



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

Referência do tema: 2022ELEPD01

Tema:

**Protecção diferencial de um novo transformador de
potência na subestação eléctrica da Matola**

Discente:

Titoce, Eliseu Isaias

Supervisor:

Da UEM: Eng. Hélder Nhambe
Da empresa: Eng. Salomão Cuna

Maputo, julho de 2022



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

Referência do tema: 2022ELEPD01

Tema:

**Protecção diferencial de um transformador de
potência na subestação eléctrica da Matola**

Discente:

Titoce, Eliseu Isaias

Supervisor:

Da UEM: Eng. Hélder Nhambe
Da empresa: Eng. Salomão Cuna

Maputo, julho de 2022

ANEXO 8.
TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA _____

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante _____
entregou no dia ___/___/20__ as --- cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a
referência: _____
intitulado: _____

Maputo, ____ de _____ de 20__

O Chefe de Secretaria



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA _____

FI - GUIA DE AVALIAÇÃO DO RELATÓRIO ESCRITO

Nome do estudante: _____

Referência do tema: _____ Data: ___/___/___

Título do tema:

1. Resumo					
1.1. Apresentação dos pontos chaves no resumo (clareza, organização, correlação com o apresentado)	1	2	3	4	5
Secção 1 subtotal (max: 5)					

2. Organização (estrutura) e explanação										
2.1. Objectivos	1	2	3	4	5					
2.2. Introdução, antecedentes e pesquisa bibliográfica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2.3. Metodologias	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2.4. Resultados, sua análise e discussão	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2.5. Conclusões e aplicação dos resultados (recomendações)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Secção 2 subtotal(max: 45)										

3. Argumentação										
3.1. Criatividade e originalidade	1	2	3	4	5					
3.2. Rigor	1	2	3	4	5					
3.3. Análise crítica, evidência e lógica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3.4. Relação objectivos/ métodos/ resultados/conclusões	1	2	3	4	5					
3.5. Relevância	1	2	3	4	5					
Secção 3 subtotal(max: 30)										

4. Apresentação e estilo da escrita					
4.1. Legibilidade e organização	1	2	3	4	5
4.2. Ilustração e qualidade das figuras e tabelas	1	2	3	4	5
4.3. Estilo da escrita (fluência do texto, uso da língua e gramática)	1	2	3	4	5
4.4. Fontes bibliográficas (citação correcta, referências, etc)	1	2	3	4	5
Secção 4 subtotal(max: 20)					

Total de pontos (max: 100) _____

Nota (=Total*0,2) _____

Nota: Quando exista a componente gráfica (desenhos técnicos), a nota acima é multiplicada por 0,8 cabendo os restantes 20% do peso à referida parte gráfica.



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA _____

FICHA DE AVALIAÇÃO DA ATITUDE DO ESTUDANTE
(Auxiliar para o supervisor)

Nome do estudante: _____

Referência do tema: _____ Data: ___/___/___

Título do tema: _____

Indicador	Classificação				
	1	2	3	4	5
Atitude geral (manteve uma disposição positiva e sentido de humor)	1	2	3	4	5
Dedicação e comprometimento (Deu grande prioridade ao projecto e aceitou as responsabilidades prontamente)	1	2	3	4	5
Independência (realizou as tarefas independentemente, como prometido e a tempo)	1	2	3	4	5
Iniciativa (viu o que devia ter sido feito e fê-lo sem hesitar e sem pressões do supervisor)	1	2	3	4	5
Flexibilidade (disponibilidade para se adaptar e estabelecer compromissos)	1	2	3	4	5
Sensibilidade (ouviu e tentou compreender as opiniões dos outros)	1	2	3	4	5
Criatividade (contribuiu com imaginação e novas ideias)	1	2	3	4	5
Total de pontos (max: 35)					

Valor do classificador	Cotação obtida	Significado
	1	Não aceitável (0 a 9 valores)
	2	Suficiente (10 a 13 valores)
	3	Bom (14 a 16 valores)
	4	Muito Bom (17 a 18 valores)
	5	Excelente (19 a 20 valores)

Total de pontos (max: 35)

Nota (=Total*20/35)

Declaração de honra

Declaro que este relatório de estágio profissional nunca foi apresentado para obtenção de qualquer grau ou num outro âmbito e que ela constitui o resultado do meu labor individual.

Resumo

O transformador de potência é o principal componente de uma subestação eléctrica, sendo de extrema importância protegê-lo contra todo tipo de defeitos interno ou externo que possam ocorrer. O projecto têm como principal foco garantir a protecção diferencial a um transformador abaixador de 160MVA 275/66KV na subestação eléctrica da Matola. Apresenta as principais protecções internas num transformador de potência, com ênfase aos relés a gás e pressão e o relé Buchholz, analisa o funcionamento dos transformadores de instrumentais (transformadores de potencial e de corrente), e sua aplicação na medição e protecção de equipamentos do sistema eléctrico. Avalia as condições de operação do relé diferencial sob influência de manobras e operações no sistema eléctrico que introduzem erros na actuação do relé diferencial 87, identificando métodos para eliminar ou atenuar sua influência, dimensionou-se os TCs empregues no relé diferencial, seleccionando-se TCs com razões de 400/5 e 2400/5, determinou-se o desvio percentual do relé 87 e escolheu-se a curva de operação, com uma declividade de 20%. E fez-se a escolha do equipamento, seleccionando-se os TCs, Modelo: CA-300 Para o lado da alta tensão 275kV do transformador, Modelo: CXG-72 Para o lado da Media tensão 66kV do transformador, e o relé diferencial digital Modelo: SEL-787, estes são os equipamentos propostos a ser empregue no projecto.

Índice

1	Introdução.....	12
1.1	Formulação do problema	13
1.2	Justificativa.....	13
1.3	Metodologia.....	13
1.4	Objectivos.....	13
1.4.1	Objectivo geral.....	13
1.4.2	Objectivos específicos.....	13
1.5	Localização	14
2	Resumo teórico.....	15
2.1	Transformadores eléctricos	15
2.1.1	Constituição do transformador	15
2.1.2	Comparação entre transformador ideal e real.....	17
2.1.3	Transformador real.....	17
2.1.4	Referindo o transformador ao primário.....	18
2.2	Protecção de Transformadores eléctricos de potência	19
2.3	Principais relés de Protecção contra defeitos internos de um transformador	20
2.3.1	Relé de pressão	21
2.3.2	Relé de detenção de gases	22
2.3.3	Relé de Buchholz	22
2.3.4	Protecção contra sobrecarga	24
2.4	Transformador para instrumentos	24
2.4.1	O transformador de potencial (TPs)	25
2.4.2	O transformador de corrente (TCs)	26
2.5	Relé diferencial.....	27
2.6	Relé diferencial comum.....	28
2.6.1	Defeito fora da zona protegida.....	28
2.6.2	Defeito dentro da zona protegida.....	29
2.7	Relé diferencial percentual	30
2.7.1	Operação normal do sistema eléctrico ou defeito fora da zona protegida.....	31
2.7.2	Defeito interno na zona de protecção	31
2.8	Ajuste de declividade (<i>slope</i>).....	34

2.9	Ajuste do valor inicial ou "pick-up" do relé.....	34
2.10	Protecção diferencial de transformadores de potência	36
2.11	Protecção diferencial no transformador monofásico	36
2.12	Protecção diferencial de transformador trifásico $\Delta - Y$	37
2.13	Regras de ligação dos TCs nos transformadores trifásicos.....	38
2.13.1	No geral:	38
2.13.2	Em transformadores com deslocamento angular de $0^\circ(Y-Y, \Delta-\Delta, \Delta-z)$	38
2.13.3	Transformador $\Delta - Y$	39
2.14	Ajuste do relé diferencial percentual na protecção do transformador	40
2.15	Condições que causam erros de operação do relé diferencial.....	42
2.16	Saturação de TCs	43
2.17	Sobre-excitação do transformador	44
2.18	Energização solidaria (<i>sympathetic inrush</i>)	44
2.19	Relé diferencial com retenção por harmónicas	45
2.20	Relé diferencial digital	47
3	Descrição do problema	48
3.1	Determinação das correntes nominais do primário e do secundário:.....	49
3.2	Dimensionamento dos TCs:	49
3.3	Corrente do secundário dos TCs:.....	49
3.4	Erro induzido na comparação das correntes de chegada ao relé:.....	49
3.5	Escolha dos TAPS	50
3.6	Ajuste de declividade	50
3.7	Equipamento seleccionado.....	51
3.7.1	Modelo do relé seleccionado.....	51
3.7.2	Modelo de TCs seleccionados	51
4	Resultados.....	53
5	Conclusão.....	54
6	Referência bibliográfica.....	55

Índice de figuras

Figura 1. Princípio de funcionamento de um transformador, (autor).....	15
Figura 2. Coínstituentes de um transformador de potência, (catalogo de transformadores de potência e reatores de derivação,1999).....	15
Figura 3. Circuito equivalente, (José Dores Costa,2010);.....	17
Figura 4. Modelo de um transformador real, (José Dores Costa,2010);.....	17
Figura 5.Modelo do transformador reduzido ao primário.....	19
Figura 6.relé Buchholz constituição.....	23
Figura 7. Relé de imagem termica com bolbo sensor de temperatura, (Geraldo_Kinderman, 2005). 24	
Figura 8.Representação esquemática para TP e TC (J.Duncan glover, Mulukutla S, Thomas J. ;2008)	25
Figura 9.Transformador de potencial 230kV (João Mamede Filho, 2007).....	25
Figura 10.TC de classe 230Kv e Detalhes construtivos de um TC (João Mamede Filho, 2007).....	26
Figura 11.Princípio de protecção diferencial, (autor).....	27
Figura 12.Protecção diferencial comum na operação normal do sistema eléctrico, (Geraldo_Kinderman, 2005)......	28
Figura 13.defeito fora da zona de protegida, (Geraldo_Kinderman, 2005)......	28
Figura 14.defeito dentro da zona protegida, (Geraldo_Kinderman, 2005)......	29
Figura 15.esquema de protecção diferencial percentual, (Geraldo_Kinderman, 2005)......	30
Figura 16.defeito interno no relé diferencial percentual,(Geraldo_Kinderman, 2005)......	31
Figura 17.Relé diferencial percentual (87) (Geraldo_Kinderman, 2005)......	32
Figura 18.Curvas de operação do relé diferencial percentual (João Mamede Filho, 2007). .	34
Figura 19.Zona de atuação do relé diferencial percentual em forma de gravata (Geraldo_Kinderman, 2005)......	35
Figura 20.Esquema de protecção diferencial no transformador monofásico (Geraldo Kinderman, 2005).....	36
Figura 21.Conexão genérica dos TCs ao transformador trifásico (Geraldo_Kinderman, 2005).	38
Figura 22.Transformador Y-Y com deslocamento angular de 0° , (Geraldo_Kinderman, 2005).	39
Figura 23.Ligações dos TCs no transformador Δ -Y(Geraldo_Kinderman, 2005).....	40
Figura 24.TAPS do relé 87 (Geraldo Kinderman, 2005).....	41
Figura 25.Forma típica da corrente de energização (IEEE37,91, 2008).....	42
Figura 26. Forma de onda das correntes primarias e secundarias de um TC Saturado (OLIVEIRA, 2013.)......	43
Figura 27.de excitação de um transformador sobre-excitado (HARLOW,2007).....	44
Figura 28.Esquematisação do fenómeno de energização solidaria (PHADKE,2008).....	45
Figura 29.Relé diferencial com retenção por harmónicas, (Geraldo_Kinderman, 2005)......	46
Figura 30. protecção de transformador com base ao rele digital e outos (adaptado).....	48
Figura 31. Esquema de ligação dos TCs no transformador em estudo (autor).....	48
Figure 32. Diagrama esquemático da protecção diferencial com relé auxiliar de bloqueio de religamento função 86.....	51

Lista de símbolos

ω	- Velocidade angular em rad/s
f	- Frequência em Hz
X_m	- Reactância de magnetização do núcleo
R_{fe}	- Perdas no núcleo
R_1, R_2	- Perdas ôhmicas nos enrolamentos
X_1, X_2	- Reactância de dispersão de fluxo
I_p	- Corrente do primário do transformador
I_s	- Corrente do secundário do transformador
$I's, R'2, X'2d$	- Parâmetros do secundário referenciado ao primário do transformador
τ	- Torque
ϕ	- Valor instantâneo do fluxo magnético
K	- Efeito da mola dos relés.
P	-percentagem diferencial
M	-múltiplo de corrente
E	- Erros intrínsecos a operação do relé diferencial 87

Lista de abreviaturas

<i>Trip</i>	- Sinal de para actuação do disjuntor
TCs	- Transformadores de Corrente
TPs	- Transformadores de potencial
ANSI	- <i>American National Standards Institute</i>
EDM	- Eletricidade de Moçambique
SEL	- <i>SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES</i>
UL	- <i>Underwriters laboratories</i>

1 Introdução

O transformador é uma máquina estática totalmente fechada e geralmente imersa em óleo, Portanto dificilmente dá-se a ocorrência de falhas neles, embora a ocorrência de falhas sejam raras, o efeito de uma falha pode ser muito grave para o transformador de potência. Cujos seu reparo ou substituição implica gastos elevados e um longo tempo de interrupção ao fornecimento, por estas razões é necessário garantir a protecção do transformador de potência contra possíveis falhas que possam ocorrer.

As falhas que podem ocorrer num transformador de potência podem ser classificadas em dois principais tipos, as falhas externas, que deveriam ser detectadas e eliminadas pelo sistema de reles fora do transformador no menor tempo possível, de modo a evitar qualquer perigo ao transformador devido a estas falhas. E falhas internas, cuja protecção deve ser garantida pelo sistema de protecção diferencial. Que é um sistema de protecção concebida para detectar e isolar as falhas internas, evitando a perda total do equipamento e garantindo a possibilidade de fazer-se a manutenção corretiva do equipamento.

A protecção diferencial é feita por meio do relé diferencial (87), que realiza a protecção de um equipamento, a sua lógica de funcionamento baseia-se no princípio de comparação de corrente eléctrica de entrada e saída de um equipamento, e se esta diferença for superior ao ajuste da protecção, o equipamento ou dispositivo é considerado estar sob condições de falta e medidas devem ser adotados por esta protecção. Porém a protecção diferencial pode actuar de forma indevida devido a influência de condições atípicas como energização do transformador, faltas externas, sobre-excitação e de saturação de TC (Transformador de Corrente) que podem gerar sinais de abertura para o disjuntor de protecção “*trip*” incorrecta.

Neste projecto pretende-se garantir a protecção diferencial no novo transformador de 160MVA 275/66kV, num projeto de emergência da EDM, na subestação eléctrica da Matola.

1.1 Formulação do problema

De modo a garantir um fornecimento de qualidade e garantir fiabilidade no fornecimento de energia eléctrica, é preciso garantir a protecção adequada dos equipamentos eléctricos, os transformadores eléctricos de potência são o principal elemento de uma subestação, é o elemento que possibilita a elevação da tensão para níveis de transporte e também a sua redução para níveis de distribuição, Neste projecto Pretende-se garantir a protecção diferencial de um novo transformador abaixador de 160MVA 275/66kV na subestação eléctrica da Matola.

1.2 Justificativa

Os transformadores de potência são equipamentos que precisam de manutenção e cuidados especiais, devido a sua importância para o sistema eléctrico. A protecção com relés adequados são condições básicas para a operação de um transformador. De modo a Prolongar a sua vida útil, os relés diferenciais comparam as correntes no primário e secundário do transformador a um ajuste já estabelecido no caso de uma falta interna o relé deverá garantir a actuação dos disjuntores de modo a garantir protecção ao equipamento.

1.3 Metodologia

Os métodos a serem empregues para a realização deste projecto irão consistir em estudos de revisão bibliográfica, métodos analíticos e quantitativos, uso de manuais e catálogos de fabricantes, pesquisas em paginas oficiais da Internet, por pesquisas em fonte orais e observação crítica de eventos relacionados a assuntos do projecto e observação.

1.4 Objectivos

1.4.1 Objectivo geral

- Realizar a protecção do novo transformador de potência com recurso ao relé diferencial.

1.4.2 Objectivos específicos

- Determinar os parâmetros dos TCs e os ajustes necessários ao relé diferencial 87 usados para protecção do transformador empregue no projecto ;
- Estudar a operação de um relé diferencial;

- Analisar situações especiais que provocam a actuação indesejada do relé diferencial

1.5 Localização

O projecto será realizado na província de Maputo, Matola na Subestação eléctrica da Matola.

2 Resumo teórico

2.1 Transformadores elétricos

O transformador elétrico é uma máquina elétrica estática, que utiliza o acoplamento eletromagnético entre enrolamentos do primário e do secundário para variar a amplitude das tensões ou das correntes podendo ser monofásicos ou trifásicos. O transformador é constituído por um núcleo, usualmente de material ferromagnético de baixa relutância e elevada resistência, em torno do qual se enrolam diversas bobinas de fio condutor.

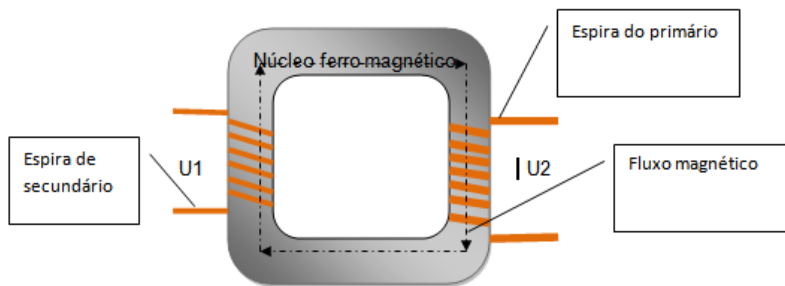


Figura 1. Princípio de funcionamento de um transformador, (autor).

2.1.1 Constituição do transformador

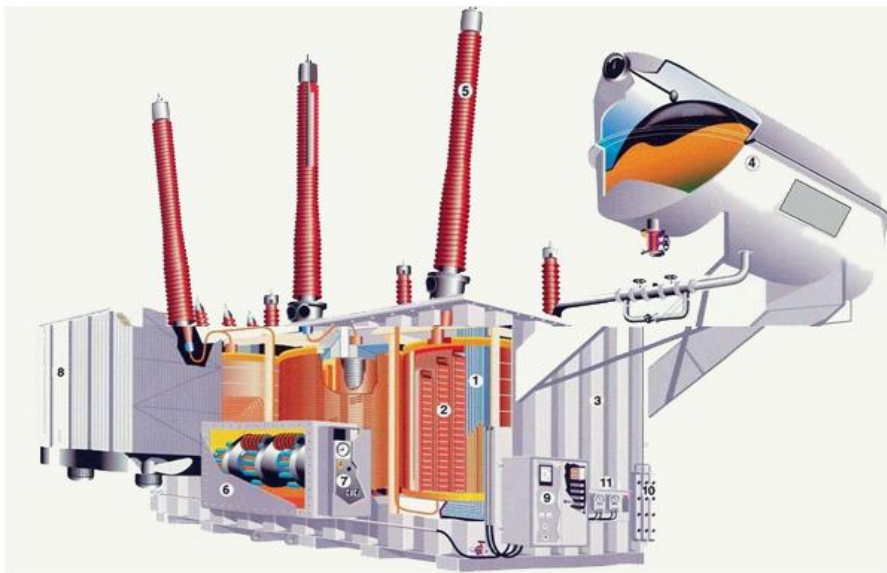


Figura 2. Coconstituintes de um transformador de potência, (catálogo de transformadores de potência e reatores de derivação, 1999).

1-Núcleo: feito de material magnético constituído de par lâminas metálicas finas de ferro silicioso com formas padronizadas, justapostas e isoladas umas das outras para se reduzir as correntes de Foucault;

2-Enrolamentos: consiste em bobinas feitas de material condutor cobre ou alumínio podendo ser insolados em papel ou envernizados;

3-Tanque principal: é um invólucro de aço, podendo ter blindagem nas paredes internas que envolve a parte activa do transformador preenchido por óleo insolente;

4-Tanque de expansão de óleo: permite a expansão do volume de óleo no transformador devido a variação da temperatura que ocorrem no aparelho;

5-Buchas: feitos de porcelana fazem o isolamento entre os terminais das bobinas e o tanque principal;

6-Comutadores sob carga: proporciona a variação do nível de tensão fazendo a comutação de terminais com diferentes números de espiras sob carga;

7-Acionamento do comutador sob carga: mecanismo electromecânico que faz mudança da posição do comutador de acordo com o nível de tensão desejado;

8-Radiadores: são trocadores de calor entre o ambiente exterior e o transformador, contêm aletas por onde circula o óleo insolante que em contacto com o ar exterior reduzem sua temperatura refrigerando o transformador;

9-Painel de controlo: local onde estão instalados os dispositivos de controlo e monitoração do funcionamento do transformador;

10-Secador de ar: faz a retirada da humidade no interior do transformador utilizando geralmente sílica-gel;

11-Termómetros: medem a temperatura do enrolamento e do óleo do transformador;

2.1.2 Comparação entre transformador ideal e real

Num transformador ideal, sem perdas, as tensões e as correntes têm diferentes amplitudes, têm a mesma frequência, e a soma da energia eléctrica fornecida por todos os enrolamentos secundários é igual à energia recebida pelo primário, ou seja, não apresenta perdas ôhmicas, dispersão de fluxo magnético, perdas no núcleo e a permeabilidade magnética do núcleo é infinita.

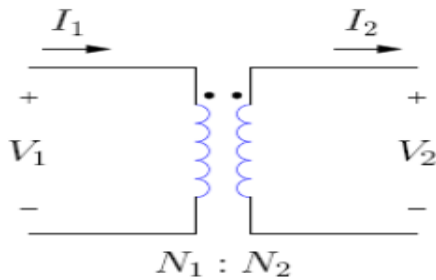


Figura 3. Circuito equivalente, (José Dores Costa,2010);

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (1)$$

$$S_1 = S_2 \rightarrow V_1 I_1^* = V_2 I_2^* \quad (2)$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{a V_2}{I_2/a} = a^2 \frac{V_2}{I_2} = a^2 Z_2 \quad (3)$$

2.1.3 Transformador real

O transformador real é aquele que apresenta perdas, dentre elas perdas no ferro devido as correntes de Foucault e a histerese, perdas no cobre e perdas devido a dispersão do fluxo magnético.

O rendimento do transformador varia com a carga, dependendo fortemente das perdas no ferro e no cobre.

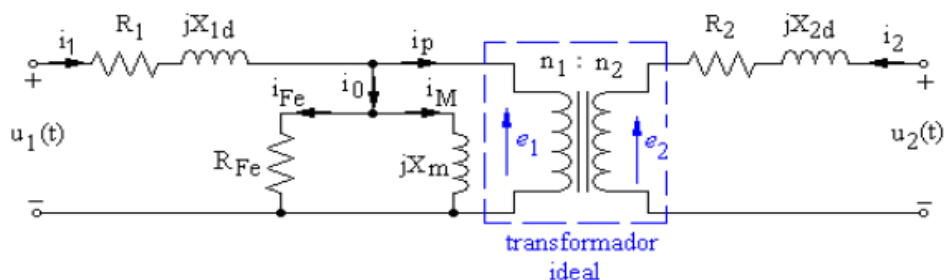


Figura 4. Modelo de um transformador real, (José Dores Costa,2010);

Onde:

R_1, R_2 - perdas ôhmicas nos enrolamentos

X_1, X_2 - dispersão de fluxo

R_{fe} - perdas no núcleo (perdas ferro)

X_m - magnetização do núcleo

Sendo: $X_{1d} = \omega l_1 d$; $X_{2d} = \omega l_2 d$; $X_m = \omega M$; $\omega = 2\pi f$

A equação para malha é do primário é:

$$U_1 = Z_1 I_1 - E_1 \quad (4)$$

$$U_1 = (R_1 + j\omega L_{1d}) \times I_1 - j\omega M \times I_m \quad (5)$$

Para malha do secundário que está em vazio ($I_2=0$):

$$E_2 = -U_2 \quad (6)$$

2.1.4 Referindo o transformador ao primário

Quando ligamos uma carga (RL) no secundário circula no transformador uma corrente que cria um fluxo magnético que se opõe ao fluxo criado pela corrente do primário logo, I_p é a corrente no primário do transformador ideal que corresponde à corrente i_2 de carga no secundário, tendo em conta a relação de espiras.

$$I_p = \frac{n_2}{n_1} I_s \quad (7)$$

Assim do lado primário, a corrente do secundário corresponde a uma corrente fictícia, i'_s , que dada por:

$$I'_s = \frac{n_2}{n_1} I_s \quad (8)$$

Assumindo um transformador ideal onde são válidas as seguinte condições:

$$I_p = \frac{n_2}{n_1} I_s \text{ e } V_p = \frac{n_1}{n_2} V_s, \quad (9)$$

Fazendo a razão entre as duas equações tem-se:

$$\frac{V_p}{I_p} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \times \frac{V_s}{I_s} \quad (10)$$

Sendo, $Z1 = \frac{VP}{IP}$ e $Z2 = \frac{Vs}{Is}$ então:

$$Z1 = \left(\frac{n1}{n2}\right)^2 \times Z2 \quad (11)$$

Logo vistas do primário teremos

$$R'2 = \left(\frac{n1}{n2}\right)^2 \times R2, \text{ e, } X'2d = \left(\frac{n1}{n2}\right)^2 \times X2d \quad (12)$$

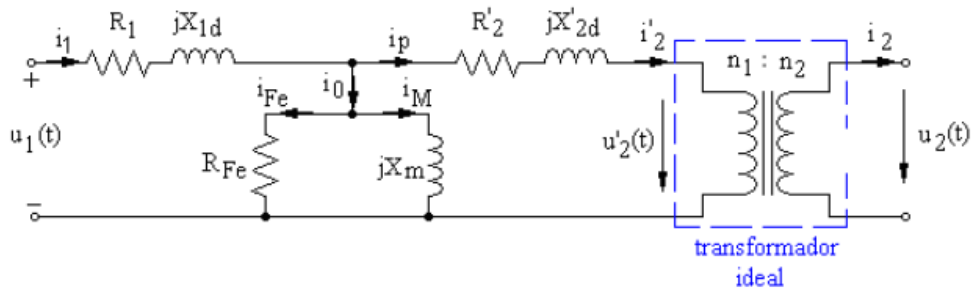


Figura 5. Modelo do transformador reduzido ao primário

2.2 Protecção de Transformadores eléctricos de potência

Os transformadores de potência são equipamentos responsáveis por fazer a conversão do nível de tensão no sistema eléctrico, reduzindo para níveis de distribuição ou elevando a tensão para os níveis de transporte, reduzindo desta forma as perdas na transmissão, para além de serem equipamentos indispensáveis no sistema eléctrico são também equipamentos de valores elevadíssimos.

Dependendo da seriedade das faltas que podem ocorrer num transformador, os prejuízos podem ser amontoados devido ao tempo de interrupção para a devida manutenção ou em casos mais graves a destruição completa do transformador. De modo a manter sua integridade e permanência em operação é necessário garantir protecção adequada ao transformador de potência.

As avarias que podem ocorrer num transformador de potência são classificadas em dois tipos:

Avarias internas - cuja protecção deve ser garantida pelo sistema de protecção diferencial, este tipo de avarias pode ser causada devido a contacto a massa dos enrolamentos, contacto entre dois enrolamentos, curto-circuito entre terminais ou curto-circuito entre espiras.

Avarias externas - que deveriam ser detectadas e eliminadas pelo sistema de relés fora do transformador, devendo-se a sobrecargas e curto-circuito externos.

2.3 Principais relés de Protecção contra defeitos internos de um transformador

Os defeitos internos têm como principal origem o aquecimento do transformador, produção de gases com diminuição do nível do óleo e no aumento de pressão. Dentre estes defeitos o curto-circuito são causados por avarias de isolamento com formação de arcos eléctricos, rutura de isolamento entre chapas do núcleo, descargas internas e nível de óleo baixo.

Os dispositivos e equipamentos de protecção devem identificar e eliminar ou acionar mecanismos para eliminar os possíveis faltas que podem ocorrer no sistema o mais rápido possível e com o máximo de eficiência para tal é necessário que apresentem excelente:

- Sensibilidade: os relés devem actuar sempre que possível dentro da faixa de ajuste identificando qualquer anomalia de operação;
- Selectividade: os relés devem ser capazes de escolher as condições de operação ou de não operação;
- Velocidade: os relés devem actuar o mais rápido possível as grandezas pelas quais são ajustadas;
- Confiabilidade: os relés devem actuar de forma segura sempre que solicitado e manter-se inativo em condições nas quais não foi ajustada para operar.

Não há nenhum padrão de protecção que possa ser aplicado a todos os transformadores, ou até mesmo em aplicações diferentes. A maioria das instalações precisa de uma análise de engenharia individual para determinar o melhor esquema do sistema de protecção que contenha melhor relação custo-benefício. Geralmente

mais de um esquema de protecção é tecnicamente viável. (IEEE Std C37.91TM,2008).

Para transformador de potência são empregues protecções intrínsecas do transformador, dentre elas:

Table 1. Funções de protecção dos relés pela nomenclatura ANSI (American National Standards institute)

Função (ANSI)	Descrição da função
21	Relé de Distância
26	Protecção térmica
27	Relé de Subtensão
32	Relé Direcional de Potência
46	Relé de Imagem Térmica
50	Relé de Sobrecorrente Instantâneo
50N	Relé de Sobrecorrente Instantâneo de Neutro
51	Relé de Sobrecorrente Temporizado
51N	Relé de Sobrecorrente Temporizado de Neutro
59	Relé de Sobretensão
63	Relé buchholz
67	Relé Direcional de Sobrecorrente
71	Protecção de baixo nível de óleo
81	Relé de Subfrequência
87	Relé Diferencial

2.3.1 Relé de pressão

São relés capazes identificarem rapidamente a elevação brusca da pressão do óleo no transformador, sendo incapazes de detectar variações lentas da pressão. Servindo de auxílio dos relés diferenciais ou subrecorrentes para os defeitos no interior do tanque do transformador.

2.3.2 Relé de detenção de gases

O óleo isolante gera pequenas quantidades de gases quando submetido a determinados fenómenos de natureza eléctrica ou térmica, a composição dos gases produzidos depende do tipo de defeito ocorrido. O relé de detenção de gases é um relé utilizado em transformadores com depósito de óleo, fazendo uma análise das condições do gás, consoante o estado do mesmo faz um diagnóstico qualitativo do tipo de defeito.

2.3.3 Relé de Buchholz

O relé de Buchholz é um dispositivo de segurança ativado por óleo e gás, usado com objectivo de garantir protecção ao transformador contra defeitos internos, e consiste na combinação dos reles de pressão e de detecção de gás.

O rele Buchholz funciona com auxílio de duas boias com contacto de mercúrio montado no interior da câmara colectora de gás. O acúmulo destes gases causa a queda do nível de óleo diminuindo o nível de localização da boia e girando a chave de contacto de mercúrio.

Quando dá-se ocorrência de algum erro interno no transformador, o óleo no transformador irá se decompor produzindo hidrocarbonetos, CO e CO₂. Em certos casos devido ao escoamento de óleo no tanque principal, em outros casos bolhas de ar e humidade podem se acumular na parte superior do recipiente Buchholz, estes gases são examinados, e consoante a sua quantidade e composição pode estimar o tipo de falha.

Um relé Buchholz típico Possui dois conjuntos de contactos, sendo que um é destinado a operar em acumulações lentas de gás accionando o alarme, enquanto o outro actua em grandes deslocamentos de volume de óleo, no caso de uma falta interna severa fazendo disparar o disjuntor.

2.3.3.1 A boia superior

Actua quando há produção lenta de gás e analisa o estado do gás, em caso de gás não inflamável é devido ao ar ou humidade, em caso de produção de gás inflamável está-se perante defeito interno tais como, caso de falhas de isolamento, Pontos

quentes no núcleo devido a curto-circuito na isolação do laminado, Perda de óleo devido a vazamento, Defeitos em juntas, Falha de isolamento em parafuso do núcleo e Faltas entre espiras ou outras faltas em enrolamento envolvendo somente injeção de baixa potência.

2.3.3.2 Boia inferior:

- Actua quando dá-se produção de grandes quantidades de bolhas de gás, em casos de curto-circuito entre espiras e ruptura de espiras gerando arcos eléctricos.

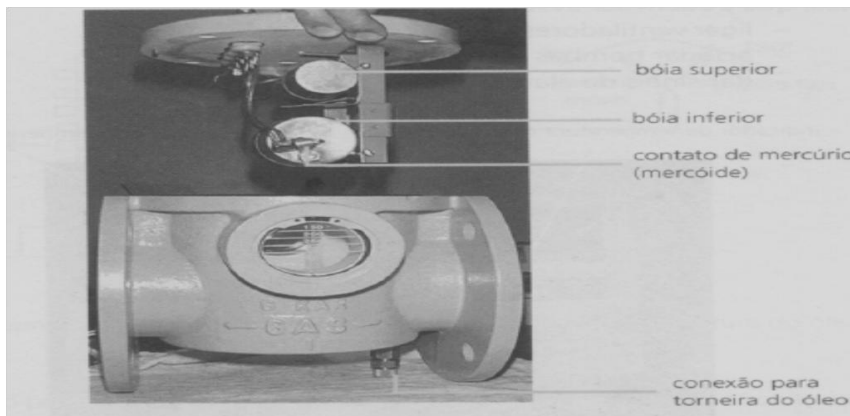


Figura 6. relé Buchholz constituição

Identificação de algumas avarias pela combinação de gases encontrados (kindermann,2006)

- H₂ e C₂H₂ indicam arco entre partes construtivas através do óleo;
- H₂, C₂H₂ e CH₄ indicam arco com alguma deterioração do isolamento fenólico, isto é, faltas no comutador de tapes;
- H₂, CH₄ e C₂H₄ indicam um ponto quente nas juntas do núcleo;
- H₂, C₂H₄, CO₂ e C₃H₆ indicam ponto quente no enrolamento.

2.3.4 Protecção contra sobrecarga

Consiste em um detector de temperatura, baseado numa resistência alimentado por um transformador de corrente denominada imagem térmica, que detecta a temperatura do ponto mais quente do enrolamento usando este aumento de temperatura para criar expansão do bolbo de mercúrio que leva ao accionamento de uma mola que move um ponteiro, quando a temperatura atinge o limite máximo liga os contactos do alarme, ventiladores e bombas de circulação de óleo. No caso de a temperatura ser demasiado elevada pode ser preciso desligar os disjuntores retirando o transformador de serviço.

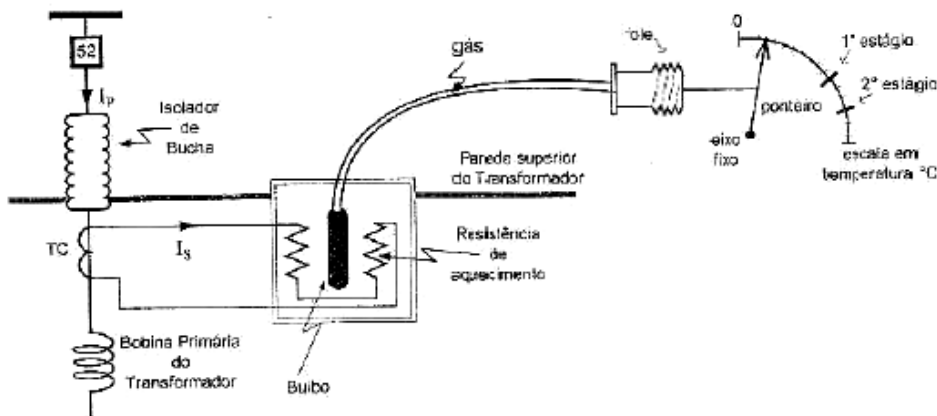


Figura 7. Relé de imagem térmica com bolbo sensor de temperatura, (Geraldo_Kinderman, 2005).

2.4 Transformador para instrumentos

É um grupo de transformadores eléctricos que permite reduzir os níveis de tensões e correntes de linha para níveis mais baixos e padronizados dos seus respectivos parâmetros, permitindo sua medição e garantindo segurança dos operadores. Os transformadores de intensidade são usados por que não é economicamente viável o uso de aparelhos que meçam directamente as correntes e tensões de linha.

Existem dois tipos básicos de transformadores de intensidade

- Transformador de tensão formalmente chamado de transformador de potencial (TPs);
- Transformador de corrente (TCs);

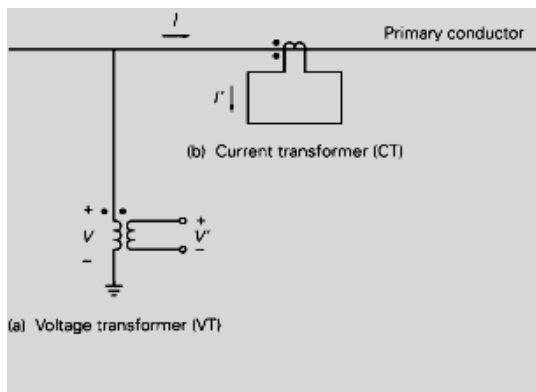


Figura 8. Representação esquemática para TP e TC (J. Duncan Glover, Mulukutla S, Thomas J. ;2008)

2.4.1 O transformador de potencial (TPs)

Os transformadores de potencial são equipamentos utilizados para suprir aparelhos que apresentam elevada impedância, tais como voltímetros, relés de tensão, bobinas de tensão de medidores de energia, etc. São empregados indistintamente nos sistemas de proteção e medição de energia elétrica. Em geral, são instalados junto aos transformadores de corrente. O enrolamento do primário do TP é diretamente ligado ao sistema de potência, o TP reduz a tensão do primário para níveis padronizados compatíveis ao funcionamento dos relés, eles são projetados de modo a ser suficientemente exatos, deste modo eles são geralmente modelados no transformador ideal assim $V' = (1/n)V$, onde V' é a escala reduzida da tensão de linha V ;



Figura 9. Transformador de potencial 230kV (João Mamede Filho, 2007)

2.4.2 O transformador de corrente (TCs)

Os transformadores de corrente são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e protecção funcionar adequadamente sem que seja necessário possuírem correntes nominais de acordo com a corrente da carga. Os TCs transformam através do fenómeno de conversão eletromagnética, correntes elevadas que circulam no seu primário em pequenas correntes secundárias.

O primário do transformador de corrente corresponde a própria linha de transmissão, a corrente nominal do secundário do TC foi padronizado como 5A nos estados unidos e 1A na Europa.

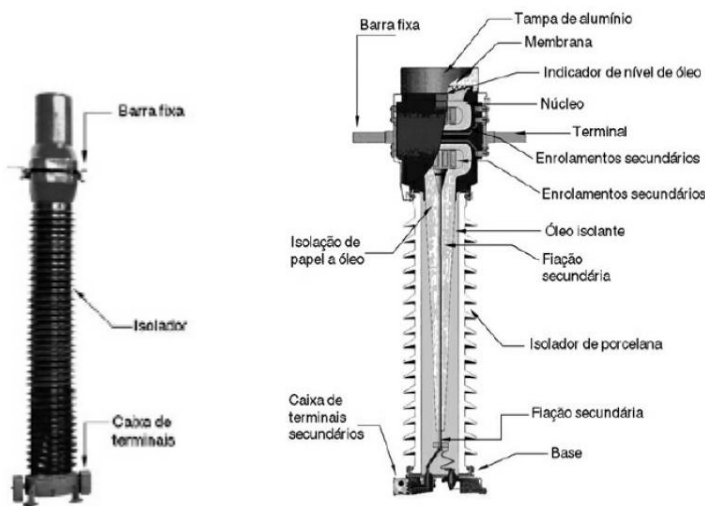


Figura 10. TC de classe 230kV e Detalhes construtivos de um TC (João Mamede Filho, 2007)

As razões de transformação são:

Table 2. Razões *standard* de TPs e TCs, (J.Duncan glover, Mulukutla S, Thomas J.;2008).

TABLE 10.1		Voltage Ratios						
Standard VT ratios	1:1	2:1	2.5:1	4:1	5:1	20:1	40:1	
	60:1	100:1	200:1	300:1	400:1	600:1	800:1	
	1000:1	2000:1	3000:1	4500:1				
TABLE 10.2		Current Ratios						
Standard CT ratios	50:5	100:5	150:5	200:5	250:5	300:5	400:5	
	450:5	500:5	600:5	800:5	900:5	1000:5	1200:5	
	1500:5	1600:5	2000:5	2400:5	2500:5	3000:5	3200:5	
	4000:5	5000:5	6000:5					

2.5 Relé diferencial

O relé diferencial é um dispositivo de protecção de um equipamento cuja função de protecção fundamenta-se na comparação da correntes eléctrica de entrada e saída do equipamento, podendo apresentar diversas possibilidade de conexão a função de protecção baseia-se na primeira lei de Kirchhoff aplicada ao equipamento. Onde a comparação de correntes é feita por meio de transformadores de corrente (TCs) e é geralmente empregue na protecção de transformadores de potência, cabos subterrâneos, maquinas síncrona, barramentos, cubículos metálicos e linhas de transmissão curtas. (Geraldo_Kinderman,2005)

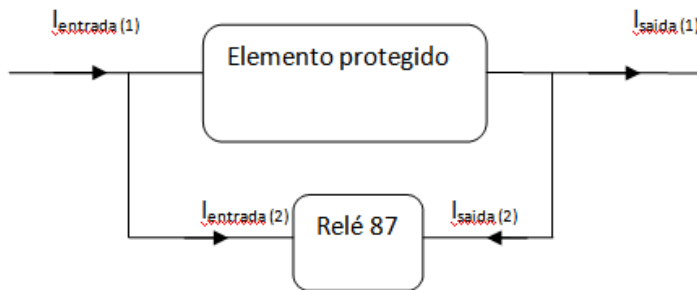


Figura 11.Princípio de protecção diferencial, (autor).

$$I_{\text{entrada}} = I_{\text{saida}} + I_{\text{relé}} \quad (13)$$

$$I_{\text{relé}} = I_{\text{entrada}} - I_{\text{saida}} \quad (14)$$

O relé de protecção vai actuar do segundo as seguintes conduções,

- se $I_{\text{entrada}} = I_{\text{saida}}$, $I_{\text{relé}} = 0$, o relé não actua , isto é, o elemento protegido não apresenta defeito;
- se $I_{\text{entrada}} - I_{\text{saida}} \leq I_{\text{ajuste do relé}}$. A protecção não irá actuar porque a diferença de corrente é menor que a corrente de ajuste de relé;
- se $I_{\text{entrada}} - I_{\text{saida}} > I_{\text{ajuste do relé}}$, a protecção actua porque a diferença de corrente é maior que o ajuste no relé, neste caso há um defeito no elemento protegido.

2.6 Relé diferencial comum

É uma protecção em que se utiliza o relé de sobrecorrente 50 ou 51 fazendo a função 87. Onde a zona seletiva de actuação é delimitada pelos dois transformadores de corrente (TCs), caso ocorra um defeito fora desta zona protegida pela protecção diferencial, os dois TCs vêm a mesma corrente e o relé não opera. O sistema de protecção diferencial pode ser empregue em sistemas eléctricos radiais e em anéis

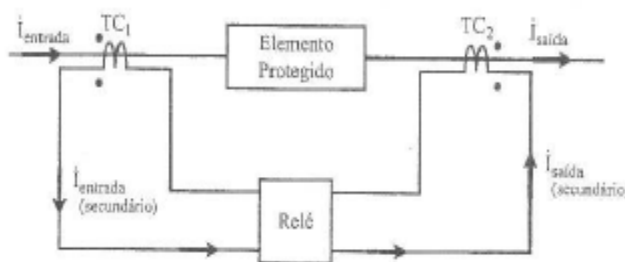


Figura 12. Protecção diferencial comum na operação normal do sistema eléctrico, (Geraldo_Kinderman, 2005).

2.6.1 Defeito fora da zona protegida

Supondo o sistema em anel, as correntes que operam o curto-circuito fora da zona de protegida pela protecção diferencial, os dois TCs vêm a mesma corrente $I_1 = I_2$, e o relé não opera. Ou seja, a protecção diferencial somente deverá operar para faltas circunstâncias á zona compreendida entre os dois TCs da protecção diferencial, não devendo se sensibilizar com faltas externas a esta zona.

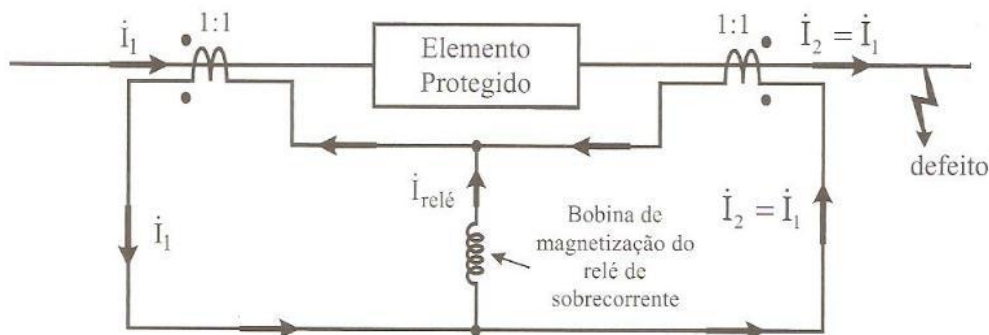


Figura 13. defeito fora da zona de protegida, (Geraldo_Kinderman, 2005).

2.6.2 Defeito dentro da zona protegida

No caso de um curto-circuito na zona protegida como ilustrado na fig14, se o sistema for radial a corrente na saída será nula $I_2=0$, e se for em anel a corrente na saída I_2 será corrente de curto-circuito, a corrente que passa pela bobina de magnetização do relé será a adição entre as correntes de entrada e de saída do elemento protegido $I_{relé} = I_{entrada} + I_{saida}$, $I_{relé} = I_1 + I_2$ e por conseguinte a protecção actuara.

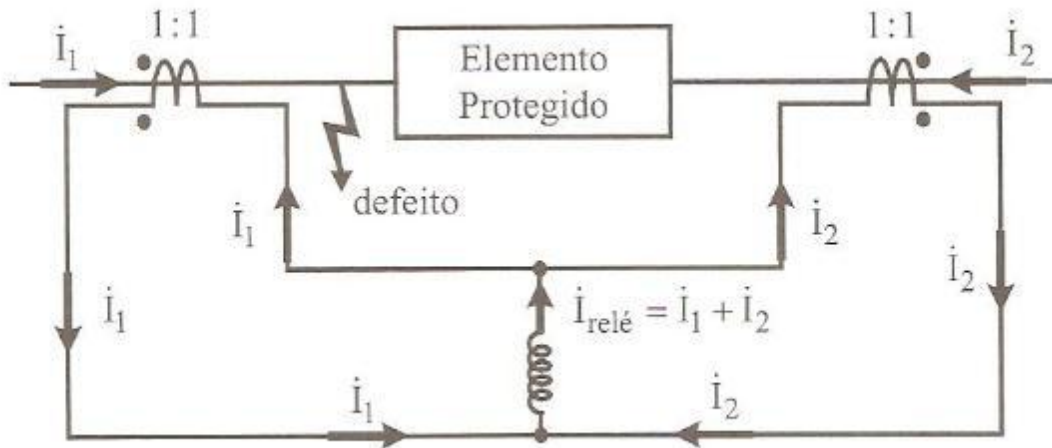


Figura 14. defeito dentro da zona protegida, (Geraldo_Kinderman, 2005).

Porém é importante observar que o uso das ligações anteriores é frequente elas apresentarem problemas na ocorrência de curtos-circuitos elevados próximos dos TCs que delimitam a zona de protecção devido:

- Não ser perfeito o casamento dos TCs;
- Saturação dos TCs;
- Carregamento (burden) nos secundário dos TCs, que causa saturação do núcleo;
- Outros problemas inerente ao equipamento protegido;

Que são condições que induzem erros nos TCs, podendo provocar a actuação indevida do relé de sobrecorrente que esta promovendo protecção diferencial. Para contornar esses problemas é recomendável o uso do relé diferencial percentual.

2.7 Relé diferencial percentual

O relé percentual caracteriza-se por apresentar melhor desempenho para restringir os defeitos da proteção devido as faltas externas, pois possui uma bobina de restrição que permite empregar certas limitações às faltas externas. O princípio básico do relé diferencial percentual baseia-se nos torques gerados nas bobinas de restrições e de operação

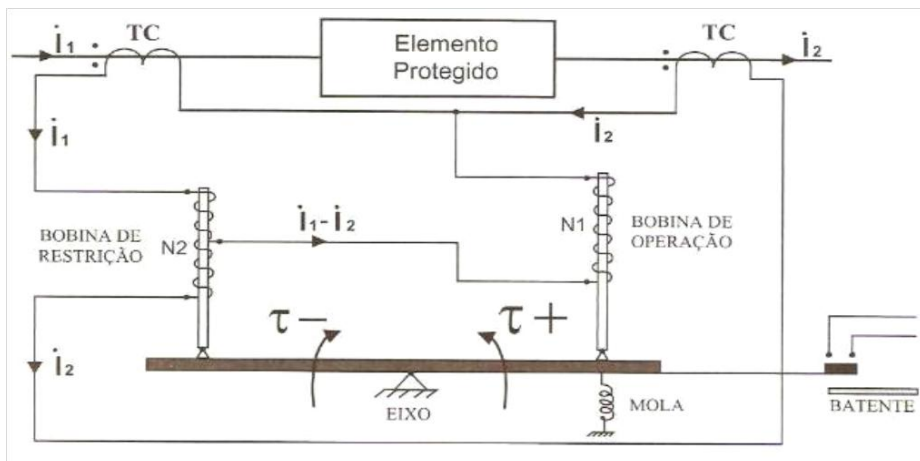


Figura 15. esquema de proteção diferencial percentual, (Geraldo_Kinderman, 2005).

O esquema de proteção diferencial percentual baseia-se na interação de duas bobinas, sendo a bobina de restrição, que tem uma derivação central, o campo magnético gerado nesta bobina de restrição actua atraindo um embolo produzindo um torque negativo, isto é contrario ao torque de operação e a bobina de operação, cujo campo magnético atrai um embolo que produz o torque positivo. O relé diferencial percentual irá operar somente se o torque positivo (τ) for superior ao torque negativo ($\tau -$).

O funcionamento básico do relé diferencial percentual baseia-se nos torques gerados nas bobinas de restrição e de operação, para melhor análise apresenta-se as seguintes condições de operação:

2.7.1 Operação normal do sistema eléctrico ou defeito fora da zona protegida

As correntes nos secundários dos TCs são iguais ($I_1=I_2$), nota que a bobina de restrição é composto de duas bobinas enroladas no mesmo sentido, portanto as correntes I_1 e I_2 criam campos eléctricos concordantes que atraem o embolo com muita força, produzindo um torque negativo ($\tau -$). E na bobina de operação a corrente resultante é nula $I_1-I_2=0$, ou seja o torque será nulo. Desta forma o forte torque negativo garantira a não operação do relé 87. Como mostrado na fig 15.

2.7.2 Defeito interno na zona de protecção

Quando o curto-circuito ocorre na zona de protecção as correntes I_1 e I_2 dirigem-se ao ponto de defeito, criando inversão do sentido da corrente I_2 , por questão de análise, suponha que o modulo as corrente I_1 e I_2 são iguais então a corrente I_2 gera um campo magnético oposto e de mesma intensidade com a da corrente I_1 na meia bobina de restrição, assim o campo de restrição é nulo, porém a corrente resultante que passa na bobina de operação é o dobro $I_1+I_2=2I_1$, produzindo um torque positivo elevado. Logo o torque de actuação é grande e o de restrição é nulo garantindo assim a operação do relé 87.

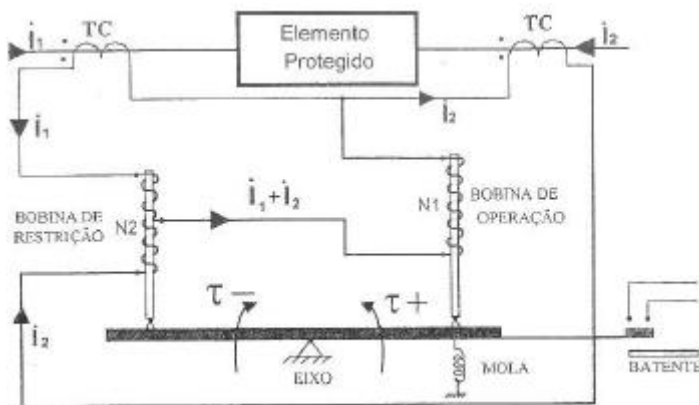


Figura 16. defeito interno no relé diferencial percentual, (Geraldo_Kinderman, 2005).

Com este melhoramento, verificou-se eficiência na garantia de restrição de operação do relé 87 em caso de defeitos externos, fortificando a restrição e enfraquecendo a operação. E no caso de defeitos internos o relé enfraquece a restrição e fortifica a operação.

O relé diferencial percentual pode ser representado pelo esquema na fig.17, em que aparecem as bobinas de restrição e de actuação separadas em duas partes. Com o intuito de representar as expressões analíticas de operação do relé diferencial percentual, considerando que I_1 e I_2 estão referenciados segundo as fig. 15 e fig.16.

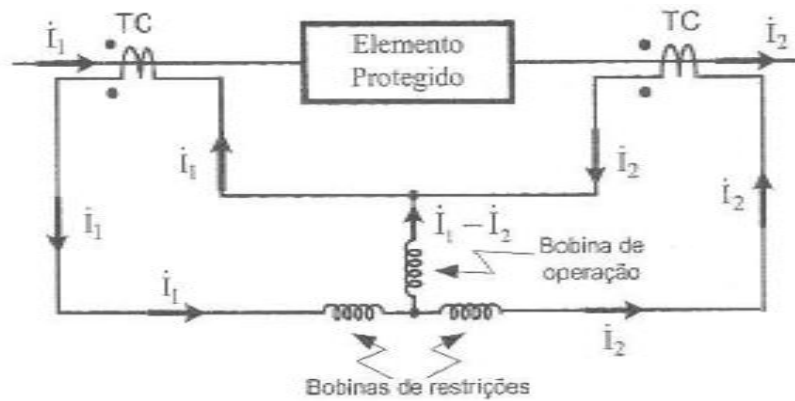


Figura 17. Relé diferencial percentual (87) (Geraldo_Kinderman, 2005).

Na bobina de restrição actua uma corrente resultante

$$I_{\text{restrição}} = \left| \frac{I_1 + I_2}{2} \right| \quad (15)$$

Usa-se a media dos módulos individuais para simplificar ficando

$$I_{\text{restrição}} = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (16)$$

O torque de restrição será:

$$\tau_{\text{restrição}} \propto (\phi_{\text{restrição}})^2 \propto \left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right)^2 \quad (17)$$

Na bobina de operação, a corrente de operação

$$I_{\text{operação}} = |I_1 - I_2|, \text{ simplificando, } I_{\text{operação}} = I_1 - I_2 \quad (18)$$

Onde o torque de operação será

$$\tau_{\text{operação}} \propto (\phi_{\text{operação}})^2 \propto (I_1 - I_2)^2 \quad (19)$$

Desprezando a restrição da mola restauradora, o torque resultante que age no balanceamento do relé diferencial percentual será

$$\tau_{\text{relé 87}} = \tau_{\text{operação}} - \tau_{\text{restrição}} \quad (20)$$

$$\tau_{\text{relé 87}} = K_1(I1 - I2)^2 - K_2\left(\frac{I1+I2}{2}\right)^2 \quad (21)$$

No limiar do relé 87 ($\tau_{\text{relé 87}}=0$) têm-se:

$$K_1(I1 - I2)^2 - K_2\left(\frac{I1+I2}{2}\right)^2 = 0 \quad (22)$$

$$I1 - I2 = \sqrt{\frac{k2}{k1}} \times \frac{I1+I2}{2}, \text{ Fazendo } a = \sqrt{\frac{k2}{k1}}, \text{ Tem-se} \quad (23)$$

$$I1 - I2 = a \times \frac{I1+I2}{2} \quad a = \frac{I1-I2}{\frac{I1+I2}{2}} \quad (24)$$

Fazendo $y = I1 - I2$ e $x = \frac{I1+I2}{2}$, tem-se a equação de uma reta $y=ax$ em que $a = \tan \alpha = \sqrt{\frac{k2}{k1}}$, Chamada de inclinação, ou declive (*stop*) da reta do limiar de operação do relé 87.

O efeito da mola de restrição do relé só será efetiva para pequenas correntes de defeito, neste caso, sua acção é representada na figura.18 e a recta não passa pela origem mas tem um pequeno desvio.

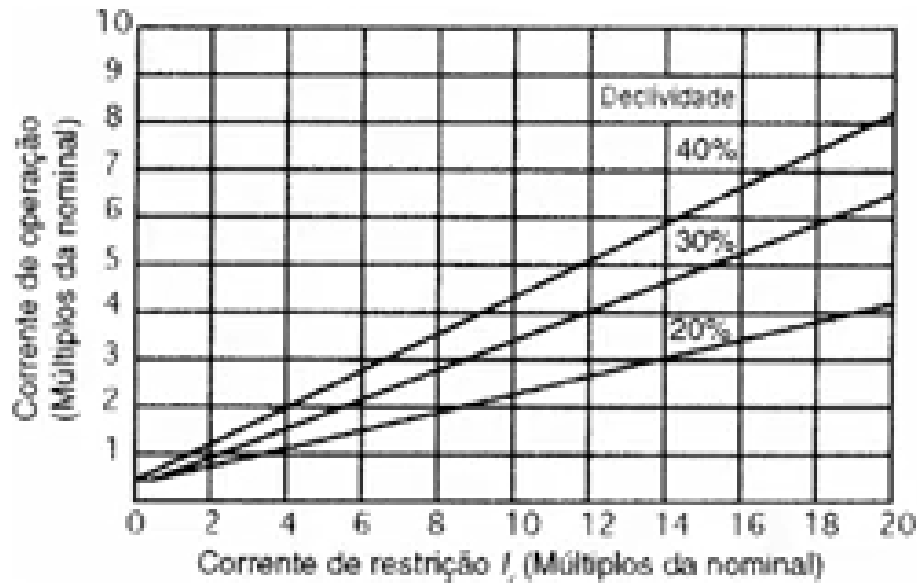


Figura 18. Curvas de operação do relé diferencial percentual (João Mamede Filho, 2007).

Para o relé diferencial percentual, devem-se fazer dois ajustes:

2.8 Ajuste de declividade (*slope*)

Que pode ser:

- 5 a 25% para máquinas síncronas;
- 10 a 45% para transformadores de potência;

Deve-se observar que a declividade for de 25% que corresponde a $\tan \alpha = 0,25$ e $\tan^{-1}(0,25) = 14,04^\circ$, quanto maior for a declividade menor é a sensibilidade do relé.

2.9 Ajuste do valor inicial ou “*pick-up*” do relé

Para recompensar o efeito da mola de restrição, seu valor mínimo é limitado por $\sqrt{\frac{k_3}{k_1}}$, em que K_3 representa o efeito da mola, por exemplo o ajuste do *pick-up* ou corrente mínima de actuação do relé, pode ser 0,1A ou 0,2A, ou o valor recomendado pelo fabricante do relé.

Pode-se também representar relé diferencial percentual com gráfico da corrente de retenção I_1 em função da corrente de retenção I_2 .

Para tal define-se um outro termo que é a percentagem da corrente diferencial $I_1 - I_2$ em relação á menor das correntes de retenção I_1 ou I_2 , supondo-se que $I_2 < I_1$, assim a percentagem diferencial “ P ” é dada por:

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_2} \times 100, \text{ desenvolvendo têm-se, } I_1 = \frac{100 + p}{100} \times I_2 \quad (25)$$

Supondo-se que $I_1 < I_2$, têm-se:

$$P = \frac{I_2 - I_1}{I_1} \times 100, \text{ desenvolvendo têm-se, } I_1 = \frac{100}{100 + p} \times I_2 \quad (26)$$

Usando-se no relé diferencial percentual, o percentual “ p ” de 10 e 25%, o gráfico da zona de actuação do relé é apresentado na figura. 19.

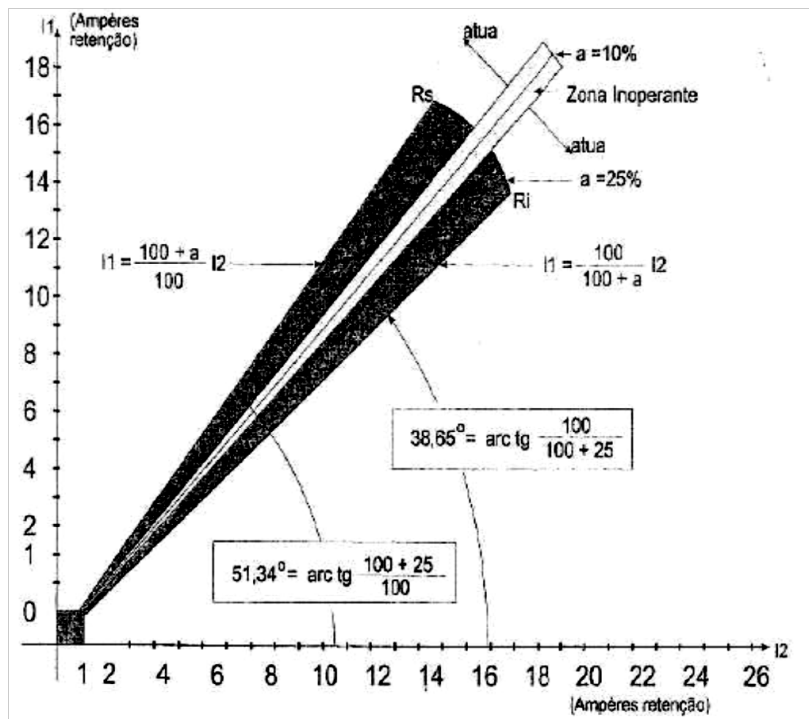


Figura 19. Zona de atuação do relé diferencial percentual em forma de gravata (Geraldo_Kinderman, 2005).

Logo para qualquer operação que produza um ponto dentro da região axorada o relé 87 e a protecção não actuaram. Caso um operação produzam pontos fora da gravata representam uma corrente diferencial alem do ajustado no relé 87 e a protecção actuara.

2.10 Protecção diferencial de transformadores de potência

O método de protecção usada em transformador de potência depende da potência do próprio transformador, fusíveis são usualmente usados para protecção de transformadores de potências pequenas, enquanto que o uso de protecção diferencial é geralmente empregue para proteger transformadores de potência superior a 10MVA (J.Duncan glover, Mulukutla S. , Thomas J. ;2008).

2.11 Protecção diferencial no transformador monofásico

Na utilização da protecção diferencial os TCs devem compensar as diferenças numéricas das correntes primária e secundárias do transformador.

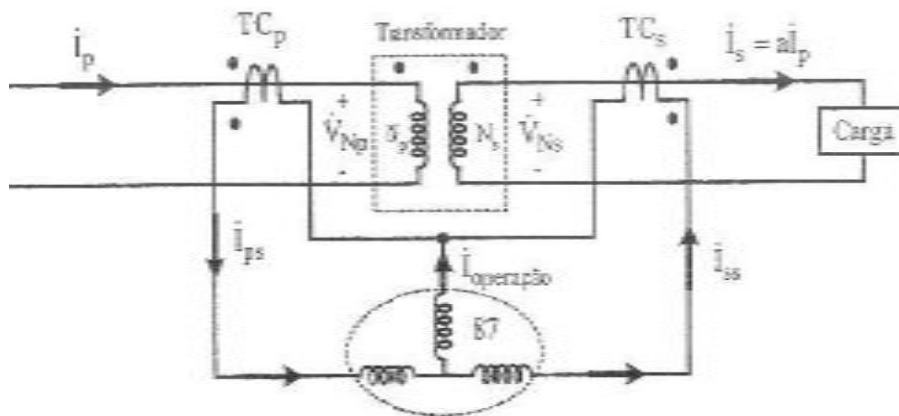


Figura 20. Esquema de protecção diferencial no transformador monofásico (Geraldo Kinderman, 2005).

Deveram ser observadas certas regras para ligação dos TCs:

- A ligação dos TCs deve obedecer as mesmas seqüências de polaridade das bobinas do primário e secundário do transformador.
- Os terminais dos TCs com marcas de polaridade devem ser ligados as bobinas de restrição.
- Dimensionar os TCs de modo que as correntes secundárias que passam pelas bobinas de restrição sejam iguais em módulo e ângulo $I_{ps} = I_{ss}$

As duas primeiras regras garantem que as correntes que passam pela bobina de restrição estejam em fase. (Geraldo_Kinderman, 2005).

Para garantir que os módulos sejam iguais faz-se:

$$I_p = I_s \quad (27)$$

$$\frac{I_p}{RTC_p} = \frac{I_s}{RTC_s} \quad (28)$$

$$\frac{I_p}{RTC_p} = \frac{a \times I_p}{RTC_s} \quad (29)$$

$$RTC_s = a \times RTC_p \quad (30)$$

Onde:

a – é a razão de transformação do transformador ;

RTC_p e RTC_s – são respectivamente razões de transformação de TCs conectados ao primário e secundário do transformador;

Desta forma desconsidera-se os erros de cada TC, na operação normal do transformador e no caso do defeito fora da zona de protecção, a corrente que passa na bobina de operação do relé 87 é nula.

2.12 Proteção diferencial de transformador trifásico $\Delta - Y$

A protecção diferencial 87 no transformador trifásico efetua-se fase a fase, geralmente usa-se a ligação estrela Y quando o transformador não produz rotação angular, porem pode-se adotar qualquer ligação estrela ou triângulo ($\Delta \cup Y$) nos secundários dos TCs da protecção diferencial.

Cuidados especiais devem ser observados em transformadores trifásicos ligados em $\Delta - Y$, devido ao desfasamento angular existente entre as correntes de linha no lado ligado em Δ em relação ao lado ligado em Y , podendo estar adiantadas ou atrasadas, segundo o grupo de ligação.

O deslocamento angular produz dois problemas:

Diferenças nas correntes do relé diferencial 87, que dependendo do seu ajuste pode operar em condições de carga do transformador e o pode prejudicar o desempenho

na bobina de restrição do relé diferencial 87 devido ao desfasamento das correntes dos TCs.

2.13 Regras de ligação dos TCs nos transformadores trifásicos

2.13.1 No geral:

- 1- Desenha-se os enrolamentos do primário e secundário do Transformador, alinhados e com as marcas de polaridades para fora da bobina;
- 2- Conecta-se as linhas de transmissão no lado das marcas de polaridade das bobinas;
- 3- Conecta-se os enrolamentos dos TCs de modo que as marcas de polaridade acompanhe as marcas de polaridade das bobinas do transformador, podendo já colocar os relés diferenciais percentuais;
- 4- Conectar as marcas de polaridade dos enrolamentos dos TCs nas respectivas entradas das bobinas de restrição do relé 87

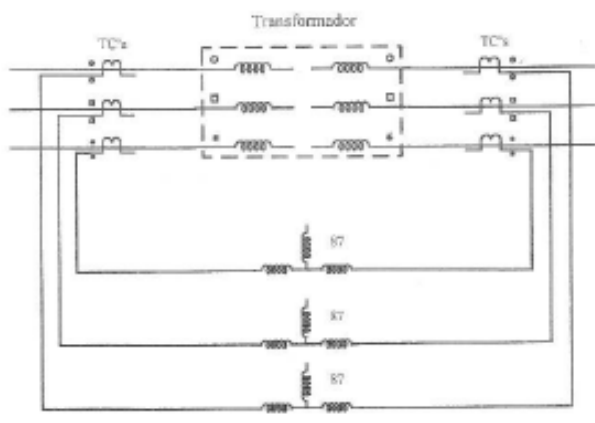


Figura 21. Conexão genérica dos TCs ao transformador trifásico (Geraldo_Kinderman, 2005).

2.13.2 Em transformadores com deslocamento angular de 0°(Y-Y, Δ-Δ, Δ-z)

Conectar os TCs em ambos lados em Y ou em Δ, e as bobinas de operação dos relés 87 em Y, no caso de ligação do transformador Y-Y aterrados a ligação adequada dos TCs em Δ, pois na ligação dos TCs em Y, em caso de curto-circuito fase-terra fora da zona de protecção, a protecção diferencial 87 actuaria.

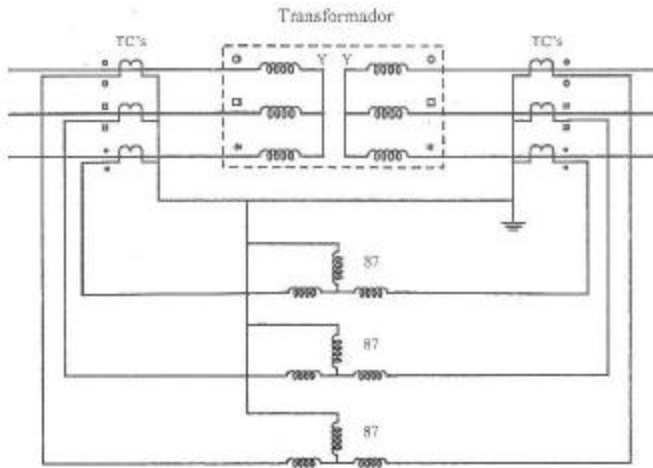


Figura 22. Transformador Y-Y com deslocamento angular de 0° , (Geraldo_Kinderman, 2005).

O aterramento serve para provocar um curto-circuito franco, caso haja defeito no isolamento interna dos TCs de modo a garantir actuação da protecção do local e garantir que esta fiação e as carcaças dos TCs e o relé 87 estejam no mesmo potencial referenciado a terra.

2.13.3 Transformador $\Delta - Y$

No transformador $\Delta - Y$, as correntes de linha no lado Δ estão desfasadas (atrasadas ou adiantadas) de $30^{\circ}, 60^{\circ}, 120^{\circ}, 150^{\circ}, 180^{\circ}$. Em relação as correntes de linha no lado Y. Dependendo da ligação dos enrolamentos das ligações $\Delta - Y$.

Os TCs devem ser dimensionados e ligados de modo que haja compensação do desfasamento angular entre as correntes de linha do primário e do secundário do transformador e garantindo que cheguem correntes em fase nas bobinas de restrição do relé 87. Para tal é preciso:

- Os enrolamentos do secundário dos TCs estejam ligados em Y no lado do transformador ligado em Δ , e em Δ no lado do transformador ligado em Y.

5- Fazer a ligação do transformador um lado em Y e o outro lado do transformador ligado em Δ ;

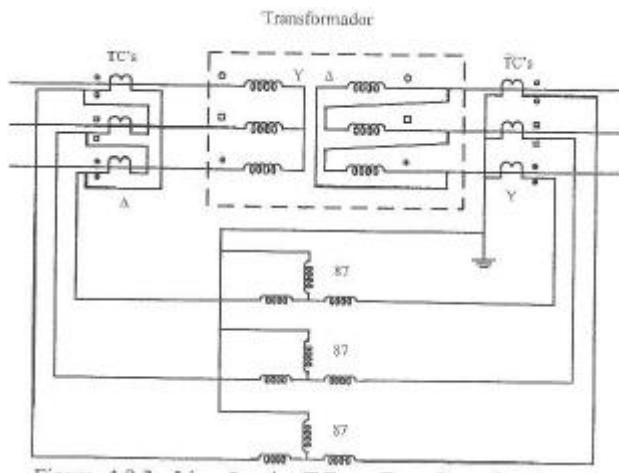


Figura 23. Ligações dos TCs no transformador Δ -Y (Geraldo_Kinderman, 2005)

2.14 Ajuste do relé diferencial percentual na proteção do transformador

Na proteção diferencial é preciso que as correntes do secundário dos TCs alimentem o relé 87 de modo que as correntes na bobina de restrição sejam iguais, porém estas correntes de chegada ao relé 87 estão associadas a erros causados por:

- Diferenças no casamento dos TCs, tendo que se escolher aqueles que mais se ajustam de acordo com as relações de transformação dos transformadores de potência;
- Erros dos TCs devido sua classe de exactidão variando entre $\pm 2,5\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ gerando um erro total de $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ e $\pm 20\%$. Devido a saturação dos TCs principalmente em condições de curto-circuito;
- Erros causados pela comutação dos TAPS dos transformadores de potência, para o relé 87 o ajuste deve ser feito na condição de operação normal ou seja com o Tap do comutador na posição central.
- Erro devido discordância dos taps nas bobinas de restrição do relé 87, causado por diferenças nas correntes de chegada nas bobinas de restrição. Podendo ser corrigidos usando de TC auxiliar intermediário que ajuste a corrente antes de entrar no relé 87 ou uso de TAPS no relé 87. Taps disponibilizados pelo fabricante;

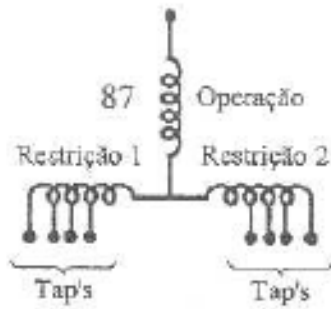


Figura 24. TAPS do relé 87 (Geraldo Kinderman, 2005)

Os TAPS são nominados em amperes que produzem mesma força magnetomotriz e mesmo fluxo magnética de restrição, o múltiplo do *TAP* na bobina de restrição é dado pela expressão:

$$M_{\text{restrição}} = \frac{I_{\text{bobina de restrição}}}{TAP} \quad (31)$$

- Margem de segurança para garantir seletividade da actuação do relé diferencial dentro da sua zona de actuação geralmente de 5%;

$$E_{\text{erro total}} = E_{\text{TCs}} + E_{\text{classe de exatidão}} + E_{\text{comutação}} + E_{\text{Taps do relé 87}} + E_{\text{segurança}} \quad (32)$$

Table 3. Matiz combinação dos *TAPS* do relé 87

Tapes (Alta)	Tapes (baixa tensão)							
	2,9	3,2	3,5	3,8	4,2	4,6	5,0	8,7
2,9	1,000	1,103	1,207	1,310	1,448	1,586	1,724	3,000
3,2		1,000	1,094	1,188	1,313	1,438	1,563	2,719
3,5			1,000	1,086	1,200	1,314	1,429	2,486
3,8				1,000	1,105	1,211	1,316	2,289
4,2					1,000	1,095	1,190	2,071
4,6						1,000	1,087	1,890
5,0							1,000	1740
8,7								1,000

2.15 Condições que causam erros de operação do relé diferencial

Em certas ocasiões dá-se surgimento de correntes diferenciais indesejadas devido a manobras operacionais efetuadas próximos ou nos próprios transformadores, estas correntes não são originárias de defeitos porém podem sensibilizar o relé diferencial 87 a operar indesejavelmente. Destacam-se as seguintes condições que causam operação indesejada do relé 87.

- Corrente transitória de magnetização (*corrente de inrush*);
- Saturação dos TCs devido aos valores elevados de corrente;
- Sobre-excitação do transformador;
- Energização solidária e defeitos internos aos transformadores;
- Eliminação de faltas próximas ao transformador.

Corrente transitória de magnetização durante a energização do transformador (*corrente de inrush*)

Durante o processo de energização do transformador, correntes diferenciais são produzidas na bobina de operação do relé de proteção devido ao fenômeno de magnetização do núcleo. A magnitude dessa corrente é definida pela inclinação da característica de magnetização na região de saturação e pela impedância de dispersão do transformador (HOROWITZ. PHADKE, 2008). Essas correntes de “*inrush*” apresentam-se como picos transitórios capazes de fazer operar a indevidamente o relé 87.

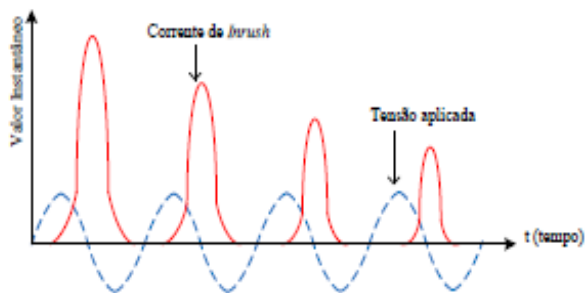


Figura 25. Forma típica da corrente de energização (IEEE37,91, 2008)

Nota-se na energização a predominância de harmônicas de 2ª ordem com uma ocorrência de 63% em relação a onda fundamental. Com o primeiro pico das correntes de “*inrush*” podendo atingir uma amplitude de 8 a 12 vezes a corrente nominal do transformador.

Embora a energização do transformador seja a causa principal de correntes de magnetização, outras causas podem ser apuradas como quaisquer transitórios no circuito do transformador ou recuperação de tensão após eliminação de faltas externas ou após energização de transformadores operando em paralelo com outro em serviço.

2.16 Saturação de TCs

Os TCs são um dos principais componentes que podem gerar erros no esquema de proteção diferencial, eles são dimensionados para trabalhar na facha linear da curva de saturação magnética, geralmente situações tais como curtos-circuitos fora da zona de proteção, podendo aumentar excessivamente o fluxo magnético que flui no núcleo ferromagnético dos TCs dependendo da sua magnitude e das propriedades físicas dos materiais usados na construção do núcleo podem levar a condição de saturação dos TCs. Criando desta forma falsas correntes no secundário dos TCs que podem ser mal interpretadas pelo relé diferencial, consequentemente gerando erros de operação no sistema de proteção diferencial.

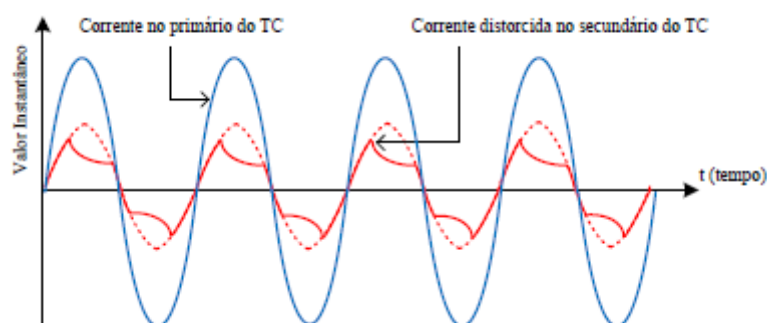


Figura 26. Forma de onda das correntes primárias e secundárias de um TC Saturado (OLIVEIRA, 2013.).

Em faltas internas, os harmônicos gerados pela saturação podem retardar o envio do sinal e a distorção pode fazer com que a corrente diferencial encontre-se na região de restrição, ou seja, região de não actuação.

Um dos métodos discutidos para evitar a saturação dos TCs consiste em aumentar o tamanho do núcleo do TC, alterar o material construtivo do TC de forma que o mesmo suporte altas densidades de fluxo. (Kezunovic, et al.,1993)

2.17 Sobre-excitação do transformador

Factores como rejeição de carga pelo transformador de potência gera condições de sobretensões e ou sub-frequência que estão acima dos limites do projetado para operação do transformador, causa aumento do fluxo magnético e levando o transformador a condições de saturação do núcleo. Durante o fenómeno de sobre-excitação, ocorrem distorções de 3ª e 5ª harmónicas nas formas de onda de corrente, que podem gerar um aumento na corrente diferencial que percorre o relé 87.(GUZAN et al.,2001), desta forma as harmónicas de 3ª e 5ª ordem podem ser usadas para detectar e discriminar condições de sobre-excitação do transformador.

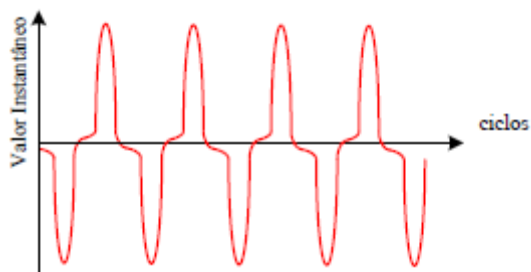


Figura 27.de excitação de um transformador sobre-excitado (HARLOW,2007)

2.18 Energização solidaria (*sympathetic inrush*)

Consiste na energização em paralelo de transformadores, nestas condições as correntes de energização e de ajustes dos relés de protecção são calculadas assumindo que os transformadores estão trabalhando de forma insolada. Porem esta energização em paralelo geralmente causam transitórios e sobretensões elevadas nos transformadores próximos. As correntes de energização presentes na

energização solidária possuem amplitudes superiores aquelas observadas quando ocorre a energização de um transformador que não opera em paralelo.

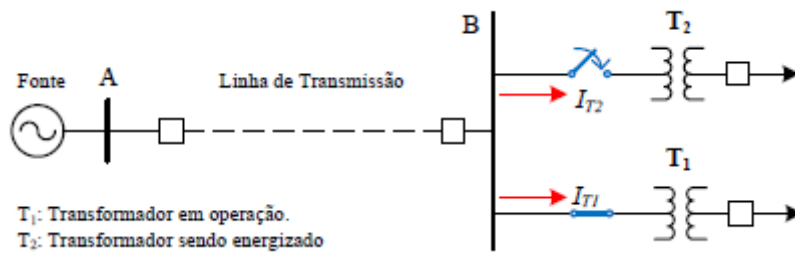


Figura 28. Esquematização do fenômeno de energização solidária (PHADKE, 2008)

2.19 Relé diferencial com retenção por harmônicas

O principal problema a ser superado pela proteção por a relé diferencial 87 do transformador, consiste em garantir que ele não irá operar pela Ação da corrente de magnetização durante a energização do transformador, ocorrência de sobre-excitação, ou durante faltas externas que provocam saturação dos TCs. E ao mesmo tempo apresentar sensibilidade para actuar em faltas internas de pequena magnitude.

O relé direcional com retenção de harmônicas possui um filtro que separa a corrente de frequência da rede (60/50 Hz) das outras frequências, assim, o relé pode distinguir o tipo de ocorrência no transformador, nos casos:

- Se houver um curto-circuito, tem-se a predominância da frequência fundamental de 60Hz e poucas harmônicas, nessas condições o relé diferencial deverá actuar normalmente dando sinal de “trip” para actuação do disjuntor
- Se for no caso de energização normal do transformador, haverá um grande conteúdo de harmônicas. Nesse caso a protecção diferencial não deverá actuar.

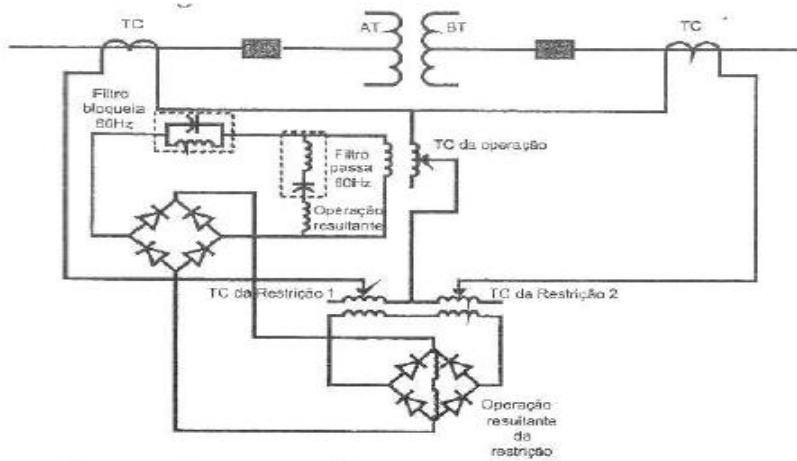


Figura 29. Relé diferencial com retenção por harmônicas, (Geraldo_Kinderman, 2005).

Funcionamento, considerando que o transformador está fora de operação, isto é, com os dois disjuntores em aberto, na energização fecha-se somente o do lado da alta tensão. Sequência de actuação:

Ocorrem correntes de “*inrush*” no lado da alta tensão

A corrente de “*inrush*” no secundário do TC do lado da alta tensão passará pela bobina de restrição 1 e pela bobina primária do TC de operação do relé diferencial;

No Secundário da bobina de restrição 1, a corrente de “*inrush*” será rectificada e passara totalmente na bobina de restrição resultante, criando torque negativo;

A corrente de “*inrush*” secundária do TC de operação do relé diferencial terá dois caminhos:

A componente fundamental de 60Hz passará pelo filtro correspondente alimentando a bobina de operação resultante, que cria um torque positivo.

O restante da corrente de “*inrush*”, sem a parcela fundamental 60Hz, passa pelo filtro de bloqueio de 60Hz, será rectificada na ponte do diodo e passará (alimentará) na bobina de restrição resultante, produzindo um torque negativo.

Logo:

$$I_{\text{operação resultante}} = I_{\text{fundamental 60Hz}} \quad (33)$$

$$I_{\text{restrição resultante}} = (2I_{\text{inrush}} - I_{\text{fundamental}}), \quad (34)$$

o torque de restrição é composto de duas parcelas:

$$\tau_{\text{restrição}} = \tau_{\text{inrush}} + \tau(I_{\text{inrush}} - I_{\text{fundamental}}), \quad (35)$$

desta forma :

$\tau_{\text{restrição}} \gg \tau_{\text{operacao}}$, e o relé não opera na energização do transformador .

2.20 Relé diferencial digital

Os relés diferenciais digitais para proteção de transformadores trabalham com a utilização dos valores discretos das ondas de corrente analisadas apoiando-se em algoritmos internos capazes de distinguir correntes de curto-circuito de correntes de “*inrush*”, sobre-excitação ou saturação de TCs operando em caso de curto-circuito em todos outros casos de operação do sistema devem Inibir sua operação.

Os algoritmos que gerenciam a operação do relé diferencial fundamentam-se:

- Na aplicação da transformada de Fourier sobre a corrente diferencial de operação obtendo-se a componente fundamental e de 2º harmônico desta corrente caso ela seja relativamente maior em relação a fundamental o relé não actua;
- O relé mede o tempo decorrido entre os picos sucessivos da corrente diferencial de operação, para determinar a lógica da sua operação;
- Na comparação do conteúdo da 2ª harmónica com a fundamental para determinar a lógica da sua operação;

As correntes de falta, em geral, apresentam-se como componentes frequência fundamental, enquanto que as correntes de magnetização apresentam maioritariamente presença de componentes de 2ª ordem. Já as correntes de sobre-excitação apresentam significativa presença de componentes de 3ª e 5ª harmônicas. Por sua vez, as correntes procedentes da saturação dos TCs apresentam componentes de 3ª ordem e não apresentam conteúdo de componentes harmônicos de ordem par.

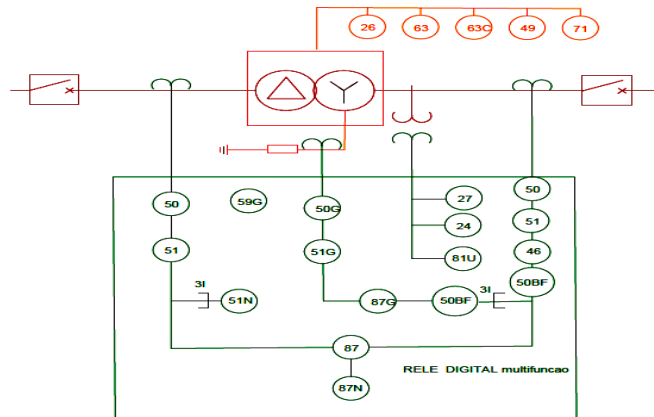


Figura 30. protecção de transformador com base ao rele digital e outos (adaptado)

3 Descrição do problema

De modo a reforçar o sistema de distribuição de energia eléctrica nas regiões da Matola e arredores, a empresa Electricidade de Moçambique EDM pretende executar um novo projecto, classificado como projecto de emergência, que consiste na instalação de dois novos transformadores abaixadores na subestação eléctrica da Matola, com o transformador de potência com a capacidade de 160MVA, tensão 275/66 kV com O primário ligado em delta Δ e o secundário em estrela Y. Neste projecto pretende-se determinar os parâmetros do transformador de corrente TCs e os ajustes no relé diferencial 87.

Esquema de ligação

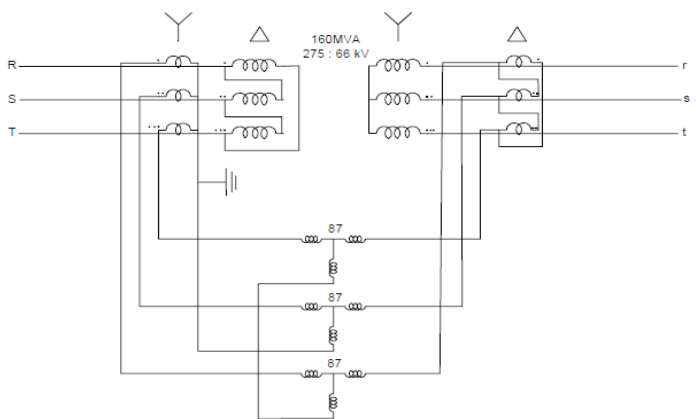


Figure 31. Esquema de ligação dos TCs no transformador em estudo (autor)

3.1 Determinação das correntes nominais do primário e do secundário:

$$I_p = \frac{S}{\sqrt{3} \times U} = \frac{160 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 275 \times 10^3} = 335,91A$$

$$I_s = \frac{S}{\sqrt{3} \times U} = \frac{160 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 66 \times 10^3} = 1399,64A$$

3.2 Dimensionamento dos TCs:

Corrente nominal do primário do TC ligado em estrela (Y), no primário do transformador.

$$I_{pTCp} = 400A > I_p = 335,91A$$

$$RTC = \frac{400}{5} = 80$$

Corrente nominal do primário TC ligado em delta (Δ), no secundário do transformador

$$I_{sTCp} = 1500A > I_p = 1399,64A$$

$$RTC = \frac{1500}{5} = 300$$

3.3 Corrente do secundário dos TCs:

Corrente do secundário do TC ligado em estrela (Y)

$$I'_{pTCs} = \frac{I_p}{RTC} = \frac{335,91}{\frac{400}{5}} = 4,19A$$

Corrente do secundário TC ligado em delta (Δ)

$$I'_{sTCs} = \sqrt{3} \times \frac{I_p}{RTC} = \sqrt{3} \times \frac{1399,64}{\frac{1500}{5}} = 8,08A$$

3.4 Erro induzido na comparação das correntes de chegada ao relé:

$$\Delta I(\%) = \frac{I'_{sTCs} - I'_{pTCs}}{I'_{pTCs}} \times 100\%$$

$$\Delta I(\%) = \frac{8,08 - 4,19}{4,19} \times 100\% = 92,84\%$$

O erro induzido na comparação das correntes de chegada ao relé é muito alto de 92,84%, então, é preciso substituir o transformador de corrente TC com o $RTC = \frac{1500}{5}$, para um que introduza menor desvio, escolheu-se um TC com $RTC = \frac{2400}{5}$.

Calcula-se a nova corrente do secundário do I'_{sTCs} do TC ligado em delta (Δ)

$$I'_{sTCs} = \sqrt{3} \times \frac{I_p}{RTC} = \sqrt{3} \times \frac{1399,64}{\frac{2400}{5}} = 5,05A$$

O novo desvio será,

$$\Delta I(\%) = \frac{5,05 - 4,19}{4,19} \times 100\% = 20,52\%$$

O condutor a ser usado no secundário do transformador segundo a norma portuguesa NP 665, será XAV3G1,5 0,6/1kV

3.5 Escolha dos TAPS

$$\frac{I'_{sTCp}}{TAP1} = \frac{I'_{sTCs}}{TAP2}$$

$$\frac{TAP1}{TAP2} = \frac{I'_{sTCs}}{I'_{sTCp}} = \frac{5,05}{4,19} = 1,2052.$$

Deve-se escolher o valor mais próximo a razão de TAPS, na matriz combinação de TAPS do relé 87.

$$TAP = \frac{TAP1}{TAP2} = \frac{4,6}{3,8} = 1,211$$

$$I'_{sTCp} = 5,05A > TAP1 = 4,6A$$

$$I'_{sTCs} = 4,19A > TAP2 = 3,8A$$

A escolha da relação dos Taps garante que as correntes nas bobinas de restrição sejam maiores e mais próximas possíveis dos Taps escolhidos

3.6 Ajuste de declividade

Corrente de restrição

$$I_{restrição} = \left| \frac{I'_{sTCs} + I'_{sTCp}}{2} \right| = \left| \frac{5,05 + 4,19}{2} \right| = 4,62A$$

Corrente de operação

$$I_{\text{operação}} = |I'sTCs - I'sTCp| = |5,05 - 4,19| = 0,86$$

$$\text{Declividade (\%)} = \frac{I_{\text{operação}}}{I_{\text{restrição}}} \times 100\% = \frac{0,86}{4,62} \times 100\% = 18,6\%$$

Então a declividade escolhida é de 20%

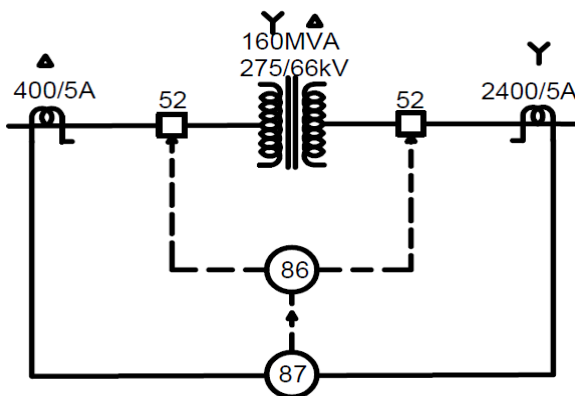


Figure 32. Diagrama esquemático da proteção diferencial com relé auxiliar de bloqueio de religamento função 86.

3.7 Equipamento selecionado

3.7.1 Modelo do relé selecionado

Escolheu-se o modelo da fabricante SEL-(SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES), série SEL-787, com proteção diferencial percentual, para transformadores de dois, três ou quatro enrolamentos e EnterNET/ ip. Função diferencial com duas inclinações do (slope) com entradas analógicas de 4-20mA (opcionais) ou entradas RTD, opera a condições extremas de -40° a 85°C tem certificação ATEX e Underwriters laboratories (UL) Classe1/ Zona2, para uso em ambientes perigosos.

3.7.2 Modelo de TCs selecionados

Escolheu-se transformadores de corrente da fabricante "artech", sendo:

- Para o lado da alta tensão 275kV, Modelo para linha CA, com isolamento em papel-óleo até 800kV, corrente do primário de 1A a 5000A,

corrente de curto-circuito 120KA/1s. Múltiplas relações de transformação, classe de exatidão 0,1/0,15. Modelo: CA-300, com tensão máxima de serviço 300kV

- Para o lado da Média tensão 66kV, Modelo para linha CX, com isolamento a seco até 72,5kV, corrente do primário de 1A a 5000A, corrente de curto-circuito 120KA/1s. Múltiplas relações de transformação, classe de exatidão 0,1/0,15. Modelo: CXG-72, com tensão máxima de serviço 72kV

Cotação

Equipamento	Quant	modelo
TCs	3 unit	CA-300
TCs	3 unit	CXG-72
Relé diferencial	3 unit	SEL-787
Relé de bloqueio de religamento	3 unit	BJ-8RP
Cabo	60 m	XAV3G1,5 0,6/1kV
Terminais Cu 2,5mm	36 unit	
Tubo PVC 25mm	6 unit	

4 Resultados

O relé diferencial é um dispositivo de protecção de um equipamento cuja função de protecção fundamenta-se na comparação da correntes eléctrica de entrada e saída do equipamento. A protecção diferencial é principal meio de protecção contra defeitos internos num transformador de potência.

.Verificou-se que as faltas apresentam-se como componentes frequência fundamental, enquanto que outros eventos no sistema eléctrico capazes de gerar erros na operação do relé diferencial 87 apresentam maioritariamente presença de componentes de 2^a, 3^a e 5^a ordem. Devendo o relé diferencial 87 usar filtros e programas de distinção da onda fundamental e das harmónicas, evitando assim o sinal de “*trip*” indesejado.

Dimensionou-se os TCs empregues no relé diferencial, seleccionando-se TCs com razões de 400/5 e 2400/5, determinou-se o desvio percentual do relé 87 e escolheu-se a curva de operação, com uma declividade de 20%.

Escolheu-se os TCs, Modelo: CA-300 e Modelo: CXG-72, e o relé diferencial digital Modelo: SEL-787

5 Conclusão

Apos a realização do projeto constatou-se para realizar-se a proteção diferencial do transformador de 160MVA de 275/66kV, seria necessário TCs com as razões de transformação de $RTC1 = \frac{400}{5}$ e $RTC2 = \frac{2400}{5}$ para o primário e o secundário respectivamente, funcionando com os seguintes valores recomendados de TAPs 4,6A para o lado da media tensão e 3,8 A para o lado da alta tensão, que geravam um ajuste percentual de 18,6%, consoante este ajuste escolheu-se a curva de declividade de 20%.

Concluiu-se que as principais condições de operação que provocam a actuação indesejada do relé diferencial é energização do transformador que caracterizam-se por originar elevadas quantidade de harmónicas de 2ª ordem, saturação dos TCs apresentam componentes de 3ª ordem e não apresentam conteúdo de componentes harmônicos de ordem par, Sobre-excitação do transformador caracterizados por distorções de 3ª e 5ª harmónica.

Portanto a protecção diferencial deverá actuar simplesmente para o caso de faltas internas na zona de protecção delimitada pelos dois TCs, o relé deve ser capaz de distinguir as correntes de faltas caracterizados pelo alto conteúdo da onda fundamental das correntes resultantes da energização do transformador, Sobre-excitação e saturação dos TCs inibindo seu funcionamento.

Os equipamentos Seleccionados foram TCs, Modelo: CA-300 Para o lado da alta tensão 275kV do transformador, Modelo: CXG-72 Para o lado da Média tensão 66kV do transformador, e o relé diferencial digital Modelo: SEL-787.

6 Referência bibliográfica

Geraldo_Kinderman. Proteção de sistema elétricos de potência, 2ed. Florianópolis 2005.

Harlow,T.H. Electric power transformer Engineering, 2nd, ed. New York; CRC Press, 2007.

Horowitz.S.H, Phadke.A.G. Power system relaying. 3rd, ed, Baldock, research Studies press, 2008.

OLIVEIRA, J. C.; COGO, J. R.; ABREU, J. P. G. Transformadores: Teoria e Ensaio. São Paulo, Edgard Blucher, 1984.

IEEE Power, Energy SOCIETY. IEEE Std C37.91. Guide for protecting, power transformer, New York, IEEE, 2008.

João Mamede Filho, Manual de equipamentos elétricos, 4ed. Rio de Janeiro, LTC, 2007.

J.Duncan glover, Mulukutla S.Sarma, Thomas J.Overby, Power System Analysis and Design, 5ed. USA, Stamford, 2008.

José Dores Costa, 2010 TRANSFORMADOR, *Máquinas Eléctrica* ENIDH vol.1 p. 30-42.

Kezunovic,M.;Fromen,C.W. and Phillips, F.” Experimental evaluation of emtp-based current transformer models for protective relay transient study”. IEEE Transactions on power Delivery, vol. 9. n1.p .405-413.

Stephen J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals McGraw-Hill, 5th Edition, 2011.

Anexos

Anexo 1

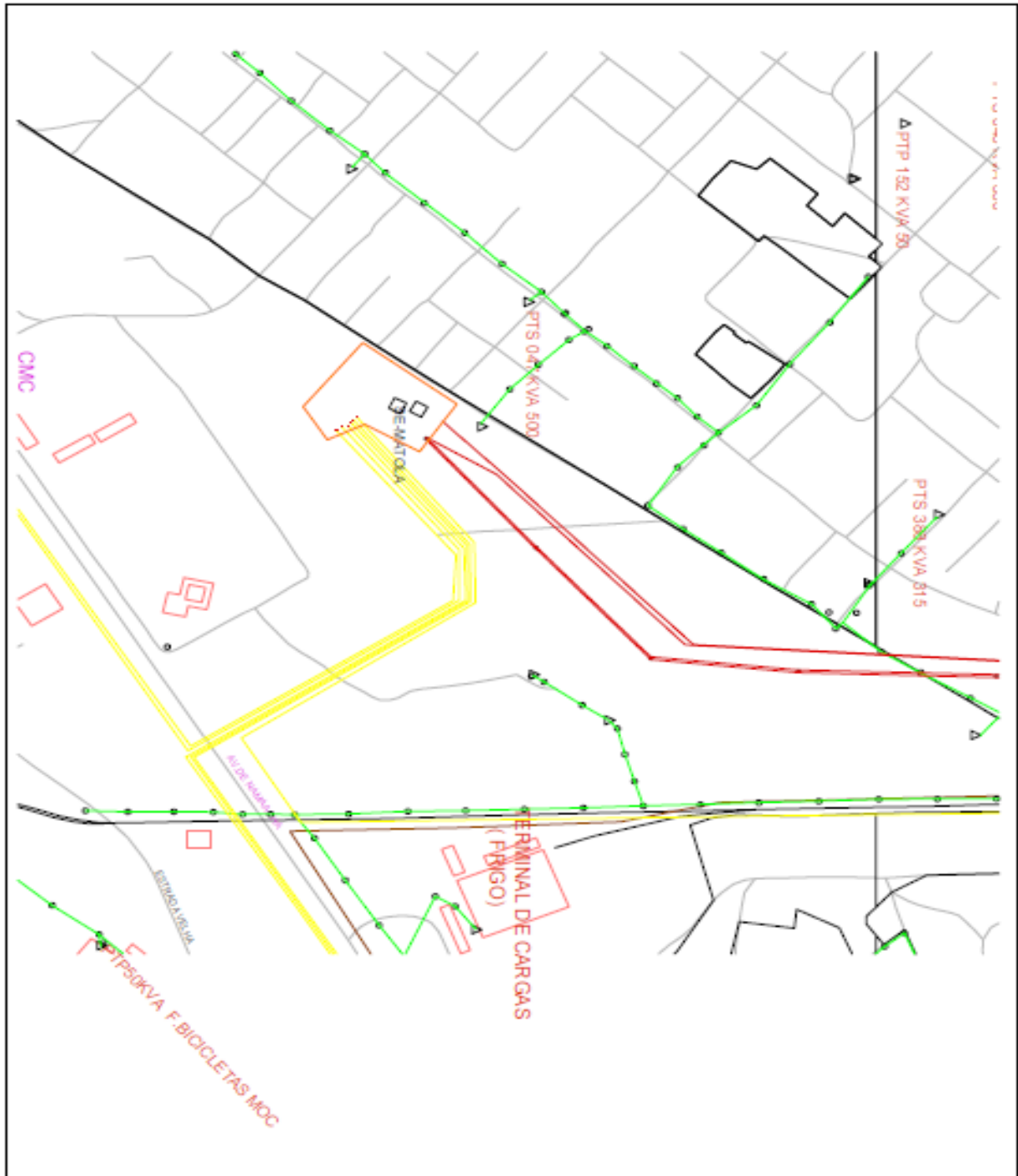


Figura A1-1 Vista da subestação eléctrica da Matola pelo programa de redes NSIM e GPS (autor).

Anexo 2

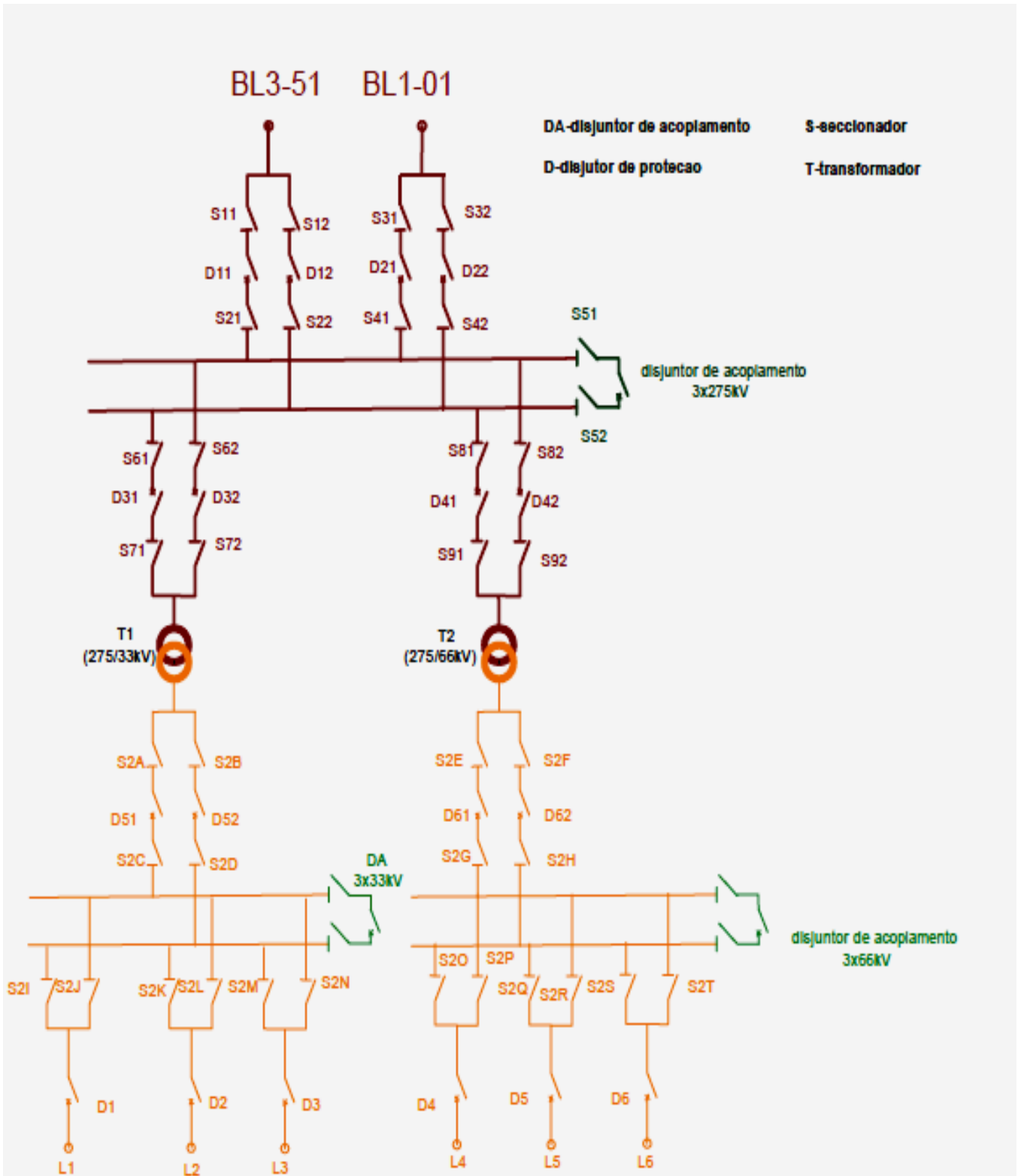


Figura A2-2 Proposta do esquema da SE MATOLA (autor).

Anexo 3



TRANSFORMADORES DE CORRENTE > Linha CA

LINHA CA

Isolamento em papel-óleo:
Linha CA até 800 kV.



1. Tampa superior
2. Sistema de compensação do volume de óleo
3. Núcleos e enrolamentos secundários
4. Terminal primário
5. Enrolamento primário
6. Cabeça
7. Malha capacitiva
8. Isolador
9. Óleo isolante
10. Conexão à terra reforçada
11. Alças de elevação
12. Base
13. Terminal para medição de tangente delta
14. Terminais secundários
15. Terminal de aterramento
16. Válvula de amostragem de óleo

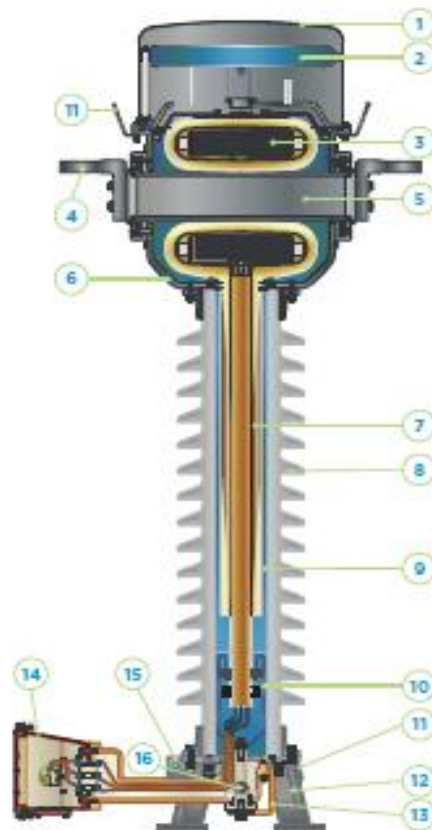


Figura A3-3 Transformador de corrente linhagem CA (artech).

Anexo 4

Tabela A4-4 características dos TCs linhação CA (arteche).

Isolamento do papel-óleo > Modelo CA									
Modelo	Tensão máxima de serviço (kV)	Níveis de isolamento			Distância de escoamento (mm)	Dimensões			Peso (kg)
		Frequência Industrial (kV)	Impulso atmosférico (kV crista)	Impulso de manobra (kV crista)		A (mm)	T (mm)	H (mm)	
CA-36	36	70	170	-	900	350	1350	1750	220
CA-52	52	95	250	-	1300	350	1350	1750	220
CA-72	72.5	140	325	-	1825	350	1350	1750	220
CA-100	100	185	450	-	2500	350	1350	1750	220
CA-123	123	230	550	-	3075	350	1785	2230	265
CA-145	145	275	650	-	3625	350	1785	2230	265
CA-170	170	325	750	-	4250	350	1945	2390	305
CA-245	245	460	1050	-	6125	350	2590	2975	375
		395	950						
CA-300	300	460	1050	850	7500	450	3070	3455	600
CA-362	362	510	1175	950	9050	600	4015	4495	1090
CA-420	420	630	1425	1050	10500	600	4015	4495	1090
		575	1300						
CA-525	550	680	1550	1175	13125	600	4525	5195	1150
CA-550	550	800	1800	1175	13750	600	5205	5960	1700
CA-765	800	880	1950	1425	15300	600	5720	6650	2250
		975	2100	1550					

Anexo 5



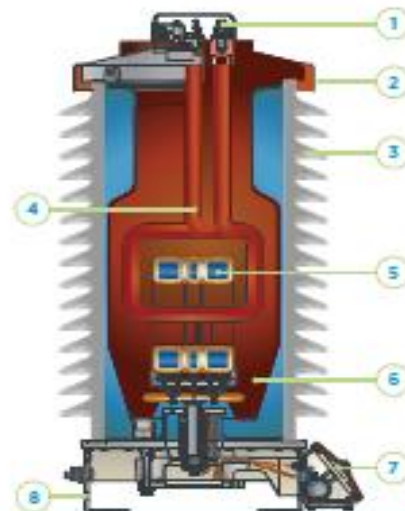
TRANSFORMADORES DE CORRENTE > Linha CX

LINHA CX

Isolamento a seco:
Linha CX até 72,5 kV.



1. Terminal primário
2. Anel equipotencial
3. Isolador
4. Enrolamento primário
5. Núcleos e enrolamentos secundários
6. Isolamento com resina
7. Caixa de terminais secundários
8. Terminal de aterramento



14

Transformadores para Instrumentos | Alta Tensão

Figura A5-5 Transformador de corrente linhaem CX (artech).

Anexo 6

Tabela A 6–6 características dos TCs linha CX (arteche).

Isolamento a seco > Linha CX							
Modelo	Tensão máxima em serviço (kV)	Níveis de Isolamento		Distância de escoamento (mm)	Dimensões		Peso (kg)
		Frequência Industrial (kV)	Impulso atmosférico (kV crista)		A (mm)	H (mm)	
CXD-24	24	50	125	744	210	462	43
CXE-24	24	50	125	744	250	480	72
CXE-36	36	70	170	900	250	532	80
CXG-36	36	70	170	900	250	670	150
CXE-52	52	95	250	1440	250	712	111
CXG-52	52	95	250	1560	250	798	186
CXH-52	52	95	250	1560	330	800	263
CXG-72	72,5	140	325	1860	250	918	190
CXH-72	72,5	140	325	1860	330	920	305

Anexo 7



Figura A7-7 Relé diferencial digital modelo SEL-787,(SEL,2022)

Anexo 8

ACTA DE ENCONTRO REGULARES

Anexo 9

RELATÓRIO DE PROGRESSO

Anexo 10

GUIAS DE AVALIAÇÃO

Anexo 11



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA _____

F2 – GUIA DE AVALIAÇÃO DA APRESENTAÇÃO ORAL E DEFESA

Nome do estudante: _____

Referência do tema: _____ Data: ___/___/___

Título do tema:

1. Introdução										
1.1. Apresentação dos pontos chaves na introdução (Contexto e importância do trabalho)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Secção 1 subtotal(max: 10)										

2. Organização e explanação										
2.1. Objectivos	1	2	3							
2.3. Metodologia	1	2	3	4						
2.4. Resultados, sua análise e discussão	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2.5. Conclusões e aplicação dos resultados (recomendações)	1	2	3	4	5	6	7	8		
Secção 2 subtotal(max: 25)										

3. Estilo da apresentação										
3.1. Uso efectivo do tempo	1	2	3	4	5					
3.2. Clareza, tom, vivacidade e entusiasmo	1	2	3	4	5					
3.3. Uso e qualidade dos audio-visuais	1	2	3	4	5					
Secção 3 subtotal(max: 15)										

4. Defesa										
4.1. Exactidão nas respostas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.2. Domínio dos conceitos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.3. Confiança e domínio do trabalho realizado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.4. Domínio do significado e aplicação dos resultados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.5. Segurança nas intervenções	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Secção 3 subtotal(max: 50)										

Total de pontos (max: 100)		Nota (=Total*0,2)	
-----------------------------------	--	--------------------------	--

Anexo12



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA _____

F3 - FICHA DE AVALIAÇÃO GLOBAL

Nome do estudante: _____

Referência do tema: _____ Data: __/__/____

Título _____ do _____ tema: _____

AVALIADOR	NOTA OBTIDA	PESO(%)
Relatório escrito (F1)	N1=	A= 60
Apresentação e defesa do trabalho (F2)	N2=	B= 40

CLASSIFICAÇÃO FINAL $=(N1 \cdot A + N2 \cdot B) / 100$	
--	--

OS MEMBROS DO JURI:

O Presidente	
O Oponente	
Os Supervisores	