

TESE

957

FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Análise dos Relés Aplicados na Proteção
de Sistemas Elétricos Industriais

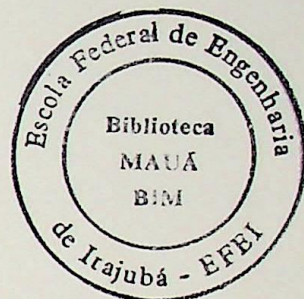
Roubério Ribeiro Rolim

ITAJUBÁ - MG - 1998

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

EFEI

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



ANÁLISE DOS RELÉS APLICADOS NA
PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS
INDUSTRIAIS

Trabalho de Dissertação de Mestrado apresentado à Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

AUTOR : **ROUBÉRIO RIBEIRO ROLIM**

ORIENTADOR : **JOÃO ROBERTO COGO**

Itajuba, 20 de Março de 1998

CLASS. 621.316-925 (043-2)
CUTTER. R748a
TOMBO. 957



ANÁLISE DOS RELES APLICADOS NA
PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS
INDUSTRIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Ilheus como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica

ROBERTO ESTRELA BOMM

ALTO

JOÃO ROBERTO COGO

COPIADOR

RESUMO

Este trabalho descreve os principais procedimentos aplicados para a verificação de reatores e transformadores encastorados acovelados em sistemas elétricos industriais e descreve um procedimento para análise das condições de curto-circuito que será utilizada como suporte para a verificação e graduação dos níveis dos relés de sobrecorrente.

Em vista destes procedimentos, também foi desenvolvida uma ferramenta escrita em Pascal, versão 7.0, que permite a verificação de relés já existentes em projetos industriais de fator e a determinação de graduação dos níveis de relés de sobrecorrente aplicadas a novos projetos dos sistemas industriais.

Dedico este trabalho aos meus pais, Efísio Alves Rolim e Íria Ribeiro Rolim, e a todas outras pessoas a quem amo e incentivaram-me para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho descreve os principais procedimentos aplicados para proteção de motores e transformadores encontrados normalmente em sistemas elétricos industriais, e descreve um procedimento para análise das correntes de curto-circuito, que será utilizada como suporte para a verificação e graduação dos ajustes dos relés de sobrecorrente.

Em vista destes procedimentos, também foi desenvolvido um programa escrito em Pascal, versão 7.0, que permite a verificação de ajustes já existentes em relés de sobrecorrente de fase e a determinação da graduação dos ajustes de relés de sobrecorrente aplicados à novos projetos dos sistemas industriais

LEGENDA

ABSTRACT

The present work describes the main procedures applied for motors and transformers protections usually found on industrial power systems, showing a procedure for short-circuit current analysis that will be used as a support for checking graduating overcurrent relay settings.

As a consequence of these procedures, it was developed a program based on Pascal (version 7.0) that allows the checking of existing settings on phase overcurrent relays and the determination of overcurrent relay setting graduation applied for new industrial power system plants.

LEGENDA

$R[i, j]$	- resistência [pu];
$X[i, j]$	- reatância [pu];
i, j	- numero da barra.
ang	- ângulo de defasamento entre a tensão e corrente;
X/R	- relação X/R, conseguida através da figura 1.1;
Z_T	- impedância do transformador [pu];
Z_S	- impedância de curto-circuito do sistema, em ohms por fase;
$I_{PRI}[i, j]$	- corrente nominal lado de alta (primário) do transformador conectado entre as barra i e j, em [A];
$I_{SEC}[i, j]$	- corrente nominal lado de baixa (secundário) do transformador conectado entre as barra i e j, em [A];
U_R	- tensão no lado de alta (primário) do transformador, em [V];
U_E	- tensão no lado de baixa (secundário) do transformador, em [V];
S_T	- potência aparente do transformador, em [kVA].
$I_{NOM}[0, j]$	- corrente nominal do equipamento conectado à barra j, em [A];
$I_p[j]$	- corrente de partida do motor conectado à barra j [A];
$I_p \cdot I_N[j]$	- múltiplo da corrente de partida pela corrente nominal do motor conectado à barra j;
$R_{MOT}[j]$	- resistência do motor [pu] conectado à barra j;
$X_{MOT}[j]$	- reatância do motor [pu] conectado à barra j;
R_{CCT}	- resistência em C.C. à temperatura de 20 °C, em [Ω/km], ver tabela 1.3;
R_{CAT}	- resistência em C.A. à temperatura de 20 °C, em [Ω/km];
d_C	- diâmetro do condutor, em [mm];
d_L	- distância entre eixos dos condutores, em [mm];
y_S	- fator devido ao efeito pelicular ("skin-effect");
y_P	- fator devido ao efeito de proximidade;
f	- frequência, em [Hz].
X_L	- reatância indutiva [Ω/km];
d_G	- distância média geométrica dos condutores [mm];
L_C	- indutância do cabo, em [mH/km].
S_{BASE}	- potência de base do sistema, em [kVA];
$U_{BASE}[i]$	- tensão de base da barra i, em [V];
S_{CC}	- potência de curto-circuito na barra de entrada do sistema (concessionária), em [kVA];
δ	- ângulo de defasagem de S_{CC} .

I_{PU}	- corrente de curto-circuito na barra br, em [pu];
I_{BASE}	- corrente de base na barra br, em [pu];
$R_{BUS}[br, br]$	- resistência da matriz $[Z_{BUS}]$, linha e coluna br;
$X_{BUS}[br, br]$	- reatância da matriz $[Z_{BUS}]$, linha e coluna br;
$I_{BARRA}[br]$	- corrente de curto-circuito na barra br, em [A];
U_M	- tensão eficaz, em [V];
f	- frequência, em [Hz];
ω	- velocidade angular, em [rad/s];
L	- indutância, em [H]
θ	- ângulo associado ao instante do curto-circuito e o correspondente valor de tensão neste instante;
$I_{SIM}(t)$	- corrente de curto-circuito simétrica em função do tempo, em [A];
t	- tempo, em [ms];
ζ	- constante de tempo;
$I_{ASS}(t)$	- corrente de curto-circuito assimétrica em função do tempo, em [A];
$I_{RMS-ASS}$	- corrente de curto-circuito eficaz assimétrica, em [A];
$I_{RMS-SIM}$	- corrente de curto-circuito eficaz simétrica, em [A];
$F_{ASS}[j]$	- fator de assimetria a ser utilizado para a barra j.
$I_{NR}[j]$	- corrente nominal do relé que protegerá o motor conectado à barra j, em [A];
RTC[j]	- relação de transformação do transformador de corrente conectado entre as barras 0 e j;
$I_{s0}[j]$	- corrente de ajuste da unidade instantânea do relé que protege o motor conectado à barra j, em [A];
$M_p[j]$	- múltiplo da corrente de partida do motor conectado à barra j, em [A];
$I_p[j]$	- corrente de partida do motor conectado à barra j, em [A];
t(I/Ir)	- tempo de operação em função de (I/Is), em [s];
TMS	- DIAL do relé;
I/Ir	- múltiplo da corrente do relé.
$I_{NF}[j]$	- corrente nominal do fusível, em [A];
\cdot	
I_i	- corrente total no nó "i";
i_{ij}	- corrente de ramo entre os nós "i" e "j";
N	- número de nós da rede.
y_{ij}	- admitância equivalente entre as barras "i" e "j";
U_i	- tensão no nó "i";
$[Y_{BUS}]$	- matriz de admitância nodal do circuito;
$[V_N]$	- matriz das tensões nodais;

$[I_N]$	- matriz das correntes injetadas.
br	- número da barra do sistema elétrico;
$Z[br]$	- impedância equivalente ligada à barra br, em pu;
$I_{SIM}[br]$	- corrente de curto-circuito simétrica da barra br, em pu;
$I_{ASS}[br]$	- corrente de curto-circuito assimétrica, em pu;
FA[br]	- fator de assimetria da barra br.
L	- indutância inerente ao próprio circuito (equipamentos), em [H];
R	- resistência ôhmica inerentes ao próprio circuito (equipamentos), em [Ω];
$u(t)$	- tensão da fonte, em [V];
$i(t)$	- corrente da fonte, em [A];
θ	- ângulo associado ao instante do curto-circuito e o correspondente valor de tensão neste instante.
ω	- velocidade angular, em [rad/s].
U_M	- tensão eficaz da fonte, em [V];
$\zeta=L/R$	- constante de tempo do circuito.
I_{CA}	- componente alternada da corrente de curto-circuito, valor eficaz a meio ciclo;
I_{DC}	- componente contínua da corrente de curto-circuito, valor eficaz a meio ciclo;
TMS	- constante definida pelo DIAL de Tempo;
I/Ir	- múltiplo da corrente de TAPE do relé;
t	- tempo de operação do relé, em [s] ou [min].
T	- transformador;
M1	- motor de indução;
R1, R2	- relé de sobrecorrente tipo longo inverso;
Id	- corrente circulante ou de operação do relé diferencial.
I _p	- corrente do secundário do TC _p ;
I _s	- corrente do secundário do TC _s .
A, B, C, D	- terminais do relé diferencial;
TC _p	- transformador de corrente no lado primário de T;
TC _s	- transformador de corrente no lado secundário de T;
F1, F2	- pontos de falta;
I _F	- corrente de falta;
BO	- bobina de operação do relé diferencial.
G	- fonte geradora;
D4	- disjuntor;
T	- transformador.
$\epsilon\%$	- erro de ajuste;
S	- menor dos dois termos do numerador.
Kt	- constante de tempo de aquecimento do equipamento;

- I_R - múltiplo da corrente de disparo;
- I_{PA} - corrente de partida assimétrica, em [A];
- I_{PS} - corrente de partida simétrica, em [A];
- FA - fator de assimetria
- I_{AJINST} - corrente de ajuste do dispositivo de proteção instantâneo, em [A];
- BO - bobina de operação do relé diferencial.
- BR - bobina de restrição do relé diferencial.

1. DESCRIÇÃO DO SOFTWARE	1
2. ANÁLISE DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO	24
3. REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE TEMPOS PARA OS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE	32
4. PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES	72
5. PROTEÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	107
6. PROTEÇÃO CONTRA FALTAS FASE-TERRA	123
7. CONCLUSÃO	146
APÊNDICE A	147
APÊNDICE B	151

SUMÁRIO

1. DESCRIÇÃO DO SOFTWARE	1
2. ANÁLISE DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO.....	24
3. REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE TEMPOS PARA OS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE	52
4. PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES.....	72
5. PROTEÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS.....	109
6. PROTEÇÃO CONTRA FALTAS FASE-TERRA.....	135
7. CONCLUSÃO.....	146
APÊNDICE A	147
APÊNDICE B	151

1. DESCRIÇÃO DO SOFTWARE

1.1 OBJETIVO

Visando atingir o Setor Industrial, elaborou-se um programa para microcomputadores capaz de efetuar a análise da proteção dos equipamentos contidos em seu sistema elétrico, verificando a proteção seletiva e coordenada dos dispositivos de proteção instalados.

O programa aqui proposto representa uma opção de baixo custo e alta performance na análise da proteção para o Setor Elétrico Industrial.

1.2 INTRODUÇÃO

Os estudos de coordenação da proteção em sistemas elétricos, quando realizados da maneira tradicional, isto é, manual, ou até com auxílio de computadores e microcomputadores, exigem dos técnicos responsáveis, além de conhecimentos básicos sobre o assunto, a disponibilidade para a realização de várias etapas de rotina, tais como:

- Cálculo das correntes de curto-circuito;
- Levantamento dos tempos de atuação dos dispositivos de proteção junto às suas curvas características;
- Comparação das diferenças entre esses tempos com critérios de coordenação.

Além do desperdício significativo de tempo, tal atividade apresenta possibilidade de erros, devido sobretudo aos exaustivos procedimentos manuais

envolvidos, dependendo ainda da complexidade do circuito elétrico a ser analisado.

A grande disponibilidade de microcomputadores na atualidade viabilizou o uso dos métodos matemáticos utilizados em engenharia, sendo que vários programas voltados para esta área das ciências exatas têm sido desenvolvidos para tais equipamentos.

Assim, desenvolveu-se um programa, denominado SELET.EXE, para microcomputadores que efetua a análise da coordenação da proteção de um circuito elétrico visando agilizar as etapas dos estudos de seletividade.

O programa desenvolvido, objeto deste trabalho, tem o objetivo de promover a coordenação da proteção como uma ferramenta didática para a graduação de dispositivos de proteção contra sobrecorrente, realizando uma proteção seletiva e coordenada para motores, cabos e transformadores de potência, os quais representa uma elevada parcela dos equipamentos que compõem um sistema elétrico.

Assim, pode-se enumerar a funcionalidade do programa para várias aplicações no Setor Elétrico Industrial. Dentre elas, tem-se:

- Estudo do comportamento dos relés instalados frente a situações críticas do sistema, averiguando as respostas dos dispositivos de proteção perante aos ajustes das unidades instantânea e temporizada dos dispositivos de sobrecorrente;
- Ampliação, melhoria e adaptações de instalações. Com alguns equipamentos elétricos e dispositivos de proteção já em uso, o sistema elétrico pode ser ligeiramente modificado adaptando-se as mudanças ou atendendo a situações não previstas na época de sua instalação;

- Análise da proteção para especificação de dispositivos de proteção em sistemas elétricos. Estudar uma melhor característica da proteção que mais se adapte a condição desejada pelo sistema elétrico;
- Treinamento. O programa facilita o treinamento de pessoal para grupos de estudos em proteção de sistemas elétricos na sedimentação do conhecimento sobre o uso e aplicação de dispositivos de proteção.

A partir do programa desenvolvido, outros programas podem ser desenvolvidos na área de coordenação da proteção de equipamentos elétricos, tornando-o apto a realizar a análise para proteção de outros equipamentos, ou ainda, colocar a disposição do usuário outros dispositivos de proteção contra sobrecorrente não apresentados no presente trabalho.

Nos itens a seguir, serão apresentados os procedimentos dos métodos e cálculos utilizados no programa para graduação de relés, visando torná-los acessíveis a qualquer usuário que tenha conhecimentos básicos em técnica de programação de computadores, e poder manuseá-lo com base nos procedimentos do programa SELET.EXE.

1.3 ENTRADA DE DADOS DE SISTEMA ELÉTRICO

Para facilitar a interpretação do sistema elétrico pelo usuário, o programa gera um arquivo de dados em formato texto para MS-DOS com informações de componentes deste sistema, para assim iniciar a análise da proteção de tal maneira que se possa manipular ou alterar o arquivo como desejado.

Os dados necessários do arquivo de entrada, são os disponíveis através de catálogos de fornecedores ou das placas dos equipamentos do sistema. Também, deverão estar disponíveis neste arquivo, os valores de base do sistema, isto é, potência e tensões, pois serão utilizados pela análise.

1.4 MODELAGEM MATEMÁTICA ADOTADA PARA O CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO

Na análise de um sistema elétrico trifásico proposto, pode-se representar seus componentes ou equipamentos elétricos (motores de indução, transformadores, barramento da concessionária, alimentadores e outros) unifilarmente, modelando-os matematicamente gerando um diagrama de impedância, conforme mostram os itens 1.4.2, 1.4.3, 1.4.4 e 1.4.5 a seguir, que descrevem os procedimentos iniciais de entrada de dados e as rotinas de cálculo para análise do sistema, utilizando-os repetidas vezes a cada entrada dos equipamentos disponíveis.

Os itens 1.4.1 e 1.4.6 descrevem os procedimentos adotados para análise do sistema elétrico pelo programa. Os dados de entrada para estes itens dependem dos resultados obtidos nos itens 1.4.2, 1.4.3, 1.4.4 e 1.4.5, caso contrário, não efetuará uma análise correta do sistema apresentando erro de processamento.

1.4.1 MATRIZ DE IMPEDÂNCIA NODAL

Com auxílio da Análise Nodal, fez-se a modelagem da rede elétrica do sistema através da Matriz de Admitância Nodal [Y_{BUS}] do sistema. A Matriz de Impedância Nodal [Z_{BUS}] é obtida através de [Y_{BUS}] pelo método de Shipley-Collen[1]. Estes procedimentos estão presentes na rotina através de subrotinas de cálculo para análise do sistema elétrico industrial. Estas subrotinas são descritas no capítulo 2.

Uma observação importante à rotina, é que adota-se a terra como barra de referência do sistema, e esta recebe a configuração de "barra zero (0)".

1.4.2 TRANSFORMADOR

Nesta rotina, o transformador é modelado através de uma resistência e uma reatância ligados em série entre a barras receptora (i) e emissora (j). A figura 1.1 ilustra o modelo matemático adotado para transformadores.

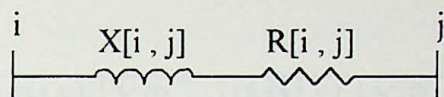


FIGURA 1.1 - MODELO USADO PARA TRANSFORMADORES

Na figura 1.1, tem-se:

$R[i, j]$ - resistência, em [pu];

$X[i, j]$ - reatância, em [pu];

i, j - barras terminais do transformador.

A resistência e a reatância do transformador podem ser obtidas com o auxílio da tabela 1.1 adotado no programa desenvolvido, o qual apresenta algumas relações entre as potências, em [MVA], e os valores típicos de X/R (relação entre a reatância e a resistência) dos transformadores. Para um valor de potência intermediário aos valores da tabela 1.1, adota-se o valor X/R da maior potência. Outras relações que não constam na tabela 1.1, podem ser obtidas em [6].

As equações (1.1), (1.2) e (1.3) apresentam as rotinas dos cálculos da resistência e reatância do transformador, que serão utilizados como subsídios para a construção da matriz de admitância [Y_{BUS}].

$$\text{ang} = \text{arc}[\tan(X / R)] \quad (1.1)$$

$$R[i, j] = Z_T \cdot \cos(\text{ang}) \quad (1.2)$$

$$X[i, j] = Z_T \cdot \text{sen}(\text{ang}) \quad (1.3)$$

Onde nas equações (1.1) a (1.3), tem-se:

ang - ângulo;

X/R - relação X/R;

Z_T - impedância do transformador, em [pu].

X/R	[MVA]	X/R	[MVA]	X/R	[MVA]	X/R	[MVA]	X/R	[MVA]
4,00	0,50	8,00	2,00	11,6	4,60	19,6	16,00	35,20	80,00
4,50	0,60	8,2	2,20	12,00	5,00	20,80	18,00	36,60	90,00
5,00	0,70	8,4	2,40	12,80	6,00	22,00	20,00	38,00	100,0
5,50	0,80	8,6	2,60	13,60	7,00	23,80	26,00	39,60	120,0
6,00	0,90	8,80	2,80	14,40	8,00	25,60	32,00	41,80	140,0
6,50	1,0	9,00	3,00	15,20	9,00	27,40	38,00	42,80	160,0
6,80	1,20	10,00	3,00	16,00	10,00	29,20	44,00	44,40	180,0
7,10	1,40	10,40	3,40	17,20	12,00	31,00	50,00	46,00	200,0
7,40	1,60	10,80	3,80	18,40	14,00	32,40	60,00		
7,70	1,80	11,20	4,2	19,00	15,00	33,80	70,00		

TABELA 1.1 - RELAÇÕES X/R PARA TRANSFORMADORES

As equações (1.4) e (1.5) serão utilizadas como subsídios para os cálculos de graduação do ajuste dos dispositivos de proteção.

$$I_{PRI}[i, j] = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_R} \quad (1.4)$$

$$I_{SEC}[i, j] = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_E} \quad (1.5)$$

Onde nas equações (1.4) e (1.5), tem-se:

$I_{PRI}[i, j]$ - corrente nominal lado primário do transformador ligado entre as barras i e j , em [A];

$I_{SEC}[i, j]$ - corrente nominal lado secundário do transformador ligado entre as barra i e j , em [A];

U_R - tensão no lado primário do transformador, em [V];

U_E - tensão no lado secundário do transformador, em [V];

S_T - potência aparente do transformador, em [kVA].

1.4.3 MOTOR DE INDUÇÃO

O modelo adotado para análise do motor no circuito é o circuito equivalente ilustrado na figura 1.2, onde tem-se em série uma fonte ideal de tensão, a resistência e a reatância subtransitória do motor. Adota-se “ i ” igual zero como referência para terra.

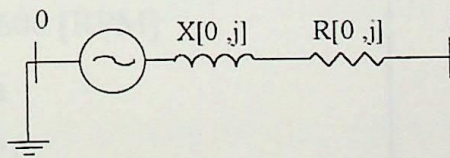
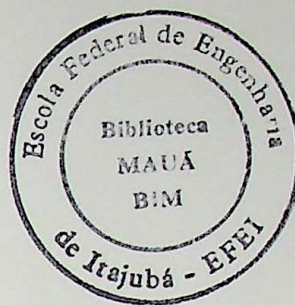


FIGURA 1.2 - MODELO USADO PARA MOTORES

Adota-se a reatância subtransitória como característica do motor de indução, porque a contribuição de corrente durante a falta só ocorre durante os primeiros ciclos, isto é, o regime subtransitório.

Esta reatância pode ser calculada a partir da corrente de partida do motor, como mostra a equação (1.6), onde de acordo com o tipo de máquina, tem-se um fator de multiplicação, ver tabela 1.2.

$$X_{\text{MOT}}[j] = F \cdot \frac{1}{I_{P_I_N}[j]} \quad (1.6)$$



Onde na equação (1.6), tem-se:

$I_{P_I_N}[j]$ - múltiplo da corrente de partida do motor em relação a nominal ligado à barra j , em [pu];

$X_{\text{MOT}}[j]$ - reatância do motor ligado à barra j , em [pu];

F - fator de multiplicação, ver tabela 1.2.

Tipo de máquina	F
Turbogeradores, hidrogeradores, compensadores síncronos	1
Hidrogeradores	0,75
Motores síncronos	1
Motores de indução	
- $P_{\text{MOTOR}} > 1000$ [HP] até 1800 [RPM]	1
- $P_{\text{MOTOR}} > 250$ [HP] até 3600 [RPM]	1
- P_{MOTOR} de 50 [HP] acima	1,2
- P_{MOTOR} abaixo de 50 [HP]	1,67

TABELA 1.2 – FATORES DE MULTIPLICAÇÃO TÍPICOS PARA CÁLCULOS DE REATÂNCIA EM MÁQUINAS ELÉTRICAS [4]

A resistência do motor de indução é calculada pela equação (1.7) com auxílio da tabela 1.3 adotado no programa desenvolvido, o qual apresenta algumas relações entre as potências, em [HP], e os valores típicos de X/R dos motores de indução. Para um valor de potência intermediário aos valores da tabela 1.3, adota-se o valor X/R da maior potência. Outras relações que não constam na tabela 1.3, podem ser obtidas em [6].

$$R_{\text{MOT}}[j] = X_{\text{MOT}}[j] \cdot \frac{1}{X/R} \quad (1.7)$$

Onde na equação (1.7), tem-se:

$R_{\text{MOT}}[j]$ - resistência do motor ligado à barra j , em [pu];

[HP]	X/R	[HP]	X/R
50	6,0	250	13,0
60	6,5	300	15,0
75	7,0	400	16,0
100	8,0	450	17,0
125	9,0	500	19,0
150	10,3	550	20,7
175	12,0	600	21,3
200	12,5	650	21,9

TABELA 1.3 - RELAÇÕES X/R PARA MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Para a inclusão da resistência e a reatância do motor na matriz de admitância, adota-se as equações (1.8) e (1.9).

$$R[0, j] = R_{\text{MOT}}[j] \quad (1.8)$$

$$X[0, j] = X_{\text{MOT}}[j] \quad (1.9)$$

A equação (1.10) mostra o cálculo da corrente de partida do motor. Este será utilizado como subsídio para os cálculos de graduação do ajuste de dispositivos de proteção. Como as correntes de partida e de rotor bloqueado do motor são iguais, tem-se que o valor da corrente de rotor bloqueado ($I_{\text{BLO}}[j]$), terá o mesmo valor da corrente de partida.

$$I_p[j] = I_{p_N}[j] \cdot I_{NOM}[0, j] \quad (1.10)$$

Onde na equação (1.10), tem-se:

$I_{NOM}[0, j]$ - corrente nominal do equipamento ligado à barra j , em [A];

$I_p[j]$ - corrente de partida do motor ligado à barra j , em [A];

$I_{p_N}[j]$ - múltiplo da corrente de partida pela corrente nominal do motor ligado à barra j ;

1.4.4 CABO

O cabo é modelado através de uma resistência e uma reatância indutiva ligados em série entre duas barras, como ilustrado na figura 1.3.

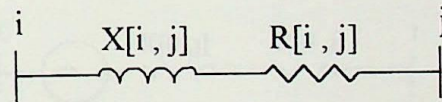


FIGURA 1.3 - MODELO USADO PARA CABOS

As equações (1.11) e (1.12) apresentam as rotinas para os cálculos da resistência e reatância indutiva do cabo, que serão utilizados na construção da matriz de admitância do sistema elétrico desejado.

$$R[i, j] = \frac{\text{compr}}{1000} \cdot R_{\text{CABO}} \cdot \frac{S_{\text{BASE}}}{U_{\text{BASE}}^2 [i]} \quad (1.11)$$

$$X[i, j] = \frac{\text{compr}}{1000} \cdot X_{\text{CABO}} \cdot \frac{S_{\text{BASE}}}{U_{\text{BASE}}^2 [i]} \quad (1.12)$$

Onde nas equações (1.11) e (1.12), tem-se:

$compr$ - comprimento do cabo, em [km];

R_{CABO} - resistência do cabo, em [Ω/km];

X_{CABO} - reatância indutiva do cabo, em [Ω/km].

S_{BASE} - potência de base adotada do sistema, em [kVA];

$U_{BASE}[i]$ - tensão de base adotada na barra i , em [V];

1.4.5 BARRAMENTO DA CONCESSIONÁRIA

No barramento da concessionária de energia elétrica, isto é, do sistema de suprimento de energia elétrica à indústria, tem-se uma fonte ideal de tensão em série com a impedância equivalente da concessionária, conforme ilustrado na figura 1.4. Esta impedância é obtida conforme apresenta as equações (1.13) e (1.14).

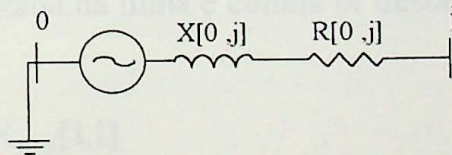


FIGURA 1.4 - MODELO USADO PARA BARRAMENTO DA CONCESSIONÁRIA

$$Z_{EQ} = \frac{1}{S_{CC} / S_{BASE}} \quad (1.13)$$

$$\delta = \arctg\left(\frac{Q_{CC}}{P_{CC}}\right) \quad (1.14)$$

Onde nas equações (1.13) e (1.14), tem-se:

$[Z_{EQ}]$ - impedância equivalente da concessionária, em [pu];

S_{CC} - potência de curto-circuito na barra de entrada do sistema (concessionária)

, $S_{CC} = P_{CC} + jQ_{CC}$, em [kVA].

Para a inclusão da resistência e a reatância indutiva do circuito da concessionária na matriz de admitância, define-se as equações (1.15) e (1.16).

$$R [i, j] = \cos(\delta) \cdot Z_{EQ} \quad (1.15)$$

$$X [i, j] = \text{sen}(\delta) \cdot Z_{EQ} \quad (1.16)$$

1.4.6 CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO.

As correntes de curto-circuito simétrica e assimétrica do sistema e o fator de assimetria para cada barra do sistema elétrico são calculadas através dos valores contidos, em pu, na diagonal principal da matriz $[Z_{BUS}]$.

Cada valor contido na diagonal principal, representa a impedância equivalente de uma barra qualquer do sistema elétrico (barra br) à barra de referência (barra 0). Por exemplo, a matriz $[Z_{BUS}]$ mostrada abaixo, referente a um circuito com 3 barras, apresenta na diagonal principal os valores de resistência e reatância da barra localizada na linha e coluna br desta matriz.

$$[Z_{BUS}] = \begin{bmatrix} R_{BUS}[1,1] + j \cdot X_{BUS}[1,1] & \cdot & \cdot \\ \cdot & R_{BUS}[2,2] + j \cdot X_{BUS}[2,2] & \cdot \\ \cdot & \cdot & R_{BUS}[3,3] + j \cdot X_{BUS}[3,3] \end{bmatrix}$$

O valor da corrente de curto-circuito em qualquer barra (br) do circuito, em pu, é calculada conforme apresenta a equação (1.17)

Com a impedância equivalente de uma barra (br) qualquer do circuito, obtém-se a corrente de curto-circuito na barra (br), em pu, conforme equação (1.17). Para se obter esta corrente em [A], multiplica-se o valor de corrente em pu pela equação (1.18), isto é, pela corrente de base, ver equação (1.19).

$$I_{PU} = \frac{1}{\sqrt{R_{BUS}[br, br]^2 + X_{BUS}[br, br]^2}} \quad (1.17)$$

$$I_{BASE} = \frac{S_{BASE}}{\sqrt{3} \cdot U_{BASE}[br]} \quad (1.18)$$

$$I_{BARRA}[br] = I_{PU} \cdot I_{BASE} \quad (1.19)$$

Onde nas equações (1.17) a (1.19), tem-se:

I_{PU} - valor da corrente de curto-circuito na barra br, em [pu];

I_{BASE} - valor da corrente de base na barra br, em [A];

$R_{BUS}[br, br]$ - resistência equivalente obtida da matriz $[Z_{BUS}]$, linha e coluna br, em [pu];

$X_{BUS}[br, br]$ - reatância equivalente obtida da matriz $[Z_{BUS}]$, linha e coluna br, em [pu];

$I_{BARRA}[br]$ - corrente de curto-circuito na barra br, em [A];

Os valores das correntes de curto-circuito simétrica e assimétrica são calculados, respectivamente, conforme as equações (1.20) e (1.26).

$$\omega = 2 \pi \cdot f \quad (1.20)$$

$$L = \frac{X_{BUS}[br, br]}{\omega} \quad (1.21)$$

$$Z = \sqrt{R_{BUS}[br, br]^2 + X_{BUS}[br, br]^2} \quad (1.22)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_{BUS}[br, br]}{R_{BUS}[br, br]}\right) \quad (1.23)$$

$$I_{SIM}[br](t) = \frac{\sqrt{2}}{Z} \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) \quad (1.24)$$

$$\zeta = \frac{L}{R_{BUS}[br, br]} \quad (1.25)$$

$$I_{ASS}[br](t) = \frac{\sqrt{2}}{Z} \cdot [\text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-t\zeta} \cdot \text{sen}(\alpha - \theta)] \quad (1.26)$$

Onde nas equações (1.20) a (1.26), tem-se:

- f - frequência, em [Hz];
 ω - velocidade angular, em [rad/s];
L - indutância, em [H];
Z - impedância, em [pu];
 θ - ângulo entre a tensão e a corrente em regime permanente;
 α - ângulo associado ao instante do curto-circuito e o correspondente valor de tensão;
 $I_{SIM}[br](t)$ - corrente de curto-circuito simétrica na barra br em função do tempo, em [pu];
t - tempo, em [s];
 ζ - constante de tempo;
 $I_{ASS}[br](t)$ - corrente de curto-circuito assimétrica na barra br em função do tempo, em [pu];

O fator de assimetria entre as correntes de curto-circuito assimétrica e simétrica é calculada conforme equações (1.27), (1.28) e (1.29).

$$I_{RMS-SIM} = \frac{1}{t} \cdot \sum_{t=833ms}^1 \sqrt{I_{SIM}^2(t)} \cdot I_{BASE} \quad (1.27)$$

$$I_{RMS-ASS} = \frac{1}{t} \cdot \sum_{t=833ms}^1 \sqrt{I_{ASS}^2(t)} \cdot I_{BASE} \quad (1.28)$$

$$F_{ASS}[j] = \frac{I_{RMS-ASS}}{I_{RMS-SIM}} \quad (1.29)$$

$$I_{SIM}[j] = I_{RMS-SIM} \quad (1.30)$$

$$I_{ASS}[j] = I_{RMS-ASS} \quad (1.31)$$

Onde nas equações (1.27) a (1.31), tem-se:

- $I_{RMS-ASS}$ - corrente de curto-circuito eficaz assimétrica, em [A];
- $I_{RMS-SIM}$ - corrente de curto-circuito eficaz simétrica, em [A];
- $F_{ASS}[j]$ - fator de assimetria a ser utilizado para a barra j.
- $I_{SIM}[j]$ - valor da corrente de curto-circuito simétrica na barra j, em [A];
- $I_{ASS}[j]$ - valor da corrente de curto-circuito assimétrica na barra j, em [A];

1.5 ANÁLISE DA PROTEÇÃO CONTRA SOBRECORRENTE

O programa desenvolvido realiza uma análise dos parâmetros do circuito elétrico e dos equipamentos do sistema elétrico definindo uma melhor proteção contra sobrecorrente para o sistema, conforme recomendações [4], [5], [6] e catálogos de fabricantes. Assim, tem-se a seguir os procedimentos adotados para o programa.

A figura 1.5 ilustra dois diagramas unifilares para aplicação na proteção contra sobrecorrente em equipamentos elétricos. Estes ilustram um relé (R) supervisionando a corrente circulante do relé (I_{NR}), que com auxílio do transformador de corrente (TC) corresponderá à corrente circulante do equipamento (I_{NOM}). Se I_{NR} é adotado como valor ajustado para proteção do motor, e surgir uma corrente superior a esta, o relé comandará a abertura, disparo, do circuito de alimentação do equipamento através de um disjuntor ou de um contator.

Os relés apresentam características de tempo de disparo instantâneo ou atrasado após sua sensibilização pelo valor de ajuste da proteção, que dependendo da forma construtiva deste relé, apresenta sua própria característica de atuação. Assim, adotou-se no programa os tipos mais comuns, os relés eletromecânicos, estáticos, microprocessados, térmicos. Também, está disponível no programa as características dos fusíveis, pois normalmente utiliza-se componentes de abertura sem capacidade de interrupção a curtos-circuitos.

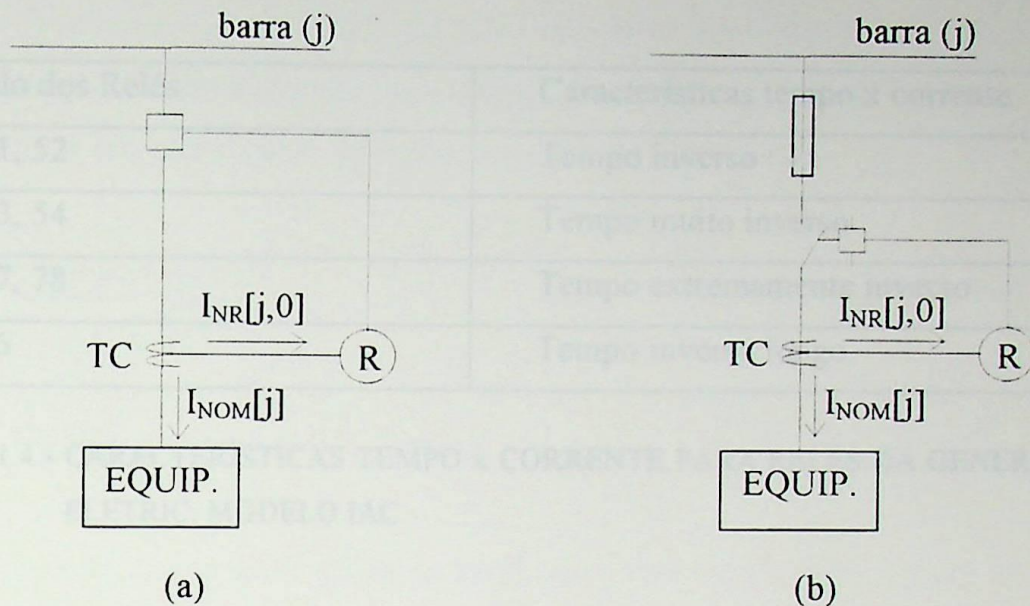


FIGURA 1.5 - DIAGRAMAS UNIFILARES COM ESQUEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA SOBRECORRENTE.

O programa desenvolvido discrimina os dispositivos de proteção através de suas características construtivas, e não por fabricante.

1.5.1 RELÉS IAC - GENERAL ELETRIC E CO - WHESTINGHOUSE

Os relés tipo IAC, General Eletric, e CO, Whestinghouse, têm o mesmo princípio de funcionamento, isto é, com tempo de atuação atrasado, por disco de indução. Para estes dois relés, tem-se os mesmos procedimentos de graduação dos ajustes, pois estes fabricantes apresentam em seus dispositivos o mesmo princípio de ajuste.

Escolhido estes dispositivos, o passo seguinte é a escolha do tipo de relé pela característica de tempo para as unidades de sobrecorrente de indução (característica Tempo x Corrente).

A tabela 1.4 apresenta os modelos disponíveis para relés da General Eletric, e a figura 1.6 ilustra as características Tempo x Corrente disponíveis para o relé com característica de tempo inverso tipo IAC51, IAC52.

Modelo dos Relés	Características tempo x corrente
IAC51, 52	Tempo inverso
IAC53, 54	Tempo muito inverso
IAC77, 78	Tempo extremamente inverso
IAC66	Tempo inverso longo

TABELA 1.4 - CARACTERÍSTICAS TEMPO x CORRENTE PARA RELÉS DA GENERAL ELETRIC, MODELO IAC.

Os procedimentos seguintes a escolha do relé, são os cálculos para a graduação dos ajustes do relé.

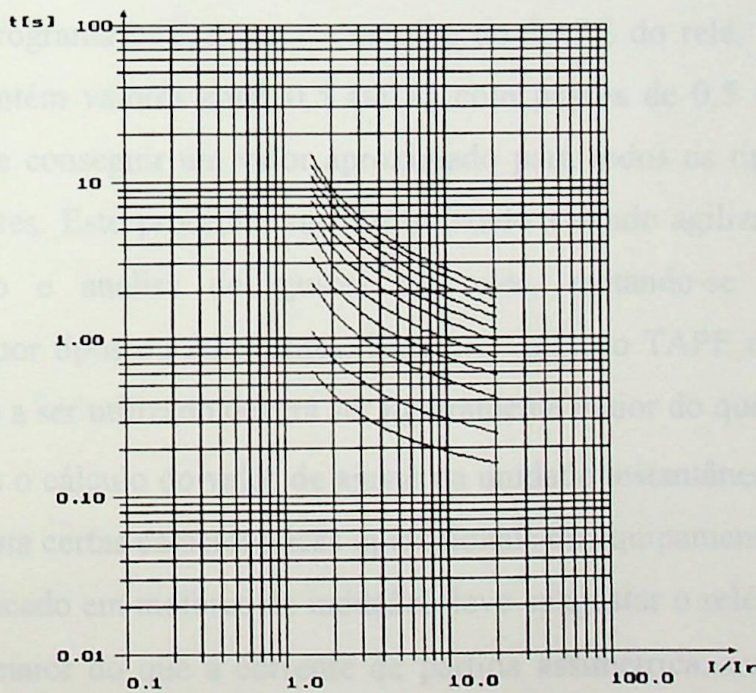


FIGURA 1.6 - CARACTERÍSTICAS TEMPO x CORRENTE PARA OS RELÉS IAC51 E IAC52, GENERAL ELETRIC - TEMPO INVERSO.

Para a escolha do TAPE do relé, calcula-se inicialmente um valor de corrente denominada de ajuste do relé, através da equação (1.32). O TAPE a ser adotado deverá ser maior que o valor da corrente de ajuste do relé.

$$I_{NR}[j] = \frac{I_{NOM}[j,0]}{RTC[j]} \quad (1.32);$$

Onde na equação (1.32), tem-se:

$I_{NR}[j]$ - corrente de ajuste do relé de proteção do motor ligado à barra j , em [A];

$RTC[j]$ - relação de transformação do transformador de corrente ligado entre as barras 0 e j ;

O programa utiliza, para a escolha do TAPE do relé, um arquivo de dados onde contém valores entre 0,5 até 15 com passos de 0,5 em 0,5. Isto se deve ao fato de conseguir um valor aproximado para todos os tipos de relés de vários fabricantes. Este procedimento foi utilizado visando agilizar os processos para o estudo e análise de ajustes de relés, evitando-se outras rotinas discriminadas por tipos ou fabricantes. Então, o valor do TAPE do relé ligado à barra j ($I_{TAPE}[j]$) a ser utilizado deverá ser ligeiramente maior do que $I_{NR}[j]$.

Para o cálculo do valor de ajuste da unidade instantânea do relé, deve-se levar em conta certas características operacionais do equipamento elétrico.

Aplicado em motores de indução, deve-se ajustar o relé para disparar a uma corrente maior do que a corrente de partida assimétrica, evitando disparos indevidos durante a partida do motor. O programa adota uma margem de segurança de projeto de 10%, conforme apresenta a equação (1.32). Assim, para qualquer curto-circuito num ponto a montante do relé, a unidade instantânea será sensibilizada.

$$I_{50}[j] = \frac{I_p[j] \cdot F_{ASS}[j] \cdot 1,1}{RTC[j] \cdot I_{TAPE}[j]} \quad (1.32)$$

Onde na equação (1.32), tem-se:

$I_{50}[j]$ - corrente de ajuste da unidade instantânea do relé que protege o motor ligado à barra j , em [A];

O próximo passo, será da escolha do DIAL, isto é, a curva de característica temporizada do relé. A curva adotada deve dar tempo suficiente para que o relé não opere durante a partida do motor, aproximadamente em 0,4 [s] de intervalo. Assim, a curva a ser escolhida deverá estar ligeiramente acima do ponto que tenha como abcissa o tempo de partida $t_p[j]$, e ordenada, $M_p[j]$. O múltiplo da corrente de partida do motor é dado pela equação (1.33).

$$M_p[j] = \frac{I_p[j]}{I_{TAPE}[j] \cdot RTC[j]} \quad (1.33)$$

Onde na equação (1.33), tem-se:

$M_p[j]$ - múltiplo da corrente de partida do motor ligado à barra j , em [A];

$I_p[j]$ - corrente de partida do motor ligado à barra j , em [A];

1.5.2 EQUAÇÕES NORMALIZADAS

Com o avanço da tecnologia, componentes eletrônicos foram utilizados na construção de dispositivos de proteção facilitando o manuseio destes, possibilitando assim, conforme normas [4], a padronização das curvas características através de equações definidas e de uso pelos fabricantes.

Os procedimentos para esta rotina são os mesmos da seção 1.5.1, sendo que para este relé, utiliza-se equações das curvas características para calcular as coordenadas Tempo x Corrente.

As equações (1.34), (1.35) e (1.36) informam as características de tempo em função da corrente para as curvas normalmente inverso, extremamente inverso e muito inverso, respectivamente.

$$t(I / I_r) = \frac{0,14 \cdot TMS}{(I / I_r)^{0,02} - 1} \quad (1.34)$$

$$t(I / I_r) = \frac{80 \cdot TMS}{(I / I_r)^2 - 1} \quad (1.35)$$

$$t(I / I_r) = \frac{13,5 \cdot TMS}{(I / I_r) - 1} \quad (1.36)$$

Onde nas equações (1.34) a (1.36), tem-se:

$t(I/I_r)$ - tempo de operação em função de (I/I_s) , em [s];

I/I_r - múltiplo da corrente do relé.

TMS - DIAL do relé;

1.5.3 RELÉ “LODTRAK” - GENERAL ELETRIC

O relé multifunção, tipo Lod-trak, fabricado pela General Eletric [7], tipo semi-estático, é indicado para proteção de motores. O programa utiliza apenas a função de proteção contra sobrecarga.

A rotina desenvolvida para a calibração deste relé segue os mesmos procedimentos para seção 1.5.1, sendo que o critério para a escolha do DIAL a ser adotado para o relé, é escolher o DIAL ligeiramente menor que o tempo de rotor bloqueado $t_{RB}[j]$ do motor e maiores que o tempo de partida $t_p[j]$ do motor, respeitando o limite térmico do motor .

1.5.4 RELÉ 3UA E 7SJ600- SIEMENS

O relé tipo 3UA, fabricado pela Siemens, ao contrário do relé na seção 1.5.3, destina-se apenas à proteção contra sobrecarga em motores.

Esta rotina utiliza os mesmos procedimentos de ajuste da seção 1.5.3, mas como este relé apresenta apenas uma curva por cada tipo de relé, a escolha do ajuste do DIAL não é feita. A curva adotada segue a característica de tempo para condição a quente.

O catálogo do fabricante fornece os seguintes tipos de relés 3UA45, 3UA46, 3UA50, 3UA52, 3UA54, 3UA58 e 3UA62, sendo que os dois primeiros, apresentam curva característica, e aos demais, outra curva característica. A escolha do tipo do relé é com relação à sua corrente nominal, pois cada um apresenta uma faixa de graduação de acordo com corrente de ajuste do relé.

O relé multifunção 7SJ600, fabricado pela Siemens, tipo eletrônico, apresenta equações que auxiliam a monitoração da corrente contra sobrecargas, por exemplo, utiliza as equações (1.37) e (1.38) para traçar a curvas características Tempo x Corrente do relé. Logo, estas equações dão condições ao relé de supervisionar a condição de sobrecarga do equipamento para a condição à frio e à quente.

$$t = 60 \cdot Kt \cdot \ln \left(\frac{I_R^2 - 0,9^2}{I_R^2 - 1} \right) \quad (1.37)$$

$$t = 60 \cdot Kt \cdot \ln \left(\frac{I_R^2}{I_R^2 - 1} \right) \quad (1.38)$$

Onde nas equações (1.37) a (1.38), tem-se:

t - tempo de disparo do relé, em [min];

Kt - constante de tempo de aquecimento do equipamento;

I_R - múltiplo da corrente de disparo;

Esta rotina utiliza os mesmos procedimentos de ajuste da seção 1.5.3, mas para se obter a curva característica, dependerá da constante térmica, Kt , do equipamento protegido, que poderá ser conseguido com o fabricante do equipamento. Caso contrário, deve-se escolher um valor de Kt fornecendo uma curva para ambas condições à frio ou à quente, menores que o tempo de rotor bloqueado $t_{RB}[j]$ do motor e maiores que o tempo de partida $t_p[j]$ do motor. Assim, deverá ser respeitado o limite térmico do motor.

1.5.5 FUSÍVEL

O fusível escolhido no programa desenvolvido para a proteção de motores e transformadores é do tipo NH [8], fabricado pela Siemens. O dimensionamento do fusível consiste no menor fusível que não atue para as condições normais de partida do motor ou energização do transformador, e nem durante o funcionamento normal destes. Para os cálculos iniciais do dimensionamento, adota-se a corrente nominal do motor multiplicado pelo fator 1,1 (10% de segurança de projeto), ver equação (1.39).

$$I_{NF} = 1,1 \cdot I_{NOM}[0, j] \quad (1.39)$$

Onde na equação (1.39), tem-se:

$I_{NF}[j]$ - corrente nominal do fusível, em [A];

Ainda, pode-se selecionar o fusível que não atuará para corrente de rotor bloqueado durante o tempo previsto para a partida. Esta recomendação se aplica, normalmente, quando há proteção de sobrecorrente ou de sobrecarga em conjunto com fusível.

1.6 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Brown, Homer E., "Grandes Sistemas Matriciais". Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1977.
- [2] Ramos, Dorel Soares; Dias, Eduardo Mário, "Sistemas Elétricos de Potência - Regime Permanente", Editora Guanabara Dois, Volume 1, 1982
- [3] Pirelli S.A. Companhia Industrial Brasileira - Divisão Cabos, "Cabos de Potência Uso Geral Baixa Tensão (até 1 kV) Condutores metrificados", 1ª edição, 1978.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, "Relés de Medição com uma Grandeza de Alimentação de Entrada a Tempo Dependente Especificado", NBR 7099.
- [5] "Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems" (IEEE Buff Book), IEEE Std 242-1986.
- [6] "Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants" (IEEE Red Book), IEEE Std 141-1976.
- [7] General Electric Company, " LODTRAK Solid- Stade Motor Protection Multifunction Unit - IC3655A118",
- [8] Siemens S.A., "Material Elétrico Industrial – Fusíveis e Seccionadores- Fusíveis)

2. ANÁLISE DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

2.1 INTRODUÇÃO

Normalmente, as correntes que têm as conseqüências mais danosas aos componentes de um Sistema Elétrico são as de curto-circuito. Estas causam as mais freqüentes das interrupções de serviço dando origem, nos casos mais severos, a danos muito graves por efeitos eletrodinâmicos e térmicos, chegando, por vezes, a comprometer a estabilidade do sistema.

O curto-circuito é equivalente a implementação na rede elétrica de um novo elemento, de admitância não nula, que dá lugar a correntes, em geral muito maiores que as correspondentes ao funcionamento normal do sistema [1].

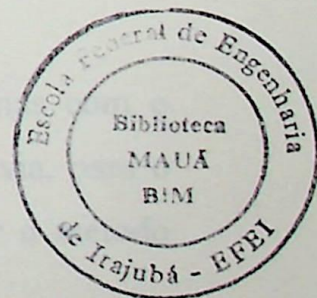
A origem dos curto-circuitos é muito variada, podendo ser mencionado o rompimento do dielétrico da isolação devido a sobretensões, avarias mecânicas, agentes climáticos, acidentes e outros [1]. Por sua natureza, podem dar lugar a faltas simétricas (equilibradas) ou, como na maioria dos casos, a faltas assimétricas (desequilibradas).

Os estudos de curto-circuitos, convencionalmente, consistem na determinação das tensões e correntes resultantes de curto-circuito nos diversos pontos da rede elétrica. Neste trabalho, a determinação das correntes de curto-circuito visam dar suporte aos ajustes dos relés de sobrecorrente.

O programa desenvolvido para análise de proteção, contém um procedimento para a análise da corrente de curto-circuito. Para tal, elaborou-se uma seqüência para iniciar o estudo de curto-circuito de um sistema elétrico. Assim, para o programa desenvolvido, adotou-se a seguinte seqüência:

1. Preparar o arquivo de dados do circuito contendo todos os componentes importantes do sistema e elementos necessários ao estudo. Estes elementos podem ser conseguidos através de dados de placa do equipamento ou através de catálogos de fabricantes;
2. Efetuar a numeração das barras;
3. Escolher a pior condição de operação do sistema. No caso, todos os disjuntores e chaves fechados, todos os motores funcionando e entrada da concessionária conectada;
4. Selecionar as bases de potência, em [VA] e tensão, em [V], para conversão das grandezas representativas do sistema para valores em [pu];
5. Montar as matrizes de admitância nodal e impedância nodal do circuito;
6. Calcular os fatores de assimetria e as correntes de curto-circuito de todas as barras do circuito.

O primeiro passo da seqüência, visa o levantamento dos dados dos equipamentos do circuito elétrico. A tabela 2.1 mostra os equipamentos e as respectivas grandezas que o programa utiliza para a análise.



Equipamento	Grandezas
Sistema (entrada - concessionária)	- Tensão - Potência de curto-circuito ($[VA]\angle\theta$)
Transformador	- Potência - Tensões primária e secundária - Impedância
Transformador de corrente do transformador	- Relação de transformação
Motor	- Potência - Correntes nominal e de partida - Tensão - Velocidade no eixo
Transformador de corrente do motor	- Relação de transformação
Cabo	- Comprimento - Bitola - Impedância

TABELA 2.1 - DADOS NECESSÁRIOS DOS EQUIPAMENTOS PARA ANÁLISE DO CURTO-CIRCUITO.

2.2 ANÁLISE DO SISTEMA ELÉTRICO

Um sistema elétrico, pode ser analisado de diversas formas com o auxílio dos métodos utilizados pela teoria clássica de circuitos. Todavia, para o programa desenvolvido, adotou-se a Análise Nodal, visando facilitar o método computacional.

Os procedimentos adotados no programa desenvolvido para efetuar a Análise Nodal de um circuito qualquer, leva em conta que os valores de impedância dos equipamentos, $R[i, j]$ e $j(X[i, j])$ estão disponíveis, (vide capítulo 1).

Como alguns componentes do sistema elétrico apresentam em seus dados de placa, impedâncias expressas em [pu], em relação à sua própria base de potência e tensão nominais, o programa se utiliza do Sistema “Por Unidade”, vide apêndice (A), para efetuar a análise nodal do circuito elétrico, facilitando o entendimento do processo computacional. Assim, o programa desenvolvido elabora os cálculos usando o sistema [pu], mas os valores de saída estão expressos nas verdadeiras grandezas ([V], [A], [Ω], etc.).

2.2.1 MATRIZ DE ADMITÂNCIAS NODAIS [Y_{BUS}]

Um circuito elétrico pode ser representado por um conjunto de nós, que conectam um conjunto de ramos. Os nós representam as barras terminais dos ramos que por sua vez, em sistemas elétricos industriais, representam cabos, transformadores ou máquinas elétricas.

Circuitos de alimentação tais como circuitos de iluminação, circuitos com dispositivos eletrônicos ou outros que não contribuem para corrente de curto-circuito são desprezadas.

Na análise nodal, é usada a primeira Lei de Kirchhoff para a obtenção das equações do circuito. Esta lei diz que: "A soma algébrica de todas as correntes injetadas em um nó é nula", ver equação (2.1).

$$\dot{I}_i = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^N i_{ij} = 0 \quad (2.1)$$

Onde na equação (2.1), tem-se:

- \dot{I}_i - corrente injetada no nó "i";
- i_{ij} - corrente de ramo entre os nós "i" e "j";
- N - número de ramos conectados ao nó "i".

Para a análise nodal, sempre se escolhe um dos nós do circuito como referência, eliminando-se a equação correspondente a este nó, evitando com isso a singularidade (indeterminação) do sistema de equações. Assim, as tensões calculadas dos demais nós ficam com seus valores referidos ao nó de referência. Neste trabalho, adota-se a terra como referência.

A figura 2.1 apresenta um sistema simplificado para fins de exemplificação.

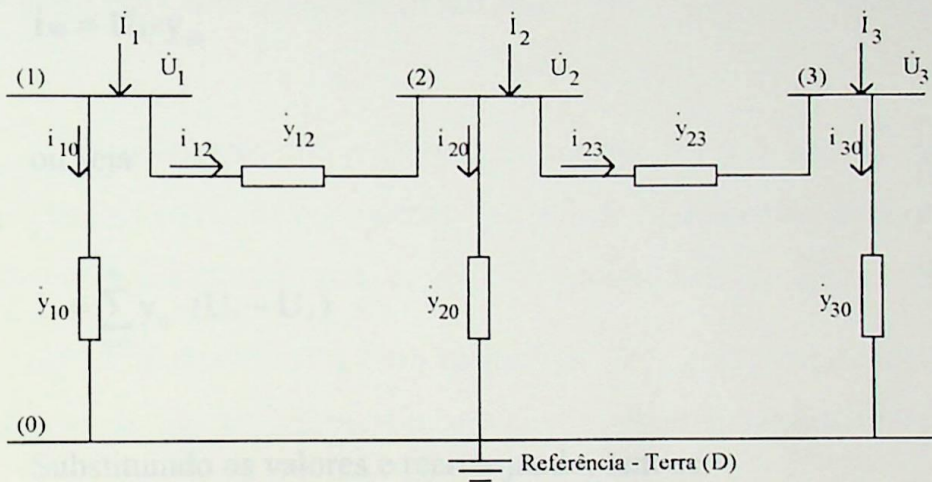


FIGURA 2.1 - APLICAÇÃO DA 1ª LEI DE KIRCHHOFF

Onde na figura 2.1, tem-se:

y_{ij} - admitância equivalente entre as barras "i" e "j";

U_i - tensão no nó "i".

As correntes nos nós (1), (2) e (3), da figura 2.1, são dados por:

$$\text{nó (1)} \quad \overset{\circ}{I}_1 = i_{12} + i_{10}$$

$$\text{nó (2):} \quad \overset{\circ}{I}_2 = -i_{12} + i_{20} + i_{23}$$

$$\text{nó (3):} \quad \overset{\circ}{I}_3 = -i_{23} + i_{30}$$

Através da lei de Ohm, tem-se as correntes dos ramos:

$$i_{12} = (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) \cdot \dot{y}_{12}$$

$$i_{23} = (\dot{U}_2 - \dot{U}_3) \cdot \dot{y}_{23}$$

$$i_{10} = \dot{U}_1 \cdot \dot{y}_{10}$$

$$i_{20} = \dot{U}_2 \cdot \dot{y}_{20}$$

$$i_{30} = \dot{U}_3 \cdot \dot{y}_{30}$$

ou seja:

$$I_i = \sum_{j=0}^N y_{ij} \cdot (\dot{U}_i - \dot{U}_j) \quad (2.2)$$

Substituindo os valores e rearranjando, tem-se:

$$\begin{cases} (\dot{y}_{12} + \dot{y}_{10}) \cdot \dot{U}_1 - \dot{y}_{12} \cdot \dot{U}_2 = \dot{I}_1 \\ \dot{y}_{12} \cdot \dot{U}_1 + (\dot{y}_{12} + \dot{y}_{23} + \dot{y}_{20}) \cdot \dot{U}_2 - \dot{y}_{23} \cdot \dot{U}_3 = \dot{I}_2 \\ \dot{y}_{23} \cdot \dot{U}_3 + (\dot{y}_{23} + \dot{y}_{30}) \cdot \dot{U}_3 = \dot{I}_3 \end{cases}$$

Em forma matricial, o sistema de equações acima fica:

$$\begin{matrix} & (1) & (2) & (3) \\ \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (3) \end{matrix} & \begin{bmatrix} (\dot{y}_{12} + \dot{y}_{10}) & -\dot{y}_{12} & 0 \\ -\dot{y}_{12} & (\dot{y}_{12} + \dot{y}_{23} + \dot{y}_{20}) & -\dot{y}_{23} \\ 0 & \dot{y}_{23} & (\dot{y}_{23} + \dot{y}_{30}) \end{bmatrix} & \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.4)$$

ou seja:

$$\left[\dot{Y}_{BUS} \right] \cdot \left[\dot{U}_N \right] = \left[\dot{I}_N \right] \quad (2.3)$$

Onde na equação (2.3), tem-se:

$[Y_{BUS}]$ - matriz de admitância nodal do circuito, também chamada matriz $[Y_{BUS}]$;

$[U_N]$ - vetor das tensões dos nós;

$[I_N]$ - vetor das correntes injetadas nos nós.

Os elementos da diagonal da matriz $[Y_{BUS}]$ são as admitâncias próprias dos nós enquanto que os elementos fora da diagonal são as admitâncias mútuas ou de transferência entre os nós. Por comodidade, os elementos da matriz $[Y_{BUS}]$ são representados pela letra maiúscula "Y", enquanto a admitância dos elementos do circuito em análise é representada pela letra minúscula "y".

Assim, na construção da matriz $[Y_{BUS}]$ tem-se os seguintes procedimentos:

1. Os elementos da diagonal principal são dados pela soma de todas as admitâncias conectadas ao nó "i" do circuito, conforme mostra a equação (2.4);

Genericamente:

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^N y_{ij} \quad (2.4)$$

No caso do exemplo da figura 2.1, tem-se:

$$Y_{11} = y_{12} + y_{10}$$

$$\dot{Y}_{22} = \dot{y}_{12} + \dot{y}_{23} + \dot{y}_{20}$$

$$\dot{Y}_{33} = \dot{y}_{23} + \dot{y}_{30}$$

2. Os elementos de fora da diagonal principal são dados pela admitância conectada entre os nós "i" e "j", com sinal trocado, conforme mostra a equação (2.5).

Genericamente:

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad (2.5)$$

No caso do exemplo da figura 2.1, tem-se:

$$Y_{12} = Y_{21} = -y_{12}$$

$$Y_{13} = Y_{31} = -y_{13}$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -y_{23}$$

Assim, a matriz de admitância nodal $[Y_{BUS}]$, para o sistema da figura 2.1, é dado por:

$$\dot{Y}_{BUS} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} & \dot{Y}_{13} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} & \dot{Y}_{23} \\ \dot{Y}_{31} & \dot{Y}_{32} & \dot{Y}_{33} \end{bmatrix}$$

Como a entrada dos elementos dos sistema elétrico é seqüencial, o programa desenvolvido adota um procedimento de entrada de dados que caso existam elementos paralelos no arquivo de dados, durante a montagem da matriz

$[Y_{BUS}]$, o programa processará o último elemento registrado do arquivo de dados como único do ramo. Por exemplo, se dois barramentos estão interligados por transformadores, isto é, transformadores paralelos, o programa desenvolvido adotará apenas um como a única interligação entre os barramentos. Para evitar tal operação, deve-se criar uma barra fictícia, entre um dos barramentos e os elementos, e interligados com um elemento de baixo valor de impedância, um cabo como exemplo, vide figura 2.2.

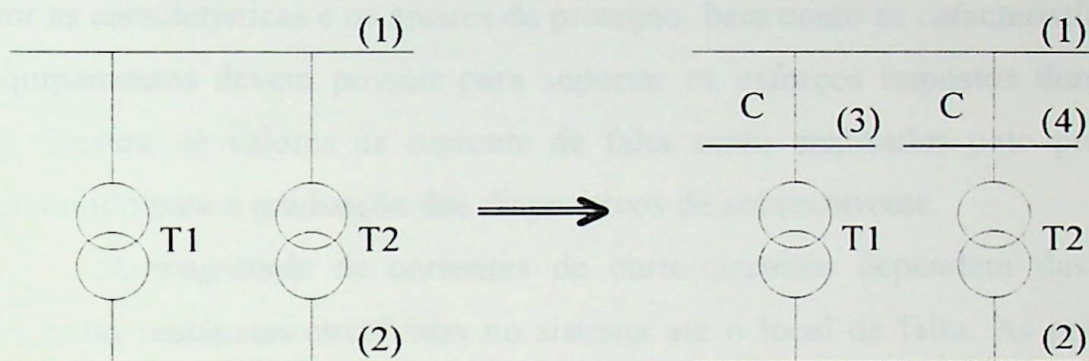


FIGURA 2.2 – EQUIVALÊNCIA ENTRE CIRCUITOS UTILIZANDO BARRAS FICTÍCIAS

Onde na figura 2.2, tem-se:

- (1),(2) - barramento do transformador;
- (3),(4) - barramento fictício;
- T1,T2 - transformador;
- C - cabo com baixo valor de impedância.

2.2.2 MATRIZ DE IMPEDÂNCIAS NODAIS $[Z_{BUS}]$

Dá-se o nome de matriz de impedâncias nodais $[Z_{BUS}]$, a inversa da matriz $[Y_{BUS}]$, conforme mostra a equação ver (2.6).

$$[Z_{BUS}] = [Y_{BUS}]^{-1} \quad (2.6)$$

Para a inversão de matrizes, adotou-se o método de Shipley-Coleman [2].

2.3 CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Os resultados de estudo de curto-circuito, que são as correntes no ponto de falta e as tensões próximas ao ponto de falta, darão subsídios para definir as características e os ajustes da proteção, bem como as características que os equipamentos devem possuir para suportar os esforços impostos durante as faltas. Destes, os valores de corrente de falta serão analisados pelo programa desenvolvido para a graduação dos dispositivos de sobrecorrente.

A magnitude de correntes de curto-circuitos dependem das várias fontes e das reatâncias envolvidas no sistema até o local da falta. As principais fontes que definem as correntes de curto-circuito em um sistema elétrico industrial, são os geradores, os motores de indução e síncronos e o sistema alimentador da concessionária.

A corrente de curto-circuito, em [pu], em uma barra de um sistema elétrico, é o inverso da impedância equivalente do sistema, a qual corresponde ao valor localizado na linha e coluna da diagonal principal da matriz $[Z_{BUS}]$ do sistema, conforme mostra a equação (2.7). Esta corrente, com valor em [pu], equivale à corrente eficaz de curto-circuito simétrica. Para se obter a corrente de curto-circuito assimétrica desta barra, multiplica-se a corrente de curto-circuito simétrica correspondente pelo fator de assimetria da barra, vide (2.8) e (2.9).

$$I_{SIM}[br] = \frac{1}{Z[br, br]} \quad (2.7)$$

$$I_{ASS}[br] = FA[br] \cdot I_{SIM}[br] \quad (2.8)$$

$$FA[br] = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-2\pi \left(\frac{R[br,br]}{X[br,br]} \right)}} \quad (2.9)$$

Onde nas equações (2.7) a (2.9), tem-se:

- br - número da barra do sistema elétrico;
- Z[br] - impedância equivalente da barra br, em [pu];
- I_{SIM}[br] - corrente de curto-circuito simétrica da barra br, em [pu];
- I_{ASS}[br] - corrente de curto-circuito assimétrica da barra br, em [pu];
- FA[br] - fator de assimetria da barra br, conforme [4].

Nota-se que o fator de assimetria é dependente da relação X/R do sistema envolvido, e analogamente, o comportamento transitório da corrente durante um curto-circuito pode ser demonstrado através da figura 2.2.

Tem-se que ângulo entre a tensão e a corrente em regime permanente para o circuito da figura 2.3, será dado pela equação (2.10), e o valor de tensão da fonte, em (2.11) com $t = 0$. Assim, α determina a amplitude da tensão no instante da ocorrência do curto-circuito.

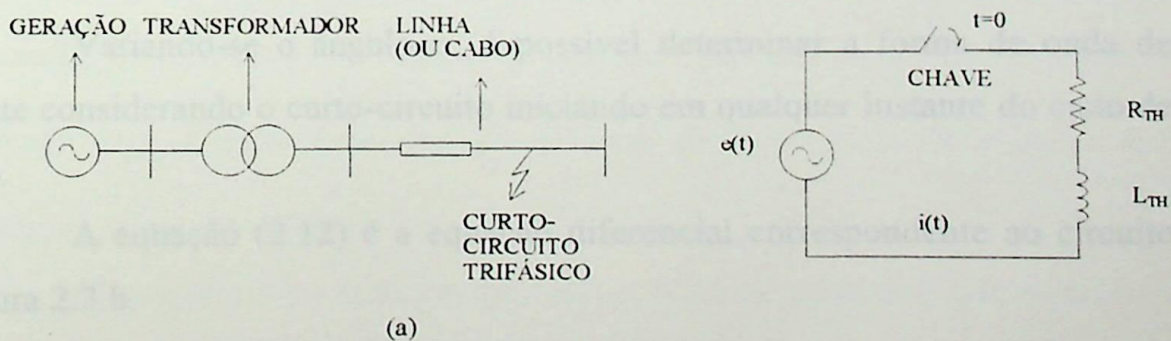


FIGURA 2.3 - CIRCUITO SIMPLIFICADO PARA ANÁLISE DA TEORIA DE ONDA DA CORRENTE DURANTE UM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.

(a) - DIAGRAMA UNIFILAR.

(b) - DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIA.

Onde na figura 2.3, tem-se:

L_{TH} - indutância equivalente “vista” do ponto de falta, em [H];

R_{TH} - resistência equivalente “vista” do ponto de falta, em [Ω];

$e(t)$ - tensão da fonte em função do tempo, em [V];

$i(t)$ - corrente da fonte em função do tempo, em [A].

$$\theta = \arccos \frac{R_{TH}}{\sqrt{R_{TH}^2 + (\omega L_{TH})^2}} \quad (2.10)$$

$$e(t) = E_M \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha) \quad (2.11)$$

Onde nas equações (2.10) e (2.11), tem-se:

θ - ângulo entre a tensão e a corrente em regime permanente;

α - ângulo associado ao instante do curto-circuito e o correspondente valor de tensão;

ω - frequência angular, em [rad/s].

E_M - tensão de pico, em [V];

Variando-se o ângulo α , é possível determinar a forma de onda de corrente considerando o curto-circuito iniciando em qualquer instante do ciclo de tensão.

A equação (2.12) é a equação diferencial correspondente ao circuito da figura 2.3.b.

$$R_{TH} \cdot i + L_{TH} \frac{di}{dt} = e(t) \quad (2.12)$$

A solução de (2.12) é dado pela equação (2.13):

$$i(t) = \frac{E_M}{Z_{TH}} \cdot [\text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-t/\zeta} \cdot \text{sen}(\alpha - \theta)] \quad (2.13)$$

Onde na equação (2.13), tem-se:

ζ - constante de tempo do circuito ($\zeta = L/R$).

Z_{TH} - impedância equivalente “vista” do ponto de falta, em $[\Omega]$.

As formas de onda das figuras 2.4 e 2.5 ilustram a forma de onda $i(t)$, respectivamente, quando $\alpha = \theta$ e $\alpha \neq \theta$.

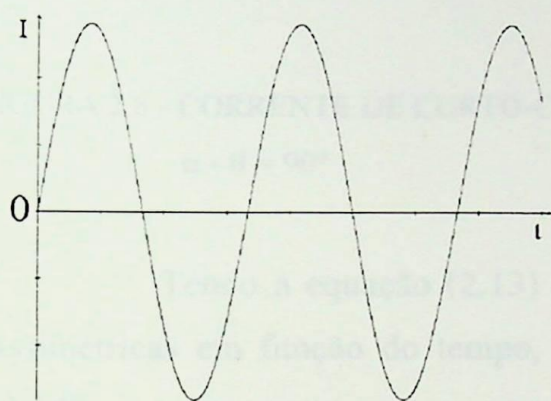


FIGURA 2.4 – ONDA DE CORRENTE
SIMÉTRICA

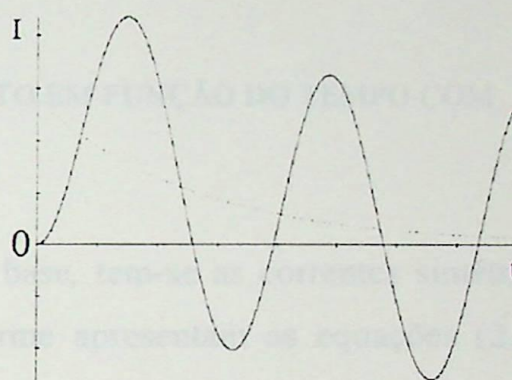


FIGURA 2.5 - ONDA DE CORRENTE
ASSIMÉTRICA

Nota-se a presença de um componente de corrente, com decaimento exponencial e constante de tempo ζ . O valor máximo deste componente, é $\frac{E_M}{Z} \cdot \text{sen}(\alpha - \theta)$, o qual é função do instante da ocorrência da falta, e está ilustrado na curva (b) da figura 2.6.

O aparecimento deste componente é a forma matemática de evitar uma variação repentina da corrente no circuito. Observa-se ainda que, se $\alpha = \theta$, não haverá transitório no circuito, ver curva (c) da figura 2.6.

Nota-se ainda, que se o instante do curto-circuito ocorrer de tal forma que a diferença entre a fase inicial α e a fase da impedância θ seja de $\pm 90^\circ$, a amplitude da corrente transitória será máxima, ficando duas vezes a corrente de regime [2], ver curvas (a) e (c) da figura 2.6 [2].

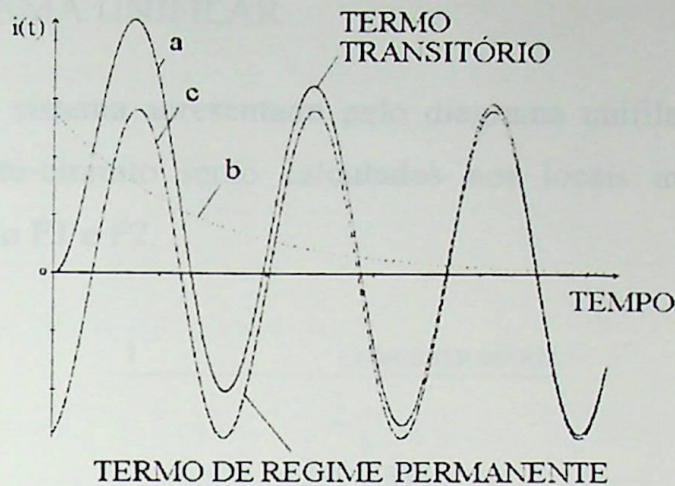


FIGURA 2.6 - CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO EM FUNÇÃO DO TEMPO COM $\alpha - \theta = 90^\circ$

Tendo a equação (2.13) como base, tem-se as correntes simétricas e assimétricas em função do tempo, conforme apresentam as equações (2.14) e (2.15).

$$i_{\text{SIM}}[\text{br}](t) = \frac{U_M}{Z_{\text{TH}}} \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) \quad (2.14)$$

$$i_{\text{ASS}}[\text{br}](t) = \frac{U_M}{Z_{\text{TH}}} \cdot [\text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-t/\zeta} \cdot \text{sen}(\alpha - \theta)] \quad (2.15)$$

Onde nas equações (2.14) e (2.15), tem-se:

$i_{\text{SIM}}[\text{br}](t)$ - corrente simétrica de curto-circuito em função do tempo, em [A];

$i_{\text{ASS}}[\text{br}](t)$ - corrente assimétrica de curto-circuito em função do tempo, em [A];

2.4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO

Nesta seção, calcula-se as correntes de curto-circuito simétrica e assimétrica de um exemplo de forma simples, e compara-se os resultados obtidos com a rotina de curto-circuito do programa.

2.4.1 - DIAGRAMA UNIFILAR

Seja o sistema apresentado pelo diagrama unifilar da figura 2.7. As correntes de curto-circuito serão calculados nos locais marcados com X, e identificados como F1 e F2.

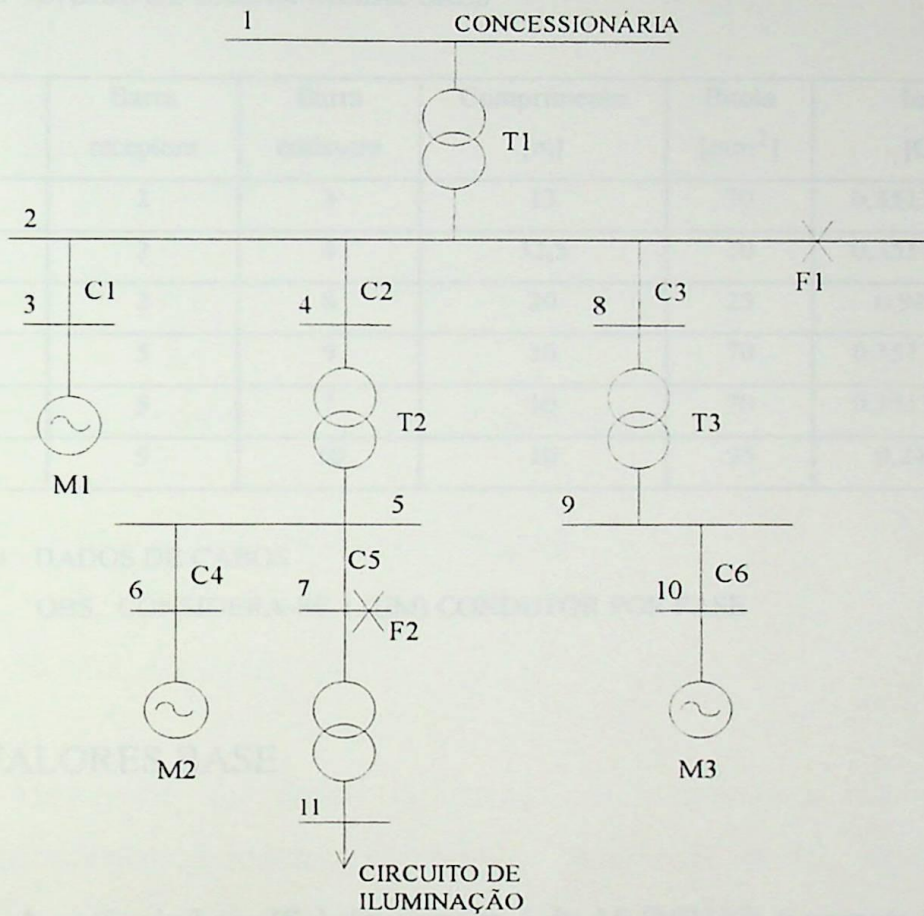


FIGURA 2.7 - DIAGRAMA UNIFILAR DO CIRCUITO EXEMPLO

Motor	Barra	Tensão [kV]	Potência [HP]	Ip/In	RPM
M1	3	13,8	3500	7	900
M2	6	4,16	2000	7	1200
M3	10	0,48	500	6	3600

TABELA 2.2 - DADOS DOS MOTORES DE INDUÇÃO

Transformador	Barra receptora	Barra emissora	Tensão receptor	Tensão emissor	Potência [kVA]	Impedância [%]
T1	1	2	138 [kV]	13.8 [kV]	15.000	7
T2	4	5	13.8 [kV]	4.16 [kV]	3.750	5.5
T3	8	9	13.8 [kV]	0.48 [kV]	1.500	5.75

TABELA 2.3 - DADOS DE TRANSFORMADORES

Cabo	Barra receptora	Barra emissora	Comprimento [m]	Bitola [mm ²]	Impedância [Ohm/Km]
C1	2	3	13	70	0,35177+j0,14873
C2	2	4	32,5	70	0,35177+j0,14873
C3	2	8	20	25	0,9280+j0,1700
C4	5	9	10	70	0,35177+j0,14873
C5	5	7	10	70	0,35177+j0,14873
C6	9	10	10	95	0,2480+j0,1380

TABELA 2.4 - DADOS DE CABOS

OBS.: CONSIDERA-SE 1 (UM) CONDUTOR POR FASE

2.4.2 - VALORES BASE

A potência base (S_B) do circuito é de 15 [MVA], e para as tensões base (U_B) do circuito, adota-se as tensões nominais do transformador na barra 1 e obtem-se as demais conforme mostra tabela 2.5

Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_B [kV]	138	13,8	13,8	13,8	4,16	4,16	4,16	13.8	0,48	0,48

TABELA 2.5 - TENSÕES BASE DAS BARRAS DO CIRCUITO

2.4.3 - CÁLCULO DAS IMPEDÂNCIAS DE RAMOS

a) Concessionária

No ponto de entrega de energia da concessionária, considera-se a potência de curto-circuito disponível de $150 \angle 86,19^\circ$ [MVA] e a tensão de 138 [kV].

$$Z = \frac{15.000}{150.000} = 0,1$$

$$r[0,1] = \cos(-86,19^\circ) 0,01 = 0,0066448 \text{ [pu]}$$

$$x[0,1] = \sin(-86,19^\circ) 0,01 = 0,09978 \text{ [pu]}$$

$$z[0,1] = 0,0066448 + j0,09978 \text{ [pu]}$$

b) Motores de Indução

Utilizando os dados da tabela 2.2, calcula-se as impedâncias subtransitórias para os motores de indução, e através de [5], representada no capítulo 1 pela tabela 1.2, encontram-se as relações X/R correspondentes à potência do motor, em [HP].

→ M1

$$x''_d = \frac{1}{I_p / I_N} = \frac{1}{7} = 0,142857 \text{ [pu]}$$

$$X = 0,142857 \cdot \frac{15.000}{3.500 \cdot 0,746} = 0,820703 \text{ [pu]}$$

A partir de [5], tem-se que:

$$X/R = 39$$

A partir da tabela 1.2, tem-se que $F = 1$, então:

$$r[0,3] = F (0,820703/39) = 0,021047 \text{ [pu]}$$

$$x[0,3] = F (0,820703) = 0,820703 \text{ [pu]}$$

$$z[0,3] = 0,021047 + j0,820703 \text{ [pu]}$$

→ M2

$$x''_d = \frac{1}{I_p / I_N} = \frac{1}{7} = 0,142857 \text{ [pu]}$$

$$X = 0,142857 \cdot \frac{15.000}{2.000 \cdot 0,746} = 1,43623 \text{ [pu]}$$

A partir de [5], tem-se que:

$$X/R = 31$$

Analogamente ao uso da tabela 1.2, tem-se que $F = 1$, então:

$$r[0,6] = F (1,43623/31) = 0,04633 \text{ [pu]}$$

$$x[0,6] = F (1,43623) = 1,43623 \text{ [pu]}$$

$$z[0,6] = 0,04633 + j1,43623 \text{ [pu]}$$

→ M3

$$x''_d = \frac{1}{I_p / I_N} = \frac{1}{7} = 0,142857 \text{ [pu]}$$

$$X = 0,142857 \cdot \frac{15.000}{500 \cdot 0,746} = 5,74492 \text{ [pu]}$$

A partir de [5], tem-se que:

$$X/R = 19$$

Analogamente ao uso da tabela 1.2, tem-se que $F = 1,2$.

$$r[0,10] = F (5,74492/19) = 0,362831 \text{ [pu]}$$

$$x[0,10] = F (5,74482) = 6,893904 \text{ [pu]}$$

$$z[0,10] = 0,362831 + j6,893904 \text{ [pu]}$$

c) Transformadores

Utilizando os dados da tabela 2.3, calcula-se as impedâncias para os transformadores, e através de [5], representada no capítulo 1 pela tabela 1.1, encontram-se as relações X/R correspondentes à potência do transformador, em [MVA].

→ T1

$$Z = \frac{7}{100} \cdot \frac{15.000}{15.000} = 0,07 \text{ [pu]}$$

A partir de [5], tem-se que:

$$X/R = 19$$

e assim:

$$\beta = \arctan(19) = 86.98^\circ$$

$$r[1,2] = \cos(86.98^\circ) 0,07 = 0,00368 \text{ [pu]}$$

$$x[1,2] = \sin(86.98^\circ) 0,07 = 0,06991 \text{ [pu]}$$

$$z[1,2] = 0,00368 + j0,06991 \text{ [pu]}$$

→ T2

$$Z = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{15.000}{3.750} = 0,22 \text{ pu}$$

Analogamente ao uso de [5], tem-se que:

$$X/R = 10,4$$

e assim:

$$\beta = \arctan(10,4) = 84,5^\circ$$

$$r[4,5] = \cos(84,5^\circ) 0,22 = 0,0211 \text{ [pu]}$$

$$x[4,5] = \text{sen}(84,5^\circ) 0,22 = 0,2190 \text{ [pu]}$$

$$z[4,5] = 0,0211 + j0,2190 \text{ [pu]}$$

→ T3

$$Z = \frac{5,75}{100} \cdot \frac{15.000}{1.500} = 0,575 \text{ pu}$$

Analogamente ao uso de [5], tem-se que:

$$X/R = 7,1$$

e assim:

$$\beta = \arctan(7,1) = 81,98^\circ$$

$$r[8,9] = \cos(81,89^\circ) 0,575 = 0,0802 \text{ [pu]}$$

$$x[8,9] = \text{sen}(81,89^\circ) 0,575 = 0,5694 \text{ [pu]}$$

$$z[8,9] = 0,0802 + j0,5694 \text{ [pu]}$$

d) Cabos

Utilizando os dados da tabela 2.4, calcula-se as impedâncias para os cabos.

→ C1

$$z[2,3] = \frac{13}{1.000} \cdot (0,35177 + j0,14873) \cdot \frac{15.000}{1.000 \cdot 13,8^2}$$

$$z[2,3] = 0,0003602 + j0,0001523 \text{ [pu]}$$

→ C2

$$z[2,4] = \frac{32,5}{1.000} \cdot (0,35177 + j0,14873) \cdot \frac{15.000}{1.000 \cdot 13,8^2}$$

$$z[2,4] = 0,0009005 + j0,0003807 \text{ [pu]}$$

→ C3

$$z[2,8] = \frac{20}{1.000} \cdot (0,928 + j0,170) \cdot \frac{15.000}{1.000 \cdot 13,8^2}$$

$$z[2,8] = 0,0014618 + j0,0002678 \text{ [pu]}$$

→ C4

$$z[2,3] = \frac{10}{1.000} \cdot (0,35177 + j0,14873) \cdot \frac{15.000}{1.000 \cdot 4,16^2}$$

$$z[2,3] = 0,003049 + j0,001289 \text{ [pu]}$$

→ C5

$$z[2,3] = \frac{10}{1.000} \cdot (0,35177 + j0,14873) \cdot \frac{15.000}{1.000 \cdot 4,16^2}$$

$$z[2,3] = 0,003049 + j0,001289 \text{ [pu]}$$

→ C6

$$z[9,10] = \frac{10}{1.000} \cdot (0.248 + j0,138) \cdot \frac{15.000}{1.000 \cdot 0,48^2}$$

$$z[9,10] = 0,1614583 + j0,0898437 \text{ [pu]}$$

2.4.4 - CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Com os dados de impedâncias do sistema calculados, monta-se os diagramas de impedâncias, tabelas com as impedâncias equivalentes para cada falta e calcula-se as impedâncias equivalentes ($z_{\text{EQUIV}}[\text{br}]$) e as correntes de curto-circuito para as barras em falta.

Considera-se nulas as correntes de carga e a tensão de todas as barras de $1|0,0^\circ$ [pu].

2.4.4.1 - CURTO-CIRCUITO EM F1

A figura 2.8 representa o diagrama de impedância do circuito da figura 2.7 para uma falta no ponto F1, onde a tensão de pré-falta correspondente à tensão de Thevenin (E_{TH}) do sistema é de 1 [pu].

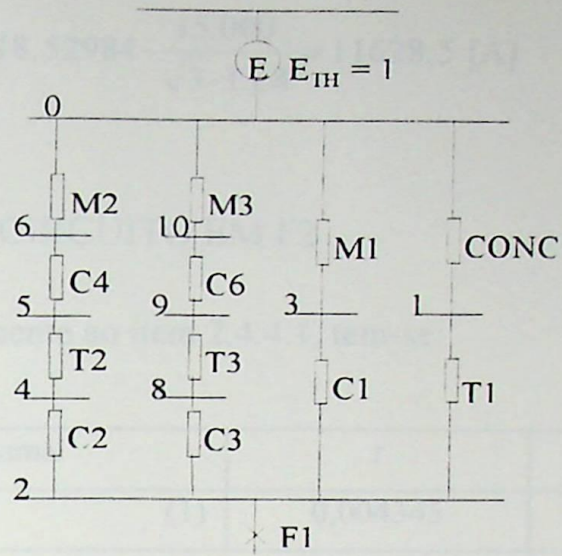


FIGURA 2.8 - DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS PARA UMA FALTA EM F1

Ramal	r	x
Conc. + T1	0,004345	0,059932
M1 + C1	0,0214072	0,8208553
M2 + C4 + T2 + C2	0,07016	2,00563
M3 + C6 + T3 + C3	0,6263683	1,549567
→ z _{EQUIV} [2]	0,004677	0,05376394

TABELA 2.6 - IMPEDÂNCIAS EQUIVALENTES

Então o módulo da impedância equivalente da barra 2 ($|z_{EQUIV}[2]|$) para uma falta em F1 será:

$$|z_{EQUIV}[2]| = \sqrt{(0,004677)^2 + (0,05376394)^2} = 0,53967 \text{ [pu]}$$

Assim, a corrente de curto-circuito na barra 2 será:

$$I_{SIM}[2] = \frac{1}{z_{EQUIV}[2]} = \frac{1}{0,053967} = 18,52984 \text{ [pu]}$$

$$I_{\text{SIM}}[2] = 18,52984 \cdot \frac{15.000}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 11628,5 \text{ [A]}$$

2.4.4.2 - CURTO-CIRCUITO EM F2

Analogamente ao item 2.4.4.1, tem-se:

Ramal		r	x
Conc. + T1	(1)	0,004345	0,059932
M1 + C1	(2)	0,0214072	0,8208553
M3 + C6 + T3 + C3	(3)	0,6263683	1,549567
(1)//(2)//(3)	(4)	0,00452655	0,055661
T2 + C2	(5)	0,0220005	0,2193807
(4)+(5)	(6)	0,02652705	0,2750417
M2 + C4	(7)	0,049379	1,437519
(6)//(7)	(8)	0,01995805	0,23098377
(8)+C5		0,02300705	0,23227277
→ $z_{\text{EQUIV}} [7]$		0,02300705	0,23227277

TABELA 2.7 - IMPEDÂNCIAS EQUIVALENTES

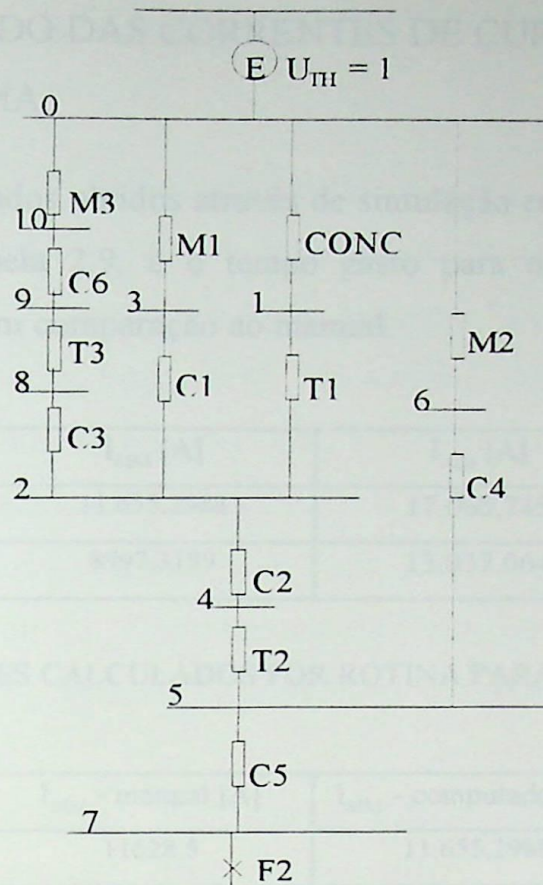


FIGURA 2.9 - DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS PARA UMA FALTA EM F1

Logo, o módulo da impedância equivalente da barra 7 ($|z_{EQUIV}[7]|$) para uma falta em F2 será:

$$|z_{EQUIV}[7]| = \sqrt{(0,02300705)^2 + (0,23227277)^2} = 0,23340943 \text{ [pu]}$$

Assim, a corrente de curto-circuito na barra 7 será:

$$I_{SIM}[7] = \frac{1}{z_{EQUIV}[7]} = \frac{1}{0,23340943} = 4,28431697 \text{ [pu]}$$

$$I_{SIM}[7] = 4,28431697 \cdot \frac{15.000}{\sqrt{3} \cdot 4,16} = 8.919 \text{ [A]}$$

2.4.5 - RESULTADO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO DO PROGRAMA.

Os resultados obtidos através de simulação em microcomputador estão apresentados na tabela 2.9, e o tempo gasto para o computador realizar os cálculos é irrisório em comparação ao manual.

Barra	I_{SIM} [A]	I_{ASS} [A]	Fator de assimetria
2	11.655,2988	17.065,745	1,464
7	8997,3189	13.037,064	1,449

TABELA 2.8 - VALORES CALCULADOS POR ROTINA PARA COMPUTADOR

Barra	I_{SIM} - manual [A]	I_{SIM} - computador [A]	Erro [%]
2	11628,5	11.655,2988	0,23
7	8.919	8997,3189	0,87

TABELA 2.9 - COMPARAÇÃO ENTRE RESPOSTAS DE CORRENTES

2.5 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Alvarez, Alberto C., "Introducción al Análisis Transitorio de Sistemas Eléctricos de Potencia, D.E.B.A. - Dirección de la Energía de La Provincia de Buenos Aires", 1ª edição, La Plata, Argentina, 1977.
- [2] Ramos, Dorel S., Dias, Eduardo M., "Sistemas Eléctricos de Potência -Regime Permanente", Editora Guanabara Dois, Volume 1, 1982.
- [3] Lazar, Irwin, "Electrical Systems Analysis and Design for Industrial Plants", McGraw-Hill Book Company, New York, 1980.
- [4] Abirached, Abalen I., "Coordenação da Proteção dos Sistemas Eléctricos Industriais", Curso Técnico da MPM - Treinamento e Consultoria, e GE Brasil - Disjuntores.
- [5] "Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants" (IEEE Red Book), IEEE Std 141-1976.

3. REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE TEMPOS PARA OS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE

3.1 INTRODUÇÃO

No estudo da seletividade e coordenação da proteção para equipamentos elétricos ou para sistemas elétricos, é importante uma representação gráfica do comportamento dos dispositivos de proteção escolhidos para esta função.

Para a ocorrência de falta em um sistema elétrico, deve-se ter disponível dispositivos de proteção contra sobrecorrente com a finalidade de proteger os equipamentos do sistema de acordo com seus níveis de suportabilidade face a elevadas correntes perante o aumento da temperatura, isto é, suas capacidades térmicas. Por isso, deve-se verificar o comportamento de operação destes dispositivos durante uma condição de sobrecorrente, levando em consideração seus ajustes e características escolhidos para a proteção.

As características tempo x corrente para operação destes dispositivos de proteção, são representados graficamente, e obtém-se as, normalmente chamadas, curvas características de tempo.

No programa desenvolvido de ajuste de relés, foram feitas rotinas capazes de representar estas curvas, podendo ainda verificar a coordenação entre os vários dispositivos de proteção envolvidos.

Devido a existência de vários dispositivos de proteção, analisa-se apenas um tipo de equipamento como exemplo, visto que os procedimentos para as futuras implementações são similares. No caso, o mais utilizado nos sistemas elétricos industriais seria os relés de sobrecorrente com características de tempo

inverso. E como complemento deste capítulo será discutido as aplicações dos tipos relés de sobrecorrente.

3.2 RELÉS DE SOBRECORRENTE COM CURVAS CARACTERÍSTICAS DE TEMPO INVERSO

Independentes da forma construtiva (eletromecânico ou eletrônico), o relé de sobrecorrente pode apresentar curvas características (tempo x corrente) onde sua utilização será em função do tipo de aplicação, e em particular, respeitando a coordenação com outros dispositivos de proteção instalados no mesmo circuito do sistema.

As características de tempo dos relés de sobrecorrente são classificadas como:

- tempo inverso, e;
- tempo definido.

O tempo de operação do relé com característica de tempo inverso é inversamente proporcional a magnitude da corrente, isto é, o relé tempo inverso opera num curto tempo para uma alta magnitude de corrente, e mais lento para corrente de menor amplitude, desde que acima da corrente de disparo do relé. A figura 3.1 ilustra uma curva típica de um relé de tempo inverso. Pode-se observar que quanto maior a corrente, menor é o tempo de atuação.

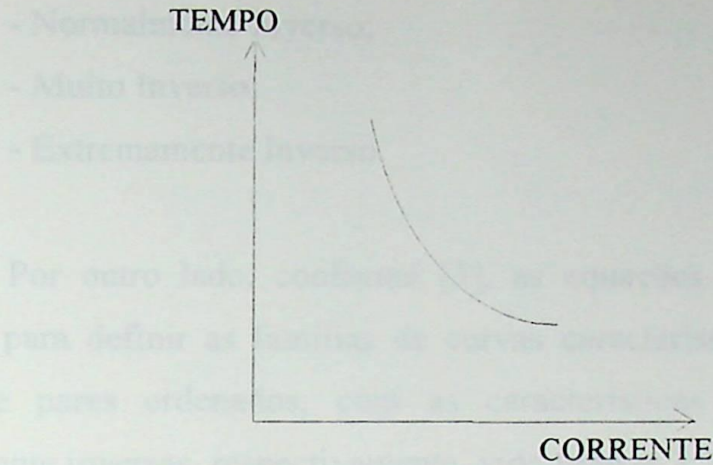


FIGURA 3.1- CURVA TÍPICA PARA RELÉ DE TEMPO INVERSO

O relé com característica de tempo definido operará sempre no mesmo intervalo de tempo independente da magnitude da corrente, ou seja, este tipo de dispositivo de proteção é caracterizado por um tempo de atuação constante. A figura 3.2 ilustra a característica tempo x corrente deste relé.

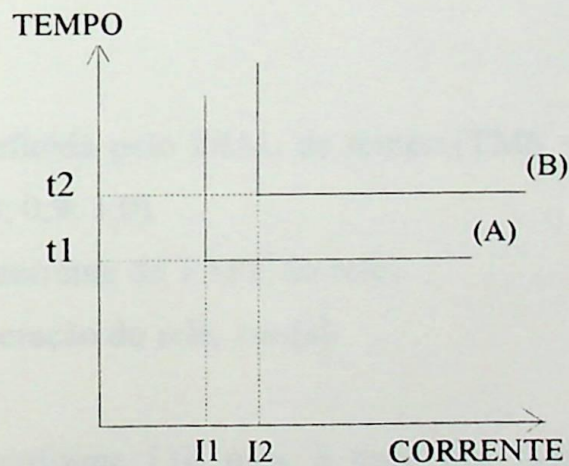


FIGURA 3.2 - CURVA CARACTERÍSTICA TEMPO-CORRENTE

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), conforme norma 7099, recomenda um padrão para as curvas características mais comuns para relés com característica inversa, os quais são:

- Normalmente Inverso;
- Muito Inverso;
- Extremamente Inverso.

Por outro lado, conforme [3], as equações (3.1), (3.2) e (3.3) são utilizadas para definir as famílias de curvas características dos relés, isto é, a família de pares ordenados, com as características normalmente, muito e extremamente inversas, respectivamente, vide figuras 3.7, 3.8 e 3.9.

$$t = \frac{TMS \cdot 0,14}{(I / I_r)^{0,02} - 1} \quad (3.1)$$

$$t = \frac{TMS \cdot 13,5}{(I / I_r) - 1} \quad (3.2)$$

$$t = \frac{TMS \cdot 80}{(I / I_r)^2 - 1} \quad (3.3)$$

onde:

TMS - constante definida pelo DIAL de tempo, (TMS = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0)

I/I_r - múltiplo da corrente de TAPE do relé;

t - tempo de operação do relé, em [s].

Ainda, conforme [3], para o caso das famílias de curvas do tipo Tempo Inverso Longo e Tempo Definido, que apesar de normalizadas, podem ser também definidas através das (3.4) e (3.5) respectivamente e figuras 3.10 e 3.11.

$$t = \frac{TMS \cdot 120}{(I / I_r) - 1} \quad (3.4)$$

$$t = TMS \quad (3.5)$$

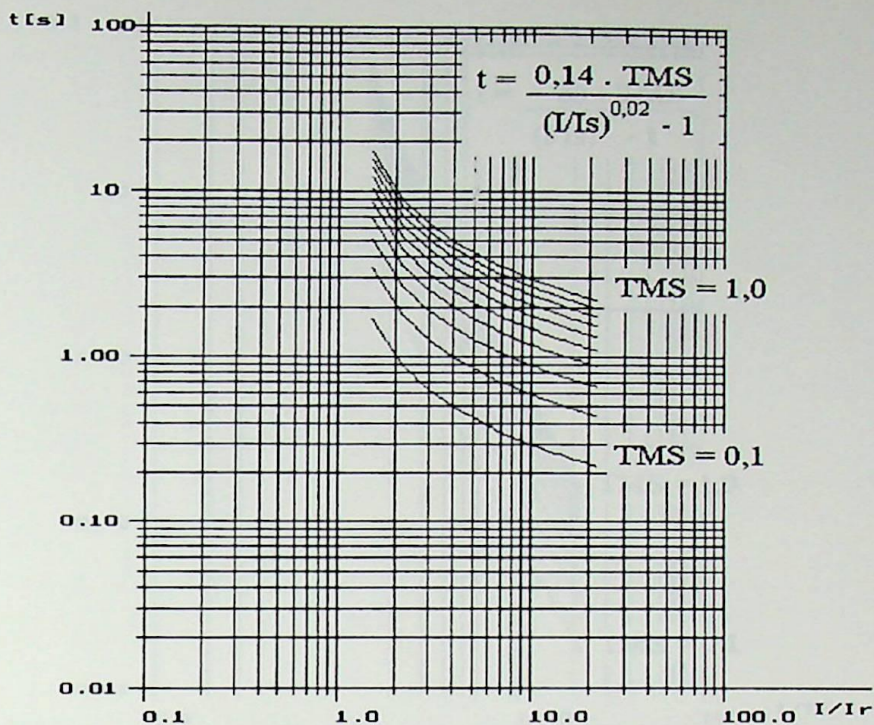


FIGURA 3.7 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS TEMPO/CORRENTE PARA RELÉ DE TEMPO NORMALMENTE INVERSO [2].

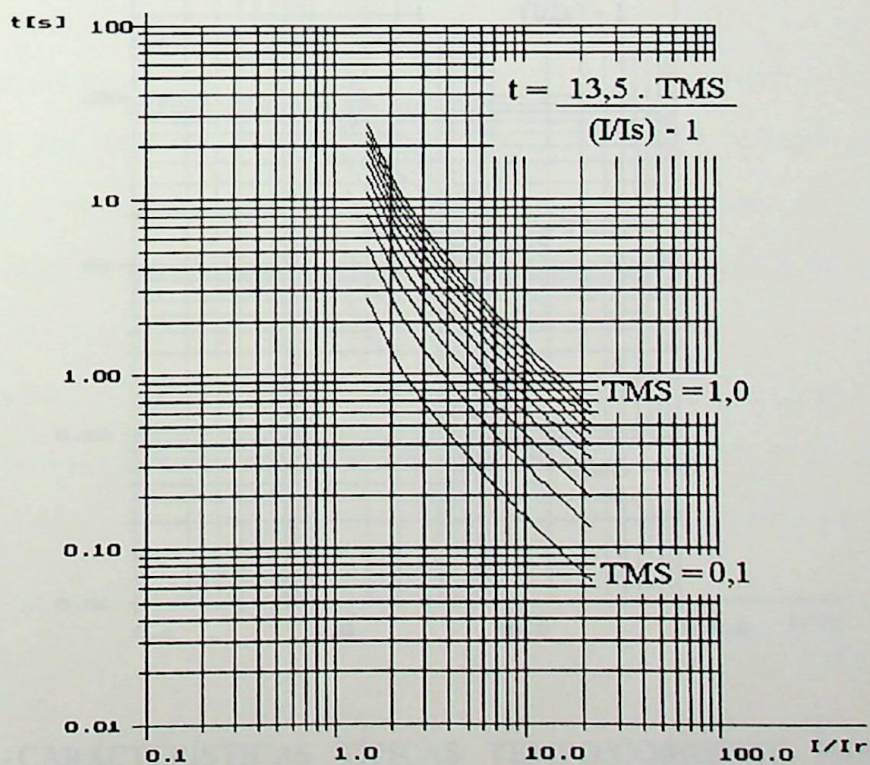


FIGURA 3.8 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS TEMPO/CORRENTE PARA RELÉ DE TEMPO MUITO INVERSO [2].

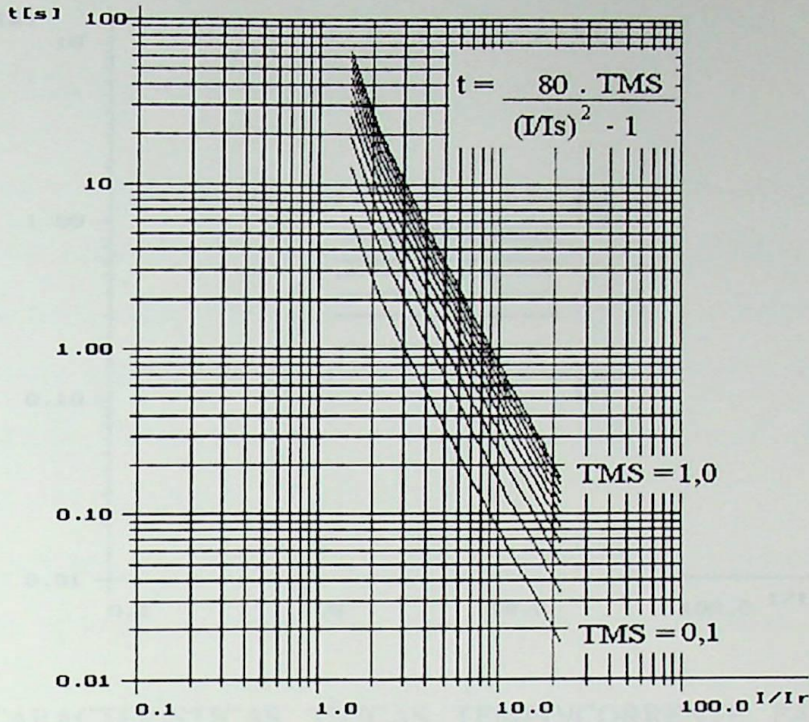


FIGURA 3.9 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS TEMPO/CORRENTE PARA RELÉ DE TEMPO EXTREMAMENTE INVERSO [2].

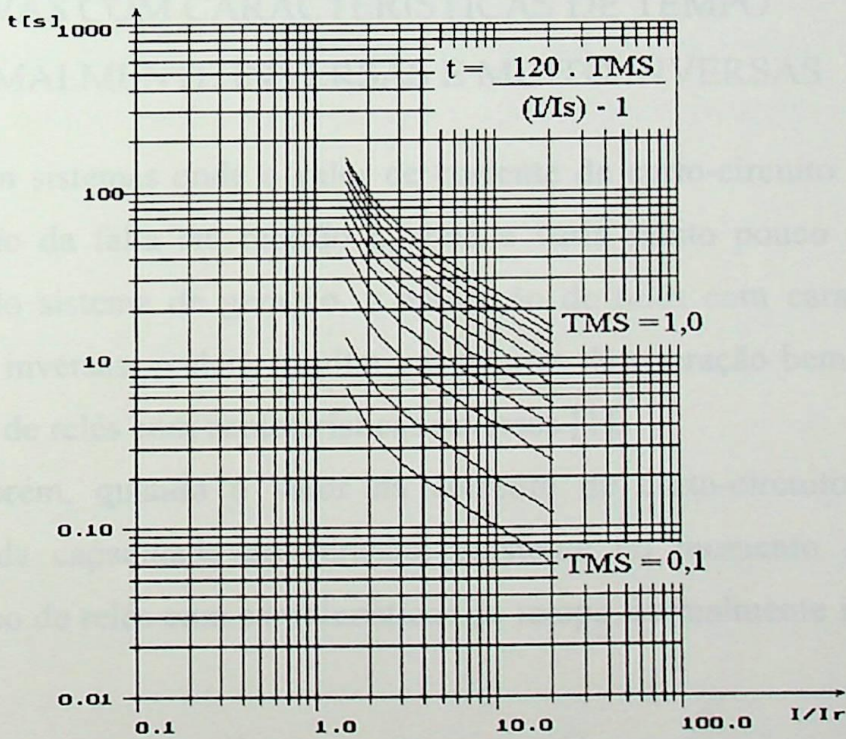


FIGURA 3.10 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS TEMPO/CORRENTE PARA RELÉ DE TEMPO INVERSO LONGO [2].

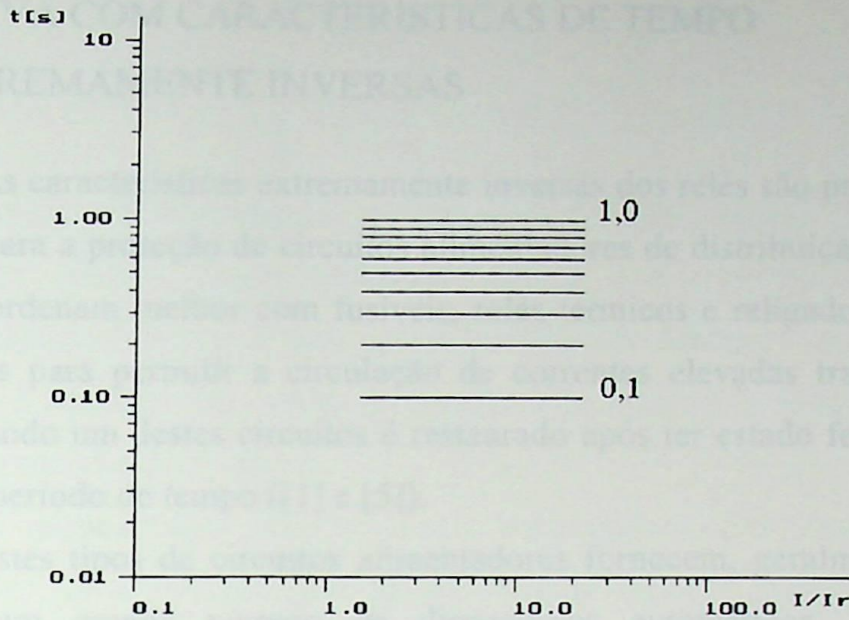


FIGURA 3.11 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS TEMPO/CORRENTE PARA RELÉ DE TEMPO DEFINIDO [2].

3.2.1 CURVAS COM CARACTERÍSTICAS DE TEMPO NORMALMENTE INVERSAS E MUITO INVERSAS

Em sistemas onde o valor de corrente de curto-circuito é dependente da localização da falta em relação ao relé e varia muito pouco em relação à capacidade do sistema de geração, a aplicação de relés com características de tempo muito inversas, poderá resultar em tempos de operação bem mais rápidos do que o uso de relés com características inversas [1].

Porém, quando o valor da corrente de curto-circuito é altamente dependente da capacidade de geração, existente no momento do defeito, é indicado o uso de relés com características de tempo normalmente inversas ([1] e [7]).

3.2.2 CURVA COM CARACTERÍSTICAS DE TEMPO EXTREMAMENTE INVERSAS

As características extremamente inversas dos relés são particularmente adequados para a proteção de circuitos alimentadores de distribuição primária, já que eles coordenam melhor com fusíveis, relés térmicos e religadores, e podem ser ajustados para permitir a circulação de correntes elevadas transitórias que ocorrem quando um destes circuitos é restaurado após ter estado fora de serviço durante um período de tempo ([1] e [5]).

Estes tipos de circuitos alimentadores fornecem, geralmente, energia elétrica a um grande número de dispositivos automáticos, de operação intermitente. Em operação normal existe uma grande diversidade entre estas cargas e a corrente total consumida é bastante inferior à soma das correntes nominais individuais. Contudo, se após uma saída prolongada de serviço dos alimentadores, todos os citados dispositivos e equipamentos começam a operar simultaneamente ocorre um pico inicial elevado de corrente, e portanto, a característica temporizada extremamente inversa é especialmente adequada para esta aplicação.

3.2.3 CURVA COM CARACTERÍSTICAS DE TEMPO INVERSO LONGO

São aplicados mais especificamente na proteção de circuitos de motores de indução ou síncronos, quando substituem os relés térmicos, ou em outra carga que se caracterize pela necessidade de uma grande temporização [1].

Como se sabe, os motores elétricos durante a partida solicitam elevadas correntes iniciais (exemplo: sistemas industriais com geração própria), que podem atingir até oito vezes a sua corrente nominal. Em razão desta elevada corrente inicial, é preciso ter um tempo disponível para que o relé não desligue o motor do sistema durante partidas.

3.2.4 CURVA COM CARACTERÍSTICAS DE TEMPO DEFINIDO

Geralmente empregados em casos de grande variação das condições do sistema de geração. Outra aplicação possível é a proteção diferencial de transformadores para prevenir uma operação indevida durante a sua energização [5]. Também é normalmente usada em proteção de retaguarda para esquemas de proteção diferencial e de distância.

Em alguns casos pode ser usado em conjunto com características de tempo inverso, como em proteção de motores de indução contra sobrecargas usando curva com características inversas. Ainda neste caso, é desejável ter uma operação instantânea ou de tempo definido a níveis de corrente correspondente a operação de rotor bloqueado. Para este caso, é preferível ter uma operação a tempo definido que instantânea visando determinar os casos de elevadas correntes assimétricas de curta duração.

A tabela 3.2, com base em [9], mostra as diversas aplicações dos relés de sobrecorrente em função da natureza e tamanho do sistema em análise.

4- Alacessorio aplicado a linhas transformadoras, com proteção local no primário	Muito sensível Muito rápido para falta	Para sistemas relativamente pequenos, a proteção diferencial sobre a relação de transformação do transformador de corrente é a principal corrente de falta para falta
5- Alacessorio aplicado a linhas transformadoras, com proteção primária	Muito sensível Muito rápido para falta	Para sistemas relativamente pequenos, a proteção diferencial sobre a relação de transformação do transformador de corrente é a principal corrente de falta para falta

TABELA 3.2 - GUIA PARA SELEÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE [9]

Equipamento a ser protegido	Tipo de relé	Observação
1- Transformador individual com abertura em baixa tensão	Extremamente inverso Muito inverso para terra	Para sistemas solidamente aterrados, ou com resistência de aterramento pendente sobre a relação de transformação do transformador de corrente e a máxima corrente de falta para terra
2- Transformador com disjuntor no primário (a) alimentadores com plantas médias (b) alimentadores com plantas relativamente grandes	Muito inverso Muito inverso Muito inverso para terra para os casos (a) e (b)	Se o transformador principal estiver entre o relé e a barra Se o transformador principal estiver entre o relé e a barra Para sistemas solidamente aterrados, ou com resistência de aterramento pendente sobre a máxima corrente de falta para terra
3- Transformador com disjuntor no secundário (a) alimentadores com plantas médias (b) alimentadores com plantas relativamente grandes	Muito inverso Muito inverso Muito inverso para terra para os casos (a) e (b)	Se o transformador principal estiver entre o relé e a barra Se o transformador principal estiver entre o relé e a barra Para sistemas solidamente aterrados, ou com resistência de aterramento pendente sobre a máxima corrente de falta para terra
4- Alimentador servindo vários transformadores, cada um tendo fusível no primário	Muito inverso Muito inverso para terra	Para sistemas solidamente aterrados, ou com resistência de aterramento pendente sobre a relação de transformação do transformador de corrente e a máxima corrente de falta para terra
5- Alimentador servindo vários transformadores, sem proteção primária	Muito inverso Muito inverso para terra	Para sistemas solidamente aterrados, ou com resistência de aterramento pendente sobre a relação de transformação do transformador de corrente e a máxima corrente de falta para terra

TABELA 3.2 - GUIA PARA SELEÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE [9]

Equipamento a ser protegido	Tipo de relé	Observação
6- Alimentador servindo um motor de média tensão com fusível	Muito inverso Muito inverso para terra	Para sistemas solidamente aterrados, ou com resistência de aterramento pendente sobre a relação de transformação do transformador de corrente e a máxima corrente de falta para terra.
7- Alimentador servindo vários motores de média tensão, cada um tendo fusível	Muito inverso Muito inverso para terra	Para sistemas solidamente aterrados, ou com resistência de aterramento pendente sobre a relação de transformação do transformador de corrente e a máxima corrente de falta para terra. O motor deve ter proteção contra desbalanceamento de fases
8- Um motor protegido por (a) dois relés para proteção de sobrecarga e curto-circuito (b) um relé para proteção contra rotor bloqueado	Inverso longo Inverso longo	
9- Alimentador para motor relativamente grande supervisionado por disjuntor e relés (a) Motor sem proteção diferencial (b) Motor com proteção diferencial	Muito inverso para terra Extremamente inverso Muito inverso	

TABELA 3.2 - GUIA PARA SELEÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE [9]
(CONTINUAÇÃO)

3.3 OBTENÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

Na análise inicial de um gráfico para estudo da proteção de sobrecorrente, admite-se que o instante considerado para o início da falta, é o zero da escala, e os outros intervalos de tempo da escala superiores a zero, são os tempos decorridos após a falta [4].

Considera-se, como mostra a figura 3.3, que os valores de corrente estão no eixo das abcissas, e o tempo, no das ordenadas.

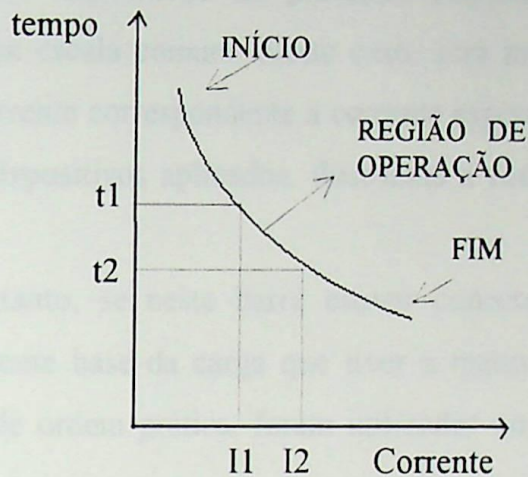


FIGURA 3.3 - CURVA CARACTERÍSTICA TEMPO-CORRENTE

Na figura 3.3, tem-se:

t_1, t_2 - tempo, em [s];

I_1, I_2 - corrente que flui pelo relé.

A curva característica mostrada na figura 3.3 é típica e indica o tempo de operação do relé pela magnitude da corrente, isto significa que qualquer ponto acima e à esquerda da curva determina a operação do relé e abaixo, à direita da curva, a não operação do relé. Estas curvas representam uma família de pares ordenados (tempo e corrente) no qual indica o período de tempo que é requerido para a operação do dispositivo de proteção para um determinado valor de corrente.

As curvas características dos relés de sobrecorrente começam normalmente em 1,5 vezes a corrente de acionamento para relés eletromecânicos, e iniciam a 1,1 vezes a corrente de acionamento para relés eletrônicos, e

usualmente terminam para uma máxima corrente de curto-circuito para a qual o relé operará dentro de suas considerações de suportabilidade de operação.

Em sistema que possua mais de um nível de tensão, as curvas características dos dispositivos de proteção dispostos em série, devem ser plotadas para uma escala comum. Neste caso, será melhor utilizar como base, uma escala de corrente correspondente à corrente esperada para o nível de tensão mais baixa dos dispositivos aplicados, ilustrando a coordenação entre as curvas características.

No entanto, se nesta barra estiver conectada mais de uma carga, escolhe-se a corrente base da carga que tiver a menor corrente de falta. Estas recomendações, de ordem prática, foram utilizadas no programa de ajuste para relés.

Para exemplificar, considera-se um sistema de potência com um transformador de 750 [kVA], tensão do lado primário 13,8 [kV] e do secundário em 4,16 [kV]. A corrente nominal deste transformador no secundário (I_{NS}) é de:

$$I_{NS} = \frac{750 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4,16 \cdot 10^3} = 104 \text{ [A]}$$

Quando 104 [A] estiver fluindo no lado secundário do transformador, a corrente no primário do transformador (I_{NP}) deverá ser 104 [A] multiplicado pela relação de transformação (K_T), isto é:

$$K_T = \frac{4160}{13800} = 0,301$$

Então a corrente no primário do transformador será de:

$$I_{NP} = 0,301 \cdot 104 = 31 \text{ [A]}$$

Se for estabelecido que a corrente a plena carga é de 1 pu, em qualquer lado, o valor será o mesmo.

A figura 3.4 ilustra um sistema de potência adotado como exemplo. Utilizando-se a tensão de 4,16 [kV] como base da escala será possível visualizar todas as características das curvas dos relés envolvidos na coordenação, vide figura 3.5.

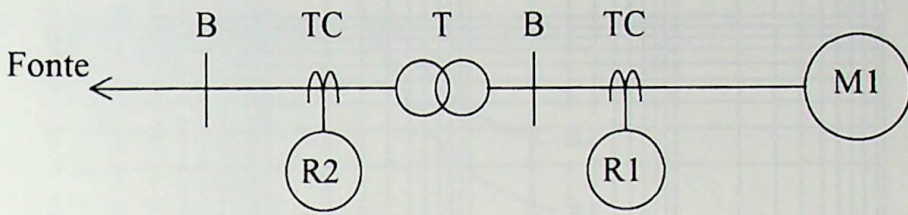


FIGURA 3.4 ESQUEMA UNIFILAR DO SISTEMA-EXEMPLO PARA ESCALA BASE

Na figura 3.4, tem-se:

- T - transformador de 750 [kVA], 13,8/4,16 [kV], $Z = 5,56\%$;
- M1 - motor de indução de 450 [HP], 4,16 [kV], $I_p/I_n = 5,2$, $t_p = 3[s]$, $t_{rb} = 7[s]$;
- R1, R2 - relé de sobrecorrente tipo longo inverso.

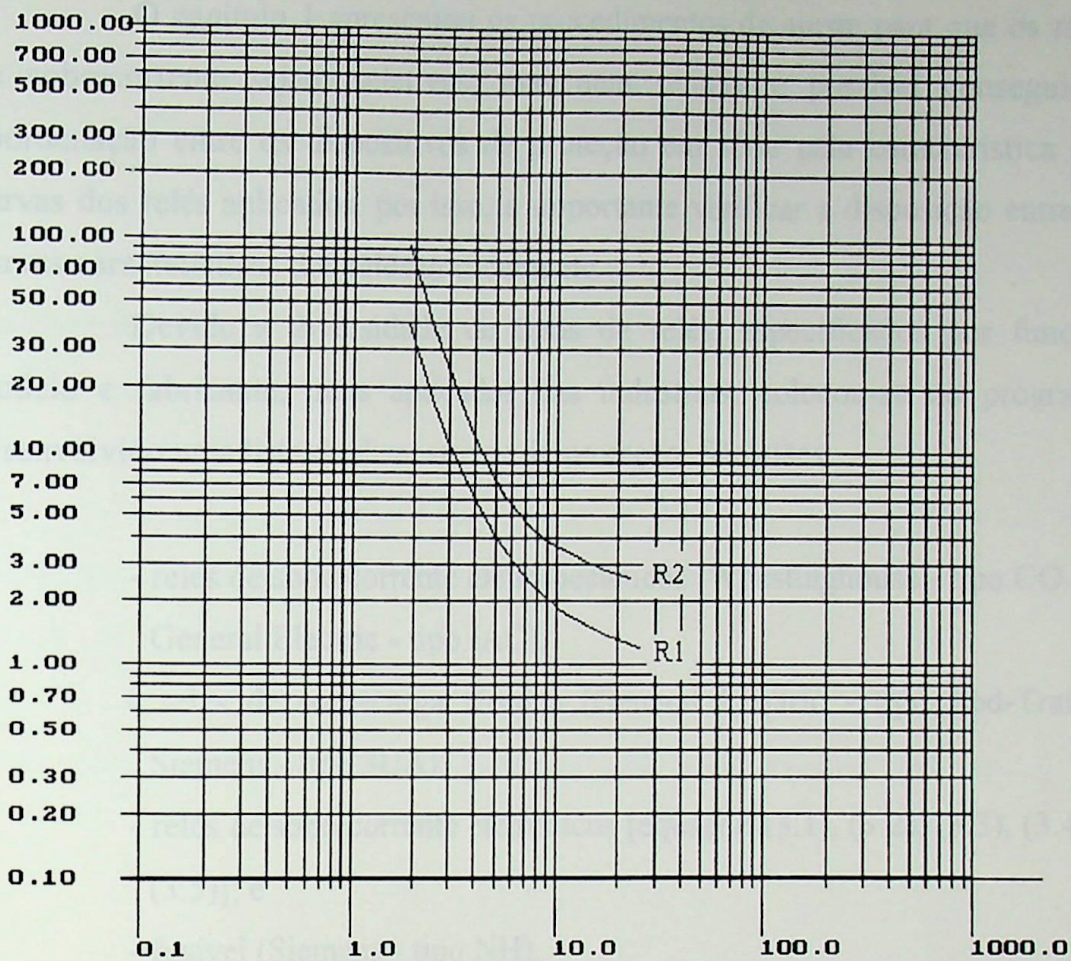


FIGURA 3.5 - CURVAS DOS RELÉS R1 E R2 NA ESCALA DE CORRENTE.

Este tipo de manipulação permite o estudo de vários dispositivos de proteção mesmo para um sistema de grande porte que envolve vários níveis de tensões em um único estudo de coordenação.

3.4 USO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS NO PROGRAMA

Em um estudo de seletividade e coordenação das proteções, existe a necessidade de se plotar as curvas características dos dispositivos de proteção em escalas logarítmicas. Manualmente o tempo para plotá-las em folhas de papel com escalas logarítmicas para conferência da seletividade e coordenação dos dispositivos de proteção é bastante elevado. Assim, foi desenvolvido rotinas para o programa que agilizam esse procedimento e plota rapidamente estas curvas.

O capítulo 1 apresentou os procedimentos de ajuste para que os relés de sobrecorrente sejam seletivos, mas nem sempre é possível conseguir a coordenação entre os dispositivos de proteção em série pela característica das curvas dos relés aplicados, por isso, é importante verificar a disposição entre as curvas características dos relés graficamente.

Devido a diversidade de tipos de relés, especificados por função, modelo e fabricante, mais aplicados nas indústrias, colocou-se no programa desenvolvido uma lista de dispositivos de proteção. São estes:

- relés de sobrecorrente eletromecânicos (Whestinghouse - tipo CO e General Electric - tipo IAC);
- relés de sobrecarga térmica (General Electric - tipo Lod-Trak e Siemens - tipo 3UA);
- relés de sobrecorrente eletrônicos [equações(3.1), (3.2), (3.3), (3.4) e (3.5)]; e
- fusível (Siemens - tipo NH).

Dos modelos relacionados, que não utilizam equações, a inserção das curvas foi feita de modo manual, onde selecionou-se pontos de coordenadas das famílias de curvas para armazená-los em arquivos (banco de dados), para cada família de curvas. Para o caso dos relés que se utilizam das equações, as famílias de curvas foram conseguidas aplicando diretamente estas equações.

Nestes arquivos, os múltiplos da corrente de acionamento do dispositivo estão representados sempre na primeira linha, sendo estes comuns para as várias curvas que representam as curvas de tempos de operação, conhecidas cada uma como “DIAL” de tempo. Isto é, a partir da segunda linha e adiante, cada linha representa um DIAL de tempo, onde o valor de cada coluna desta se associa com o valor da mesma coluna na primeira linha. Assim, tem-se a família de curvas do dispositivo de proteção.

A quantidade de curvas disponíveis em um arquivo, deve-se à capacidade do dispositivo de possuir uma faixa de ajustes de tempo mais abrangente. Porém, o programa apresenta um limite de quinze curvas.

Cada curva pode apresentar até 50 pontos de coordenadas representando a família de pares ordenados para cada DIAL graficamente. Estas coordenadas dos pontos das curvas são conseguidos através de leitura visual de gráficos de catálogos de fabricantes ou conseguidos através de equações fornecidas pelos fabricantes.

A tabela 3.3 mostra o banco de dados para uma família de curvas para o relé com característica de tempo normalmente inverso conseguidas através da equação (3.1).

Com base neste procedimento, torna-se fácil a implementação de outros relés e fabricantes e implantar outros tipos de curvas características.

Curva	Equação	Tempo (s)	Coordenada
1	$t = 10000 / f$	10000	10000
2	$t = 10000 / f$	10000	10000
3	$t = 10000 / f$	10000	10000
4	$t = 10000 / f$	10000	10000
5	$t = 10000 / f$	10000	10000
6	$t = 10000 / f$	10000	10000
7	$t = 10000 / f$	10000	10000
8	$t = 10000 / f$	10000	10000
9	$t = 10000 / f$	10000	10000
10	$t = 10000 / f$	10000	10000
11	$t = 10000 / f$	10000	10000
12	$t = 10000 / f$	10000	10000
13	$t = 10000 / f$	10000	10000
14	$t = 10000 / f$	10000	10000
15	$t = 10000 / f$	10000	10000
16	$t = 10000 / f$	10000	10000
17	$t = 10000 / f$	10000	10000
18	$t = 10000 / f$	10000	10000
19	$t = 10000 / f$	10000	10000
20	$t = 10000 / f$	10000	10000

TABELA 3.3 - EXEMPLO PARA BANCO DE DADOS DE CURVAS NORMAL INVERSO

I/Ir	DIAL									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	Tempo de Operação em [s]									
1.500	17.194	34.388	51.533	68.777	85.971	103.165	120.360	137.554	154.748	171.942
1.690	13.270	26.541	39.811	53.081	66.352	79.622	92.892	106.163	119.433	132.704
2.000	10.029	20.058	30.087	40.116	50.145	60.174	70.203	80.232	90.261	100.290
2.147	9.092	18.183	27.275	36.366	45.458	54.550	63.641	72.733	81.825	90.916
2.200	8.808	17.617	26.425	35.233	44.041	52.850	61.658	70.466	79.275	88.083
2.396	7.941	15.882	23.824	31.765	39.706	47.647	55.588	63.529	71.471	79.412
2.713	6.944	13.888	20.832	27.775	34.719	41.663	48.607	55.551	62.495	69.439
2.900	6.505	13.010	19.514	26.019	32.524	39.029	45.534	52.038	58.543	65.048
3.000	6.302	12.604	18.906	25.208	31.510	37.812	44.114	50.415	56.717	63.019
3.600	5.395	10.790	16.185	21.580	26.975	32.370	37.765	43.160	48.556	53.951
3.838	5.135	10.270	15.405	20.540	25.675	30.810	35.945	41.080	46.215	51.350
4.000	4.980	9.960	14.939	19.919	24.899	29.879	34.858	39.838	44.818	49.798
4.300	4.729	9.459	14.188	18.918	23.647	28.376	33.106	37.835	42.565	47.294
4.538	4.558	9.117	13.675	18.234	22.792	27.351	31.909	36.468	41.026	45.585
5.000	4.280	8.559	12.839	17.119	21.399	25.678	29.958	34.238	38.517	42.797
5.700	3.952	7.905	11.857	15.809	19.762	23.714	27.666	31.619	35.571	39.523
6.000	3.837	7.674	11.512	15.349	19.186	23.023	26.860	30.698	34.535	38.372
6.400	3.701	7.403	11.104	14.806	18.507	22.208	25.910	29.611	33.312	37.014
7.000	3.528	7.055	10.583	14.111	17.639	21.166	24.694	28.222	31.750	35.277
7.100	3.502	7.003	10.505	14.007	17.509	21.010	24.512	28.014	31.515	35.017
7.413	3.425	6.850	10.274	13.699	17.124	20.549	23.974	27.399	30.823	34.248
7.800	3.338	6.677	10.015	13.353	16.691	20.030	23.368	26.706	30.044	33.383
8.000	3.297	6.594	9.890	13.187	16.484	19.781	23.077	26.374	29.671	32.968
8.500	3.201	6.403	9.604	12.806	16.007	19.209	22.410	25.611	28.813	32.014
9.000	3.116	6.233	9.349	12.465	15.582	18.698	21.814	24.931	28.047	31.163
9.200	3.085	6.170	9.254	12.339	15.424	18.509	21.594	24.678	27.763	30.848
9.900	2.984	5.968	8.952	11.936	14.920	17.904	20.887	23.871	26.855	29.839
10.000	2.971	5.941	8.912	11.882	14.853	17.824	20.794	23.765	26.735	29.706
10.600	2.896	5.791	8.687	11.582	14.478	17.373	20.269	23.165	26.060	28.956
11.300	2.817	5.635	8.452	11.270	14.087	16.904	19.722	22.539	25.357	28.174
12.000	2.748	5.495	8.243	10.990	13.738	16.486	19.233	21.981	24.728	27.476
12.700	2.685	5.370	8.054	10.739	13.424	16.109	18.793	21.478	24.163	26.848
13.400	2.628	5.256	7.884	10.511	13.139	15.767	18.395	21.023	23.651	26.278
14.000	2.583	5.166	7.749	10.332	12.915	15.498	18.082	20.665	23.248	25.831
14.100	2.576	5.152	7.728	10.304	12.880	15.456	18.032	20.608	23.184	25.759
14.800	2.528	5.057	7.585	10.114	12.642	15.170	17.699	20.227	22.756	25.284
15.500	2.485	4.969	7.454	9.938	12.423	14.908	17.392	19.877	22.361	24.846
16.000	2.455	4.911	7.366	9.821	12.277	14.732	17.188	19.643	22.098	24.554
16.200	2.444	4.888	7.332	9.776	12.221	14.665	17.109	19.553	21.997	24.441
16.900	2.407	4.813	7.220	9.626	12.033	14.439	16.846	19.252	21.659	24.065
17.600	2.371	4.743	7.114	9.486	11.857	14.229	16.600	18.972	21.343	23.715
18.000	2.353	4.705	7.058	9.410	11.763	14.115	16.468	18.820	21.173	23.525
18.300	2.339	4.677	7.016	9.355	11.694	14.032	16.371	18.710	21.049	23.387
19.000	2.308	4.616	6.924	9.232	11.540	13.848	16.156	18.464	20.772	23.080
19.700	2.279	4.558	6.838	9.117	11.396	13.675	15.954	18.234	20.513	22.792
20.100	2.263	4.527	6.790	9.054	11.317	13.581	15.844	18.108	20.371	22.635

TABELA 3.3 - EXEMPLO PARA BANCO DE DADOS DE CURVAS NORMAL INVERSO [2]

3.5 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Barros, A. E., "Relés de Sobrecorrente Tipo IAC", General Electric do Brasil S.A., Dpto. de Relés, Instruções: EA - 1009.
- [2] INEPAR, "Relé de Sobrecorrente Linha "I", CAT. IN.3.2 - Outubro de 1984.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, "Relés de Medição com uma Grandeza de Alimentação de Entrada a Tempo Dependente Especificado", NBR 7099.
- [4] "Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems" (IEEE Buff Book), IEEE Std 242-1986.[5] Madhava Rao, T. S., "Power System Protection Static Relays", Ed. McGraw-Hill Book Company, New Delhi, 1981.
- [6] Caminha, Amadeu C., "Metodologia de Coordenação da Proteção em Sistemas Industriais de Grande Porte", Tese de Livre Docência - EFEI Escola Federal de Itajubá, 1974.
- [7] Mamede Filho, João, "Manual de Equipamentos Elétricos", LTC - Livros Técnicos e Científicos Ed., Volume 1, Rio de Janeiro, 1993.
- [8] Mamede Filho, João, "Instalações Elétricas Industriais", LTC - Livros Técnicos e Científicos Ed., 3ª Edição, Rio de Janeiro, 1989.
- [9] Lazar, Irwin, "Electrical Systems Analysis and Design for Industrial Plants", McGraw-Hill Book Company, New York, 1980.
- [10] Rossi, Ronaldo; Guimarães, C. A. Mohallen; Silveira, Paulo M.; "Um Equipamento Didático Utilizando Microcomputador para Treinamento em Relés de Proteção", Dissertação de Mestrado, EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1991.
- [11] Costa, Bruno R.; Viana, Francisco A.de A. L.; Galindo, Ricardo de V.; "Sistema Computacional para Coordenação da Proteção em Microcomputadores", IV Seminário Técnico de Proteção e Controle, Maio de 1993.

- [12] Caminha, Amadeu C., "Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos", Ed. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1977.

4.1 INTRODUÇÃO

O transformador de potência tem um custo bastante significativo em uma instalação industrial e, além disso, é suscetível a falhas de origem interna ou externa, que podem custar vidas humanas sob risco de explosão, e pode causar danos a equipamentos adjacentes, ou ainda permanecer fora de operação. Também, os custos de reparos ou manutenção do transformador são elevados, e dependendo da sua posição, este custo deverá atingir valores superiores.

Devido a estes parâmetros, tem-se limitado as falhas aplicando dispositivos adequados de proteção ao transformador.

Levando-se em consideração a quantidade de tipos de proteção que um equipamento precisa requerer, os transformadores de potência, basicamente, são sujeitos, conforme [1] e [2], as seguintes falhas:

- na isolação dos enrolamentos do transformador;
- devido a esforços mecânicos de curto-circuito;
- sobrecarga;
- circuito aberto.

4. PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES

4.1 INTRODUÇÃO

O transformador de potência tem um custo bastante significativo em uma instalação industrial e além disso, é susceptível a falhas de origem interna ou externa, expondo ainda vidas humanas sob riscos, devido a explosão, e pode provocar danos à equipamentos adjacentes, ou ainda permanecer fora de operação. Também, os custos de reparos ou manutenção do transformador são elevados, e dependendo da sua potência, este custo deverá assumir valores exagerados.

Devido a estes parâmetros, tenta-se limitar as falhas aplicando dispositivos adequados de proteção ao transformador.

Levando-se em consideração a quantidade de tipos de proteções que um equipamento venha a requerer, os transformadores de potência, basicamente, são sujeitos, conforme [1] e [2], as seguintes falhas:

- na isolação dos enrolamentos do transformador;
- devido a esforços mecânicos de curto-circuito;
- sobrecarga; e
- circuito aberto.

4.2 TIPOS DE PROTEÇÕES APLICADOS À TRANSFORMADORES

Basicamente, os tipos de proteções aplicados em transformadores de potência se restringe a curto-circuitos e sobrecargas. Destes, vários esquemas de proteção viabilizam a escolha da aplicação de um tipo de esquema devido ao custo e ao benefício que cada um deles propicia.

A filosofia a ser aplicada dependerá, principalmente, da potência do transformador ou da necessidade exigida pelo circuito, e dentre eles, tem-se:

- proteção diferencial;
- proteção por sobrecorrente; e
- proteção de retaguarda.

4.2.1 - PROTEÇÃO DIFERENCIAL

A proteção diferencial (função 87 - ANSI) deve ser empregada onde seu custo de compra e instalação compense o valor do equipamento protegido. Assim, conforme [2], recomenda-se aplicar a proteção diferencial em transformadores, que apresentem no mínimo os seguintes requisitos;

- tensão acima de 15 [kV], qualquer potência; ou
- potência acima de 2000 [kVA], qualquer tensão; ou
- em qualquer outro caso, por motivo de segurança.

Relés diferenciais devem operar para condições de desbalanço de correntes entre os enrolamentos primário e o secundário de um transformador. Com a operação do relé, o transformador será removido do sistema. Tal relé opera com diferença de correntes, normalmente pequena, e portanto deverá ser bastante sensível de modo a conseguir discernir entre condição normal de operação e de falta.

A zona da proteção diferencial de um transformador envolve os equipamentos contidos entre os transformadores de corrente, então qualquer perturbação ou falta que ocorrer dentro desta região, o relé deve operar. Neste trabalho, a zona de proteção diferencial se restringirá apenas ao transformador, omitindo-se cabos, barramentos, etc.

A vantagem da proteção diferencial está na sua alta sensibilidade e grande velocidade de operação contra falhas localizadas dentro de sua zona diferencial. Por exemplo, faltas internas em transformadores quase sempre envolvem baixas correntes em relação a nominal, havendo a necessidade dos dispositivos de proteção detectarem estes tipos de falhas evitando danos ao transformador.

A figura 4.1 mostra o esquema simplificado de proteção diferencial tipo amperimétrica de transformadores.

A ligação dos transformadores de corrente deve ser tal, que a corrente através do relé diferencial é a diferença entre a corrente de entrada e a corrente de saída, ver equação (4.1).

$$I_d = I_p - I_s \quad (4.1)$$

onde:

I_d - corrente diferencial.

I_p - corrente através do secundário do TCp;

I_s - corrente através do secundário do TCs.

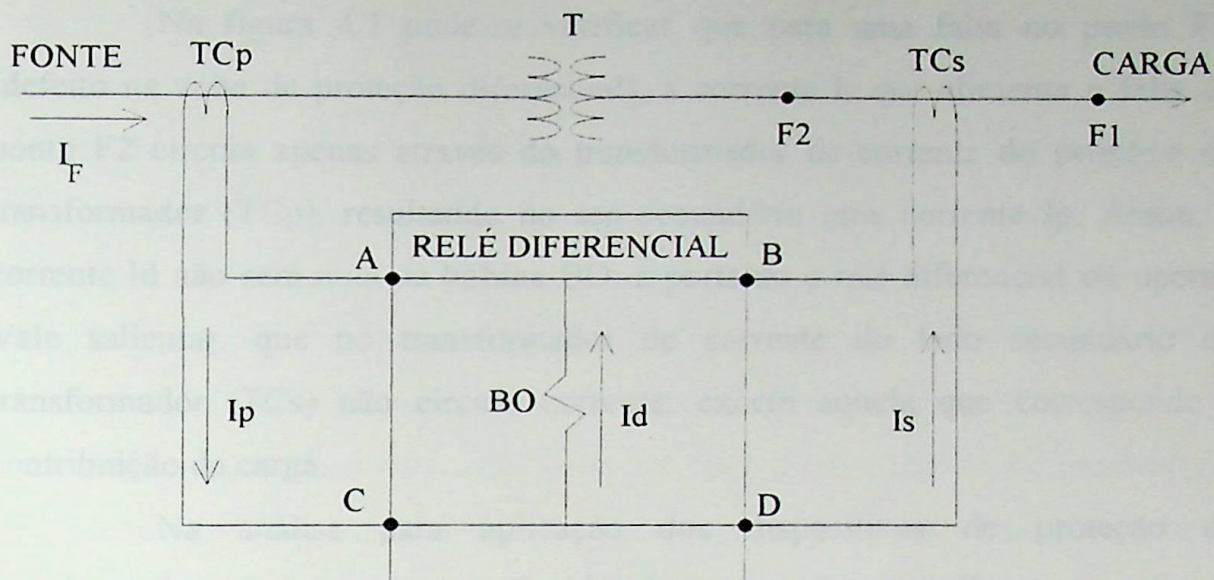


FIGURA 4.1 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES

Na figura 4.1, tem-se:

A, B, C, D- terminais do relé diferencial;

TCp - transformador de corrente no lado primário de T;

TCs - transformador de corrente no lado secundário de T;

F1, F2 - pontos de falta;

I_F - corrente de falta;

BO - bobina de operação do relé diferencial.

Na figura 4.1 para uma condição de falta no ponto F1, nota-se que surgem correntes nos lados secundários de ambos os transformadores de corrente, I_s e I_p , correspondentes à corrente de falta, que percorrem o circuito diferencial. Estas correntes são praticamente iguais, $I_s \cong I_p$, e de mesmo sentido, o que impede a operação do relé diferencial, como é desejado, ou seja:

$$I_d = I_p - I_s = 0 \quad (4.2)$$

Na figura 4.1 pode-se verificar que para uma falta no ponto F2, (defeito na zona de proteção diferencial), a corrente I_F que alimenta a falta do ponto F2 circula apenas através do transformador de corrente do primário do transformador (TCp), resultando no seu secundário uma corrente I_p . Assim, a corrente I_d não será nula na bobina BO, e portanto o relé diferencial irá operar. Vale salientar, que no transformador de corrente do lado secundário do transformador (TCs) não circula corrente, exceto aquela que corresponde à contribuição da carga.

Na análise para aplicação dos dispositivos de proteção do transformador, é importante o estudo das correntes que fluem através do transformador. Algumas correntes dificultam a detecção de faltas pelos dispositivos de proteção devido a faltas internas do transformador, por efeitos adversos do próprio transformador ou do sistema.

Assim, para a proteção diferencial aplicada à transformadores existem fatores que desequilibram a diferença de corrente que podem levar o relé a operar inadequadamente. Dentre outros, pode-se ter :

A - CORRENTES NA ZONA DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL DURANTE FALTAS

As faltas entre espiras do enrolamento do transformador de potência pode originar, em seus terminais, uma corrente de valor menor que a corrente a plena carga do transformador, por exemplo, para provocar uma corrente de falta igual à corrente a plena carga nos terminais do transformador de dois enrolamentos possivelmente 10% do enrolamento deve ser curto-circuitado, portanto, nota-se que este tipo de falta é difícil de ser detectado pela proteção diferencial [1].

Por outro lado, uma falta externa a zona de proteção diferencial, no alimentador do transformador de potência, as correntes secundária dos transformadores de corrente podem assumir valores elevados. Assim, pode-se

esperar a saturação dos transformadores de corrente, propiciando o surgimento, na corrente secundária, de componentes harmônicos de segunda e de terceira ordem ([1] e [4]). Nesta situação deverá estar previsto para que o relé diferencial não seja sensibilizado estes componentes harmônicos.

Para faltas externas, a proteção diferencial deverá ter um perfeito acoplamento entre os transformadores de corrente dos lados de alta e baixa tensão, caso contrário poderá haver uma falsa operação da proteção diferencial. Isso pode ser superado com a aplicação de relés diferenciais de sobrecorrente de tempo sem restrição ou de relés diferenciais com restrição percentual. O primeiro deve ser ajustado com a derivação do TAPE e o DIAL de tempo suficientemente altos podendo ter o tempo de operação mais demorado, por isso, o segundo relé é mais vantajoso por ser mais sensível e mais rápido.

B - ACOPLAMENTO IMPERFEITO ENTRE TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Dentre as várias dificuldades que se encontra em projetos de proteção diferencial do transformador de potência, ou seja, as correntes nos secundários dos transformadores TCp e TCs, figura 4.1, deveriam ser idênticos. Todavia, mesmo que o transformador tenha uma relação de transformação fixa (apenas um “tap”), normalmente não se consegue uma combinação perfeita entre os transformadores de corrente, e quando o transformador de potência tem “tap’s”, a imperfeição do casamento entre os transformadores de corrente é maior. Estes fatos provocam circulação de corrente no circuito de operação do relé diferencial.

O ajuste para relés diferenciais neste caso deve seguir as mesmas recomendações do item (A)

C) CORRENTES NA ZONA DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL DEVIDO A CORRENTES DE ENERGIZAÇÃO (“INRUSH CURRENTS”)

Durante a energização do transformador, o circuito de magnetização deste pode apresentar um fluxo magnético residual, apresentando uma impedância muito baixa sem que represente uma falha no transformador. Esta corrente pode assumir valores de 8 a 12 vezes maiores que a corrente nominal do transformador, dependendo de suas características de fabricação do transformador. Neste caso, tem-se, principalmente, o componente harmônico de corrente de segunda ordem (em torno de 60%).

A figura 4.2 ilustra o comportamento da corrente de energização de um transformador, obtida através de simulação utilizando o programa MICROTRAN [13]. Assim, utilizando o programa MTREAD.EXE [17], obteve-se a tabela 4.1, onde apresenta os valores da média aritmética dos harmônicos de corrente ciclo a ciclo do período total ilustrado na figura 4.2

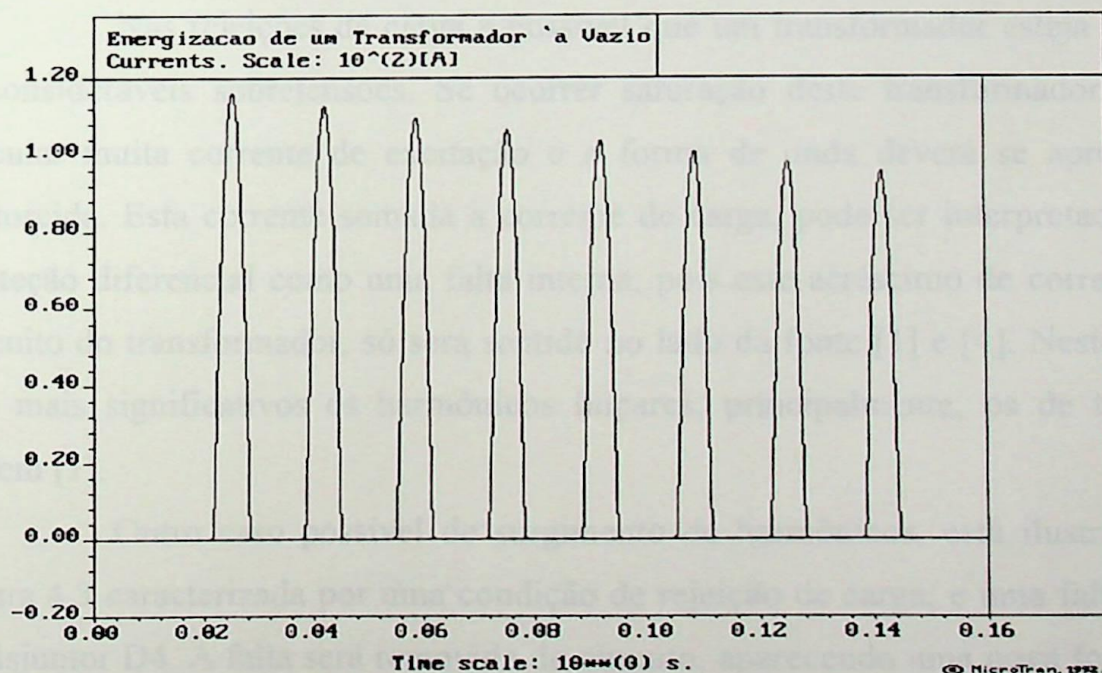


FIGURA 4.2 - COMPORTAMENTO DA CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR.

Componente Harmônico	Valores por unidade
1 ^a ordem	1.000000
2 ^a ordem	0.596596
3 ^a ordem	0.187039
4 ^a ordem	0.048303

TABELA 4.1 - MÚLTIPLOS DOS COMPONENTES HARMÔNICOS DA CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR.

Tal fato pode ser analisado como um circuito RL. A constante de tempo do circuito (R/L) não é, de fato, fixa, pois L varia como um resultado da saturação do transformador. Nos primeiros ciclos a saturação é alta e a indutância L é baixa. Como R determina o fator de amortecimento da forma de onda da corrente transitória, isto é, as perdas RI^2 desde a fonte geradora até o transformador, nos ciclos seguintes a saturação diminui e L aumenta, [1] e [4].

Nas rejeições de carga é possível que um transformador esteja sujeito a consideráveis sobretensões. Se ocorrer saturação deste transformador, pode circular muita corrente de excitação e a forma de onda deverá se apresentar distorcida. Esta corrente somada a corrente de carga, pode ser interpretada pela proteção diferencial como uma falta interna, pois este acréscimo de corrente no circuito do transformador, só será sentido no lado da fonte [1] e [4]. Neste caso, são mais significativos os harmônicos ímpares, principalmente, os de terceira ordem [1].

Outro caso possível de surgimento de harmônicos, está ilustrado na figura 4.3 caracterizada por uma condição de rejeição de carga, e uma falta após o disjuntor D4. A falta será removida do circuito, aparecendo uma nova forma de corrente de excitação transitória devido a uma sobretensão, pela saída de carga, ver figuras 4.4 e 4.5.

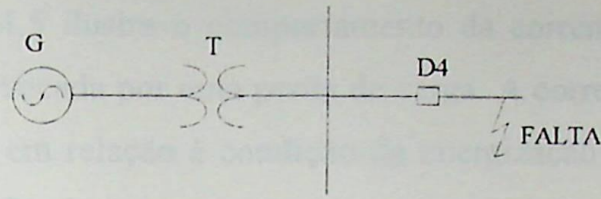


FIGURA 4.3 - EXEMPLO SIMPLIFICADO DE REJEIÇÃO DE CARGA

Na figura 4.3, tem-se:

- G - fonte;
- D4 - disjuntor;
- T - transformador.

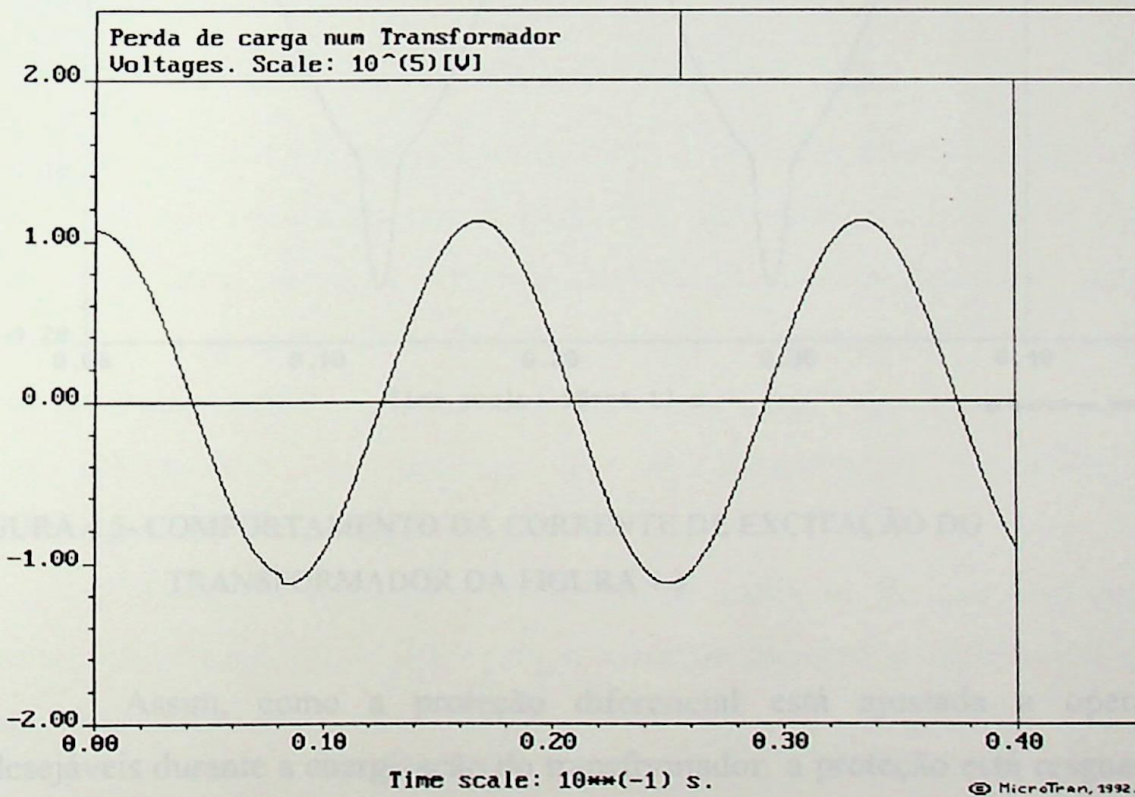


FIGURA 4.4 - COMPORTAMENTO DA TENSÃO DO ALIMENTADOR DO TRANSFORMADOR DA FIGURA 4.3



A figura 4.5 ilustra o comportamento da corrente de excitação após uma sobretensão provocada por uma perda de carga. A corrente diferencial, neste momento é pequena em relação à condição de energização do transformador. O mesmo pode ser verificado pelos harmônicos que surgem neste caso em relação à energização do transformador [4].

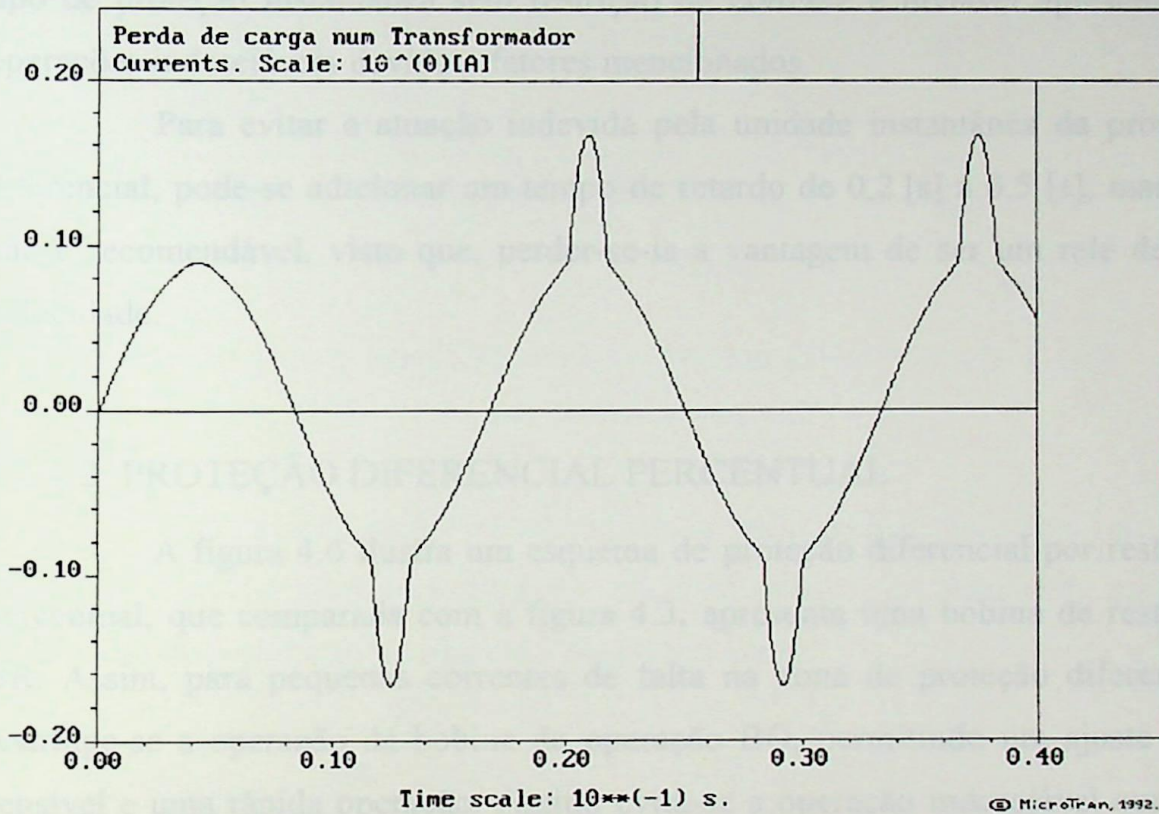


FIGURA 4.5- COMPORTAMENTO DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO DO TRANSFORMADOR DA FIGURA 4.3.

Assim, como a proteção diferencial está ajustada a operações indesejáveis durante a energização do transformador, a proteção está resguardada após uma sobretensão provocada por uma perda de carga.

Para evitar uma operação indesejável causada por estes fatores, tem-se a seguir métodos que evitam tais situações.

4.2.1.1 PROTEÇÃO DIFERENCIAL POR SOBRECORRENTE TEMPORIZADO

Este tipo de proteção diferencial, apresenta um circuito simples, conforme ilustra a figura 4.3. O relé, além da unidade temporizada, geralmente possui uma unidade instantânea apresentando valor de ajuste elevado, o suficiente para não operar durante a energização do transformador. Porém, este tipo de proteção instantânea sem restrição de corrente é inviável apresentando operações indesejáveis devido a fatores mencionados.

Para evitar a atuação indevida pela unidade instantânea da proteção diferencial, pode-se adicionar um tempo de retardo de 0,2 [s] a 0,5 [s], mas isto não é recomendável, visto que, perder-se-ia a vantagem de ser um relé de alta velocidade.

4.2.1.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL PERCENTUAL

A figura 4.6 ilustra um esquema de proteção diferencial por restrição percentual, que comparada com a figura 4.3, apresenta uma bobina de restrição BR. Assim, para pequenas correntes de falta na zona de proteção diferencial, restringe-se a operação da bobina de operação BO, permitindo um ajuste mais sensível e uma rápida operação. Assim, evita-se a operação indesejável em caso com sobretensões do sistema, ou de acoplamento imperfeito entre transformadores de corrente.

Na figura 4.6, tem-se a corrente de operação, I_d , que deve superar a corrente de restrição, $(I_s + I_p)/2$, para a operação da proteção diferencial durante uma falta na zona de proteção.

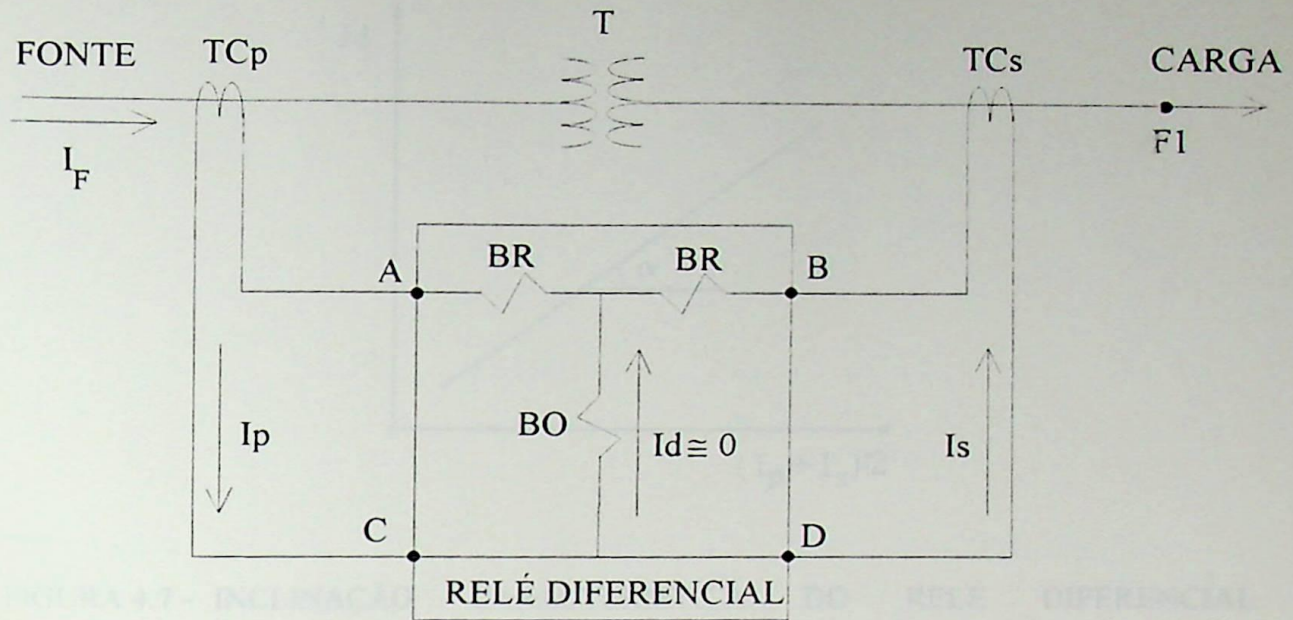


FIGURA 4.6 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL POR RESTRIÇÃO PARA TRANSFORMADORES

Esta relação pode ser representada graficamente por uma reta (vide figura 4.7), onde a tangência desta reta (vide equação (4.2)) representa um valor percentual da inclinação da reta em relação aos eixos.

$$\tan(\alpha) = \frac{I_d}{\frac{I_p - I_s}{2}} \quad (4.2)$$

Esta inclinação é chamada inclinação característica, fornecendo a restrição percentual da corrente diferencial entre 15 % a 50 %, dependendo do fabricante do relé, vide figura 4.8.

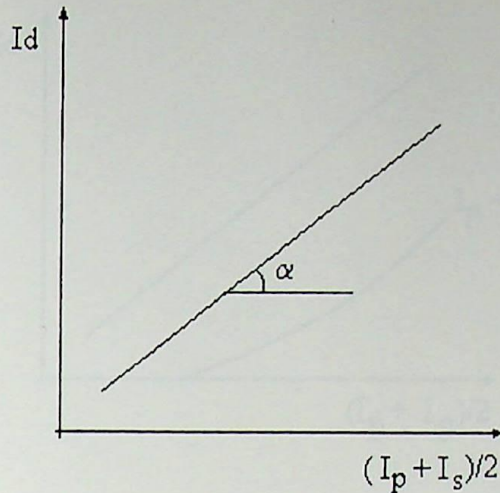


FIGURA 4.7 - INCLINAÇÃO CARACTERÍSTICA DO RELÉ DIFERENCIAL PERCENTUAL

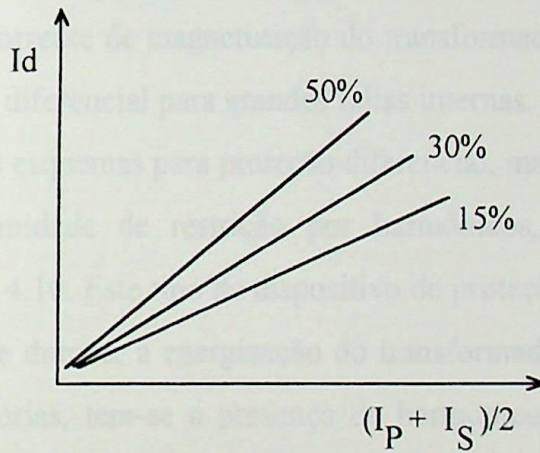


FIGURA 4.8 - INCLINAÇÕES CARACTERÍSTICAS DO RELÉ DIFERENCIAL COM RESTRIÇÃO

A figura 4.9 mostra um exemplo para a vantagem do uso da proteção diferencial por restrição sobre a proteção diferencial simples, ou sem restrição, para o caso de imperfeição de transformadores de corrente, nota-se quanto maior for a corrente $(I_p + I_s)/2$ tanto maior será a diferença entre I_p e I_s para a operação do relé. Assim, não será atingida a região de operação da curva característica do relé.

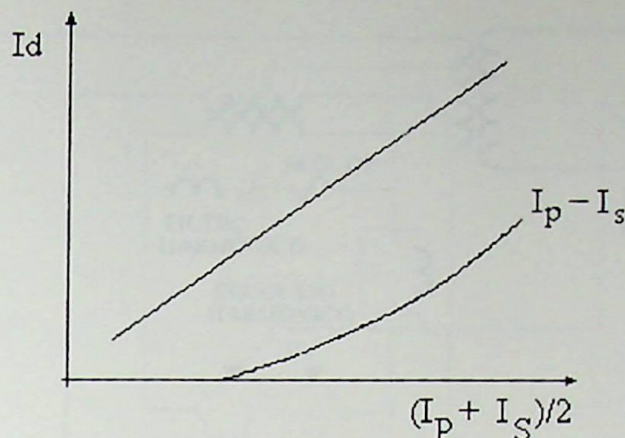


FIGURA 4.9 - INCLINAÇÕES CARACTERÍSTICAS DO RELÉ DIFERENCIAL COM RESTRIÇÃO

A adição de uma unidade instantânea, sem restrição, ajustada a operar acima do valor da corrente de magnetização do transformador, reduz o tempo de atuação da proteção diferencial para grandes faltas internas.

Há vários esquemas para proteção diferencial, mas o mais utilizado é a inclusão de uma unidade de restrição por harmônicos, providos de filtros especiais, ver figura 4.10. Este tipo de dispositivo de proteção é recomendado em transformadores, que durante a energização do transformador ou na presença de sobretensões transitórias, tem-se a presença de harmônicos. Assim, o relé não deverá operar indevidamente.

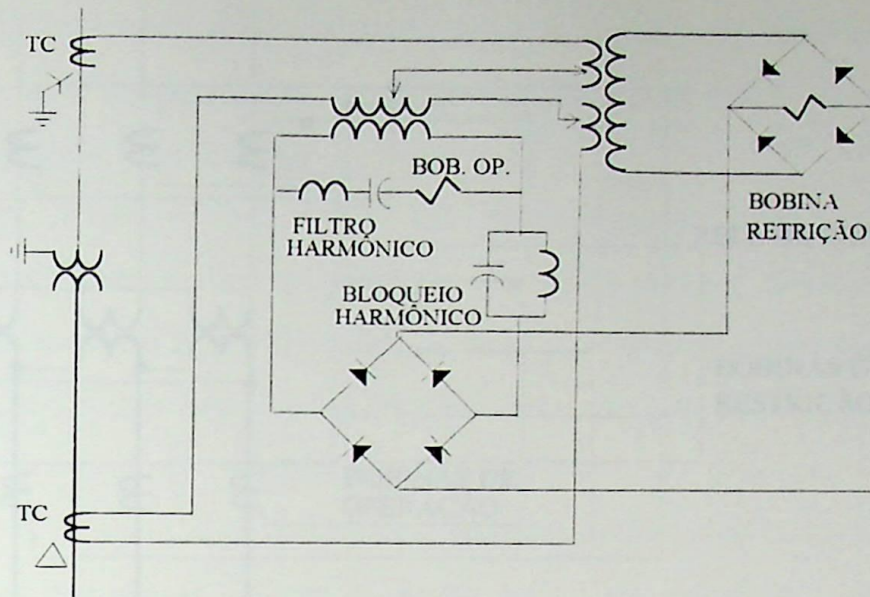


FIGURA 4.10 - ESQUEMA UNIFILAR DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL POR RESTRIÇÃO DE HARMÔNICO PARA UM TRANSFORMADOR CONECTADO EM Y/Δ.

A aplicação de proteção diferencial em transformadores é recomendado a transformadores com potências iguais ou maiores que 1000 [kVA] e com tensões secundárias iguais ou maiores que 2400 [V]. Os relés diferenciais percentuais com restrição de harmônicos são recomendados para transformadores com potências iguais e maiores que 2000 [kVA], [3].

As conexões dos transformadores de corrente aplicados na proteção diferencial dependem da configuração de transformador de potência. Quando tem-se um lado do transformador de potência conectado em estrela, Y, o transformador de corrente aplicado na proteção diferencial deve ser ligado em triângulo, Δ, e ligado em estrela no lado triângulo do transformador, vide figura 4.11.

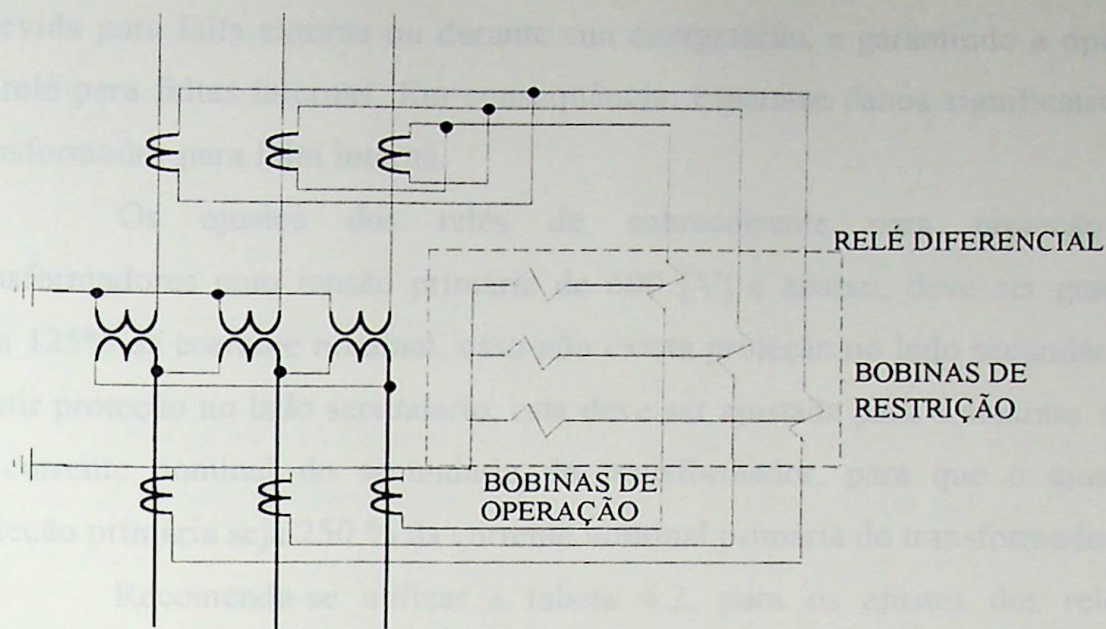


FIGURA 4.11 - ESQUEMA TRIFILAR DE CONEXÃO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL EM TRANSFORMADORES.

4.2.2 PROTEÇÃO POR RELÉS DE SOBRECORRENTE

Os relés de sobrecorrente são normalmente aplicados na proteção de transformadores de média e pequena potência contra faltas de sobrecorrentes externas a este, e para proteção de retaguarda para relés diferenciais ou mesmo às faltas internas.

Para as faltas internas ao transformador, aplica-se este tipo de proteção como principal em pequenas instalações e sem importância para o sistema, pois trata-se de um recurso simples e econômico. Porém, estes relés não apresentam ajustes sensíveis e operações rápidas.

Por causa da coordenação da proteção aplicada nos lados de alta e de baixa tensão do transformador, torna-se difícil ter uma operação rápida dos relés de sobrecorrente para faltas internas, mas para tal, recomenda-se o emprego de unidades instantâneas nos relés de sobrecorrente do lado primário do transformador, ajustadas para operarem acima da corrente de falta no lado secundário a um valor superior a 125 % da corrente de curto-circuito simétrica, ou 8 a 12 vezes a corrente nominal do transformador, evitando a operação

indevida para falta externa ou durante sua energização, e garantindo a operação do relé para faltas internas. Em conseqüência, espera-se danos significativos ao transformador para falta interna.

Os ajustes dos relés de sobrecorrente para proteção dos transformadores com tensão primária de 600 [V] e abaixo, deve ser graduado para 125% da corrente nominal, caso não exista proteção no lado secundário. Se existir proteção no lado secundário, esta deve ser ajustada para o máximo 125 % da corrente nominal do secundário do transformador, para que o ajuste da proteção primária seja 250 % da corrente nominal primária do transformador [7].

Recomenda-se utilizar a tabela 4.2, para os ajustes dos relés de sobrecorrente para proteção dos transformadores com tensão primária acima de 600 [V], onde dependem da impedância e da tensão secundária do transformador, e tipo de dispositivo a ser aplicado [7].

Impedância do Transformador	Primário > 600[V]		Secund. > 600[V]		Secund. ≤600[V]
	Sobrecorr.	Fusível	Sobrecorr.	Fusível	Sobrecorr. e Fusível
até 6%	600	300	300	150	250
acima de 6% até 10%	400	200	250	125	250

TABELA 4.2 - CLASSIFICAÇÃO MÁXIMA PARA PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE (VALORES EM POR CENTO DA CORRENTE NOMINAL) [7].

Entretanto, deve-se verificar a coordenação do ajuste deste relé com os relés adjacentes, limitando-se à curva característica de suportabilidade para cargas de curta duração do transformador, conforme ilustra a figura 4.12 [1], onde tem-se a curva característica de aquecimento do transformador, caso esta curva não seja fornecida pelo fabricante do transformador.

A aplicação das características de tempo para unidades temporizadas aplicados a relés de sobrecorrente, seguem as recomendações para apresentadas no capítulo 3.

4.2.3 PROTEÇÃO POR FUSÍVEIS

Os fusíveis são construtivamente simples e largamente aplicados em proteção de transformadores para proteção contra correntes de curto-circuito de faltas externas, isto é, proteção de retaguarda, em potências até 10.000 [kVA] onde não há a relevância para proteção de maior sensibilidade e a importância econômica não é significativa [1]. Os fusíveis também podem ser empregados como proteção contra sobrecorrente, como um meio simples e econômico de proteger um transformador contra sobrecarga para que não ocorra algum dano a este.

A recomendação para seleção destes dispositivos de proteção [7], é que para primários de transformadores com tensão nominal acima de 600 [V], sem proteção secundária, cada fusível primário opere de 150% a 300% da corrente nominal. Se existir proteção primária, a recomendação dependerá da impedância do transformador, da tensão nominal do secundário e do tipo de proteção secundária do transformador. Assim, esta recomendação pode ser resumida utilizando a tabela 4.2.

Para proteção de transformadores com tensão primária até 600 [V], recomenda-se utilizar os mesmos valores de ajuste aplicados na proteção por relés de sobrecorrente [7].

Contudo, durante a seleção do fusível, é recomendado verificar se o fusível não atuará para a corrente de energização do transformador, visto que esta corrente pode atingir valores entre 8 e 12 vezes a corrente nominal do transformador para um tempo máximo de 0,1 [s].

4.2.4 PROTEÇÃO DE RETAGUARDA

Sob condição de falta externa, o transformador é submetido às condições bastante severas em termos de corrente, assim o dispositivo de proteção mais próximo da falta deve eliminá-la o mais rápido possível. Caso este falhe, deverá haver um outro dispositivo de proteção aplicado no transformador que elimine a falta logo após o instante de disparo do dispositivo principal, esse dispositivo recebe a função de proteção de retaguarda.

Os dispositivos de proteção de retaguarda aplicados no transformador devem protegê-lo contra sobrecargas ou sobrecorrentes. Estes dispositivos devem ser ajustados de modo coordenado com o limite térmico do transformador, para evitar que o mesmo se danifique por efeitos mecânicos ou térmicos provocados pela corrente de falta, e coordenado com a característica tempo/corrente do dispositivo de proteção principal.

A suportabilidade dos transformadores à correntes de faltas externas está prevista em normas brasileiras e internacionais, conforme [11], [12], [13], [14], e é definido por elas como a capacidade dos enrolamentos dos transformadores em suportar correntes de faltas externas por um tempo determinado sem causar ao mesmo danos por efeitos térmicos e dinâmicos.

As normas descritas a seguir, apresentam como os transformadores devem suportar a magnitude e a duração das correntes de falta.

- 1) Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, NBR 8926, 1985
“Guia de Aplicação de Relés para a Proteção de Transformadores”

Esta norma, recomenda de maneira simples como proteger um transformador através da coordenação gráfica de dispositivos de proteção contra sobrecorrentes com base em uma curva, (vide figura 4.12) que ilustra o tempo máximo admissível para sobrecorrentes de origem externa de curta duração, isto é, o limite térmico do transformador.

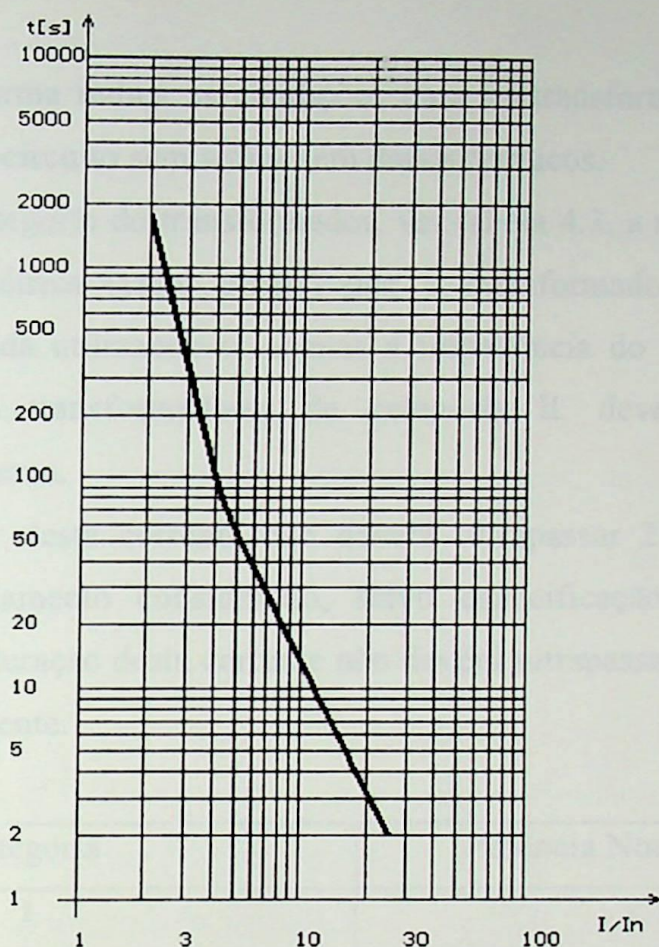


FIGURA 4.12 - TEMPO MÁXIMO ADMISSÍVEL PARA CARGAS DE CURTA DURAÇÃO APÓS REGIME A PLENA CARGA DO TRANSFORMADOR

O tempo de atuação dos dispositivos de proteção deverão ser menores do que o tempo limitado pela curva característica do limite térmico para o transformador.

Observa-se na figura 4.12, que a curva termina na corrente de 25 vezes da corrente nominal do transformador em um tempo de 2 segundos. Assim, este ponto indica o intervalo de duração e o valor da máxima corrente admissível pelo transformador. Isto está previsto em outra norma da ABNT, NBR 5356, descrita abaixo.

2) Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, NBR 5356, 1981
 “Transformador de Potência - Especificação”

Esta norma indica as condições para os transformadores suportarem correntes de curto-circuito sem sofrerem danos térmicos.

Pela categoria do transformador, ver tabela 4.3, a máxima corrente de curto-circuito simétrica (valor eficaz) que o transformador poderá suportar, deverá ser calculada utilizando-se apenas a impedância do transformador para categoria I. Para transformadores de categoria II, deve-se acrescentar a impedância do sistema.

O valor desta corrente não deverá ultrapassar 25 vezes a corrente nominal do enrolamento considerado, salvo especificação diferente para o transformador. A duração desta corrente não deverá ultrapassar 2 segundos, salvo especificação diferente.

Categoria	Potência Nominal, em [kVA]
I	≤ 10.000
II	> 10.000

TABELA 4.3 - CATEGORIA DO TRANSFORMADOR DEPENDENDO DA POTÊNCIA NOMINAL DO TRANSFORMADOR [11].

A corrente de curto-circuito simétrica (valor eficaz) deve ser calculada através da equação (4.3), para transformadores trifásicos, com dois enrolamentos.

$$I_{CC\ SIM} = \frac{U_N}{(Z_T + Z_S) \cdot \sqrt{3}} \quad (4.3)$$

$$Z_S = \frac{U_S^2}{S_{CC}} \quad (4.4)$$

$$Z_T = \frac{Z\% \cdot U_N^2}{100 \cdot S_N} \quad (4.5)$$

Onde nas equações (4.3) a (4.5), tem-se:

$I_{CC\ SIM}$ - corrente de curto-circuito (valor simétrico), em [kA];

U_N - tensão nominal do enrolamento considerado, em [kV];

Z_S - impedância de curto-circuito do sistema, em [Ω] por fase;

S_{CC} - potência aparente de curto-circuito do sistema no lado primário do transformador, em [MVA];

U_S - tensão nominal do sistema, em [kV];

Z_T - impedância de curto-circuito do transformador, referida ao enrolamento considerado, em [Ω] por fase;

$Z\%$ - impedância de curto-circuito, em [%];

S_N - potência nominal do transformador, em [MVA].

Na falta de dados mais adequados, pode-se utilizar a tabela 4.4 para se obter os valores típicos de impedância de curto-circuito para transformadores visando o cálculo da corrente de $I_{CC\ SIM}$.

Potência Nominal, em [kVA]	Impedância de curto-circuito, em [%]
$P \leq 630$	4,0
$630 < P \leq 1.250$	5,0
$1.250 < P \leq 3.150$	6,0
$3.150 < P \leq 6.300$	7,0
$6.300 < P \leq 12.500$	8,0
$12.500 < P \leq 25.000$	10,0
$25.000 < P \leq 200.000$	12,0

TABELA 4.4 - VALORES TÍPICOS DE IMPEDÂNCIA DE CURTO-CIRCUITO DE TRANSFORMADORES DE DOIS ENROLAMENTOS SEPARADOS [11].

3) American National Standards Institute - ANSI, C.57.12.00 - 1989.

"General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers"

Assim como a ABNT, a ANSI, através da norma C.57.12.00, recomenda um limite de duração para correntes de faltas que os transformadores imersos em óleo isolante pode se submeter. Estas podem ser ilustradas graficamente através de curvas, onde tem-se o tempo máximo admissível para sobrecorrentes de origem externa de curta duração. Estas curvas devem ser utilizadas para a coordenação de dispositivos de proteção contra sobrecorrente aplicados em transformadores de enrolamentos imersos em líquido isolante. Estas curvas estão ilustradas nas figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16.

Recomenda-se que o tempo de atuação dos dispositivos de proteção sejam menores que o limite de tempo especificado pela curvas características para a suportabilidade térmica ou mecânica do transformador.

Cada categoria do transformador apresenta uma ou duas características de limite de tempo para altas correntes de curta duração, representando a frequência de correntes de faltas passantes no tempo de vida útil. As categorias para transformadores imersos em óleo isolante dependem de sua potência, ver tabela 4.5.

Categoria	Transformador Monofásico [kVA]	Transformador Trifásico [kVA]
I	5 a 500	15 a 500
II	501 a 1.667	501 a 5.000
III	1668 a 10.000	5.001 a 30.000
IV	acima de 10.000	acima de 30.000

TABELA 4.5 - CATEGORIA DE TRANSFORMADORES IMERSOS EM LÍQUIDO ISOLANTE.

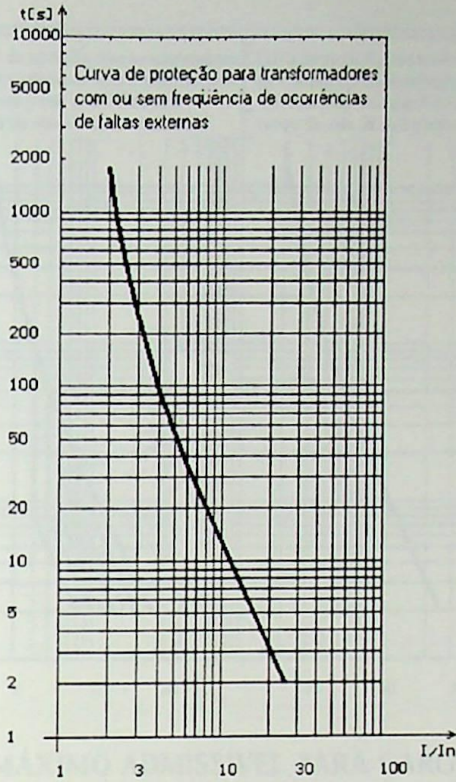


FIGURA 4.13 - TEMPO MÁXIMO ADMISSÍVEL PARA CARGAS DE CURTA DURAÇÃO PARA TRANSFORMADORES DE CATEGORIA I [12]

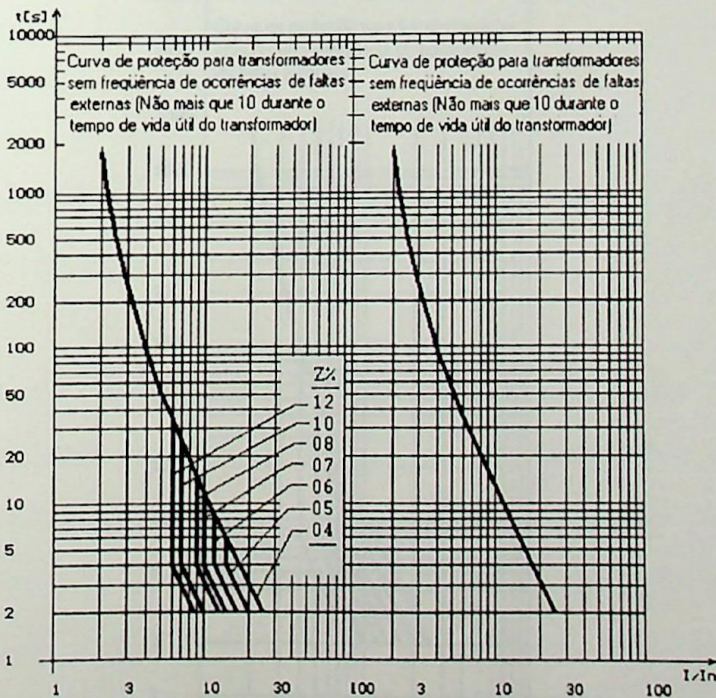


FIGURA 4.14 - TEMPO MÁXIMO ADMISSÍVEL PARA CARGAS DE CURTA DURAÇÃO PARA TRANSFORMADORES DE CATEGORIA II [12]

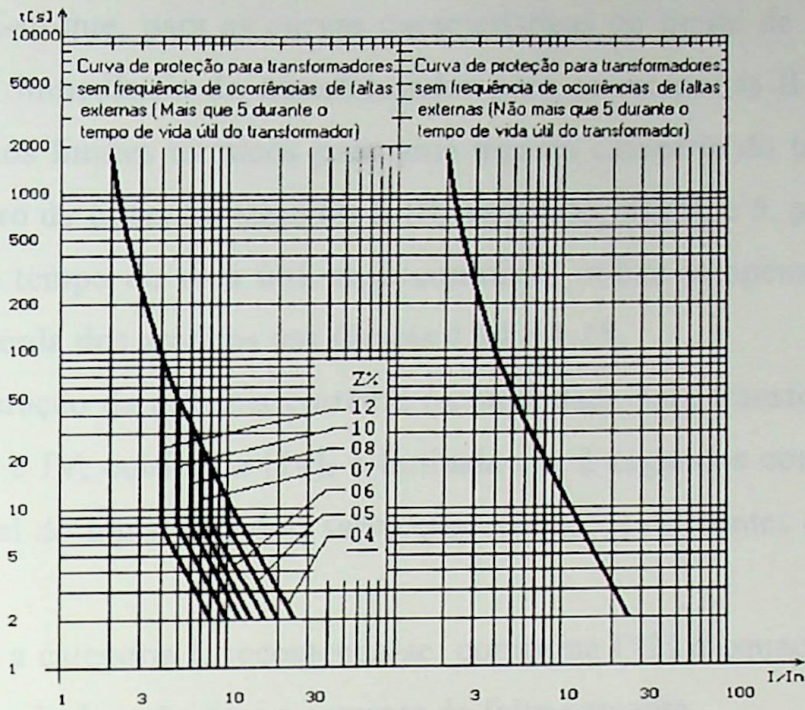


FIGURA 4.15 - TEMPO MÁXIMO ADMISSÍVEL PARA CARGAS DE CURTA DURAÇÃO PARA TRANSFORMADORES DE CATEGORIA III [12]

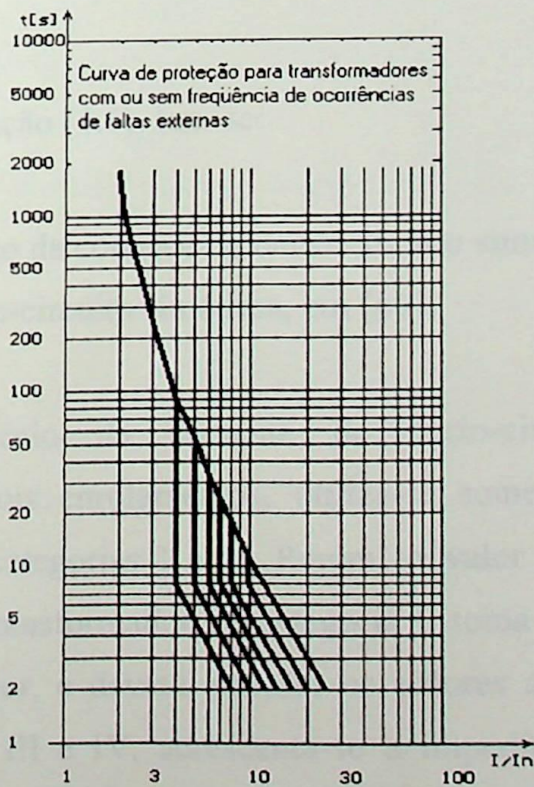


FIGURA 4.16 - TEMPO MÁXIMO ADMISSÍVEL PARA CARGAS DE CURTA DURAÇÃO PARA TRANSFORMADORES DE CATEGORIA IV [12]

Nota-se que, para as curvas características do limite de proteção são dependentes da impedância do transformador para as categorias II e III. Existe uma variação nos limites térmicos para uma mesma categoria do transformador quando o número de faltas for superior a 10, para categoria II, e 5, para categoria III, durante seu tempo de vida útil, caso contrário, utiliza-se apenas uma curva ilustrada a esquerda dos gráficos nas figuras 4.14 e 4.15.

A duração da máxima corrente recomendada para transformadores de categoria II, III e IV, conforme [14], é limitada em 2 segundos com 25 vezes a corrente nominal do transformador, salvo especificações diferentes exigidas pelo usuário.

Para a categoria I, recomenda-se, conforme [12] a equação (4.6) para se obter o tempo de duração para a corrente de falta passante.

$$t = \frac{1250}{I_{CC\ PU}^2} \quad (4.6)$$

Onde na equação (4.6), tem-se:

t - tempo de duração da corrente de curto-circuito simétrica, em [s];

$I_{CC\ PU}$ - corrente de curto-circuito simétrica, em [pu];

Para o cálculo da corrente de curto-circuito simétrica em transformadores com dois enrolamentos, utiliza-se somente a impedância do transformador para as categorias I e II. Porém, o valor da corrente simétrica máxima que flue pelo transformador de categoria I, toma como base a corrente nominal do transformador, e deverá exceder os valores apresentados na tabela 4.6. Para as categorias III e IV, acrescenta-se a impedância do sistema, vide equação (4.7).

Transformador Monofásico, em [kVA]	Transformador Trifásico, em [kVA]	Corrente (simétrica), em [pu]
5 - 25	15 - 75	40
37.5 - 100	112.5 - 300	35
167 - 500	500	25

TABELA 4.6 - MÁXIMA CORRENTE PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO [12]

$$I_{CC\ SIM} = \frac{I_T}{Z_{T\ PU} + Z_{S\ PU}} \quad (4.7)$$

$$I_{CC\ PU} = \frac{I_{CC\ SIM}}{I_T} \quad (4.8)$$

Onde nas equações (4.7) e (4.8), tem-se:

I_T - corrente nominal (valor eficaz) do transformador, em [A];

$Z_{S\ PU}$ - impedância do sistema, em [pu] na mesma potência base de I_T ;

$Z_{T\ PU}$ - impedância do transformador, em [pu] na mesma potência base de I_T ;

A tabela 4.6 é aplicada a todos transformadores de distribuição com tensão nominal do secundário de até 600 [V]. Se a tensão secundária for superior a 600 [V], o mesmo deve suportar as correntes de falta limitadas somente através de sua impedância própria.

4) American National Standards Institute - ANSI, C.57.12.01 - 1989

"Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers "

Assim como a norma C.57.12.00, esta recomenda um limite de duração para altas correntes de faltas que o transformador encapsulado por resina ou a seco pode se submeter.

Para o cálculo da corrente de curto-circuito simétrico, também recomenda-se a equação (4.7), onde o valor desta corrente não deve exceder 25 vezes a corrente nominal do enrolamento considerado, com tempo de duração limitado em 2 segundos. Estas condições aplicam-se às categorias I, II, e III, conforme apresenta a tabela 4.7.

Categoria	Transformador Monofásico [kVA]	Transformador Trifásico [kVA]
I	5 a 500	15 a 500
II	501 a 1.667	501 a 5.000
III	1668 a 10.000	5.001 a 30.000

TABELA 4.7 - CATEGORIA DE TRANSFORMADORES TIPO SECO OU COM RESINA [13].

Para o cálculo da corrente de curto-circuito simétrica, no caso de transformadores de categoria II e III, também se utiliza a equação (4.7), excluindo-se a impedância do transformador. Para os transformadores com categorias I, exclue-se a impedância do sistema da equação (4.7).

5) National Electrical Manufacturers Association - NEMA, TR27 - 1965
 "Commercial, Institutional and Industrial Dry-type Transformers"

A NEMA, através da norma TR27 [15], prevê que seja verificado o limite térmico do transformador para suportar corrente de curto-circuito simétricos.

Esta norma faz uma recomendação simples admitindo que esta corrente não deverá exceder a 25 vezes a corrente nominal do enrolamento considerado, onde o tempo de duração desta corrente é dependente da impedância do transformador conforme tabela 4.8.

Impedância, em [pu]	Corrente simétrica eficaz, vezes I_T	Duração
4 ou menor	25	3
5	20	2
6	16.6	4
7 ou maior	Calculados através de interpolação ou extrapolação	5

TABELA 4.8 - TEMPO DE DURAÇÃO MÁXIMO PARA MÁXIMA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO [15]

A aplicação de dispositivos de proteção de retaguarda em transformadores é função dos seguintes fatores:

- a filosofia de proteção empregado no sistema;
- potência do transformador a ser protegido; e
- considerações econômicas.

Utilizando-se estes requisitos, consegue-se ter disponível vários dispositivos de proteção, dentre eles se destacam:

- relés de sobrecorrente e fusíveis contra sobrecorrentes;
- relés de térmico contra sobrecarga do transformador.

4.2.4.1 PROTEÇÃO CONTRA SOBRECORRENTE EM TRANSFORMADOR

As recomendações de aplicações e ajustes dos dispositivos de proteção, seguem as mesmas recomendações mencionadas para relés de sobrecorrente e fusíveis, levando em conta que esta aplicação deve ser para retaguarda.

A aplicação de relés e fusíveis, dependem da conexão do transformador, que poderá afetar a sua sensibilidade [8]. Para um transformador com o lado de alta tensão ligado em delta e o lado de baixa tensão em estrela aterrada, a corrente, em [pu], para uma falta fase-terra no lado de baixa tensão vista pelo relé ou fusível do lado de alta tensão, é apenas 57% ($1/\sqrt{3} \times 100\%$) da corrente de falta no lado de baixa tensão. Assim, deve-se multiplicar o valor da corrente de falta por 0,57, verificando se o dispositivo de proteção atua para esse nível de corrente, mantendo o mesmo tempo que o transformador suporta a corrente de falta sem apresentar dano [8], e verificar se a proteção é seletiva a esse nível de corrente.

Para uma falta fase-fase, no caso de conexão delta-estrela, introduz um deslocamento angular de 30° entre as correntes de falta nos lados opostos do transformador. As correntes nas fases defeituosas terão o valor de 1 [pu] de corrente de falta trifásica. A corrente do lado não defeituoso terá um valor igual a corrente de falta trifásica de $1/(\sqrt{3}/2)$ [pu] em uma fase, e nas outras duas fases, somente fluirá metade deste valor, conforme ilustra a figura 4.17.

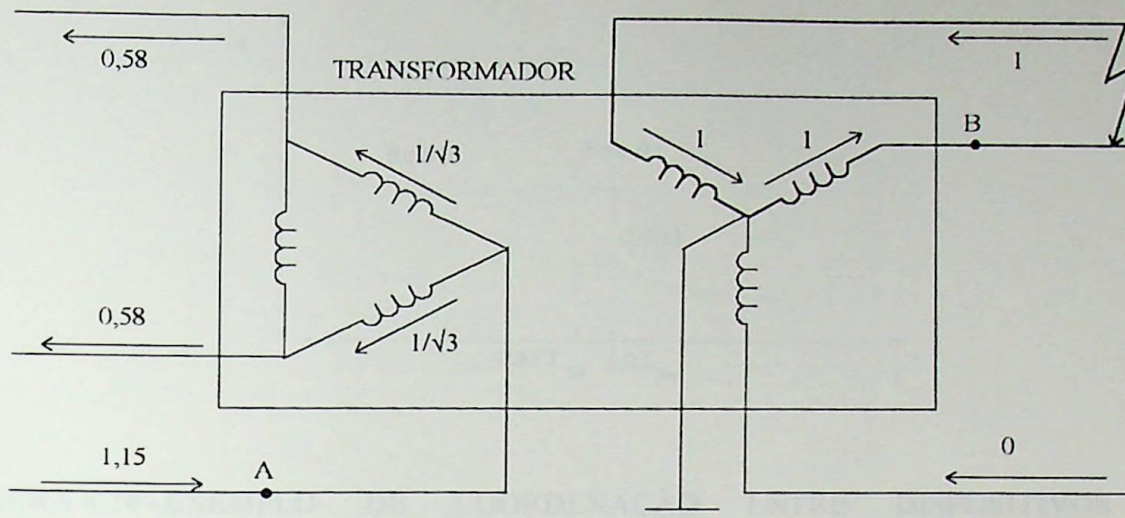


FIGURA 4.17 - COMPORTAMENTO DAS CORRENTES DURANTE UMA FALTA BIFÁSICA NO SECUNDÁRIO (LADO ESTRELA) DO TRANSFORMADOR CONECTADO EM DELTA-ESTRELA.

Conseqüentemente, o dispositivo de sobrecorrente instalado na fase onde flui a corrente de $1/(\sqrt{3}/2)$ [pu], tenderá a operar proporcionalmente mais rápido que o dispositivo instalado no lado de baixa tensão, assim comprometendo a coordenação dos relés dos lados opostos do transformador.

A recomendação, dada por [16], para impedir uma má operação seletiva dos dispositivos, é fornecer uma margem de 16% na corrente do lado do dispositivo do lado de baixa tensão (ponto B) antes de contar o intervalo seletivo para se plotar a curva característica do dispositivo do lado de alta tensão (ponto A). Assim sendo, a seletividade do dispositivo de sobrecorrente do lado estrela será conseguida quando for dado uma margem de 0,4 [s] para uma corrente igual à trifásica de curto-circuito ao dispositivo do lado delta, isto é equivalente a deslocar a característica de corrente do relé B para a direita de 16%, conforme mostra a figura 4.18.

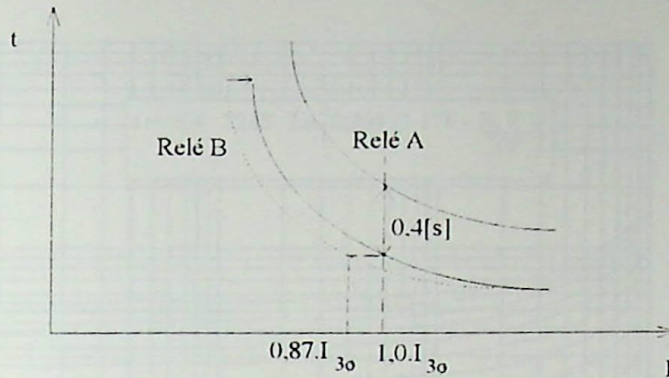


FIGURA 4.18 - EXEMPLO DE COORDENAÇÃO ENTRE DISPOSITIVOS DE SOBRECORRENTE PARA TRANSFORMADOR DELTA-ESTRELA.

4.2.4.2 RELÉS SENSÍVEIS A TENSÃO

Os relés sensíveis a tensão são aplicados na proteção de sistemas elétricos visando duas características de operação:

- proteção contra sobretensão; e
- proteção contra subtensão.

Os relés de tensão apresentam características de tempo para operação, que podem ser definidas como:

- instantâneo; e
- temporizadas.

As características temporizadas podem ser classificadas em tempo inverso ou definido, vide figuras 4.19 e 4.20, respectivamente.

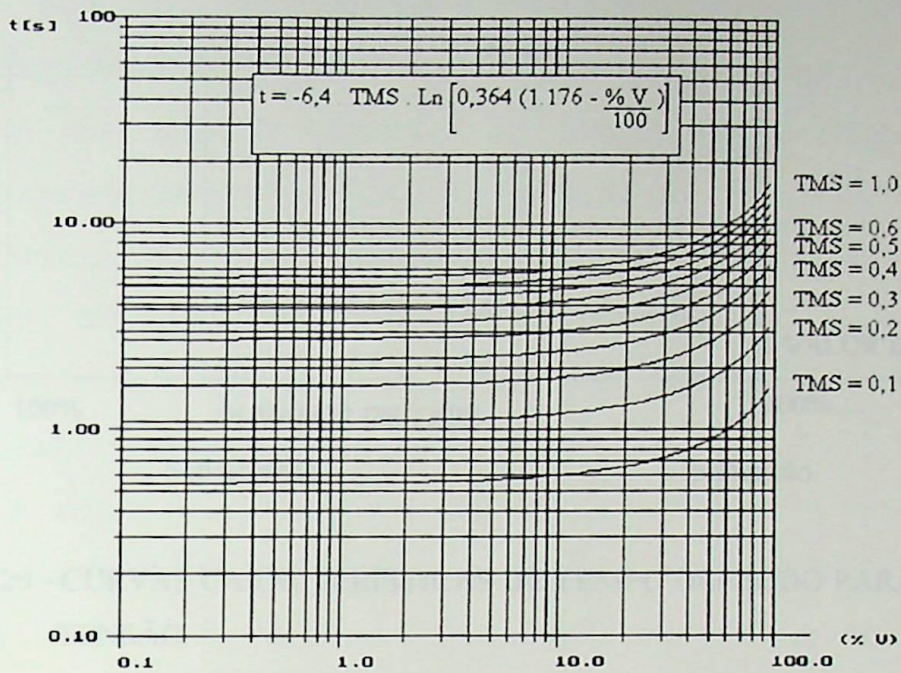


FIGURA 4.19 - CURVAS CARACTERÍSTICA TEMPO x TENSÃO PARA O RELÉ DE SUBTENSÃO COM CARACTERÍSTICA DE TEMPO INVERSO [10].

A recomendação para o ajuste dos dispositivos de proteção contra subtensão aplicados em transformadores é de 80% da tensão nominal do transformador. A unidade de disparo pode ter a característica de retardar do tempo de operação quando da sua sensibilização, levando-se em conta a coordenação dos dispositivos de proteção por sobrecorrente, de tal maneira que durante um curto-circuito, o relé de subtensão seja graduado de tal maneira que opere após a proteção de sobrecorrente.

4.2.4.3 RELE TÉRMICO

Para os casos em que o relé de subtensão não puder ser aplicado no transformador devido à ausência de equipamento adequado, que possa detectar a deterioração do isolamento dos enrolamentos. Para evitar tal

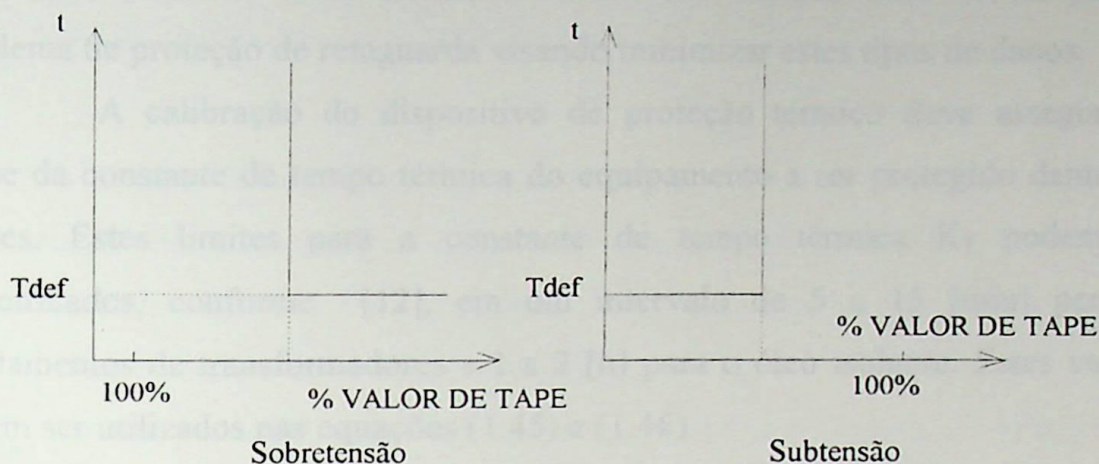


FIGURA 4.20 - CURVAS CARACTERÍSTICAS DE TEMPO DEFINIDO PARA O RELÉ DE TENSÃO.

Em geral, os relés de subtensão são melhores aplicados onde se tem tensões de distribuição mais baixas e em pequenos transformadores de potência servindo como proteção de retaguarda.

A aplicação destes relés consiste na utilização de relés de subtensão combinados com relés de sobrecorrente para melhor caracterizar a proteção contra curto-circuito, permitindo que a queda de tensão nos terminais do transformador limite a sensibilidade da proteção para curto-circuito ao invés da corrente de falta.

Nos relés de proteção contra sobretensão aplicados em transformadores, a recomendação para sua graduação é de 110 % da tensão nominal do transformador, por mais de 0,1 [s], evitando, assim, falsas operações por transitórios provocados pelo sistema.

4.2.4.3 RELÉ TÉRMICO

Faltas externas não eliminadas adequadamente podem causar danos ao transformador devido a sobrecarga, acarretando aquecimento que poderá acarretar a deterioração do isolamento dos enrolamentos. Para evitar tais

problemas, utiliza-se relés térmicos como uma solução mais direta para o problema de proteção de retaguarda visando minimizar estes tipos de danos.

A calibração do dispositivo de proteção térmico deve assegurar o ajuste da constante de tempo térmica do equipamento a ser protegido dentro de limites. Estes limites para a constante de tempo térmica K_T podem ser especificados, conforme [12], em um intervalo de 5 a 15 [min] para os enrolamentos de transformadores e 1 a 2 [h] para o óleo isolante. Estes valores podem ser utilizados nas equações (1.45) e (1.46).

A figura 4.21 ilustra um exemplo da coordenação entre as curvas características do limite térmico de um transformador (curva TR), conforme recomenda [11], e de um relé térmico (curva RE), que utiliza as equações (1.45) e (1.46) adotando K_T igual a 13. Tem-se que a curva TR deverá estar sempre abaixo da curva de limite térmico do transformador, conforme recomenda [11], para evitar danos por efeito térmico aos enrolamentos do transformador.

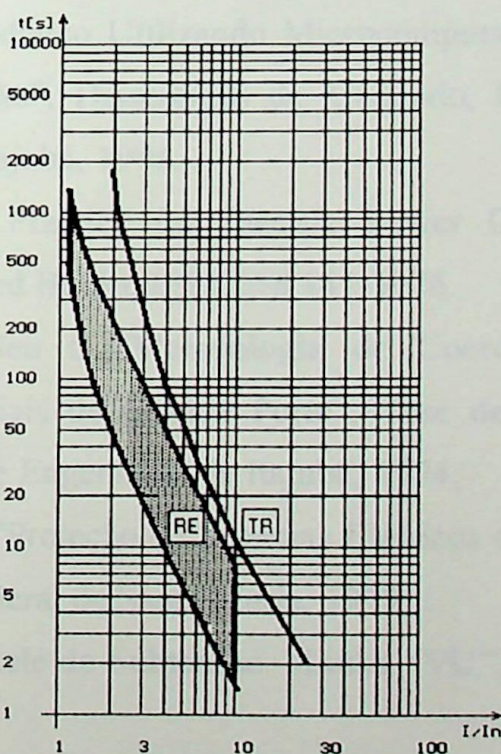
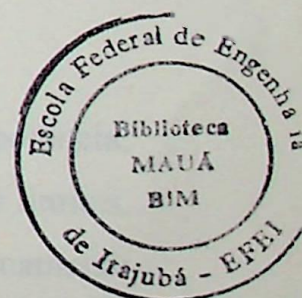


FIGURA 4.21 - COORDENAÇÃO DO RELÉ TÉRMICO COM A SUPORTABILIDADE TÉRMICA DO TRANSFORMADOR.

4.3 BIBLIOGRAFIA

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, "Guia de Aplicação de Relés para a Proteção de Transformadores", 03.026, NBR 8926, Jun/1985.
- [2] Caminha, Amadeu C., "Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos", Ed. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1977.
- [3] "Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems" (IEEE Buff Book), IEEE Std 242-1986.
- [4] "Applied Protective Relaying", Whestinghouse Electric Corporation, Relay-Instrument Division, Newark, N.J. 07101, 1976.
- [5] Mamede Filho, João, "Manual de Equipamentos Elétricos", LTC - Livros Técnicos e Científicos Ed., Volume 1, Rio de Janeiro, 1993.
- [6] Rossi, Ronaldo; Guimarães, C. A. Mohallen; Silveira, Paulo M.; "Um Equipamento Didático Utilizando Microcomputador para Treinamento em Relés de Proteção", Dissertação de Mestrado, EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1991.
- [7] "Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants" (IEEE Red Book), IEEE Std 141-1976.
- [8] Caminha, Amadeu C., "Metodologia de Coordenação da Proteção de Sistemas Industriais de Grande Porte", Tese de Livre Docência, EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1974.
- [9] Mello, F. P. de, "Proteção de Sistemas Elétricos de Potência", Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1979.
- [10] INEPAR S.A., 'Relé de Subtensão - Linha "VU"', CAT. IN.3.13, Janeiro de 1987.
- [11] Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, "Transformador de Potência - especificação", NBR 5356, Dez/1981.

- [12] American National Standards Institute - ANSI, "Applications of the Transformers Through-Fault Current Duration Guide to the Protection of Power Transformers", C.37.91 - 1985.
- [13] American National Standards Institute - ANSI, "Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers ", C.57.12.01 - 1989.
- [14] American National Standards Institute - ANSI, "General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers ", C.57.12.00 - 1989.
- [15] National Electrical Manufacturers Association - NEMA, "Commercial, Institutional and Industrial Dry-type Transformers", TR27 - 1965.
- [16] Rossi, Ronaldo, Apostila do curso "Proteção de Sistemas Elétricos Industriais", Fundação de Pesquisa e Assessoria à Indústria - FUPAI.
- [17] "MTREAD.EXE", Programa de propriedade da GSI – Engenharia e Comércio Ltda.



5. PROTEÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

5.1 - INTRODUÇÃO

Assim como os transformadores, os motores elétricos também tem sua importância no sistema elétrico industrial, tanto economicamente como pela sua continuidade de serviço que sua função requer. Portanto, os motores devem também merecer cuidados especiais tanto por danos internos como por danos que possam provocar ao sistema industrial. Portanto, recomenda-se uma proteção específica a cada motor, respeitando os requerimentos exigidos pelo motor e seu uso.

Devido a existência de motores com várias potências, aplicações variadas ou tipos de serviços, existe uma variação nos esquemas de proteção para motores, e assim, requer uma análise das variáveis que podem existir na sua aplicação ou no sistema. Basicamente, pode-se ter [4]:

a) Características do motor:

Estas incluem tipo, velocidade, tensão, potência, fator de potência, fator de serviço, arranjo dos enrolamentos e suas temperaturas limites, capacidade térmica do rotor e estator durante a partida, funcionamento e parada do motor.

b) Condições de partida do motor:

Incluindo partida com tensão nominal ou reduzida, queda de tensão e decréscimo da corrente de partida, partidas repetitivas, frequência e número total de partidas.

c) Condições ambientais:

Temperatura máxima e mínima, fontes próximas de calor, tipo de ventilação, exposição a água ou produtos químicos.

d) Condições de carga:

Características da carga influenciarão no motor, tais como: condições de rotor bloqueado, falha para alcançar velocidade normal, calor provocado durante aceleração ou sobrecarga.

e) Condição do sistema de potência:

Tipo de aterramento do sistema, exposição a surtos de manobra, capacidade de falha, possibilidades de falha monofásica na alimentação (quebra de condutor ou queima de fusível), e outras cargas que podem causar desequilíbrio de tensão devem ser consideradas.

f) Importância do motor:

Custo do motor, quantidade de manutenção e supervisão de operação requerida pelo motor, facilidade e custos de reparos devem ser avaliados.

A exemplo da importância destas variáveis, tem-se a tabela 5.1 [7], que apresenta as perdas existentes para motores de indução trifásicos em relação percentual às suas perdas totais. Estas perdas, basicamente, são responsáveis pela temperatura de funcionamento do motor, e uma das principais preocupações com relação à proteção de motores, é com relação à elevação da temperatura de funcionamento, pois se algumas das condições mencionadas acima forem modificadas fora do especificado, pode-se ter como resposta um aumento de suas

perdas normais, provocando um aumento de temperatura, e se for ultrapassado o limite dado por sua curva de aquecimento, o motor poderá ter como resposta uma redução do tempo de sua vida útil.

Especificação das perdas	% em relação às perdas totais	Fatores que influenciam nestas perdas
Perdas no estator	35 a 40	Dimensão dos condutores do estator
Perdas no rotor	15 a 20	Dimensão dos condutores do rotor
Perdas no ferro	15 a 20	Tipo e qualidade de material magnético
Perdas por atrito e ventilação	5 a 10	Seleção/projeto de mancais e ventiladores
Perdas por dispersão	10 a 15	Métodos de projetos e fabricação

TABELA 5.1 - DISTRIBUIÇÃO DAS PERDAS EM UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.

A curva de aquecimento do motor estabelece a relação tempo x corrente de suportabilidade do motor, fornecida pelos fabricantes, ao atingir a temperatura limite sem danos. Como consequência destes danos, tem-se:

- acelerar o envelhecimento térmico do dielétrico do isolante, que é, por natureza, muito lento;
- queima do isolante dos enrolamentos;
- quebra das barras em rotores do tipo gaiola; e
- danos aos núcleos magnéticos.

Esta curva deve ser fornecida pelos fabricantes, pois a existência da variedade de tipos de motores e potências, é difícil obter uma característica de suportabilidade térmica padrão para os dispositivos de proteção. Assim, a tabela 5.2 recomenda uma composição desta característica em função da classe de isolamento do motor ([5] e [6]), isto é sua temperatura admissível.

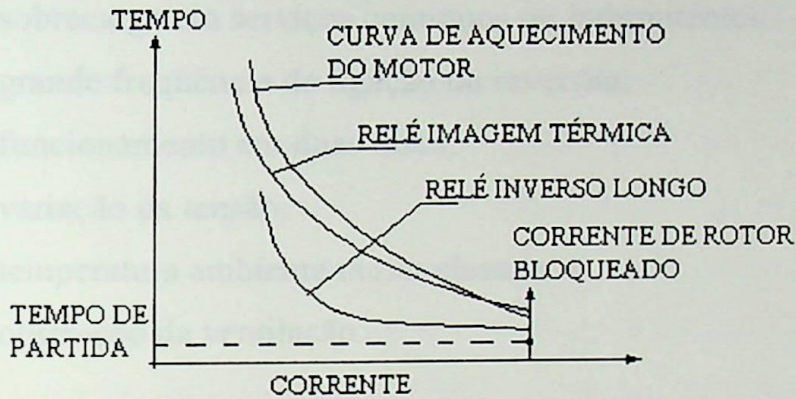


FIGURA 5.1 - CARACTERÍSTICAS TEMPO x CORRENTE DE RELÉS E MOTOR

Classe de isolamento		A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	°C	40	40	40	40	40
$\Delta\tau$ = elevação da temperatura (método da resistência)	°C	60	75	80	100	125
Diferença de temperatura entre o ponto mais quente e a temperatura média	°C	5	5	10	15	15
τ_{ADM} = temperatura do ponto mais quente (Total)	°C	105	120	130	155	180

TABELA 5.2 - TEMPERATURA ADMISSÍVEL EM FUNÇÃO DA CLASSE DE ISOLAMENTO

A importância da elevação da temperatura do motor, influi na vida de seu enrolamento, pois com acréscimo de 10% de temperatura, o motor terá sua vida útil reduzida em 50%.

As principais variáveis responsáveis pelo aumento da temperatura serão discutidas a seguir, tais como:

- sobrecarga em serviços contínuos ou intermitentes;
- grande frequência de ligação ou reversão;
- funcionamento em duas fases;
- variação da tensão;
- temperatura ambiente muito elevada; e
- obstrução da ventilação.

5.2 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO ESTATOR

Sabe-se que uma das causas da diminuição da vida útil do motor é a deterioração do isolamento dos seus enrolamentos. A temperatura tem grande influência no estado e situação do isolamento, isto porque a variação da temperatura será responsável pela deterioração da isolação, afetando a resistência do enrolamento pelas condições elétricas e mecânicas.

A exemplo de sobrecarga, tem-se o tempo da elevação e grau de temperatura, no qual o motor se submete. Se é aplicada uma sobrecarga neste por um curto período de tempo, isto não implicará em danos devido à inclusão de temperatura, pois o calor extra é transferido à massa do motor pelo condutor para outras partes da estrutura. Porém, na condição de rotor bloqueado, a taxa de elevação de temperatura será rápida em razão às altas correntes, porque a capacidade de transmissão de calor da massa do motor é pequena, podendo, com uma variação muito brusca da temperatura, ultrapassar o limite térmico da isolação do enrolamento rapidamente.

As condições do sistema de refrigeração do motor também podem deteriorar o isolamento dos condutores. Por exemplo, a obstrução da passagem do meio refrigerante, ou a elevação temperatura ambiente acondicionando ao motor a mesma temperatura do motor em condição de sobrecarga em ambiente normal.

A variação da tensão do sistema, também influencia no aumento das perdas nos motores, e conseqüentemente, no aumento da temperatura. As tabelas 5.3 e 5.4, conforme [7], apresentam parâmetros causados pela variação da tensão de alimentação em mais ou menos 10% da tensão nominal.

A tabela 5.4 apresenta os parâmetros obtidos pelas condições de carga e tensão de alimentação abaixo da nominal. Nota-se que as perdas diminuem devido à sensível redução das perdas no ferro, representando uma grande parcela das perdas totais. Porém, o conjugado diminui proporcionalmente ao quadrado da variação da tensão, o que pode afetar os motores que partem com carga.

Condições de carga	Parâmetros analisados	Conseqüência	Variação (%)
Em Vazio	Perdas	Aumentam	13,48 a 66,25
	Corrente	Aumenta	20,18 a 52,14
	Fator de potência	Diminui	0,64 a 18,52
Abaixo da Nominal	Rendimento	Diminui	0,42 a 21,05
	Corrente	Aumenta	0,37 a 36,41
	Fator de potência	Diminui	7,34 a 24,88
Nominal	Rendimento	Diminui	0,13 a 4,41
	Corrente	Diminui	0,39 a 6,25
	Fator de potência	Diminui	3,60 a 10,59

TABELA 5.3 - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TENSÃO NO COMPORTAMENTO DO MOTOR (OPERAÇÃO DO MOTOR COM TENSÃO ACIMA DA TENSÃO NOMINAL, 110% DE U_N)

Condições de carga	Parâmetros analisados	Conseqüência	Variação (%)
Em vazio	Perdas	Diminuem	12,20 a 34,00
	Corrente	Diminui	11,83 a 28,05
	Fator de potência	Aumenta	0,72 a 19,17
Abaixo da nominal	Rendimento	Aumenta	0,29 a 10,52
	Corrente	Diminui	0,50 a 15,54
	Fator de potência	Aumenta	4,81 a 25,38
Nominal	Rendimento	Diminui	0,13 a 9,20
	Corrente	Aumenta	3,25 a 16,46
	Fator de potência	Aumenta	0,58 a 7,99

TABELA 5.4 - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TENSÃO NO COMPORTAMENTO DO MOTOR (OPERAÇÃO DO MOTOR COM TENSÃO ABAIXO DA TENSÃO NOMINAL, 90% DE U_N)

Em conseqüência do aumento das perdas, é esperado uma elevação de temperatura do motor acima do especificado. Tem-se que alguns motores são projetados para suportar a variação de tensão por um curto período de tempo sem acarretar uma diminuição do tempo de vida útil.

5.3 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO ROTOR

O enrolamento do rotor pode ser do tipo enrolado ou gaiola. Durante a partida do motor, ou condição de rotor bloqueado, o rotor funciona como o secundário de um transformador curto-circuitado, e o enrolamento do estator, o enrolamento primário, submetendo-se a correntes elevadas, e ambos podem sofrer danos devido a elevação de temperatura. Por exemplo, em condições em que o rotor perde velocidade, chegando próximo às condições de rotor bloqueado, altas temperaturas podem ser alcançadas rapidamente. Esta

temperatura adicional poderá comprometer o rotor, danificando o material isolante do enrolamento do rotor, ou romper as barras de um rotor tipo gaiola.

Outra condição de elevação da temperatura do rotor, é quando são aplicadas tensões desbalanceadas, aparecendo correntes de seqüência negativa. Neste caso, a corrente de seqüência positiva não mudará substancialmente, e a corrente de seqüência negativa aparecerá devido ao desequilíbrio das tensões. Se, por um instante, tem-se a natureza do desequilíbrio por apresentar alguma fase sem tensão, a corrente de seqüência negativa terá valor igual e oposto à corrente de carga daquela fase. A combinação das correntes de seqüência positiva e negativa produz uma corrente teórica de aproximadamente de 170% da corrente normal de carga, conforme ilustra as figuras 5.2, 5.3, 5.4.

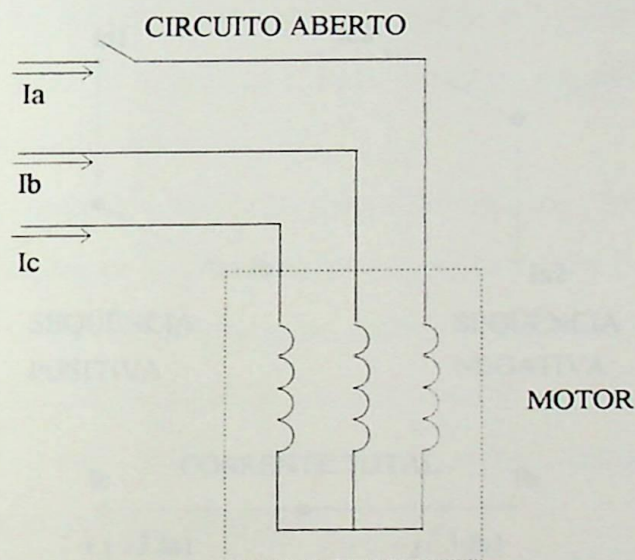


FIGURA 5.2 - CORRENTES NOS ENROLAMENTOS DO MOTOR COM UM CIRCUITO DE UMA FASE ABERTO

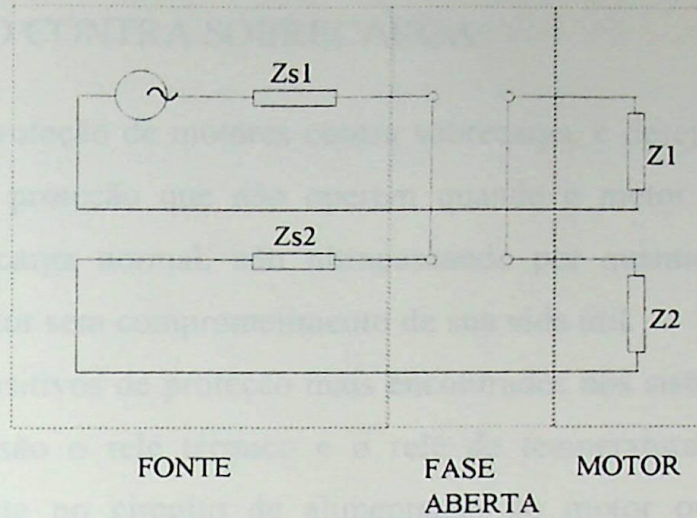
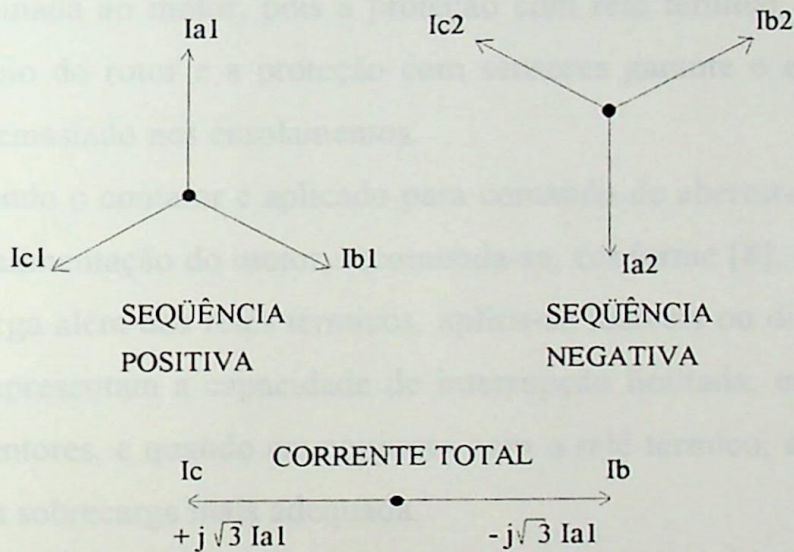


FIGURA 5.3 - CONEXÃO DA MALHA DE SEQÜÊNCIA PARA CONDIÇÃO DE FASE ABERTA



$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (\text{CIRCUITO ABERTO NA FASE - a})$$

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} = -j\sqrt{3} I_{a1}$$

$$I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} = +j\sqrt{3} I_{a1}$$

FIGURA 5.4 - CORRENTES DE SEQÜÊNCIA PARA CONDIÇÃO DE FASE ABERTA

5.4 - PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGA

Para a proteção de motores contra sobrecarga, é desejado a aplicação de dispositivos de proteção que não operem quando o motor esteja em uma condição de sobrecarga normal, não ultrapassando por quantidade e duração especificada ao motor sem comprometimento de sua vida útil.

Os dispositivos de proteção mais encontrados nos sistemas industriais contra sobrecarga são o relé térmico e o relé de temperatura. O primeiro é aplicado diretamente no circuito de alimentação do motor ou indiretamente quando ligado a transformadores de corrente. O segundo, ligado a sondas térmicas instaladas no motor, embutidos no enrolamento do estator [10].

A combinação de relé térmico com termostatos garantem uma proteção combinada ao motor, pois a proteção com relé térmico é eficiente em caso de bloqueio do rotor e a proteção com sensores garante o motor contra o aquecimento demasiado nos enrolamentos.

Quando o contator é aplicado para comando de abertura e fechamento do circuito de alimentação do motor, recomenda-se, conforme [8], que a proteção contra sobrecarga além dos relés térmicos, aplica-se fusíveis ou disjuntores, pois os contatores apresentam a capacidade de interrupção limitada, menores que os fusíveis e disjuntores, e quando em conjunto com o relé térmico, asseguram uma proteção contra sobrecarga mais adequada.

Os relés térmicos tipo bimetálicos, mais utilizados nas indústrias, são normalmente fabricados para suportar a corrente de sobrecarga durante o tempo de operação próprio, geralmente até dez vezes a sua corrente nominal. Para melhor apreciação da suportabilidade do relé, deve-se consultar o fabricante.

Como exemplo de alguns esquemas de proteção contra sobrecarga aplicados em motores de indução trifásicos, tem-se ilustrado na figura 5.3, alguns esquemas dos tipos de ligação, de acordo com os seguintes dispositivos de proteção:

- A - contator com relé térmico de sobrecarga;
 B - sondas térmicas de enrolamento com contator; e
 C - sondas térmicas de enrolamento e relé térmico de sobrecarga com contator.

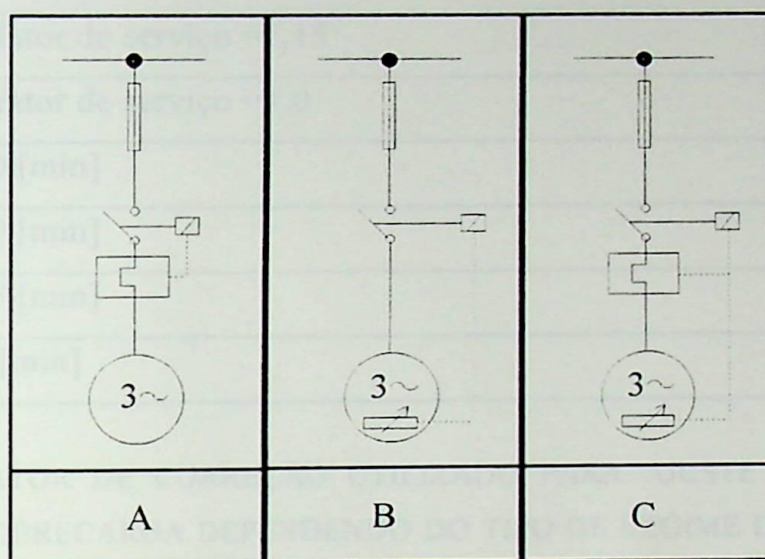


FIGURA 5.5 - ESQUEMAS DE LIGAÇÕES DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO APLICADOS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS.

A figura 5.6 indica como os termostatos (em número de 3 ou 6) são instalados entre os enrolamentos do estator do motor.

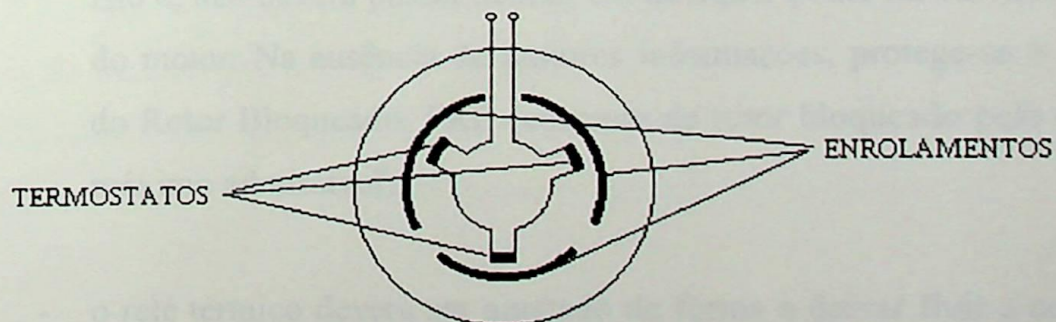


FIGURA 5.6 - INSTALAÇÃO DE TERMOSTATOS ENTRE OS ENROLAMENTOS DO ESTATOR.

Recomenda-se para o ajuste dos relés térmicos, conforme [1], a corrente de disparo de 115 % a 125 % (porcento) da corrente de plena carga do motor, multiplicado por um fator de correção mostrado na tabela 5.5.

Regime de Serviço	Fator de correção
Contínuo, com fator de serviço =1,15	1,0
Contínuo, com fator de serviço =1,0	0,9
Curto tempo, 60 [min]	0,8
Curto tempo, 30 [min]	0,75
Curto tempo, 15 [min]	0,7
Curto tempo, 5 [min]	0,6

TABELA 5.5 - FATOR DE CORREÇÃO UTILIZADO PARA AJUSTE DE RELÉS DE SOBRECARGA DEPENDENDO DO TIPO DE REGIME DE SERVIÇO DO MOTOR [1]

Ainda, deve-se levar em conta as seguintes condições de proteção, (acompanhar figura 5.7):

- a curva característica tempo x corrente do relé térmico utilizado para proteção contra sobrecarga, deve proteger a curva térmica do motor, isto é, não deverá passar acima, em qualquer ponto da curva térmica do motor. Na ausência de maiores informações, protege-se o Ponto do Rotor Bloqueado, PRB (corrente de rotor bloqueado pelo tempo máximo admissível);
- o relé térmico deverá ser ajustado de forma a deixar fluir a corrente de partida do motor, durante o tempo de partida.

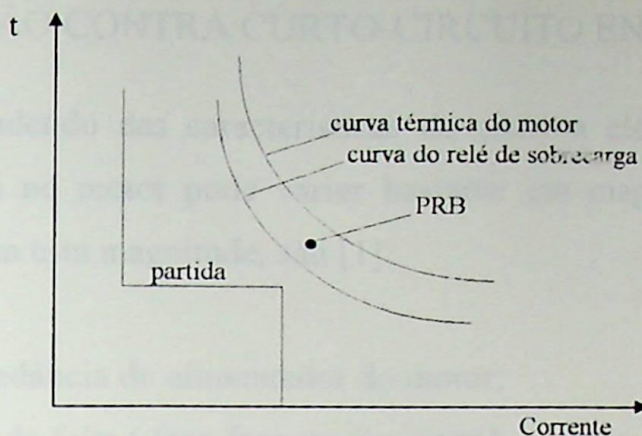


FIGURA 5.7 - CURVA CARACTERÍSTICA DO RELÉ DE SOBRECARGA

Ao contrário do relé térmico, o relé de temperatura avalia o comportamento térmico do motor diretamente em sua estrutura, ao invés de avaliar o comportamento térmico através da corrente que flui pelo motor, como é o caso do relé térmico.

O relé de temperatura é indicado somente a motores com potência superior a 1500 [HP] ([9] e [10]). As sondas térmicas ou termostatos são detetores térmicos compostos de um material cuja resistividade varia sensivelmente, acionando o circuito de comando do contator pelo crescimento da resistência do termostato, funcionando como um contato aberto.

A temperatura na qual o relé de temperatura deverá ser ajustado para operar ou dar o alarme dependerá da classe de isolamento do motor, mostrado na tabela 5.2, a ser protegido ou supervisionado para alarmes. Normalmente, ajusta-se o relé de temperatura para abrir o circuito na temperatura admissível da classe de isolamento do motor protegido [1], isto é, a maior temperatura do ponto mais quente que o motor admite sem que comprometa seu tempo de vida útil.

5.5 - PROTEÇÃO CONTRA CURTO-CIRCUITO ENTRE FASES

Dependendo das características do sistema elétrico ou do motor, a corrente de falta no motor pode variar bastante em magnitude. Os principais fatores que afetam esta magnitude, são [1]:

- a impedância do alimentador do motor;
- o tipo de falta (fase-fase ou fase-terra); e
- a localização da falta no enrolamento do motor.

A filosofia adotada para proteção de um motor, é retirar imediatamente o motor do sistema, onde o valor da corrente de falta no motor seja elevada, ou alarmar o defeito onde o valor da corrente de falta seja baixa. Como, por exemplo, quando aparece um curto-circuito próximo dos terminais do neutro do motor com os enrolamentos conectados em estrela.

Portanto, a proteção contra curto-circuito entre fases do motor é recomendado para qualquer aplicação na proteção de motores, aplicando-se dispositivos de proteção instantâneos ou temporizados, ou ambos.

Deve-se ainda observar o limite térmico admissível do motor e respeitar a coordenação da proteção entre os outros dispositivos de proteção do motor [8].

Na proteção de motores, pela combinação da proteção contra sobrecorrente das unidades instantânea e temporizada, tem-se que a unidade temporizada protegerá o motor desde o valor de ajuste da unidade temporizada até o valor do ajuste da unidade instantânea. O ajuste de corrente e da característica de tempo da unidade temporizada devem ser suficientes a não operar durante o tempo de partida do motor, o qual deve transcorrer por um tempo relativamente longo. Vide tabela 3.2 sobre aplicação de relés.

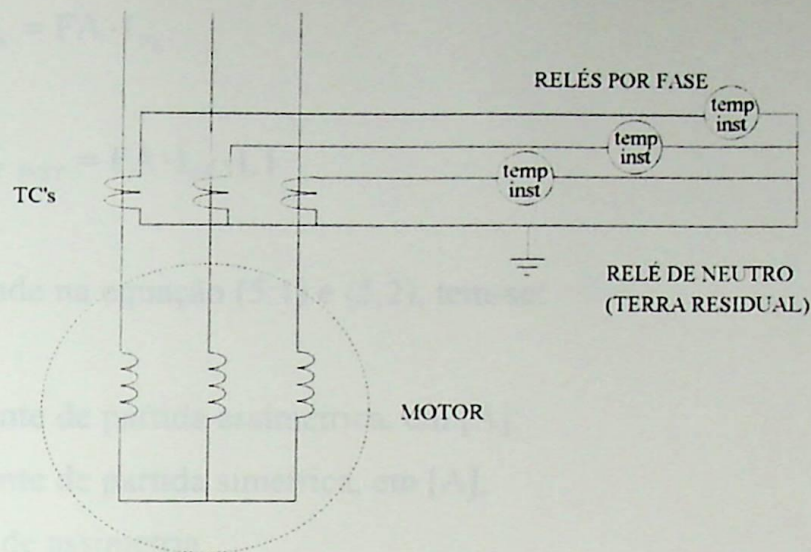


FIGURA 5.8 - PROTEÇÃO CONTRA CURTO-CIRCUITOS FASE-FASE UTILIZANDO RELÉS DE SOBRECORRENTE INSTANTÂNEO E TEMPORIZADO

Quando aplicados em conjunto com proteção contra sobrecarga, recomenda-se ajustar as unidades temporizadas, dependendo do tipo de motor, em uma faixa de 150 % até 175 % e 150 % até 300% da corrente nominal, respectivamente conforme [1] e [10], respeitando o tempo que o motor leva para partir e não ultrapassando os limites de suportabilidade térmica do motor (a curva térmica e o PRB).

Quando não se aplica proteção contra sobrecarga térmica em motores, recomenda-se que o ajuste dos relés de sobrecorrente temporizados sejam aproximadamente 125% da corrente nominal do motor [1].

Para o ajuste das unidades instantâneas, deve-se ajustar acima da corrente de partida assimétrica. Então, recomenda-se, conforme apresenta a equação (5.2), oriunda da equação (5.1), acrescentar em 10 % o valor da corrente de partida assimétrica como margem de segurança ([1] e [10]). Pode-se utilizar um ajuste adicional na faixa de 10 % e 25 % dependendo da tolerância do relé utilizado [1]. Se faltar informações do valor do fator de assimetria (FA) no alimentador do motor, recomenda-se adotar FA igual a 1,5 ou 1,6, respectivamente conforme [1] e [9].

$$I_{PA} = FA \cdot I_{PS} \quad (5.1)$$

$$I_{AJ\ INST} = FA \cdot I_{PS} \cdot 1,1 \quad (5.2)$$

Onde na equação (5.1) e (5.2), tem-se:

I_{PA} - corrente de partida assimétrica, em [A];

I_{PS} - corrente de partida simétrica, em [A];

FA - fator de assimetria

$I_{AJ\ INST}$ - corrente de ajuste do dispositivo de proteção instantâneo, em [A];

A filosofia na proteção de curto-circuito entre fases empregada em motores com potência acima de 1500 [HP], ou maior que a metade da potência do transformador que o alimenta, recomenda-se aplicar a proteção diferencial pela vantagem da rapidez e sensibilidade a correntes de falta no motor ([9] e [10]). Assim, evitam-se falsas operações do relé diferencial para curto-circuitos externos ou durante a partida do motor.

Qualquer que seja o tipo da proteção diferencial empregado, ainda se deve ter a proteção com relés de sobrecorrente como proteção de retaguarda ([1], [10] e [11]).

A proteção diferencial autobalanceada utiliza relés de sobrecorrente com unidade instantânea, ou com unidade temporizada com característica de tempo curto-inverso [1] ou tempo definido [12], alimentados por transformadores de corrente, conforme ilustra a figura 5.9.

Tem-se o mínimo ajuste de corrente quando a impedância de excitação do transformador de corrente e a impedância do relé se igualarem [1]. Nos relés de baixo consumo, assim como os relés estáticos, geralmente, utiliza-se o mais baixo ajuste no menor TAPE. Nos relés eletromecânicos, geralmente, não se consegue no menor TAPE.

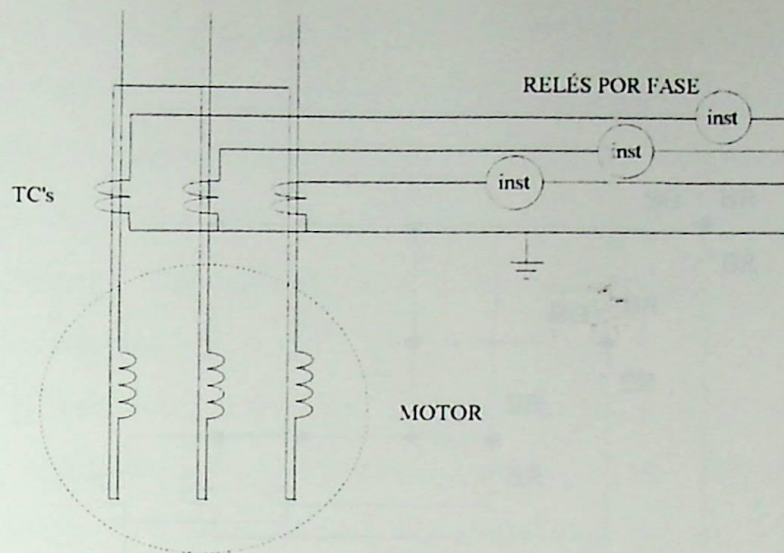


FIGURA 5.8 - PROTEÇÃO DIFERENCIAL AUTOBALANCEADA

A proteção diferencial autobalanceada oferece uma menor sensibilidade, e seu esquema é mais simples que a proteção percentual. Por isto, é preferencialmente mais utilizada, mas sua zona de proteção é restrita podendo requerer uma outra proteção para o cabo de alimentação do motor. Com a conexão percentual, a zona de proteção contra correntes de falta abrange os equipamentos contidos entre os transformadores de corrente em cada fase.

A figura 5.9 apresenta a ligação para uma proteção diferencial percentual, alocando três transformadores de corrente do lado de fase e outros três do lado de neutro.

Para o ajuste da proteção diferencial percentual, não se utiliza os mesmos passos para graduação de um relé de sobrecorrente. Para tal, tem-se o ajuste da declividade da relação percentual. Uma declividade percentual de 10% é geralmente utilizado, mas se não há um acoplamento substancial entre os transformadores de corrente, recomenda-se uma declividade percentual de 25% [1].

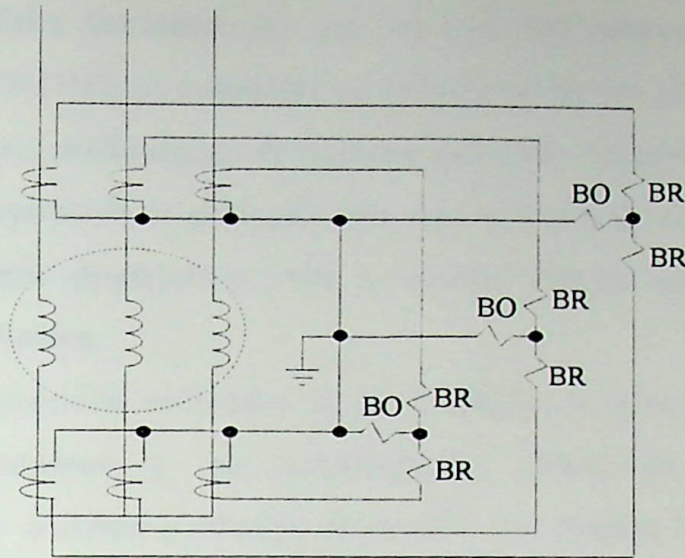


FIGURA 5.9 - PROTEÇÃO DIFERENCIAL PERCENTUAL

Na figura 5.9, tem-se:

BO - bobina de operação do relé diferencial.

BR - bobina de restrição do relé diferencial.

Caso seja utilizado relés de sobrecorrente temporizados numa proteção diferencial de um motor, recomenda-se que o valor da corrente de ajuste, para se obter uma determinada sensibilidade, deverá ser de 10 % a 20 % da corrente nominal do motor. A relação do transformador de corrente utilizado e o mínimo TAPE da corrente de ajuste do relé devem permitir o ajuste deste intervalo. Para a graduação da curva característica da temporização, deve-se escolher o tempo de 0,1 [s] [1].

5.6 - PROTEÇÃO CONTRA CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA

Quando em um sistema elétrico industrial, tem-se uma configuração de sistema aterrado, é recomendável utilizar na proteção de motores, dispositivos de proteção para detectar correntes de faltas para terra em motores até 1500 [HP],

se a corrente de falta for maior do que 10 [A]. Em motores com potências maiores do que 1500 [HP], se a corrente de falta for maior do que 5 [A] [10].

Assim, na configuração de sistema aterrado, recomenda-se verificar a coordenação do dispositivo de proteção aplicado na proteção de faltas à terra em motores, com outros dispositivos com a mesma função que proteja outros equipamentos do sistema.

Os dispositivos utilizados nesta proteção à terra são os relés de sobrecorrente instantâneo e, ou temporizados. Estes são conectados aos transformadores de corrente conforme ilustrados nas figuras 5.10 e 5.11. Seus esquemas de ligação são chamados, respectivamente, de conexão residual e conexão diferencial.

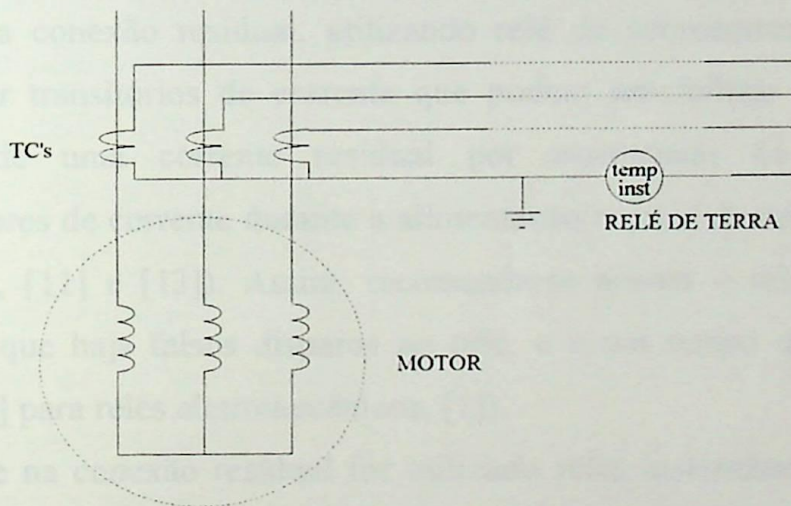


FIGURA 5.10 - PROTEÇÃO DE FALTA À TERRA TIPO DIFERENCIAL RESIDUAL [1]

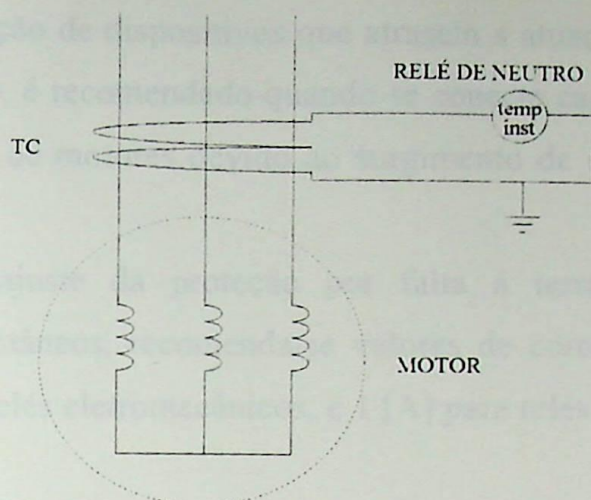


FIGURA 5.11- PROTEÇÃO DE FALTA À TERRA TIPO DIFERENCIAL COM TRANSFORMADOR DE CORRENTE TIPO JANELA [1]

Na conexão residual, utilizando relé de sobrecorrente temporizado, podem surgir transitórios de corrente que podem sensibilizar o relé devido a circulação de uma corrente residual por assimetrias na saturação dos transformadores de corrente durante a alimentação normal do motor (durante sua partida) ([1], [11] e [13]). Assim, recomenda-se ajustar o relé ao mais baixo TAPE, sem que haja falsos disparos no relé, e a um tempo de operação mais baixo (0,5 [s] para relés eletromecânicos, [1]).

Se na conexão residual for utilizado relés instantâneos, pode ocorrer atuação indevida do relé durante a partida do motor, ou ainda por uma corrente de retorno provocada por uma falta externa. Para tal situação, recomenda-se ajustar o TAPE do relé com valores altos, ou adicionando uma impedância em série com o relé diminuindo a corrente residual. Contudo, isto diminuirá a sensibilidade às correntes de faltas à terra.

A conexão diferencial utiliza um transformador de corrente tipo janela ao redor das três fases que alimentam o motor. Este arranjo permite que as correntes de seqüência positiva, negativa, incluindo a componente contínua, não sensibilizem o relé de sobrecorrente, a fim de que somente correntes de falta à terra apareçam no relé, isto é, correntes de seqüência zero.

A aplicação de dispositivos que atrasem a atuação do relé instantâneo por um curto tempo, é recomendado quando se conecta capacitores ou pára-raios junto aos terminais de motores devido ao surgimento de correntes de seqüência zero transitórias.

Para o ajuste da proteção por falta à terra utilizando relés de sobrecorrente instantâneos, recomenda-se valores de corrente primária na faixa de 4 a 12 [A] para relés eletromecânicos, e 1 [A] para relés mais sensíveis [1].

5.7 - PROTEÇÃO CONTRA DESBALANCEAMENTO DE FASE

O investimento em dispositivos de proteção contra tensões desbalanceadas ou perda de fase da alimentação recomendado à motores de indução com potência de 1000 [HP] e acima [10] e [15], podem garantir uma proteção a mais contra aquecimento indevido de motores, devido ao aparecimento de correntes de seqüência negativa como anteriormente analisado.

Relés de desbalanceamento de corrente de fase ou de corrente de seqüência negativa são relés utilizados quando as correntes polifásicas estão desbalanceadas ou contém componentes de corrente de seqüência negativa acima de uma quantidade requerida. Esta quantidade é ajustada para aproximadamente 15 % da corrente nominal do motor [1]. Um tempo de atraso pode ser exigido devido ao fato de que durante a partida do motor, correntes desbalanceadas podem surgir por causa de cargas desbalanceadas dos transformadores de corrente [1].

Relés de seqüência negativa são utilizados com unidades de sobrecorrente com característica de tempo de atuação instantâneo ou tempo inverso, com o mesmo valor de ajuste já definido anteriormente.

Na aplicação de relés de tensão de seqüência negativa, poderá surgir disparos indevidos do relé tirando o motor de operação. Principalmente, quando o motor é conectado a um barramento onde apareçam desbalanços provocados pela

cargas conectadas ao mesmo barramento [1]. Não é recomendado por [1] para proteção contra desbalanço de corrente de seqüência negativa.

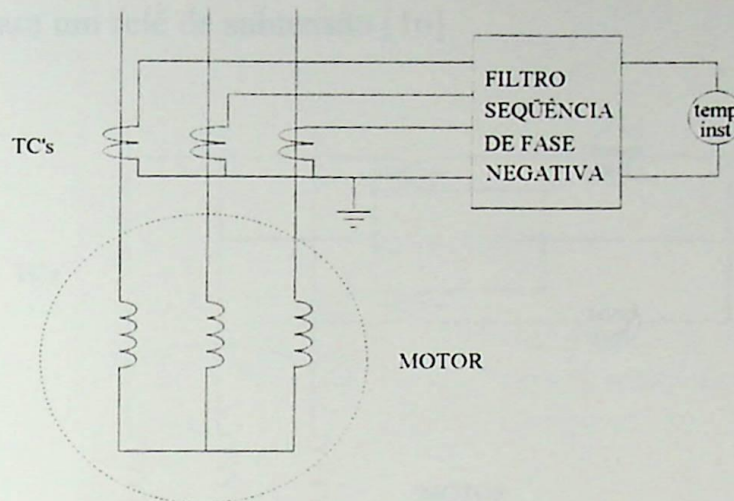


FIGURA 5.10 - PROTEÇÃO CONTRA CORRENTE DE SEQÜÊNCIA NEGATIVA.

5.8 - PROTEÇÃO CONTRA SUBTENSÃO

Casos em que o sistema perde a capacidade de geração temporariamente, ou onde a tensão de alimentação do motor atinge níveis baixos, é desejado a abertura dos disjuntores ou contadores do motor. A primeira situação justifica devido a volta da capacidade normal do sistema de geração, o sistema não seja sobrecarregado pela partida simultânea de todos os motores, e a segunda situação, de evitar dano térmico ao motor resultado da corrente excessiva pelas baixas tensões do sistema.

Deve-se ajustar o relé de subtensão a um valor de 80 % da tensão nominal de alimentação do motor, com a característica de tempo de disparo do relé sendo instantânea ou temporizada.

Para evitar disparos indesejados pela unidade instantânea, recomenda-se atrasar o disparo, normalmente, em 2 a 3 [s]. Para a unidade temporizada, que tem um tempo de atraso inversamente proporcional ao valor de subtensão, recomenda-se ter para o ajuste do tempo de disparo de 1,25 a 2 [s]. Estes tempos

são dados para que o sistema possa ter transitórios de subtensão e o motor não saia de operação. A figura 5.11 ilustra um esquema de ligação para proteção contra subtensão para motores. A figura 4.10 ilustra uma curva característica de tempo inverso para um relé de subtensão [16]

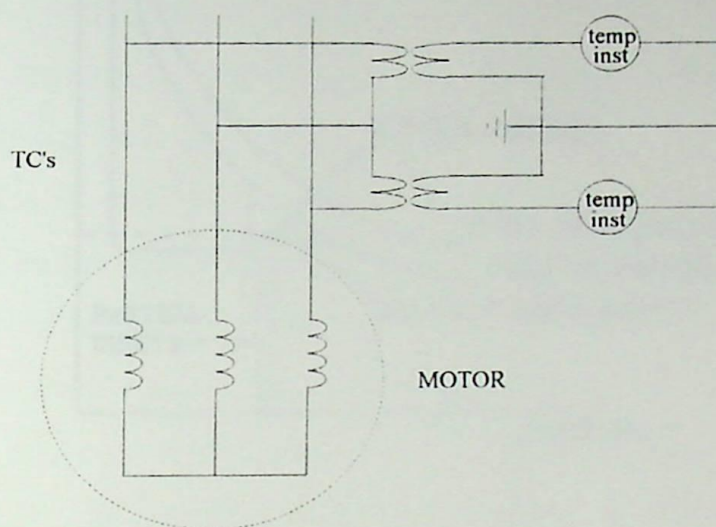


FIGURA 5.11 - PROTEÇÃO CONTRA SUBTENSÃO.

5.9 - PROTEÇÃO CONTRA PARTIDA PROLONGADA

Quando um motor é energizado e prolonga seu tempo de partida ou em condições de operação normal perde aceleração, causado por falhas provocadas pela carga, sistema mecânico ou sistema de alimentação do motor, é recomendado ter uma proteção contra partida prolongada. Isto evita que o motor sofra danos térmicos, provocados pela alta corrente, podendo ser equivalente à corrente de rotor bloqueado, que flui pelo estador do motor por um tempo maior que o tempo permissível a esta corrente sem sofrer danos.

Não é recomendado que as proteções de sobrecarga ou de sobrecorrente supervisionem este tipo de problema, visto que os ajustes podem ser altos, em função das condições de partida e, ou sobrecarga do motor, ou devido que estas proteções não assegurem correta proteção contra rotor bloqueado, tendo

um tempo de rotor bloqueado pequeno para o ajuste da proteção contra sobrecarga [10], ver figura 5.13.

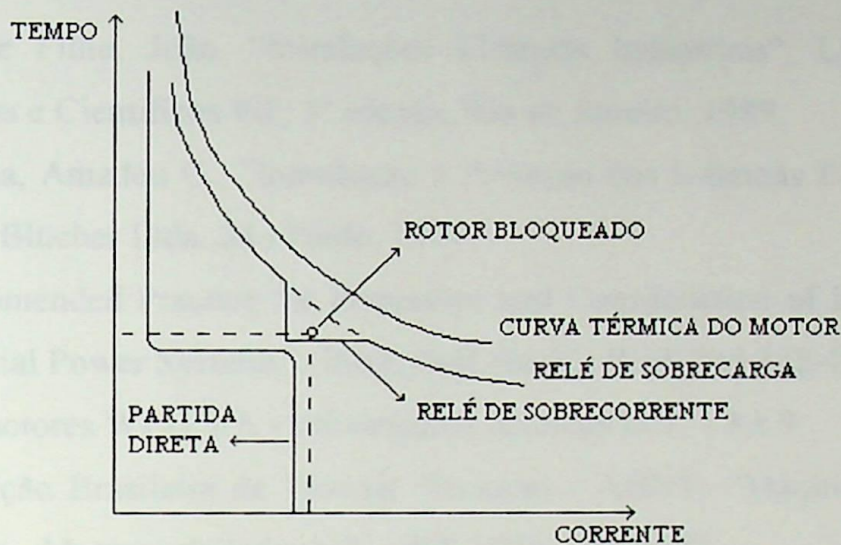


FIGURA 5.13 - PROTEÇÃO CONTRA PARTIDA PROLONGADA

Recomenda-se que se utilize nesta proteção, o relé de sobrecorrente com característica de tempo definido, ou dependendo da curva de partida e das condições de rotor bloqueado do motor, característica de tempo inverso.

Os ajustes desta proteção devem dar condições para partida normal do motor sem tirá-lo de operação. Assim, o tempo de ajuste do relé deverá ser graduado ligeiramente acima do tempo de partida, dando segurança ao motor [10].

5.10 BIBLIOGRAFIA

- [1] American National Standard IEEE - ANSI, "Guide for AC Motor Protection", C37.96 - 1975.
- [2] Mamede Filho, João, "Instalações Elétricas Industriais", LTC - Livros Técnicos e Científicos Ed., 3ª edição, Rio de Janeiro, 1989.
- [3] Caminha, Amadeu C., "Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos", Ed. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1977.
- [4] "Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems" (IEEE Buff Book), IEEE Std 242-1986.
- [5] Eletromotores WEG S/A - informações técnicas D.T. - 8 e 9.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, "Máquinas elétricas Girantes - Motores de Indução", NBR 7094, Dez/1981.
- [7] Cogo, João R.; Sá, Jocélio S. de; Simões, Nelson W. B.; Burgoa, Jaime A.; "Análise do Desempenho dos Motores Trifásicos Nacionais", Eletricidade Moderna, ano XXI, nº 227, Fevereiro 1993.
- [8] Rossi, Ronaldo, "Proteção de Sistemas Elétricos Industriais", Curso FUPAI - Fundação de Pesquisa e Acessoramento à Indústria.
- [9] Elmore, W. A., "Motor Protection", Applied Protective Relaying, Westinghouse Electric Corporation, Relay - Instrument Division, Newark, N.J. 07101, 1976.
- [10] INEPAR S/A Eletroeletrônica - "Proteção de Motores de Indução Trifásicos", set/93.
- [11] Lobosco, O. S., Dias, J. J. C., "Seleção e Aplicação de Motores Elétricos", Ed. McGraw Hill, Siemens S.A., São Paulo, 1988.
- [12] Madhava Rao, T. S., "Power System Protection Static Relays", Ed. McGraw-Hill Book Company, New Delhi, 1981.
- [13] Caminha, Amadeu C., "Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos", Ed. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1977.

- [14] Mello, F. P. de, "Proteção de Sistemas Elétricos de Potência", Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1979.
- [15] "Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems" (IEEE Buff Book), IEEE Std 242-1986.
- [16] INEPAR S.A., 'Relé de Subtensão - Linha "VU"', CAT. IN.3.13, Janeiro de 1987.

5.1 OBJETIVO

Este capítulo tem por objetivo apresentar o estado de arte em sistemas de aterramento e propor um critério para definir uma proteção adequada contra falhas à terra em sistemas de neutro praticamente isolado.

5.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Conforme [1], o método de aterramento de alta resistência tem apenas uma aplicação: 17,8 [kV] tem-se inscrito nos sistemas. Esse resultado é obtido quando se considera que os sistemas de alta resistência são projetados para evitar danos materiais de falha, permitindo assim a duração característica de isolamento de interrupções não-provistas.

Em sistemas isolados de aterramento de alta resistência em 17,8 [kV] agora requerem atenção especial para definir a zona de risco e assegurar a seletividade para estas falhas. Os relés para proteção de sobrecorrente e dispositivos de proteção de proteção para a terra, bem como relés de sensibilidade de 15 [A], exigiram um incremento da capacidade dos relés de falha à terra para três ou quatro vezes a corrente de fuga dos relés de proteção (10-20 A).

Este método de aterramento de alta resistência tem sido usado como um sistema de aterramento de alta resistência em sistemas de distribuição de energia elétrica. O método de aterramento de alta resistência de neutro é usado em sistemas de distribuição de energia elétrica de alta tensão em 17,8 [kV] e em sistemas de distribuição de energia elétrica de alta tensão em 33 [kV].

6. PROTEÇÃO CONTRA FALTAS FASE-TERRA

6.1 OBJETIVO

Este capítulo tem por objetivo apresentar o estado da arte em sistema de aterramento e propor um critério para efetuar uma proteção adequada contra faltas à terra em sistemas de neutro praticamente isolado.

6.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Conforme [1], o método de aterramento de alta resistência com apenas alerta em 13,8 [kV] tem-se mostrado sem sucesso. Como resultado, todas as aplicações de proteção conhecidas são do tipo híbrido, preparadas para atuar numa indicação de falta, perdendo assim a desejada característica de prevenção de interrupções não-previstas.

Estes sistemas híbridos de aterramento de alta resistência em 13,8 [kV] agora requerem atuação sensível para faltas à terra, de modo a assegurar a seletividade para estas faltas. Os esforços para utilizar os atualmente disponíveis e econômicos dispositivos de proteção falta à terra, com sua inerente sensibilidade de 15 [A], exigiram um incremento da magnitude das correntes de falta à terra para três ou quatro vezes a corrente devida aos efeitos capacitivos do sistema (60-80 A).

Este método de aterramento não deveria ser classificado como um sistema de aterramento de alta resistência. Na realidade, as características deste método são típicas de sistemas de aterramento de baixa resistência. Geralmente aterramentos de baixa resistência em 13,8 [kV] têm sido implementados a 400 [A], mas uma análise mais precisa torna viável 200 [A], dependendo do “lay-out” específico do sistema e das necessidades de proteção falta à terra. A aplicação para

uma unidade motor-transformador sozinha poderia ser adequadamente protegida por um aterramento de baixa resistência a 50 [A].

A afirmação de que 60 [A], em geral, deveria ser melhor do que 400 [A], é bastante discutível pelas seguintes razões:

- De um ponto de vista de danos por queima, uma extensa experiência com aterramento de 400 [A] provou que o dano por queima é menor. Enquanto que o dano ou queima a 60 [A] normalmente será menor (assumindo o mesmo tempo de eliminação da falta), o resultado líquido não é diferente. A seção do cabo com falta precisa ser substituída, e o motor com falta ou núcleo do transformador não é danificado.
- Do ponto de vista da proteção da falta terra do enrolamento da máquina, a filosofia geralmente aceita se baseia na proteção de 90% de um enrolamento conectado em estrela. A probabilidade de uma falta terra nos últimos 10% em direção do neutro é pequena, já que o isolamento terra é acentuado em apenas 10% da tensão normal fase-neutro, que é de 800 [V] em um sistema de 13800 [V]. Dada a sensibilidade instantânea do sensor terra geralmente disponível de 15 [A], pode-se deduzir que deve ser usado pelo menos um resistor de aterramento de 150 [A]. Um sistema aterrado de 60 [A] deixa uma zona não protegida de $(15/60) \times 100 = 25\%$ enquanto em um sistema aterrado de 400 [A], esta zona é de apenas $(15/400) \times 100 = 3,75\%$.
- Do ponto de vista de proteção do diferencial do gerador, uma falta terra de 60 [A] em um gerador, geralmente está abaixo da sensibilidade dos relés diferenciais do gerador. Dependendo das relações CT fase e carga, os relés diferenciais do gerador captarão em 60 a 200 [A]. Um resistor de 400 [A] protegerá de 85% a 50%, respectivamente, do enrolamento de um gerador. Pode-se argumentar que o CT e o relé no neutro do gerador podem ser ajustados com mais sensibilidade. Este argumento só é válido se houver apenas um resistor de aterramento no circuito de sequência zero e ignora o

fato de que o resistor CT e o relé devem fornecer apenas proteção de backup ou contra calamidades.

- De um ponto de vista de proteção de diferencial de barramento, o sistema aterrado de 60 [A] é igualmente deficiente pela razão de que os relés diferenciais de barramento tipicamente possuem sensibilidades que variam entre 75 e 200 [A].
- De um ponto de vista de proteção do diferencial do transformador, as sensibilidades do relé, conforme influenciadas por conexões de enrolamento e relações de tensão, geralmente estão bem acima de 800 [A] em transformadores industriais conectados em delta-estrela. Portanto, normalmente, oferece-se proteção especial para ajudar a assegurar que a proteção adequada contra falta terra seja mantida.

Pode-se concluir que em 13,8 [kV], o modo de aterramento de alta resistência, arranjado para disparar é inferior ao sistema aterrado convencional de baixa resistência onde a resistência é adequadamente selecionada para maximizar a proteção contra falta terra de todos os componentes do sistema. O sistema aterrado de alta resistência, *arranjado* para alarme, não deve ser considerado.

Conforme [2], o sistema aterrado de alta resistência é projetado para atender o critério $R_0 \leq X_{C0}$, onde X_{C0} é a reatância capacitiva à terra do sistema, por fase, de modo a limitar as sobretensões transitórias devidas ao arqueamento das faltas à terra.

A corrente de falta à terra é usualmente limitada a menos de 10 [A]. O sistema de aterramento de baixa resistência permite uma maior corrente de falta à terra (da ordem de 25 [A] até várias centenas de ampère) de modo a obter corrente suficiente para um funcionamento seletivo dos relés. Num sistema usual, o critério para limitação de sobretensões transitórias é $R_0/X_0 \geq 2$.

Conforme [3], o sistema de aterramento de alta resistência fornece as mesmas vantagens de sistemas isolados, e ainda limita as severas sobretensões

transitórias associadas a estes últimos. Os sistemas aterrados de alta resistência não exigem uma eliminação imediata da falta a terra, já que a corrente de falta tem um valor bem baixo (usualmente menor que 10 [A]). O valor ôhmico da resistência é da mesma ordem (ou menor) que a reatância capacitiva à terra total do sistema ($X_{C0}/3$), ou seja, a corrente de falta deve ser pelo menos igual à corrente total devida aos efeitos capacitivos do sistema.

Conforme [4], o aterramento de alta resistência é aplicado a um sistema gerador-transformador através da conexão de um resistor entre o secundário de um transformador de distribuição e o neutro aterrado de um gerador, conforme ilustra a figura 6.1. O valor do resistor é escolhido de modo que a perda em [kW] causada por uma falta fase-terra sólida no terminal da máquina seja igual ou maior que a perda em [kVA] por efeitos capacitivos do sistema de baixa tensão. Neste caso, a perda em [kVA] por efeitos capacitivos resulta da combinação das capacitâncias à terra dos enrolamentos do gerador, conexões de cabos ao transformador, enrolamentos de baixa tensão do transformador, etc. Este valor de resistência limitará a queima do gerador por faltas terra, amenizar oscilações e limitar o pico da sobretensão a cerca de 2,5 vezes ou menos a tensão fase-neutro normal.

Se a impedância do relé de sobretensão é muito elevada para a classe de tensão do sistema, os transformadores de potencial que estão sendo utilizados podem ficar sujeitos a ferroressonância. Neste caso, é preferível conectar o relé em paralelo com um resistor. A tabela 6.1 apresenta os valores típicos de resistor a serem colocados em paralelos com o relé de sobretensão de alta impedância.

Relação do transformador de potencial	Resistor (em ohms)
2400 para 120 [V]	250
4200 para 120 [V]	125
7200 para 120 [V]	90
14400 para 120 [V]	60

TABELA 6.1 – RESISTORES TÍPICOS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIAL [4]

6.3 OBTENÇÃO DO NEUTRO DO SISTEMA

Conforme [5], a melhor maneira de se obter o neutro do sistema para fins de aterramento em sistemas trifásicos é utilizar transformadores de alimentação ou geradores conectados em estrela. O neutro é então diretamente acessível. Tais transformadores são disponíveis para praticamente todas as tensões, exceto 240 [V]. Em sistemas novos, transformadores 208Y/120 [V] ou 480Y/277 [V] conectados em estrela podem ser usados com vantagem para 240 [V]. Transformadores de alimentação conectados em estrela para sistemas de 2400, 4160 e 13800 [V] são disponíveis como padrão, enquanto transformadores para 4800 e 6900 [V] conectados em estrela podem ser cotados como fabricação especial. A alternativa é o uso de transformadores de aterramento.

Os neutros de um sistema podem não ser acessíveis, o que ocorre particularmente em muitos sistemas antigos de 600 [V] ou menos e muitos sistemas atuais de 2400, 4800 e 6900 [V]. Quando sistemas conectados em delta já em funcionamento precisam ser aterrados, podem ser usados transformadores de aterramento para obtenção de um neutro. Transformadores de aterramento podem ser conectados tanto em zigue-zague como em T ou delta-estrela. Um tipo comumente usado de transformador de aterramento é um transformador trifásico em zigue-zague sem enrolamento secundário.

A potência aparente nominal de um transformador trifásico de aterramento (ou banco), em [kVA], é igual à tensão nominal fase-neutro em [kV] vezes a corrente nominal de neutro. A maioria dos transformadores são projetados para suportar esta corrente nominal por apenas um tempo limitado, como 10 [s] ou 1 [min]. Conseqüentemente eles são muito menores em tamanho que um transformador trifásico comum com a mesma corrente nominal fluindo continuamente.

6.4 RECOMENDAÇÕES GERAIS

Como regra geral é recomendável visando uma operação adequada do sistema que na ocorrência do curto-circuito fase-terra a parcela resistiva da corrente seja superior a parcela capacitiva resultante, ou seja :

$$I_R \geq 3I_0 \quad (5.1)$$

Onde, na expressão anterior I_0 corresponde a corrente de carga devido aos efeitos capacitivos (capacitâncias de buchas de transformadores; barramentos; cabos, etc). e I_R representa a corrente pelo resistor de aterramento durante a falta.

De modo geral, investigações recentes ([1] a [5]) recomendam que o aterramento através de resistores limitando a corrente de falta a terra para valores inferiores a 10 [A] deva ser aplicado a sistemas da classe de 5 [kV]. Na classe de 15 [kV], o valor de resistência deve propiciar uma corrente de falta a terra que sensibilize os relés instalados com esta finalidade. Tem sido uma prática comum a adoção de corrente de falta a terra em até 800 [A]. Atualmente, com relés eletrônicos bastantes sensíveis, pode-se admitir, em princípio, correntes menores.

Recomenda-se uma ampla análise visando uma definição mais segura para os sistemas de proteção ao nível de 13,8 [kV] para as correntes de falta e de falta a terra. Destaca-se que o tempo de parada em sistemas com resistores de aterramento elevado (alta resistência) apresentam uma dificuldade grande para a seletividade e o risco de danos dos equipamentos e, principalmente, pessoal é maior, visto que a fuga de corrente à terra nem sempre propiciará a operação segura dos relés.

Para sistemas elétricos que apresentam uma grande probabilidade de ocorrência de falhas de isolamento nos equipamentos elétricos (transformadores, cabos, isoladores, etc.) durante faltas à terra, recomenda-se os seguintes procedimentos:

- a - Adotar uma corrente de falta a terra limitada em cada resistor durante a operação paralela em 15 [A] e portanto, pode-se utilizar os sistemas de aterramento com 3 (três) transformadores monofásicos de 75 [kVA]; 13,8/0,345 [kV], os quais serão conectados em estrela aterrada nos lados primários e em delta aberto nos correspondentes secundários;
- b - Instalar relés de sobretensão nas configurações de proteção de falta à terra com TP's em delta aberto com ajustes adequados para, no caso de abertura dos resistores ou mesmo de faltas a terra existir uma supervisão e controle de retaguarda com ação em até no máximo dois segundos retirando-se os geradores e/ou transformadores de operação para reduzir o nível de curto-circuito e permitir a manobra dos disjuntores;
- c - Instalar TC's adequados para a proteção de fase;
- d - Instalar disjuntores adequados, nunca fusíveis, para os alimentadores dos sistemas de aterramento;
- e - Instalar pára-raios adequados para proteção contra surtos de curta duração.

Em recomendações para proteção para faltas à terra, aplica-se as seguintes filosofias:

A - PROTEÇÃO DO RESISTOR INSTALADO NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR DE ATERRAMENTO

O resistor deverá ser protegido por um relé térmico tripolar com corrente de ajuste com valor disponível para 600 [A] na média. O relé térmico tripolar deverá ter três pólos ligados em paralelo, para permitir uma corrente da ordem de 200 [A] através do resistor, deverá portanto ser ajustado em 200 [A]. Em 600 [A] este relé irá desligar o resistor em aproximadamente 10 [seg].

B - PROTEÇÃO DE FASE DO TRANSFORMADOR DO RESISTOR DE ATERRAMENTO.

Para exemplificar considere a figura 6.1 como um sistema típico. Deve-se instalar, ao nível de 13,8 [kV], três relés de sobrecorrente instantâneo e temporizado de fase (função 50/51) e um temporizado de falta à terra (função 51 GS) para a proteção do transformador de aterramento e sinalização com os ajustes relacionados nas tabelas 6.2 e 6.3 a seguir.

LOCAL	FUNÇÃO 50			FUNÇÃO 51		
	I [A]	T [Seg]	AÇÃO	I [A]	T [Seg]	AÇÃO
AT1	30,00	4,00	Abertura AT1	10,00	9,00	Abertura AT1
AT2	30,00	4,00	Abertura AT2	10,00	9,00	Abertura AT2

TABELA 6.2 - AJUSTES DOS RELÉS DE FASE DOS TRANSFORMADORES DE ATERRAMENTO

LOCAL	FUNÇÃO 50 GS			FUNÇÃO 51 GS		
	I [A]	T [Seg]	AÇÃO	I [A]	T [Seg]	AÇÃO
AT1	30,00	4,00	Abertura AT1	8,00	9,00	Abertura AT1
AT2	30,00	4,00	Abertura AT2	8,00	9,00	Abertura AT2

TABELA 6.3 - AJUSTES DOS RELÉS DE FASE-TERRA DOS TRANSFORMADORES DE ATERRAMENTO

C - ALIMENTADORES PRINCIPAIS

Em função da parcela capacitiva das correntes de falta a terra os alimentadores de saída providos com relés 50 GS conectados a transformador de corrente de núcleo toroidal deverão ser ajustados para operar com 30 [A] em 0,0 [seg] enquanto os relés 51GS, com 8,00 [A] em 0,4 [seg] (correntes de linha).

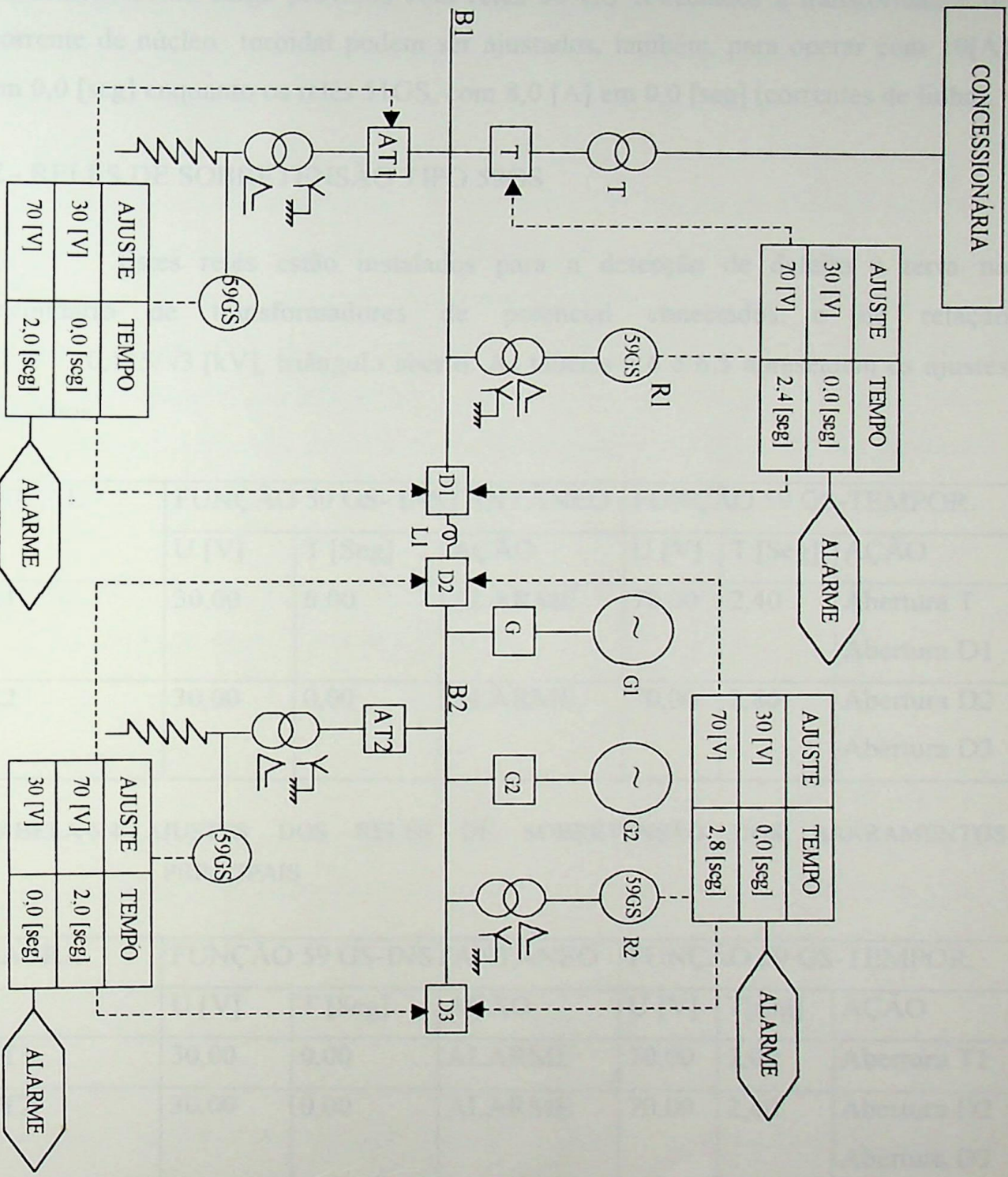


FIGURA 6.1 - SISTEMA ELÉTRICO TÍPICO

D - ALIMENTADORES DE CARGAS

Em função da parcela capacitiva das correntes de falta a terra os alimentadores de carga providos com relés 50 GS conectados a transformador de corrente de núcleo toroidal podem ser ajustados, também, para operar com 10[A] em 0,0 [seg] enquanto os relés 51GS, com 8,0 [A] em 0,0 [seg] (correntes de linha).

E - RELÉS DE SOBRETENSÃO TIPO 59GS

Estes relés estão instalados para a detecção de defeito à terra no secundário de transformadores de potencial conectados e de relação $13,8/\sqrt{3}:0,115/\sqrt{3}$ [kV], triângulo aberto. As tabelas 6.4 e 6.5 apresentam os ajustes previstos.

LOCAL	FUNÇÃO 59 GS- INSTANTÂNEO			FUNÇÃO 59 GS-TEMPOR.		
	U [V]	T [Seg]	AÇÃO	U [V]	T [Seg]	AÇÃO
R1	30,00	0,00	ALARME	70,00	2,40	Abertura T Abertura D1
R2	30,00	0,00	ALARME	70,00	2,80	Abertura D2 Abertura D3

TABELA 6.4 - AJUSTES DOS RELÉS DE SOBRETENSÃO DOS BARRAMENTOS PRINCIPAIS

BARRA	FUNÇÃO 59 GS-INSTANTÂNEO			FUNÇÃO 59 GS-TEMPOR.		
	U [V]	T [Seg]	AÇÃO	U [V]	T[seg]	AÇÃO
AT1	30,00	0,00	ALARME	70,00	2,00	Abertura T1
AT2	30,00	0,00	ALARME	70,00	2,40	Abertura D2 Abertura D3

TABELA 6.5 - AJUSTES DOS RELÉS DE SOBRETENSÃO DOS SECUNDÁRIOS DOS TRANSFORMADORES DE ATERRAMENTO

Relativamente as barras B1 e B2 os detalhes dos ajustes de sobretensões levaram em conta a seguinte filosofia de proteção:

- a - Os transformadores de potencial instalados nos barramentos ao nível de 13,8 [kV] devem ter seus relés de sobretensão atuando após ter decorrido o tempo previsto nos itens “C” e “D” acrescidos de no mínimo 400 [mseg] (portanto com temporização mínima de 0,8 [seg]), e deverão dar o comando de abertura do paralelismo no D1. O subsistema que estiver em falta irá manter o relé 59 GS atuado, e portanto, deverá retirar a fonte correspondente a partir de 0,8 [seg]. Assim, o comando de desligamento devido a uma falta fase - terra para o disjuntor T (transformador T) deverá estar atrasado em pelo menos 0,4 [seg] daquele correspondente a abertura do paralelismo (D1). Para a barra B2 com 0,4 [seg] após abertura do T, deve ocorrer o desligamento nos geradores G1 e G2.
- b - Notar que o relé de sobretensão conectado na barra B2 para a falta no B1 voltará a sua condição normal quando a D1 abrir.

6.5 REFERÊNCIAS

- [1] DUNKI-JACOBS; J.R.; The Reality of High-Resistance Grounding. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol IA-13, no 5, Sept/Oct 1977, pp 473.
- [2] IEEE Std 142-1982, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, (IEEE Green Book) (ANSI) pp 18.
- [3] IEEE Std 141-1986, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, (IEEE Red Book) (ANSI) pp 347.
- [4] Applied Protective Relaying, *Westinghouse Electric Corporation* 1979, pp 11-7/8
- [5] IEEE Std 142-1991, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, (IEEE Green Book) (ANSI) pp 28-30.

7. CONCLUSÃO

A análise da referência da sistemática utilizada na proteção de motores de indução trifásicos e transformadores, torna-se mais relevante, quando se considera as limitações impostas pelo caráter acadêmico, com que foi desenvolvido este trabalho.

O desenvolvimento desta sistemática na arte da proteção em sistemas elétricos industriais torna possível o conhecimento os principais tipos de esquemas de proteção para motores e transformadores, onde tem-se as recomendações das graduações que visa manter integridade pessoal e elétrica pela qualidade da seletividade nos dispositivos de proteção perante uma falta.

Pelas informações obtidas, promoveu-se, também, uma análise das correntes de curto-circuito em sistemas elétricos, que monitorada pela graduação aplicada aos dispositivos de proteção, objetiva a eliminação destas faltas sem interferir no desempenho operacional do sistema industrial.

A aplicação do programa desenvolvido, na análise das proteções de motores e transformadores, utilizando a sistemática proposta, torna possível a uma breve averiguação da proteção durante a fase preliminar de um estudo de proteção. Também, para fins teóricos, tem-se a explanação dos conhecimentos da arte da proteção.

O desenvolvimento do programa e da sistemática adotada foi aplicada em dois grandes sistemas industriais, onde foi verificado seu desempenho pelas graduações das proteções como proposto neste trabalho.

O apêndice A apresenta o fluxograma do programa desenvolvido, onde as rotinas são descritas nos capítulos desta dissertação. Assim, pode-se desenvolver este programa, ou outros programas a partir da filosofia adotada neste trabalho.

APÊNDICE A

A - SISTEMA "POR UNIDADE" [PU]

Em estudos de sistemas elétricos, é usual utilizar valores por unidade ([pu]), para expressar números, facilitando sua comparação com outros valores. Através da equação (2.1), pode-se representar um número em relação a um outro número base.

$$[pu] = \frac{\text{Numero}}{\text{Numero base}} \quad (2.1)$$

Para o entendimento do sistema por unidade, considere a tabela 2.2. Nota-se que o número da primeira coluna pode ser representada em qualquer outro número base, conforme mostram a segunda e terceira colunas da tabela 2.2.

Número	Valor em [pu] na base 560	Valor em [pu] na base 95
95	0,17	1,00
123	0,22	1,30
560	1,00	5,9
2053	3,66	21,60

TABELA 2.2 - EXEMPLO DE SISTEMA "PU"

Nota-se na tabela 2.2 que o número 560 expresso na base 560, é representado pelo valor um, pois o número base é também chamado de valor unitário, uma vez que no sistema por unidade ele tem o valor um ou unidade.

Para um outro exemplo, considera-se que a tensão em regime contínuo de um motor seja 2300 [V], e durante a partida, 2020 [V]. Adotando como base a tensão do regime contínuo (2300 [V]), tem-se a tensão durante a partida de 0,88 [pu] do regime contínuo, conforme é mostrado abaixo:

$$\frac{2020}{2300} = 0,88$$

Os números também podem ser expressos em por cento de um número base qualquer, conforme mostra a equação (2.2).

$$\% = \frac{\text{Numero}}{\text{Numero base}} \times 100 \quad (2.2)$$

Das equações (2.1) e (2.2), tem-se a equação (2.3).

$$[\text{pu}] = \frac{\%}{100} \quad \text{ou} \quad \% = [\text{pu}] \times 100 \quad (2.3)$$

Na prática, na análise de um sistema elétrico, adota-se apenas tensões base e potência base. Para obter as correntes base e impedâncias base do sistema, utiliza-se as equações (2.3) e (2.4) para sistemas trifásicos.

$$I_{\text{BASE}} = \frac{S_{\text{BASE}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{BASE}}} \quad (2.4)$$

$$Z_{\text{BASE}} = \frac{U_{\text{BASE}}^2}{S_{\text{BASE}}} \quad (2.5)$$

onde nas equações (2.4) e (2.5), tem-se:

S_{BASE} - potência base, em [VA];

U_{BASE} - tensão base, em [V];

I_{BASE} - corrente base, em [A];

Z_{BASE} - impedância base, em [Ω].

Assim, pode-se obter os valores de tensão, corrente, impedância, potência expressos em valores base do sistema, conforme equações mostram as equações (2.5), (2.6), (2.7) e (2.8).

$$S_{PU} = \frac{S}{S_{BASE}} \quad (2.5)$$

$$U_{PU} = \frac{U}{U_{BASE}} \quad (2.6)$$

$$I_{PU} = \frac{I}{I_{BASE}} \quad (2.7)$$

$$Z_{PU} = \frac{Z}{Z_{BASE}} \quad (2.8)$$

Os componentes de um sistema elétrico, normalmente, apresentam seus valores de impedância expressos em [pu] com relação à sua própria base, ou seja, sua potência e tensão nominais. Assim, é necessário corrigir estes valores para a base adotada para a análise do sistema, o que é conseguido através da equação (2.9).

$$Z_{PU(NB)} = Z_{PU(BA)} \cdot \left[\frac{U_{BASE(BA)}}{U_{BASE(NB)}} \right]^2 \cdot \frac{S_{BASE(NB)}}{S_{BASE(BA)}} \quad (2.9)$$

onde na equação (2.9), tem-se:

2.1 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Alvarez, Alberto C., "Introducción al Analisis Transitorio de Sistemas Electricos de Potencia, D.E.B.A. - Dirección de la Energía de La Provincia de Buenos Aires", 1ª edição, La Plata, Argentina, 1977.
- [2] Ramos, Dorel S., Dias, Eduardo M., "Sistemas Elétricos de Potência -Regime Permanente", Editora Guanabara Dois, Volume 1, 1982.
- [3] Lazar, Irwin, "Electrical Systems Analysis and Desing for Industrial Plants", McGraw-Hill Book Company, New York, 1980.
- [4] Abirached, Abalen I., "Coordenação da Proteção dos Sistemas Elétricos Industriais", Curso Técnico da MPM - Treinamento e Consultoria, e GE Brasil - Disjuntores.



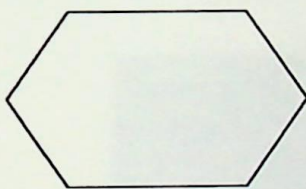
APÊNDICE B

B - ESTRUTURA DO PROGRAMA

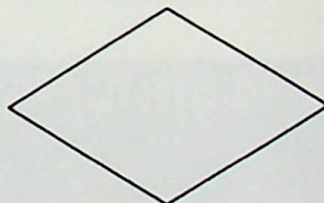
O programa é estruturado para armazenar os dados de um sistema elétrico, conforme descrito no capítulo 2, e sugerir uma recomendação para um sistema de proteção contra sobrecorrente. Tem-se a seguir, estruturas básicas do programa em forma de fluxogramas, exposto de tal maneira que possa ser analisado e desenvolvido em outros ramos da arte da proteção.

B.1 - SIMBOLOGIA

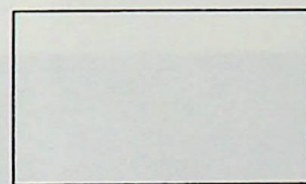
Preparação



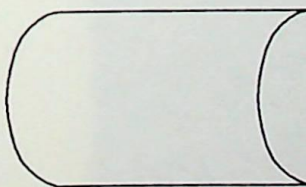
Decisão



Processo



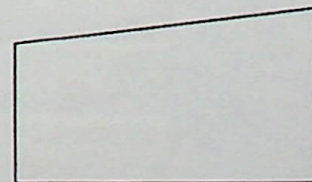
Dados armazenados



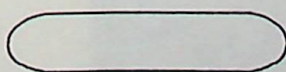
Mesclar Caminhos



Entrada de Dados



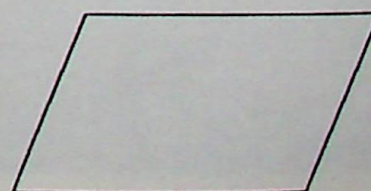
Início/Término



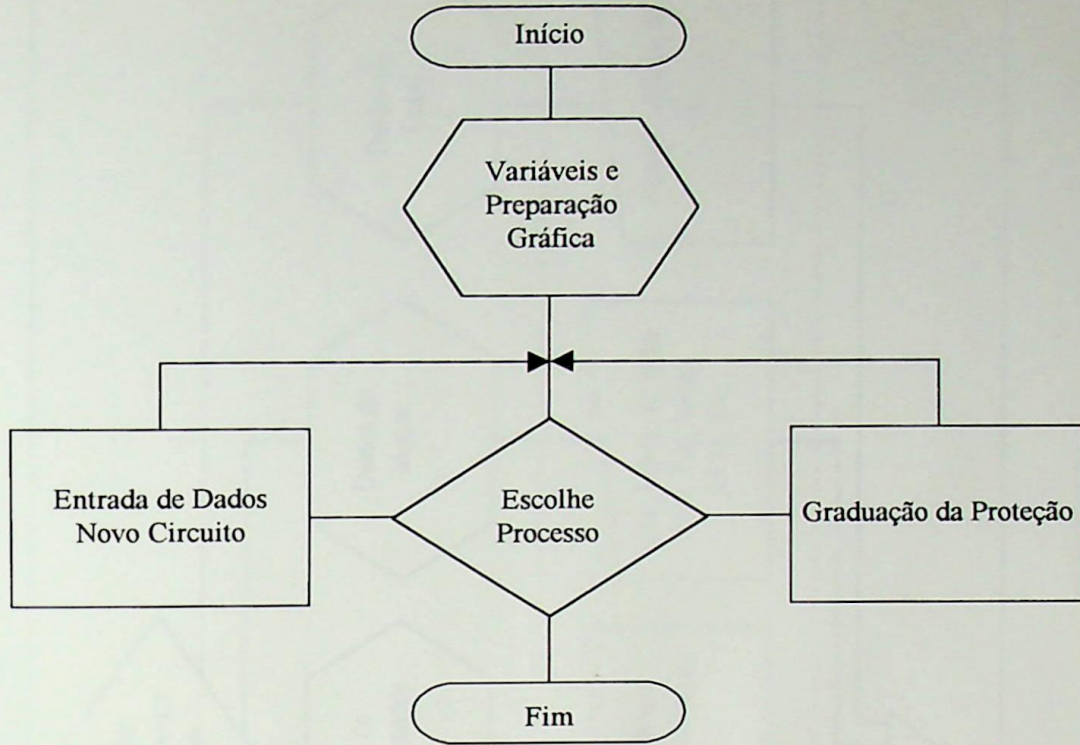
Apresentação



Dados



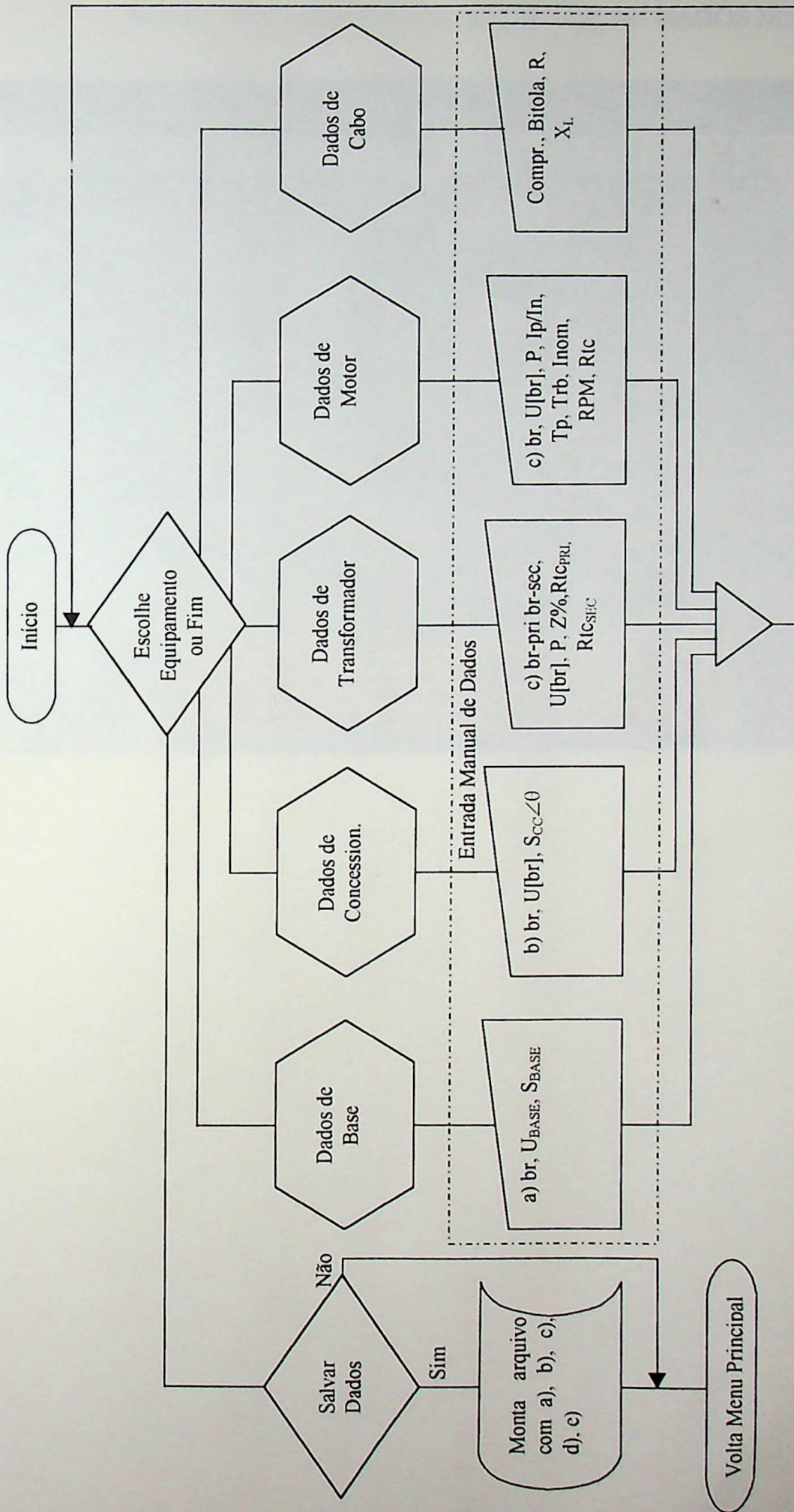
B.2 – SUBROTINA : MENU PRINCIPAL



B.1.1 – TELA PRINCIPAL : MENU PRINCIPAL



B.3 - SUBROTINA : ENTRADA DE DADOS DE UM NOVO CIRCUITO



B.3.1 - TELA EXEMPLO : ENTRADA DE DADOS DO MOTOR

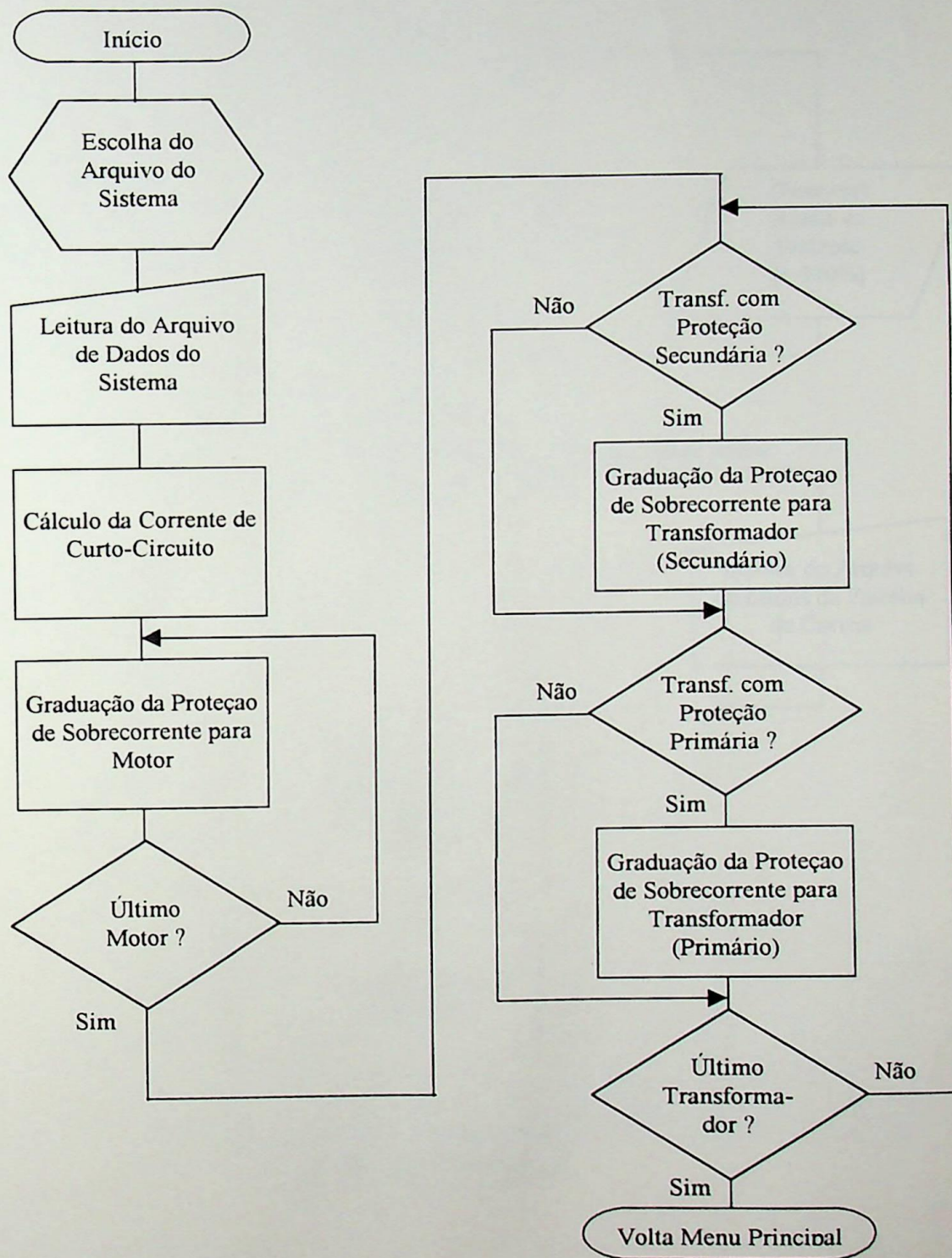
Entrada de Dados do Sistema Elétrico

Valores de Base Motor de Indução Transformador Cabo Concessionária

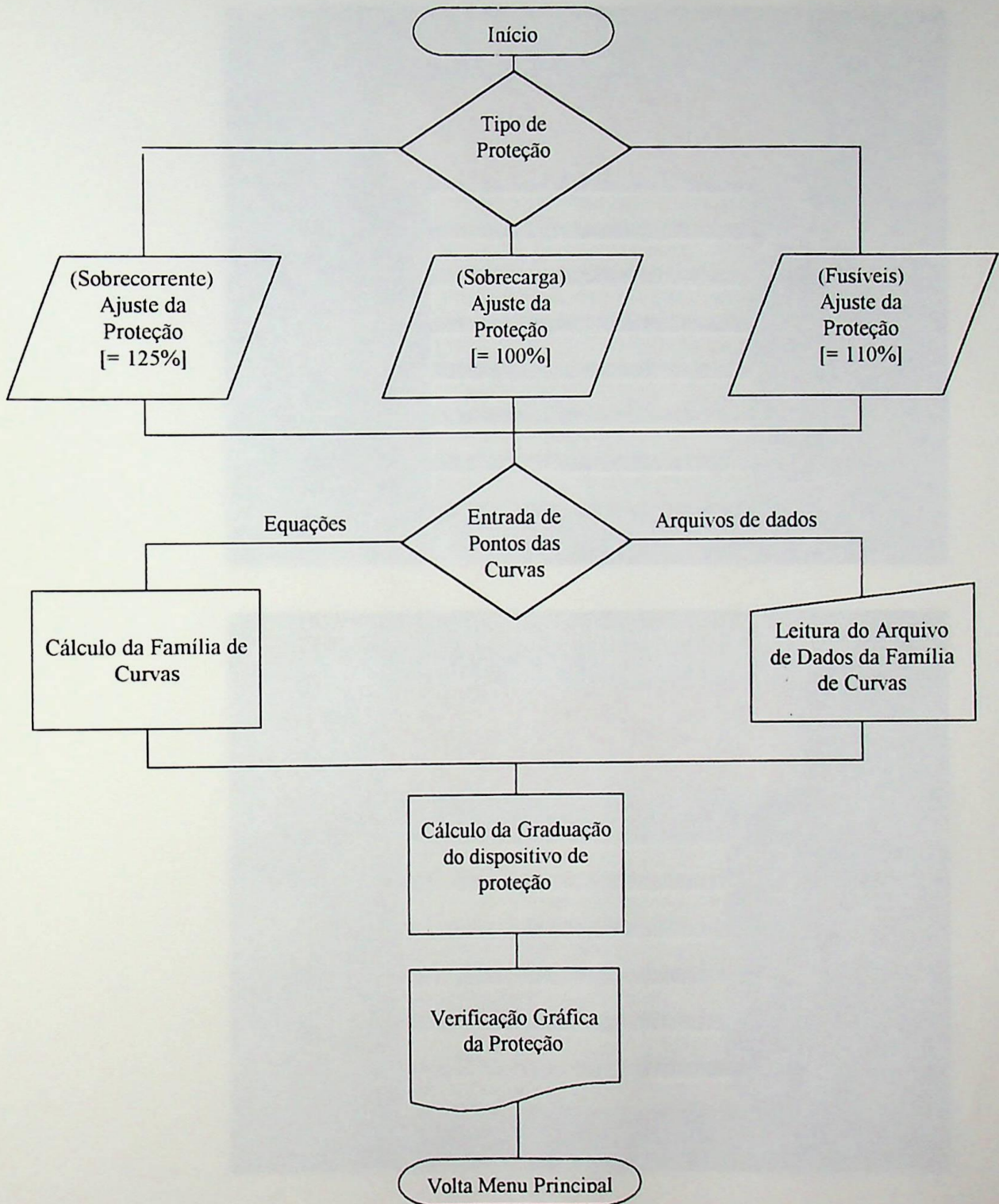
MOTOR No. 1	
Barra conectada n.	0.000
Tensão [KV]	0.000
Potência [hp]	0.000
Ip/In	0.000
Tempo de Partida [s]	0.000
Tempo de Rotor Bloqueado [s]	0.000
Corrente nominal [A]	0.000
R.P.M.	0.000
Relação T.C.	0.000

ENTER ←↑↓ Move Acima/Abaixo Entrada de Valores
BACKSPACE Apaga Valor
F10 Confirma e Vai Menu Principal
ESC Não Confirma e Vai Menu Principal

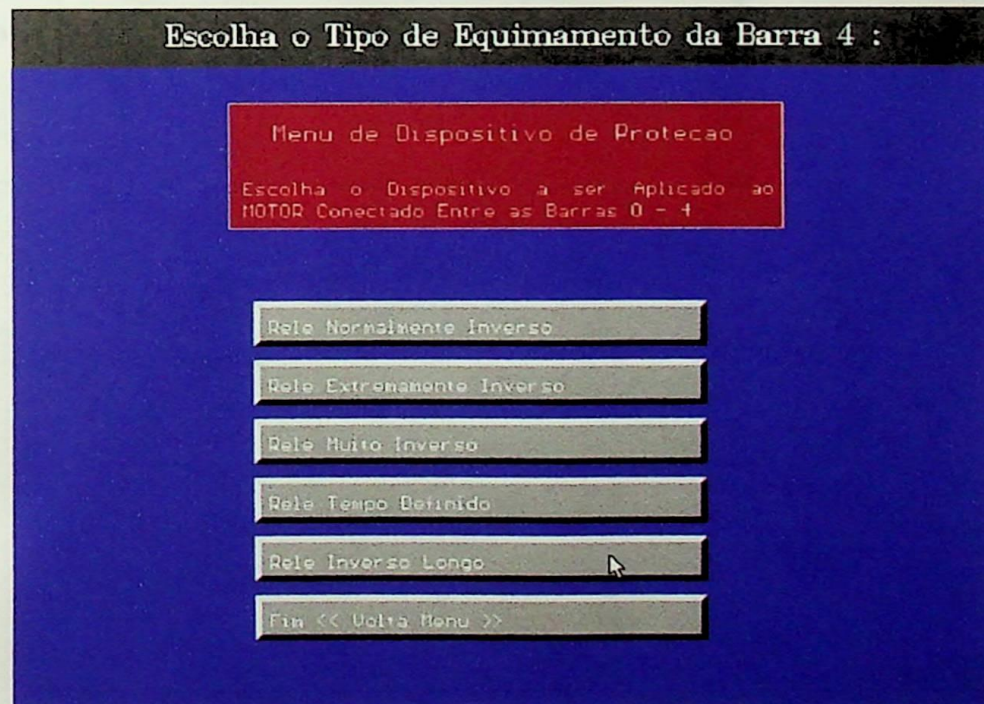
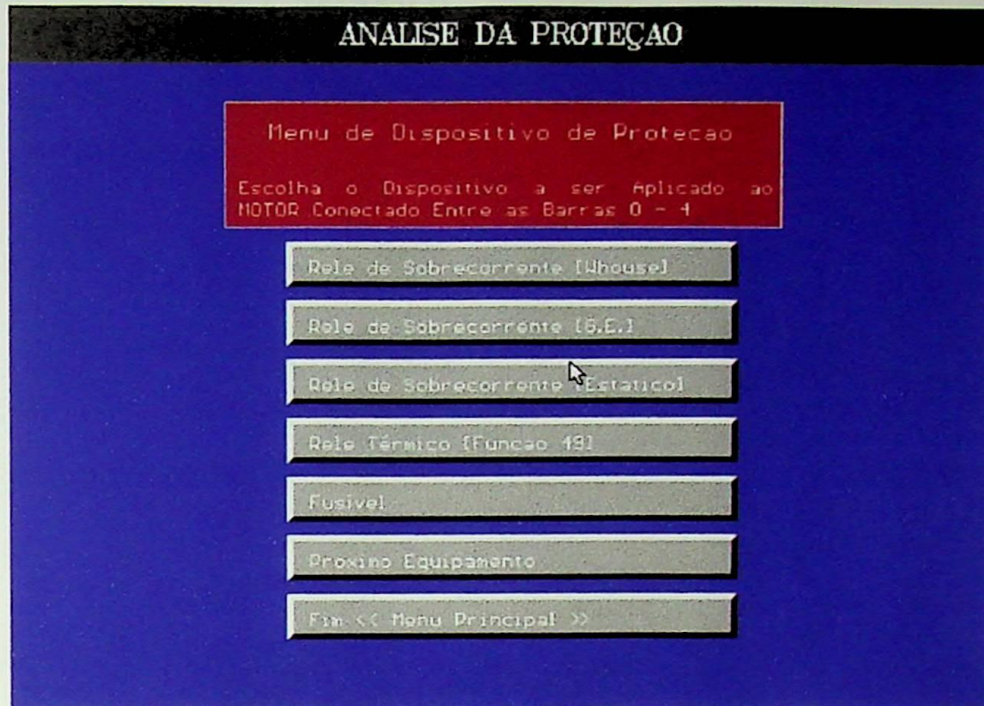
B.4 - SUBROTINA : GRADUAÇÃO DA PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO



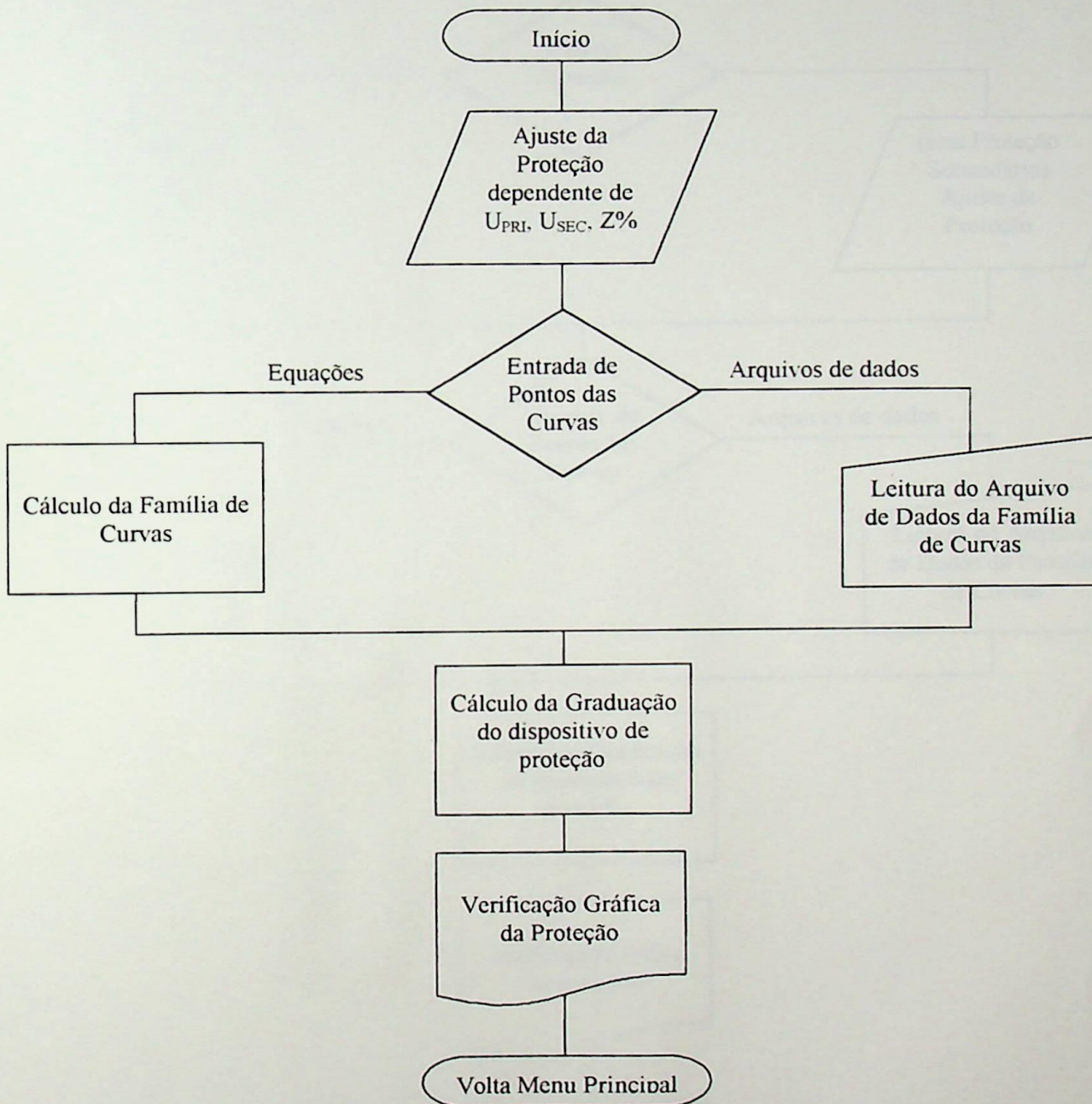
B.5 - SUBROTINA : GRADUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA MOTOR



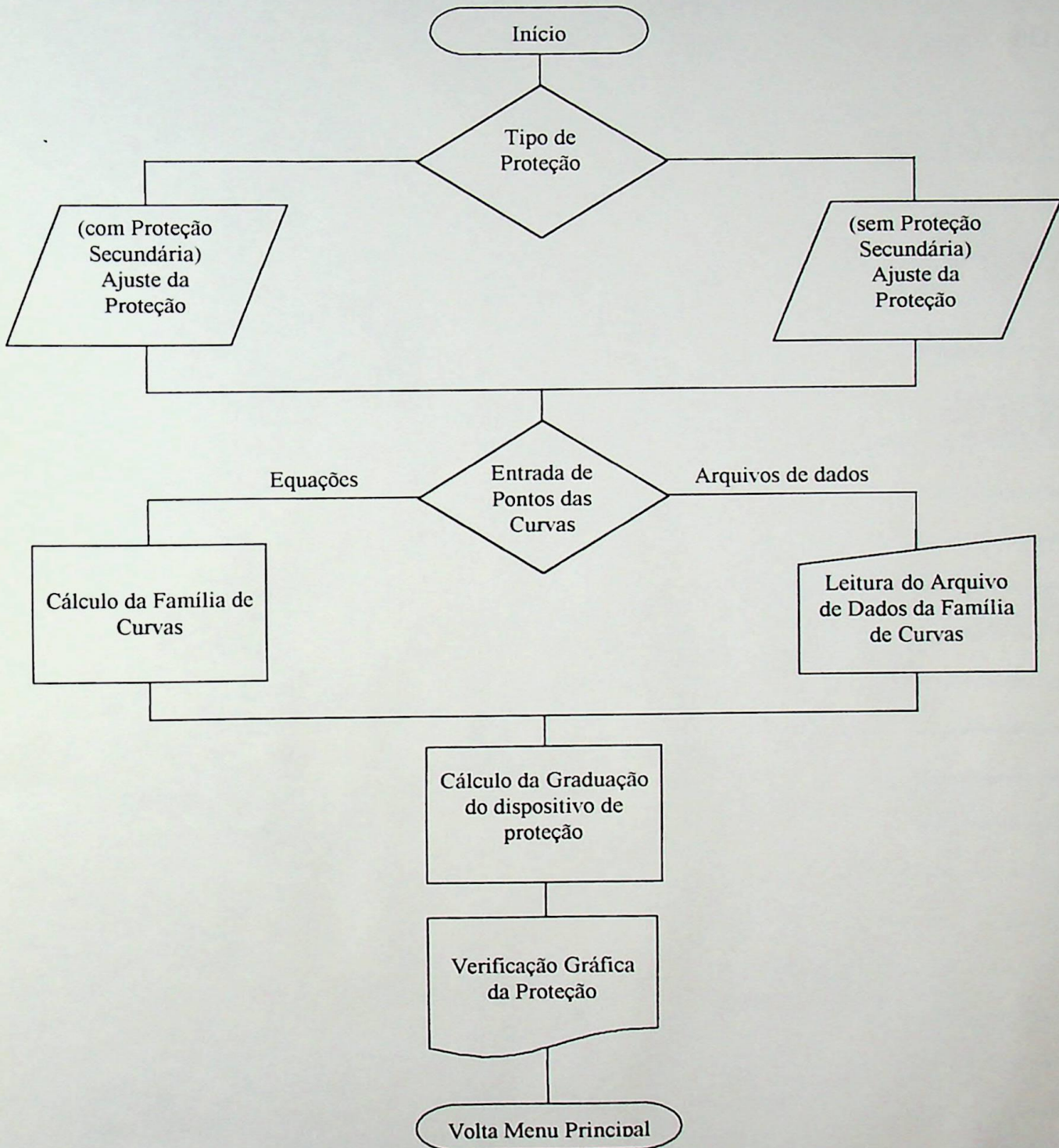
B.5.1 – TELA EXEMPLO : ESCOLHA DO DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO (MOTOR OU TRANSFORMADOR)



B.6 - SUBROTINA : GRADUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA TRANSFORMADOR (SECUNDÁRIO)



B.7 - SUBROTINA : GRADUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA TRANSFORMADOR (PRIMÁRIO)



B.8 - TELA EXEMPLO : VERIFICAÇÃO GRÁFICA DA COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO - PROTEÇÃO PARA MOTOR (MAIOR CARGA) E TRANSFORMADOR

