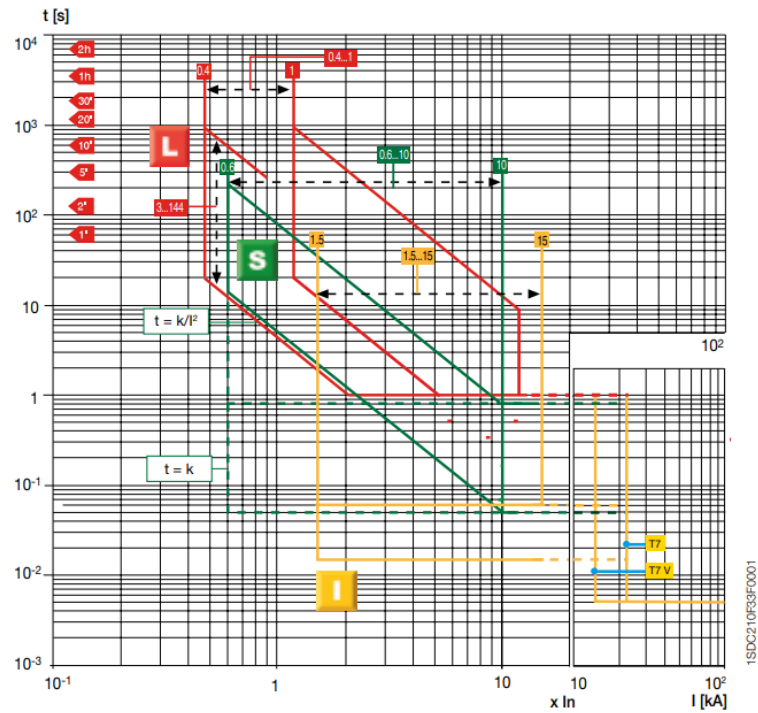


Figura 5.1 – Curva dos ajustes de Retardo Longo, Retardo Curto e Instantâneo do relé PR332/P

Curva do ajuste de falta à terra do relé PR332/P retiradas do catálogo:

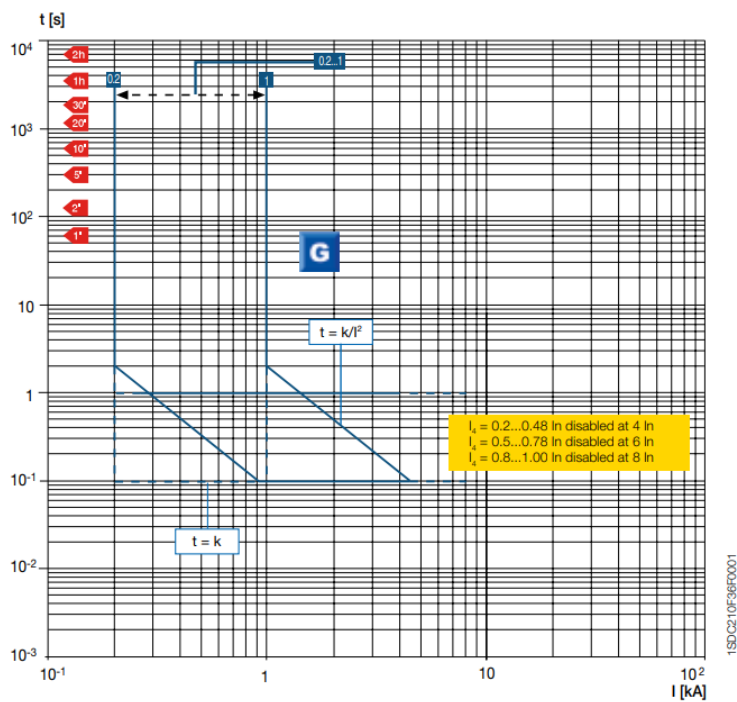


Figura 5.2 – Curva do ajuste de falta à terra do relé PR332/P

Alternativamente, o relé PR332/P também permite a utilização das curvas de tempo inverso de acordo com a norma IEC 60225-3, essas são as curvas Inversa Padrão, Muito Inversa e Extremamente Inversa para o ajuste de Retardo Longo.

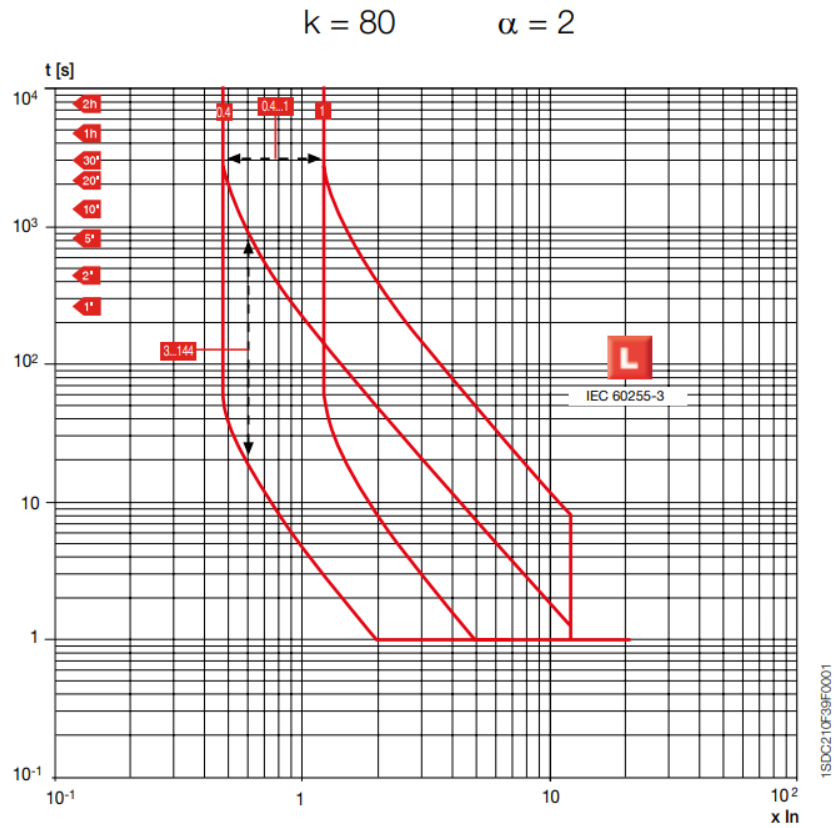


Figura 5.3 – Curva Extremamente Inversa padrão IEC do ajuste de Retardo Longo do relé PR332/P

Com ambos disjuntores escolhidos, passa-se para a especificação dos transformadores de corrente e de potencial que serão utilizados na média tensão.

5.3 - Relação de transformação dos transformadores de corrente (TCs) de proteção (média tensão)

Primeiramente, analisa-se as condições para a relação de transformação do TC.

Dadas as seguintes condições:

$$\begin{aligned} I_{PRIM(TC)} &> I_{NPT} \\ 20 \cdot I_{PRIM(TC)} &> I''_{kMT} \end{aligned}$$

Onde: $I_{PRIM(TC)}$ é a corrente nominal no primário do TC

Sendo:

$$I_{NPT} = 41,82 \text{ A}$$

$$I''_{kMT} = 2091,85 \text{ A para } S_{cc} = 50 \text{ MVA}$$

Tem-se:

$$I_{PRIM(TC)} > 41,82 \text{ A}$$

E

$$20 \cdot I_{PRIM(TC)} > 2091,85 \text{ A}$$

$$I_{PRIM(TC)} > 104,59 \text{ A}$$

Portanto, o TC pode ser especificado com uma relação de transformação de 150/5 A.

Lembrando que a constante “20” é relativa ao Fator de Sobrecorrente Nominal, que representa a relação entre a máxima corrente com a qual o TC mantém a sua classe de exatidão e a corrente no lado primário do TC, em condições nominais de operação.

De acordo com a norma ANSI, essa máxima corrente deve ser da ordem de 20 vezes a corrente nominal, conforme a Equação 3.1.

$$FS = \frac{I_{ccmax}}{I_{PRIM(TC)}} \quad (3.1)$$

Realizando a mesma análise para os valores de 80 e 100 MVA para a potência de curto-circuito na entrada, foram encontrados os resultados da Tabela 5.5.

Potência de curto-circuito na entrada (MVA)	Relação de transformação dos TC's
50	150 / 5
80	200 / 5
100	250 / 5

Tabela 5.5 – Relação de transformação dos TC's para os diferentes valores de potência de curto-circuito analisados

5.4 Especificação dos Transformadores de Corrente

Os parâmetros a serem considerados para a especificação de um transformador de corrente são:

- Classe de exatidão

Quando a aplicação do transformador de corrente é alimentar um relé de proteção, utiliza-se uma classe de exatidão com valor de 5% ou 10%, enquanto para os TCs de medição utiliza-se 0,3%, 0,6% ou 1,2%.

Escolhe-se também entre um transformador de corrente de alta ou baixa impedância. Para este caso, foi escolhido um TC de alta impedância e classe de exatidão de 10%.

- Potência da carga

Como já mencionado anteriormente, o relé de proteção a ser utilizado na média tensão é o Relé SEL 751, e pelo *data sheet* do equipamento, tem-se que o mesmo consome 0,1 VA para suas portas de sobrecorrente. Considerando que o cabo utilizado para conectar os TC's e o relé possui seção transversal de 2,5 mm² e comprimento de 10 metros. Portanto, tem-se:

Cálculo da impedância do relé:

$$0,1 VA = Z_{relé} \cdot I^2$$

$$Z_{relé} = \frac{0,1}{5^2}$$

$$Z_{relé} = 0,004 \Omega$$

Cálculo da impedância do cabo:

Considerando que a impedância do cabo é aproximadamente igual a resistência do condutor de cobre, tem-se:

$$Z_L \approx 2 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{l}{S} [\Omega]$$

$$Z_L = 2 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2 \cdot 10}{2,5}$$

$$Z_L = 0,16 \Omega$$

Cálculo da potência da carga do TC:

$$Z_{relé} + Z_L = 0,164 \Omega$$

$$S_{TC} = 0,164 \cdot 5^2$$

$$S_{TC} = 4,1 VA$$

- Tensão secundária máxima

Sabe-se que a corrente de curto-circuito vale 2061,85 A na média tensão.

$$Curto - circuito = 2091,85 A$$

$$i_{smáx} = 2091,85 / (150 / 5) = 69,73 A$$

$$V_{máx} = 0,164 \Omega \cdot 69,73 A = 11,43 V$$

O menor valor normalizado acima do calculado é de 20V, portanto, tem-se a seguinte especificação para os TC's de proteção: **10B20**

Portanto, foi escolhido o transformador de corrente Epoxi modelo SN1, de carga C5,0 e corrente primaria de 150 para alimentar o relé de proteção da subestação, conforme mostrado na Tabela 5.6.

Modelo/ Model	SNT										
Transformador de Corrente Medição ou Proteção Current Transformer Metering and/or Protection	ABNT										
Umáx/ Um/ Umax. (kV)	Até/Up to/ 15										
Tensão Sup./ Rated. Pow. Freq. (kV)	Até/Up to/ 34										
NBI/ BIL (Kv)	Até/Up to/ 95										
It./Ith. (X In.)	80										
Massa/ Weight (Kg)	17										
Iat. Térm./ Therm. Current (X In.)	1,2										
Frequência/ Frequency. (Hz)	50 ou/ or 60										
Relg. no Prim./ Prim. Connect (Opcional/ Optional)											
Máx. Term. Sec./ Max. Sec. Term. (A)	4										
Cor. Sec./ Sec. Curr. (A)	5										

Norma/ Standard	ABNT (VA)													
Aplicação/ Application	Medição Metering						Proteção Protection							
Carga/ Burdn.	C2.5	C5.0	C12.5	C25	C50	C100	C2.5	C5.0	C12.5	C25	C50	C100	Relé/ Relay Assoc. Proc.	
Corrente Primária Nominal (A)	5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
Rated Primary Current (A)	10	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	15	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	20	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	25	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	30	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	40	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	50	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	60	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	75	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	100	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	150	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	200	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	250	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	300	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	400	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
	500	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20
600	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10B10	10B20	10B50	10B100				0.3C/12.5 10B20	
800														
1000														
1200														
1500														
2000														
2500														
3000														

Tabela 5.6 – Especificação sumária do TC escolhido

5.5 Especificação dos Transformadores de Potencial

Para os transformadores de potencial não será considerado apenas o relé de proteção como carga, mas também toda a relação de componentes da subestação que serão alimentados por corrente contínua, como os motores que controlam as chaves do lado primário seletivo da subestação.

Com isso, foi necessário utilizar um banco de baterias *No-Break* de 1000VA para as cargas de corrente contínua, portanto os TPs especificados serão de 1000 VA e 115 V cada.

Portanto foi escolhido o transformador de potencial Epoxi, modelo SNT16, com potência de 1000 e tensão secundária de 115V, conforme mostrado na Tabela 5.7.


Modelo/ Model	SNT 16	
Transformador de Potencial Fase - Terra (GL 2 ABNT)		
Voltage Transformer Phase - Ground		
	ABNT	
Umáx/ Um.	(kV.)	Até/ Up to/ 15
Tensão Sup./ Voltage test.	(kV.)	Até/ Up to/ 34
NBI/ BIL	(kV.)	Até/ Up to/ 95
Fat. de Sobreten/ Volt. Factor		1,2 Cont.
Massa/ Weight	(Kg.)	36
Pot. Térm./ Thermal Out Put	(VA)	1000VA
Cl. de Exat./ Acc. Cl.	(ABNT)	0,3P5 / 0,3P75
Frequência/ Frequency	(Hz)	50 ou / or / 60
Max. Sec. Term.		3
Tensão Prim./ Prim. Volt.	(V)	6900/√3 Até / Up To 13800/√3
Tensão Sec./ Sec. Volt.	(V)	115 Até / Up To/ 220
. Normas de Referência ABNT NBR 6855/2009		

Tabela 5.7 – Especificação sumária do TP escolhido

5.6 Especificação dos para-raios de entrada da subestação

Os para-raios tem como função proteger o sistema contra surtos de tensão, os quais podem ser provenientes de manobras de chaves seccionadoras e disjuntores ou de descargas atmosféricas.

Os parâmetros a serem analisados para a especificação de um para-raios são os seguintes:

- Tensão máxima de operação contínua (MCOV)

É a máxima tensão eficaz que o para-raios suporta aplicada a seus terminais.

$$MCOV \geq \frac{V_{Nrede}}{\sqrt{3}} = \frac{13,8 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}$$

$$MCOV \geq 7,97 \text{ kV}$$

Com isso, MCOV escolhido, com base no catalogo de para-raios de Óxido de Zinco Poliméricos Balestro:

$$MCOV = 10,2 \text{ kV}$$

➤ Tensão nominal dos para-raios ($V_{N(PR)}$)

É a tensão para qual o para-raios é projetado a operar em regime permanente.

$$V_{N(PR)} = 1,25 \cdot \frac{V_{Nrede}}{\sqrt{3}} = 1,25 \cdot \frac{13,8 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}$$

$$V_{N(PR)} = 9,959 \text{ kV}$$

$$V_{Nescolhido} > V_{N(PR)}$$

Com isso, V_N escolhido foi:

$$V_N = 12 \text{ kV}$$

➤ Sobretensões temporárias, com aplicação previa de energia (TOV)

- 1,32 pu de V_N por 1s
- 1,26 pu de V_N por 10s
- 1,19 pu de V_N por 100s

Para TOV de 1 segundo tem-se:

$$TOV(1s) = 1,32 \cdot 12$$

$$TOV(1s) = 15,84 \text{ kV}$$

➤ Tensão residual (V_d) para corrente de descarga nominal (10kA – 8/20 μ s)

É a tensão nos terminais do para-raios, quando ocorre a passagem de uma corrente de 10 kA, proveniente de uma descarga atmosférica.

$$V_d = 39,6 \text{ kV}$$

- Tensão residual para impulso de corrente de manobra 500 A

É a tensão nos terminais do para-raios, quando ocorre a passagem de uma corrente de 500 A, proveniente de uma manobra.

$$V_{MAN} = 32 \text{ kV}$$

- Tensão residual para impulso íngreme 10kA

É a tensão nos terminais do para-raios, quando ocorre a passagem de uma corrente de 10 kA, proveniente de um impulso.

$$V'_d = 43,9 \text{ kV}$$

Com isso, tem-se o para-raios especificado, modelo PBP 12/10, fabricante Balestro.

6. Estudo da seletividade da proteção da subestação

6.1 - Estudo de seletividade – Opção 1 – Curva original do disjuntor de BT

Primeiramente foi selecionado os ajustes para o disjuntor de baixa tensão (ABB), baseado na Tabela 5.4:

$$I1 = 0,83 (xIn) - 1660A$$

$t1 = 6$ s (para $3xI1$) – Valor escolhido deve ser suficiente à evitar a atuação indevida da proteção em um caso de partida de motor (estudo realizado mais adiante).

$$I2 = 1,2 (xIn) - 2400 A$$

$$t2 = 0,1 \text{ s (para } 10xIn)$$

$$Ii = 5 (xIr) - 10000 A$$

Por meio do catálogo, tem-se que as funções de proteção L (Retardo longo) e S (Retardo curto) são dadas pela Equação 6.1:

$$t = K/I^2 \quad (6.1)$$

Onde:

t = tempo;

K = constante definida pelo ajuste de t1 ou t2;

I = valor múltiplo da corrente;

Portanto para o ajuste escolhido tem-se:

- Função L

$$6 = \frac{K}{3^2}$$

$$K = 6 * 9$$

$$K = 54$$

- Função S

$$0,1 = \frac{K}{10^2}$$

$$K = 0,1 * 100$$

$$K = 10$$

Com isso foi possível reproduzir a curva escolhida, como visto na Figura 3.5.

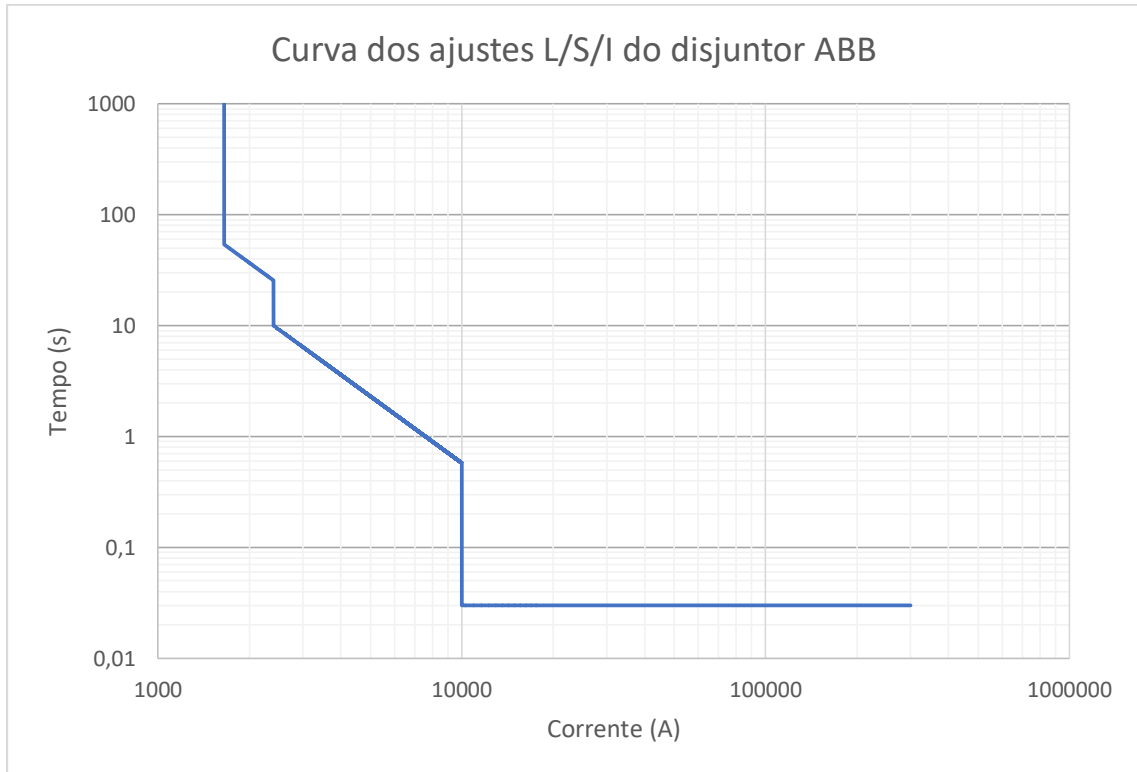


Figura 6.1 – Curva do disjuntor ABB Tmax T8 2000 com relé PR332/P

O segundo passo foi determinar a característica da curva do Relé SEL 751 que comandará o disjuntor de média tensão. Pelo manual do produto (descrito na Referência 1), foi encontrado que esse possui as seguintes curvas:

Table 4.14 Equations Associated With IEC Curves

Curve Type	Operating Time	Reset Time	Figure
C1 (Standard Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{0.14}{M^{0.02} - 1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{13.5}{1 - M^2} \right)$	Figure 4.15
C2 (Very Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{13.5}{M - 1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{47.3}{1 - M^2} \right)$	Figure 4.16
C3 (Extremely Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{80}{M^2 - 1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{80}{1 - M^2} \right)$	Figure 4.17
C4 (Long-Time Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{120}{M - 1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{120}{1 - M} \right)$	Figure 4.18
C5 (Short-Time Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{0.05}{M^{0.04} - 1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{4.85}{1 - M^2} \right)$	Figure 4.19

where:
 t_p = operating time in seconds
 t_r = electromechanical induction—disk emulation reset time in seconds (if you select electromechanical reset setting)
 TD = time-dial setting
 M = applied multiples of pickup current [for operating time (t_p), $M > 1$; for reset time (t_r), $M \leq 1$]

Tabela 6.1 – Equações das curvas do Relé SEL 751 (Retirada do manual do produto)

Então foi escolhido utilizar a curva IEC Extremamente Inversa.

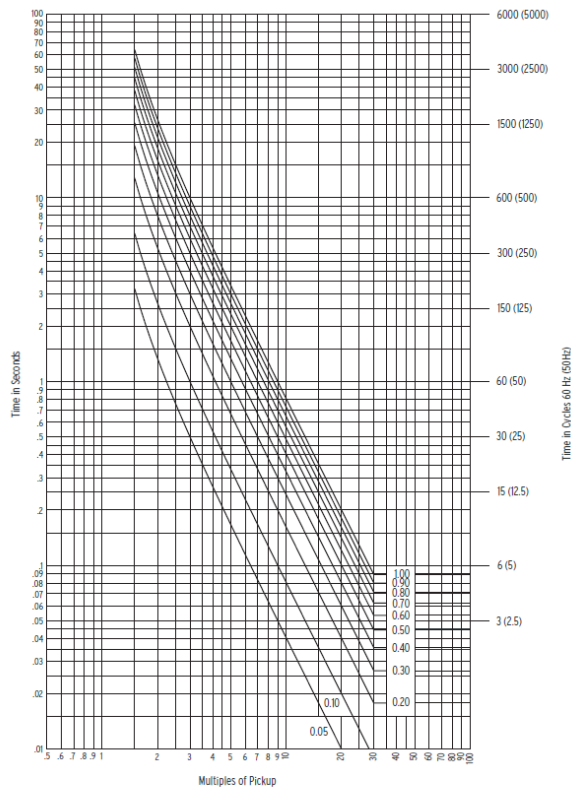


Figure 4.17 IEC Class C Curve (Extremely Inverse): C3

Figura 6.2 – Família de curvas IEC Extremamente Inversa

A escolha dessa curva se deve ao fato de ser mais comumente utilizada e solicitada pelas concessionárias de energia.

Pela curva e manual do fabricante, é possível retirar os valores de dial de tempo disponíveis para esse ajuste escolhido. Repara-se que esse parâmetro é

discreto não igualmente espaçado entre 0,05 e 0,1 e igualmente espaçado a partir de 0,1 (passo = 0,01).

DT: (0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0)

Para que ambas proteções sejam seletivas, deseja-se que a curva do relé SEL esteja acima da curva do disjuntor da ABB, de modo que esse atue em caso de falha na proteção de baixa tensão.

Portanto, foi escolhido como referência, o ponto onde a curva do disjuntor ABB passa de seu ajuste de seu ajuste de retardo longo para o ajuste de retardo curto, ou seja, o ponto para 2400 A e 25,5 segundos. Desta maneira, procura-se que a curva do relé SEL esteja 4,5 segundos acima deste mesmo ponto, ou seja, para 2400 A (no secundário do transformador), a proteção do primário da subestação deve atuar em 30 segundos. Esse procedimento define o Intervalo de Tempo de Coordenação (ITC).

Assim, foi realizado os primeiros ajustes para os relés de proteção com funções 50 e 51.

Para o relé temporizado de fase (função 51):

Sabe-se que a corrente nominal no lado primário do transformado vale: 41,84 A

Utiliza-se um fator de sobrecarga sobre essa corrente, evitando a atuação devido a demanda do sistema.

O fator de sobrecarga escolhido foi de 1,10.

Com isso:

$$I_{ajuste51} = 1,10 \cdot 41,84$$

$$I_{ajuste51} = 46,02 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51} = I_{pick-up} = I_{partida}$$

É necessário referir a corrente de ajuste do relé para o secundário do transformador para implementação no coordenograma.

$$I'_{ajuste51} = 46,02 \cdot \frac{13800}{380}$$

$$I'_{ajuste51} = 1671,28 \text{ A}$$

Para o relé instantâneo de fase (função 50):

Sabe-se que a corrente de curto-circuito trifásico no lado primário do transformador vale 2091,85 A e a corrente de energização do transformador (*Inrush*) é estimada em 12 vezes a sua corrente nominal com duração de 0,1 segundos, por se tratar de um transformador a seco. Desta forma, tem-se:

$$I_{Inrush} = 12 \cdot 41,84$$

$$I_{Inrush} = 502,04 \text{ A}$$

Utiliza-se um fator de segurança para que essa proteção instantânea não atue para a energização do transformador, esse fator deve ser no máximo 10% maior que a corrente de *Inrush* do transformador. Portanto, o fator de segurança escolhido para essa situação foi de 10%.

$$I_{ajuste50} = 1,10 \cdot 502,04$$

$$I_{ajuste50} = 552,25 \text{ A}$$

Referindo a corrente de ajuste do relé 50 para o lado secundário do transformador:

$$I'_{ajuste50} = 552,25 \cdot \frac{13800}{380}$$

$$I'_{ajuste50} = 20055,33 \text{ A}$$

Com os ajustes dos relés 50 e 51 selecionados, deseja-se encontrar o valor de dial de tempo que será utilizado para esse caso.

Sabe-se que a curva IEC Extremamente Inversa é dada por:

$$t = TD \cdot \left(\frac{80}{M^2 - 1} \right) \quad (6.2)$$

Onde M é o múltiplo da corrente de *pick-up*, dada por:

$$M = \frac{I}{I_{partida}} \quad (6.3)$$

Como mencionado anteriormente, deseja-se que esta proteção atue em 30 segundos para uma corrente de 2400 A (no secundário do transformador).

Desta forma temos que:

$$M = \frac{2400 \cdot (380/13800)}{46,02} = 1,4360$$

Utiliza-se então, este valor de M, para encontrar o DT.

$$t = DT \cdot \left(\frac{80}{M^2 - 1} \right)$$

$$DT = t \cdot \left(\frac{M^2 - 1}{80} \right)$$

$$DT = 30 \cdot \left(\frac{1,4360^2 - 1}{80} \right)$$

$$DT = 0,3986$$

O dial de tempo (DT) calculado é arredondado para o valor mais próximo entre os ajustes disponíveis no equipamento, portanto, tem-se DT = 0,40 e a seguinte curva para estes ajustes:

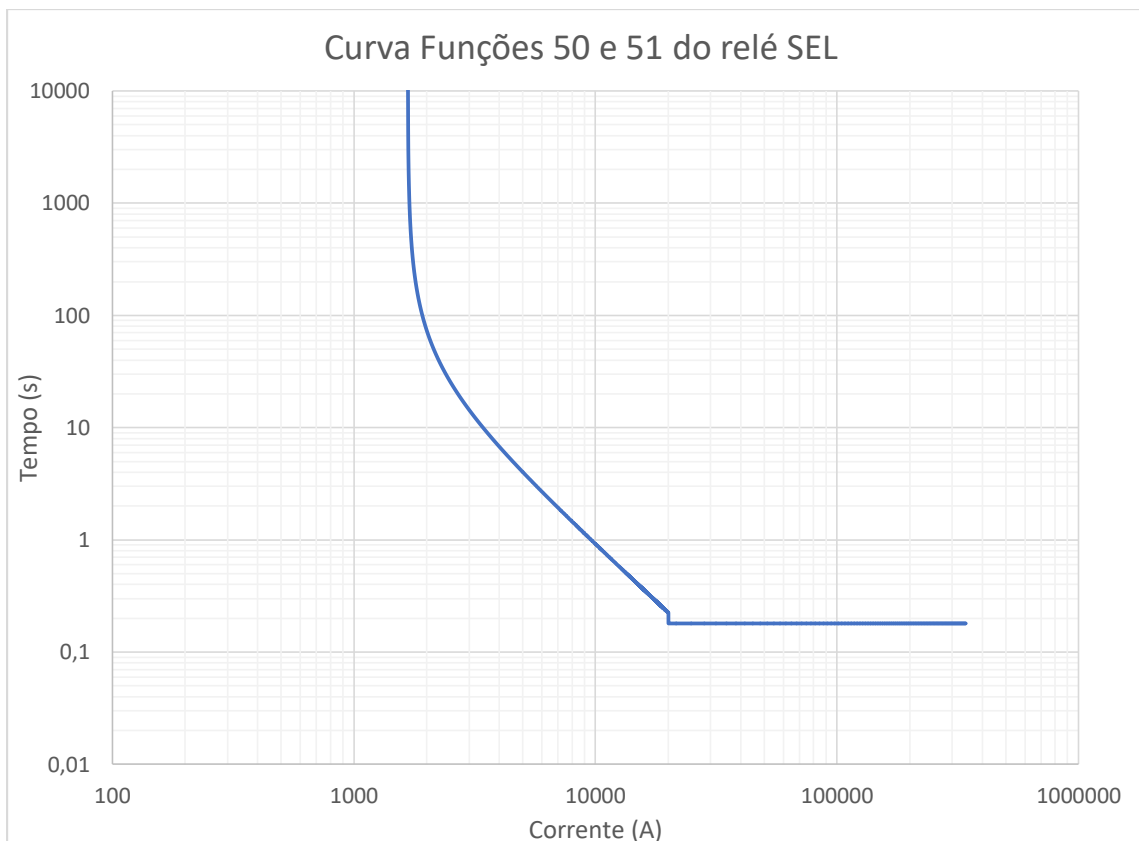


Figura 6.3 – Curva das funções 50 e 51 do relé SEL 751

O próximo passo foi colocar ambas as curvas do disjuntor ABB e do relé SEL em um único coordenograma para verificar a seletividade.

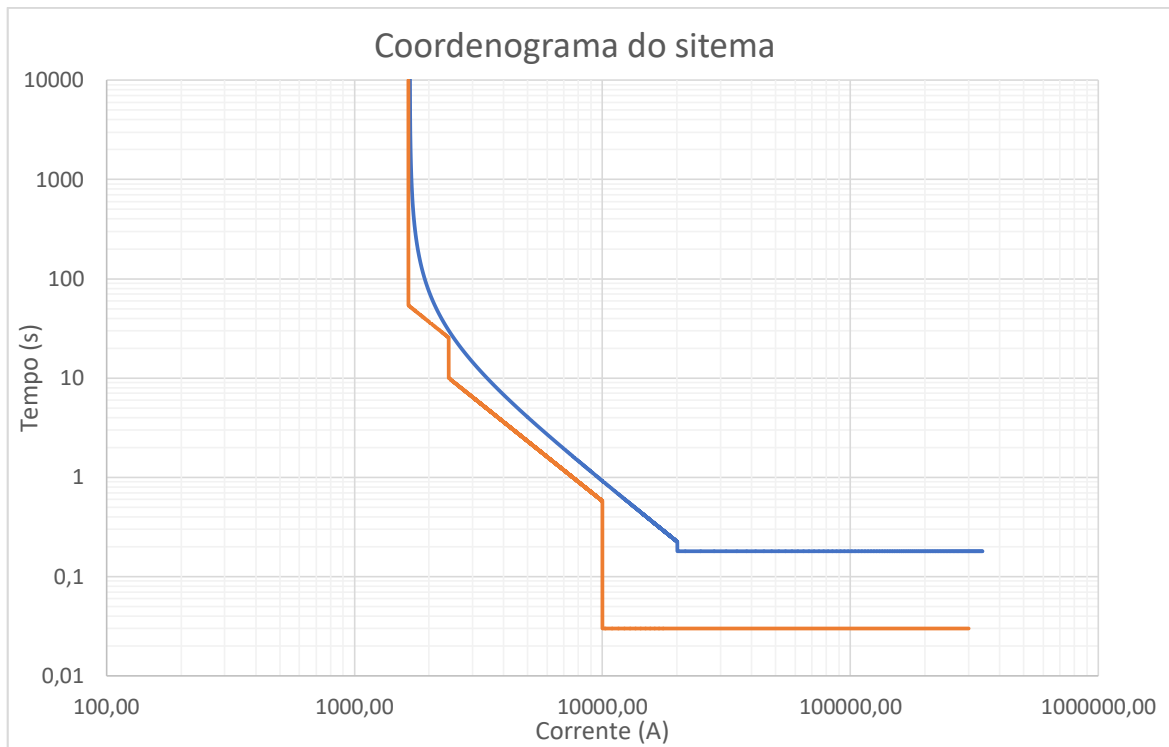


Figura 6.4 – Coordenograma do sistema

Então foram feitas as considerações quanto a energização e suportabilidade térmica do transformador.

6.1.2 - Corrente de *Inrush* (Energização do transformador)

Foi considerado que a corrente de *Inrush* tem valor de 12 vezes a corrente nominal do primário do transformador e duração de 0,1 segundo. Este ponto deve estar abaixo da curva do relé SEL, ou seja, a proteção no lado primário não pode atuar quando ocorre a energização do transformador.

$$I_{Inrush} = 12 \cdot 41,84$$

$$I_{Inrush} = 502,04 \text{ A}$$

Referindo esta corrente para o secundário do transformador:

$$I'_{Inrush} = 502,04 \cdot \frac{13800}{380}$$

$$I'_{Inrush} = 18232,11 \text{ A}$$

6.1.3 - Suportabilidade térmica (Ponto ANSI do transformador)

O ponto ANSI é dado pela razão entre a corrente nominal do primário do transformador por sua impedância percentual em um tempo de 2 a 4 segundos. Diante disso foi considerado para esse caso em tempo de 3 segundos e esse ponto deve estar acima de ambas as curvas do coordenograma.

$$Ponto\ ANSI = \frac{41,84}{7} \cdot 100$$

$$Ponto\ ANSI = 597,67\ A$$

Referindo esta corrente para o secundário do transformador:

$$Ponto\ ANSI' = 597,67 \cdot \frac{13800}{380}$$

$$Ponto\ ANSI' = 21704,90\ A$$

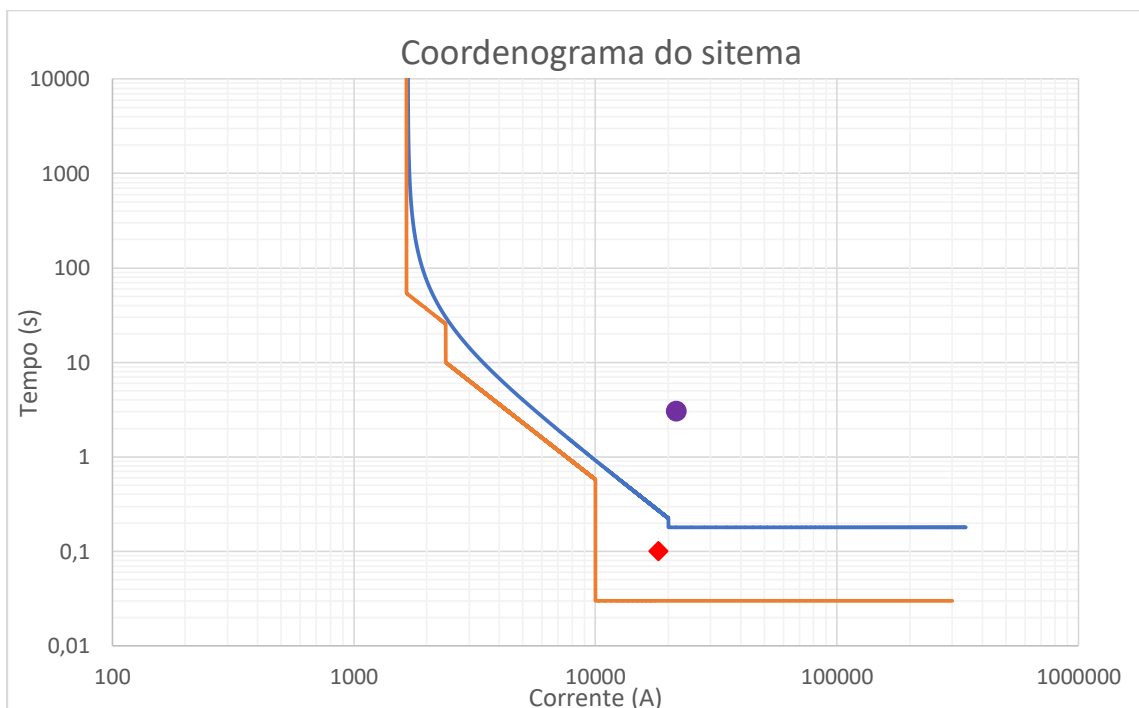


Figura 6.5 – Coordenograma do sistema com os pontos ANSI e Corrente de Inrush do transformador

Percebe-se que tanto o ponto para Corrente Inrush (losango em vermelho), quanto o ponto ANSI (círculo em roxo) satisfazem as condições propostas.

6.1.4- Estudo da partida de um motor

A última consideração a ser feita é quanto à partida de motor considerado como carga na subestação. Neste caso estudado a subestação possui 15 cargas iguais, estando uma destas em partida sendo $I_p=8I_n$ e duração de 6 segundos, e o restante das cargas estão ligadas continuamente.

Portanto:

$$I_C = \frac{1519,34}{15} = 101,29 \text{ A}$$

I_C é o valor da corrente nominal de cada carga individualmente;

Então:

$$I_{partida} = 8 \cdot 101,29 = 810,32 \text{ A}$$

$$I_{total} = I_{partida} + 14 \cdot I_C$$

$$I_{total} = 810,32 + 14 \cdot 101,29$$

$$I_{total} = 2228,37 \text{ A}$$

Nesta situação, o ponto para a partida deve estar abaixo da curva do disjuntor ABB, ou seja, a proteção não deve atuar para a partida do motor.

Colocando o ponto encontrado no coordenograma:

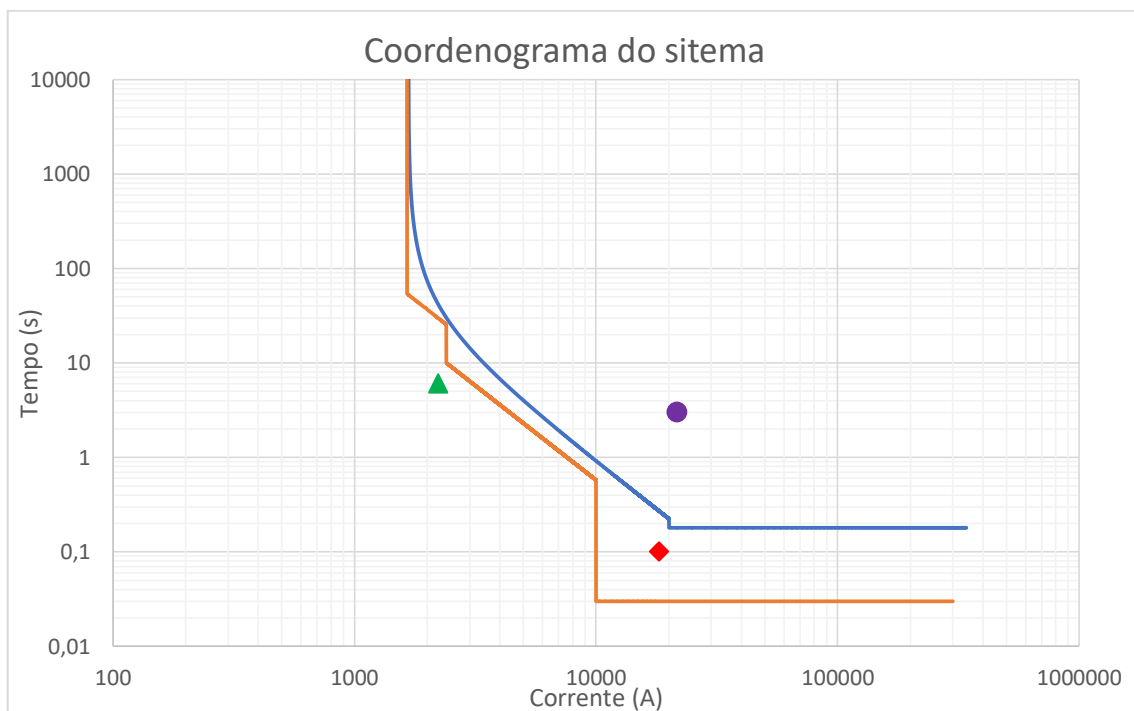


Figura 6.6 – Coordenograma do sistema levando em consideração o ponto para a partida do motor

Percebe-se que o ponto (triângulo verde) atende a condição de estar abaixo da curva do disjuntor ABB. É possível utilizar a equação do ajuste de retardo longo do disjuntor para fazer a comparação de tempo de atuação da proteção com o tempo da partida do motor.

Portanto:

$$t = \frac{K}{I^2}$$

Onde:

t = tempo;

K = constante definida pelo ajuste de t1;

I = valor múltiplo da corrente;

Lembrando que o ajuste escolhido para t1 foi: t1 igual a 6s (3xI1)

$$6 = \frac{K}{3^2}$$

$$K = 6 * 9$$

$$K = 54$$

Sendo a corrente durante a partida $I_p = 2228,37$ A.

$$I = \frac{I_p}{I_n} = \frac{2228,37}{1660}$$

$$I \cong 1,34$$

Portanto o tempo de atuação para essa corrente será:

$$t = \frac{K}{I^2} = \frac{54}{1,34^2}$$

$$t = 30,07s$$

Como a partida possui duração de apenas 6 segundos, não haverá problemas com a atuação desnecessária da proteção.

6.2- Estudo de seletividade - Opção 2 – Curva baseada na IEC 60225-3 para o disjuntor de BT

Como o relé PR332/P permite a utilização das curvas de tempo inverso padrão IEC, pode-se utiliza-las para realizar o ajuste do disjuntor ABB. Com isso foram escolhidos os seguintes ajustes de acordo com a Tabela 5.4:

$$I1 = 0,83 (xIn) - 1660A$$

$t1 = 3$ s (para $3xI1$) – Valor escolhido deve ser suficiente à evitar a atuação indevida da proteção em um caso de partida de motor (estudo realizado mais adiante).

$$I2 = \text{desligado}$$

$$t2 = \text{desligado}$$

$$Ii = 5 (xIr) - 10000 A$$

Por meio do catálogo, tem-se que a função de proteção L (Retardo longo) quando ajustada para as curvas IEC é dada pela Equação 3.5:

$$t = \frac{k}{(I)^\alpha - 1} \cdot b \text{ onde } I = \frac{I_f}{I_1} \quad (6.4)$$

Sendo:

α e k : parâmetros que determinam o tipo da curva;

b : parâmetro calculado de acordo com os ajustes $t1$ e $I1$;

I : corrente de *pick-up*;

I_f : corrente de falta;

Utilizando a curva Extremamente Inversa, tem-se $\alpha = 2$ e $k = 80$. Com os ajustes $I1$, $t1$ e o tipo de curva escolhidos, pode-se reproduzir a curva do disjuntor ABB.

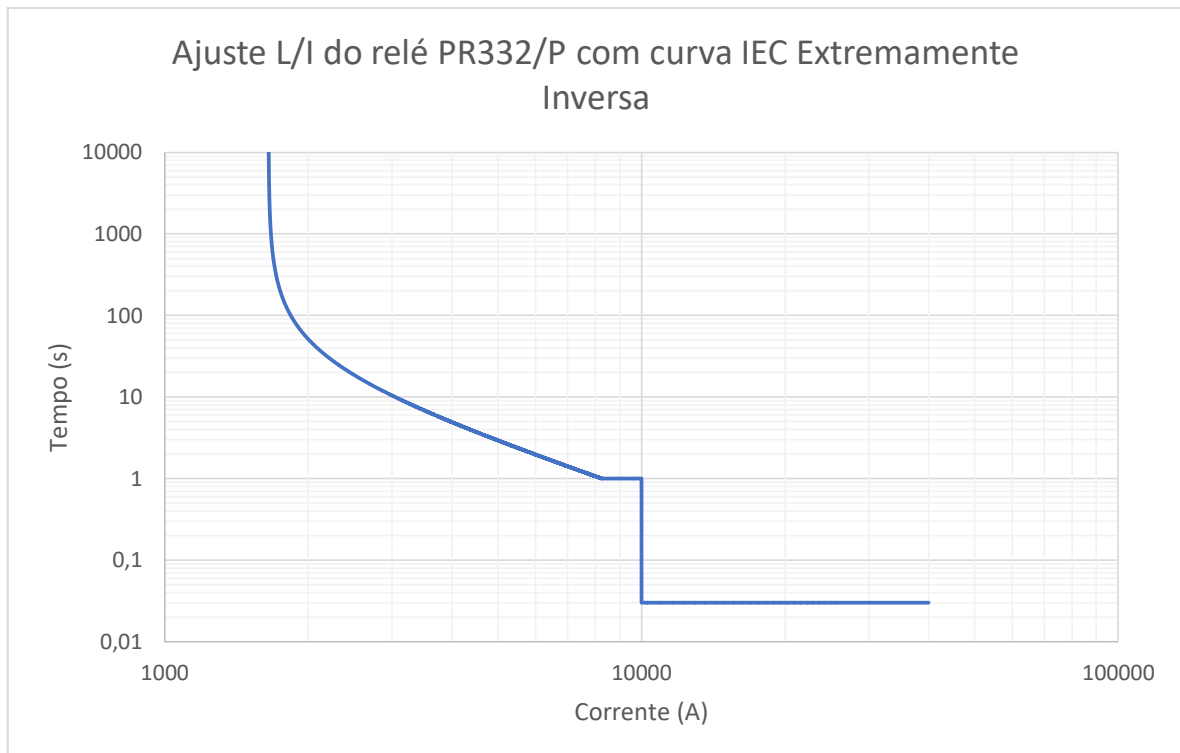


Figura 6.7 – Curva do disjuntor ABB Tmax T8 2000 com relé PR332/P

Como o *tripping time* da curva temporizada é limitado em 1 segundo, o ponto em que a curva passa para o ajuste instantâneo em 10000 A e 1 segundo será utilizado como referência para determinar a curva do relé de proteção na média tensão.

Utilizando a curva Extremamente Inversa para o ajuste do relé SEL na média tensão e o ponto de referência de 10000 A no secundário do transformador com tempo de atuação de 1,3 segundos, pode-se fazer os ajustes das funções 50 e 51.

Para o relé temporizado de fase (função 51):

Sabe-se que a corrente nominal no lado primário do transformado vale: 41,84 A

Utiliza-se um fator de sobrecarga sobre essa corrente, evitando a atuação devido a demanda do sistema.

O fator de sobrecarga escolhido foi de 1,10.

Com isso:

$$I_{ajuste51} = 1,10 \cdot 41,84$$

$$I_{ajuste51} = 46,02 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51} = I_{pick-up} = I_{partida}$$

É necessário referir a corrente de ajuste do relé para o secundário do transformador para implementação no coordenograma.

$$I'_{ajuste51} = 46,02 \cdot \frac{13800}{380}$$
$$I'_{ajuste51} = 1671,28 A$$

Para o relé instantâneo de fase (função 50):

Sabe-se que a corrente de curto-circuito trifásico no lado primário do transformador vale 2091,85 A e a corrente de energização do transformador (*Inrush*) é estimada em 12 vezes a sua corrente nominal com duração de 0,1 segundos, por se tratar de um transformador a seco. Desta forma, tem-se:

$$I_{Inrush} = 12 \cdot 41,84$$
$$I_{Inrush} = 502,04 A$$

Utiliza-se um fator de segurança para que essa proteção instantânea não atue para a energização do transformador, esse fator deve ser no máximo 10% maior que a corrente de *Inrush* do transformador. Portanto, o fator de segurança escolhido para essa situação foi de 10%.

$$I_{ajuste50} = 1,10 \cdot 502,04$$
$$I_{ajuste50} = 552,25 A$$

Referindo a corrente de ajuste do relé 50 para o lado secundário do transformador:

$$I'_{ajuste50} = 552,25 \cdot \frac{13800}{380}$$
$$I'_{ajuste50} = 20055,33 A$$

Com os ajustes dos relés 50 e 51 seleccionados, deseja-se encontrar o valor de dial de tempo que será utilizado para esse caso.

Sabe-se que a curva IEC Extremamente Inversa é dada por:

$$t = TD \cdot \left(\frac{80}{M^2 - 1} \right) \quad (3.3)$$

Onde M é o múltiplo da corrente de *pick-up*, dada por:

$$M = \frac{I}{I_{partida}} \quad (3.4)$$

Como mencionado anteriormente, deseja-se que esta proteção atue em 1,3 segundos para uma corrente de 10000 A.

Desta forma temos que:

$$M = \frac{10000 \cdot (380/13800)}{46,02} = 5,9834$$

Utiliza-se então, este valor de M, para encontrar o DT.

$$t = DT \cdot \left(\frac{80}{M^2 - 1} \right)$$

$$DT = t \cdot \left(\frac{M^2 - 1}{80} \right)$$

$$DT = 1,3 \cdot \left(\frac{5,9834^2 - 1}{80} \right)$$

$$DT = 0,5655$$

O dial de tempo (DT) calculado é arredondado para o valor mais próximo entre os ajustes disponíveis no equipamento, portanto, tem-se DT = 0,57 e a seguinte curva para estes ajustes:

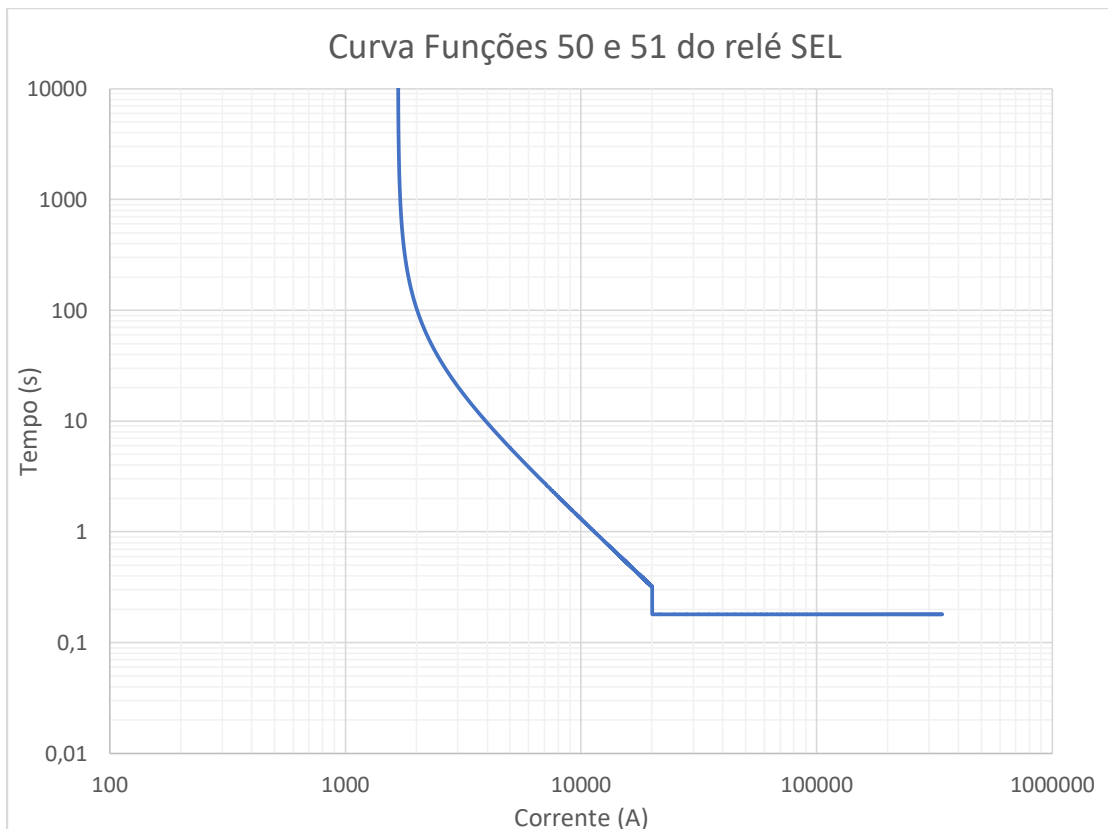


Figura 6.8– Curva dos ajustes 51 e 50 do relé SEL

Com isto, junta-se ambas as curvas em um único coordenograma para verificação da seletividade e realiza-se as considerações para energização do transformador, Ponto ANSI e partida de um motor da mesma forma realizada na opção anterior.

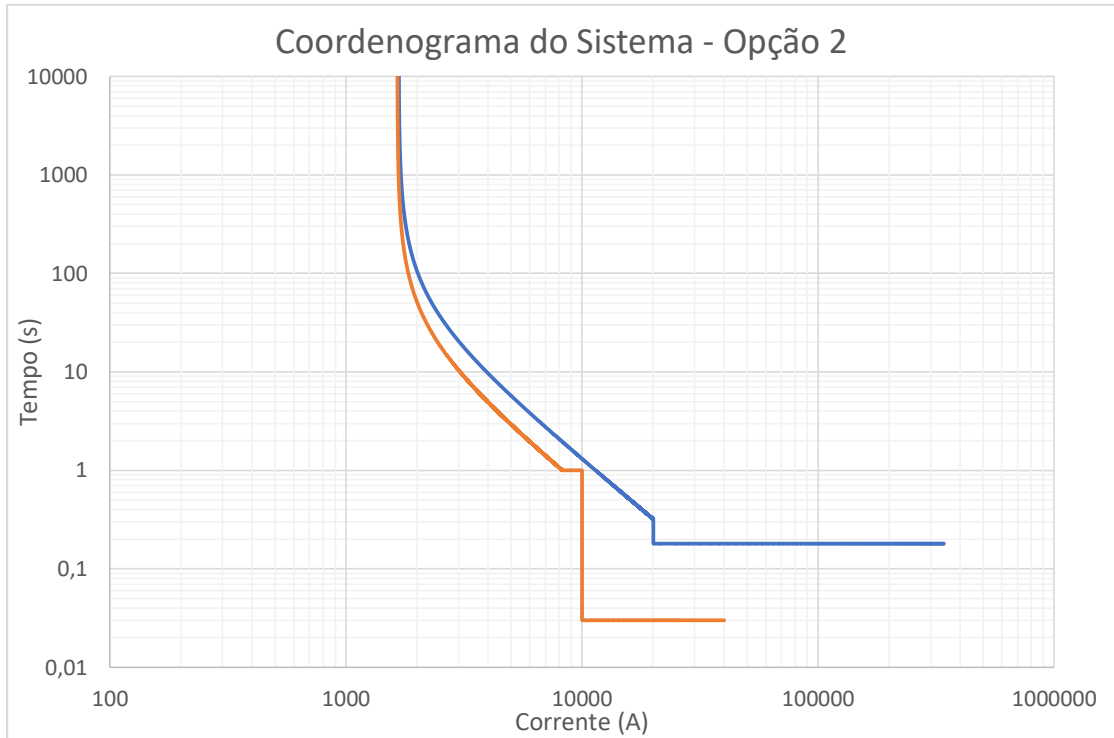


Figura 6.9 – Coordenograma do sistema para a opção 2 de ajustes do disjuntor ABB

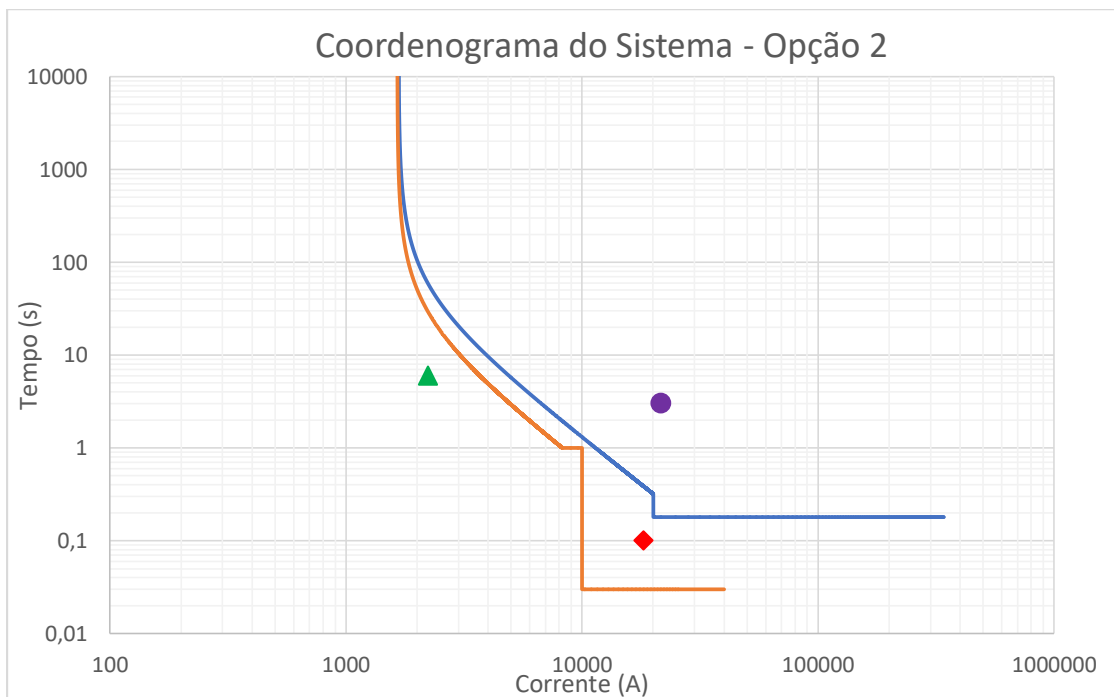


Figura 6.10 – Coordenograma do sistema para a opção 2 de ajustes do disjuntor ABB com pontos Inrush, ANSI e partida do motor

Percebe-se que tanto o ponto para Corrente Inrush (losango em vermelho), quanto o ponto ANSI (círculo em roxo) e a partida do motor (triângulo verde) satisfazem as condições propostas anteriormente.

6.3 – Ajuste de falta à terra do disjuntor de baixa tensão e ajustes 51N/50N do relé de média tensão

Foi considerado que a corrente de uma falta à terra equivale a 20% da corrente de curto-circuito trifásico para a baixa tensão.

$$I_{1\phi} = 20\% \cdot I_{3\phi}$$

$$I_{1\phi} = 0,2 \cdot 16881,59$$

$$I_{1\phi} = 3376,32 \text{ A}$$

Desta forma, o ajuste escolhido deve ser menor que esta corrente.

Pela Tabela 5.4, os ajustes disponíveis para I4 variam de 0,1 a 1 xIn com passo de 0,02. Portanto o ajuste de corrente escolhido foi de I4 = 0,4 (xIn) com ajuste t1 de 0,15 segundos.

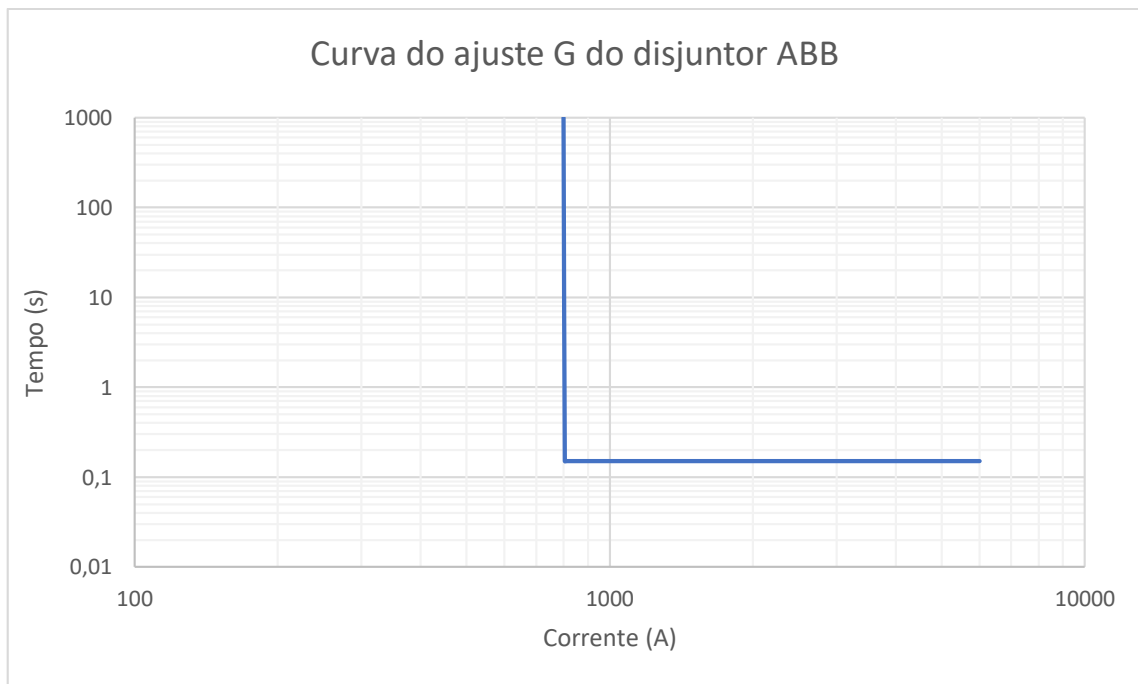


Figura 6.11 – Curva do ajuste de falta à terra para o disjuntor ABB na baixa tensão

Para as funções 51N e 50N do relé SEL, deve considerar a corrente de partida de neutro 1/3 da corrente de partida de fase e a corrente *Inrush* de neutro 1/3 da corrente *Inrush* de fase. Com isso, tem-se para o ajuste 51N:

$$I_{partida} = 46,02 A$$

$$I_{partidaN} = 15,34 A$$

Referindo a corrente de partida de neutro para o lado de baixa tensão:

$$I'_{partidaN} = 15,34 * \frac{13800}{380}$$

$$I'_{partidaN} = 557,09 A$$

O tipo de curva recomendado para o ajuste 51N é o de tempo definido com tempo de atuação entre 1 e 3 segundos, portanto foi escolhido um tempo de atuação igual a 2 segundos.

Para o ajuste 50N tem-se:

$$I_{Inrush} = 502,04 A$$

$$I_{InrushN} = 167,35 A$$

$$I_{ajuste50N} = 1,10 * I_{InrushN}$$

$$I_{ajuste50N} = 184,08 A$$

Referindo a corrente de ajuste 50N para o secundário tem-se:

$$I'_{ajuste50N} = 184,08 * \frac{13800}{380}$$

$$I'_{ajuste50N} = 6685,11 A$$

Com isso pode-se reproduzir a curva dos ajustes 51N e 50N para o relé SEL na média tensão:

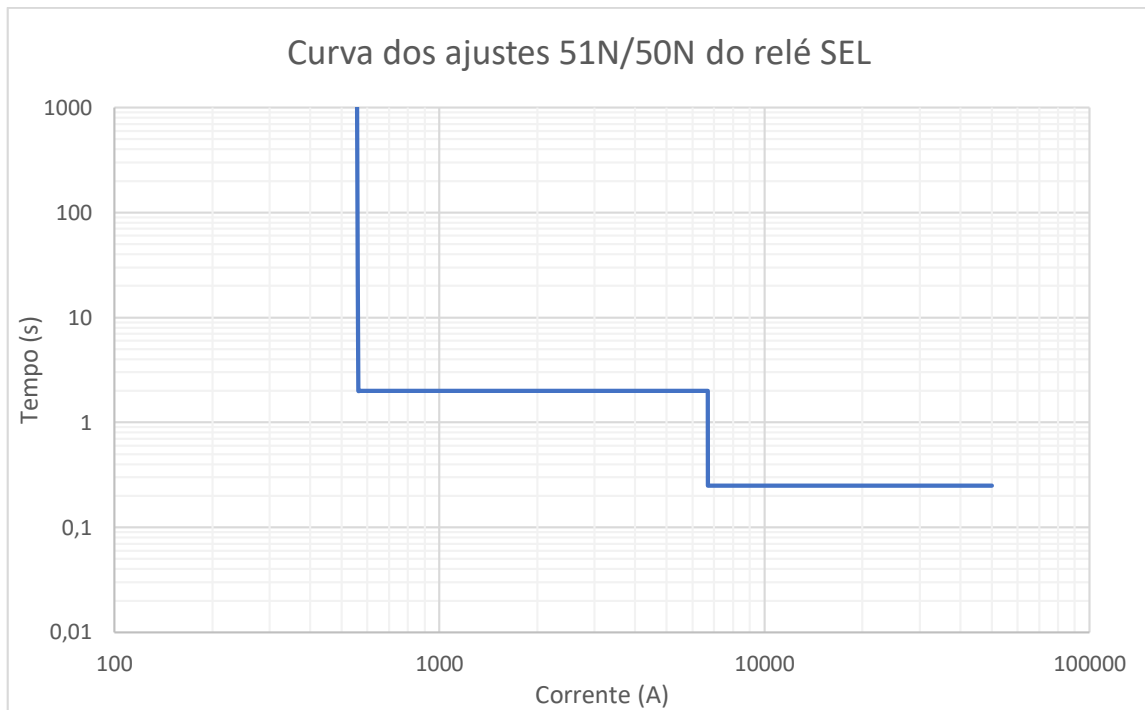


Figura 6.12 – Curva dos ajustes 51N/50N do relé SEL

Recomenda-se que a curva dos ajustes 51N/50N esteja abaixo do Ponto ANSI de neutro, o qual tem valor de 58% do Ponto ANSI de fase. Portanto, tem-se:

$$Ponto\ ANSI = 597,67\ A$$

$$Ponto\ ANSI_N = 0,58 * 597,67\ A$$

$$Ponto\ ANSI_N = 346,65\ A$$

Referindo esta corrente para o secundário do transformador:

$$Ponto\ ANSI'_N = 346,65 \cdot \frac{13800}{380}$$

$$Ponto\ ANSI'_N = 12588,84\ A$$

Com isso pode-se colocar os pontos de *Inrush* de neutro e ANSI de neutro no gráfico com a curva dos ajustes 51N e 50N.

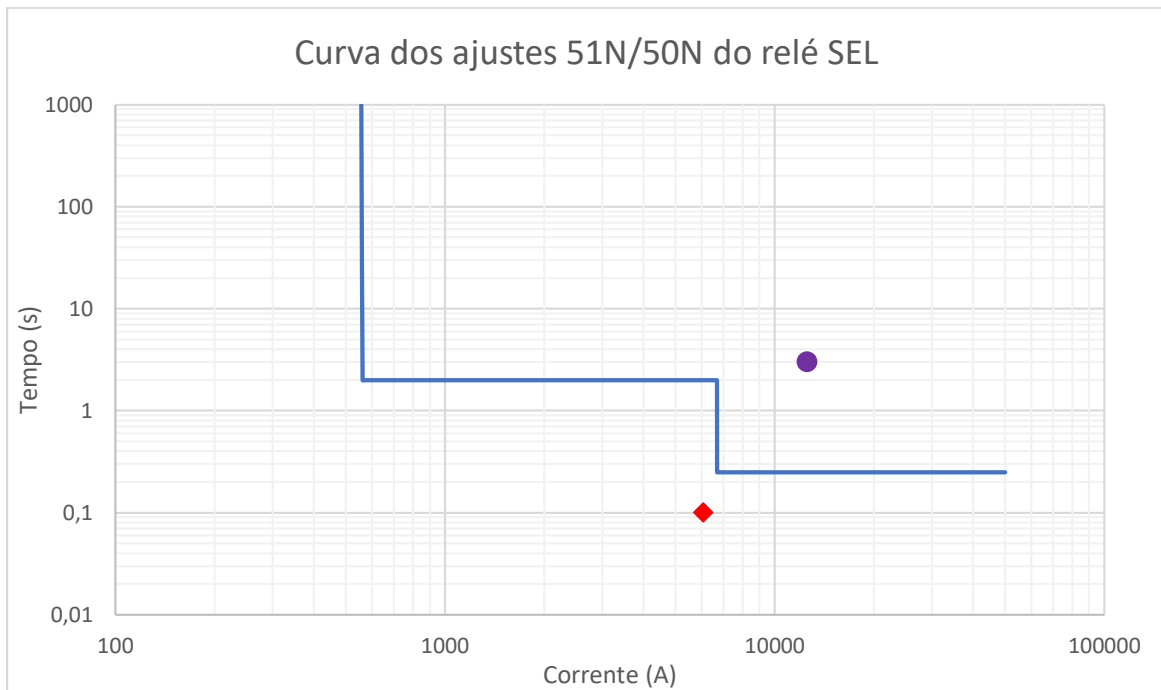


Figura 6.13 – Curva dos ajustes 51N/50N do relé SEL com os pontos ANSI de neutro e *Inrush* de neutro

Percebe-se que os pontos ANSI de neutro (círculo roxo) e *Inrush* de neutro (losango vermelho) atendem as condições propostas anteriormente.

É importante ressaltar que como o transformador é Delta-Estrela, as referências à terra do lado de alta tensão e baixa tensão estão isoladas, não sendo necessário coordenar o ajuste de falta à terra do disjuntor com os ajustes 51N e 50N do relé.

6.4– Estudo de seletividade do disjuntor de baixa tensão com os fusíveis de proteção do CBT

Sabendo-se que o esquema unifilar da subestação é apresentado pela Figura 3.16 e que a norma da CEB (NTD 1.05) informa que o maior fusível a ser instalado no CBT é de 250 A do tipo NH. Neste sentido, pode ser desenvolvido o estudo entre o fusível mencionado do CBT e o disjuntor de baixa tensão. Deve-se mencionar que, uma vez efetuada a seletividade com o maior fusível, qualquer

que seja os valores nominais dos elementos fusíveis instalados no CBT terão a seletividade garantida.

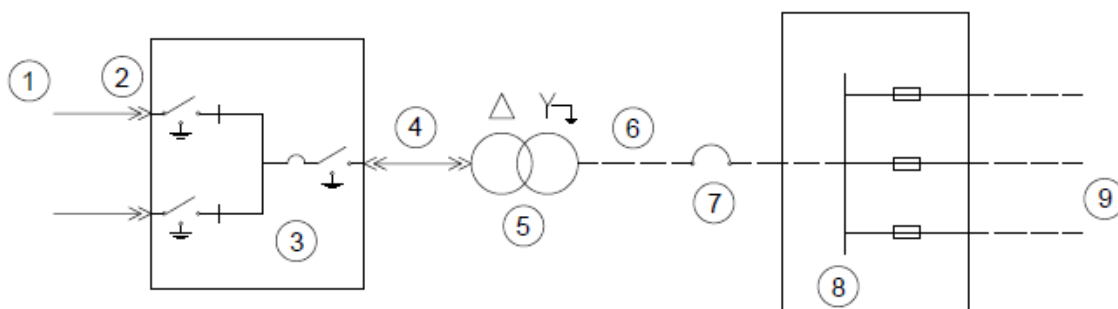


Figura 6.14 – Esquema unifilar da subestação com arranjo primário seletivo

Onde:

- 1 – Rede de distribuição subterrânea primária
- 2 – Acessório desconectável
- 3 – Chave seccionadora com interruptor de falta
- 4 – Circuito primário
- 5 – Transformador a seco ou em liquido isolante
- 6 – Circuito secundário
- 7 – Disjuntor de baixa tensão
- 8 – CBT (Cubículo de baixa tensão)
- 9 – Rede de distribuição subterrânea secundária

Dentro do exposto, utilizando-se o catálogo WEG para Fusíveis aR e gL/gG, Tipo NH Contato Faca, NH Flush End e Diametral, foi possível plotar as curvas do fusível de 250 A e do disjuntor de baixa tensão, conforme mostrado nas Figuras 6.15 e 6.16.

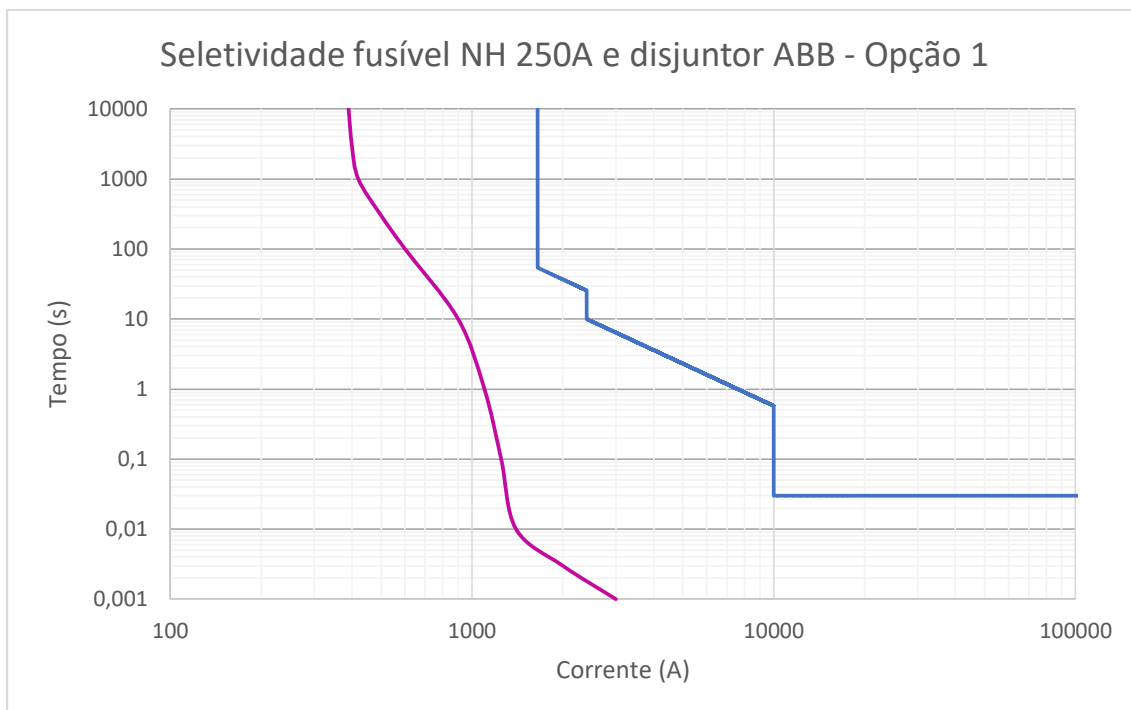


Figura 6.15 – Coordenograma Fusível NH 250 A e disjuntor ABB – Opção 1

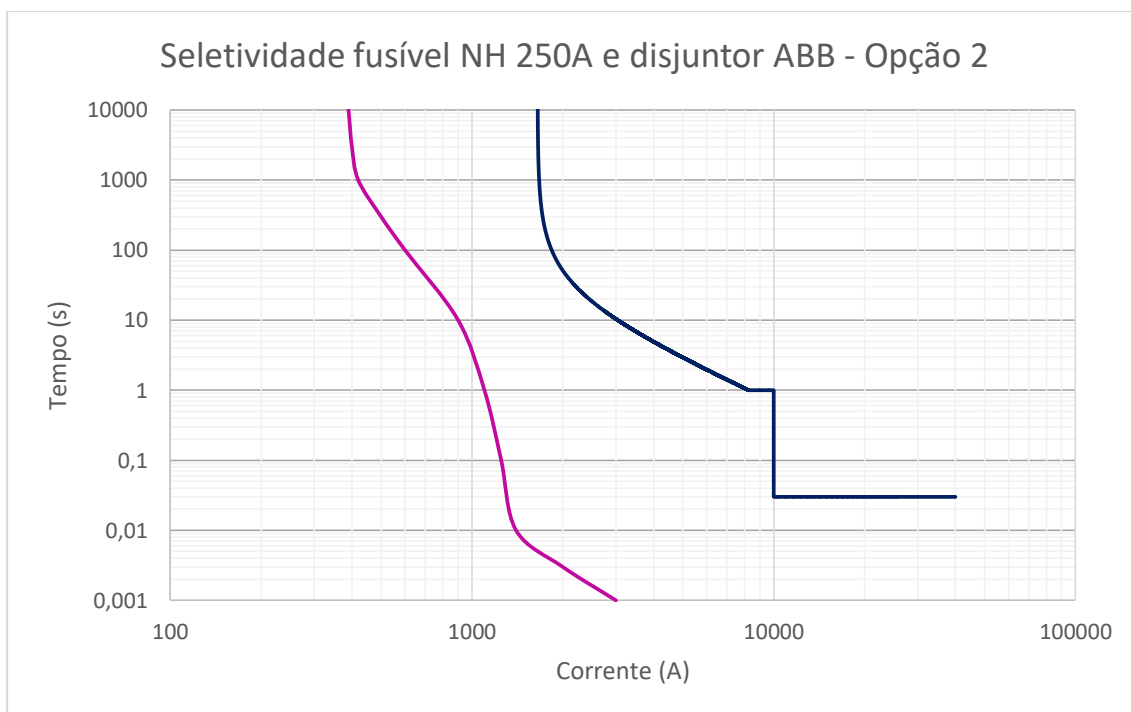


Figura 6.16 – Coordenograma Fusível NH 250 A e disjuntor ABB – Opção 2

Percebe-se que para ambas situações a curva do fusível está inteiramente abaixo da curva do disjuntor, o que garante a seletividade do sistema. Porém, a Norma Técnica de Distribuição 1.05 recomenda uma diferença mínima de 100 milissegundos (ms) entre o tempo de fusão do fusível e o ajuste

instantâneo do disjuntor. Portanto, deve-se realizar ajustes na função instantânea do disjuntor para atender as recomendações da norma.

6.4.1– Ajuste do Intervalo de Tempo de Coordenação (ITC) das funções instantâneas do relé SEL da MT e disjuntor ABB da BT

Como mencionado, para a faixa de curto-circuito, a NTD 1.05 da CEB recomenda que a curva do ajuste instantâneo do disjuntor da baixa tensão esteja pelo menos 100 ms acima do tempo de fusão do fusível presente no CBT e o ajuste instantâneo do relé da média tensão (função 50) deve estar no mínimo 150 ms acima do ajuste instantâneo do disjuntor da baixa tensão.

Para um fusível do tipo NH, o tempo de fusão máximo varia entre 4 e 5 ms, com isto, deve-se ajustar a função instantânea “I” do disjuntor ABB Tmax T8 no mínimo a 105 ms. Porém, o tempo de atuação deste ajuste é fixo com valores menores ou iguais a 30 ms. Sendo assim, faz-se necessário desabilitar o ajuste instantâneo e utilizar o ajuste de retardo curto “S” como tempo definido (relação $t=k$), para o valor de tempo necessário.

Portanto, altera-se o ajuste “S” do disjuntor ABB para tempo definido, com corrente de disparo igual a 10000 A ($5 \times I_n$) e tempo de atuação de 0,15 segundos (150 ms), valor que atende a condição estabelecida pela NTD 1.05. Nestas condições, as figuras 6.17 e 6.18 apresentam as novas curvas características dos elementos de proteção, bem como o estudo de seletividade entre os mesmos componentes.

Deve-se salientar que no caso 1, a seletividade é realizada tomando-se como base a curva de tempo inverso, a qual é indicada pela relação matemática dada por: $t=k/I^2$. Por outro lado, o caso 2, refere-se a coordenação seletiva a qual é realizada tomando-se como referência a curva Extremamente Inversa padrão IEC, a qual é indicada por: $t = DT \cdot \left(\frac{80}{M^2-1} \right)$.

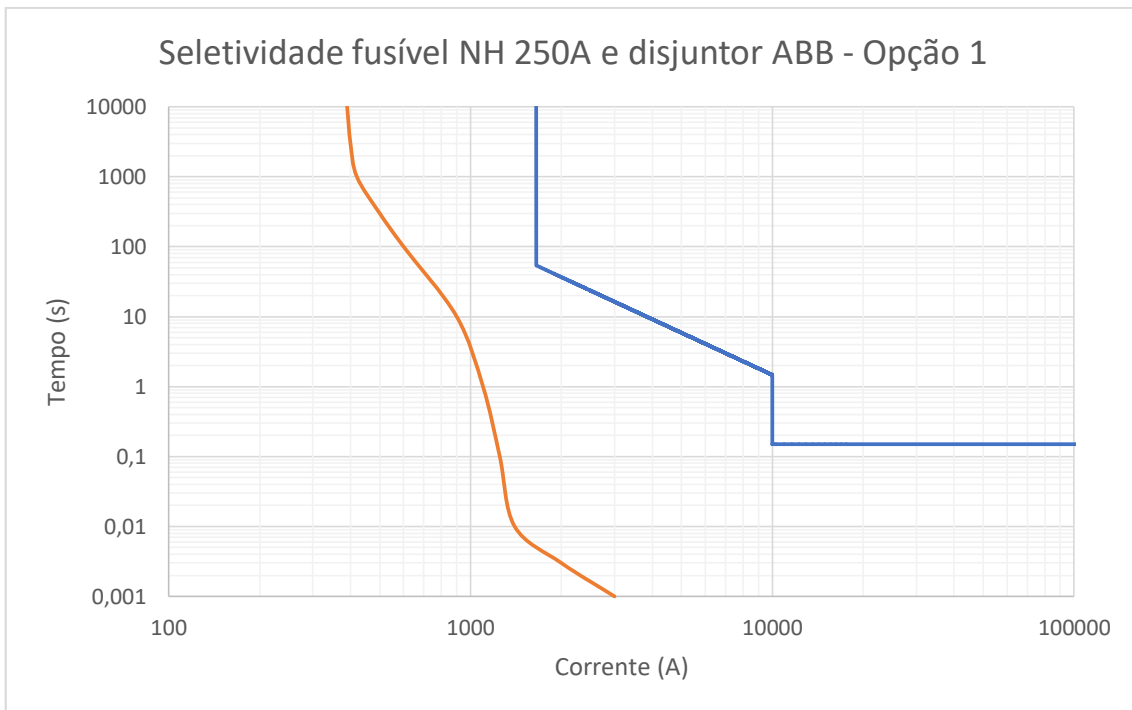


Figura 6.17 – Coordenograma Fusível NH 250 A e disjuntor ABB – Opção 1

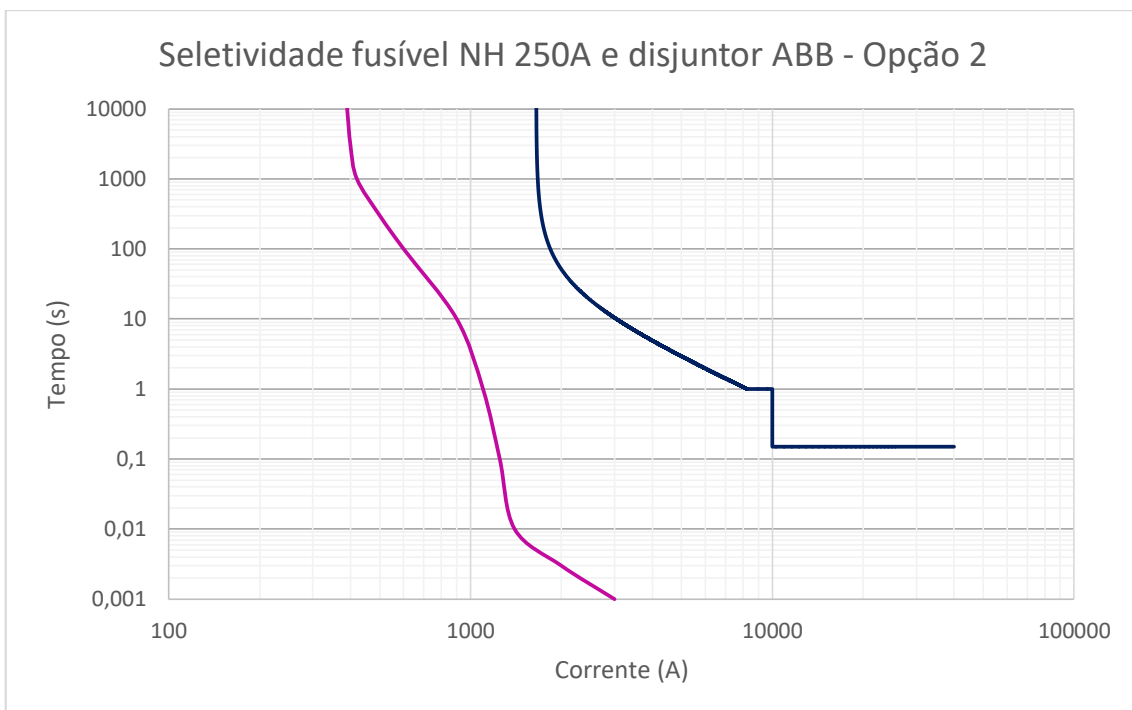


Figura 6.18 – Coordenograma Fusível NH 250 A e disjuntor ABB – Opção 2

Prosseguindo os estudos, torna-se necessário realizar a seletividade entre os elementos de proteção da BT e MT. Neste sentido, para que haja uma coordenação correta, deve-se alterar o tempo de atuação do ajuste instantâneo do relé da média tensão para atender as condições exigidas pela NTD 1.05. Portanto, foi escolhido que o tempo de atuação da função 50 do relé SEL, será

de 0,3 segundos (300 ms), valor que atende a diferença de 150 ms recomendada entre os ajustes instantâneos do disjuntor de baixa tensão e o relé de média tensão.

Ressalta-se que embora a “Opção 2” de ajuste do disjuntor ABB tenha sofrido alteração apenas no tempo de atuação do ajuste “instantâneo”, já que a corrente de disparo não mudou, a “Opção 1” possui agora um intervalo maior para o ajuste de retardo longo “L”, o que altera o ajuste de dial de tempo para curva temporizada do relé SEL, sendo necessário refazer os cálculos para um novo ponto de referência da curva do disjuntor.

Desta forma, escolhe-se o novo ponto de referência, o qual é o último ponto da curva do ajuste de retardo longo do disjuntor.

Lembrando que o ajuste escolhido para t_1 foi: t_1 igual a 6s (3xI1)

$$t = \frac{K}{I^2}$$

$$6 = \frac{K}{3^2}$$

$$K = 6 * 9$$

$$K = 54$$

Sendo a corrente de referência $I = 10000$ A.

$$I = \frac{I_r}{I_n} = \frac{10000}{1660}$$

$$I \cong 6,02$$

Portanto o tempo de atuação para essa corrente será:

$$t = \frac{K}{I^2} = \frac{54}{6,06^2}$$

$$t = 1,49s$$

Neste sentido, deseja-se que a curva temporizada do relé esteja 0,3 segundos acima da curva do disjuntor para a corrente de 10000 A no secundário do transformador. Desta forma, essa relação define o novo ITC para os ajustes

temporizados de fase. Refazendo os cálculos necessários, são encontrados os resultados da Tabela 6.2.

Corrente de referência	10000 A
Tempo de referência	1,77 s
Corrente de partida (I_p)	46,02 A
Tipo de curva	Extremamente Inversa (EI)
Múltiplo da corrente de <i>pick-up</i>	5,9834
Dial de tempo calculado	0,7701
Dial de tempo selecionado	0,78

Tabela 6.2 – Resultados para o novo ajuste da função temporizada 51 do relé SEL

Pode-se assim, plotar os coordenogramas para ambas opções de ajustes, como observado nas figuras 6.19 e 6.20.

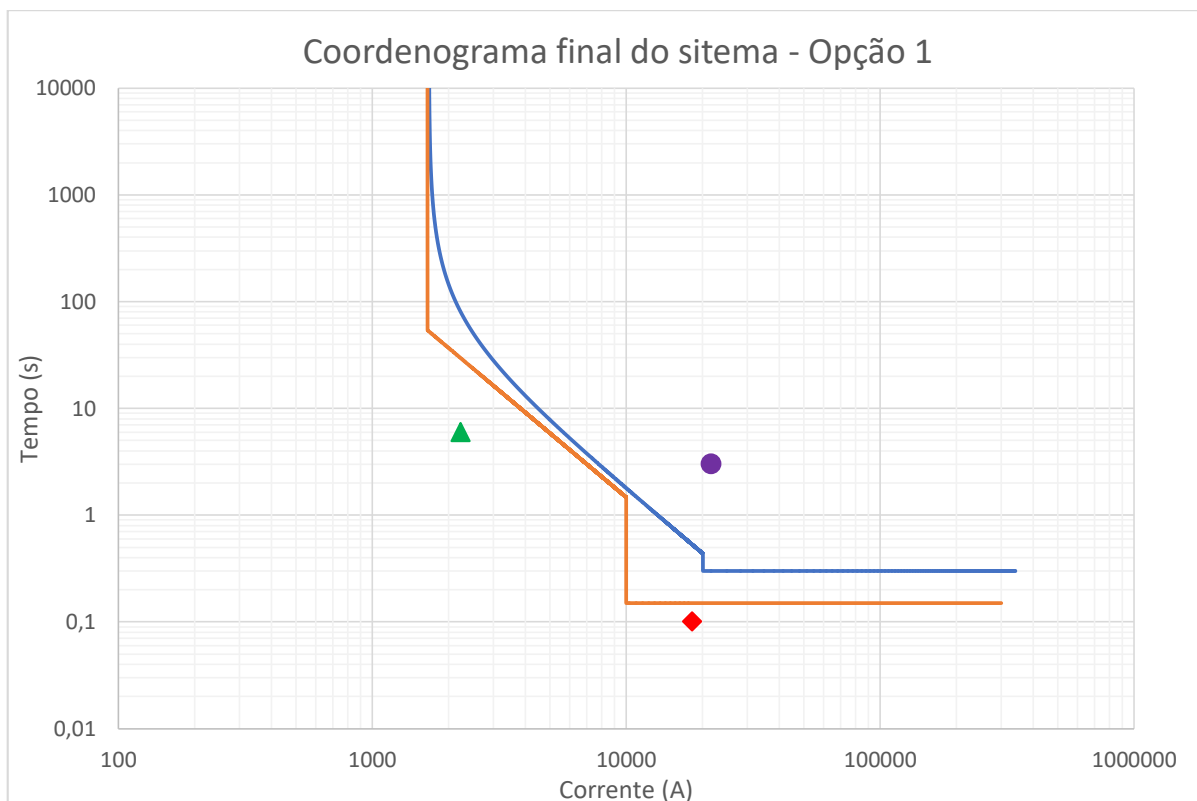


Figura 6.19 – Coordenograma final do sistema - Opção 1

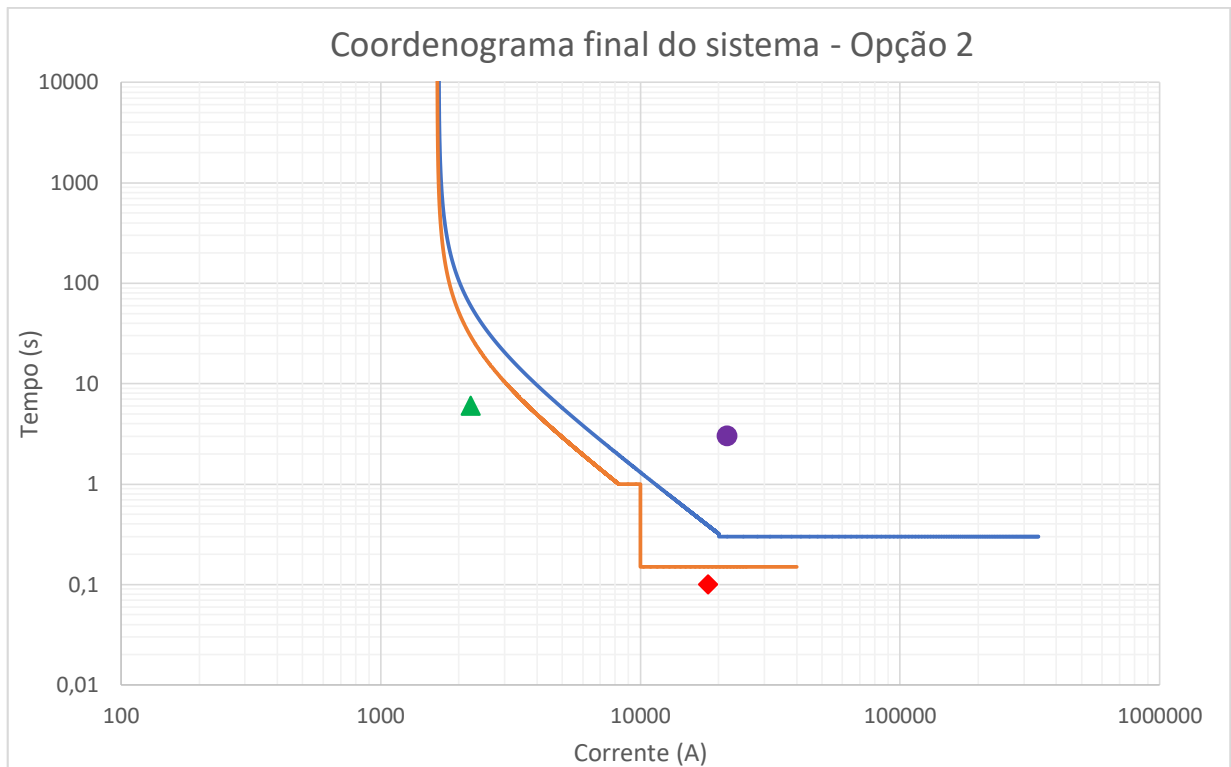


Figura 6.20 – Coordenograma final do sistema - Opção 2

Mostra-se nas figuras 6.19 e 6.20, que ambas opções de ajuste atentem as condições expostas para a corrente de magnetização (losango vermelho) e ponto ANSI (círculo roxo) do transformador e para a condição de partida de motor (triângulo verde) anteriormente analisada.

Dentro do exposto, finaliza-se o estudo de seletividade sabendo-se que os ajustes apresentados atendem tanto os requisitos recomendados pela norma NTD 1.05 quanto as condições de seletividade apresentadas durante o estudo.

6.5 Parâmetros necessários para ajustar o Relé de média tensão e disjuntor de baixa tensão

Lembrando que o sistema estudado possui as seguintes valores para as correntes de curto-circuito:

Corrente de curto-circuito trifásico no lado de média tensão (I_{CCMT}):

$$I_{CCMT} = 2091,85 A$$

Corrente de curto-circuito trifásico assimétrico (valor de pico) no lado de média tensão (I_{SMT}):

$$I_{SMT} = 5334,22 A$$

Corrente de curto-circuito trifásico no lado de baixa tensão (I_{CCBT}):

$$I_{CCBT} = 16881,59 A$$

Corrente de curto-circuito trifásico assimétrico (valor de pico) no lado de baixa tensão (I_{SBT}):

$$I_{SBT} = 43048,05 A$$

Corrente de curto-circuito monofásico no lado de baixa tensão ($I_{1\phi}$):

$$I_{1\phi} = 3376,32 A$$

Quanto as características dos disjuntores de média e baixa tensão, tem-se:

- Disjuntor de média tensão:
 - Modelo: CGMCOSMOS-V
 - Tensão nominal: 24 kV
 - Corrente nominal: 400 A

- ❖ Relé de proteção:
 - Modelo: SEL-751A
 - Fabricante: Schweitzer Engineering Laboratories (SEL)
 - Funções: ANSI 50 e 51
 - Relação de transformação do transformador de corrente utilizado: (150/5 A); RTC = 30
- Disjuntor de baixa tensão:
 - Modelo: ABB Tmax T8 2000
 - Fabricante: ABB
 - Tensão nominal: 690 V
 - Corrente nominal: 2000 A

- Opção 1 de ajuste
 - Ajuste da unidade temporizada de fase (Função 51):
 - Corrente de *pick-up* primária: 46,02 A
 - Corrente nominal do sistema no lado de média tensão:

$$I_{NPT} = 41,84 \text{ A}$$
 Fator de sobrecarga: 1,10

$$I_{ajuste51} = 1,10 \cdot 41,84$$

$$I_{ajuste51} = \mathbf{46,02 \text{ A}}$$
 - Curva de operação: Curva IEC Extremamente Inversa
 - Dial de tempo: 0,78
 - Ajuste da unidade instantânea de fase (Função 50):
 - Corrente de *pick-up* primária: 552,25 A
 - Corrente *Inrush* do transformador:

$$I_{Inrush} = 502,04 \text{ A}$$
 Fator de segurança: 10%

$$I_{ajuste50} = 1,10 \cdot 502,04$$

$$I_{ajuste50} = \mathbf{552,25 \text{ A}}$$
 - Ajustes do disjuntor ABB Tmax T8 2000

Parâmetro	Função / Ajuste
I1	Ajuste da corrente de sobrecarga (Função de proteção L): 0,83 x In
t1	Tempo de retardo da corrente I1: 6 s @ 3 x I1
I2	Corrente de disparo por curto-circuito temporizado (Função de proteção S): 5,0 x In (função ajustada como tempo definido, t=k)
t2	Tempo de retardo da corrente Is: 0,15 s @ 10 x In
I3	Corrente de disparo por curto-circuito instantâneo (Função de proteção I): OFF

Tabela 6.3 – Parâmetros e ajustes do disjuntor ABB Tmax T8 2000 – Opção 1

Parâmetro	Ajuste	Corrente ou Tempo
I1	0,825 x In	1660 A
t1	6 s (3xI1)	6 s
I2	5,0 x In	10000 A
t2	0,15 s (10xIn)	0,15 s
I3	OFF	-----

Tabela 6.4 – Valores dos ajustes realizados para o disjuntor ABB Tmax T8 2000 – Opção 1

- Opção 2 de ajuste
 - Ajuste da unidade temporizada de fase (Função 51):
 - Corrente de *pick-up* primária: 46,02 A
 - Corrente nominal do sistema no lado de média tensão:

$$I_{NPT} = 41,84 \text{ A}$$

Fator de sobrecarga: 1,10

$$I_{ajuste51} = 1,10 \cdot 41,84$$

$$I_{ajuste51} = \mathbf{46,02 \text{ A}}$$

- Curva de operação: Curva IEC Extremamente Inversa
- Dial de tempo: 0,57

- Ajuste da unidade instantânea de fase (Função 50):
 - Corrente de *pick-up* primária: 552,25 A
 - Corrente *Inrush* do transformador:

$$I_{Inrush} = 502,04 \text{ A}$$

Fator de segurança: 10%

$$I_{ajuste50} = 1,10 \cdot 502,04$$

$$I_{ajuste50} = \mathbf{552,25 \text{ A}}$$

- Ajustes do disjuntor ABB Tmax T8 2000

Parâmetro	Função / Ajuste
I1	Ajuste da corrente de sobrecarga (Função de proteção L): 0,83 x In
t1	Tempo de retardo da corrente I1: 3 s @ 3 x I1
I2	Corrente de disparo por curto-circuito temporizado (Função de proteção S): 5,0 x In (função ajustada como tempo definido, t=k)
t2	Tempo de retardo da corrente Is: 0,15 s
I3	Corrente de disparo por curto-circuito instantâneo (Função de proteção I): OFF

Tabela 6.5 - Parâmetros e ajustes do disjuntor ABB Tmax T8 2000 – Opção 2

Parâmetro	Ajuste	Corrente ou Tempo
I1	0,825 x In	1660 A
tr	3 s (3xI1)	3 s
I2	5 x In	10000 A
t2	0,15 s	0,15 s
I3	OFF	-----

Tabela 6.6 - Valores dos ajustes realizados para o disjuntor ABB Tmax T8 2000 – Opção 2

- Ajustes das funções 51N e 50N do rele SEL e ajuste de falta à terra do disjuntor de baixa tensão
 - Ajuste da unidade temporizada de neutro (Função 51N):

- Corrente de *pick-up* de neutro: 15,34 A

- Corrente de *pick-up* primária:

$$I_{ajuste51} = 46,02 \text{ A}$$

- Corrente de *pick-up* de neutro:

$$I_{ajuste51N} = 0,33 \cdot 46,02$$

$$I_{ajuste51} = \mathbf{15,34 \text{ A}}$$

- Curva de operação: Tempo definido
- Tempo de operação: 2 segundos
- Ajuste da unidade instantânea de neutro (Função 50N):
 - Corrente de *pick-up* de neutro: 184,08 A
 - Corrente *Inrush* do transformador:

$$I_{Inrush} = 502,04 A$$

- Corrente *Inrush* de neutro:

$$I_{InrushN} = 0,33 * 502,04 A$$

$$I_{InrushN} = 167,35 A$$

Fator de segurança: 10%

$$I_{ajuste50N} = 1,10 * 167,35 A$$

$$I_{ajuste50N} = \mathbf{184,08 A}$$

- Ajuste de falta à terra do disjuntor ABB Tmax T8 2000

Parâmetro	Função / Ajuste
I4	Ajuste da corrente de falta à terra (Função de proteção G): 0,4 x In
t4	Tempo de retardo da corrente I4: 0,15 s

Tabela 6.7 – Parâmetros e ajustes para a função de falta à terra do disjuntor ABB Tmax T8 2000

Parâmetro	Ajuste	Corrente ou Tempo
I4	0,4 x In	800 A
t4	0,15 s	0,15 s

Tabela 6.8 – Valores dos ajustes para a função de falta à terra do disjuntor ABB Tmax T8 2000

7. Estudo da seletividade da proteção para outros modelos de disjuntor no lado BT

7.1 Estudo de seletividade com o disjuntor WEG ACW1600H-AG1 1600-3

Com o estudo de seletividade apresentado, pode-se escolher disjuntores de outros fabricantes para a proteção no lado de baixa tensão e verificar se os mesmos seriam seletivos para os equipamentos do lado de média tensão do sistema, apesar de não possuírem os valores de corrente nominal de 2000 A e ajuste em 1650 A exigidos pela norma de CEB.

7.1.1 Verificação dos critérios para escolha do disjuntor

$$\text{Critérios para } 380 \text{ V} \begin{cases} I_{ND2} > I_{NST} \\ I''_{kD2} > I''_{kBT} \\ I_{SD2} > I_{SBT} \end{cases}$$

I_{ND2} : corrente nominal do disjuntor de baixa tensão

I''_{kD2} : corrente admissível nominal de curta duração do disjuntor de baixa tensão

I_{SD2} : corrente admissível nominal de curta duração (valor de pico) do disjuntor de baixa tensão

$$I_{ND2} > 1519,34 \text{ A}$$

$$I''_{kD2} > 16881,59 \text{ A}$$

$$I_{SD2} > 43048,05 \text{ A}$$

Utilizando o Disjuntor WEG ACW1600H-AG1 1600-3 como alternativa para a proteção na baixa tensão, temos os seguintes dados para esse equipamento, de acordo com o catálogo (WEG,2018, ACW Disjuntores em Caixa Moldada).

$$I_{ND2} = 1600 \text{ A} \quad \text{OK!}$$

$$I''_{kD2} = 70 \text{ kA} \quad OK!$$

$$I_{sD2} = 150 \text{ kA} \quad OK!$$

Os ajustes do disjuntor do disparador AG1 do disjuntor WEG ACW1600H-AG1 1600-3 encontrados no catálogo, são vistos na Tabela 5.1.

Parâmetro	Função / Faixa de ajuste
lu	Ajuste da corrente de sobrecarga (0,5-0,6-0,7-0,8-0,9-1,0) x In
lr	Ajuste da corrente de sobrecarga (função de proteção L) (0,8-0,83-0,85-0,88-0,89-0,9-0,93-0,95-0,98-1,0) x lu
tr	Tempo de retardo da corrente lr (0,5-1-2-4-8-12-16-20-OFF) s @ 6xlr
ls	Corrente de disparo por curto-circuito temporizado (Função de proteção S) (1,5-2-3-4-5-6-7-8-9-10-OFF) x lr
tsd	Tempo de retardo da corrente ls I ² t OFF (0,05-0,1-0,2-0,3-0,4) s I ² t ON (0,1-0,2-0,3-0,4) s
li	Corrente de disparo por curto-circuito instantâneo (Função de proteção I) (2-3-4-6-8-10-12-15-OFF) x In
lg	Corrente de detecção de falta à terra (Função de proteção G) (0,2-0,3-0,4-0,5-0,6-0,7-0,8-1-OFF) x In
tg	I ² t OFF (0,05-0,1-0,2-0,3-0,4) s I ² t ON (0,1-0,2-0,3-0,4) s

Tabela 7.1 – Parâmetros e faixas de ajustes do disjuntor WEG ACW1600H-AG1 1600-3

Curvas dos ajustes de Retardo Longo e Retardo Curto do disparador AG1 retiradas do catálogo:

Retardo Longo (L)

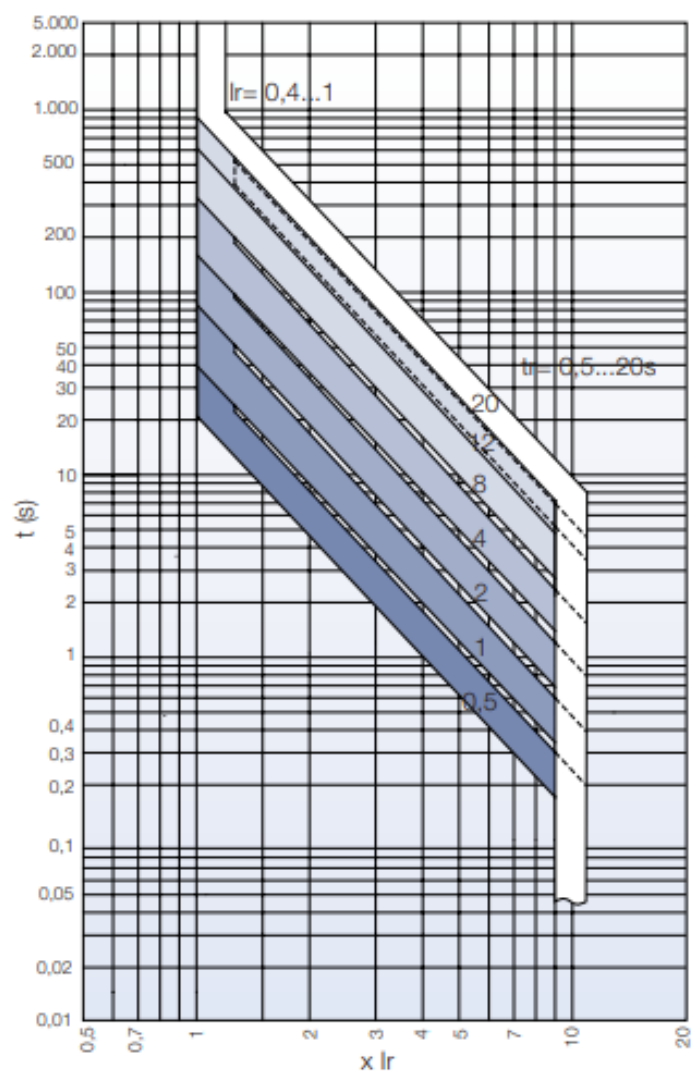


Figura 7.1 – Curva de Retardo Longo do disjuntor WEG ACW1600H-AG1 1600-3

Retardo Curto (S)

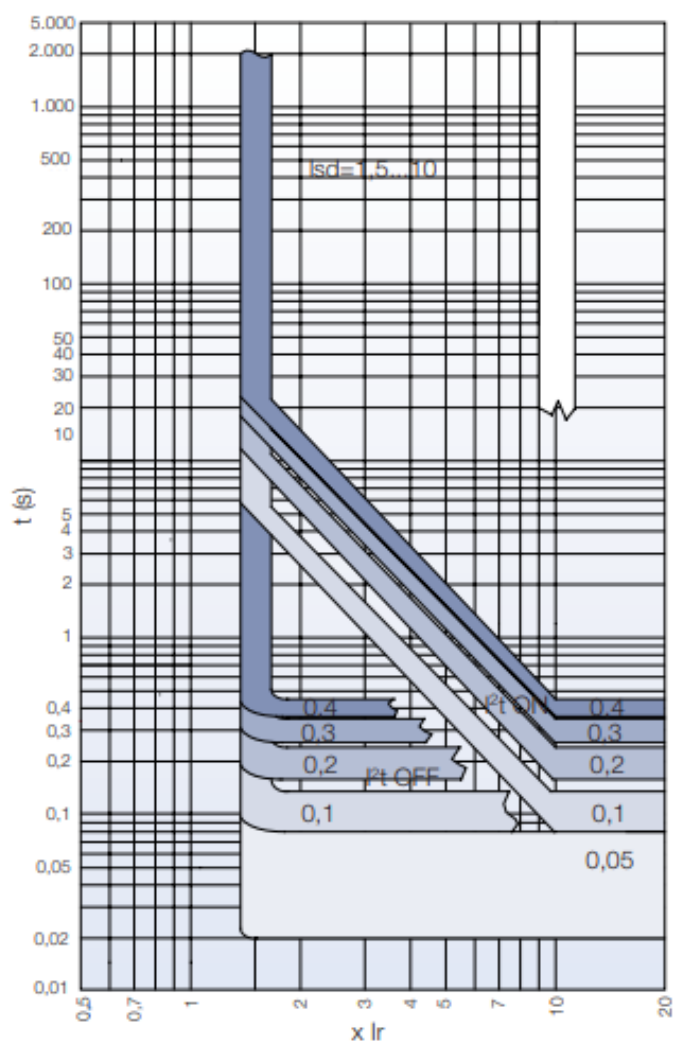


Figura 7.2 – Curva de Retardo Curto do disjuntor WEG ACW1600H-AG1 1600-3

Instantâneo (I) - Falta a Terra (G)

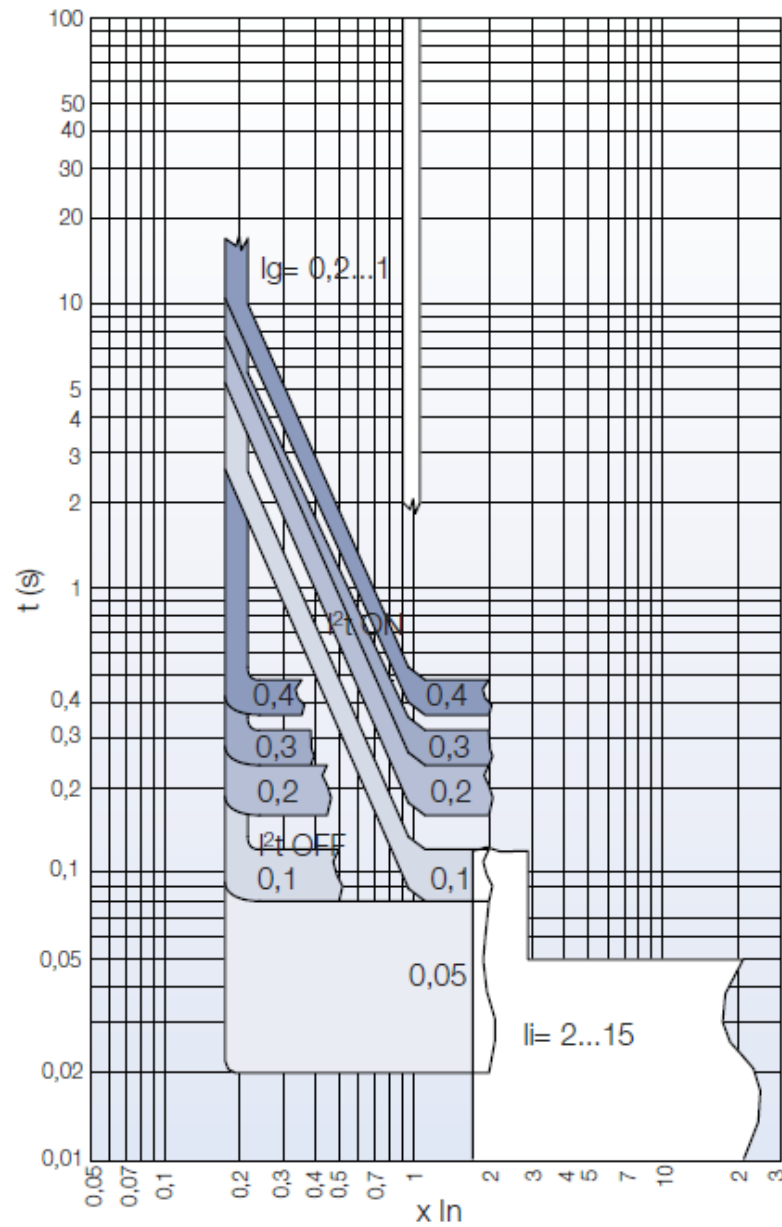


Figura 7.3 – Curvas ajuste Instantâneo e de Falta à terra do disjuntor WEG
ACW1600H-AG1 1600-3

Com os ajustes e curvas do disjuntor disponíveis pode-se verificar a seletividade deste equipamento com a proteção da média tensão do sistema.

7.1.2 Ajustes do disjuntor WEG

Com o apresentado, foi selecionado os ajustes para o disjuntor de baixa tensão (WEG), baseado na Tabela 5.1:

$$I_u = 1 (xI_n) - 1600A$$

$$I_r = 1 (xI_u) - 1600A$$

$t_r = 2$ s (para $6xI_r$) – Valor escolhido buscando evitar a atuação indevida da proteção em um caso de partida de motor.

$$I_s = 1,5 (xI_r) - 2400 A$$

$$T_{sd} = 0,1 \text{ s (I}^2\text{t OFF)}$$

$$I_i = 8 (xI_r) - 12800 A$$

$$I_g = 0,4 (xI_n) - 640 A$$

$$t_g = 0,2 \text{ s}$$

Por meio de uma análise da Figura 5.1, foi possível determinar que a função de proteção L (Retardo longo) é dada pela Equação 5.1, a mesma que determina a função L do disjuntor ABB:

$$t = K/I^2 \quad (5.1)$$

Onde:

t = tempo;

K = constante definida pelo ajuste de t_r ;

I = valor múltiplo da corrente;

Portanto para o ajuste escolhido tem-se:

$$2 = \frac{K}{6^2}$$

$$K = 4 * 36$$

$$K = 72$$

Com isso foi possível reproduzir a curva escolhida, como visto na Figura 5.3.

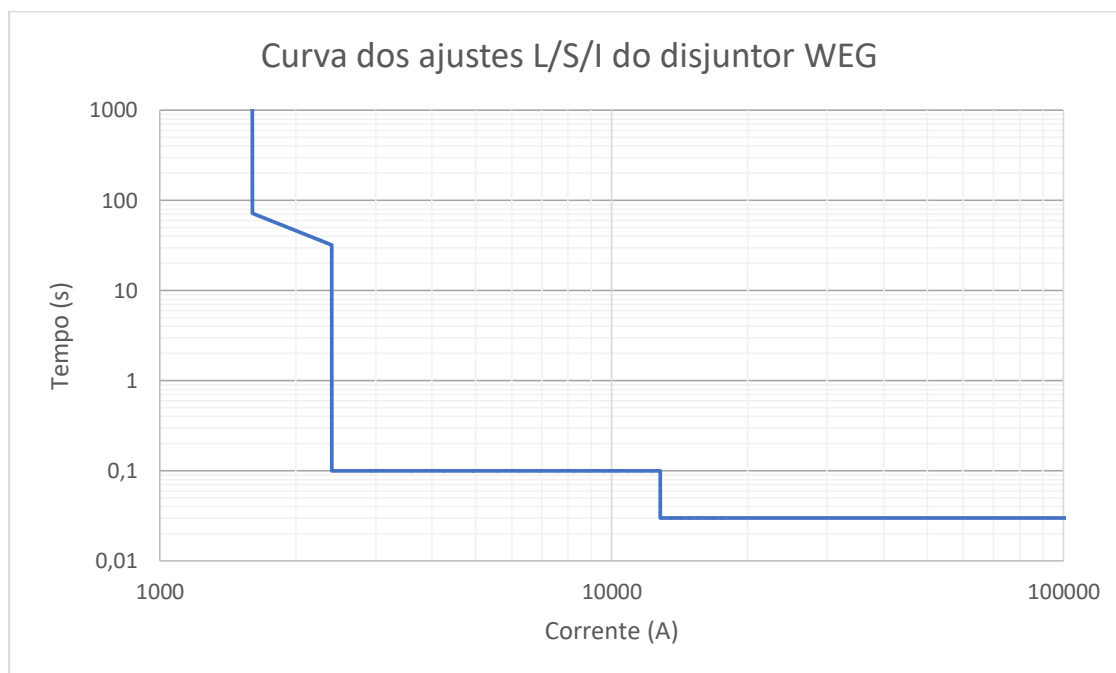


Figura 7.4 – Curva do disjuntor WEG ACW1600H-AG1 1600-3

7.1.3 Ajustes do relé se média tensão

Como não houve alteração no transformador da subestação, os ajustes de corrente de partida para as funções de Sobrecorrente 50 e 51 não sofrerão alterações, sendo necessário apenas alterar o Dial de Tempo utilizado para a função 51. Portanto, tem-se para o ajuste de Sobrecorrente 51:

O fator de sobrecarga escolhido foi de 1,10.

Com isso:

$$I_{ajuste51} = 1,10 \cdot 41,84$$

$$I_{ajuste51} = 46,02 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51} = I_{pick-up} = I_{partida}$$

É necessário referir a corrente de ajuste do relé para o secundário do transformador para implementação no coordenograma.

$$I'_{ajuste51} = 46,02 \cdot \frac{13800}{380}$$

$$I'_{ajuste51} = 1671,28 \text{ A}$$

Para o relé instantâneo de fase (função 50):

$$I_{Inrush} = 12 \cdot 41,8$$

$$I_{Inrush} = 502,04 \text{ A}$$

Utiliza-se um fator de segurança para que essa proteção instantânea não atue para a energização do transformador, esse fator deve ser no máximo 10% maior que a corrente de *Inrush* do transformador. Portanto, o fator de segurança escolhido para essa situação foi de 10%.

$$I_{ajuste50} = 1,10 \cdot 502,04$$

$$I_{ajuste50} = 552,25 \text{ A}$$

Referindo a corrente de ajuste do relé 50 para o lado secundário do transformador:

$$I'_{ajuste50} = 552,25 \cdot \frac{13800}{380}$$

$$I'_{ajuste50} = 20055,33 \text{ A}$$

Com os ajustes dos relés 50 e 51 selecionados, deseja-se encontrar o valor de dial de tempo que será utilizado para esse caso.

Sabe-se que a curva IEC Extremamente Inversa é dada por:

$$t = TD \cdot \left(\frac{80}{M^2 - 1} \right) \quad (3.3)$$

Onde M é o múltiplo da corrente de *pick-up*, dada por:

$$M = \frac{I}{I_{partida}} \quad (3.4)$$

Como mencionado anteriormente, utiliza-se um ponto de referência da curva do disjuntor WEG para determinar o Dial de tempo da função 51. Para este caso foi escolhido o ponto no qual a curva muda do ajuste L para o S em 2400 A. Com isso, encontra-se o tempo em que o disjuntor atua para este ponto:

$$t = \frac{72}{\left(\frac{2400}{1600}\right)^2} = 32 \text{ s}$$

Deseja-se que a curva temporizada de Sobrecorrente do relé atue 4,5 segundos acima da curva do disjuntor WEG para o ponto de 2400 A (na baixa tensão). Desta forma temos que:

$$M = \frac{2400 \cdot (380/13800)}{46,02} = 1,4360$$

Utiliza-se então, este valor de M, para encontrar o DT.

$$t = DT \cdot \left(\frac{80}{M^2 - 1}\right)$$

$$DT = t \cdot \left(\frac{M^2 - 1}{80}\right)$$

$$DT = 36,5 \cdot \left(\frac{1,4360^2 - 1}{80}\right)$$

$$DT = 0,4846$$

O dial de tempo (DT) calculado é arredondado para o valor mais próximo entre os ajustes disponíveis no equipamento, portanto, tem-se DT = 0,49 e a seguinte curva para estes ajustes:

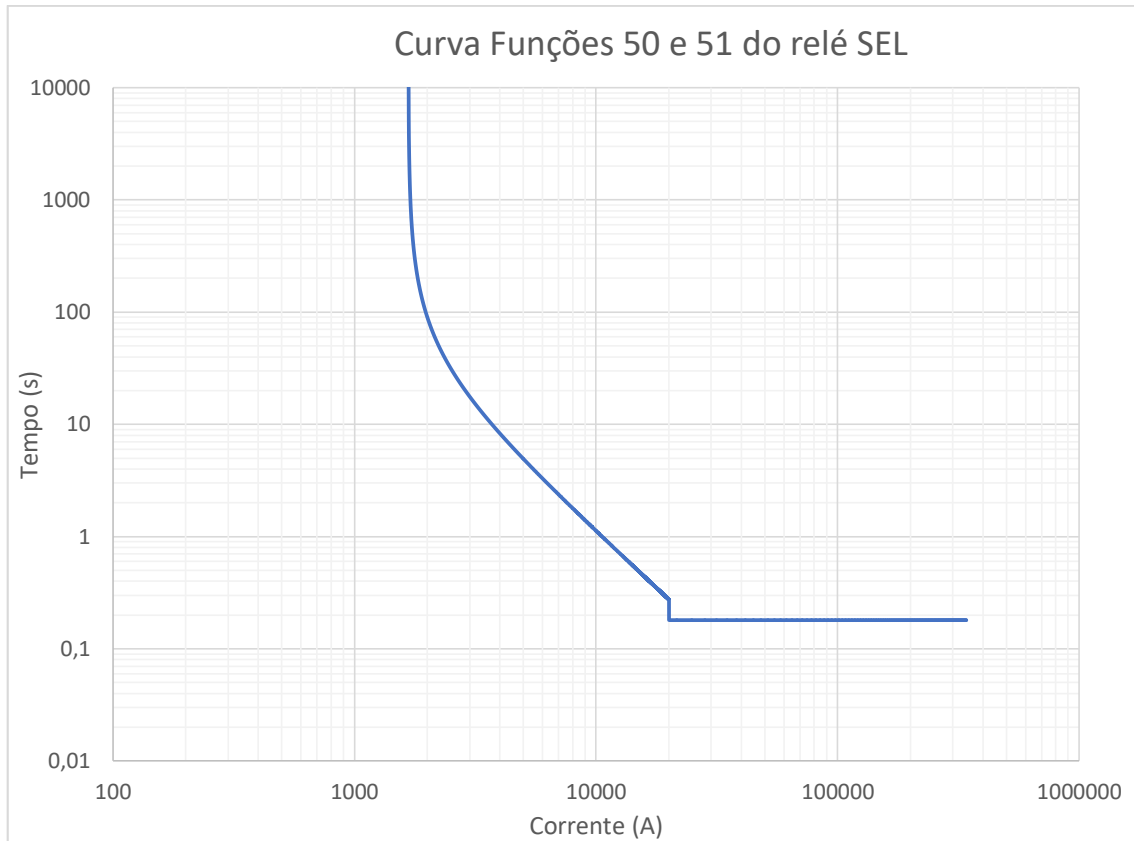


Figura 7.5 – Curva das Funções 50 e 51 do relé SEL

Assim, junta-se ambas as curvas em um único coordenograma para verificação da seletividade lembrando que as considerações para energização do transformador, Ponto ANSI e partida de um motor ainda valem para este caso e são:

$$I_{Inrush} = 502,04 \text{ A}$$

$$I'_{Inrush} = 18232,11 \text{ A}$$

$$\text{Ponto ANSI} = 597,67 \text{ A}$$

$$\text{Ponto ANSI}' = 21704,90 \text{ A}$$

$$I_{partida} = 810,32 \text{ A}$$

$$I_{total} = I_{partida} + 14 \cdot I_C$$

$$I_{total} = 2228,37 \text{ A}$$

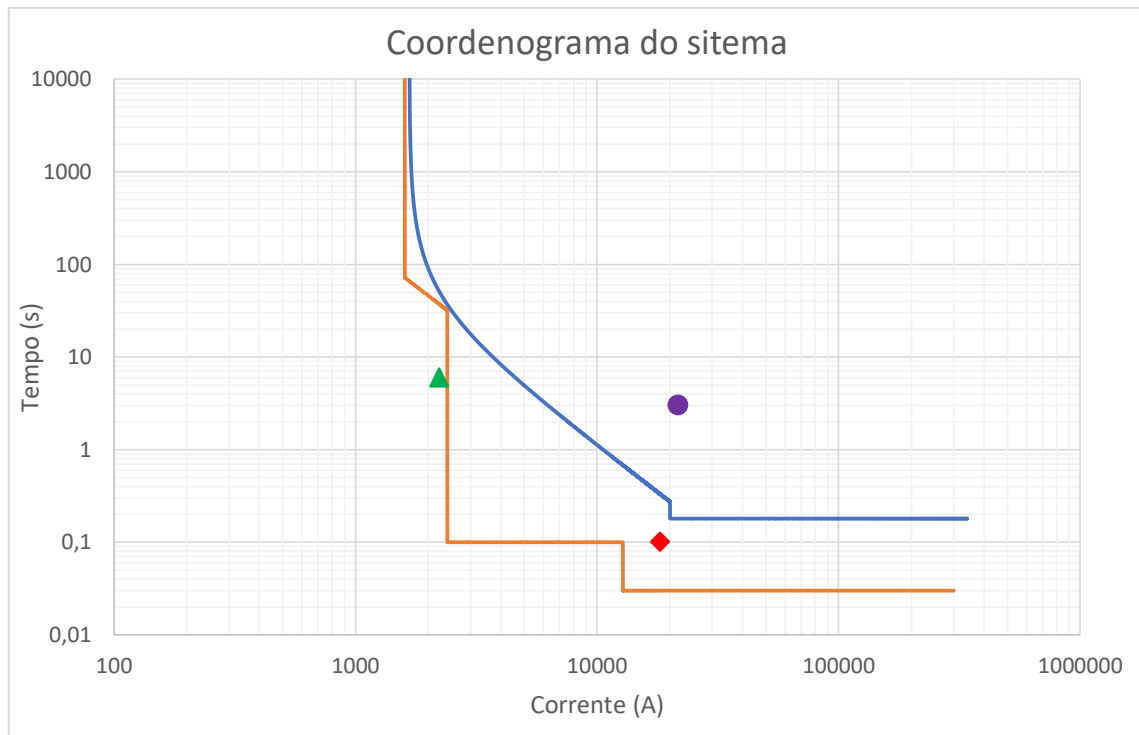


Figura 7.6 – Coordenograma do sistema para o disjuntor WEG no lado de BT

Como visto na figura 5.5, os ajustes utilizados atendem as considerações necessárias para seletividade do sistema, embora seria necessário alterar os ajustes coordenação das funções instantâneas como foi feito para o disjuntor ABB.

7.1.4 Curvas da proteção de falta à terra do disjuntor em BT

De acordo com os ajustes escolhidos no item 5.2 e com a tabela 5.1, temos a seguinte curva do ajuste G para o disparador AG1.

$$I_g = 0,4 (xI_n) - 640 \text{ A}$$

$$t_g = 0,2 \text{ s (I}^2\text{t OFF)}$$

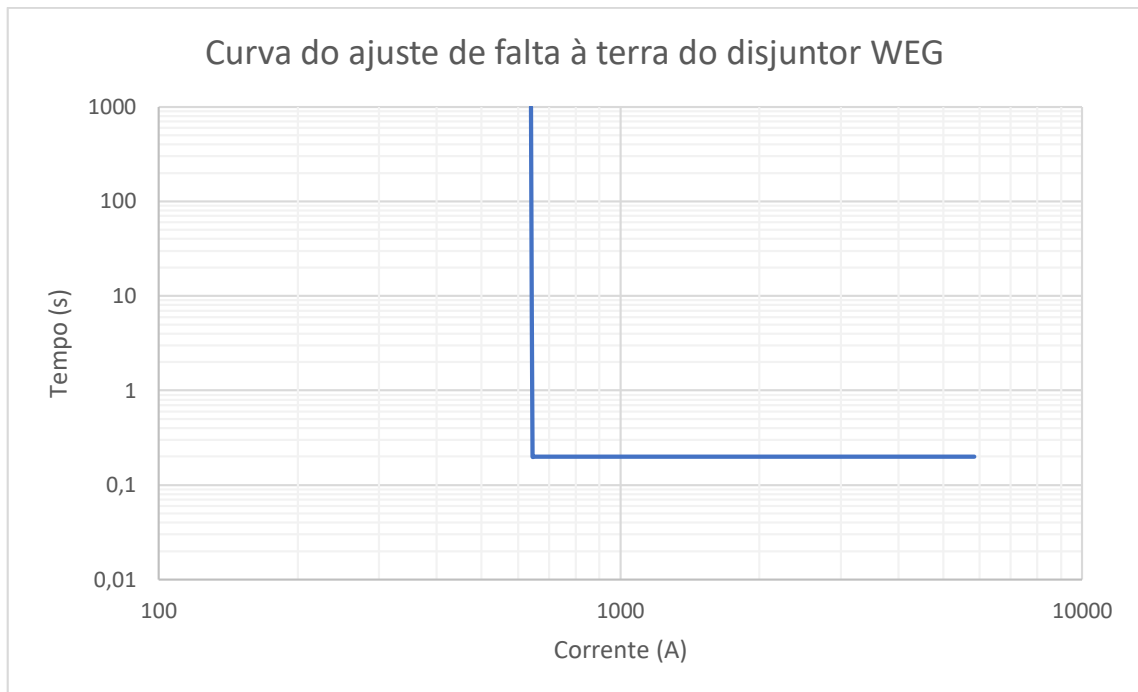


Figura 7.7 – Ajuste de falta à terra do disjuntor WEG

Como já mencionado anteriormente, não há necessidade de realizar a coordenação do ajuste de falta à terra do disjuntor com as funções 51N e 50N do relé de média tensão.

7.2 Estudo de seletividade com o disjuntor de caixa aberta Siemens 3WL 2000 A

Pode-se repetir o processo para o disjuntor Siemens, e assim, verificar se o mesmo se adequa as considerações de seletividade exigidas.

7.2.1 Verificação dos critérios para escolha do disjuntor

$$\text{Critérios para } 380 \text{ V} \begin{cases} I_{ND2} > I_{NST} \\ I''_{kD2} > I''_{kBT} \\ I_{sD2} > I_{sBT} \end{cases}$$

I_{ND2} : corrente nominal do disjuntor de baixa tensão

I''_{kD2} : corrente admissível nominal de curta duração do disjuntor de baixa tensão

I_{SD2} : corrente admissível nominal de curta duração (valor de pico) do disjuntor de baixa tensão

$$I_{ND2} > 1519,34 A$$

$$I''_{kD2} > 16881,59 A$$

$$I_{SD2} > 43048,05 A$$

Utilizando o Disjuntor Siemens 3WL como alternativa para a proteção na baixa tensão, temos os seguintes dados para esse equipamento, de acordo com o catálogo (SENTRON, 2017, Disjuntores abertos 3WL).

$$I_{ND2} = 2000 A \quad OK!$$

$$I''_{kD2} = 55 kA \quad OK!$$

$$I_{SD2} = 121 kA \quad OK!$$

Ressalta-se que os valores de capacidade de interrupção do disjuntor, variam de acordo com a tensão nominal de operação do disjuntor, com o tamanho do disjuntor escolhido (disponível em três tamanhos: I, II e III), e com o tipo de capacidade, sendo estas: N (capacidade de interrupção ECO N), S (capacidade de interrupção padrão S), H (alta capacidade de interrupção H) e C (capacidade de interrupção muito elevada C). Desta forma, os valores escolhidos foram baseados no disjuntor de tamanho I, tensão de operação de 415 Vca, e capacidade de interrupção N.

Este modelo de disjuntor oferece a possibilidade de escolha entre 5 disparadores eletrônicos distintos. Portanto foi escolhido o qual possui todas as funções L, S, I e G com o maior range de ajustes possíveis, sendo que o disparador de modelo ETU45B atende estas considerações. Assim, os ajustes disponíveis para o disparador ETU45B encontrados no catálogo, são vistos na Tabela 6.1.

Parâmetro	Função / Faixa de ajuste
I_R	Ajuste da corrente de sobrecarga (função de proteção L) (0,4-0,45-0,5-0,55-0,6-0,65-0,7-0,8-0,9-1,0) $\times I_N$
t_R	Tempo de retardo da corrente I_R (2-3,5-5,5-8-10-14-17-21-25-30) s @ 6 $\times I_R$
I_{sd}	Corrente de disparo por curto-circuito temporizado (Função de proteção S) (1,25-1,5-2-2,5-3-4-6-8-10-12) $\times I_N$
t_{sd}	Tempo de retardo da corrente I_{sd} I ² t OFF (0,02-0,1-0,2-0,3-0,4) s I ² t ON (0,1-0,2-0,3-0,4) s @ 12 $\times I_R$
I_i	Corrente de disparo por curto-circuito instantâneo (Função de proteção I) (1,5-2,2-3-4-6-8-10-12-MAX (20 $\times I_N$ até 50kA)-OFF) $\times I_N$
G	Corrente de detecção de falta à terra (Função de proteção G) A (100 A) – B (300 A) – C (600 A) – D (900 A) – E (1200 A) - OFF
t_g	I ² t OFF (0,1-0,2-0,3-0,4-0,5) s I ² t ON (0,1-0,2-0,3-0,4-0,5) s

Tabela 7.2 – Parâmetros e faixas de ajustes do disparador Siemens ETU45B

Curvas dos ajustes L, S, I e G retiradas do manual de instalação do disjuntor Siemens 3WL.

Disparo L

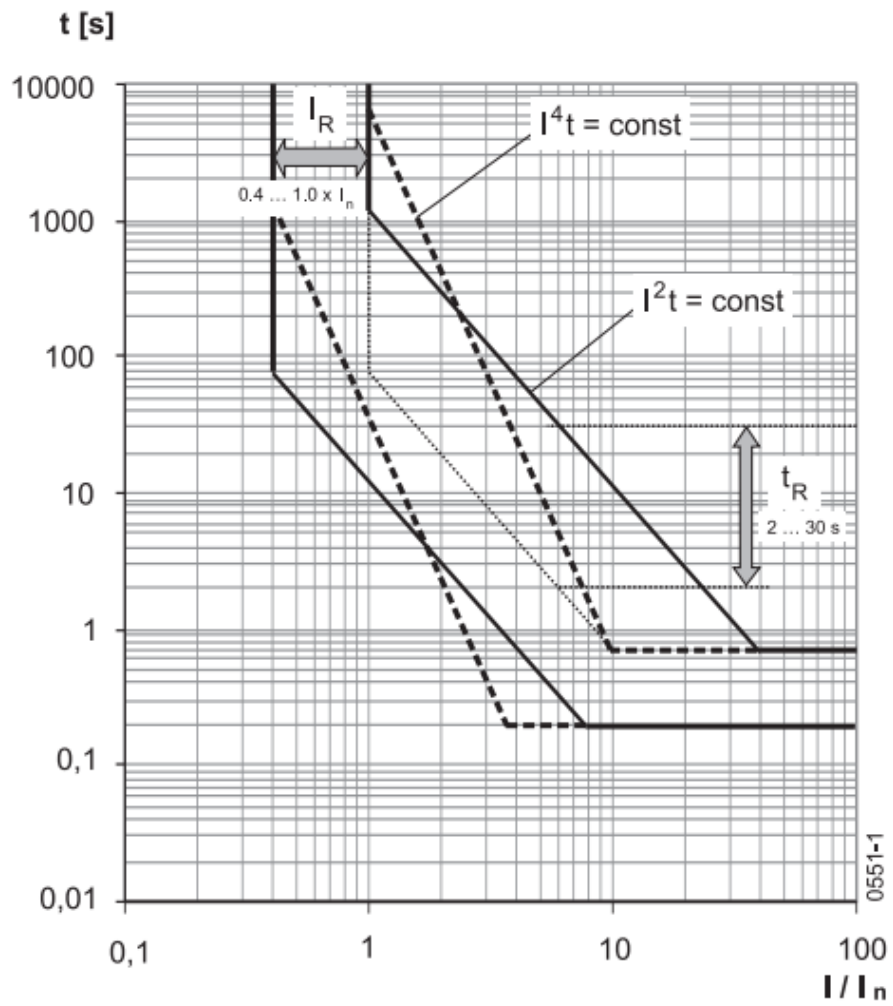


Figura 7.8 – Curva de Retardo Longo (Função L) do disparador ETU45B

Disparo S

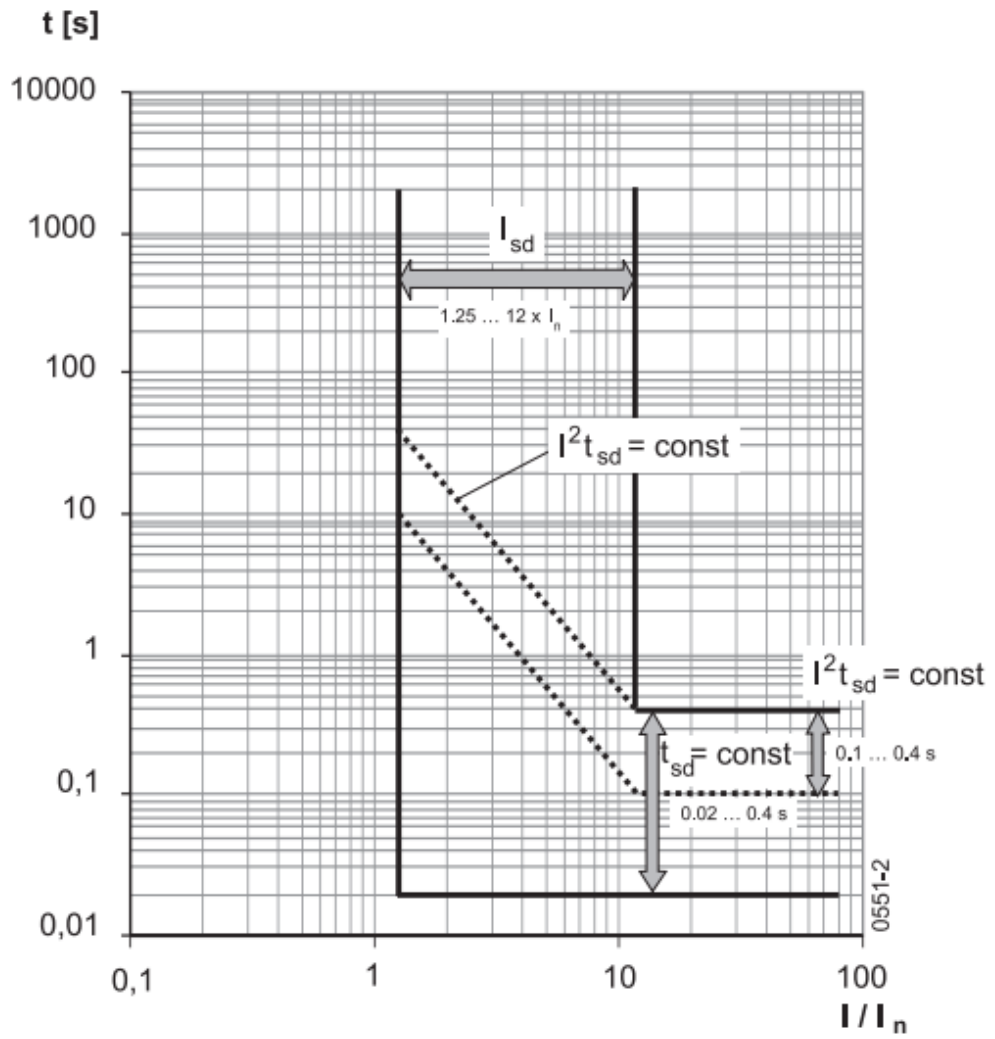


Figura 7.9 – Curva de Retardo Curto (Função S) do disparador ETU45B

Disparo I

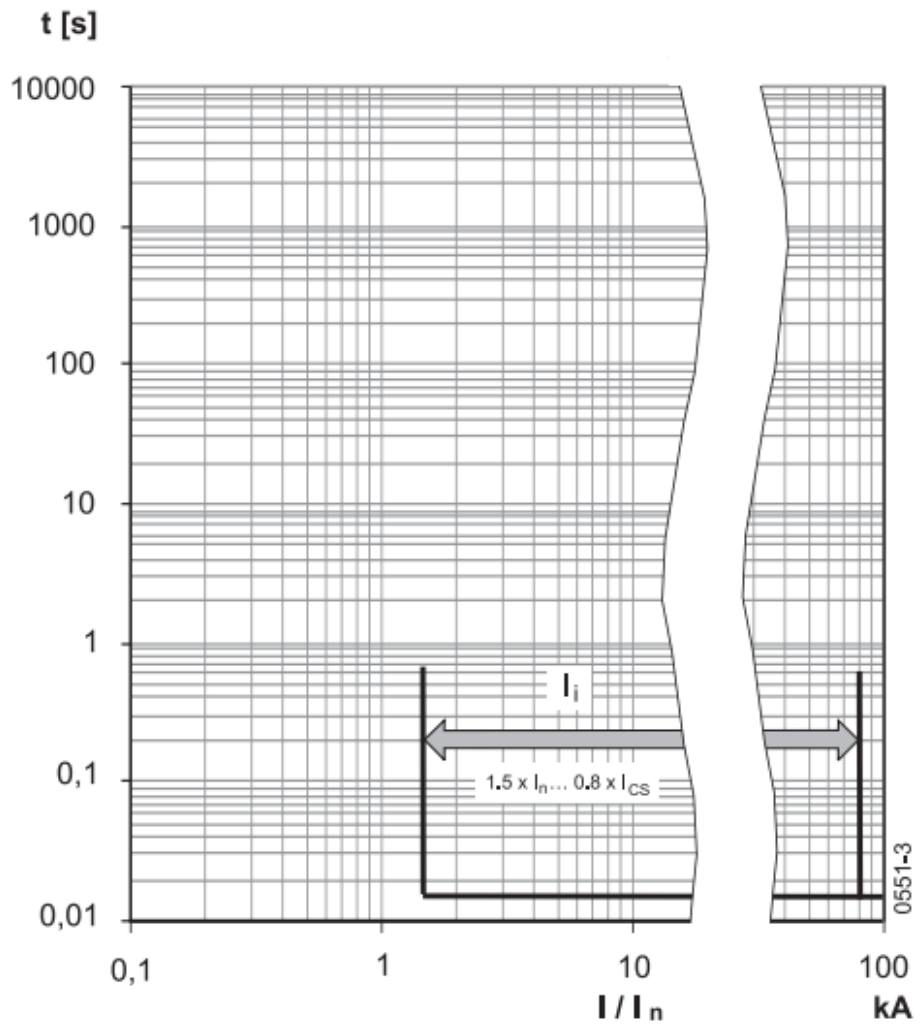


Figura 7.10 – Curva Instantânea (Função I) do disparador ETU45B

Disparo de defeito à terra

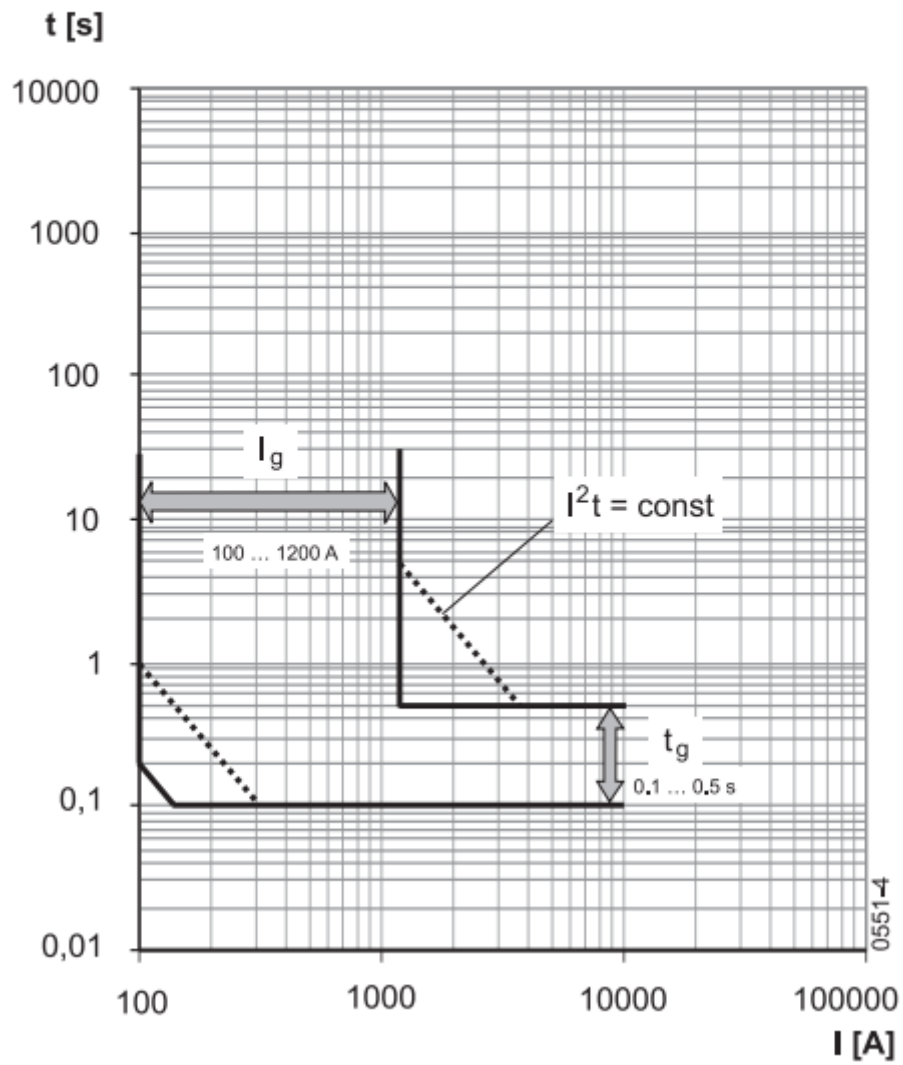


Figura 7.11 – Curva de falta à terra (Função G) do disjuntor ETU45B

Com os ajustes e curvas do disjuntor disponíveis pode-se verificar a seletividade deste equipamento com a proteção da média tensão do sistema.

7.2.2 Ajustes do disjuntor Siemens

Com o apresentado, foi selecionado os ajustes para o disjuntor de baixa tensão (Siemens), baseado na Tabela 6.1:

$$I_R = 0,8 (x I_N) - 1600A$$

$t_R = 2$ s (para $6 x I_R$) – Valor escolhido buscando evitar a atuação indevida da proteção em um caso de partida de motor.

$$I_{sd} = 1,25 (x I_N) - 2500 A$$

$$t_{sd} = 0,1 \text{ s (I}^2\text{t ON)}$$

$$I_i = 6 (x I_N) - 12000 A$$

$$G = D - 900 A$$

$$t_g = 0,2 \text{ s (I}^2\text{t OFF)}$$

Por meio de uma análise da Figura 6.1, foi possível determinar que a função de proteção L (Retardo longo) é dada pela Equação 5.1, a mesma que determina a função L do disjuntor ABB:

$$t = K/I^2 \quad (5.1)$$

Onde:

t = tempo;

K = constante definida pelo ajuste de t_R ;

I = valor múltiplo da corrente;

Portanto para o ajuste escolhido tem-se:

$$2 = \frac{K}{6^2}$$

$$K = 4 * 36$$

$$K = 72$$

Com isso foi possível reproduzir a curva escolhida, como visto na Figura 6.5.

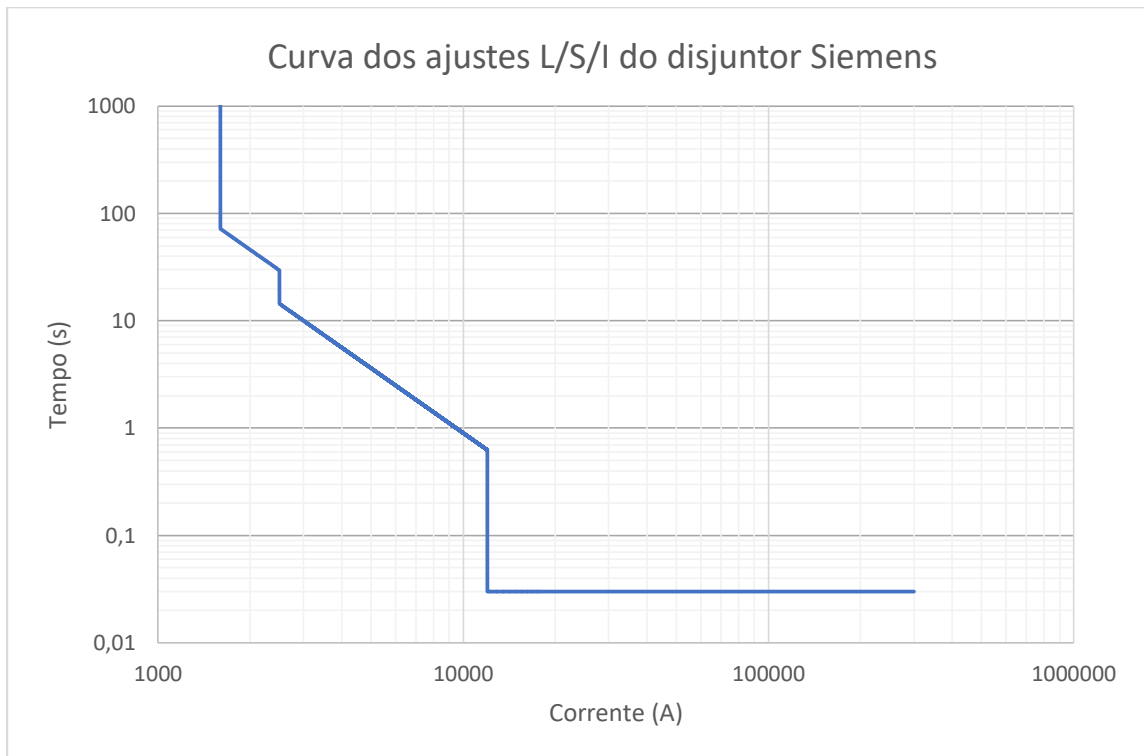


Figura 7.12 – Curva dos ajuste L/S/I escolhidos para o disjuntor Siemens e disparador ETU45B

7.2.3 Ajustes do relé se média tensão

Da mesma maneira como no caso do disjuntor WEG, não houve alteração no transformador da subestação. Portanto, os ajustes de corrente de partida para as funções de Sobrecorrente 50 e 51 não sofrerão alterações, sendo necessário apenas alterar o Dial de Tempo utilizado para a função 51. Portanto, tem-se para o ajuste de Sobrecorrente 51:

O fator de sobrecarga escolhido foi de 1,10.

Com isso:

$$I_{ajuste51} = 1,10 \cdot 41,84$$

$$I_{ajuste51} = 46,02 \text{ A}$$

$$I_{ajuste51} = I_{pick-up} = I_{partida}$$

É necessário referir a corrente de ajuste do relé para o secundário do transformador para implementação no coordenograma.

$$I'_{ajuste51} = 46,02 \cdot \frac{13800}{380}$$

$$I'_{ajuste51} = 1671,28 A$$

Para o relé instantâneo de fase (função 50):

$$I_{Inrush} = 12 \cdot 41,8$$

$$I_{Inrush} = 502,04 A$$

Utiliza-se um fator de segurança para que essa proteção instantânea não atue para a energização do transformador, esse fator deve ser no máximo 10% maior que a corrente de *Inrush* do transformador. Portanto, o fator de segurança escolhido para essa situação foi de 10%.

$$I_{ajuste50} = 1,10 \cdot 502,04$$

$$I_{ajuste50} = 552,25 A$$

Referindo a corrente de ajuste do relé 50 para o lado secundário do transformador:

$$I'_{ajuste50} = 552,25 \cdot \frac{13800}{380}$$

$$I'_{ajuste50} = 20055,33 A$$

Com os ajustes dos relés 50 e 51 selecionados, deseja-se encontrar o valor de dial de tempo que será utilizado para esse caso.

Sabe-se que a curva IEC Extremamente Inversa é dada por:

$$t = TD \cdot \left(\frac{80}{M^2 - 1} \right) \quad (3.3)$$

Onde M é o múltiplo da corrente de *pick-up*, dada por:

$$M = \frac{I}{I_{partida}} \quad (3.4)$$

Neste caso foi utilizado como ponto de referência o ponto de 2500 A para o ajuste L do disjuntor Siemens. Com isso, encontra-se o tempo em que o disjuntor atua para este ponto:

$$t = \frac{72}{\left(\frac{2500}{1600}\right)^2} = 29,50 \text{ s}$$

Deseja-se que a curva temporizada de Sobrecorrente do relé atue 4,5 segundos acima da curva do disjuntor Siemens para o ponto de 2500 A (na baixa tensão). Desta forma temos que:

$$M = \frac{2500 \cdot (380/13800)}{46,02} = 1,4959$$

Utiliza-se então, este valor de M, para encontrar o DT.

$$t = DT \cdot \left(\frac{80}{M^2 - 1}\right)$$

$$DT = t \cdot \left(\frac{M^2 - 1}{80}\right)$$

$$DT = 34 \cdot \left(\frac{1,4959^2 - 1}{80}\right)$$

$$DT = 0,5258$$

O dial de tempo (DT) calculado é arredondado para o valor mais próximo entre os ajustes disponíveis no equipamento, portanto, tem-se DT = 0,53 e a seguinte curva para estes ajustes:

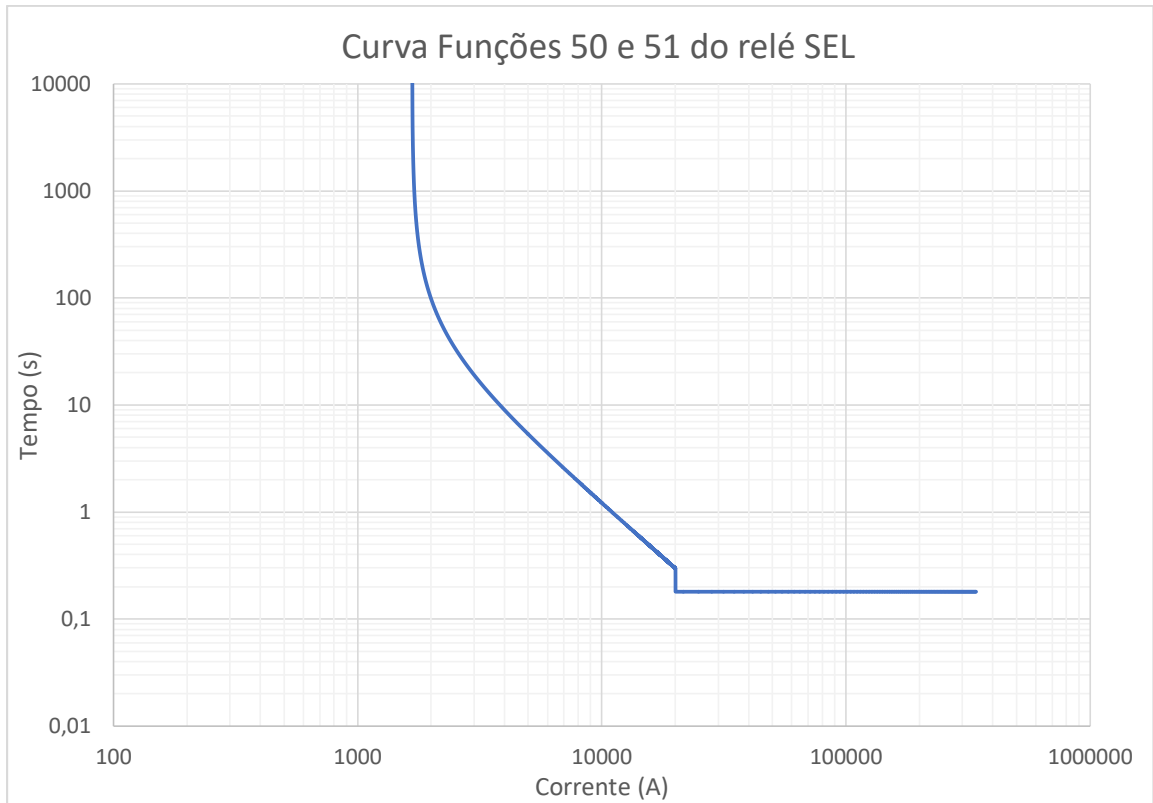


Figura 7.13 – Curva das Funções 50 e 51 do relé SEL

Assim, junta-se ambas as curvas em um único coordenograma para verificação da seletividade lembrando que as considerações para energização do transformador, Ponto ANSI e partida de um motor ainda valem para este caso e são:

$$I_{Inrush} = 502,04 \text{ A}$$

$$I'_{Inrush} = 18232,11 \text{ A}$$

$$\text{Ponto ANSI} = 597,67 \text{ A}$$

$$\text{Ponto ANSI}' = 21704,90 \text{ A}$$

$$I_{partida} = 810,32 \text{ A}$$

$$I_{total} = I_{partida} + 14 \cdot I_C$$

$$I_{total} = 2228,37 \text{ A}$$

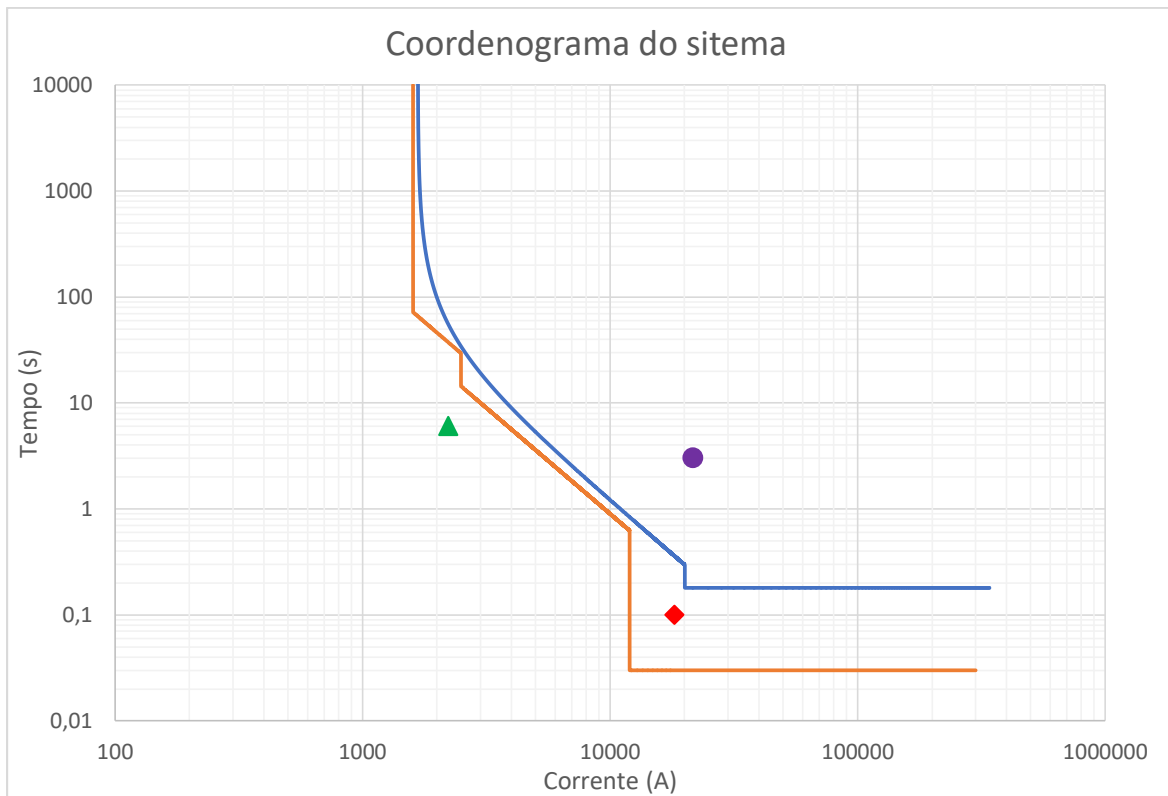


Figura 7.14 – Coordenograma do sistema para o disjuntor Siemens 3WL no lado de BT

Como visto na figura 6.7, os ajustes utilizados atendem as considerações necessárias para seletividade do sistema, embora seria necessário alterar os ajustes de coordenação das funções instantâneas da mesma forma realizada para o disjuntor ABB.

7.2.4 Curvas da proteção de falta à terra do disjuntor em BT

De acordo com os ajustes escolhidos no item 6.2 e com a tabela 6.1, temos a seguinte curva do ajuste G para o disparador ETU45B.

$$G = D - 900 \text{ A}$$

$$t_g = 0,2 \text{ s (I}^2\text{t OFF)}$$

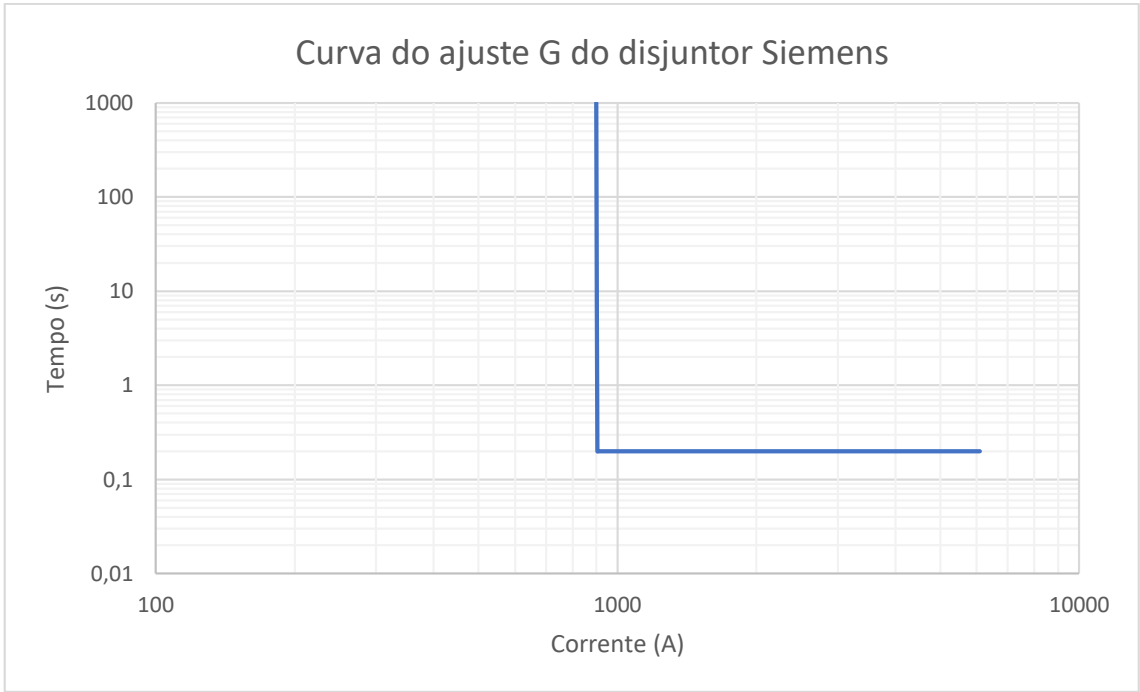


Figura 7.15 – Ajuste de falta à terra do disjuntor Siemens 3WL

8. Conclusões

Este trabalho apresenta um conteúdo básico na área de projetos de subestações e estudo de seletividade sobre a proteção da mesma, uma vez que foi incorporado cálculos e análises de parâmetros importantes para a especificação e ajustes dos componentes elétricos presentes ou conectados a subestação.

Foi dada ênfase as considerações, equações e parâmetros necessários para um estudo da proteção seletiva da subestação apresentada, conforme exigido pelas normas técnicas da concessionária de energia responsável, de tal maneira a aproximar o máximo possível de um estudo e parametrização real.

Vale ressaltar que os resultados obtidos poderiam ser mais precisos caso não fosse utilizadas suposições durante as análises realizadas, devido à falta de informações importantes para os cálculos apresentados. Outro obstáculo foi a falta ou a forma como os fabricantes disponibilizam as informações de seus produtos, dificultando o entendimento e a utilização dos ajustes do mesmo.

9. Referências

1. SEL (2018). SEL-751A Feeder Protection Relay, Instruction Manual
2. ABB (2012). Disjuntores de baixa tensão. Linhas Formula, Tmax XT, Tmax, Emax X1 e Emax
3. ABB. Operating instructions for T7-T8-X1 low voltage air circuit breakers Protection releases
4. WEG (2017). Fusíveis aR e gL/gG. Tipo NH Contato Faca, NH Flush End e Diametral
5. MAMEDE FILHO, João. Instalações Elétricas Industriais. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007
6. MAMEDE FILHO, João. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Rio de Janeiro: LTC, 2013
7. DELAIBA, Antônio Carlos. Apostila de Subestações. Uberlândia, 2009.
8. SIEMENS (2017). Disjuntores Abertos 3WL. SETRON Catálogo.
9. SIEMENS (2016). Manual de Instalação 3WL.
10. COMPANHIA ENERGÉTICA DE BRASÍLIA, Norma Técnica de Distribuição 1.05, 2ª edição. Disponível em: <https://www.ceb.com.br/index.php/informacoes-ceb-separator/normas-tecnicas-col-200>. Último acesso em 23 de novembro de 2019.