



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA
ELE0641 - PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA - 2021.2

**Estudo de coordenação da proteção da subestação
plena, do consumidor Centro Musical Zicartola,
com a proteção retaguarda da concessionária
COSERN**

Consumidor: Centro musical Zicartola
Endereço: Rua Santa Úrsula, 1705. Natal-RN

Autor: Eng. Eletricista Levy Gabriel da Silva Galvão
Crea: 20170056839

Natal/RN
Janeiro/2022

Lista de símbolos

$I_{CC3F_{AT}}$	Corrente de curto-circuito trifásica no lado de alta tensão
$I_{CC2F_{AT}}$	Corrente de curto-circuito bifásica no lado de alta tensão
$I_{CCFT_{AT}}$	Corrente de curto-circuito fase-terra no lado de alta tensão
$I_{CCFTm_{AT}}$	Corrente de curto-circuito fase-terra mínimo no lado de alta tensão
$I_{CC3F_{BT}}$	Corrente de curto-circuito trifásica no lado de baixa tensão
$I_{CC2F_{BT}}$	Corrente de curto-circuito bifásica no lado de baixa tensão
$I_{CCFT_{BT}}$	Corrente de curto-circuito fase-terra no lado de baixa tensão
$I_{CCFTm_{BT}}$	Corrente de curto-circuito fase-terra mínimo no lado de baixa tensão
$V_{base_{AT}}$	Tensão de linha de base do lado de alta tensão
$V_{base_{BT}}$	Tensão de linha de base do lado de baixa tensão
S_{base}	Potência aparente de base do sistema
$S_{base_{TRAFO}}$	Potência aparente de base do transformador
$I_{base_{AT}}$	Corrente de base do sistema na base de alta tensão
$I_{base_{BT}}$	Corrente de base do sistema na base de baixa tensão
R_t	Resistência terra no ponto especificado
$R_{t_{AT}}$	Resistência terra no ponto especificado em p.u na base de alta tensão
$R_{t_{BT}}$	Resistência terra no ponto especificado em p.u na base de baixa tensão
TAP	Corrente mínima de ajuste do relé referida ao secundário
TAP_{con}	Corrente mínima de ajuste do relé referida ao secundário para a concessionária
z	Reatância do transformador em p.u. na base do transformador
Z	Reatância do transformador em p.u. na base do sistema
Z_{1trafo}	Reatância de sequência positiva do transformador em p.u. na base do sistema
Z_{2trafo}	Reatância de sequência negativa do transformador em p.u. na base do sistema
Z_{0trafo}	Reatância de sequência zero do transformador em p.u. na base do sistema
Z_{1th}	Impedância equivalente de Thévenin de sequência positiva em p.u.
Z_{2th}	Impedância equivalente de Thévenin de sequência negativa em p.u.
Z_{0th}	Impedância equivalente de Thévenin de sequência zero em p.u.
$I_{carga,max}$	Corrente de carga máxima no primário do transformador
$I_{prim,TC}$	Corrente nominal do lado primário do TC
$I_{sec,TC}$	Corrente nominal do lado secundário do TC
$V_{max,TC}$	Tensão máxima do secundário do TC
FS	Fator de sobrecorrente
k	Fator de crescimento
RTC	Relação de transformação de corrente do TC
RTC_{con}	Relação de transformação de corrente do TC da concessionária
I_{lim}	Corrente limite superior da faixa de coordenação
$I_{nom,trafo}$	Corrente nominal do transformador
I_{INRUSH}	Corrente transitória de magnetização
I_{ANSI}	Corrente do ponto ANSI

Sumário

1	Objetivo	3
2	Dados da subestação do consumidor	3
3	Dados da concessionária	4
4	Curtos-circuitos	4
5	Relé, TC, TP e alimentação auxiliar (<i>nobreak</i>)	5
6	Determinação dos ajustes das unidades de sobrecorrente de fase e neutro do relé	5
7	Determinação dos ajustes das unidades 59 e 47	6
8	Parâmetros e ajustes do relé da subestação do consumidor . . .	6
9	Coordenogramas	7
10	Diagrama unifilar	9
11	Conclusão	10
12	Apêndice	14
12.1	Circuitos de sequências para o sistema proposto	14
12.2	Correntes de curto-circuito no ponto de entrega	14
12.3	Correntes de curto-circuito no secundário do transformador	15
12.4	Correntes de curto-circuito referidas ao primário do transformador . .	16
12.5	Dimensionamento do TC	16
12.6	Ajustes das unidades de sobrecorrente de fase e neutro do relé	17
12.6.1	Unidade 51	17
12.6.2	Unidade 50	18
12.6.3	Unidade 51NS	19
12.6.4	Unidade 51N	19
12.6.5	Unidade 50N	20
12.6.6	Unidade 59	20

1 Objetivo

O presente documento tem por objetivo determinar as graduações das proteções do relé associado ao disjuntor de proteção geral, localizado no cubículo de proteção da subestação plena do consumidor Centro Musical Zicartola, que neste estudo passa a ser denominada SE CONSUMIDOR. Para isso, serão tomadas como base as correntes de carga e de curtos-circuitos.

As graduações que serão determinadas aqui, assegurarão uma proteção coordenada e seletiva com a proteção de retaguarda do alimentador da concessionária COSERN. Além disso, proporcionarão uma operação segura e protegida do sistema elétrico da planta do Consumidor.

2 Dados da subestação do consumidor

No que confere a instalação do consumidor que será objeto de estudo, seus dados principais, são:

- Tipo de instalação: subestação de energia elétrica transformadora de média tensão;
- Características estruturais: subestação abrigada de alvenaria;
- Tensão nominal primária de fornecimento: 13.8 kV;
- Tensão nominal secundária: 380 V;
- Tipo de alimentação da rede: aérea;
- Tipo de alimentação do ponto de derivação: subterrânea;
- Demanda máxima: 420 kVA;
- Corrente de carga máxima: 17.57 A;
- Transformador a seco: 500 kVA, D-Yt, 13.8/0.38 kV, $Z = 5.7\%$;
- Fator de potência: 0.92 indutivo;
- Frequência do sistema: 60 Hz;
- Taxa de crescimento esperada: 1% ao ano;
- Horizonte de estudo: 10 anos;
- Fator de crescimento de carga aproximado: 1.1;

3 Dados da concessionária

Os dados fornecidos pela concessionária, são:

(a) Impedância equivalente de Thévenin no ponto de entrega:

$$Z_{1th} = Z_{2th} = 0.8589 + j 1.6296 \text{ pu}$$

$$Z_{0th} = 1.7967 + j 2.8326 \text{ pu}$$

$$V_{base_{AT}} = 13.8 \text{ kV}$$

$$V_{base_{BT}} = 380 \text{ V}$$

$$S_{base} = 100 \text{ MVA}$$

(b) Correntes de curto-circuito no ponto de entrega:

$$I_{CC3F_{AT}} = 2271 \text{ A}$$

$$I_{CC2F_{AT}} = 1967 \text{ A}$$

$$I_{CCFT_{AT}} = 1785 \text{ A}$$

$$I_{CCFTm_{AT}} = 188 \text{ A}, R_t = 40 \Omega$$

(c) Ajustes do relé associado ao Religador:

- $RTC = 600/5$;
- Relé SEL-551;
- Fase:
 - Unidade 51: $TAP = 2.8 \text{ A}$ (secundário), curva 0.15-MI-IEC;
 - Unidade 50: $TAP = 26 \text{ A}$ (secundário), tempo de 0.07s;
- Neutro:
 - Unidade 51N: $TAP = 0.5 \text{ A}$ (secundário), curva 0.2-MI-IEC;
 - Unidade 50N: $TAP = 15 \text{ A}$ (secundário), tempo de 0.07s;
- Neutro sensível (51NS): $TAP = 0.1 \text{ A}$ (secundário), tempo de 5s;
- Religamentos automáticos:
 - Número de religamentos: 2;
 - Tempos dos religamentos: 1.5/10 s;
 - Sequência de operações: (50/51/50N/51N/51) / (51/51N) / (51/51N);
 - Funções que bloqueiam o religamento: 51NS;
 - Tempo de *reset*: 60s;

4 Curtos-circuitos

Os valores de curto-circuito expressos nesta seção possuem os cálculos descritos no Apêndice.

(a) Correntes de curto-circuito no secundário do transformador:

$$I_{CC3F_{BT}} = 11636 \text{ A}$$

$$I_{CC2F_{BT}} = 10077 \text{ A}$$

$$I_{CCFT_{BT}} = 12155 \text{ A}$$

$$I_{CCFT_{m_{BT}}} = 43.87 \text{ A}, R_t = 5 \Omega$$

(b) Correntes de curto-circuito referidas ao primário do transformador:

$$I_{CC3F_{AT}} = 320 \text{ A}$$

$$I_{CC2F_{AT}} = 321 \text{ A}$$

$$I_{CCFT_{AT}} = 194 \text{ A}$$

$$I_{CCFT_{m_{AT}}} = 0.7 \text{ A}, R_t = 5 \Omega$$

5 Relé, TC, TP e alimentação auxiliar (*nobreak*)

O relé, TCs, TP e *nobreak* a serem utilizados são especificados a seguir. Os cálculos necessários para o dimensionamento dos TC estão listados no Apêndice.

- Relé: URPE 7104T;
- TC: 10B50; 150/5; $RTC = 30$; classe de exatidão 12.5%; Modelo SN1 da SOLTRAN TRANSFORMADORES; São 3 TCs (um para cada fase), em ligação residual, conforme sugestão do manual do relé.
- TP: 0.3P75; 13800/115 V; Modelo SN12 da SOLTRAN TRANSFORMADORES; São 2 TPs, ligados em DELTA aberto (ligação V), conforme sugestão do manual do relé;
- TP para serviço auxiliar: 1 TP; 400 VA; classe de exatidão 1.5%, 13.800/220 V; Modelo SN12 da SOLTRAN TRANSFORMADORES;
- *Nobreak*: *Nobreak* para alimentação do relé; 400 VA; bivolt 220/115 V; Modelo BZ400BI-BR da APC;

6 Determinação dos ajustes das unidades de sobrecorrente de fase e neutro do relé

(a) Fase

- Unidades 51 (temporizadas): $I_s = 20.4 \text{ A}$ (valor primário) ou $TAP = 0.68 \text{ A}$ (valor secundário). Esse ajuste libera uma carga 16.1% acima da potência informada, que corresponde a uma corrente 17.57 A, em 13,8 kV. Curva: 0.9-MI-IEC. Essa curva coordena com a curva da unidade 51 do religador.

- Unidades 50 (instantâneas): $I_{nst} = 390 \text{ A}$ (valor primário) ou $I_{nst} = 13 \text{ A}$ (valor secundário), tempo 0.05 s.

(b) Neutro

- Unidade 51N (temporizada): $I_{sn} = 6 \text{ A}$ (valor primário) ou $TAP = 0.2 \text{ A}$ (valor secundário). Esse ajuste garante alta sensibilidade às faltas monofásicas na rede primária da unidade consumidora. A curva determinada, 0.2-MI-IEC, coordena com a curva da unidade 51N do relé do religador.
- Unidade 50N (instantâneas): $I_{nst} = 240 \text{ A}$ (valor primário) ou $I_{nst} = 8 \text{ A}$ (valor secundário), tempo 0.05 s.
- Unidade 51NS: $TAP = 0.16 \text{ A}$ (secundário) e $pickup = 4.8 \text{ A}$ (primário), tempo de 3 s.

7 Determinação dos ajustes das unidades 59 e 47

A unidade 59 (sobretensão) recebe informações de dois ou três TPs (13800/115). Então, deverá ser graduada com base na tensão secundária (115 V) dos TPs.

No caso da unidade 47 (sequência de fases), basta ativá-la nos parâmetros do relé (ver software de graduação do relé).

8 Parâmetros e ajustes do relé da subestação do consumidor

Vide abaixo os quadros-resumo dos ajustes do relé URPE 7104T.

Tabela 1: Ajustes dos relés de fase.

Parâmetro	Descrição do parâmetro	Ajuste determinado
RTC	Relação de transformação do TC	150/5
I (<i>pickup</i>)	Corrente de partida da unidade de tempo inverso de fase	20.4 A
Curva	Curva de atuação da unidade de tempo inverso de fase	MI-IEC
D.T.	Dial de tempo da unidade de tempo inverso de fase	0.9
I def.	Corrente de partida da unidade tempo definido de fase	390
T def.	Tempo da unidade de tempo definido de fase	0.05
I inst.	Corrente da unidade instantânea de fase	390

Tabela 2: Ajustes dos relés de neutro.

Parâmetro	Descrição do parâmetro	Ajuste determinado
RTC	Relação de transformação do TC	150/5
I (<i>pickup</i>)	Corrente de partida da unidade de tempo inverso de neutro	6 A
Curva	Curva de atuação da unidade de tempo inverso de neutro	MI-IEC
D.T.	Dial de tempo da unidade de tempo inverso de neutro	0.2
I def.	Corrente de partida da unidade tempo definido de neutro	240 A
T def.	Tempo da unidade de tempo definido de neutro	0.05 s
I inst.	Corrente da unidade instantânea de neutro	240 A

Tabela 3: Ajustes dos relés de sobretensão.

Parâmetro	Descrição do parâmetro	Ajuste determinado
RTP	Relação de transformação do TP	13800/115
V (<i>pickup</i>)	Tensão de partida da unidade 59 (sobretensão)	16.5 kV
T def.	Tempo da unidade (tempo definido)	0.5 s

9 Coordenogramas

De acordo com a norma DIS-NORM-036, a corrente transitória de magnetização (*inrush*) e o ponto ANSI podem ser obtidos a partir da corrente nominal do transformador ($I_{nom,trafo} = 500 \text{ kVA} / \sqrt{3} 13.8 \text{ kV} = 21 \text{ A}$).

A corrente de *inrush* pode ser determinada como 6 vezes a corrente nominal do transformador num tempo de 0.1 segundos:

$$I_{INRUSH} = 6I_{nom,trafo} = 6 \cdot 21 = 126 \text{ A}$$

O ponto ANSI para a impedância em p.u do transformador de aproximadamente 6%, num tempo de 4 segundos, resulta em uma corrente:

$$I_{ANSI} = 16.6I_{nom,trafo} = 16.6 \cdot 21 = 348.6 \text{ A}$$

Definidos esses pontos, os coordenogramas de fase e neutro podem ser traçados de acordo com as figuras 1 e 2.

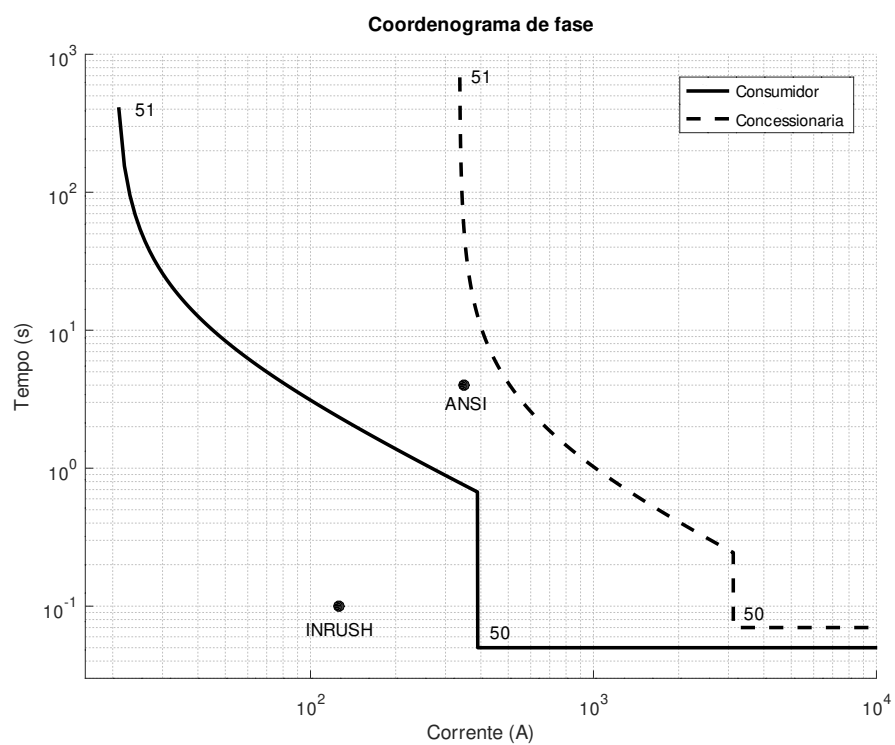


Figura 1: Coordenograma de fase. A curva da unidade 51 do relé da concessionária é do tipo 0.15-MI-IEC, enquanto que para o consumidor é do tipo 0.9-MI-IEC.

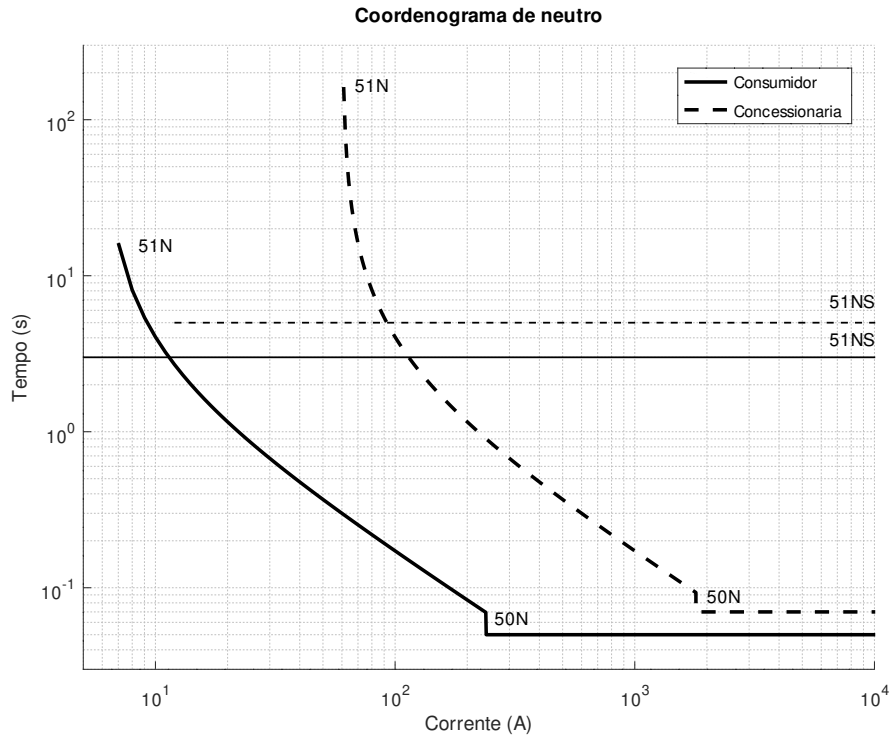


Figura 2: Coordenograma de neutro. A curva da unidade 51N do relé da concessionária e do consumidor são ambas do tipo 0.2-MI-IEC.

Conforme observado nos coordenogramas, as curvas determinadas para as unidades 51/51N/51NS/50/50N do relé URPE 7104T garantem uma operação coordenada com as correspondentes unidades do relé do alimentador da concessionária.

10 Diagrama unifilar

A figura 3 apresenta o diagrama unifilar da SE CONSUMIDOR.

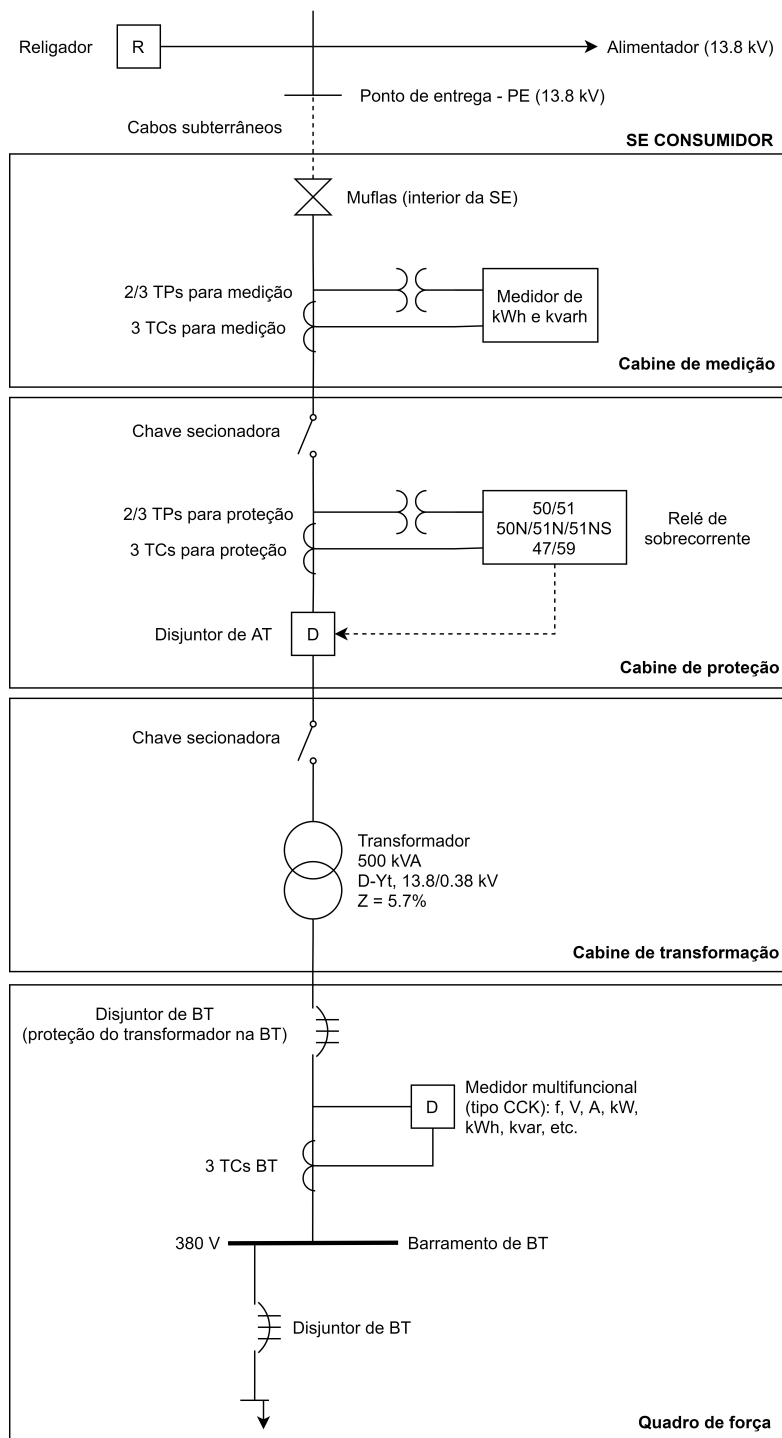


Figura 3: Diagrama unifilar do sistema em análise.

11 Conclusão

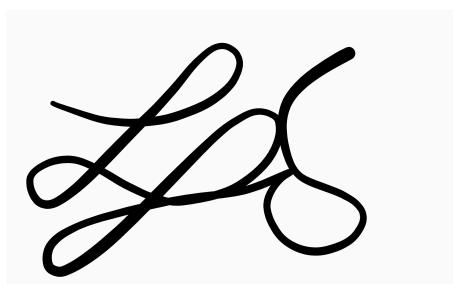
A graduação determinada para o relé de sobrecorrente URPE 7104T (funções 50/51/50N/51N/51NS), associado ao disjuntor de 13,8 kV da SE CONSUMIDOR,

garante coordenação com a proteção da Concessionária, conforme observado nos Coordenogramas e ajustes fornecidos anteriormente.

Além disso, assegura a proteção do transformador, pois, o PONTO ANSI está acima da curva da unidade 51 do relé da SE CONSUMIDOR de acordo com o Coordenograma de fase.

Referências

- [1] Notas de Aula.
- [2] Neoenergia. Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão de Distribuição à Edificação Individual – DIS-NOR-036.
- [3] Soltran. Transformadores de potencial. Disponível em: <http://www.soltran.com.br/pdf/SN12.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2022.
- [4] Soltran. Transformadores de corrente. Disponível em: <http://www.soltran.com.br/pdf/SN1.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2022.
- [5] APC. *Nobreaks*. Disponível em: https://download.schneider-electric.com/files?p_File_Name=DMVA-8RQGUL_R3_BR.pdf&p_Doc_Ref=SPD_DMVA-8RQGUL_BZ&p_enDocType=User+guide. Acesso em: 07 jan. 2022.
- [6] Pextron. Relé URPE 7104T. Disponível em: https://www.pextron.com/images/jdownloads/MANUAIS/Manual_URPE7104T/URPE7104TV10.34r03.pdf. Acesso em: 07 jan. 2022.

A stylized, handwritten signature in black ink, featuring large, flowing loops and a cursive style, set against a light gray rectangular background.

Eng. Eletricista Levy Gabriel da Silva Galvão
Crea-RN nº 20170056839

Natal, RN. Janeiro de 2022.

12 Apêndice

12.1 Circuitos de seqüências para o sistema proposto

As figuras 4, 5 e 6 apresentam os três circuitos de seqüências para o sistema proposto, i.e. circuito de seqüência positiva, negativa e zero, respectivamente. Estes definem a simbologia a ser utilizada durante os cálculos de curto circuito no ponto de entrega (PE) e no lado de baixa tensão (BT) do transformador.

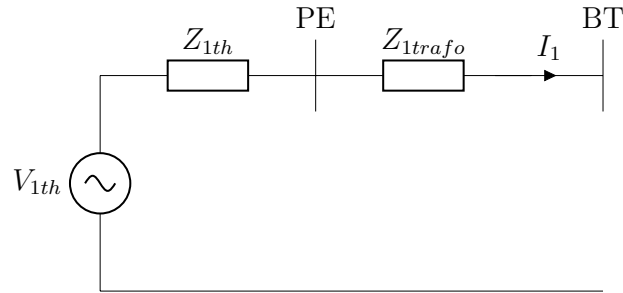


Figura 4: Circuito de seqüência positiva do sistema proposto.

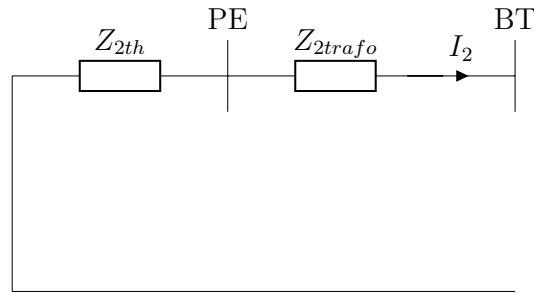


Figura 5: Circuito de seqüência negativa do sistema proposto.

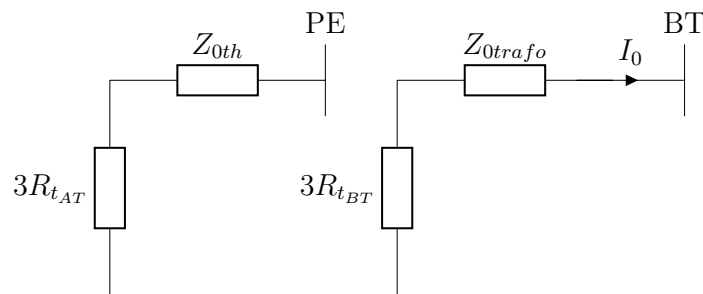


Figura 6: Circuito de seqüência zero do sistema proposto.

12.2 Correntes de curto-circuito no ponto de entrega

Considera-se:

$$Z_{base_{AT}} = \frac{V_{base_{AT}}^2}{S_{base}} = 1.9044 \, \Omega$$

$$I_{base_{AT}} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}V_{base_{AT}}} = 4183.7 \, A$$

Assim as correntes são:

$$I_{CC3F_{AT}} = \left| \frac{1}{Z_{1th}} \right| \cdot I_{base_{AT}} = 2271 \, A$$

$$I_{CC2F_{AT}} = \left| \frac{j\sqrt{3}}{Z_{1th} + Z_{2th}} \right| \cdot I_{base_{AT}} = 1967 \, A$$

$$I_{CCFT_{AT}} = \left| \frac{3}{Z_{1th} + Z_{2th} + Z_{0th}} \right| \cdot I_{base_{AT}} = 1785 \, A$$

$$I_{CCFTm_{AT}} = \left| \frac{3}{Z_{1th} + Z_{2th} + Z_{0th} + 3 \frac{R_t}{Z_{base_{AT}}}} \right| \cdot I_{base_{AT}} = 188 \, A, R_t = 40 \, \Omega$$

12.3 Correntes de curto-circuito no secundário do transformador

As grandezas de base devem ser ajustadas para o secundário, assim considera-se:

$$Z_{base_{BT}} = \frac{V_{base_{BT}}^2}{S_{base}} = 0.001444 \, \Omega$$

$$I_{base_{BT}} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}V_{base_{BT}}} = 151934.28137 \, A$$

Neste caso, além das impedâncias do ponto de entrega, também deve ser considerada a impedância $z = j5.7\%$ do transformador que é dada em sua base ($S_{base_{TRAF0}} = 500 \, kVA$, $V_{base_{AT}} = 13.8 \, kV$). Esta deve ser convertida para a base do sistema, assim tem-se:

$$Z = z \cdot \frac{V_{base_{AT}}^2}{S_{base_{TRAF0}}} \cdot \frac{1}{Z_{base_{AT}}} = j11.4 \, p.u$$

Considerando que todas as reatâncias dos circuitos de sequência são as mesmas que a encontrada anteriormente, tem-se que: $Z = Z_{1trafo} = Z_{2trafo} = Z_{0trafo}$.

Finalmente a correntes serão:

$$\begin{aligned}
I_{CC3F_{BT}} &= \left| \frac{1}{Z_{1th} + Z} \right| \cdot I_{base_{AT}} = 11636 \text{ A} \\
I_{CC2F_{BT}} &= \left| \frac{j\sqrt{3}}{Z_{1th} + Z_{2th} + 2Z} \right| \cdot I_{base_{BT}} = 10077 \text{ A} \\
I_{CCFT_{BT}} &= \left| \frac{3}{Z_{1th} + Z_{2th} + 3Z} \right| \cdot I_{base_{BT}} = 12155 \text{ A} \\
I_{CCFTm_{BT}} &= \left| \frac{3}{Z_{1th} + Z_{2th} + 3Z + 3\frac{R_t}{Z_{base_{BT}}}} \right| \cdot I_{base_{BT}} = 43.87 \text{ A}, R_t = 5 \Omega
\end{aligned}$$

12.4 Correntes de curto-circuito referidas ao primário do transformador

A corrente de curto-circuito trifásica referida ao lado de alta tensão pode ser obtida a partir da relação de transformação das tensões:

$$I_{CC3F_{AT}} = I_{CC3F_{BT}} \cdot \frac{380}{13800} = 320.4 \text{ A}$$

As demais correntes de curto-circuito, i.e. bifásica, fase-terra e fase-terra mínimo referida ao lado de alta tensão podem ser obtidas a partir da relação de espiras:

$$\begin{aligned}
I_{CC2F_{AT}} &= 2I_{CC2F_{BT}} \cdot \frac{220}{13800} = 321.28 \text{ A} \\
I_{CCFT_{AT}} &= I_{CCFT_{BT}} \cdot \frac{220}{13800} = 193.78 \text{ A} \\
I_{CCFTm_{AT}} &= I_{CCFTm_{BT}} \cdot \frac{220}{13800} = 0.7 \text{ A}
\end{aligned}$$

12.5 Dimensionamento do TC

Considerando a corrente de carga baseada na demanda máxima determinada na seção que lista os dados da subestação do consumidor de: $I_{carga,max} = 17.57 \text{ A}$; permite-se limitar a corrente primária do TC a ser maior que a de carga modificada do fator de crescimento ($k = 1.1$), de forma que:

$$\begin{aligned}
I_{prim,TC} &\geq k \cdot I_{carga,max} \\
I_{prim,TC} &\geq 1.1 \cdot 17.57 \text{ A} \\
I_{prim,TC} &\geq 19.33 \text{ A}
\end{aligned}$$

A corrente nominal primária do TC também deve ser maior do que a razão entre o curto-circuito máximo no ponto de entrega ($I_{CC3F_{AT}} = 2271 \text{ A}$) e o fator de sobrecorrente do TC ($FS = 20$), assim:

$$\begin{aligned}
I_{prim,TC} &\geq \frac{I_{CC3F_{AT}}}{FS} \\
I_{prim,TC} &\geq \frac{2271}{20} \\
I_{prim,TC} &\geq 114 \text{ A}
\end{aligned}$$

Dessa forma, permite-se determinar um TC de proteção 150/5 com relação de transformação de corrente $RTC = 30$.

O *burden* do TC será considerado aproximadamente de $300 \text{ m}\Omega$, baseando-se no exemplo fornecido pelo texto da norma DIS-NOR-036. Isso garante que, para a maior corrente de curto-circuito no lado de alta tensão, permite definir a tensão máxima do secundário do TC como:

$$\begin{aligned}
V_{max,TC} &= \frac{I_{CC3F_{AT}}}{RTC} \cdot 300 \cdot 10^{-3} \\
V_{max,TC} &= \frac{2271}{30} \cdot 300 \cdot 10^{-3} \\
V_{max,TC} &= 22.71 \text{ V}
\end{aligned}$$

Por fim, permite dimensionar um TC com precisão 10B50, que possui $V_{max,TC} = 50 \text{ V}$.

12.6 Ajustes das unidades de sobrecorrente de fase e neutro do relé

12.6.1 Unidade 51

Para a graduação desta unidade a corrente mínima de atuação no secundário do transformador (TAP) deve atender os seguintes critérios:

$$\begin{aligned}
\frac{k \cdot I_{carga,max}}{RTC} &\leq TAP \leq \frac{I_{CC2F_{AT}}}{RTC} \\
\frac{1.1 \cdot 17.57}{30} &\leq TAP \leq \frac{321}{30} \\
0.64 &\leq TAP \leq 10.7
\end{aligned}$$

O valor escolhido é $TAP = 0.68 \text{ A}$.

De acordo com os ajustes estabelecidos pela concessionária para a unidade 51, procura-se estabelecer um tempo de atuação da unidade 51 da SE CONSUMIDOR 0.2 segundos mais rápido que o relé da concessionária, para a maior corrente de curto-circuito, portanto:

$$\begin{aligned}
t_{51} &\geq \frac{k_1 \cdot TMS}{\left(\frac{I_{CC3FAT}}{RTC_{con} \cdot TAP_{con}}\right)^{k_2} - 1} - 0.2 \\
t_{51} &\geq \frac{13.5 \cdot 0.15}{\frac{2271}{120 \cdot 2.8} - 1} - 0.2 \\
t_{51} &\geq 0.15163 \text{ s}
\end{aligned}$$

Agora aplicando aos parâmetros da SE CONSUMIDOR para a mesma corrente para obter a curva adequada:

$$\begin{aligned}
t_{51} &\geq \frac{k_1 \cdot TMS}{\left(\frac{I_{CC3FAT}}{RTC \cdot TAP}\right)^{k_2} - 1} \\
TMS &\leq \frac{t_{51}}{k_1} \left(\left(\frac{I_{CC3FAT}}{RTC \cdot TAP} \right)^{k_2} - 1 \right) \\
TMS &\leq \frac{0.15163}{13.5} \left(\left(\frac{2271}{30 \cdot 0.68} \right)^{k_2} - 1 \right) \\
TMS &\leq 1.23
\end{aligned}$$

Portanto, define-se a curva 0.9-MI-IEC para a unidade 51 do relé da SE CONSUMIDOR.

12.6.2 Unidade 50

Para a graduação desta unidade a corrente mínima de atuação no secundário do transformador (TAP) deve atender os seguintes critérios:

$$\begin{aligned}
TAP &\geq \frac{8 \cdot I_{carga,max}}{RTC} \\
TAP &\geq \frac{8 \cdot 17.57}{30} \\
TAP &\geq 4.7
\end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned}
TAP &\geq \frac{I_{CC3FAT}}{RTC} \\
TAP &\geq \frac{320}{30} \\
TAP &\geq 10.7
\end{aligned}$$

O fator de multiplicação foi escolhido como 8, considerando a presença de diversos motores de indução devido aparelhos de condicionamento de ar.

O valor escolhido é $TAP = 13 \text{ A}$.

12.6.3 Unidade 51NS

A proteção 51NS deve ser do tipo tempo definido. Seu ajuste será definido a uma corrente de 40% da unidade 51NS da concessionária, esta sendo 12 A referida ao primário, o que resulta em um ajuste de 4.8 A para a unidade do consumidor.

O tempo de atuação deve ser no mínimo 0.4 segundos mais rápido que a da concessionária. Como o da concessionária foi definido como 5 segundos, será escolhido um tempo de atuação de 3 segundos para a unidade 51NS do consumidor.

12.6.4 Unidade 51N

Para a graduação desta unidade a corrente mínima de atuação no secundário do transformador (TAP) deve atender os seguintes critérios:

$$\begin{aligned}\frac{0.1 \cdot I_{carga,max}}{RTC} &\leq TAP \leq \frac{I_{CCFT_{m_{AT}}}}{RTC} \\ \frac{0.1 \cdot 17.57}{30} &\leq TAP \leq \frac{188}{30} \\ 0.058567 &\leq TAP \leq 6.266667\end{aligned}$$

O curto-circuito é considerado no final do trecho, portanto no ponto de entrega.

O TAP da unidade 51N do consumidor deve ser menor que o TAP da unidade 51NS da concessionária ($TAP < 12/RTC_{con} \rightarrow TAP < 0.4 A$, com $RTC_{con} = 30$). Portanto o valor escolhido é $TAP = 0.2 A$.

Como o múltiplo avaliado na corrente de curto fase-terra franco no ponto de entrega é deveras alto ($m = I_{CCFT_{AT}}/(RTC \cdot TAP) = 1785/(30 \cdot 0.2) = 297.50$), este deve ser limitado a $m = 20$. Isso resulta na corrente limite superior da faixa de coordenação dada por: $I_{lim} = m \cdot RTC \cdot TAP = 20 \cdot 30 \cdot 0.2 = 180 A$. Esta corrente será utilizada para coordenar as unidades 51N.

De acordo com os ajustes estabelecidos pela concessionária para a unidade 51N, procura-se estabelecer um tempo de atuação da unidade 51N da SE CONSUMIDOR 0.2 segundos mais rápido que o relé da concessionária, para a corrente limitada, anteriormente encontrada, tem-se:

$$\begin{aligned}t_{51N} &\geq \frac{k_1 \cdot TMS}{\left(\frac{I_{lim}}{RTC_{con} \cdot TAP_{con}}\right)^{k_2} - 1} - 0.2 \\ t_{51N} &\geq \frac{13.5 \cdot 0.2}{\frac{180}{120 \cdot 0.5} - 1} - 0.2 \\ t_{51N} &\geq 0.475 s\end{aligned}$$

Agora aplicando aos parâmetros da SE CONSUMIDOR para a mesma corrente para obter a curva adequada:

$$\begin{aligned}
t_{51N} &\geq \frac{k_1 \cdot TMS}{\left(\frac{I_{lim}}{RTC \cdot TAP}\right)^{k_2} - 1} \\
TMS &\leq \frac{t_{51}}{k_1} \left(\left(\frac{I_{lim}}{RTC \cdot TAP} \right)^{k_2} - 1 \right) \\
TMS &\leq \frac{0.475}{13.5} \left(\left(\frac{180}{30 \cdot 0.2} \right)^{k_2} - 1 \right) \\
TMS &\leq 0.67
\end{aligned}$$

Portanto, define-se a curva 0.2-MI-IEC para a unidade 51N do relé da SE CONSUMIDOR.

12.6.5 Unidade 50N

Para a graduação desta unidade a corrente mínima de atuação no secundário do transformador (TAP) deve atender os seguintes critérios:

$$\begin{aligned}
TAP &\geq \frac{8 \cdot 0.3 \cdot I_{carga,max}}{RTC} \\
TAP &\geq \frac{8 \cdot 0.3 \cdot 17.57}{30} \\
TAP &\geq 1.4
\end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned}
TAP &\geq \frac{I_{CCFT_{AT}}}{RTC} \\
TAP &\geq \frac{194}{30} \\
TAP &\geq 6.5
\end{aligned}$$

O fator de multiplicação de 0.3 foi escolhido para compensar o desequilíbrio.

O valor escolhido é $TAP = 8 \text{ A}$.

12.6.6 Unidade 59

A unidade 59 será graduada para atuar quando a tensão do sistema for 120% da tensão nominal. Considerando a tensão nominal como a do secundário do TP (115 V), a graduação da unidade 59 será 138 V. Isso corresponde ao *pickup* de: $RTP \cdot 138 = 13800/115 \cdot 138 = 16.5 \text{ kV}$.