

1. CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS

De forma a construir um Posto de Transformação que cumpra os objectivos a que foi proposto e simultaneamente respeite a segurança de pessoas e bens, impõe-se o cálculo de algumas grandezas eléctricas fundamentais. O conhecimento dos valores destas grandezas para cada caso particular permite a adequada escolha de técnicas e materiais a usar. Nas secções seguintes são apresentados os cálculos efectuados e respectiva adequação dos equipamentos escolhidos.

1.1 INTENSIDADES DE CORRENTE NOMINAIS

No cálculo das intensidades de corrente nominais nos circuitos de Alta Tensão e Baixa Tensão, considera-se que os transformadores estão em regime de exploração trifásico equilibrado.

Considera-se, também, que o sentido do fluxo de energia é da Alta Tensão para a Baixa Tensão. Este pressuposto é importante, pois no cálculo das correntes nominais é necessário considerar as perdas do transformador. No caso do fluxo de energia ser o inverso estas perdas serão consideradas na expressão de I_{AT} e não na expressão de I_{BT} .

• Circuito de Alta Tensão

A intensidade de corrente no circuito de Alta Tensão é calculada através da seguinte expressão:

$$I_{AT} = \frac{S}{U_{AT} \times \sqrt{3}} \quad (A)$$

Onde:

S – Potência nominal do transformador, em kVA.

U_{AT} – Tensão composta na Alta Tensão, em kV.

I_{AT} - Intensidade de corrente nominal no circuito de Alta Tensão, em A.

• Circuito de Baixa Tensão

A intensidade nominal de corrente no circuito de Baixa Tensão é calculada através da seguinte expressão:

$$I_{BT} = \frac{S - W_{cu} - W_{fe}}{U_{BT} \times \sqrt{3}} \times 10^3 \quad (A)$$

Onde:

S – Potência nominal do transformador, em kVA.

U_{BT} – Tensão composta em carga na Baixa Tensão.

W_{cu} – Perdas por efeito de Joule nos enrolamentos, em kW.

W_{fe} – Perdas no circuito magnético por correntes de Foucault e histerese, em kW.

I_{BT} - Intensidade nominal de corrente no circuito de Baixa Tensão, em A.

Substituindo os valores respectivos nas expressões anteriores, obtemos os seguintes resultados:

Potência Nominal do

Intensidade Nominal a

Intensidade Nominal

	Transformador (kVA)	Alta Tensão (A)	na Baixa Tensão (A)
TR1	630	36,373	947
TOTAL	630	36,373	947

1.2 INTENSIDADES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

As intensidades de corrente de curto-circuito são calculadas em função da potência de curto-circuito da rede, S_{ccR} , da tensão de curto-circuito do(s) transformador(es) e pressupondo que os curto-circuitos são trifásicos simétricos. De todos os tipos de defeito possíveis, esta é a que conduz aos valores máximos das intensidades de corrente.

O valor de S_{ccR} é fornecido pela Empresa Distribuidora de Energia Eléctrica, e a tensão de curto-circuito do(s) transformador(es) é fornecido pelo fabricante.

1.2.1 Intensidade de corrente de curto-circuito na Alta Tensão

A intensidade de corrente de curto-circuito na Alta Tensão poderá ser provocada por um curto-circuito no lado da Alta Tensão ou no lado da Baixa Tensão. Esta intensidade de corrente será sempre superior para o caso do curto-circuito ser na Alta Tensão, pois o valor total da impedância de curto-circuito será menor.

• Curto-circuito na Alta Tensão

O cálculo desta intensidade de corrente de curto-circuito realiza-se utilizando a seguinte expressão:

$$I_{ccAT} = \frac{S_{ccR}}{U_{AT} \times \sqrt{3}} \quad (kA)$$



Onde:

S_{ccR} – Potência de curto-circuito da rede de distribuição, em MVA.

U_{AT} – Tensão composta na Alta Tensão, em kV.

I_{ccAT} – Intensidade de corrente de curto-circuito no circuito de Alta Tensão, em kA.

• Curto-circuito na Baixa Tensão

Devido à impedância interna do(s) transformador(es) a corrente na Alta Tensão devido a um curto-circuito na Baixa Tensão será inferior ao valor calculado pela expressão anterior. Assim, na prática, o seu cálculo não é relevante. Pois o dimensionamento dos equipamentos do circuito de Alta Tensão relativamente à Intensidade de Limite Térmico e Intensidade Limite Electrodinâmica, será efectuado em função do maior valor possível para a corrente curto-circuito na Alta Tensão.

1.2.2 Intensidade de corrente de curto-circuito na Baixa Tensão

O cálculo da intensidade de curto-circuito na Baixa Tensão, na maioria dos casos, resulta apenas de curto-circuitos no circuito Baixa Tensão. Assim, o cálculo seguinte será para esta situação.

• Curto-circuito na Baixa Tensão

Para o cálculo desta intensidade de corrente de curto-circuito é necessário conhecer a impedância de curto-circuito equivalente da rede distribuidora (referida ao secundário) e também a impedância de curto-circuito do(s) transformador(es).

O cálculo da impedância de curto-circuito equivalente da rede distribuidora realiza-se utilizando a seguinte expressão:

$$Z_{ccR} = \frac{U_{BT}^2}{S_{ccR}} \times 10^{-6} \quad (\Omega)$$

Onde:

S_{ccR} – Potência de curto-circuito da rede de distribuição, em MVA.

U_{BT} – Tensão composta em vazio na Baixa Tensão.

Z_{ccR} – Impedância de curto-circuito equivalente da rede distribuidora, em Ω .

Para o cálculo da impedância de curto-circuito do(s) transformador(es) utiliza-se a seguinte expressão:

$$Z_{cc} = \frac{U_{BT}^2 \times u_{cc}}{S_{TR}} \times 10^{-5} \quad (\Omega)$$

Onde:

U_{BT} – Tensão composta em carga na Baixa Tensão, 400 V.

S_{TR} – Potência nominal do transformador, em kVA.

u_{cc} – Tensão de curto-circuito do transformador, em %.

Z_{cc} – Impedância de curto-circuito do transformador, em Ω .

O cálculo da corrente de curto-circuito na Baixa Tensão realiza-se utilizando os valores calculados nas expressões anteriores, na seguinte expressão:

$$I_{ccBT} = \frac{U_{BT}}{(Z_{cc} + Z_{ccR}) \times \sqrt{3}} \times 10^{-3}$$

Onde:

U_{BT} – Tensão composta em carga na Baixa Tensão, 400 V.

Z_{cc} – Impedância de curto-circuito do(s) transformador(es), em Ω .

Z_{ccR} – Impedância de curto-circuito equivalente da rede distribuidora, em Ω .

I_{ccBT} – Intensidade de corrente de curto-circuito na Baixa Tensão, em kA.

Substituindo os valores na expressão anterior e calculando obtemos:

$$I_{ccAT} = 12 \text{ kA}$$

	Potência Nominal do Transformador (kVA)	Intensidade Curto-Circuito na Baixa Tensão (kA)
TR1	630	23
TOTAL	630	23

1.3 DIMENSIONAMENTO DE CIRCUITOS

Nos Postos de Transformação compactos, os equipamentos que constituem os circuitos de Alta Tensão e Baixa Tensão são projectados, fabricados, e certificados de acordo com as normas CEI aplicáveis, respectivamente. A escolha dos equipamentos é feita de modo que as características nominais satisfaçam, no mínimo, os valores das grandezas eléctricas calculadas nos pontos anteriores. Assim é garantida a segurança e fiabilidade na utilização destes equipamentos.

1.3.1 Circuito de Alta Tensão

O quadro NORMAFIX a utilizar terá características eléctricas mínimas superiores aos valores calculados, para a intensidade de corrente nominal, I_{AT} , intensidade de corrente de curto-circuito, I_{ccAT} , e tensão nominal maior ou igual a U_{AT} .

Assim, o quadro NORMAFIX a instalar terá as seguintes características eléctricas relevantes, de acordo com norma CEI 298:

Tensão Nominal pico U_N (kV)	Corrente Nominal I_N (A)	Corr. de curto-circuito I_{cc} (kA/1s)	Corrente de I_p (kAp)
12,0	400	16	40

1.3.2 Circuito de Baixa Tensão

O interruptor de entrada do Quadro Geral de Baixa Tensão, assim como o cabo que liga este aos terminais de Baixa Tensão do(s) transformador(es) devem ter tensão nominal, U_{BT} , e corrente nominal superior a I_{BT} . O poder de corte de fusíveis e disjuntores, e a corrente de curto-circuito suportada pelos restantes equipamentos do quadro deverá ser no mínimo igual a I_{ccBT} , ou seja 23 kA, valor calculado no ponto 1.2.2.

1.4 ESCOLHA DAS PROTECÇÕES DE SOBREINTENSIDADES

• Alta Tensão

A escolha das protecções de curto-circuito na Alta Tensão é feita considerando o poder de corte dos equipamentos de protecção e o tempo máximo para a eliminação do defeito. A Empresa Distribuidora de Energia Eléctrica impõe como valor máximo para eliminação do defeito, 800 ms.

CELA TIPO CIS

Neste caso a utiliza-se para a função de protecção de sobreintensidades os corta-circuitos fusíveis. Dispositivo constituído por fusível e interruptor actuado por percutor associado. A escolha dos fusíveis a aplicar deve considerar a tensão nominal da rede, a intensidade da corrente de magnetização do transformador, cerca de 12 vezes a corrente nominal durante 0,1 s; a sua corrente nominal; e poder de corte superior ao valor calculado para a corrente máxima de curto-circuito na Alta Tensão.

Assim os fusíveis a utilizar terão as seguintes características eléctricas principais:

- Tensão Nominal: $\geq U_{AT}$
- Corrente Nominal: $\approx 1,6 \times I_{AT}$
- Poder de Corte: $\geq I_{ccAT}$

Potência Nominal do Serviço	Calibre do Fusível	Poder de Corte	Tensão
Transformador (kVA)	(A)	(kA)	(kV)
630	80,0	63,0	10,0

- **Baixa Tensão**

A saída do transformador será protegida por disjuntor de poder de corte e intensidade de corrente nominal no mínimo iguais a 23 kA, e 947 A, respectivamente. Valores calculados anteriormente.

1.5 DIMENSIONAMENTO DOS CIRCUITOS DE LIGAÇÃO À TERRA

Os circuitos de ligação à terra devem ser dimensionados e instalados de modo a garantir, com a máxima fiabilidade e eficiência, a segurança das pessoas, e equipamentos constituintes e/ou ligados ao Posto de Transformação – PT. O sistema de terras será constituído por dois circuitos independentes de ligação à terra:

- terra de protecção
- terra de serviço da baixa tensão

1.5.1 Impedância de defeito à terra e tempo de eliminação do defeito

De forma a calcular a elevação de potencial no circuito de terra de protecção, devido a defeito à terra nas instalações do Posto de Transformação, é essencial conhecer o valor da impedância de defeito à terra da rede de Alta Tensão.

De acordo com a informação da Empresa Distribuidora o regime de neutro é directo. No regime de neutro directo, o neutro da rede de Alta Tensão ligado directamente à terra através de uma impedância de valor desprezável. Nestas condições, e no caso de defeito à terra, a corrente de defeito máxima - I_{dM} - será apenas limitada pela impedância de curto-circuito da rede, pois considera-se a resistência de terra do PT nula.

De acordo com informação da Empresa Distribuidora, a eliminação deste defeito é instantânea.

O valor, em módulo, da impedância de defeito é dado por:

$$Z_R = \frac{U_{AT}^2}{S_{ccR}} \quad (\Omega)$$

Onde:

S_{ccR} – Potência de curto-circuito da rede de distribuição, em MVA.

U_{AT} – Tensão composta na Alta Tensão, em kV.

Z_R - Impedância da rede de Alta Tensão, em Ω .

Esta impedância é de natureza reactiva, assim a componente resistiva é desprezável.

Como,

$$Z_R = \sqrt{X_R^2 + R_R^2} \quad (\Omega)$$

e $R_R \sim 0 \Omega$, logo $Z_R \sim X_R$.

Substituindo os valores 10 kV e 200 MVA na expressão anterior obtemos $Z_R = 0,5 \Omega$.

Fazendo uso do valor de Z_R pode ser calculada a intensidade de corrente máxima de defeito, I_{dM} :

$$I_{dM} = \frac{U_{AT}}{\sqrt{3} \times Z_R} \quad (kA)$$

$I_{dM} = 11,547 \text{ kA}$.

1.5.2 Circuito de terra de protecção

O interior da cabina do PT será percorrido por uma barra de cobre nú, fixa nas paredes, com secção não inferior a 50 mm^2 .

A esta barra serão ligadas as seguintes massas metálicas:

- carcaça do transformador de potência
- o circuito de terra do quadro de alta tensão
- circuito de terra do quadro de baixa tensão
-
- as grelhas de ventilação e as portas
- todas as peças metálicas que normalmente não estejam em tensão mas possam vir estar como consequência de avarias ou causas fortuitas.

A barra será ligada ao terminal geral da terra de protecção da cabina. Este terminal, amovível, é ligado ao eléctrodo de terra no exterior através de um condutor isolado, isolamento a 1 kV, de secção não inferior a 50 mm^2 ,

enterrado e protegido contra eventuais acções mecânicas.

O eléctrodo de terra será constituído por um anel de cabo de cobre nú de secção não inferior a 50 mm². Este anel será colocado a 0,8 m de profundidade e a uma distância horizontal aproximada de 1 m das paredes da cabina. A este anel serão solidamente ligados, quatro eléctrodos de vareta de cobre com 2 m de comprimento e 20 mm de diâmetro, enterrados verticalmente a 0,8 m. Estes serão dispostos ao longo do anel, um por cada lado da cabina, e com uma separação entre eles de aproximadamente 4 m. Deverá ser prevista a disponibilidade de terreno necessária à instalação deste eléctrodo.

Os parâmetros característicos deste eléctrodo são:

$$K_R = 0,071 \, \Omega/(\Omega.m)$$

$$K_P = 0,0089 \, V/(\Omega.m.A)$$

Poderá ser usado outro tipo de eléctrodo desde que garanta valores de K_R e K_P inferiores aos indicados e tenha configuração em anel envolvendo a cabina do PT.

- **Cálculo dos valores de defeito à terra**

Para o cálculo da resistência de terra, R_T , do eléctrodo é usada a seguinte expressão:

$$R_T = K_R \times \rho_T$$

Onde:

ρ_T – resistividade do terreno, em $\Omega.m$.

Fazendo o cálculo obtemos:

$$R_T = 0,355 \, \Omega$$

Com o valor de R_T , podemos calcular o valor da intensidade de corrente de defeito à terra, I_d , e o valor da tensão de defeito à terra U_d :

$$I_d = \frac{U_{AT}}{\sqrt{3} \times \sqrt{Z_R^2 + R_T^2}} \times 10^3 \quad (A)$$

Onde:

U_{AT} – Tensão composta na Alta Tensão, em kV.

Z_R – Impedância de defeito à terra da rede de Alta Tensão, em Ω .

I_d - Intensidade de corrente de defeito à terra no PT, em A.

Substituindo os valores e calculando, obtemos:

$$I_d = 9415,231 \, A$$

Com os valores calculados anteriormente obtém-se a tensão de defeito, U_d :

$$U_d = I_d \times R_T \quad (V)$$

$$U_d = 3342,407 \text{ V}$$

O isolamento dos equipamentos dos circuitos de Baixa Tensão do PT deverão ter um isolamento superior à tensão de defeito calculada, 3342,407 V. Deste modo evita-se que em caso de defeito à terra na Alta Tensão do PT não exista dano para os equipamentos, evitando a transferência de sobretensões para a rede de Baixa Tensão.

1.5.3 Circuito de terra de serviço

Ao circuito da terra de serviço de baixa tensão será ligado o neutro do transformador de potência. Este circuito será ligado, através de um ligador amovível, ao eléctrodo de terra no exterior por um condutor isolado, isolamento de 1 kV, de secção não inferior a 35 mm^2 . O eléctrodo da terra de serviço será instalado a uma distancia mínima de 20 m do eléctrodo da terra de protecção.

O eléctrodo da terra de serviço será constituído por um conjunto de 4 varetas de cobre nu de 2 m de comprimento e enterradas verticalmente até uma profundidade de 0,8 m. As varetas serão interligadas através de um condutor de cobre nu de secção 35 mm^2 , enterrado a uma profundidade de 0,8 m. A disposição relativa das varetas não é relevante desde que a distância mínima entre qualquer uma delas seja 4 m.

Este eléctrodo terá os seguintes parâmetros característicos:

$$K_R = 0,120 \quad \Omega/(\Omega.m)$$

$$K_P = 0,0298 \text{ V}/(\Omega.m.A)$$

Para o cálculo da resistência de terra, R_S , do eléctrodo da terra de serviço é usada a seguinte expressão:

$$R_S = K_R \times \rho_T$$

Onde:

ρ_T – resistividade do terreno, em $\Omega.m$.

Fazendo o cálculo obtemos:

$$R_S = 0,60 \quad \Omega$$

Como se verifica este valor está abaixo dos 20Ω de valor máximo permitido pelo Art. 58º do RSSPTS.

1.5.4 Tensões no interior da instalação

Este tipo de PT é de exploração exclusivamente exterior. No entanto piso de

assentamento do PT, é constituído no seu interior por uma malha condutora electrosoldada de quadrícula não superior a 20×20cm e secção não inferior a 4 mm². Esta malha será ligada ao circuito de terra de protecção, de forma a garantir contacto eléctrico sólido. Assim, consegue-se uma superfície equipotencial fazendo desaparecer o perigo do aparecimento de tensões de contacto e de passo no interior da cabina do PT.

1.5.5 Tensão de passo permitida no exterior

O cálculo da tensão de passo máxima admissível no exterior do PT é feito recorrendo à expressão seguinte:

$$U_{Fext} = 10 \times \frac{K}{t^n} \times \left(1 + \frac{6 \times \rho_T}{1000} \right) \quad (V)$$

Onde:

t – tempo máximo de eliminação do defeito, 0,8s.

K – constante dependente do máximo de eliminação do defeito, 72.

n - constante dependente do máximo de eliminação do defeito, 1.

ρ_T – resistividade do terreno, em $\Omega.m$.

U_P - Tensão no exterior, em V.

Substituindo os valores e calculando obtemos 927,0 V como valor máximo para a tensão de passo no exterior.

1.5.6 Tensões no exterior da instalação

Devido ao facto de o eléctrodo da terra protecção ser um anel contornando, na totalidade, a cabina do PT à distância de um metro do seu perímetro exterior, é criada uma superfície equipotencial no solo circundante e adjacente ao PT. Desta forma não existirão tensões de contacto significativas no exterior do PT.

A tensão de passo no exterior, U_P , será calculada pela seguinte expressão:

$$U_P = K_F \times \rho_T \times I_d \quad (V)$$

Substituindo os valores calculados anteriormente, temos:

$U_P = 1360,501 \text{ V}$

1.5.7 Tensões transferíveis para o exterior

Não existem meios de transferência de tensões para o exterior, assim não é necessário tomar medidas para a sua redução ou eliminação.

1.6 VENTILAÇÃO DO POSTO DE TRANSFORMAÇÃO

Com o objectivo de evitar o sobreaquecimento dos equipamentos no interior do PT há que garantir a adequada renovação de massa de ar. Isto é conseguido através do correcto dimensionamento das grelhas de ventilação da cabina do PT. A cabina do PT tipo PUCINOX possui na sua estrutura grelhas de ventilação devidamente protegidas que garantem a ventilação adequada às gamas de soluções existentes.

1.7 DIMENSIONAMENTO DO DEPÓSITO DE ÓLEO

O depósito de recolha de óleo será ser colocado por debaixo do transformador, ou então devem existir caleiras de recolha e condução do óleo até ao depósito. Este terá uma capacidade superior ao volume de óleo do transformador.

É usual a quantidade de óleo do transformador ser fornecida pelo fabricante em massa de óleo, assim teremos que usar a seguinte expressão para calcular a capacidade:

$$V = \frac{M}{\sigma} \quad (\text{litros})$$

Onde:

σ – densidade típica do óleo de transformador a 20° C, 0,887 kg/litro.

M – massa de óleo do transformador, em kg.

V – volume de óleo, em litros.

**Potência Nominal do
Transformador (kVA)**
630

**Volume mínimo do
depósito (litros)**
248