

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Elaboração de um Guia para a Seleção de Relés
em Redes Isoladas**

Ribamar Nelson Ferreira

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Professor Doutor Helder Filipe Duarte Leite

Setembro de 2012

" A vida, nos nossos dias, não se compreende sem a eletricidade.
Cada vez esta conquista maior campo de ação e faculta maiores comodidades."

Ezequiel de Campos,
1924

© Ribamar Nelson Ferreira, 2012

Resumo

Em sistemas elétricos de energia (SEE) a preservação de qualidade e continuidade de serviço é essencial. Por vezes a continuidade de serviço é afetada pela ocorrência dos mais variados defeitos, responsáveis pela ocorrência de avarias nos geradores, transformadores, linhas e outros componentes do sistema.

O sistema elétrico de energia é dotado de sistemas de proteção próprio que assume um papel importante no funcionamento e exploração da rede elétrica. O sistema de proteção apesar de não evitar defeitos, é fundamental para minimizar a sua propagação.

As redes isoladas são redes de dimensão relativamente pequena, possuindo pouca carga e alimentada por geradores síncronos de pequena dimensão. Sendo redes eletricamente fracas, sistema de proteção desempenha o papel preponderante. Assim, é indispensável uma aposta em sistema de proteção eficaz, para a melhoria de continuidade de serviço.

Esta dissertação visa a elaboração de um documento que sirva de guia para seleção de relés de proteção para redes elétricas isoladas. Assim, este trabalho sugere soluções de relés de proteção multifunções de tecnologia digital para a proteção de pequenas redes elétricas isoladas.

Palavras-Chave:

Curto-circuito, Média Tensão, Qualidade de Serviço, Redes isoladas, Relé de proteção, Rede de Distribuição, Rede aérea, Rede subterrânea, Sistemas de proteção.

Abstract

In power systems preservation of quality and continuity of service is essential. Sometimes the continuity of service is affected by the occurrence of various defects, responsible for the occurrence of faults in generators, transformers, lines and other system components. The electric power system is equipped with protection systems which itself plays an important role in the operation of the power grid. The protection system does not prevent defects, but it is essential to minimize its spread.

The isolated networks are networks of relatively small size, low power and having fed by small diesel generators. Being electrically weak networks, protection system plays the leading role. Thus, it is essential to have a bet on effective protection system, to improve service continuity.

This thesis aims drafting a document that serves as a guide for selection of protective relays for isolated grids. Thus, this work suggests solutions multifunction protection relays of digital technology for the protection of small isolated grids.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor Helder Filipe Duarte Leite, pela dedicação, apoio e disponibilidade manifestada ao longo da realização da dissertação.

Ao DEEC, o meu agradecimento pelo apoio prestado.

A minha família pelo carinho, motivação e inspiração, tornando possível a realização do meu percurso académico.

Agradeço a todos os docentes que me ajudaram na minha vida académica.

Aos colegas e amigos e todos que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Índice

Resumo	iv
Abstract.....	vi
Agradecimentos	viii
Índice	x
Lista de Figuras	xii
Lista de tabelas	xv
Abreviaturas e Símbolos	xvi
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 - Considerações Iniciais.....	1
1.2 - Motivação e Objetivos	2
1.3 - Estrutura da Dissertação	2
Capítulo 2	3
Redes Isoladas: Caraterização.....	3
2.1 - Introdução	3
2.2 - Caraterísticas das redes isoladas em relação à tensão e estrutura topológica	4
a) - Níveis de Tensão	4
b) - Função	5
c) - Estrutura Topológica	5
2.3 - Redes de Distribuição em Média Tensão.....	6
2.4 - Subestação e Posto de transformação	7
2.4.1 - Subestação	8
2.4.2 - Posto de transformação.....	13
2.5 - Resumo	18
Capítulo 3	19
Sistemas de proteção em redes elétricas de energia	19
3.1 - Introdução e Considerações Gerais	19
3.2 - Evolução das Proteções.....	20
3.3 - Constituição e princípios de funcionamento dos sistemas de proteção.....	22
3.3.1 - Órgãos de entrada do sistema de proteção.....	22
3.3.2 - Relés de proteção	23

3.3.3 - Classificação dos relés de proteção	24
3.3.4 - Órgãos de acionamento	33
3.3.5 - Fontes de alimentação auxiliar	34
3.4 - Requisitos do sistema de proteção	34
3.4.1 - Zonas de proteção e redundâncias	34
3.4.2 - Seletividade	35
3.4.3 - Sensibilidade	36
3.4.4 - Rapidez.....	37
3.4.5 - Segurança.....	38
3.4.6 - Fiabilidade.....	38
3.4.7 - Economia.....	39
3.5 - Resumo	39
Capítulo 4	40
Potência de Curto-Circuito versus Sistemas de proteção.....	40
4.1 - Introdução.....	40
4.2 - Potência de curto-circuito em redes isoladas	41
4.3 - Pequenos geradores síncronos e suas características.....	43
4.3.1 - Aspectos construtivos e princípio de funcionamento	43
4.4 - Influência do Baixo Potência de Curto-Circuito nos sistemas de Proteção em redes isoladas	46
4.6 - Resumo	47
Capítulo 5	48
Guia para Seleção de Relés de Proteção em Redes Isoladas	48
5.1 - Introdução.....	48
5.2 - Aplicação de tecnologia digital na proteção da rede elétrica	48
5.2.1 - Arquitetura de um relé digital	49
5.3 - Proteção Digital de Gerador Síncrono	51
5.3.1 - Função de proteção para o gerador	53
5.4 - Proteção digital de transformador de potência	59
5.4.1 - Função de proteção para o transformador.....	60
5.5 - Proteção digital dos Barramentos.....	64
5.5.1 - Função de proteção para barramento	64
5.6 - Proteção digital de linhas e cabos	67
5.6.1 - Função de proteção para as saídas.....	67
5.7 - Proteção digital para banco de condensadores	69
5.7.1 - Função de proteção de proteção para banco de condensadores	70
5.8 - Resumo	71
Capítulo 6	73
Conclusão e trabalhos Futuros.....	73
6.1 - Conclusões	73
6.2 - Trabalhos Futuros.....	73
6.2.1 - Impacto da penetração de fontes renováveis no sistema de proteção em redes isoladas	74
Referências	75
Anexo A.....	78
Classificação das Funções de Proteção pela Nomenclatura ANSI/IEEE	78

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Exemplo de esquemas de operação utilizados em redes de distribuição de média tensão (redes isoladas).	6
Figura 2.2 - Exemplo de pequena subestação/posto de seccionamento média tensão	10
Figura 2.3 - Exemplo de sala de comando de uma subestação	11
Figura 2.4 - Exemplo de esquema simplificado de uma subestação (redes isoladas)	13
Figura 2.5 - Interruptor-seccionador corte no ar e modular de corte em SF6	16
Figura 2.6 - Disjuntor média tensão de corte em SF6	16
Figura 2.7 - Transformador trifásico de distribuição imerso em óleo	16
Figura 2.8 - Quadro Geral Baixa Tensão do posto de transformação	17
Figura 2.9 - Ligação à terra no posto de transformação	17
Figura 3.1 - Evolução das proteções	21
Figura 3.2 - Esquema de um subsistema de proteção	22
Figura 3.3 - Órgãos constituintes do relé de proteção	23
Figura 3.4 - Relé elementar de atração eletromagnética [11]	25
Figura 3.5 - Relé de indução Eletromagnética	25
Figura 3.6 - Corrente induzido conjugado desenvolvido no disco do relé	26
Figura 3.7 - Princípio de funcionamento de relé estático	27
Figura 3.8 - Relé de tecnologia digital	27
Figura 3.9 - Curva caraterístico tempo instantâneo	29
Figura 3.10 - Curva caraterístico tempo definido	30
Figura 3.11 - Curva Caraterístico tempo inverso e tempo inverso com mínimo definido	30
Figura 3.12 - Curva caraterística dos três grupos de tempo dependente	31

Figura 3.13 - Caraterístico tempo combinado	32
Figura 3.14 - Exemplo de sala de baterias de uma subestação	34
Figura 3.15 - Zonas de proteção [5]	35
Figura 3.16 - Diferentes zonas de atuação de um relé	35
Figura 3.17 - Seletividade por zonas de proteção [13]	36
Figura 4.1 - Esquema unifilar de Thevenin da rede a montante (grupo gerador)	41
Figura 4.2 - Esquema unifilar simplificado de grupo geradores ligados em paralelo	42
Figura 4.3 - Geradores acionados por motores à diesel [14]	43
Figura 4.4 - Corte máquina síncrona de polos salientes e polos lisos [15]	44
Figura 4.5 - Exemplo de máquina síncrono operando como gerador [3]	45
Figura 5.1 - Modelo de organização dos sistemas de proteção, comando e controlo das subestações de distribuição [19]	49
Figura 5.2 - Constituição de um relé digital de proteção [9]	50
Figura 5.3 - Esquema unifilar de ligação de pequenos e médios geradores à rede [11]	51
Figura 5.4 - Esquema representativo de sistema que envolve o funcionamento do gerador ..	51
Figura 5.5 - Ligação de neutro do gerador à terra	52
Figura 5.6 - Esquema unifilar de proteção de pequeno gerador síncrono com ligação direto ao barramento	58
Figura 5.7 - M-3425 Relé digital multifunção para a proteção do gerador síncrono [23]	59
Figura 5.8 - Princípio de funcionamento do relé Buchholz	61
Figura 5.9 - Proteção de transformador por relé digital Multifunções [24]	62
Figura 5.10 - TPU TC420 Relé digital multifunção para a proteção do transformador	63
Figura 5.11 - Esquema de proteção de barramento	66
Figura 5.12 - TPU B420 Relé digital multifunção para a proteção de barramento	66
Figura 5.13 - TPU S420 Relé digital multifunção para a proteção de linhas e cabos subterrâneos	68
Figura 5.14 - Triângulo de potência	69
Figura 5.15 - Esquemática de uma unidade de condensador típico [13] e banco de condensadores	70
Figura 5.16 - TPU C420 Relé digital multifunção para a proteção de banco de condensadores	71

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Equipamentos dos postos de transformação aéreos [8]	14
Tabela 2.2 – Potência dos transformadores [8]	14
Tabela 2.3 – Potência instaladas dos transformadores	15
Tabela 3.1 – Evolução das protecções	21
Tabela 3.2 – Valores de α e k segundo norma IEC 60255-3	31
Tabela 3.3 – Valores típicos de eliminação de defeitos (tempo de atuação das protecções) .	37
Tabela 5.1 - Defeitos e protecções do gerador [22]	58
Tabela 5.2 - Principais defeitos de um transformador	63

Abreviaturas e Símbolos

ANSI	American National Standards Institute
AT/MT	Alta Tensão para Média Tensão. Representa as subestações de Alta Tensão para Média Tensão
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
DST	Descarregador de Sobretensão
Fe	Força eletromagnética
Fm	Força mecânica da mola
f	Frequência
IED	Intelligent Electronic Device
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
I_{ccmin}	Corrente de curto-circuito mínimo
K_s	Coeficiente de sensibilidade
kV	kilovolts
km	kilometro
MT	Média tensão
MT/BT	Média Tensão para Baixa Tensão. Representa os postos de transformação de média Tensão para Baixa Tensão
MVA	Mega volt-ampere
P	Potência Ativa
PT	Posto de Transformação
Q	Potência Reativa
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
S	Potência aparente
SPCC	Sistema de Proteção Comando e Controlo
S_{cc}	Potência de curto-circuito
SEE	Sistema Elétrico de Energia
TI	Transformador de Intensidade
TT	Transformador de Tensão

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Considerações Iniciais

A dependência da sociedade moderna à energia elétrica torna indispensável o cumprimento da nobre missão dos sistemas elétricos de energia - garantia de qualidade e continuidade de serviço. O sistema de proteção desempenha papel preponderante no cumprimento dessa missão.

Os principais defeitos que ocorrem numa rede de distribuição de energia elétrica são:

- Curto-circuito;
- Sobrecarga;
- Sobretensão;
- Subtensão;
- Variação de frequência;
- Desequilíbrio de cargas;
- Oscilação de potência.

A ocorrência de um defeito num Sistema Elétrico de Energia poderá causar danos nos fornecedores e utilizadores de energia e ainda, provocar interrupção no fornecimento da energia elétrica, pelo que este deverá ser detetado, localizado e rapidamente eliminado.

Para a eliminação dos defeitos é indispensável um sistema de proteção eficaz. O sistema de proteção é projetado de acordo com as características e os requisitos do sistema de energia, sendo constituído essencialmente pelos seguintes órgãos:

- Órgão de medida (TI e TT);
- Relé de proteção;
- Órgão de acionamento (disjuntor).

1.2 - Motivação e Objetivos

Ao contrário do que acontece na Europa, onde a maior parte das redes elétricas são interligadas, ainda existem um número muito significativo de países continentais e ilhas (Madeira, Açores, Creta, Canárias, Chipre, entre outras) e localidades onde as redes são isoladas (não dispõem de ajuda de redes vizinhas que a possam socorrer em situações mais críticas). É também o caso da maioria das redes elétricas dos países africanos, onde as redes são isoladas e dispersas por grandes cidades (grandes centros de consumo).

As redes isoladas são redes de dimensão relativamente pequena, com poucas cargas, geralmente alimentada por geradores síncronos de pequena potência, quando comparado com as redes interligadas. Sendo redes eletricamente fracas, estão muito suscetíveis a variações de frequência resultantes de desequilíbrio entre carga e produção.

Apesar da evolução tecnológica na área de sistemas de proteções, muitas destas redes, mais concretamente as redes elétricas dos países africanos, só utilizam sistemas de proteções baseados em relés eletromecânicos.

É objetivo desta dissertação, elaborar um guia para a seleção de relés digitais de proteção para as redes elétricas isoladas. Apresentando requisitos necessários para facilitar a migração da tecnologia de proteção eletromecânica para a tecnologia digital. Aproveitando assim, as vantagens e as valências oferecidas por relé digital.

A instalação de relés de tecnologia digital pode contribuir para melhoria da continuidade de serviço e, consequentemente, da qualidade de serviço prestada.

1.3 - Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é constituída por seis capítulos e um anexo.

O Capítulo 1, o atual capítulo é feito uma breve introdução aos assuntos que irão ser abordados nos restantes capítulos.

O Capítulo 2, apresentam-se as redes elétricas isoladas e suas principais características. Também são descritos postos de transformação e subestações.

O Capítulo 3, é dedicado à descrição do sistema de proteção em redes de energia elétricas, são igualmente descritos neste capítulo os requisitos e a constituição de um sistema de proteção.

O Capítulo 4, centra-se na descrição de potência de curto-circuito em redes elétricas isoladas e a sua influência em sistemas de proteção.

O Capítulo 5, consiste na elaboração de guia para a seleção de relés digitais em sistemas elétricos isolados.

O sexto e último Capítulo, apresentam-se as conclusões mais importantes que é possível retirar do trabalho desenvolvido, propondo-se também possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Redes Isoladas: Caracterização

Neste capítulo será descrita a constituição de uma rede isolada genérica, na sua estrutura topológica, modo de exploração e níveis de tensão. Serão igualmente caracterizadas as subestações e os postos de transformação.

2.1 - Introdução

O sistema elétrico de energia (SEE) é definido como sistema que converte em energia elétrica outras formas de energia, transportando a energia desde os locais de geração até aos pontos de consumo, com finalidade de garantir os seguintes requisitos, segundo [1]:

- Controlar o equilíbrio entre potência ativa e reativa;
- Fornecer energia ao mais baixo custo, respeitando o ambiente;
- Satisfazer padrões mínimos de fiabilidade e estabilidade da tensão e frequência.

SEE é constituído por instalações de serviço destinado à produção, transporte e distribuição de energia elétrica. No caso das pequenas redes isoladas (caso de pequenas ilhas ou algumas redes de pequena dimensão), esta definição pode-se restringir apenas à produção e distribuição, não havendo necessidade de efetuar transporte de energia, devido à proximidade entre o local da geração e o centro de consumo.

As redes isoladas são pequenas redes individuais, com poucas cargas, alimentadas por máquinas de pequena dimensão quando comparada com as redes interligadas, não dispõem de ajuda das redes vizinhas que as possam socorrer em situações mais críticas. É comum encontrar, em redes com estas características, um grupo gerador de emergência, fazendo o papel de reserva. As redes isoladas têm especificidades que as caracterizam, uma delas é a baixa potência de curto-circuito (devido à pouca geração).

Normalmente as redes isoladas, são redes vulneráveis a severas perturbações e pouca capacidade de promover uma exploração económica dos meios de produção da energia

elétrica. Numa rede com estas características a saída de um grupo gerador poderá provocar um forte desequilíbrio na geração-carga do sistema, e consequentemente pode fazer com que a variação da frequência atinja valores inaceitáveis caso não haja reserva girante suficiente [2].

Em muitos casos, as redes isoladas são consideradas como uma opção economicamente viável para satisfazer as necessidades energéticas. São normalmente utilizadas em locais como:

- Zonas de baixa densidade populacional, onde o custo de instalação de uma rede pública se torna muito alto;
- Locais onde não seja viável o fornecimento de energia elétrica através dos grandes grupos Alternadores/geradores, como por exemplo: ilhas;
- Aldeias rurais longe de grandes redes elétricas;
- Indústrias longe de grandes centros de consumo.

O sistema produtor das redes isoladas baseia-se essencialmente na exploração de centrais equipadas com geradores síncronos de funcionamento contínuo, utilizando o gásóleo e o fuel como combustível [2].

2.2 - Características das redes isoladas em relação à tensão e estrutura topológica

Para o estudo das proteções, as características das redes que mais influenciam as correntes de curto-circuito são:

- Composição da rede (aérea e/ou subterrânea);
- Potência de curto-circuito no barramento da subestação;
- Comprimento da linha;
- Níveis de tensão.

Segundo [3], as redes elétricas podem ser classificadas segundo os três critérios seguintes:

a) - Níveis de Tensão

A tensão nominal de uma rede elétrica pode variar das dezenas de volts até aos milhares de volts. As redes isoladas de pequena dimensão, sem necessidade de rede de transporte, são usadas dois níveis de tensão:

Baixa tensão, tensão inferior a 1000 volt (V), com valores típicos (valores eficazes em corrente alternada) de 400 V - tensão entre fases e 230 V - tensão entre fase e neutro.

Média tensão, nas redes de distribuição urbana ou rural usa-se: 6kV, 10kV, 15kV e 30 kV. Nas redes industriais são 6 Kilovolt (kV). Por razões económicas, a maioria dos alternadores

existentes nas centrais são em geral constituídos para este nível de tensão, tensão entre 1 e 45 kV, em função da sua potência.

b) - Função

As redes isoladas são essencialmente redes de distribuição, com função de levar a energia até junto dos consumidores, domésticos e indústrias (geralmente pequenas indústrias). Para estas redes usam-se dois níveis de tensão: a baixa tensão, a qual estão ligados os aparelhos de consumo e a média tensão que alimenta os postos de transformação.

c) - Estrutura Topológica

Objetivo principal de qualquer rede elétrica é assegurar a transmissão de energia desde as instalações de produção até aos consumidores finais [3], garantindo continuamente as melhores condições de exploração da rede, em situação normal ou de perturbação, com garantias de melhor qualidade de serviço.

Um aspeto de fundamental importância na exploração de redes elétricas é a sua fiabilidade. Os elementos da rede estão naturalmente sujeitos a avarias que originam interrupções no fornecimento de energia, se não houver redundância. A redundância implica aumento dos custos de investimento, havendo que estabelecer um compromisso entre estes custos e os benefícios que acarretam, o qual se reflete na estrutura topológica da rede [3].

A topologia de uma rede de distribuição é definida por um conjunto de parâmetros que são estabelecidos com base em estudos técnicos. De acordo com [4], a solução adotada para a topologia da rede deverá cumprir os seguintes objetivos:

- Garantir a segurança de pessoas e bens;
- Garantir níveis de qualidade de serviço predefinidos;
- Atingir os níveis de rentabilidade económica desejados.
- As redes de distribuição deverão ainda satisfazer os seguintes requisitos:
- Adequar-se à densidade de clientes/consumo (MVA/km²);
- Adequar-se às características geográficas e às restrições impostas pela construção humana ou envolvente natural;
- Adequar-se às condições climatéricas.

As redes isoladas sendo essencialmente redes de distribuição em MT e BT, quase nunca têm redundância ativa, ou seja, são exploradas radialmente. Assim, as redes isoladas podem ser de estrutura radial ou de estrutura emalhada (em anel) com exploração radial.

2.3 - Redes de Distribuição em Média Tensão

As redes de distribuição em Média Tensão (MT) são constituídas por linhas aéreas e cabos subterrâneos. As subestações, postos de seccionamento e de transformação e instalações de iluminação pública, são as principais infraestruturas que integram a rede elétrica.

Quanto à topologia, as redes de distribuição podem ser aéreas ou subterrâneas, são soluções com custo de instalação e níveis de qualidade de serviço distintos, de acordo com [5], as redes subterrâneas são implementadas em ambientes urbanos com comprimentos médio entre os 3 e 10 km, enquanto as redes aéreas são utilizado maioritariamente em zonas rurais e apresentam comprimentos entre 10 e 35 km.

As redes de distribuição aéreas estão mais expostas a forças de naturezas diversas, como tal, apresentam menor fiabilidade quando comparada com redes subterrâneas, constituídos por cabos subterrâneos.

Relativamente ao modo de exploração e configuração, as redes de distribuição apresentam diversos esquemas de exploração, sendo os mais destacados, estrutura radial e anel aberto.

A Figura 2.1 ilustra esquemas de operação habitualmente utilizados em redes de distribuição de média tensão em SEE isolado.

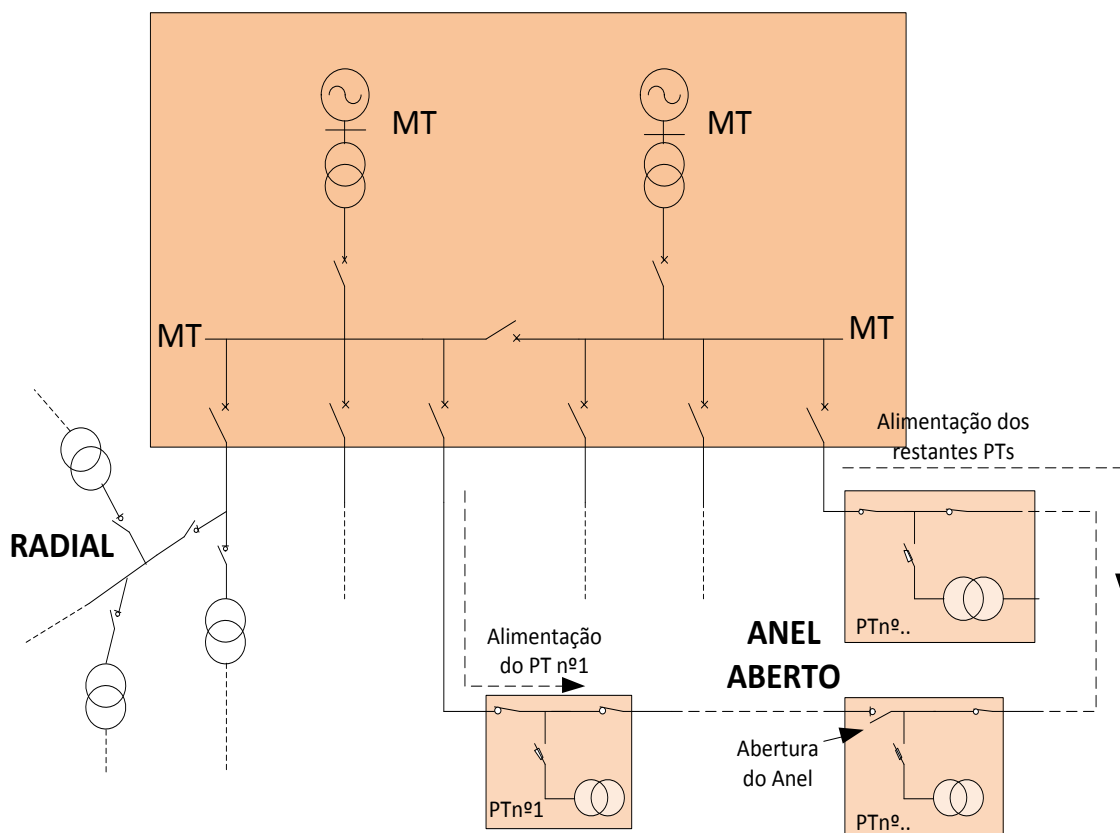


Figura 2.1 - Exemplo de esquemas de operação utilizados em redes de distribuição de média tensão (redes isoladas).

As redes radiais, podendo também ser designadas como redes em antena, são caracterizadas por possuírem um único ponto de alimentação. As linhas da rede vão ramificando. Por serem monoalimentadas, a realimentação dos consumidores na ocorrência de defeitos fica condicionada. Existe apenas um caminho para o fluxo de potência entre a geração e o consumidor. Quando existe um curto-circuito, a corrente tem somente uma origem e um sentido, sempre do gerador para o local do defeito. Para o sistema de proteção esta característica torna mais fácil a coordenação e mais barato o sistema. As redes de distribuição aéreas radiais, são ideais para zonas de muita baixa densidade de carga e de grande dispersão de consumo.

De modo geral, as principais características do sistema elétrico radial são:

- Baixo custo de instalação e exploração;
- Estrutura topológica mais simples;
- Menor fiabilidade;
- Menor continuidade de serviço;
- Maior queda de tensão;
- Coordenação fácil;
- Sistema de proteção mais simples;
- Baixa densidade de clientes/consumo.

As estruturas da rede em anel aberto, com exploração radiais são dotadas de duas linhas ou dois caminhos distintos de alimentação. Apenas uma alimentação é utilizada em condições normais, ficando o outro caminho para alimentação dos consumidores em caso de defeito ou indisponibilidade do primeiro. Deste modo, apresenta maior continuidade de serviço, consequentemente maior fiabilidade. São particularmente utilizada nas redes de distribuição subterrâneas em áreas urbanas com elevada densidade de carga ou na alimentação de cargas que exigem maior continuidade de serviço. Tal como nas redes radiais, em redes exploradas em anel aberto, o fluxo da corrente quer em regime de funcionamento normal ou anormal (em defeito) da rede apresenta um único sentido.

Como se pode constatar na Figura 2.1, esta estrutura só pode ser conseguida mediante a utilização se instalação de transformação de energia. Uma das vantagens da utilização de corrente alternada no SEE é que se torna possível alterar o valor da tensão com a utilização do transformador, assunto que será tratado na secção seguinte.

2.4 - Subestação e Posto de transformação

Por razões de ordem económica, técnica e de segurança, o SEE é constituído por níveis de tensão distintos, níveis de tensão esses que se vão adaptando de acordo com as necessidades. Para a obtenção desses níveis de tensão, indispensáveis ao bom desempenho de sistema

elétrico, são utilizadas instalações de transformação de energia (subestação e posto de transformação), cujo elemento principal é o transformador de potência (máquina estática).

2.4.1 - Subestação

Em [6], uma subestação é definida como instalação de alta tensão destinada aos seguintes fins:

- Transformação da corrente elétrica por meio de um ou mais transformadores estáticos, quando o secundário de um ou mais desses transformadores se destina a alimentar postos de transformação ou outras subestações;
- Transformação da corrente por retificadores, onduladores, conversores ou máquinas conjugadas;
- Compensação do fator de potência por compensadores síncronos ou condensadores.

Os níveis de tensão padronizados para as subestações AT/MT são: 60/30 kV, 60/15 kV ou 60/10 kV e para uma potência de transformação máxima de 2×40 MVA. Considera-se ainda um número previsto de painéis de linha de AT e MT para interligação à rede - 6 painéis de AT, 12 painéis de 30 kV, 20 painéis de 15 kV e 24 painéis de 10 kV [7].

As redes isoladas pelas suas características, dimensão e especificidades, são utilizadas níveis de tensão mais baixos, e por conseguinte, as subestações neste tipo de rede apresentam níveis de tensão baixo quando comparadas com as subestações mais comuns encontradas nas redes interligadas.

Para as redes isoladas de pequena dimensão, sem necessidade de rede de transporte, podemos encontrar subestação de tipo MT/MT, onde os circuitos apresentam mesmo nível de tensão, uma vez que a geração e distribuição são feitas em MT. Subestação com estas características podem servir como posto de corte e seccionamento ou para elevar a tensão.

Em redes elétricas isoladas é comum encontrar subestações de pequenas dimensões com seguintes níveis de tensão: 0,4/15 kV; 6/10 kV; 10/15 kV; 30/10 kV; 30/15 kV entre outras. Estas instalações podem ser integradas nas áreas rurais, urbanas ou semiurbanas em redes de distribuição.

- **Principais constituintes de uma subestação e suas funções**

A conceção de uma subestação deve satisfazer em simultâneo os princípios básicos, como a segurança geral de pessoas e bens, facilidade de exploração e manutenção. A proteção é garantida por dispositivos capazes de detetar os diferentes tipos de defeitos que ocorrem no sistema, isolando as partes em defeito a fim de garantir continuidade de serviço.

A subestação pode ser uma instalação mista, com aparelhagens montada no exterior do parque e no interior do edifício de comando.

1. Parque exterior

No parque exterior de aparelhagem encontra-se normalmente instalados um ou mais transformadores de potência, disjuntores, seccionadores, barramentos, linhas, os equipamentos complementares de MT, tais como as baterias de condensadores (podem ser instalados no interior, numa sala própria), os descarregadores de sobretensões, os transformadores auxiliares e as impedâncias limitadoras de corrente de defeito à terra.

Barramentos

Os barramentos têm a função de interligar as entradas existentes como se fosse um ponto comum (barramento de entrada da subestação), que por ligação intermédia de um transformador ou mais transformadores, se obtém uma tensão diferente também ligada a um ponto comum (barramento de saída da subestação). Para as pequenas instalações, normalmente de baixa potência e reduzido número de linhas, utilizam-se barramentos simples.

Disjuntor

Dispositivo eletromecânico que protege os circuitos contra sobreintensidades (curto-circuitos ou sobrecargas). O corte é efetuado de forma automática, separando dois contactos numa câmara de corte, que possui material dielétrico com excelentes propriedades de extinção do arco elétrico voltaico. O dielétrico pode ser: o gás hexafluoreto de enxofre (SF₆), pequeno volume de óleo ou tecnologia recente em vácuo.

Seccionador

É destinado a interromper ou estabelecer a continuidade de um condutor. É um equipamento de corte visível mas que não possui poder de corte em carga. O corte visível é importante e fundamental na segurança de pessoas. Na posição aberta, garante uma distância de isolamento que satisfaz requisitos de segurança especificados.

Isolador

Responsável pelo afastamento das partes em tensão, das suas estruturas de suporte. O tamanho do isolador reflete no nível de tensão em jogo. Quanto menor é o nível de tensão menor é o tamanho do isolador.

Transformador

O transformador de potência é o elemento responsável pela alteração de tensão numa subestação. O secundário de transformador conta com regulação de tomadas de carga

(possibilidade seleção do enrolamento consoante a carga imposta). Níveis de tensão típicos de uma subestação em redes isoladas: 6/10 kV; 10/15 kV; 30/10 kV; 30/15kV.

Transformadores de medida

O transformador de corrente (TI) e transformador de tensão (TT) são responsáveis pela leitura de corrente e tensão, a partir dessa leitura é avaliada a necessidade ou não de abertura do disjuntor.

Descarregadores de sobretensão

Os Descarregadores de Sobretensões (DST) são usados para proteger equipamentos e instalações, das eventuais descargas atmosféricas e de sobretensões de manobra. São classificados pela sua capacidade de descarga de corrente para a terra.

Rede de terras

A rede geral de terra de uma subestação deve ser concebida de forma a construir uma rede equipotencial, reduzindo os riscos de tensões de passo e de contacto e limitando-as a valores não perigosos, em caso de defeito a terra, as suas ligações serão formados por:

- Terra de proteção, destinada a contribuir para a segurança das pessoas nas proximidades de um objeto metálico da instalação suscetível de colocação acidental sob tensão em caso de defeito de isolamento;
- Terra de serviço, destinada a influenciar o comportamento da rede em caso de defeito a terra;
- Cabo de guarda, para proteção da instalação contra descargas atmosféricas diretas.

A Figura 2.2 ilustra o exemplo de um pequeno poste de seccionamento comum em pequenas redes elétricas isoladas.



Figura 2.2 - Exemplo de pequena subestação/posto de seccionamento média tensão

2. Edifício de comando

O edifício de comando será constituído por uma sala dotado de sistema de proteção, comando e controlo (SPCC), para assegurar o comando e supervisão da subestação, no local e a distância, através das funções de proteção e automatismo. A Figura 2.3 mostra uma sala de comando onde está instalado o quadro metálico que com as respetivas celas de MT.



Figura 2.3 - Exemplo de sala de comando de uma subestação

O quadro metálico inclui todos os painéis de saída MT, Baterias de condensadores, reactâncias de neutro e transformadores de serviços auxiliares.

Saídas MT

A cela de Linha MT permite fazer a distribuição da alimentação do sistema elétrico pelas várias linhas de média tensão que compõem um dado sistema dado que estão “penduradas” no barramento de MT da Subestação. A cela de linha MT tem a particularidade de permitir, ora alimentar a rede, ora alimentar o próprio barramento seja através de um produtor isolado ou do fecho em anel da própria rede. Este tipo de configuração confere ao painel de linha uma grande versatilidade que terá de ser levada em linha de conta no estudo de coordenação para a sua proteção, avaliada mais adiante.

Retificador

Cela onde se aloja o equipamento que converte a alimentação a tensão alternada em tensão contínua, que irá carregar as baterias de tensão contínua.

Bateria de tensão contínua

Serve para alimentar os circuitos de comando e proteção porque estes funcionam a tensão contínua. Faltando a energia as baterias asseguram o comando funcional da subestação durante o tempo da capacidade das baterias, tal como, a alimentação das unidades de proteção e o comando dos motores dos órgãos comandáveis.

Bateria de Condensadores

A cela de bateria de condensadores é responsável pela ligação do barramento de média tensão a um ou mais bancos de baterias de condensadores que têm como função permitir a compensação do fator de potência do sistema a que se encontra ligado ora de uma forma manual ora de uma forma automática e programada no tempo.

Transformador de Serviços Auxiliares

A cela de transformador de serviços auxiliares assegura a ligação do barramento de média tensão a um transformador MT/BT responsável por alimentar todo o sistema de baixa tensão existente na subestação.

Comunicações

Armário onde se acomoda o equipamento de telecomunicações, que permite que a subestação seja comandada remotamente, sem a presença física de técnicos.

Interbarras

A cela de interbarras permite a ligação de dois semibarramentos. A exploração do SEE poderá assim optar por um sistema de barramento único ou de dois semibarramentos.

Numa rede elétrica isolada, o edifício central compreende todos os elementos acima referidos, assim em resumo podemos encontrar os seguintes elementos numa subestação:

- Sala de Máquinas;
- Sala de comando;
- Parque exterior da Subestação;
- Parque de refrigeração e combustível;
- Armazéns
- Sala de bateria

A Figura 2.4 ilustra um exemplo de esquema simplificado de uma subestação de pequena dimensão em redes elétricas isoladas.

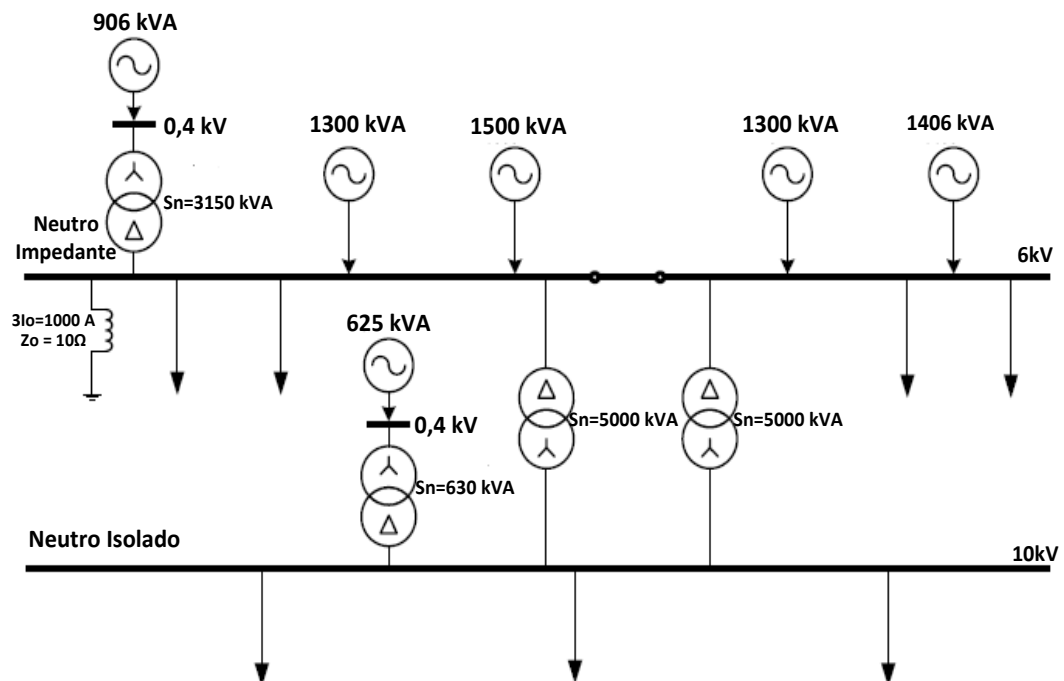


Figura 2.4 - Exemplo de esquema simplificado de uma subestação (redes isoladas)

2.4.2 - Posto de transformação

O Posto de transformação (PT) é definido segundo [6], como instalação de alta tensão destinada a transformação de corrente elétrica por um ou mais transformadores estáticos, quando a corrente secundária de todos os transformadores for utilizada diretamente nos recetores, podendo incluir condensadores para compensação do fator de potência. De acordo com a definição, não é necessário que a tensão secundária esteja no domínio de baixa tensão (BT), mas sim, que essa corrente alimente diretamente os recetores (cargas de elevada potência alimentadas até 6 kV).

Normalmente, as principais transformações MT/BT, são: 30/0,4 kV; 10/0,4 kV; 6,6/0,4kV; 6/0,4kV e 5/0,4 kV.

Atendendo a definição acima referida, os PTs são inseridos nas redes próximos dos centros de consumo, nas zonas rurais, urbanas e semiurbanas, zonas industriais, loteamentos e urbanizações.

Assim, os PTs podem ser classificados por seguinte:

- i. Quanto à instalação
 - De interior - em edifício próprio ou em edifício para outros usos;
 - De exterior.
- ii. Quanto ao modo de alimentação
 - Radial;
 - Em anel aberto;
 - Com dupla derivação.
- iii. Quanto ao tipo de serviço prestado
 - Públicos;
 - Privado.

Com o intuito de simplificar e facilitar o projeto dos PTs, encontra-se normalizado os seguintes tipos:

1) Postos de exterior, aéreos, PT-A:

Geralmente os transformadores (imersos em óleo) são montados em postes de betão, apoiados numa plataforma. São identificados pela forma como é feita a sua conexão a rede aérea MT:

Tipo A - ligação direta;

Tipo AS - ligação feita através de seccionador;

Tipo AI (AI1-1poste e AI2-2postes) - ligação feita através de interruptor-seccionador.

As Tabelas 2.1 e 2.2 mostram respetivamente os equipamentos que constituem diferentes postos de transformação aérea e as suas potências nominais.

Tabela 2.1 – Equipamentos dos postos de transformação aéreos [8]

Tipo de PT	Proteção contra sobretensões	Seccionador	Interruptor-Seccionador
A	✓	-	-
AS	✓	✓	-
AI	✓	-	✓

Tabela 2.2 – Potência dos transformadores [8]

Tipo de PT	Potência kVA				
A	25	50	100	-	-
AS	25	50	100	-	-
AI	-	-	-	160	250

Os postos de transformação aéreos são utilizados em redes aéreas, geralmente em zonas rurais. Deve-se evitar a sua implementação em locais frequentados pelo público. O local escolhido deve permitir a obtenção, de boa terra e garantir que os valores das resistências de terra não sofram grandes alterações ao longo do tempo. São tipos de PTs que por questões estético e urbanístico se deve ponderar a sua utilização.

2) Postos instalados no interior, a sua dimensão depende do tipo de alimentação e da potência:

PT-CA: CA1 e CA2 - transformador (imerso em óleo) alimentado através de linhas aéreas - instalados em cabine alta.

PT-CB: - transformador (imerso em óleo) alimentados através cabos subterrâneas - instalados em cabine baixa, possui duas variantes consoante a disposição das suas celas em U (CBU) ou em L (CBL).

Tabela 2.3 – Potência instaladas dos transformadores

Tipo de PT		Potência (kVA)
CA1	160	250
CA2 - CBU- CBL	400	630

• Constituição do posto de transformação

O equipamento fundamental de um posto de transformação é o transformador, mas, atendendo aos níveis de tensão envolvida e segurança necessária, é utilizada um conjunto de aparelhagem adicional com função de seccionamento, contagem e proteção quer de pessoas, quer dos próprios equipamentos e bens.

Em geral, um posto de transformação é constituído essencialmente por três equipamentos:

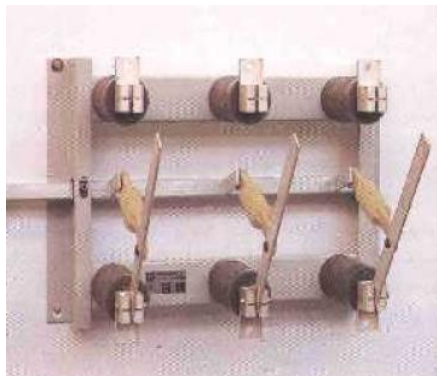
1. Aparelhagem de MT - interrupção, seccionamento e proteção;

Interruptor - destina-se a ligar ou desligar o circuito em carga, é dotado de poder de corte garantido e tem duas posições, uma de abertura e outra de fecho, nas quais se mantem na ausência de ações exteriores.

Seccionador - aparelho destinada a interromper ou estabelecer a continuidade de um condutor ou isolá-lo de outros condutores, não tem poder de corte, não deve ser manobrado em carga. Quando utilizado para proteção de pessoas, a separação dos contactos deve ser visível e facilmente verificável do local de manobra.

Interruptor - seccionador, interruptor em que a separação dos contactos é visível, geralmente dotado de poder de corte reduzido, mas suficiente para a manobra em carga.

A figura 2.5 apresenta o seccionador e o Interruptor-seccionador corte no ar e modular de corte em SF6.



- Aparelhagem de corte no ar
- Uso interior
- In até 400A
- Un até 36kV
- Icc ate 16 kA/3s



- Aparelhagem modular de corte em SF6
- Uso interior
- Interruptor- seccionador de corte em SF6
- Manutenção necessária reduzida
- Un até 36 kV
- In até 636 A
- Icc até 25 kA

Figura 2.5 - Interruptor-seccionador corte no ar e modular de corte em SF6

Disjuntor é o interruptor no qual a abertura do circuito se produz automaticamente, em condições predeterminadas.



- Disjuntor MT de corte em SF6
- Uso interior
- Utiliza principio Auto pneumático de duplo corte em SF6
- Simplicidade de instalação e manobra
- Un até 36 kV
- In até 2.500A
- Icc até 25 kA

Figura 2.6 - Disjuntor média tensão de corte em SF6

2. Um ou mais transformadores de potência, responsáveis pela transformação da tensão;



- Transformadores trifásicos de distribuição
- Uso interior e exterior
- Imersos em óleo mineral
- Un até 36 kV
- Sn de 50 ate 6300 kVA

Figura 2.7 - Transformador trifásico de distribuição imerso em óleo

3. Quadro geral de baixa tensão (QGBT), de onde partem os diversos ramais da rede de BT.



- PT público: Quadro Aberto(CA2)
interruptor na entrada
5 saídas por triblocos
1 saída iluminação pública
- PT privado: quadro fechado
configuração em função da instalação

Figura 2.8 - Quadro Geral Baixa Tensão do posto de transformação

- **Proteção das pessoas contra contacto acidentais**

Os equipamentos usados nos postos de transformação são concebidos de forma a impedir que as partes sob tensão estejam diretamente acessíveis a quem tem acesso a ele, como consequência de uma avaria esses níveis de tensão podem encontrar-se em partes dos equipamentos que habitualmente não estão sob tensão.

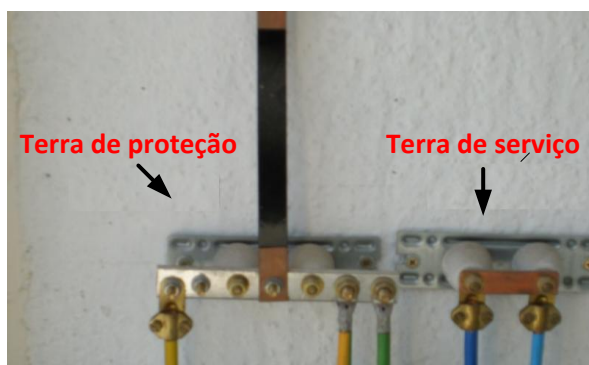


Figura 2.9 - Ligação à terra no posto de transformação

As ligações à terra são utilizadas nas redes e instalações elétricas, seja para influenciar o comportamento da rede em caso de defeito à terra - terra de serviço, seja para contribuir para a segurança das pessoas nas proximidades do local do defeito e bens - terra de proteção [8].

i. **Terra de serviço**

A terra de serviço tem como função estabelecer um potencial de referência, de forma a garantir, por exemplo, que o neutro dos sistemas monofásicos tenha uma resistência igual a zero e potencial nulo. Como exemplo de terra de serviço, tem-se a ligação à terra dos pontos neutros ou dos condutores neutros das redes de distribuição de energia elétrica em baixa tensão.

Segundo [6], a terra de serviço é definida como:

- Circuito de terra a que são ligados unicamente pontos dos circuitos elétricos para influenciar as suas condições de exploração, quer limitando o potencial dos condutores em relação ao solo, quer permitindo o funcionamento das proteções;
- Os pontos neutros ou terminais dos circuitos de alta tensão ligados diretamente a circuitos exteriores à zona de influência da terra de proteção;

Nas instalações existe normalmente uma terra de serviço por cada transformador, à qual se devem ligar os pontos neutros dos circuitos polifásicos.

Para os PTs aéreos, a ligação à terra do neutro de baixa tensão será feita, pelo menos em duas saídas, no primeiro ou primeiros apoios de cada saída da rede de distribuição, devendo a rede ser executada com condutores isolados em feixe até aos apoios e onde localizaremos elétrodos da terra de serviço [8].

ii. Terra de proteção

Têm como objetivo limitar as tensões perigosas que possam ser aplicadas a uma pessoa que venha a ficar em contacto com esses elementos, e favorecer a intervenção dos dispositivos de proteção, melhorando as condições de segurança.

Ainda de acordo com [6], a terra de proteção é definida como o circuito de terra a que são ligados todos os elementos condutores da instalação normalmente sem tensão ou com tensões não perigosas mas sujeitas a uma passagem fortuita de corrente que provoque diferenças de potencial perigosas e não previstas entre esses elementos.

Nas instalações deverá sempre existir uma, e uma só, terra de proteção, à qual se devem ligar: suportes metálicos dos aparelhos, redes, ferragem de apoio e fixação dos quadros, canalizações metálicas, estrutura metálica dos edifícios e as bainhas metálicas dos cabos MT e BT, enrolamentos secundários dos transformadores de medida, para-raios de MT.

Para os PTs aéreos, as massas da aparelhagem de MT serão ligadas entre si e aos pontos de ligação do poste ou dos postes, consoante se trate de PT tipo AI-1 ou AI-2 [8].

2.5 - Resumo

Neste capítulo, foram caracterizadas as redes isoladas, com especial atenção a níveis de tensão e estrutura topológica. Foram também feitas abordagens sobre sistemas de terra, fazendo referencia aos diferentes tipos de sistema de terras nas subestações e nos postos de transformação. Finalmente, na última secção deste capítulo, abordou-se a proteção de pessoas contra contactos acidentais e segurança dos sistemas de terras.

Capítulo 3

Sistemas de proteção em redes elétricas de energia

Serão apresentadas neste capítulo a evolução tecnológica das proteções, a constituição e princípio de funcionamento de sistemas de proteção, e por fim, os requisitos do sistema de proteção.

3.1 - Introdução e Considerações Gerais

Segundo [9], o objetivo fundamental de um sistema de proteção é o de promover uma utilização e exploração segura do sistema elétrico de energia (SEE).

Os sistemas elétricos de energia, estão frequentemente sujeitos a perturbações tais como:

- Sobreintensidade - curto-circuito e sobrecarga;
- Variação do nível de tensão - sobretensão e subtensão;
- Variação do valor de frequência.

Alguns equipamentos que integram o sistema elétrico de energia, são sensíveis a pequenas perturbações e defeitos. Por isso, o funcionamento do sistema sob estas anomalias, podem conduzir a danos graves aos fornecedores e aos utilizadores de energia, se não forem rapidamente corrigidos. Torna-se necessário proteger os equipamentos para garantir a segurança e continuidade de serviço no fornecimento de energia.

As principais funções de um sistema de proteção podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- Vigiar o funcionamento da rede;
- Detetar a ocorrência de situações anómalas;
- Limitar o impacto das situações anómalas;
- Promover uma exploração segura do SEE;
- Promover a qualidade e continuidade de serviço.

O sistema de proteção deve ser sensível a diversas situações de perturbação, tais como:

- Defeitos de isolamento originando diversos tipos de curto-circuito;
- As sobretensões que também podem causar danos nos isolamentos;

- As condições anormais de operação associadas a sobrecargas de longa duração, a ligação ou corte simultâneo de cargas de valor elevado;
- Sobretenção de manobra associado a abertura das linhas longas.

A escolha da configuração da rede está relacionada com o tipo de consumidores que as redes devem servir, caracterizando estes pelo nível de potência instalada e pelo grau de exigência da qualidade de serviço, a qual depende do tipo de atividade do consumidor. Pode-se concluir que a escolha das características do sistema de proteção, depende de diversos fatores entre os quais se incluem a estrutura da rede, a potência elétrica veiculada e o tipo de consumidores alimentados [9].

3.2 - Evolução das Proteções

Os dispositivos de proteção sofreram ao longo dos últimos anos, alterações significativas quanto às tecnologias utilizadas no seu fabrico, as quais evoluíram a partir das antigas unidades eletromecânicas, décadas 30 à 60 para as atuais digitais numéricas (a partir dos anos 80) passando por tecnologia intermediárias como foram por exemplo, as proteções estático, décadas 70, atualmente em fase de extinção.

Todavia, é importante salientar que apesar da evolução tecnológica das proteções a maioria das funções de proteção por elas utilizadas e desenvolvidas, permanece ainda hoje em uso corrente, disponíveis e aperfeiçoadas. As tecnologias mais recentes dos modernos dispositivos de proteção digital permitem a implementação de mais recursos operacionais e múltiplas funções simultaneamente.

Os sistemas de proteção têm evoluído desde as simples proteção por fusíveis ou relés de máxima intensidade com tempo escalonado, passando pelas proteções direcionais, diferenciais e de distância, baseada inicialmente em relés eletromecânicos e que depois passaram a integrar relés estáticos, que são muito mais rápidos e eficazes. Com a possibilidade da conversão das grandezas analógicas em digitais, deu-se mais um passo na evolução dos Sistemas de Proteção (SP), com a construção de relés digitais [9].

Apenas para dar uma ideia geral da evolução das diferentes tecnologias de proteções, a Figura 3.1 mostra etapas e progressos alcançados nas proteções.

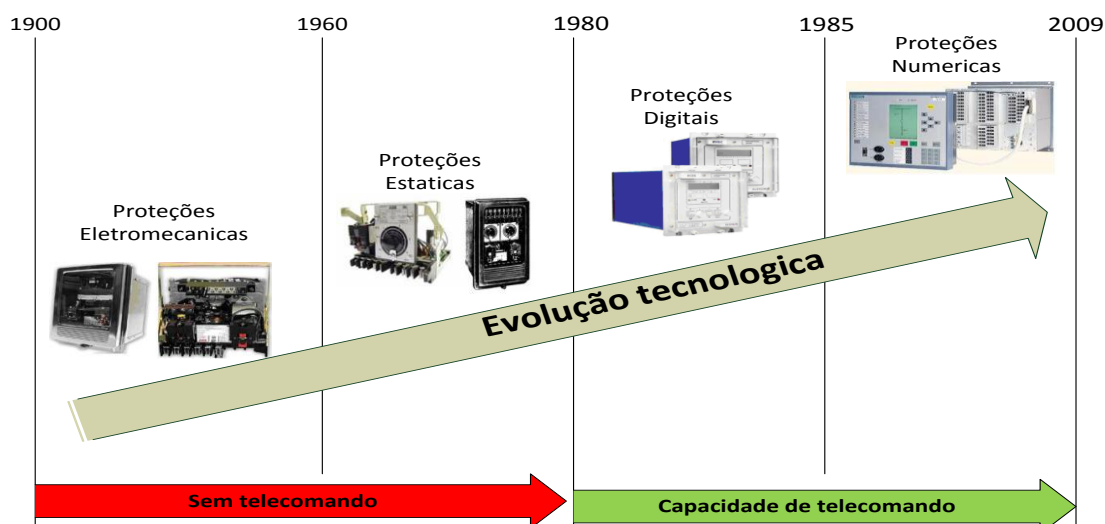


Figura 3.1 - Evolução das proteções

A evolução acima referida trás muitas vantagens e alguns inconvenientes, que serão resumidos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Evolução das proteções

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Proteções Eletromecânicas	• Durabilidade e Robustez; • Tolerância a altas temperaturas; • Baixa sensibilidade a surtos eletromagnéticos.	• Custo de instalação; • Precisão; • Manutenção; • Limitação de funcionalidades. • Uma única função de proteção;
Proteções Estáticas	• Maior velocidade; • Fácil manutenção; • Fiabilidade.	• Envelhecimento precoce; • Sensibilidade a surtos eletromagnéticos e a temperaturas elevadas.
Proteções Digitais	• Telecontrolo remoto; • "Watchdog"; • Fiabilidade igual ou superior as anteriores tecnologias; • Multifunções.	• Capacidade de processamento reduzida; • Memória limitada; • Software não portátil; • Sensibilidade a surtos eletromagnéticos e a temperaturas elevadas.
Proteções Numéricas	• Telecontrolo remoto; • "watchdog"; • Multifunções; • Microprocessador de elevado rendimento; • Capacidade de memória elevada; • Fiabilidade.	• Software não Portável; • Sensibilidade a surtos eletromagnéticos e a temperaturas elevadas.

3.3 - Constituição e princípios de funcionamento dos sistemas de proteção

Os sistemas de proteção (SP) são projetados de acordo com as características e os requisitos do SEE onde vão ser inseridos, são constituídos essencialmente pelos seguintes órgãos: órgão de entrada, relé de proteção, órgão de acionamento e fonte auxiliar de alimentação, tal como mostra a figura 3.2.

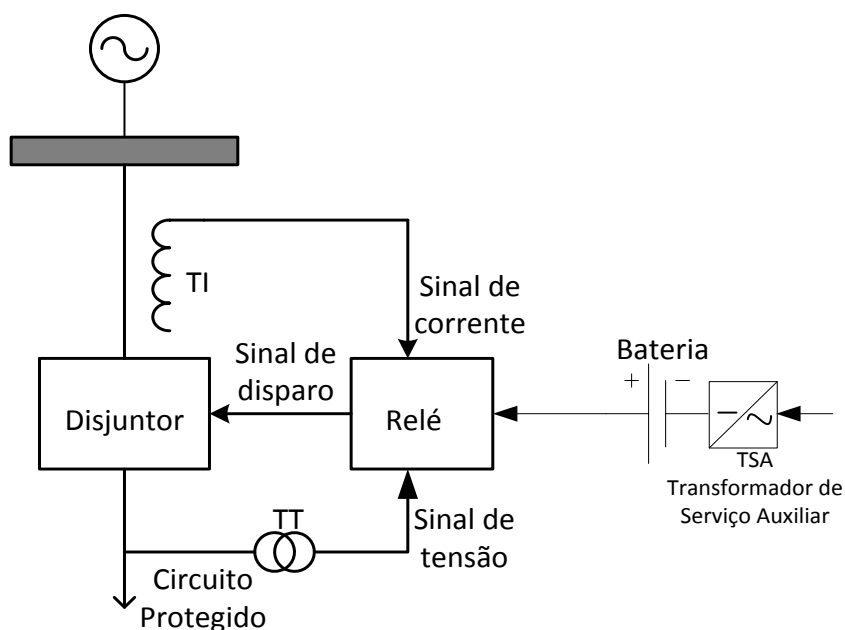


Figura 3.2 - Esquema de um subsistema de proteção

A proteção é realizada por um conjunto de equipamentos, sendo os principais, os transformadores de medida (cujas grandezas do lado secundário deverão ser uma imagem fiel das grandezas supervisionadas), os relés e os disjuntores.

3.3.1 - Órgãos de entrada do sistema de proteção

Os transformadores de medida servem para converter para a gama dos relés, a tensão e a corrente do sistema. Os transformadores de intensidade (TI's) e transformadores de tensão (TT's) são bastante importantes na constituição dos SP, porque garantem o isolamento galvânico entre os circuitos de potência e o circuito de proteção.

Por isso, é importante uma elevada precisão e uma transformação eficaz para o bom desempenho de sistemas de proteção. Geralmente, o secundário dos transformadores de intensidade são de 1 A ou 5 A e transformadores de tensão 110 ou 120V respetivamente [10].

A escolha dos TI's e TT's depende de muitos fatores, tais como:

- A localização,
- Função,
- Nível de tensão
- Ligação nos diferentes tipos de proteção.

3.3.2 - Relés de proteção

O relé é o elemento principal de um sistema de proteção, que serve para monitorizar o funcionamento do sistema elétrico, ou seja, vigiar as grandezas como: tensão, intensidade de corrente, frequência ou uma combinação dessas grandezas (fluxo de potência, impedância, ângulo de fase, entre outras) e, face a condições anormais, atue sobre aparelhagem de corte (Disjuntor) de modo a isolar o defeito. Esta ação deve ser feita com a rapidez suficiente para impedir o alastramento de danos, desligando apenas a alimentação dos equipamentos defeituosos e, assim, restringir ao mínimo as zonas afetadas do sistema.

Os relés são basicamente constituídos por três órgãos distintos, como ilustra a Figura 3.3, cada bloco representa uma etapa a ser executado pelo relé.

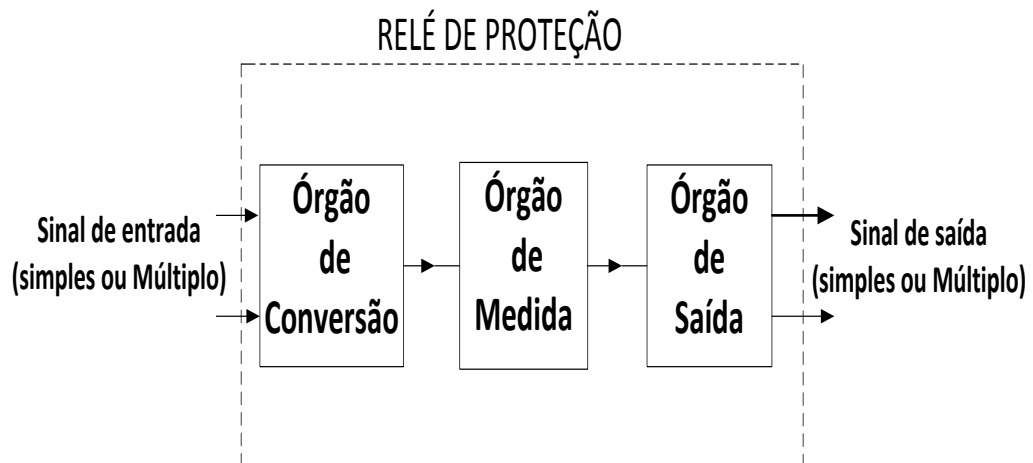


Figura 3.3 - Órgãos constituintes do relé de proteção

- **Órgão de conversão**, converte os sinais ou grandezas de entrada antes de serem processados.
- **Órgão de medição**, onde são processadas as comparações de níveis entre as grandezas supervisionadas e as suas referências ajustadas ("setting point"), assim como, uma unidade auxiliar de temporização e sinalização, quando aplicável.

- **Órgão de Saída**, a qual permitirá o interface de relé com a sua unidade recetora de comando e ou de controlo (bobinas de abertura ou de fecho de disjuntores, ou relés auxiliares de controlo, sinalização, alarmes).

3.3.3 - Classificação dos relés de proteção

i. Classificação quanto ao princípio de funcionamento

Quer os relés principais quer os relés suplementares, de acordo com as características tecnológicas ou construtivas podem ser: eletromecânicos (atuando de acordo com os princípios da conversão eletromecânica de energia), estáticos (cujos elementos são semicondutores não programáveis), digitais (baseados em microprocessadores) e numéricos (possível de programar).

A. Relés eletromecânicos

Os relés de tipo eletromecânico baseiam-se na atuação de forças produzidas devido às interações eletromagnéticas entre intensidades de corrente e fluxos. Estas forças são criadas por variações das intensidades de corrente e tensões, ou através duma combinação das variáveis de entrada (tensão e intensidades de corrente) ou armazenamento de energia em alguns dos seus elementos constituintes. A atuação dessas forças movimenta algumas partes mecânicas do relé originando a sua atuação.

Os relés eletromecânicos são relés tradicionais, subdividem-se em relés de atração eletromagnética e de indução eletromagnética.

• Relé de atração eletromagnética

A Figura 3.4 mostra um circuito monofásico, contendo uma fonte de tensão que alimenta uma carga Z , do que resulta uma corrente circulante I . No circuito foi introduzido um relé elementar, do tipo eletromecânico: uma estrutura em charneira, composto por um núcleo fixo e uma amadura móvel a qual estão solidários, o contacto móvel e a mola, que obriga o circuito magnético a ficar aberto numa posição regulável. O núcleo é percorrido por um fluxo proporcional à corrente do circuito, circulando na bobina do relé, e isso faz com que seja possível que o contacto móvel feche um circuito operativo auxiliar, neste caso uma fonte de corrente contínua alimentando um alarme ou/e o disparador do disjuntor colocado no circuito principal, sempre que $F_e > F_m$ [11].

A Figura 3.4 apresenta algumas características construtivas e operacionais desse tipo de relé.

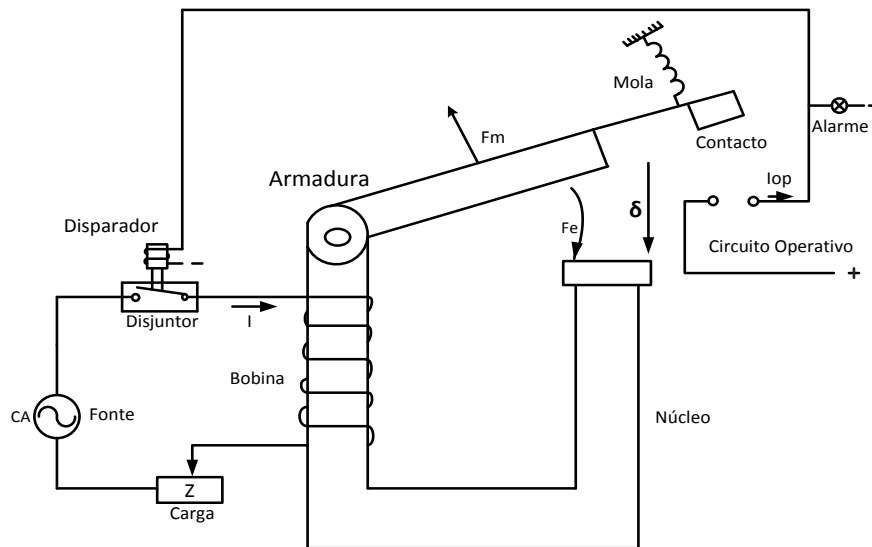


Figura 3.4 - Relé elementar de atração eletromagnética [11]

Pelo princípio de conversão eletromecânica sabe-se que a força eletromagnética (F_e) desenvolvida através do entreferro (δ) pelo fluxo no núcleo, e provocada pela corrente I na bobina do relé neste tipo de estrutura é dada pela expressão:

$$F_e \approx KI^2 \quad (1)$$

Onde K depende da taxa de variação da permeância do entreferro, número de espiras. Por outro lado existe uma força da mola (F_m) opondo-se ao deslocamento da armadura [11].

- **Relés de indução eletromagnética**

O funcionamento deste tipo de relé é baseado na ação exercida por campos magnéticos alternativos (circuito indutor fixo), sobre as correntes induzidas por esses campos num condutor móvel constituído por um disco ou corpo metálico, como ilustrado na figura 3.5.

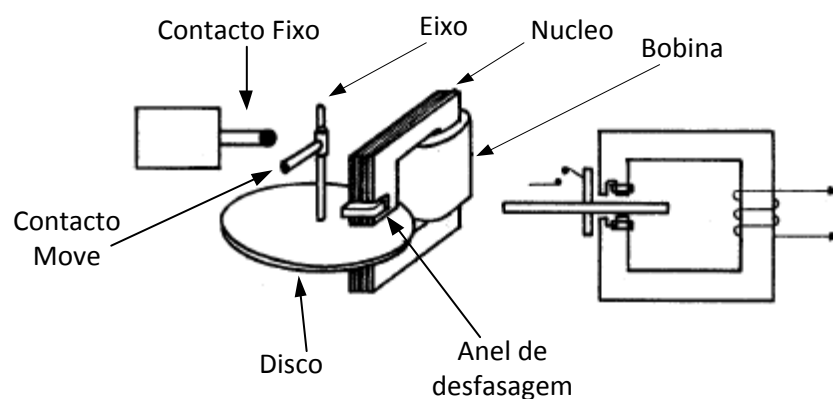


Figura 3.5 - Relé de indução Eletromagnética

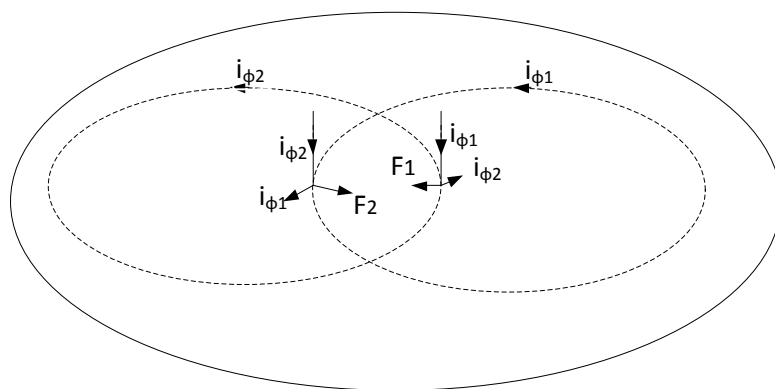


Figura 3.6 - Corrente induzido conjugado desenvolvido no disco do relé

O fluxo variável induz uma tensão da forma:

$$e = -Kn \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

Que aplicada ao disco metálico de resistência R , faz circular uma corrente de forma:

$$i = \frac{e}{R} = -\frac{Kn}{R} \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

A força é dada pela expressão: $F \approx \phi i$.

O relé de indução eletromagnética atua a partir do binário gerado sobre um disco, pela interação entre fluxo magnéticos, estes gerados pelas correntes obtidas ou geradas pela tensão dos transformadores medida, TI e TT [11].

Atualmente, os relés eletromecânicos sendo os mais obsoletos, estão a ser substituídos por relés eletrônicos e digitais efetuando-se essa substituição com maior evidência nas redes de tensão mais elevada.

B. Relés estáticos ou eletrônicos

Fruto de desenvolvimento dos semicondutores e o aparecimento de dispositivos eletrônicos, como por exemplo componentes discretos e circuitos integrados, fazem com que as funções e características já disponíveis com os relés eletromecânicos sejam melhoradas. Os relés estáticos são extremamente rápidos porque não possuem partes móveis, tendo assim, tempo de resposta baixa [11].

Neste tipo de relé, o órgão de conversão é constituído por pontes retificadoras com ou sem filtragem, convertendo sinais analógicos convencionais em pulsações tipo ondas quadradas, o órgão de medida é constituído por exemplo, por um circuito “Trigger Schmitt” realizando a comparação entre o sinal medido e o de referência obtendo-se um sinal binário que é amplificado no órgão de saída por forma a obter-se ou não ordem de disparo a enviar ao disjuntor.

A figura 3.7 traduz o princípio de funcionamento de um relé do tipo estático ou eletrônico.

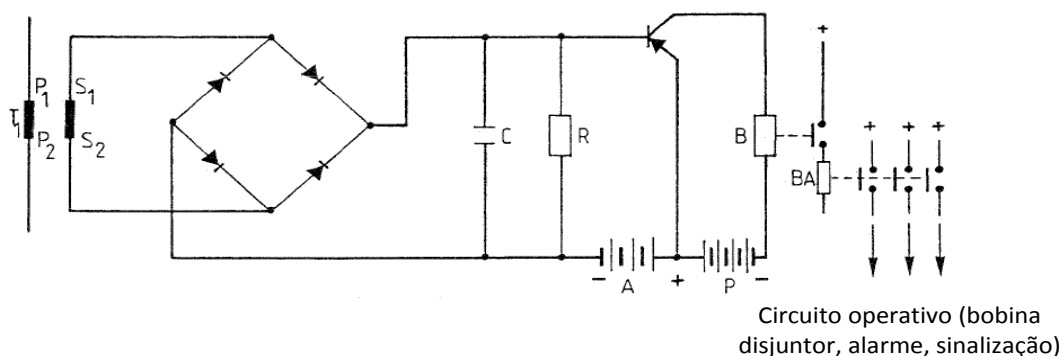


Figura 3.7 - Princípio de funcionamento de relé estático

O sinal fornecido por um transformador de medida é aplicado após ter sido retificado, por um transistor. Quando esse sinal supera o nível de polarização fornecido pela fonte A, o transistor conduz e a corrente produzida pela fonte P estabelece o circuito pelo relé B. Pela excitação do relé B, através de um dos seus contactos, é alimentado um relé auxiliar BA cuja missão é enviar a ordem de abertura ao disjuntor, de sinalização e de alarme correspondentes.

A tecnologia estática apresenta algumas vantagens comparado com o relé convencional eletromecânico, tais como:

- Baixo custo;
- Dimensões mais reduzidas;
- Consumo reduzido;
- Maior flexibilidade permitindo um melhor ajustamento dos respetivos parâmetros de regulação em função da variação da configuração do SEE ou das cargas, mais exatos e seguros dentro das tolerâncias especificadas para os parâmetros de regulação.

C. Relés digitais

O desenvolvimento de microprocessadores permitiu que um novo e significativo passo tenha sido dado no domínio das proteções de SEE. Os relés digitais são relés eletrónicos controlados por microprocessadores.

A Figura 3.8 ilustra relé digital multifunção, ainda possui função de medição e de controlo.



Figura 3.8 - Relé de tecnologia digital

Os relés digitais possuem excelentes características de funcionamento tais como [9]:

- Possibilidade de modificação automática dos seus parâmetros de regulação em função das alterações do SEE;
- A grande utilização de tecnologias digitais em algumas funções do SEE, tais como medições, comunicação, telemédidas e controlo;
- A possibilidade de serem programados para executarem funções distintas para além da função de proteção;
- Capacidade de autoteste, ou seja, programados para monitorizar continuamente o seu estado de funcionamento colocando-se fora de serviço se ocorrer alguma anomalia, e enviando de imediato um sinal de alarme para o centro de controlo. Esta performance do relé digital aumenta a sua fiabilidade assim como do SEE onde está integrado, porque diminui a probabilidade do relé não atuar por avaria numa situação de defeito.

Os relés digitais são considerados o futuro de sistemas de proteção, mas ainda há muito a evoluir com esta tecnologia de proteção.

Atualmente, a maioria dos relés instalados são de tipo eletromecânico, não permitindo utilizar grande parte das vantagens da tecnologia digital.

D. Relés Numéricos

O princípio básico de funcionamento de operação dos relés numéricos consiste numa amostragem periódica dos sinais de entrada, atuando nas saídas com o intuito de proteger e controlar o sistema no qual estes relés estão inseridos. Depois do sinal de entrada ser amostrado, são realizados cálculos que permitem converter os valores das sucessivas amostragens num valor final que corresponda às grandezas do sinal de entrada.

O carácter multifuncional de grande parte destes relés levou a que fossem designados atualmente por Dispositivos Eletrónicos Inteligentes (IEDs). Para que todas as funcionalidades sejam utilizadas de forma adequada e personalizada ao sistema, os IEDs disponibilizam uma plataforma de programação lógica de forma a tornar ainda mais flexível para o operador a utilização e implementação das suas funcionalidades. Assim, garante-se um maior nível de personalização das funções de proteção, tendo em vista satisfazer os requisitos do sistema que se pretende proteger.

ii. Classificação quanto ao tipo de resposta

O tempo de atuação é fundamental para a preservação dos equipamentos do SEE e para a coordenação da proteção. Embora se espera que o relé atue mais rapidamente possível, por questão de seletividade, torna-se necessário permitir aos relés uma certa temporização antes da ordem de abertura do disjuntor. O tempo de atuação do relé pode ser instantâneo ou temporizado, este último com tempo definido ou tempo inverso.

a) Relé instantâneo

Serão considerados como tais, aqueles que não apresentam atraso intencional no tempo de atuação. É frequente utilizar proteções de tempo instantâneo nas redes radiais, coordenadas através de atraso uniforme (a proteção detecta o defeito e dá indicação instantânea para abertura do aparelho de corte).

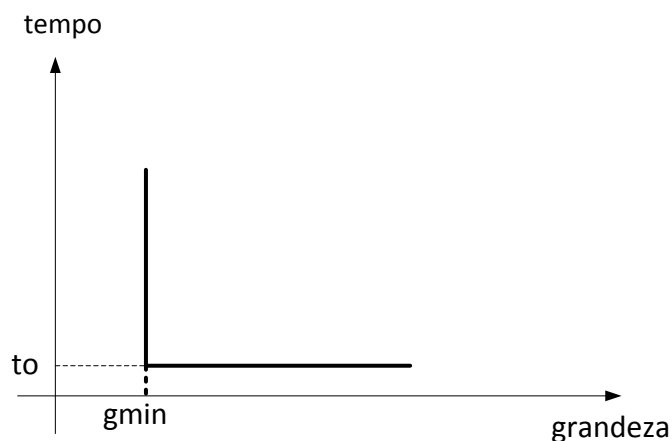


Figura 3.9 - Curva característica tempo instantâneo

O atraso existente é devido à inércia natural do mecanismo de funcionamento e das suas características construtivas. Este tipo de temporização não pode ser utilizado em esquemas seletivos, com os valores das correntes de curto-circuito nos diferentes pontos da rede.

b) Relés Temporizado

Serão considerados como tais, aqueles que permitirem controle no seu tempo de operação. Para o efeito de coordenação são induzidos atrasos propositados para permitir a atuação das proteções que tenha menor atraso definido.

- Relé de tempo definido (constante) ou independente

Uma vez regulado o tempo de atuação (t_o) e a corrente mínima de atuação (g_{min}), o relé irá atuar neste tempo para qualquer valor de corrente igual ou maior do que o mínimo ajustado, ou seja, o tempo de atuação é constante independentemente da magnitude da grandeza que ele é sensível. A figura 3.10 apresenta a curva de temporização com atraso independente.

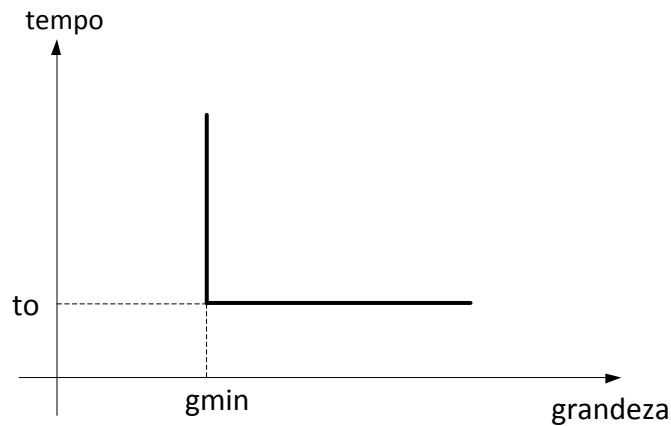


Figura 3.10 - Curva caraterístico tempo definido

- Relés de tempo dependente ou inverso

Os relés temporizados com atraso dependente são os mais utilizados em SEE. A Figura 3.11, mostra a curva temporizado normalmente inversa, cujo atraso é função do valor da grandeza a qual é sensível. O tempo de atuação do relé é inversamente proporcional à magnitude da grandeza que o sensibiliza.

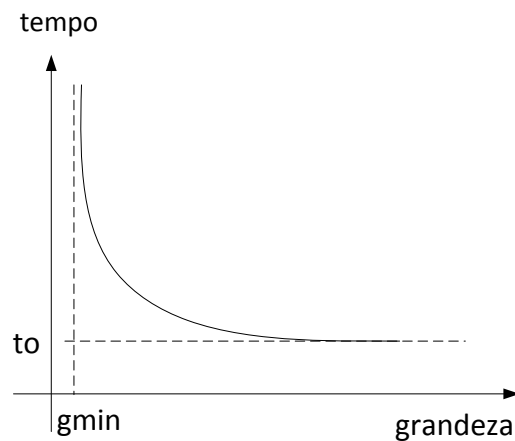


Figura 3.11 - Curva Caraterístico tempo inverso e tempo inverso com mínimo definido

O relé ira atuar em tempos decrescentes para valores de corrente igual ou maior do que a mínima de atuação (corrente de partida ou starting current), ou seja é garantido que a sua atuação é mais rápida para correntes mais elevadas.

As curvas de tempo dependente são classificadas em três grupos: Normalmente Inversa (NI), Muito Inversa (MI) e Extremamente Inversa (EI).

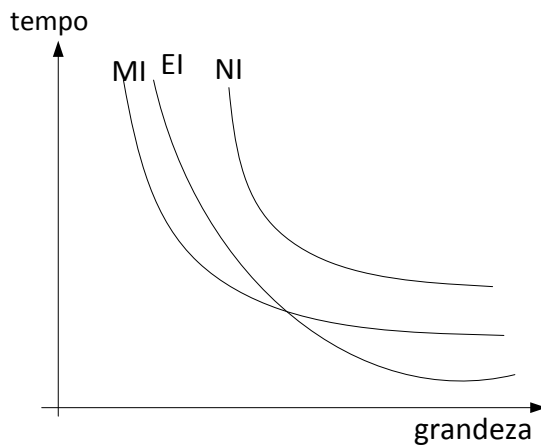


Figura 3.12 - Curva característica dos três grupos de tempo dependente

Para os relés de tempo inverso com a intensidade de corrente, o tempo de atuação (temporização) vem definido na norma IEC 60255-3 (1989-05) por:

$$T(seg) = \frac{K}{\left(\frac{I}{I_{PK}}\right)^{\alpha} - 1} \times TMS \quad (6)$$

Onde:

T é o tempo de atuação em segundos,

K e α são constantes,

TMS é o time multiplier setting (multiplicador de tempo)

IPK é a corrente de disparo do relé, a corrente mínima que provoca o disparo.

Os valores de α e k para os três curvas mais frequente vem apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores de α e k segundo norma IEC 60255-3

Tipo de curva	α	k
Normalmente inverso	0,02	0,14
Muito inverso	1,0	13,5
Extremamente inverso	2,0	80,0

- Relés de características combinadas

Esta característica resulta da combinação de formas acima referidas, no caso do relé de máxima intensidade, é uma combinação de duas características, temporizado com elemento instantâneo.

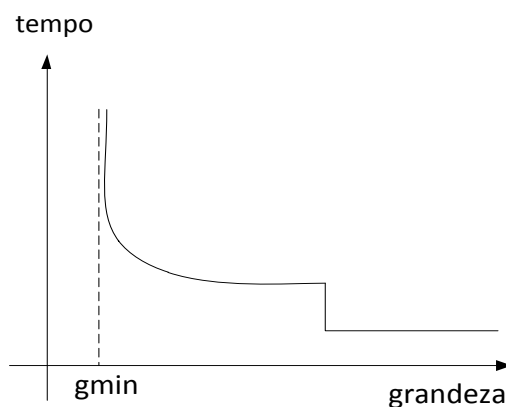


Figura 3.13 - Caraterístico tempo combinado

iii. Classificação quanto a grandeza a que são sensíveis

- Relés de corrente

São aqueles cuja grandeza característica de atuação ou de acionamento é uma corrente fornecida ao relé, seja diretamente ou através de um transformador de corrente da rede [10], são sensíveis ao valor eficaz da intensidade de corrente elétrica, atuam para uma corrente maior que a corrente à qual foi regulado. Atuação do relé pode ser instantânea ou temporária, conforme a necessidade. De todo o tipo de relés é o mais utilizado, tornando o seu uso obrigatório, em consequência das anomalias da corrente elétrica que circula numa instalação.

- Relés de tensão

São relés sensíveis ao valor eficaz da tensão do circuito que monitorizam. A sua grandeza característica de acionamento é uma tensão obtida, seja diretamente ou através de um transformador de tensão da rede e compara seu valor com o valor ajustado para operação. Geralmente, a tensão numa instalação é estável, ao contrário da corrente. Só atinge valores elevados aquando da ocorrência de fenómenos externos á instalação, como, por exemplo, à descarga atmosférica ou perturbação na geração.

- Relés direcionais

São aqueles que respondem ao fluxo nominal de potência ou corrente. Têm sensibilidade direcional em relação ao sentido do fluxo de energia. Este tipo de relés tem usualmente características temporizadas para impedir operação indesejável durante as momentâneas reversões de energia, como, por exemplo, quando dos "surtos" de potência sincronizante dos geradores ou das reversões de energia quando ocorrem curto-circuitos [3].

- Relés de distância

Relés sensíveis a uma variação de impedância, em particular uma variação da reactância ou da resistência. Como esses parâmetros são proporcionais à distância, daí a origem do nome do relé. Na verdade o relé vê o parâmetro da linha ou sistema e não a distância propriamente dita [12].

- **Relés frequência**

Relés sensíveis à variação de frequência na rede, comparando-a com o valor regulado para operação. Assim, se houver uma queda de frequência para um valor abaixo da frequência nominal, fecha-se o contacto de relé e é disparado o disjuntor.

iv. Relés suplementar

Os relés suplementares, por sua vez, podem ser classificados de acordo com a sua função na parte lógica da proteção. Assim consideram-se:

- **Relés temporizadores**

A função desses relés é diferir a ação de um outro relé, sendo esse valor de retardo regulável e independente das variações das grandezas elétricas da rede. São relés que recebendo sinais lógicos dos medidores introduzem um determinado atraso na sua atuação.

- **Relés auxiliar**

Relé cuja função é excitar o circuito de disparo dos disjuntores. Estes relés têm de ter poder de fecho, o que não acontece nos restantes (sejam eles medidores ou suplementares). Muitas das vezes os relés auxiliares destinam-se apenas à interligação dos elementos da proteção, não necessitando neste caso de exibir poder de fecho.

- **Relés de sinalização**

Geralmente utilizado para sinalizar e registar a operação das proteções.

3.3.4 - Órgãos de acionamento

O disjuntor é um dispositivo de manobra capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes normais e anormais especificadas do sistema. Num sistema de proteção, o disjuntor tem a função de interromper a corrente de curto-circuito do sistema e isolar a parte do SEE sob defeito, retirando o elemento com defeito do circuito. É composto basicamente por um circuito de controlo, pelos contactos, por um sistema de abertura dos contactos, por um sistema de extinção do arco elétrico e por um sistema de fecho dos contactos.

As operações de abertura e de fecho são realizadas a partir de um comando, que pode ser dado por um relé ou por um operador.

Na proteção do SEE existem diversos tipos de disjuntores, que diferem essencialmente pelo dielétrico utilizado e sua aplicação na câmara de extinção do arco elétrico:

- Disjuntor a sopro magnético, usado em MT até 24 kV.
- Disjuntor a óleo (grande e pequeno volume), aplicado na MT e AT até 230kV.
- Disjuntores a vácuo, aplicado em MT
- Disjuntores de ar comprimido, embora possam ser usados em toda a gama de tensões, são mais utilizados na AT e MAT.
- Disjuntores à Gás SF₆ mais moderno e com melhores características, é a tendência atual nas áreas de AT e MAT.

3.3.5 - Fontes de alimentação auxiliar

Consiste em várias baterias formando uma associação até chegar à tensão nominal de operação do circuito de corrente contínua (DC) na ordem de 115 a 125 Volts.

O circuito de comando de abertura ou fecho do disjuntor é alimentado em corrente contínua, isto torna o controlo independente das tensões e correntes do sistema elétrico que sofrem constantemente variações e mudanças no seu estado. Uma sala especial é dedicada ao banco de baterias, Figura 3.14, por causa das reações eletroquímicas internas das baterias que podem gerar gases explosivos venenosos [12].



Figura 3.14 - Exemplo de sala de baterias de uma subestação

O banco de baterias é responsável pelo auxílio em corrente contínua dos serviços auxiliares da subestação. O seu carregador consiste numa ponte retificadora projetada especialmente para o efeito.

3.4 - Requisitos do sistema de proteção

Os critérios básicos que norteiam o projeto e implementação de sistemas de proteção são: velocidade de atuação, seletividade e coordenação, sensibilidade, fiabilidade e segurança. Assim, serão descritos estas características funcionais essenciais devido a sua importância.

3.4.1 - Zonas de proteção e redundâncias

Para a garantir a melhor coordenação e execução do sistema de proteção, é necessário definir as zonas de proteção. Geralmente, para os defeitos que afetam diretamente os equipamentos, como os curto-circuitos, uma zona de proteção corresponde a um equipamento específico do sistema (linha, barramento, transformador, motor).

Normalmente, existe sempre alguma sobreposição entre zonas de proteção, que por vezes, visa proporcionar uma ou mais reservas de atuação face à eventualidade de funcionamento incorreto da proteção responsável, em primeira mão, pelo equipamento

respetivo (proteção primária) ou dos disjuntores por ela comandados. A Figura 3.15 mostra um pequeno sistema com as zonas de proteção correspondentes.

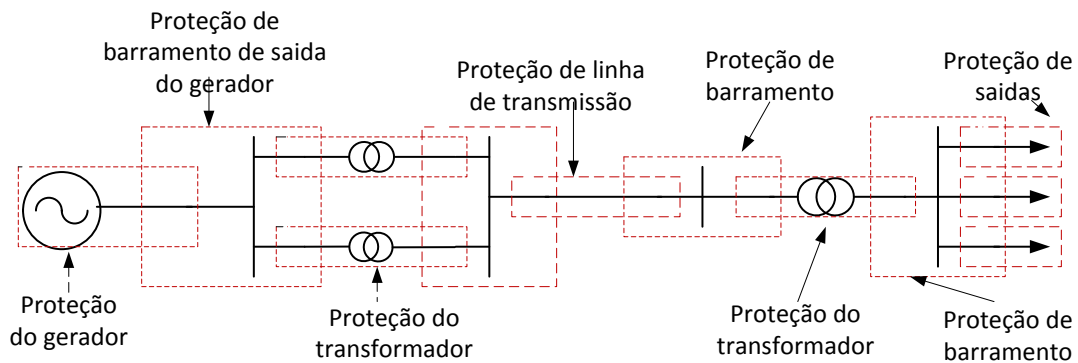


Figura 3.15 - Zonas de proteção [5]

A sobreposição de zonas de proteção vizinhas, garante que nenhuma parte do sistema fique sem proteção. Por vezes, tal sobreposição visa garantir uma duplicação redundante, quando os equipamentos do sistema o justificam. A redundância implica que a unidade de proteção deverá servir de backup à unidade existente a jusante. Um equipamento de proteção deve cobrir diversas zonas, efetuando proteção primária na sua zona, onde deve atuar primeiro e mais rapidamente. A Figura 3.16 mostra que o relé A realiza proteção primária na zona A, e proteção secundária ou backup nas zonas B e C.

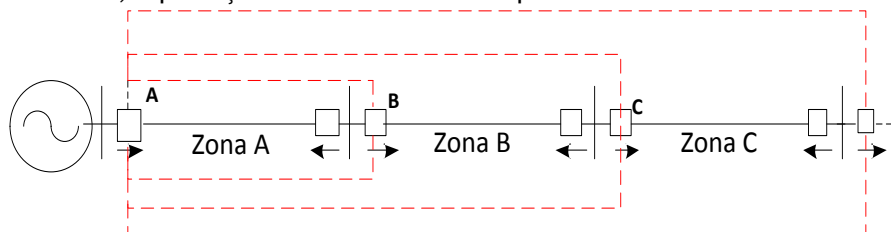


Figura 3.16 - Diferentes zonas de atuação de um relé

A coordenação entre a proteção primária e secundária é realizada através de um atraso na atuação de backup. O atraso deverá ser o mínimo possível, mas que permita a correta atuação da proteção primária [13].

3.4.2 - Seletividade

A seletividade é a propriedade que o sistema de proteção deve possuir de modo a isolar apenas o equipamento defeituoso quando da ocorrência de um defeito, com o objetivo de minimizar a perda de funcionalidade do sistema de energia [13]. Este requisito exige que a cada zona de proteção se associem disjuntores terminais que permitam o referido isolamento

específico. Com ela, pretende-se garantir que, em caso de defeito, atue a proteção que esteja localizada mais próximo do local onde ocorreu esse defeito. Assim, será possível minimizar as consequências e os reflexos sentidos pelos utilizadores do sistema. Observa-se na Figura 3.16, um exemplo de eliminação seletiva de defeito.

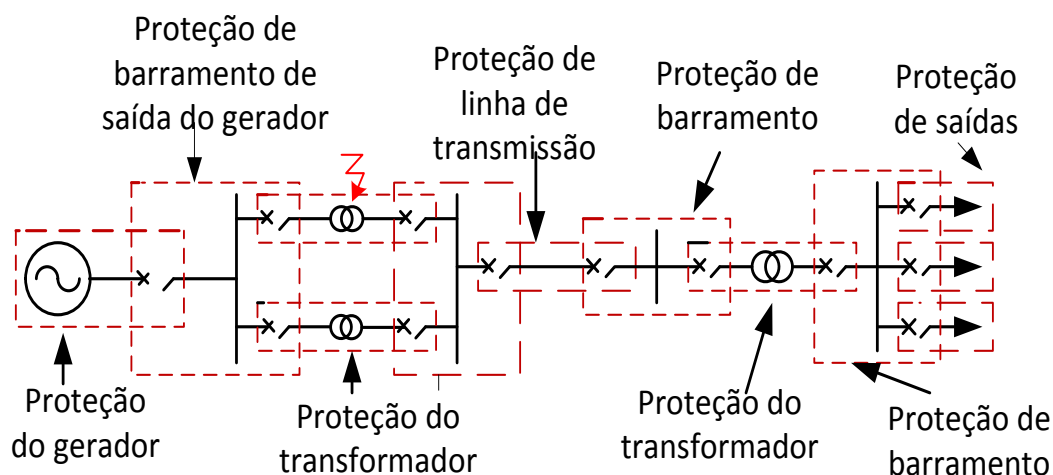


Figura 3.17 - Seletividade por zonas de proteção [13]

No caso de um curto-circuito no transformador, as proteções devem ordenar a abertura dos disjuntores mais próximo do defeito (disjuntores imediatamente a montante e a jusante do transformador). Para garantir maior segurança, cada disjuntor está incluído em duas zonas de proteção vizinhas. A seletividade é uma das características funcionais mais importantes dos sistemas de proteção, a não atuação ou a atuação indevida deste mecanismo de proteção, pode conduzir a uma interrupção desnecessária em certas zonas da rede.

3.4.3 - Sensibilidade

As proteções devem ser suficientemente sensíveis para operarem nas condições de defeito associadas as menores intensidades de corrente de curto-circuito na sua zona de atuação, e permanecerem estáveis nas condições máximas de carga (não atuar nas condições de carga que originam as máximas intensidades de corrente).

As proteções devem atuar não só em caso de defeitos francos (na sua zona de atuação), como também no caso de defeitos resistivos, quaisquer que sejam as condições da rede e sempre que as características dos defeitos caem no seu campo de medida [13].

A sensibilidade da proteção deve ser tal que quando, da ocorrência de curto-circuito resistivo esta opere na parte final da sua zona de atuação. É usualmente expresso através do fator de sensibilidade (K_s) é definida na equação 5 como:

$$K_s = \frac{I_{ccmin}}{I_{op}} \quad (5)$$

Em que: I_{ccmin} – Corrente de curto-circuito mínimo (calculada para o curto-circuito franco no extremo mais afastado da linha, e sob condição de geração mínima)

I_{op} – Menor corrente que faz operar a proteção (valor mínimo de corrente de acionamento exigido pelo fabricante do relé)

A seletividade e a sensibilidade são requisitos fundamentais de sistemas de proteção, muitas vezes em conflito. A seletividade deve ser considerada como prioritária, como um requisito fundamental do projeto do sistema de proteção, enquanto a sensibilidade será um objetivo a maximizar.

3.4.4 - Rapidez

O sistema de proteção deve atuar tão rápido quanto possível de modo a reduzir os danos nos equipamentos devido ao funcionamento inadequado, aquecimento ou instabilidade do sistema, quando da ocorrência de um defeito. A rapidez do sistema permite ainda reduzir o intervalo de tempo em que a tensão assume valores diferentes do nominal, assim como, manter a estabilidade do sistema. É de referir que o tempo máximo admissível pela manutenção da estabilidade, para a eliminação de um defeito numa rede primária, depende de diversos fatores, sendo o mais importante o valor da tensão nos barramentos das centrais e subestações durante o defeito.

A Tabela 3.3. mostra os tempos típicos de eliminação de defeitos para diferentes níveis de tensão da rede, onde se pode verificar que os tempos decrescem com o aumento do nível de tensão.

Tabela 3.3 – Valores típicos de eliminação de defeitos (tempo de atuação das proteções)

U_n	t_{op}
300 - 500 kV	100 - 120ms
110 - 220 kV	150 - 300ms
6 - 15 kV	1,5 - 30s

Um sistema de proteção é eficaz quando a sua atuação é seletiva e rápida, ou seja, quando tem uma atuação correta. O tempo total de eliminação de um defeito depende do tempo de atuação das proteções somado ao tempo de atuação dos disjuntores, contado desde a ordem de abertura até à extinção do arco (t_d).

$$T_{total} = t_{op} + t_d \quad (6)$$

De salientar que, com o aparecimento no mercado de equipamentos modernos e sofisticados o tempo de eliminação de defeito tem vindo a decrescer. Assim, o sistema equipado com estes aparelhos melhora significativamente a sua rapidez [13]. Os relés rápidos devem ser associados a disjuntores rápidos, de modo a dar um tempo de operação total pequeno [11].

3.4.5 - Segurança

O sistema de proteção não deve operar sob condições em que não esteja previsto que atue, ou seja, ele deve operar fielmente no caso da ocorrência de um curto-circuito na sua zona de atuação. A segurança das proteções depende, por um lado, da sensibilidade (K_s), e por outro lado, da sua coordenação (temporização, regulação da intensidade).

Uma operação incorreta poderá dever-se:

- Instalação incorreta
- Deterioração do equipamento

Geralmente, a segurança está em contradição com a rapidez e sensibilidade das proteções. Por exemplo, uma proteção segura não deve atuar devido a um pico de corrente de arranque de um motor de indução. Por isso, satisfazer estes requisitos contraditórios é a principal dificuldade em projeto das proteções.

3.4.6 - Fiabilidade

O sistema deve operar no caso de ocorrência de um defeito na sua zona de proteção, a fiabilidade é um dos mais importantes requisitos de proteção. Uma proteção passa a maior parte do seu tempo de vida útil no estado estacionário, durante este período há tendência para se verificar uma deterioração dos contactos e enrolamentos de proteção de tal modo que quando ocorre um defeito, esta pode não ter resposta adequada. As proteções devem ser revistas periodicamente, e ensaiadas de forma a ser controlada a sua fiabilidade.

É impossível obter uma fiabilidade completa, existe sempre um risco de não funcionamento, quer devido a defeitos no equipamento, quer a erros humanos. Por isso, a existência de reserva é fundamental nos sistemas de proteção. Quanto mais simples for a constituição de um sistema de proteção (circuitos de proteção e relés), melhor é sua fiabilidade.

3.4.7 - Economia

Segundo [13], é fundamental obter a máxima proteção a um custo reduzido. Os custos de proteção são considerados muitas vezes elevados, quando considerados isoladamente. A avaliação económica das proteções deve ser feita em função do custo mais elevado dos equipamentos que serão protegidos, e o custo de uma interrupção ou a perda do equipamento através de uma proteção inadequada.

O equipamento de proteção usualmente representa um investimento de 3 a 5 % do total dos investimentos, variando caso a caso, com a configuração da rede, níveis de tensão ou ainda de local da sua instalação (rural ou urbano).

Com a introdução das proteções digitais, o valor das proteções tornou-se ainda mais baixo devido a uma maior diversidade de fabricantes e devido á introdução de proteções digitais que conseguem reunir num só equipamento proteções contra diversos tipos de defeitos [13].

3.5 - Resumo

Foram feitas uma pequena abordagem sobre a evolução das proteções, de tecnologia eletromecânica, passando por estático, digital e numérico. Também falou-se da constituição, princípio de funcionamento de sistemas de proteção, assim como a classificação dos relés de proteção. Para finalizar apresentou-se os principais requisitos do sistema de proteção.

Capítulo 4

Potência de Curto-Circuito versus Sistemas de proteção

Neste capítulo será abordado o tema da potência de curto-circuito e corrente de curto-circuito em redes isoladas, assim como, os pequenos geradores síncronos e suas características. Para finalizar, será analisado a influência da baixa potência de curto-circuito em sistemas de proteção em redes isoladas.

4.1 - Introdução

O estudo da corrente de curto-circuito rede tem grande importância no planejamento, projeto e exploração de instalações e redes elétricas. Através do seu conhecimento, é garantido que todos os componentes percorridos por essa corrente de defeito possam suportar os seus efeitos.

Como a corrente de curto-circuito é proporcional à potência de curto-circuito, este será objeto de estudo deste capítulo.

A potência de curto-circuito é a potência máxima que a rede pode proporcionar durante um defeito. Como tal, para o seu estudo, são consideradas todas as fontes que possam proporcionar fluxo de potência que vão contribuir para a corrente de curto-circuito.

A potência de curto-circuito num dado ponto da rede depende diretamente da configuração da rede e a impedância de seus componentes: linhas, cabos, transformadores, e outros equipamentos da rede através do qual a corrente de curto-circuito passa. Sendo assim, a impedância equivalente da rede é um indicador muito útil da potência de curto-circuito.

A Figura 4.1 representa o equivalente de Thevenin representativo da rede equivalente a montante do barramento da rede de distribuição. No caso de uma rede isolada este equivalente corresponde à central elétrica constituída por grupos geradores síncronos acionados por motor á diesel.

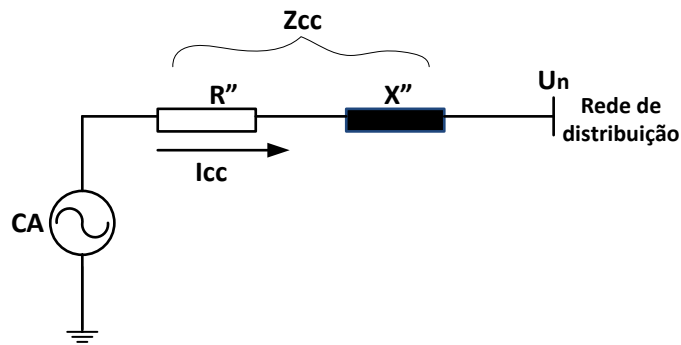


Figura 4.1 - Esquema unifilar de Thevenin da rede a montante (grupo gerador)

A potência de curto-circuito relaciona-se com R'' e X'' pela equação:

$$S_{cc} = \frac{V_n^2}{Z_{cc}} = \frac{V_n^2}{\sqrt{R''^2 + X''^2}} \quad (1)$$

Sendo:

- S_{cc} - Potência de curto-circuito [MVA];
- V_n - Tensão nominal da rede [kV];
- Z_{cc} - Impedância de curto-circuito a montante da rede [Ω];
- X'' - Reactância de curto-circuito a montante da rede [Ω];
- R'' - Resistência a montante da rede [Ω];
- I_{cc} - Corrente de curto-circuito a montante da rede [kA];

A expressão (1) mostra que, conhecendo a tensão nominal no barramento e a impedância de curto-circuito, sabe-se a potência de curto-circuito no barramento.

Para uma rede isolada o cálculo da potência de curto-circuito no barramento da subestação é feita utilizando valores típicos das reactâncias síncronas dos grupos geradores ou utilizando os valores fornecidos pelo fabricante.

A potência de curto-circuito num dado ponto da rede é definida como o produto da tensão nominal da rede pela corrente que fluiria no caso de ocorrer um curto-circuito nesse ponto da rede, equação (2).

$$\bullet S_{cc} = I_{cc} \times U_n \quad (2)$$

$$\bullet I_{cc} = \frac{U_n}{Z_{cc}} \quad (3)$$

4.2 - Potência de curto-circuito em redes isoladas

Para uma rede isolada, cuja alimentação é feita através de centrais elétricas de pequenas, constituído por grupo de geradores síncronos de baixa potência, a potência de curto-circuito será a máxima potência que o grupo fornece em situação de defeito.

As redes isoladas possuem, por isso, baixa potência de curto-circuito devido ao pouco consumo, este facto influencia a corrente de curto-circuito, uma vez que a magnitude de corrente de curto-circuito, depende da potência da geração. Isto é, tanto maior será a corrente de curto-circuito, quanto maior for a potência que o sistema poderá fornecer.

Quando ocorre um defeito num ponto da rede, alimentado por um grupo de gerador síncrono, este continuará a fornecer tensão para o sistema, e o campo de excitação será mantido independente do curto-circuito. Esta tensão gerada irá produzir a corrente de curto-circuito, que fluirá para o ponto onde ocorre o defeito, e será apenas limitada pela impedância do gerador e do circuito entre o gerador e o ponto. No caso de ocorrer o curto-circuito no barramento de ligação do gerador, este é limitado apenas pela impedância do gerador, por isso, quanto mais próximo do gerador, mais severo é o defeito.

A Figura 4.2 representa a central, constituído por um grupo de geradores síncronos, ligados em paralelo a um barramento de média tensão.

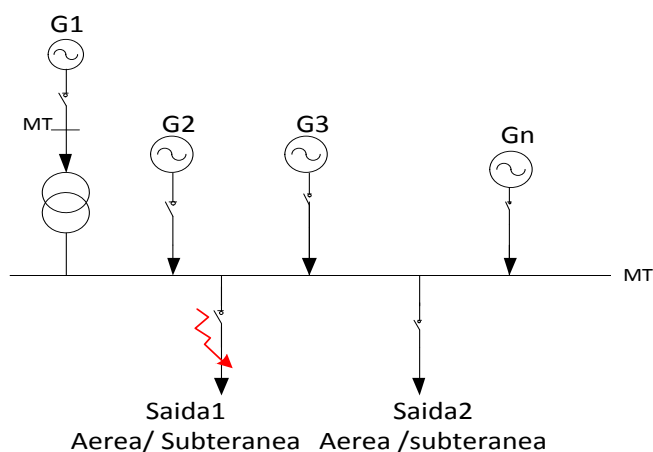


Figura 4.2 - Esquema unifilar simplificado de grupo geradores ligados em paralelo

Em situação de defeito na saída1, vai circular uma corrente de curto-circuito proporcional à geração. Esta vai obrigar a atuação do relé dando ordem de abertura do disjuntor afeto à saída1.

Como exemplo, a Figura 4.3 ilustra modelos de gerador á diesel comum em pequenas redes isoladas, de salientar que no mercado existe gamas distinto, assim como existem também diferentes fabricantes deste tipo de máquina elétrica.



Figura 4.3 - Geradores acionados por motores à diesel [14]

4.3 - Pequenos geradores síncronos e suas características

As máquinas síncronas podem ser utilizadas tanto como motores, assim como geradores. Por razões construtivas e ao seu custo maior em relação às máquinas de indução, elas são mais utilizadas como geradores. Como motores elas são em geral utilizadas em altas potências, onde apresentam vantagens importantes em relação aos motores de indução [12].

Tal como foi referido na secção 4.2, uma utilização mais comum da máquina síncrona funcionando como gerador é em centrais elétricas, independente do seu tipo. Nestes centrais, toda a energia elétrica disponível é produzida por geradores síncronos. Eles convertem, assim energia mecânica em elétrica.

4.3.1 - Aspetos construtivos e princípio de funcionamento

A seguir, apresenta-se uma descrição resumida das principais características construtivas, tecnológicas e princípio de funcionamento das máquinas síncronas.

- **Estator**

No estator estão alojados as bobinas das fases, essas bobinas, construtivamente, estarão distribuídas ao longo do estator, tendo uma em relação a outra um desfasamento de 120° . Assim, na bobina serão induzidas tensão elétrica desfasada de 120° elétrico.

- **Rotor**

O rotor é constituído por um núcleo magnético, envolvido por uma bobina. A bobina é alimentada por corrente contínua, para criar o campo magnético de excitação, necessário para induzir as tensões nas bobinas do estator [15].

Normalmente existe dois tipos de rotor: rotor de polo saliente e rotor de liso ou bobinado. No entanto, nas máquinas de pequena potência, também se usa rotor de íman permanente.

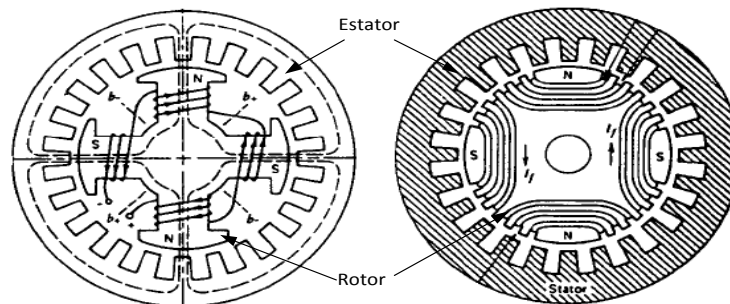


Figura 4.4 - Corte máquina síncrona de polos salientes e polos lisos [15]

- **Circuito Magnético**

O circuito magnético do gerador síncrono serve percurso ao fluxo magnético, é constituído por material ferromagnético de elevada permeabilidade com uma pequena percentagem de silício, formado por empilhamento de chapas obtidos por laminagem a frio. O circuito magnético é constituído por uma parte estatórica e outra parte rotórica, com aspetos caraterísticos de uma máquina de pólos salientes e entreferro variável.

- **Circuito elétrico**

O funcionamento do gerador baseia-se na indução de forças eletromotrizes nos condutores elétricos que são atravessados por campo magnético fixo no tempo e variável no espaço. Para um bom funcionamento da máquina elétrica é necessário que circuitos elétricos sejam constituídos por um material bom condutor devidamente isolado da massa de material ferromagnético. O isolamento das bobinas estatóricas deve estar previsto para suportar as sobretensões de origem atmosférica, frequentes nas redes elétricas aéreas, e as sobretensões provocadas pela atuação das diferentes proteções utilizadas na rede.

- **Caixa de terminais**

Os diferentes grupos de bobina de uma fase estatórica são ligados no interior da máquina, na zona da cabeça das bobinas e ligados por cabos aos terminais, somente os cabos terminais são acessíveis ao exterior.

- **Excitação do gerador síncrono**

No gerador síncrono o fluxo magnético necessário ao funcionamento da máquina é criado pela passagem de uma corrente elétrica nos condutores do circuito indutor. A excitação do gerador síncrono é feita por uma corrente elétrica contínua, para ser possível criar um campo magnético indutor constante no tempo e fixo no espaço, relativamente a parte da máquina em que é criado. Existem vários esquemas de excitatriz, com ou sem escova (brushless).

A Figura 4.5 representa o princípio de funcionamento da máquina síncrona como gerador.

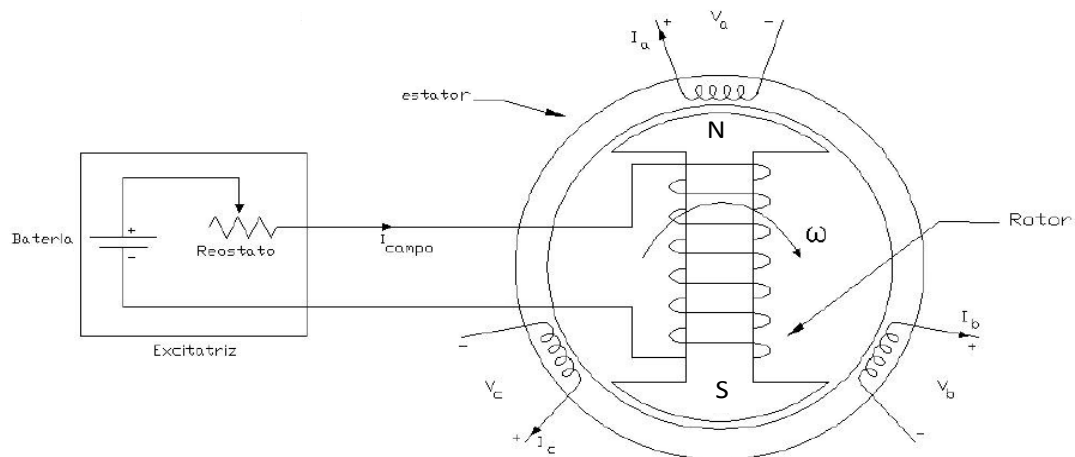


Figura 4.5 - Exemplo de máquina síncrona operando como gerador [3]

O Rotor roda sempre à velocidade de sincronismo (exceto em condições transitórias ou sob algum tipo de oscilação). A velocidade de sincronismo é definida pela rotação da máquina primária, a qual fornece a potência ativa para o sistema ligado ao gerador. A frequência da tensão gerada depende assim da velocidade de rotação e do número de Pólo, de acordo com a equação:

$$f = \frac{n_s}{60} p \quad (4)$$

f - frequência da tensão gerada [Hz].

n_s - Velocidade de sincronismo [rpm]

P - nº de pares de pólos

Na aplicação das máquinas elétricas síncronas pode existir a necessidade da máquina funcionar em paralelo com um qualquer sistema elétrico, desde uma vasta rede elétrica a um gerador síncrono a funcionar isoladamente.

Segundo [12], um problema importante no funcionamento em paralelo de uma máquina síncrona é o da sincronização da máquina para estabelecimento do paralelo. Para efetuar o paralelo de dois sistemas de corrente alternada, em particular, formado por alternadores síncronos, são indispensáveis as seguintes condições:

- O valor da tensão das máquinas deve ser igual;
- As frequências dos sistemas (geradores) devem ter o mesmo valor;
- Deve verificar a mesma sequência de fase nos sistemas (geradores);
- As máquinas devem estar em sincronismo (os seus valores instantâneos de tensão em cada fase devem ser iguais e com a mesma polaridade em cada instante).

Estas condições são importantes, uma vez que, para uma rede isolada cujo centro produtor é constituído por geradores síncronos ligados em paralelo, as condições acima são indispensáveis.

Satisfeitas estas condições, quando dois os mais geradores síncronos são ligados em paralelo, a capacidade do sistema é a soma das capacidades das unidades em paralelo. Assim, unidades de diferentes potências nominais dividem a carga proporcionalmente as suas capacidades individuais.

4.4 - Influência do Baixa Potência de Curto-Circuito nos sistemas de Proteção em redes isoladas

Os sistemas de proteção são conjunto formados por relés de proteção, disjuntores e demais equipamentos de proteção, com a finalidade de proteger os componentes da rede como, geradores, barramentos, linhas e outros equipamentos em caso de defeito. Sendo assim, o seu projeto é feito de acordo com as características e os requisitos do sistema de energia onde será utilizado. A solução adotada tem que garantir o compromisso técnico-económico tendo em conta os investimentos, os custos operacionais a segurança e a qualidade de serviço.

A baixa potência de curto-circuito tem influência direta nos sistemas de proteção, uma vez que influencia o seu dimensionamento e a escolha dos equipamentos.

De acordo com [17], os estudos sobre curto-circuito são essenciais para o conhecimento de:

- Determinação do poder de corte de disjuntores e fusíveis: com a previsão da corrente máxima de curto-circuito no ponto da rede onde estão instalados, tem-se o limite inferior do poder de corte destes dispositivos;
- Previsão dos esforços térmicos e eletrodinâmicos provocados pela passagem da corrente: Todos os elementos da rede, sobretudo pontos nevralgicos como barramentos e seccionadores, terão que suportar os efeitos destrutivos da passagem das correntes de curto-circuito;
- Regulação das proteções: a especificação das correntes e tempos de disparo das proteções baseia-se nos valores previstos da corrente de curto-circuito.

Relativamente à aparelhagem de corte, a consideração das potências ou intensidades de corrente de curto-circuito intervêm na definição de uma das suas características mais importantes que é o poder de corte. Com efeito, este deve garantir que tal aparelhagem tem capacidade para suportar os regimes de curto-circuito que se possam verificar, tendo em conta o ponto da rede onde é instalada.

No âmbito desta temática é necessário conhecer o valor de Potência e Corrente de curto-circuito trifásico simétrico, máximos e mínimos da rede. O valor máximo (sub - transitório) é

determinado para o regime de ponta da produção e o valor mínimo (permanente) é determinado para o regime de vazio da produção.

Sendo o SEE um sistema dinâmico, ou seja, ao longo do tempo vai evoluindo a constituição da rede pela adição de novos componentes, nomeadamente novos centros produtores que faz aumentar conseqüentemente, a potência e a intensidade de corrente de curto-circuito num dado ponto da rede. Por isso, quando houver aumento da capacidade geradora ou mudança do sistema devem ser refeitos os cálculos da corrente de curto-circuito na rede.

4.6 - Resumo

Este capítulo iniciou-se com uma abordagem sobre potência de curto-circuito em redes isoladas, assim como, a sua influência em sistemas de proteção.

Seguiu-se uma abordagem sucinta sobre os geradores síncronos acionados por motor à diesel, suas características e princípio de funcionamento.

Finalmente falou-se da influência da baixa potência de curto-circuito nas proteções em redes isoladas.

Capítulo 5

Guia para Seleção de Relés de Proteção em Redes Isoladas

5.1 - Introdução

A escolha de dispositivos de proteção é uma das mais importantes etapas do projeto de uma rede elétrica, é objeto de um estudo prévio e pormenorizado visando satisfazer os principais requisitos de sistema de proteção. Esse estudo fica condicionado por investimento económico que se pretende fazer. O sistema elétrico de energia é protegido contra os defeitos e perturbações do tipo:

- Oscilações de potência e de frequência;
- Sobreintensidade (curtos-circuitos e sobrecarga);
- Sobreensões (internas e externa - descargas atmosféricas).

Neste capítulo será analisada a proteção digital dos principais elementos constituintes de uma rede elétrica isolada, com uma baixa potência elétrica instalada. Estes elementos são: o gerador, o transformador de potência, o barramento, linhas e banco de condensadores.

5.2 - Aplicação de tecnologia digital na proteção da rede elétrica

Inicialmente a tecnologia digital era aplicada apenas para as linhas de transmissão. Esta tecnologia ganhou impulso com o desenvolvimento dos microprocessadores e dos computadores permitindo um avanço significativo no domínio das proteções, hoje a sua aplicação estende-se a toda rede de distribuição.

O desenvolvimento da tecnologia digital procurou solucionar os problemas apresentados pelas tecnologias eletromecânicas e eletrónicas ou estáticos, como implementação de múltiplas funções de proteção, redução de custo, aumento de flexibilidade e fiabilidade do sistema de proteção.

Os sistemas digitais possibilitam uma maior integração entre seus componentes, o que permite uma maior flexibilidade e velocidade na obtenção das informações registadas pelos equipamentos, além da possibilidade de troca de informações entre os dispositivos para a melhor tomada de decisão [9].

A utilização das proteções digitais encontra-se integrada no atual desenvolvimento dos sistemas hierarquizados de controlo dos SEE, com elevada capacidade de processamento paralelo e distribuído, assim como, possibilita uma monitorização e controlo das proteções em tempo real [9].

A arquitetura implementada para o sistema de proteção, comando e controlo (SPCC) nas subestações de distribuição pressupõe a existência de três níveis hierárquicos Figura 5.1. No nível 0 estão todos os equipamentos de média tensão que interage com SPPS. Nível 1 é constituído pelas unidades de painel (Dispositivos Eletrónico Inteligentes-IED), estabelecendo a interface entre os equipamentos do nível 0 e a unidade central, localizada no nível 2 [19].

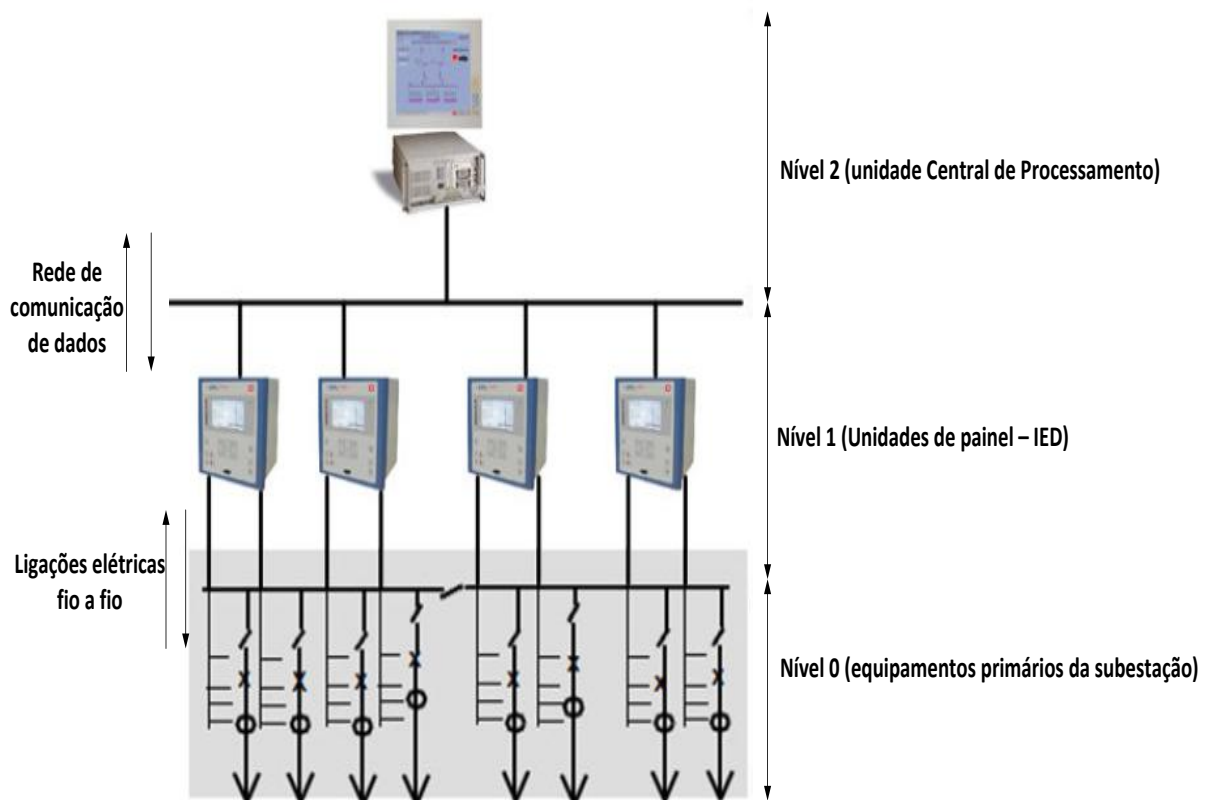


Figura 5.1 - Modelo de organização dos sistemas de proteção, comando e controlo das subestações de distribuição [19]

5.2.1 - Arquitetura de um relé digital

A Figura 5.2 mostra a arquitetura genérica de um relé digital de proteção. Nesta figura, verifica-se que o papel preponderante que o processador desempenha. Ele é o elemento

central desta arquitetura, sendo responsável pela execução dos programas, manutenção das variáveis temporais e comunicação com todos os elementos periféricos.

O processador aceita os dados da amostra e armazena-os para uso futuro na RAM (memória de acesso aleatório). Os dados são acionados por algoritmos ou comparações definidos pela memória do programa, que está armazenado na memória ROM (memória apenas para leitura) ou mais amplamente na EPROM (memória apenas de leitura programável). O programa armazenado em ROM ou EPROM é não-volátil.

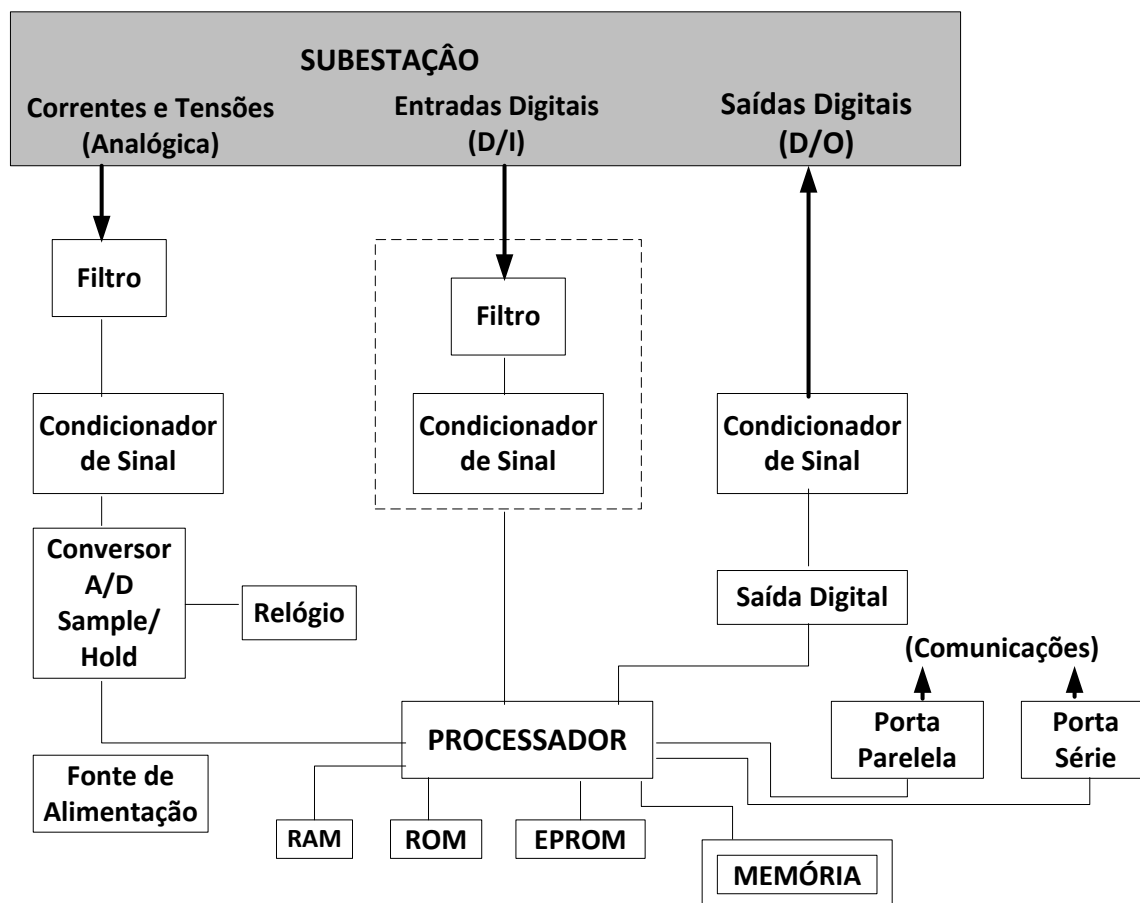


Figura 5.2 - Constituição de um relé digital de proteção [9]

A proteção digital integra entradas analógicas de intensidades de corrente e tensões, e ainda entradas digitais para indicar a posição de contactos. Os sinais analógicos de entrada recebida dos TI's e dos TT's são convertidos em sinais digitais por conversor A/D intermédio.

Os sinais de saída digital do processador são sinais de saída do relé que vão dar ordem de abertura ou de fecho de contacto do disjuntor. A saída do processador através da porta paralela é efetuada através de um conjunto de bytes que podem ser usados para atuar contactos. Estes contactos podem ativar alarmes, bobines de disparo de disjuntor, ou outros equipamentos externos [9].

5.3 - Proteção Digital de Gerador Síncrono

Numa rede elétrica isolada cujas centrais elétricas constituídos por geradores síncronos, estes são normalmente ligados diretamente a rede de distribuição ou por intermédio de um transformador.

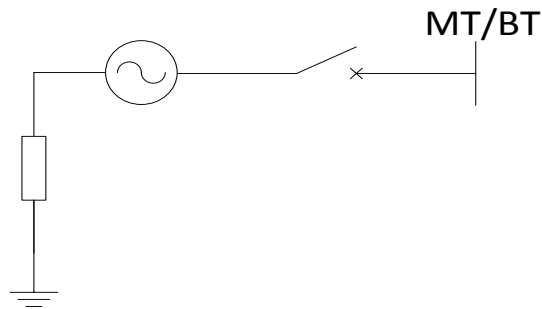


Figura 5.3 - Esquema unifilar de ligação de pequenos e médios geradores à rede [11]

Sendo estes elementos de elevado custo de aquisição e de reparação, e ainda devido à sua importância na rede, necessitam de sistemas de proteção individual eficiente e até especiais para minimizar estragos na máquina e suas consequências, como por exemplo, o tempo de paragem para reparação da máquina.

De todos os elementos da rede, o gerador é o que apresenta maiores desafios de proteção devido ao facto de estar ligado a três sistemas diferentes ver Figura 5.4.

De um lado ele está ligado ao motor principal (fornecendo energia mecânica), de outro lado está ligado à rede ou a outros geradores, a qual tem que rodar em sincronismo e por último, ligação a fonte de excitação. Podem ocorrer vários tipos de defeitos neste sistema de geração pelo que necessita de proteções elétricas e mecânicas.

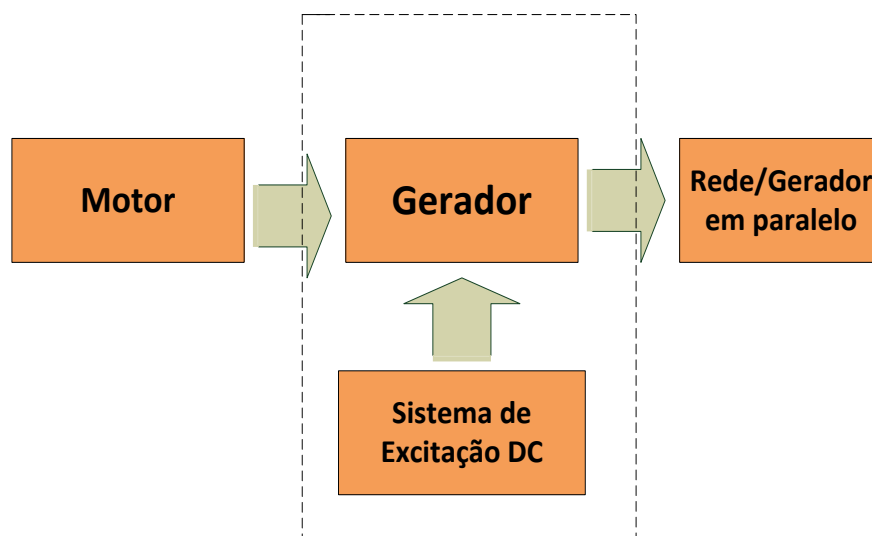


Figura 5.4 - Esquema representativo de sistema que envolve o funcionamento do gerador

Assim, os aspetos acima referidos apontam, de forma incontornável para a necessidade de dotar o sistema de proteção dos seguintes requisitos:

- Fornecer apenas sinalizações e alarmes numa função de deteção;
- Fornecer sinalizações e alarmes e colocar o equipamento fora de serviço numa função mais complexa de deteção;
- Medição da extensão e intensidade dos defeitos;
- Capacidade de decisão.

Ligação de neutro do gerador à terra

A ligação do neutro à terra facilita a proteção do enrolamento do estator e torna-se essencial para a eliminação do defeito. Assim, o neutro do gerador é ligado à terra através de baixa impedância, para facilitar a deteção e eliminação de defeito. Este método é adequado a sistemas com vários geradores ligados em paralelo por um barramento comum, que é o caso das redes isoladas.

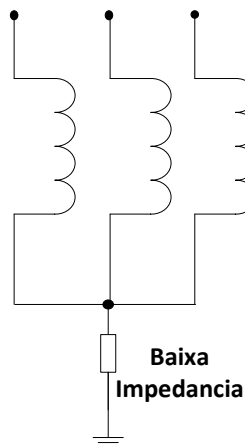


Figura 5.5 - Ligação de neutro do gerador à terra

Antes de entrar em detalhes sobre o sistema de proteção do gerador, é conveniente considerar a origem e as consequências das avarias para o sistema.

O funcionamento anormal do gerador pode ter causas internas ou externas:

a) Avaria de origem interna - Avarias que se verificam nos diversos órgãos constituintes dos geradores.

As anomalias mais comuns no interior do gerador são geralmente atribuídas a defeitos de isolamento dos enrolamentos do estator e do rotor por efeito de sobretensão ou do envelhecimento térmico dos materiais dielétricos.

Os defeitos elétricos de origem interna afetam as duas partes principais do gerador:

- **Estator:** Defeitos entre fases; Defeitos fase-terra; Defeitos entre espiras da mesma fase.
- **Rotor:** Defeitos fase-terra; Defeitos entre espiras da mesma fase; Defeitos no rotor originados por queda de isolamento devido a causas mecânicas.

b) Avaria de origem externa

Perturbações e avarias que se verificam na rede, como reflexo, afetam os geradores, causando danos de natureza térmica (sobreaquecimento dos enrolamentos do estator), ou de natureza eletromecânica (solicitações mecânicas excessivas nos enrolamentos do estator). Estas perturbações são:

- Curto-circuito (trifásico, trifásico-terra, bifásico, bifásico-terra e monofásico-terra);
- Cargas desequilibradas;
- Sobrecargas;
- Descargas atmosféricas diretas ou indiretas;
- Retirada súbita de geração;
- Retirada súbita de carga;

Os geradores síncronos quando ligados ao sistema elétrico de potência, ficam sujeitos a diversas condições anormais de operação. A seguir serão analisadas as recomendações de proteção, visando cobrir todos os defeitos e demais anormalidades no funcionamento do gerador síncrono.

5.3.1 - Função de proteção para o gerador

A determinação das funções de proteção a serem aplicadas a um gerador síncrono leva em consideração diversos fatores tais como a capacidade da máquina, o tipo e a importância do gerador para o sistema, o tipo de sistema de excitação, entre outros. As funções de proteção mais comuns são:

Proteção de Sobrecarga [#49]

A sobrecarga acontece quando a potência que é pedida a máquina for maior que a potência nominal da máquina, nesta condição, haverá sobreintensidade no gerador, com aumento das perdas e elevação da temperatura no enrolamento do estator e aquecimento excessivo no gerador. Isso pode causar envelhecimento precoce do isolamento dos enrolamentos.

A carga excessiva num componente seja ele, máquina rotativa ou estática, cabos e linhas pode provocar um aumento da temperatura. A proteção contra sobrecarga deve avaliar as condições de aquecimento do gerador em função da corrente.

Para um determinado valor de corrente, a temperatura desse componente variará exponencialmente em função da sua constante de tempo de aquecimento de acordo com a norma IEC 60255-8.

A maior dificuldade no uso desta função é a determinação da constante de tempo e os parâmetros do componente a proteger. A maioria dos relés digitais usa o conceito de réplica térmica de acordo com a norma IEC 60255-8.

Ainda para a proteção contra sobrecarga, utiliza-se [#38 - #49T], estas funções de proteção são usadas para monitorizar a temperatura interna do gerador.

Proteção de Sequencia inversa ou Negativa [#46]

Os geradores destinados a alimentar cargas equilibradas podem suportar apenas uma pequena percentagem de desequilíbrio de carga. As cargas desequilibradas devem ser desligadas da rede quando forem excessivas.

Uma carga desequilibrada, é caracterizada pela existência de corrente de sequência negativa. Esta corrente provoca correntes induzidas de frequência dupla no rotor. Além do aumento da perda no enrolamento do estator, o maior efeito ocorre no rotor (aquecimento).

A função de sequência negativa deteta o desequilíbrio das correntes de fase, com ou sem terra. As correntes de sequência negativa produzem campo girante no sentido inverso e induzem correntes inferiores à corrente de carga nominal da máquina.

Existem ainda diversas condições no sistema que provocam a existência da componente de sequência negativa, como por exemplo, curto-circuito bifásicos e monofásico, Também são detetados por esta função. O relé atua quando as correntes polifásicas forem desequilibradas ou contiverem correntes de sequência negativa.

Proteção Direcional de potência [#32]

O gerador síncrono, quando funciona em paralelo com outras fontes ou rede deve de acordo com as condições indicadas pelo fabricante, ser protegidos contra uma potência inversa (energia ativa).

Esta função opera num valor desejado de fluxo de potência, numa dada direção. A função 32R é utilizada nos geradores síncronos para a deteção de retorno de energia. A sensibilidade da inversão de potência deve ser na ordem de 1%, da potência nominal dependendo de tipo da máquina primária (para alguns fabricantes, motor a Diesel 5% á 25%).

Proteção Diferencial [#87G]

A função diferencial é a mais usada na proteção de SEE, utilizada na proteção de transformadores, máquinas rotativas, sistemas de barramento, linhas e cabos, equipamentos de compensação reativa. O princípio da proteção diferencial baseia-se na comparação entre grandezas que entram no circuito protegido e grandezas de mesma natureza que saem do circuito protegido.

Para o gerador, a proteção diferencial é responsável por comparar os valores das correntes da entrada e da saída para cada fase do estator, a fim de detetar curto-circuito no

seu interior e assim, realizar a proteção no momento de sua ocorrência. A proteção atua na sequência de curto-circuito entre duas fases.

No caso do neutro do gerador ser ligado diretamente a terra ou através de uma resistência de baixo valor, a proteção funciona igualmente para defeito à terra, no entanto, é prática geral prever um dispositivo de proteção particular contra defeitos à terra se a impedância da terra for grande [20].

Os requisitos básicos de uma proteção diferencial são:

- Deve considerar os efeitos de erros de precisão nos TI's e TI's auxiliares utilizados para conexão da proteção.
- Deve manter a estabilidade (não atuar) para curto-circuito externo à zona protegida, mesmo com saturação do TI.
- Deve ter rápida atuação para curto-circuito interno, mesmo para aqueles de baixa corrente.

A função diferencial é recomendada para geradores síncronos com potência entre 1 e 10MVA.

Proteção de máxima intensidade de fase instantânea [#50], Proteção de máxima intensidade de fase temporizado [#51] e proteção de máxima intensidade de fase com restrição de tensão [#51V]

Estas funções de proteção funcionam como proteção secundária para curto-circuito entre as fases caso exista proteção diferencial.

A proteção de máxima intensidade com restrição de tensão é aplicada nos geradores médios, potência superior a 1000 kW, de poder ser regulada para correntes menores e para tensão abaixo da nominal.

Proteção de máxima intensidade homopolar [#50N] [#51N]

Estas funções de proteção funcionam como proteção secundária para curto-circuito fase-terra.

Proteção contra Perda de sincronismo [#78PS]

A perda de sincronismo do gerador síncrono pode ser devido a um defeito de excitação, defeito no sistema de regulação, ou ainda causa exterior (curto-circuito na rede, desligamento de um importante consumidor de carga indutiva, ligação a uma longa linha em vazio) [11].

Um curto-circuito na rede ocasiona uma queda da potência elétrica fornecida pelo gerador, este gerador acelera permanecendo acionado pela máquina primária. Este tipo de funcionamento anômalo pode causar instabilidade na rede se não for rapidamente eliminada. A proteção é assegurada por uma proteção específica de perda de sincronismo (ANSI 78PS).

Proteção contra perda de excitação [#40]

Sistema de excitação tem como função estabelecer a tensão interna do gerador síncrono. Em consequência, o sistema de excitação é responsável não somente pela tensão gerada pela máquina, mas também pelo fator de potência e pela magnitude da corrente de saída.

Em função das suas características e de acordo com as necessidades do sistema elétrico ao qual está ligado, o gerador síncrono pode operar com correntes de excitação dentro de uma larga faixa.

Quando a corrente do circuito de campo atinge valores elevados, próximos do limite térmico deste circuito, tem-se uma condição de sobreexcitação. Nesse regime de operação, o gerador fornece potência reativa ao sistema.

Ao contrário, para valores muito pequenos da corrente de campo, o gerador passa a operar em regime de subexcitação (perda de excitação). Nesta condição o gerador síncrono funciona em modo assíncrono, absorve potência reativa do sistema. As consequências são aquecimento do estator, pois a corrente reativa pode ser elevada.

Alem disso, pode levar o sistema elétrico à instabilidade e até mesmo a um colapso de tensão, devido ao afundamento da tensão provocado pela absorção de potência reativa do sistema pelo gerador subexcitado. Pode ainda provocar a sobreexcitação das máquinas vizinhas, que tentarão suprir a potência reativa solicitada pelo gerador subexcitado.

Proteção contra defeitos à massa no Rotor [#64]

O circuito de excitação do gerador não é mais que um circuito de corrente contínua isolado e que não necessita de ligação à terra.

Na ocorrência de um defeito à terra neste circuito não haverá circulação de corrente, pelo que não é necessário desenvolver imediatamente qualquer ação, isto é a máquina poderá trabalhar nesta situação por períodos largos de tempo.

O perigo surge quando um segundo defeito ocorre num ponto diferente do primeiro, criando um caminho diversificado a circulação da corrente entre as espiras intervenientes do rotor. Como a corrente de excitação é elevada poderá causar danos consideráveis no enrolamento, aquecimento do rotor e danos na máquina.

A função desta proteção é detetar qualquer contacto dos enrolamentos do rotor com a terra, pois, em condições normais de operação, estes ficam totalmente isolados.

Proteção de máxima tensão de fase [#59] e proteção de mínima tensão [#27]

As funções de proteção de máximo e mínimo de tensão permitem a retirada de serviço gerador quando a tensão aos seus terminais se encontra fora dos limites superiores e inferiores respetivos. Quando o limite máximo de tensão for excedido a função de proteção de máxima tensão dá ordem de abertura ao disjuntor de interligação retirando o gerador de serviço.

O aumento da tensão aos terminais do gerador é devido muitas vezes à queda repentina de carga, uma vez que nessas condições o fluxo magnético reativo do estator enfraquece

consideravelmente e a máquina ganha velocidade. Estas sobrelevações de tensão podem ser perigosas para o isolamento do estator e, portanto, deverão ser rapidamente eliminadas.

Normalmente o regulador automático de tensão atua de modo a repor o valor pré-estabelecido de funcionamento. Contudo, para valores de tensão que subsistam eventualmente para além dos limites de controlo do regulador automático de tensão, a máquina e os disjuntores de saída deverão ser desligados.

A proteção de máxima tensão exerce deste modo uma ação de reserva do regulador de tensão desfazendo o paralelo entre a máquina e a rede. Esta função também protege o gerador em condições não controladas pelo regulador de tensão, como por exemplo uma forte rejeição de carga.

Proteção de máxima tensão homopolar [#59N]

Esta função é utilizada para proteção do estator contra defeitos à terra, os geradores síncronos com o neutro ligado à terra através de uma impedância de valor elevado apresenta baixa corrente de curto-circuito fase-terra o que torna difícil a sua deteção por proteção de sobreintensidade ou proteção diferencial. Logo, não pode ser utilizado o critério de medição direta de corrente. Assim, a função 59N através da deteção de tensão residual permite medir de uma forma indireta a corrente de curto-circuito fase-terra no enrolamento de estator.

Proteção de máxima [#81O] e mínima frequência [#81U]

As funções de proteção de máximo e mínima frequência permitem a retirada de serviço do gerador através da atuação do disjuntor de interligação, quando a frequência ultrapassa o valor máximo ou mínimo regulável, respetivamente.

A variação de frequência em regime permanente pode ser resultado de mau funcionamento do regulador correspondente e provoca os seguintes inconvenientes:

- Frequência muito elevada causa aquecimento anormal nos geradores e nos motores;
- Frequência muito baixa provoca perda de potência dos motores;
- A variação de frequência causa variação de velocidade dos motores, que pode causar desgastes mecânicos e mau funcionamento de dispositivos eletrónicos.

A Figura 5.6 apresenta o esquema de proteção de gerador síncrono médio com ligação direto ao barramento.

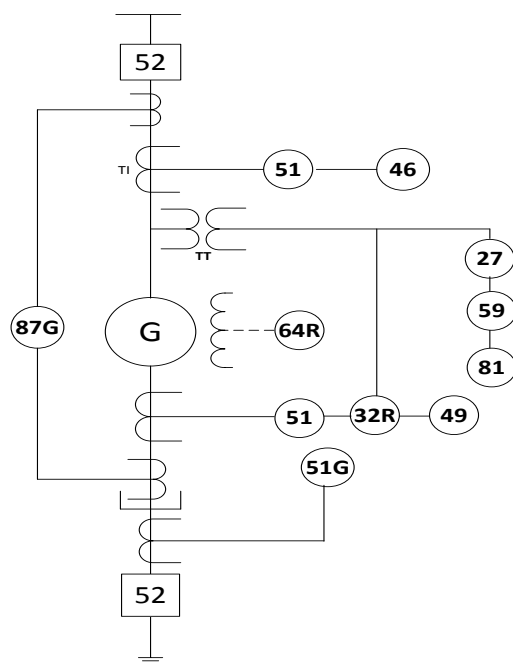


Figura 5.6 - Esquema unifilar de proteção de pequeno gerador síncrono com ligação direto ao barramento

A Tabela 5.1 mostra os principais defeitos e condições de perturbação a que podem afetar um gerador síncrono. Nela consta as proteções principais e as respectivas proteções secundárias.

Tabela 5.1 - Defeitos e proteções do gerador [22]

Tipo de defeito	Proteção Principal	Proteção secundária
Defeito entre as fases	87G	21, 51V, 87U, 46
Defeito fase-terra alta impedância de terra	59N, 27TN	50N/51N, 27/59
Defeito fase-terra baixa impedância de terra	87GD	50N/51N
Perda de excitação	40	
Sobretensão	59	59
Sobreexcitação	24	59
Desequilíbrio de corrente	46	
Frequência	81O/U	81O/U
Anti Motorização	32	32
Perda de energia (desenergização)	67	
Falha do disjuntor	50BF	46
Defeitos na rede (fase-fase)	21, 51V	46
Diferencial de fuga a terra dos enrolamentos	64F	

O moderno relé digitais multifunção, Figura 5.7, inclui todas as funções indispensáveis para a proteção do gerador num único equipamento, e a proteção é feita com a máxima fiabilidade e redundância.

Relé Digital Multifunções

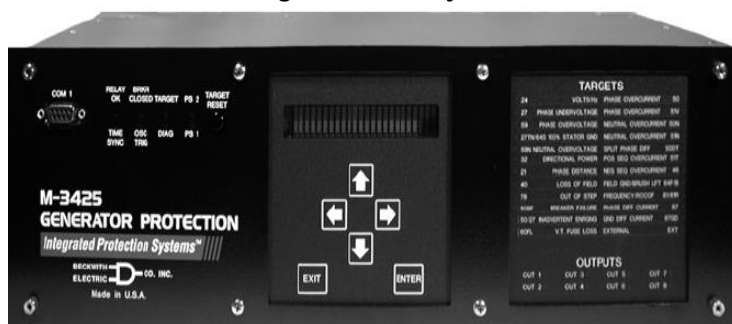


Figura 5.7 - M-3425 Relé digital multifunção para a proteção do gerador síncrono [23]

Este relé, para além das funções de proteção acima referido, também dispõe de funções adicionais de monitorização como: medição, oscilografia, deteção e registo de eventos, entre outros.

5.4 - Proteção digital de transformador de potência

O transformador é um elemento especialmente importante num sistema elétrico de energia. Dos elementos de SEE, os transformadores são os que apresentam baixo índice de ocorrência de defeito e maior segurança no funcionamento devido ao elevado aperfeiçoamento técnico aplicado na sua construção.

Mesmo assim, o seu elevado custo e os perigos associados aos defeitos que podem ocorrer dentro da cuba de óleo do transformador, onde os enrolamentos se encontram imersos, justificam um sistema de proteção apropriados, de modo a cobrir toda a gama de defeitos que possam ocorrer, sejam eles de origem interna ou externa.

Nos sistemas de proteção utilizados para os transformadores é usual distinguir dois grupos de proteção:

- Os que atuam contra a presença de defeito externos
- E os que atuam na ocorrência de defeitos internos.

Estão incluídas no primeiro grupo as proteções de máxima intensidade de fase e homopolar.

Fazem parte do segundo grupo a proteção diferencial de transformador, a proteção de cuba, a proteção Buchholz e a proteção por imagem térmica.

A escolha de uma proteção baseia-se em considerações técnicas e custos ligados à sua potência.

5.4.1 - Função de proteção para o transformador

Proteção diferencial [#87]

Tal como nos geradores, a proteção diferencial é utilizada na deteção de defeitos internos em transformadores de potência. Estes defeitos podem ser:

- Defeito entre fases
- Defeitos fase-terra
- Defeitos entre espiras

O seu princípio de funcionamento baseia-se na comparação das intensidades de corrente à entrada e à saída do transformador utilizando as correntes-imagem dos transformadores de intensidade instalados nos dois enrolamentos, primário e secundário do transformador de potência.

A proteção diferencial acaba por servir de proteção da cuba do transformador, porque todo o tipo de defeito que a proteção de cuba está vocacionada para detetar estão também incluído no campo de deteção da proteção diferencial.

Proteção de máxima intensidade de fase [#50] [#51]

Atua quando a corrente do circuito protegido é superior ao valor parametrizado. Deteta situações de defeito que solicitem correntes elevadas. Esta proteção é utilizada como proteção principal contra curto-circuito nos transformadores de média e pequena potência, ou como proteção secundária para defeitos externos.

Proteção de máxima intensidade de fase homopolar [#51N]

Atua quando a corrente homopolar se encontra acima dos valores parametrizados. Deteta as correntes de defeito a terra.

Proteção de máxima tensão homopolar [#59N]

Atua quando a tensão homopolar se encontra acima dos valores parametrizados. Deteta situações de defeito fase terra. Este tipo de defeito também pode ser detetado através de proteção de máxima intensidade homopolar de fase.

Proteção de gás - Buchholz [#63]

Os defeitos internos de transformadores ocasionam, por vezes, correntes de curto-circuito de intensidades relativamente pequenas. Estão incluídos nestes defeitos os curto-circuitos entre espiras que envolvem espiras vizinhas, e portanto, troços reduzidos dos enrolamentos. Estes defeitos são de difícil deteção e ocorrem dentro do óleo em que o transformador está imerso, com os riscos de incêndio inerentes.

Todos estes defeitos se traduzem num aquecimento local excessivo, originando a decomposição do óleo em gases que se elevam e acumulam no topo do transformador. Um elemento sempre presente nesta decomposição de gases é o hidrogénio. É na presença destes

gases que se fundamenta o funcionamento do relé Buchholz. Ele é uma combinação de relé de pressão com relé detetor de gás.

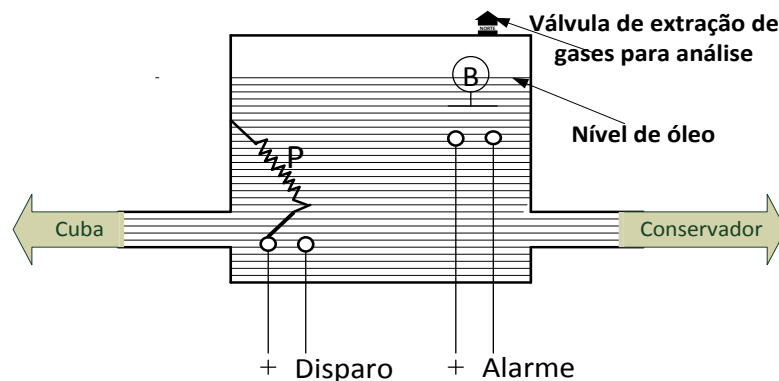


Figura 5.8 - Princípio de funcionamento do relé Buchholz

O transformador é munido dum conservador, que para facilitar a dilatação do óleo é colocado num plano superior ao do tanque de imersão dos enrolamentos (a cuba). O relé Buchholz situa-se entre o tanque e o conservador, é constituído basicamente por duas partes: uma boia (B), ligada a um circuito de alarme, e um pressostato (P), ligado a um circuito de abertura dos disjuntores.

A proteção Buchholz é usada em todos os transformadores de média e de elevada potência (normalmente de potência superior a 1MVA).

Proteção contra sobrecarga [#26]

Destina-se a proteger o isolante de seus enrolamentos contra os estragos provocados por aquecimento inadmissível. Esta função serve para monitorizar a temperatura do dielétrico nos transformadores imersos em óleo. O dispositivo de proteção térmico pode medir a temperatura e ter 1, 2, ou 3 estado de atuação.

Proteção de sobrecargas ou imagem térmica [#49]

O relé de imagem térmica, é um relé que deteta a temperatura do ponto mais quente do transformador. O aquecimento nos enrolamentos do transformador é provocado pela corrente elétrica proveniente da sobrecarga e os sensores para captar esta temperatura deviam estar no ponto mais quente do enrolamento. Como a temperatura do ponto mais quente é conseguida de modo indireto daí o nome de imagem térmica.

Esta proteção permite, controlar no tempo a variação da temperatura das partes mais quentes do transformador, salvaguardando-o dos efeitos de sobrecarga prolongados que lhe possam reduzir a vida útil.

Nos modernos relés digitais [#49] tem-se o recurso de parametrização para a modelagem da respetiva curva do aquecimento das bobinas do transformador. Deste modo, o relé digital é regulado para atuar em vários estágios de alarme, inclusive na abertura do disjuntor se for necessário.

Na proteção tradicional do transformador, os relés são unidades eletromecânicas, ocupam painéis extensos na sala de comando das subestações.

Atualmente, com a tecnologia digital, os relés incorporam na mesma unidade, várias funções de proteção e adicionalmente outras facilidades inerentes à supervisão, medição, comando, controlo, localização de defeitos, sinalização de tempo, entre outras.

O relé digital é um pequeno equipamento que ocupa pouco espaço no painel da sala de comandos da subestação. A Figura 5.9 apresenta a proteção de transformador feito por relé digital multifunção com as funções de proteção típico do transformador.

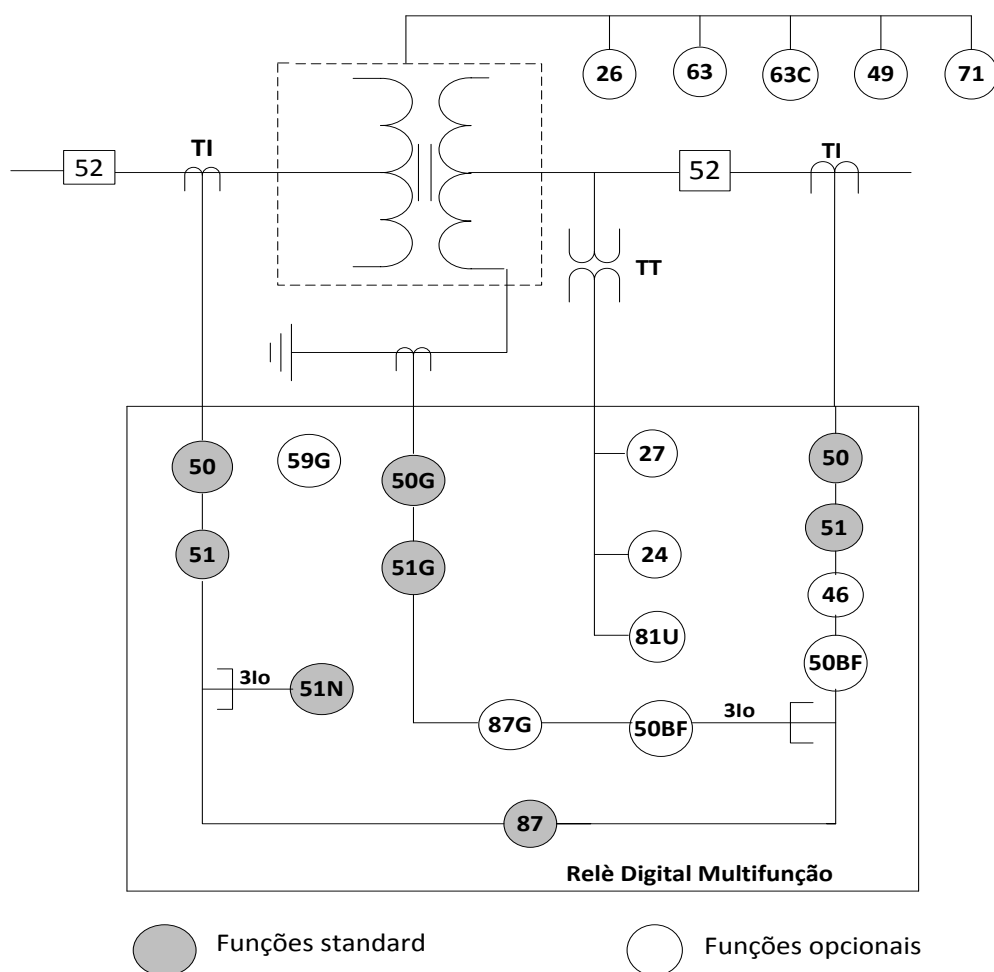


Figura 5.9 - Proteção de transformador por relé digital Multifunções [24]

A função 59G poderá ser usada se o transformador for ligado à terra por uma impedância de valor elevado.

A Tabela 5.2 apresenta os principais defeitos de um transformador de potência e as respectivas proteções.

Tabela 5.2 - Principais defeitos de um transformador

Defeito	Proteção	Código ANSI
Sobrecarga	Termostato: monitorização da temperatura do dielétrico	26
	Monitorização da temperatura dos enrolamentos	49T
	Sobrecarga térmica	49RMS
Curto-circuito	Máxima intensidade instantâneo	50
	Máxima intensidade temporizado	51
	Proteção diferencial	87T
	Deteção gás e pressão (Buchholz)	63
Fuga à terra	Máxima intensidade temporizado à terra	51G
	Máxima intensidade	51N
	Máxima de tensão homopolar	59N

A Figura 5.10 apresenta uma solução para a proteção digital do transformador de potência, trata-se de um relé digital multifunção. A TPU TC420 foi projetada como unidade de regulação de tensão de transformadores equipados com regulador em carga, em subestações de distribuição, e como proteção e unidade terminal de supervisão e controlo do respetivo andar de Média Tensão [26].



Figura 5.10 - TPU TC420 Relé digital multifunção para a proteção do transformador

A TPU TC420 realiza um largo leque de funções de proteção e de automação. Com uma extensa gama de opções programáveis pelo utilizador, oferece grande precisão de regulação nas correntes, tensões, temporizações. Todas as regulações das funções de proteção e de automação são independentes entre si, dispondo de quatro conjuntos de parametrizações para cada função. Oferece ao utilizador flexibilidade na escolha do relé com as funcionalidades mais adequadas a cada caso. Como unidade terminal, a TPU TC420 efetua medidas precisas de todas as grandezas do enrolamento MT do transformador, e diversas funções de monitorização de defeitos, incluindo Oscilografia e Registo Cronológico de Eventos [26].

5.5 - Proteção digital dos Barramentos

Os barramentos podem ser considerados como nós elétricos de despacho da energia, tendo em geral mais de duas extremidades. Existem vários tipos de configuração de barramentos numa subestação cuja escolha adequada é influenciado por fatores como:

- Número e característica de transformadores;
- Número e Capacidades das linhas de partida e/ou de chegada da subestação;
- Custos versus facilidade de exploração ou qualidade de serviço.

Em pequenas redes isoladas é frequente encontrar pequena subestação MT/MT ou poste de corte e seccionamento onde é comum a utilização de esquema de barramento simples (seccionável). Este tipo de configuração de barramento é adequado a pequenas instalações, normalmente de baixa potência, e reduzido número de linhas.

5.5.1 - Função de proteção para barramento

O defeito nos barramentos pode ser originadas por diversas causas como:

- Falha de isolamento dos equipamentos;
- Arcos devidos a descargas atmosféricas;
- Erros humanos;
- Queda de objetos;
- Falha na atuação do disjuntor.

A maioria dos defeitos que ocorrem em barramentos envolve uma fase e a terra, mas também se verifica um número significativo são defeitos entre as fases.

Proteção de máxima tensão [#59] e Proteção de mínima tensão [#27]

As funções de proteção de máximo e mínimo de tensão permitem a retirada de serviço do gerador quando a tensão aos seus terminais se encontra fora do limite superior e inferior respetivo. Quando o limite máximo de tensão for excedido a função de proteção de máxima tensão dá ordem de abertura ao disjuntor de interligação retirando gerador de serviço.

A proteção de mínimo de tensão é utilizada para detetar defeitos que provoquem diminuição da tensão no barramento. A proteção atua quando a tensão do circuito protegido viola inferiormente os valores parametrizados. Esta função também permite implementar deslastres das saídas da subestação.

Proteção de máxima tensão homopolar [#59N]

Em redes em que não exista uma ligação sólida do neutro à terra, em particular para regimes de neutro isolado ou ressonante, um defeito envolvendo a terra provoca uma grande sobrelevação das tensões nas fases sãs, que se manifesta pelo aparecimento de um valor significativo de tensão homopolar. Este pode atingir o valor da tensão simples em condições de defeito franco.

Proteção de máxima [#81O] e mínima frequência [#81U]

O balanço entre a produção e o consumo pode ser verificado através da frequência do sistema. Situações como perda de produção ou tomada de carga elétrica levam a frequência do sistema a descer do valor de referência. Situações como aumento de produção ou deslastre de carga levam a frequência do sistema a subir em relação ao valor de referência.

Estas funções permitem deslastre de frequência muito rápidos. A conjugação das proteções de máximo e de mínimo de frequência permite uma proteção eficaz contra situações de isolamento de rede com alimentação por pequenos produtores [26].

Proteção de máxima intensidade de fase instantâneo [#50]

A função de proteção de máxima intensidade instantânea destina-se, em regra, a uma proteção muito rápida, esta proteção é usada para eliminar correntes de curto-circuito entre fases.

A Figura 5.11 ilustra o esquema de proteção de barramento em redes de distribuição média tensão. Geralmente a proteção contra curto-circuito é garantido por proteção diferencial. As funções de relé digital TPU B420 garantem a proteção de barramento, dispensando assim a proteção diferencial.

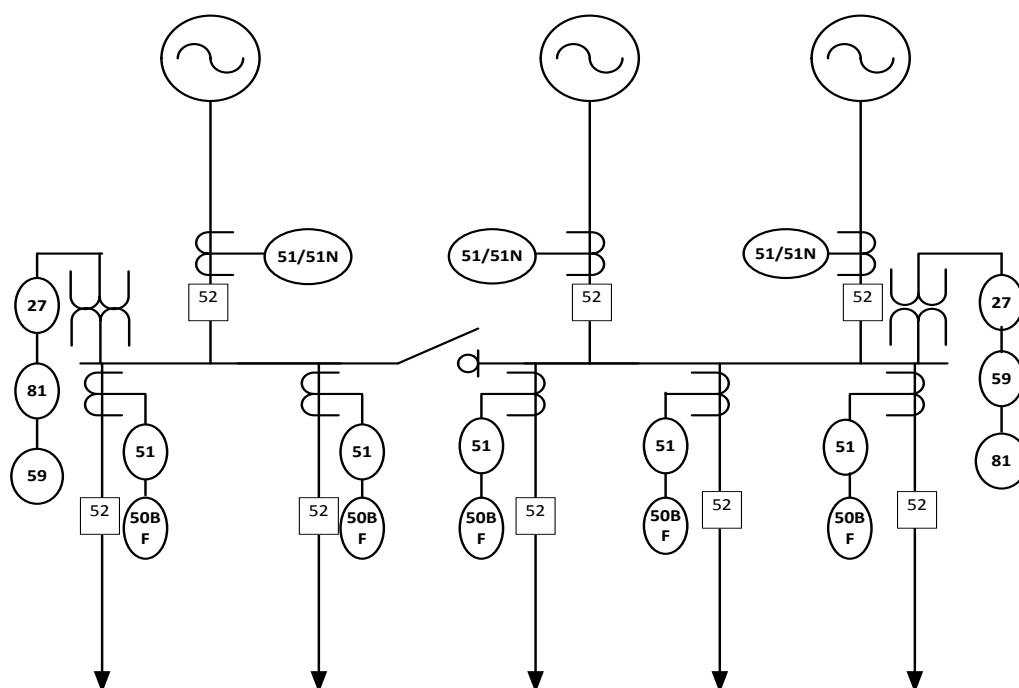


Figura 5.11 - Esquema de proteção de barramento

A Figura 5.12 mostra o relé digital TPU B420, projetada como proteção e unidade terminal de supervisão e controlo de barramentos de Média Tensão, em Subestações de Distribuição ou Postos de Corte e Seccionamento [27].

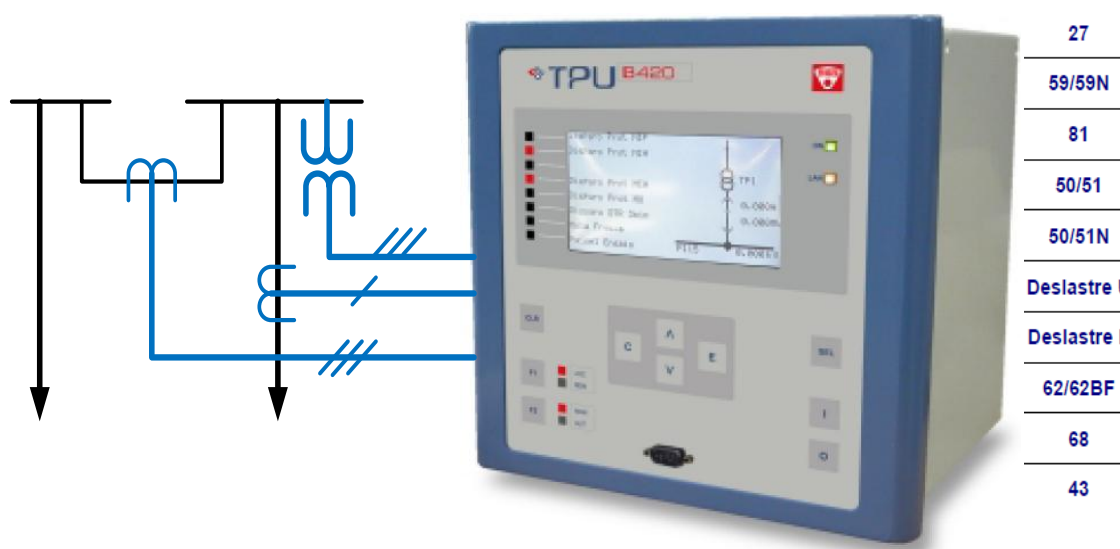


Figura 5.12- TPU B420 Relé digital multifunção para a proteção de barramento

A TPU B420 realiza múltiplas funções de proteção e de automação, Com uma extensa gama de opções programáveis pelo utilizador, oferece grande precisão de regulação nas

correntes, tensões, temporizações. Todas as regulações das funções de proteção e de automação são independentes entre si, dispondo de quatro conjuntos de parametrizações para cada função [27].

Como unidade terminal, a TPU B420 efetua medidas precisas de todas as grandezas de uma linha, e diversas funções de monitorização de defeitos, incluindo Oscilografia e Registo Cronológico de Eventos.

5.6 - Proteção digital de linhas e cabos

Uma proteção de linhas e cabos deve garantir que todos os defeitos sejam eliminados tão rapidamente quanto possível, desligando mínima extensão possível, ou seja apenas o troço afetado pelo defeito.

Tipo de defeito

Os principais defeitos elétricos numa linha ou num cabo são os curto-circuitos entre fases e curto-circuito fase-terra. Também acontecem defeitos como a sobrecarga térmica, que originam o aquecimento anormal dos condutores em regime permanente.

5.6.1 - Função de proteção para as saídas

A seguir apresenta-se as principais funções de proteção implementadas nas saídas MT das subestações.

Proteção de máxima intensidade homopolar [#51N]

Esta função é uma proteção de máximo de corrente contra defeitos à terra em linhas aéreas que permite uma operação seletiva para defeitos muito resistivos não detetados pelas proteções de máximo de corrente tradicional. A principal aplicação desta função é em redes com impedância limitadora no neutro.

Proteção de Sobrecarga [#49]

A proteção de sobrecargas tem como objetivo a proteção do equipamento contra esforços térmicos de origem elétrica.

Esta função baseia-se no cálculo do modelo térmico através da observação das correntes de fase que circulam no equipamento. As características de atuação têm em conta a constante de tempo de arrefecimento do equipamento e as perdas por efeito de Joule produzidas.

Proteção intensidade direcional de fase [#67]

Para a determinação do sentido da corrente em cada fase é usada a tensão composta entre as outras duas fases, o que maximiza a sensibilidade da proteção. O sentido da corrente de defeito é obtido mesmo quando se dá a anulação da tensão (defeito muito próximo).

Proteção intensidade direcional de terra [#67N]

Em redes com neutro isolado ou compensado, as correntes de defeito fase-terra podem tomar valores muito pequenos, da ordem das correntes de desequilíbrio que circulam no neutro.

A proteção direcional opera independentemente da proteção por máximo de corrente, sendo a sua função a de bloqueio do disparo desta no caso de defeito não ser na linha.

Proteção de Sequencia inversa ou Negativa [#46]

A proteção de sequência inversa visa a detecção de valores elevados da componente inversa do sistema trifásico de correntes. A principal aplicação desta função é como proteção de desequilíbrio, podendo ser usada em várias situações.

A detecção de condutores partidos com ou sem contacto à terra assim como a falta de uma fase constituem a vocação natural desta função de proteção, devido à significativa componente inversa resultante.

A proteção de sequência inversa poderá também ser utilizada para eliminar defeitos bifásicos, apresentando nestes casos uma elevada sensibilidade que resulta da diferença da componente inversa em situações normais de carga e situações de desequilíbrio.

A Figura 5.13 ilustra o relé digital TPU S420. Este relé foi projetado como proteção e unidade terminal de supervisão e controlo de linhas aéreas e cabos subterrâneos, em redes elétricas radiais de neutro isolado, compensado, sólido ou com impedância limitadora [28].



Figura 5.13 - TPU S420 Relé digital multifunção para a proteção de linhas e cabos subterrâneos

A TPU S420 oferece múltiplas funções de proteção e de automação. Com uma extensa gama de opções programáveis pelo utilizador, oferece grande precisão de regulação nas correntes, tensões, temporizações. Todas as regulações das funções de proteção e de automação são independentes entre si, dispondo de quatro conjuntos de parametrizações para cada função. Estas funções permitem-lhe integrar-se como Unidade Remota em Sistemas de Comando e Supervisão, oferecendo em simultâneo uma ligação a um computador [28].

5.7 - Proteção digital para banco de condensadores

As máquinas e equipamentos indutivos de corrente alternada (motores de indução, fornos indutivos, transformadores entre outros) necessitam de dois tipos de potências para o seu funcionamento:

- Potência ativa, a que produz trabalho;
- Potência reativa, a que produz campo eletromagnético.

A potência total que o equipamento consome (potência aparente) é a soma geométrica das duas potências, Figura 5.14. Esta relação também se verifica para as correntes.

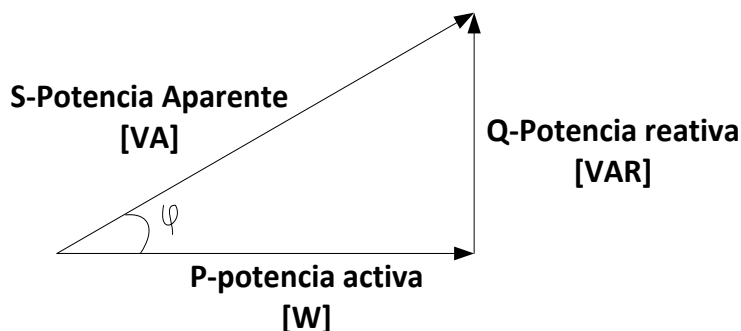


Figura 5.14 - Triângulo de potência

Fator de potência é o cosseno do ângulo formado pela potência ativa e pela potência total ou aparente.

$$\text{Factor de potencia} = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (1)$$

O ângulo de fase entre a tensão e corrente, pode estar em atraso (a instalação absorve a energia reativa) ou em avanço (a instalação fornece a energia reativa). Por exemplo, um gerador síncrono sobrecarregado (gera energia reativa) apresenta um ângulo de fase adiantado (corrente em avanço em relação a tensão). Um condensador ligado à rede tem o comportamento de um gerador de energia reativa.

Os bancos de condensadores são utilizados para compensar a energia reativa absorvida pelas cargas da rede e, ocasionalmente, para realizar filtros para reduzir as tensões harmônicas. Seu papel é melhorar a qualidade da rede elétrica. Podem ser conectados em

estrela, em triângulo ou em estrela dupla, dependendo do nível de tensão e da potência instalada. É composto por condensadores unitários e são montados em grupos ligados em série e em paralelo.

A Figura 5.15 Ilustração um esquema de uma unidade de condensador típico e um banco de condensadores.

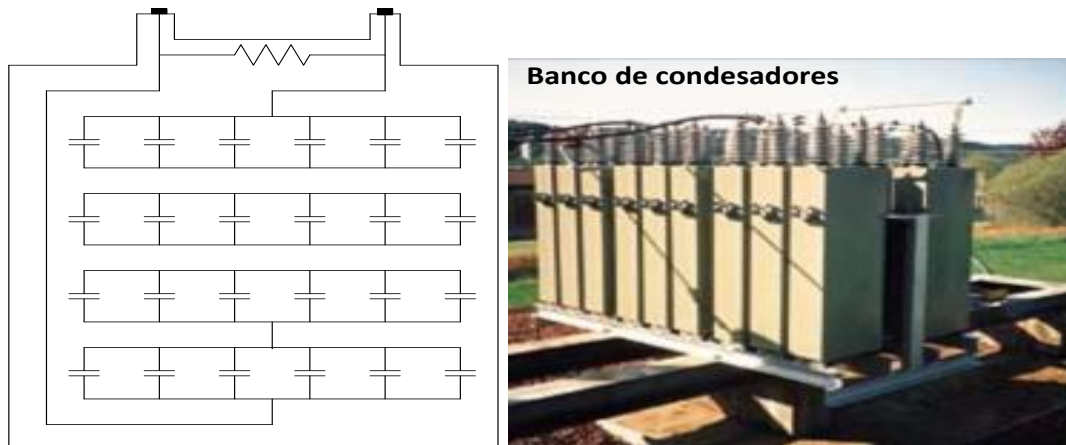


Figura 5.15 - Esquemática de uma unidade de condensador típico [13] e banco de condensadores

Tipo de defeito

Os principais defeitos que podem afetar o banco de condensadores são curto-circuito interno e externo. O aparecimento de gás no compartimento do condensador cria um aumento de pressão que pode levar à abertura do involucro e a fuga do dielétrico. A avaria no dielétrico do condensador unitário resulta em curto-circuito.

5.7.1 - Função de proteção de proteção para banco de condensadores

Proteção de máxima intensidade de fase [#51]

Os curtos circuitos internos e externos são detetados por proteção de máxima intensidade de fase.

Mínimo de Tensão [#27]

A função de mínimo de tensão permite implementar o deslastre do banco de condensadores na ocorrência de uma falta de tensão.

Máximo de Tensão [#59]

A função de tensão permite proteger banco de condensadores contra sobretensão na rede, prejudiciais para os condensadores.

Proteção de Sequencia inversa ou Negativa [#46]

A proteção de sequência inversa visa a detecção de valores elevados da componente inversa do sistema trifásico de correntes. A principal aplicação desta função é como proteção de desequilíbrio, podendo ser usada em várias situações.

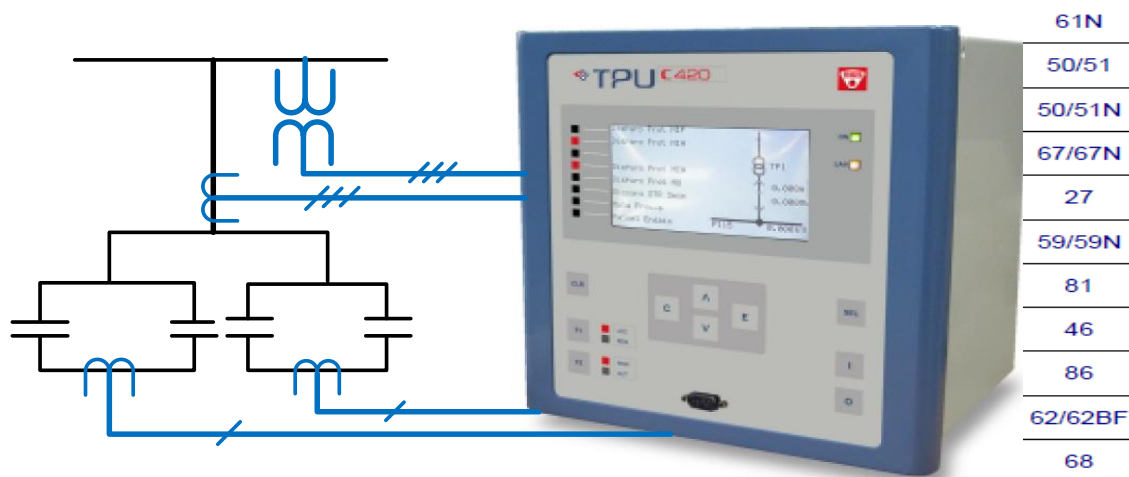


Figura 5.16 - TPU C420 Relé digital multifunção para a proteção de banco de condensadores

A TPU C420 foi projetada como proteção e unidade terminal de supervisão e controlo de baterias de condensadores em Subestações de Distribuição. Realiza um largo leque de funções de proteção e de automação. Com uma extensa gama de opções programáveis pelo utilizador, oferece grande precisão de regulação nas correntes, tensões, temporizações. Todas as regulações das funções de proteção e de automação são independentes entre si, dispondo de quatro conjuntos de parametrizações para cada função [29].

A TPU TC420 oferece ao utilizador flexibilidade na escolha do relé com as funcionalidades mais adequadas a cada caso. A possibilidade de programação de encravamentos lógicos complementares às funções de controlo existentes acrescenta uma facilidade de configuração adicional da proteção, que pode ser aproveitada para a adaptar às necessidades do utilizador. Oferece diversas funções de medição e de monitorização de defeitos, incluindo Oscilografia e Registo Cronológico de Eventos [29].

5.8 - Resumo

Neste capítulo foram apresentadas arquiteturas de relés de proteção digital, assim como as suas vantagens, funcionalidades e forma como os relés digitais são integrados no sistema de proteção comando e controlo em subestações de distribuição.

Finalizou-se este Capítulo com uma descrição de tipos de relés digitais e as respectivas funções de proteção utilizadas para proteger geradores síncronos, transformadores, barramentos e as saídas aéreas e subterrâneas.

Capítulo 6

Conclusões e trabalhos Futuros

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões, com base na elaboração de um projeto de sistemas de proteção em redes elétricas de energia. Para tal, serão apresentadas as principais etapas de projeto e implementação de um sistema de proteção.

6.1 - Conclusões

Conclui-se que o projeto e a implementação de sistema de proteção de redes elétricas de energia envolvem as seguintes etapas:

i. Caracterização da rede elétrica

A caracterização da rede elétrica envolve o conhecimento dos níveis de tensão da rede, potência de curto-circuito e a sua topologia da rede.

ii. Identificação e proteção dos elementos da rede a ser protegido

Nesta fase é feita a identificação de principais elementos da rede elétrica a proteger. A escolha de dispositivos de proteção é objeto de um estudo prévio e pormenorizado visando satisfazer os principais requisitos de sistema de proteção e também responde as necessidades de proteção de cada elemento.

iii. Parametrização dos relés de proteção

A parametrização de relés consiste em inserir os parâmetros de regulação de relés de proteção, definidos com base no estudo de seletividade.

iv. Teste e comissionamento

Esta etapa é executada quando o relé de proteção é instalada, tem os seguintes propósitos:

- Garantir que todas ligações AC e DC do sistema estejam corretas;
- Garantir que as funções de proteção do relé atendam as suas especificações, de acordo com as regulações;
- Garantir que todos os equipamentos auxiliares operem conforme projetados.

6.2 - Trabalhos Futuros

Iniciou-se com esta dissertação o estudo de sistemas de proteções em redes isoladas sem a penetração de fontes renováveis de energia. Atualmente, com as preocupações ambientais, poluição vinda de fontes de energia fósseis e a necessidade aproveitamento das energias

renováveis, pretende-se dar seguimento a este trabalho com estudo do impacto de penetração de fontes renováveis nos sistemas de proteção em redes isoladas. Abordando temas como, os desafios, problemas e soluções para as proteções.

6.2.1 - Impacto da penetração de fontes renováveis no sistema de proteção em redes isoladas

A inserção de fontes renováveis apresenta um impacto no funcionamento adequado do sistema de proteção na rede de distribuição. As redes sendo essencialmente redes de distribuição e com estrutura em anel aberto e exploração radial, apresentam a função de receber energia de central elétrica e distribuí-la pelos clientes. Desta forma, o fluxo da corrente quer em regime de funcionamento normal ou anormal (em defeito) da rede apresentava um único sentido. Com a interligação de fontes de energia renováveis, a amplitude e o sentido da corrente em defeito é alterado, provocando problemas no funcionamento adequado no sistema de proteção da rede. O impacto da penetração de fontes renováveis no sistema de proteção pode apresentar consequências desastrosas para o sistema de proteção. Os principais desafios no sistema de proteção aquando a interligação de fontes de energia renováveis são segundo os seguintes [25]:

- **Falha de operação da proteção ou redução de sensibilidade:** a redução da amplitude da corrente em defeito pode impedir ou aumentar o tempo de atuação da proteção para o isolamento do defeito;
- **Incorreta operação da proteção:** a proteção pode operar sem necessidade devido à contribuição da fonte de energia renovável;
- **Formação de ilha:** fornecimento de energia por parte da fonte de energia renovável sem interligação da mesma à rede. Pode provocar a redução da qualidade de serviço e o impedimento da religação automática.

Para diminuir o impacto da penetração de fontes renováveis no sistema de proteção da rede de distribuição isoladas, tem que se adotar um sistema de proteção de interligação que permite a retirada de serviço dessas fontes aquando a ocorrência de um defeito.

Referências

- [1] P. Kundor, "Power System Stability and Control," Mc Graw Hill, 1994.
- [2] Ruy Lopes dos Santos João D. Fonseca, J. A. Peças Lopes, Helena Vasconcelos. "Estudos de impacto eléctrico da integração de produção eólica adicional nas redes eléctricas da república de cabo verde - caso de santiago".
- [3] Paiva, José Pedro Sucena, Redes de energia eléctrica - uma análise sistémica. Lisboa: IST Press, 2005
- [4] C. Puret, "MV public distribution networks throughout the world," Cahier technique no. 155, Março 1992.
- [5] Lehtonen M. , "Fault Management in Electrical Distribution Systems," Final report of the CIRED Working Group WG03 Fault Management, December 1998.
- [6] Regulamento de segurança de subestação e postos de transformação e de seccionamento, imprensa nacional-casa da moeda, lisboa, 1979.
- [7] DIT-C13-500/N, "Instalações AT e MT. Subestação de Distribuição - Projeto Tipo - Memória Descritiva", DNT - Direcção de Normalização e Tecnologia. Website: <http://www.edp.pt/>
=> Profissional => Projeto tipo SE AT/MT => Memória descritiva projeto tipo subestações SE AT/MT - Acedido em Julho de 2012, EDP Distribuição - Energia, S.A.
- [8] Direcção-geral de energia "Posto de transformação aérea dos tipos AI-1 e AI-2" -Memória descritiva e justificativa, Lopes da Silva, 1984.
- [9] Dias Braga, António Silvestre; "Desenvolvimento de um modelo linear de optimização para coordenar relés direccionais de máxima de Intensidade em redes eléctricas", dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre, FEUP, Julho de 1996.
- [10] The institution of Electrical Engineers, London United Kingdon, Power system protection vol. 1-4, 1997.

- [11] Caminha, Amadeu Casal, Introdução a proteção dos sistemas elétricos, 1983.
- [12] Kindermann, Geraldo, Proteção de sistemas elétricos de potência, vol. 1, 2 edição , 2005.
- [13] J. Lewis Blackburn, Thomas J. Domin, Protective Relaying, Principles and Applications, Third Edition, 2006.
- [14] Site Caterpillar, <http://www.cat.com/cda/files/3006975/7/LEHE0350-01.pdf>, acedido em 13 de agosto de 2012.
- [15] STEVENSON W. D. Jr., "Elementos de Análise de Sistemas de Potência", McGraw-Hill, 2a Ed. em Português (4a Ed. americana), São Paulo-SP, 1986.
- [16] Matos, Manuel António, "introdução ao cálculo de curto-circuitos trifásicos simétricos pela norma CEI-909", Apontamento para as disciplinas de Instalações Eletricas, FEUP 1996.
- [17] Correia de morais, André " Arquitetura de comunicação de sistemas de proteção, comando e controlo da EDP Distribuições", dissertação realizada no âmbito do mestrado integrado em engenharia eletrotecnica e de computadores - Major Energia, FEUP, julho de 2009.
- [18] Hunt. R, Dimensioning CT for small generator differential protection, industrial and commercial power systems technical conference (I&CPS), IEEE, 2010.
- [19] Murty V.V.S. Yalla, etal , Application of Multifunction Generator Protection Systems, Working group J11 of the Rotating Machinery Protection Subcommittee, Power System Relaying Committee. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, October 1999, pp.1285-1294.
- [20] Murty V.V.S. Yalla, Georg Punnoose, Upgrading generator protection with digital multifunction relay technology, Beckwith electric company, Florida, USA.
- [21] Charles J. Mozina, Didital transformer protection from power plants to distribution substations, Beckwith electric company, Florida, USA
- [22] L.K. Kumpulainen; K. T Kauhaniemi, "Analysis of the impact of distributed generation on automatic reclosing," Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES, pp. 603-608 vol.1, 10-13 Oct. 2004
- [23] TPU-TC420, " Unidade Terminal de Proteção de Transformadores e Regulação de Tensão" EFACEC Engenharia, S.A., Edição 1, maio 2010, www.efacec.pt --> PresentationLayer--> ResourcesUser --> CatalogoOnline --> Automacao --> [catalogos%20da%20Intra%20ASCM](#) --> TDSC_TPUTC420_PT.pdf, acedido em 20 de Setembro de 2012.

- [24] TPU-B420, " Unidade Terminal de Proteção e controlo de barramentos" EFACEC Engenharia, S.A., Edição 1, maio 2010, www.efacec.pt --> PresentationLayer--> ResourcesUser --> CatalogoOnline --> Automacao --> [catalogos%20da%20Intra%20ASCM](#) --> TDSC_TPUB420_PT.pdf, acedido em 20 de Setembro de 2012.
- [25] TPU-S420, " Unidade Terminal de Proteção e controlo de saidas" EFACEC Engenharia, S.A., Edição 1, maio 2010, www.efacec.pt --> PresentationLayer--> ResourcesUser --> CatalogoOnline --> Automacao --> [catalogos%20da%20Intra%20ASCM](#) --> TDSC_TPUS420_PT.pdf, acedido em 20 de Setembro de 2012.
- [26] TPU-C420, " Unidade Terminal de Proteção e controlo de saidas" EFACEC Engenharia, S.A., Edição 1, maio 2010, www.efacec.pt --> PresentationLayer--> ResourcesUser --> CatalogoOnline --> Automacao --> [catalogos%20da%20Intra%20ASCM](#) --> TDSC_TPUC420_PT.pdf, acedido em 20 de Setembro de 2012.
- [27] K. Kaneda, S. Tamura, N. Fujiyama, Y. Arata, and H. Ito, "IEC61850 based Substation Automation System," in Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on, 2008, pp. 1-8.

Anexo A

Classificação das Funções de Proteção pela Nomenclatura ANSI/IEEE

A numeração apresentada na tabela A.1 apresenta alguns dos códigos ANSI/IEEE e as respectivas proteções. Classificação das proteções pela função que desempenham é feita através de um código numérico definido pela ANSI /IEEE.

Tabela A.1 código para as funções de proteções mais utilizadas

Código numérico ANSI/IEEE	Função da Proteção
2	Temporizador (auxiliar)
21	Distâncias
24	Sobre-excitação ou V/Hz
25	Sincronismo (“Synchrocheck”)
27	Mínimo de Tensão
30	Sinalizador (Auxiliar)
32	Inversão de Potência
37	Mínimo de Corrente (Motores)
38	Bearing
40	Perda de Campo de Excitação (Geradores)
46	Máximo de Corrente de Sequência Inversa
47	Sequência Errada de Fases da Tensão
48	Falta de Fase na Tensão
49	Térmica ou Contra Sobrecargas
50	Máximo de Corrente Instantânea
50BF	Falha de Disjuntor
51	Máximo de Corrente Temporizada
51G/51N	Máximo de Corrente Homopolar, Temporizada
51V	Máximo de Corrente Temporizada com Bloqueio por 27
52	Disjuntor
59	Máximo de Tensão
59G	Maxima Tensão Residual

59N	Máximo de Tensão Homopolar
60	Desequilíbrio de Tensão
63	Pressostato
64G	Corrente à Terra no Rotor (Geradores)
67	Máximo de Corrente Direccional
67N	Máximo de Corrente Direccional Homopolar
68	Relé Bloqueante (Auxiliar)
69	Relé Permissivo (Auxiliar)
71	Relé Detector de Gás
74	Relé de Alarme (Auxiliar)
76	Máximo de Corrente Contínua
78	Dessincronização (Geradores)
79	Religação Automática (Linhas Aéreas)
81	Frequência (Mínimo ou Máximo)
85	Interface para Tele-proteção
86	Bloqueio (Usada para Encravar Ligações)
87	Diferencial
87B	Diferencial de Barramentos (bus)
87L	Diferencial de Linhas
87N	Diferencial Restrita a Defeitos à Terra
94	Relé de Disparo (Auxiliar, de Amplificação)
