

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Coordenação e Seletividade em Sistemas de Proteção

Pedro Miguel Barbosa Pacheco

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: António Carlos Sepúlveda Machado e Moura

Co-orientador: Bruno Gata

6 de Julho de 2020

Resumo

Esta tese de mestrado pretende ser um guia simples de proteções no que toca a subestações, de modo a que iniciados no mundo das proteções possam obter um conhecimento geral no que diz respeito às mesmas: o que fazem, onde e como o fazem. No primeiro capítulo, falamos sobre o propósito deste documento e o que se pretende alcançar. No segundo capítulo é referido o que sabemos sobre subestações, o que inclui equipamento, equipamento de proteção, sustentabilidade ambiental, entre outros. No terceiro capítulo, falamos sobre SPCC's (Sistema de Proteção, Comando e Controlo Numérico), os vários painéis que os constituem, funções de proteção dos mesmos, e mais. No quarto capítulo é o guia em si: referimos as falhas mais comuns que podem ocorrer, assim como é feita uma breve descrição das mesmas, explorando também algumas falhas mais específicas de alguns equipamentos. Depois disto, mencionamos o equipamento de proteção mais comum utilizado nas subestações e em que equipamento as podemos aplicar. Falamos de tudo o necessário para o sistema de proteção, como os parâmetros da subestação, normas, condições do SPCC. Por fim, são referidos os requisitos de proteção, armários e os ensaios necessários para as proteções.

Abstract

This master thesis aspires to be a simple guide for protection systems regarding substations, so that initiates in the world of protections can grasp a superficial understanding of protections: what they do, where and how they work. In the first chapter we talk about the purpose of the thesis and what we want to achieve. In the second chapter, we show what we know about substations. This knowledge includes types of substations, equipment, protection equipment, environmental sustainability and more. In the third chapter we explore PAC (Protection, Automation and Control) systems, the various panels that are part of it and their protection functions, etc. In the fourth it's the guide itself. We talk about the most common faults that can occur with a brief description of each one. We also refer some equipment specific faults. After this we talk about some common protection equipment to be used in substations and where in the substation we can use these protections. In the second part of this chapter we refer to the minimal protection needed and where to apply it in the context of substations. We also talk about everything needed for the protection system such as the substation parameters, norms, PAC conditions. Finally we talk about protection requirements as well as the cabinets and the required trials for the equipment.

Keywords: Guide, protection, PAC, substation, equipment, panels.

Agradecimentos

Esta tese é dedicada ao meu pai Arnaldo Pacheco (1951-2018). Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador o professor Machado e Moura por se ter mostrado sempre disponível para me ajudar e por me ter dado a oportunidade de realizar esta tese. Quero agradecer ao Engenheiro Bruno Gata e ao Pedro Fernandes da CJR pela oportunidade de trabalhar neste tema. Quero agradecer à AEFEUP por me ter dado alguns dos melhores momentos da minha vida académica, assim como à própria FEUP por me ter acolhido. Quero agradecer a todos os amigos que fiz ao longo dos anos e que estiveram sempre lá por mim, ao Pedro Kretschmann, à Tatiana Grácio, ao Duarte Silva, ao Nelson Pereira, ao Bruno Guimarães, ao Bruno Canhoto e ao Pedro Pereira por este me ter sempre ajudado nos meus últimos tempos na faculdade. Também quero agradecer aos que, mesmo longe, sei que nunca me falharam, como o Rui Teixeira e o Luís Pedrosa. Quero agradecer, em especial, ao Jóni Teixeira que é o irmão que nunca tive e que está sempre presente nos momentos em que preciso e estive sempre comigo no pior e no melhor. Quero agradecer à minha família por todo o apoio que me dão. Quero agradecer, em especial, à minha mãe por nunca deixar de acreditar e por nunca desistir de mim. Finalmente, mas não menos importante, quero agradecer à minha namorada por ser o meu pilar, acreditar sempre no meu sucesso e por me apoiar sempre em todos os momentos. Obrigado a todos.

“People’s dreams never end!”

Eiichiro Oda, *One Piece*

Conteúdo

Abbreviations	xv
1 Introdução	1
1.1 Estrutura da Dissertação	1
2 Subestações	3
2.1 Introdução	3
2.2 Classificação das Subestações	3
2.2.1 Classificação por natureza da tarefa	3
2.2.2 Classificação por nível de tensão	4
2.2.3 Aplicação na rede	4
2.2.4 Forma de instalação	5
2.3 Equipamento	7
2.3.1 Transformadores de Medida	7
2.3.2 Transformadores de Potência	10
2.3.3 Seccionadores	12
2.3.4 Disjuntores	13
2.3.5 Disjuntores-Seccionadores	16
2.3.6 Proteção contra Sobretenção	17
2.3.7 Para-Raios	18
2.3.8 Banco de Condensadores	18
2.3.9 Reactância do Neutro	19
2.3.10 Isoladores	19
2.4 Proteção	20
2.4.1 Características de Proteção	21
2.5 Zonas de Proteção	22
2.5.1 Seletividade de Sistemas de Proteção	23
2.6 Relés	23
2.7 Topologias de Barramentos	24
2.7.1 Barramento Simples	24
2.7.2 Barramento Principal e de Transferência	25
2.7.3 Barramento Duplo com Disjuntor Simples	26
2.7.4 Barramento Duplo com Disjuntor Duplo	27
2.7.5 Barramento em Anel	27
2.7.6 Barramento Duplo com Disjuntor e Meio	28
2.8 Proteções	28
2.8.1 Características de Proteção	29
2.9 Sustentabilidade Ambiental de uma Subestação	31

2.9.1	Impactos Temporários	31
2.9.2	Impactos Permanentes	31
3	Sistema de Proteção, Comando e Controlo Numérico	35
3.1	Painel de Linha AT	36
3.1.1	Distância	36
3.1.2	Máxima Intensidade de Fase	37
3.1.3	Máximo de Intensidade Homopolar Direcional	37
3.1.4	Máximo de Intensidade Homopolar de Terras Resistentes	37
3.1.5	Power Swing Detection	37
3.1.6	Weak End Feed	38
3.1.7	Ligação sobre defeito	38
3.1.8	Condutor Partido	38
3.1.9	Teleproteção	38
3.1.10	Verificação de Sincronismo	38
3.1.11	Funções Complementares	38
3.1.12	Modos de Funcionamento	39
3.1.13	Ensaio de funções de proteção	39
3.2	Painel de Barras AT	39
3.2.1	Diferencial	39
3.2.2	Mínimo de Tensão	40
3.2.3	Verificação de Sincronismo	40
3.2.4	Funções Complementares	40
3.2.5	Ensaio das Funções de Proteção	40
3.3	Painel de Transformador de Potência	41
3.3.1	Diferencial	41
3.3.2	Máximo de Intensidade de Fase	41
3.3.3	Funções Complementares	41
3.3.4	Ensaio das Funções de Proteção	41
3.4	Painel de Chegada MT	41
3.4.1	Máximo de Intensidade de Fase	41
3.4.2	Mínimo de Tensão	42
3.4.3	Máximo de Tensão	42
3.4.4	Mínimo de Frequência	42
3.4.5	Funções Complementares	42
3.4.6	Ensaio das Funções de Proteção	43
3.5	Painel de Bateria de Condensadores	43
3.5.1	Desequilíbrio do Neutro	43
3.5.2	Máximo de Intensidade de Fase	43
3.5.3	Máximo de Intensidade Polar	43
3.5.4	Máximo de Tensão	43
3.5.5	Funções Complementares	44
3.5.6	Ensaio das Funções de Proteção	44
3.6	Saída MT	44
3.6.1	Máximo de Intensidade de Fase	44
3.6.2	Máximo de Intensidade Homopolar para Terras Resistentes	44
3.6.3	Condutor Partido	45
3.6.4	Presença de Tensão	45
3.6.5	Cold Load Pickup/ Inrush Restraint	45

3.6.6	Funções Complementares	45
3.6.7	Ensaio das Funções de Proteção	46
3.7	Painel TSA + Reatância do Neutro	46
3.7.1	Máximo de Intensidade de Fase	46
3.7.2	Máximo de Intensidade Homopolar de Barras AT	46
3.7.3	Máximo Intensidade Homopolar de Terras Resistentes	47
3.7.4	Máximo de Tensão Homopolar de Terras Resistentes	47
3.7.5	Funções Complementares	47
3.7.6	Ensaio das Funções de Proteção	47
4	Guia Orientador para a Escolha de Proteções	49
4.1	Defeitos e Proteções Possíveis	49
4.1.1	Defeitos	49
4.1.2	Defeitos Específicos a Alguns Equipamentos das Subestações	50
4.1.3	Proteções	52
4.2	Escolha e Aplicação da Proteção Passo a Passo	62
4.2.1	Parametrização da Subestação	63
4.2.2	Normas	63
4.2.3	Condições do SPCC	64
4.2.4	Níveis de Controlo	64
4.2.5	Requisitos Técnicos	64
4.2.6	Armários	68
4.2.7	Requerimentos e Proteção Interna	69
4.2.8	Ensaio de Proteção	69
4.2.9	Protocolos dos Ensaio	69
4.3	Aplicação a uma Subestação de Produção Eólica	70
5	Conclusões e Trabalho Futuro	71
5.1	Satisfação dos Objetivos	71
A		73
Referências		79

Lista de Figuras

2.1	Subestação [1]	4
2.2	Subestação GIS Ardnacrusha na Irlanda [2]	5
2.3	Subestação AIS [3]	6
2.4	Subestação de isolamento híbrido [4]	7
2.5	Transformador de Corrente [5]	9
2.6	Transformador de Potência [6]	10
2.7	Seccionadores [7]	12
2.8	Disjuntor numa subestação [8]	14
2.9	Disjuntor-Seccionador 72.5 – 550 kV [9]	16
2.10	Descarregadores de sobretensão [10]	18
2.11	Banco de Condensadores [11]	19
2.12	Isolador na subestação de Linoperamata, Grécia [12]	20
2.13	Barramento Simples [13]	24
2.14	Barramento Principal e de Transferência [13]	25
2.15	Barramento Duplo com Disjuntor Simples [14]	26
2.16	Barramento Duplo com Disjuntor Duplo [13]	27
2.17	Barramento em Anel [14]	28
3.1	Possibilidades de Regime do Neutro Referentes à Exploração da Subestação	46
4.1	Defeitos Internos do Transformador de Potência	50
4.2	Defeitos Externos do Transformador de Potência	51
4.3	Aplicações para Mínimo de Tensão	56
4.4	Aplicações para Máximo de Tensão	57
4.5	Funcionamento do Relé de Bloqueio [15]	60
4.6	Esquema de um Relé Buchholz [16]	61
4.7	Relé de Buchholz num Transformador [16]	62
4.8	Esquema de Montagem de um Relé Buchholz [17]	63

Abreviaturas e Símbolos

MAT	Muito Alta Tensão
AT	Alta Tensão
MT	Média Tensão
BT	Baixa Tensão
SPCC	Sistema de Proteção, Comando e Controlo Numérico
TI	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potência
TT	Transformador de Tensão
TET	Trabalhos em Tensão
PTR	Proteção Homopolar de Alta Sensibilidade
IED	Intelligent Electronic Device
TSA	Transformadores de Serviços Auxiliares
AIS	Air-Insulated Substations
GIS	Gas-Insulated Substations
SEE	Sistema Elétrico de Energia
ONAN	Oil Natural Air Natural
ONAF	Oil Natural Air Forced
OFAF	Oil Forced Air Forced
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
MIF	Máximo de Intensidade de Fase
MIHD	Máximo de Intensidade Homopolar Direcional
RN	Reatância do Neutro
T	Tempo
UCP	Unidade de Controlo de Painel
UCC	Unidade de Controlo Centralizada
RTU	Remote Terminal Unit
U	Diferença de Potencial Elétrico
I	Intensidade de Corrente
R	Resistência
X	Reatância
I_{cc}	Corrente de Curto-Circuito
IL	Intensidade de Corrente na Bobine
IC	Intensidade de Corrente no Condensador
V_r	Tensão vista pelo relé
I_o	Corrente de Saída
U_o	Tensão de Saída
kV	Kilovolt
km	Kilometro
k Ω	KiloOhm
t_{op}	Tempo de Atuação
A	Ampere
MVA	Mega Volt Ampere
mm	Milímetro
ms	Milissegundo

Capítulo 1

Introdução

Em Janeiro de 2020, foi-me proposto pelo Engenheiro Bruno Gata da CJR Renewables e pelo Professor Machado e Moura que realizasse uma tese de mestrado que pretende ser um guia informativo sobre sistemas de proteção, mais concretamente sobre sistemas de proteção em subestações. O desafio é muito grande, visto que existem imensas configurações e proteções muito diferentes para casos específicos, assim o desafio será fazer isto da forma mais geral possível. O sistema de proteção de uma subestação é vital na fiabilidade e estabilidade das subestações. Poderá, muitas vezes, atuar numa situação extrema sendo que, nestas alturas, o sistema de proteção irá ser ainda mais importante.

1.1 Estrutura da Dissertação

Para além da introdução, esta dissertação contém mais 4 capítulos. No capítulo 2, é descrito o estado da arte, sendo apresentado a constituição das subestações, uma introdução ao sistema de proteção, falando também do impacto ambiental desde a sua construção até ao funcionamento da mesma. No capítulo 3 é falado exclusivamente do SPCC, vários elementos constituintes do SPCC, os seus painéis e respetivas funções dos mesmos. No capítulo 4 é o guia mais propriamente dito, pretende ser um guia para leigos com fácil leitura, nos quais falamos de alguns defeitos mais comuns, alguns mais específicos a alguns equipamentos da subestação. Seguidamente são faladas várias proteções, com respetiva função e o equipamento onde estas podem ser utilizadas e em seguida falamos da sistema de proteção em si, funções mínimas de proteção que deverá ter, falando ainda de requerimentos técnicos, armários, normas e ensaios. No capítulo 5 falamos um pouco sobre o trabalho realizado e se fomos capazes de atingir os nossos objetivos.

Capítulo 2

Subestações

2.1 Introdução

Dentro das redes de transmissão e distribuição, temos o mais variado tipo de instalações, sendo uma delas, a subestação. Esta tem a função de interligar pontos, servindo também para fazer a elevação e descida de níveis de corrente e de tensão, assegurando trocas energéticas e a proteção do sistema de transmissão

O percurso que a energia faz entre a produção e consumo, passa por várias subestações, conforme a necessidade de transformação de tensão. A nível técnico é viável, pois é uma solução mais segura para pessoas e há uma aproximação ao potencial utilizado em aparelhos a nível industrial e doméstico. Vemos então que as subestações são de extrema importância para garantir que que existe viabilidade técnica e rentabilidade económica no SEE. Para esta parte da dissertação utilizou-se a dissertação [18] como base para alguns dos tópicos abordados.

2.2 Classificação das Subestações

As subestações podem ser classificadas conforme vários parâmetros, como a natureza da suas tarefa, nível de tensão, aplicação e forma de instalação.

2.2.1 Classificação por natureza da tarefa

- **Subestação Elevadora** — Uma subestação elevadora é uma subestação de transformação, que serve para elevar os níveis de tensão de saída em relação aos de entrada, de modo a que a energia possa ser transformada de forma mais económica. Isto deve-se a existir uma diminuição das perdas Joule nas linhas; *push*;
- **Subestação abaixadora** — Uma subestação abaixadora é uma subestação de transformação, que serve para baixar os níveis de tensão de saída em relação aos de entrada, tensão de energia essa que vem do transporte.

- **Subestação de Manobra** — São utilizadas para efetuar a interligação entre as linhas e os seccionadores de circuitos, sem elevar nem baixar os níveis de tensão. São iguais em termos de equipamento em relação a uma subestação normal, diferenciado-se na presença do transformador de potência.



Figura 2.1: Subestação [1]

2.2.2 Classificação por nível de tensão

As subestações em relação ao nível de tensão, são classificadas como média tensão (MT), alta tensão(AT) e muito alta tensão (MAT)

- **Baixa Tensão** — Em Portugal o valor vai até 1kV e o valor típico é de 400/230;
- **Média Tensão** — Valores entre 1kV e 45kV, com valores típicos de 10, 15 e 30 kV;
- **Alta Tensão** — Valores entre 45kV e 110kV, com o valor típico de 60kV;
- **Muito Alta Tensão** — A partir de 110kV e com valores típicos de 150, 220 e 400kV.

2.2.3 Aplicação na rede

- **Transporte** — Este tipo de subestações, vão elevar tensões provenientes de subestações, o que permite que a energia possa ser transportada por distâncias maiores. Seccionam linhas de transmissão e servem como pontos de interligação, permitindo um transporte à rede adequado. Este tipo de subestações são as principais do sistema de transporte e encontram-se mais próximas da geração;

- **Distribuição** — São mais próximas dos consumidores, tem função abaixadora de forma a adequar a energia para consumo, que na maior parte dos casos é feito em BT, mas em alguns casos, como por exemplo a nível industrial, pode ser MT ou até AT;
- **Cliente** — Há casos em que o consumidor pode produzir parte da própria energia, o que pode tornar necessário uma subestação própria, de forma a transformar a própria energia.

2.2.4 Forma de instalação

As subestações podem ser do tipo *indoor*, dentro de um edifício, ou exteriores, ao ar livre. As exteriores vão ter de ser sujeitas a manutenção mais vezes, que por sofrerem com as condições atmosféricas, vão tendo uma degradação do equipamento. Já nas *indoor* os equipamentos irão estar mais bem protegidos devido à ausência das condições atmosféricas, o que aumenta a sua fiabilidade, a área ocupada por estas subestações também será menor. Outra vantagem é o facto de serem mais discretas do que as externas, podendo encontrar-se em áreas subterrâneas ou estando à superfície, ser finalizadas na parte exterior de modo a se poderem enquadrar esteticamente na área onde se encontram.

2.2.4.1 Isolamento

Uma das coisas mais importantes nas subestações é o seu isolamento e a forma como é feito. O isolamento pode ser feito de duas formas, utilizando um gás (GIS *Gas-Insulated Substation*), ou utilizando o ar da atmosfera (AIS *Air-Insulated Substation*).

GIS



Figura 2.2: Subestação GIS Ardnacrusha na Irlanda [2]

A GIS é uma subestação de alta tensão, cujo as estruturas principais encontram-se em ambiente fechado, que utiliza hexafluoreto de enxofre (SF_6) como isolamento. O hexafluoreto de enxofre é um gás cerca de 5 vezes mais denso que o ar, sendo um dos gases mais densos conhecidos. Tem facilidade em captar eletrões, formando iões pesados com baixa mobilidade, o que torna a passagem de grandes quantidades de eletrões muito pouco provável. Apresenta rigidez dielétrica elevada e uma constante de tempo térmica baixa. A rigidez dielétrica é o valor do campo

elétrico aplicado sobre a espessura do material isolante, medida em kV/mm. Isto significa que irá haver um decréscimo muito elevado da condutibilidade térmica do canal ionizado depois da passagem da corrente por zero, isto favorece muito a interrupção do arco. [19] O SF₆ é criado em laboratório, muito utilizado em disjuntores, consiste num átomo de enxofre e seis de fluór, em condições normais de pressão e temperatura é não inflamável, inodoro, sem cor e não tóxico. Tem a vantagem em relação ao ar de ser menos propício a incidentes como explosões ou incêndios. É um gás extremamente caro, deve ser utilizado em circuito fechado, pelo que não haverá evacuação de gases para o exterior. [19]. Comparativamente com as AIS, esta consegue em cm de SF₆, o que AIS necessita em metros de ar, sendo que podem ser até mais vezes mais pequenas. Pelo que são usadas principalmente quando não existe espaço é caro ou o mesmo não está disponível. [20]

AIS

Na figura seguinte temos representada uma subestação que utiliza o ar como meio de isolamento. São o tipo de subestações mais comuns, mais económicas em relação às GIS e representam cerca de 70% das subestações existentes [19]. São mais presentes em locais mais extensos, onde não há tantas preocupações ambientais como por exemplo áreas rurais, seguindo normas técnicas relacionadas com altitude e temperatura ambiente. Com o aumento da altitude, há uma diminuição da densidade do ar e com isto, há uma diminuição da rigidez dielétrica. Isto cria a necessidade de que as folgas operacionais dos equipamentos seja aumentadas de forma a se poder lidar com correntes e tensões correspondentes.



Figura 2.3: Subestação AIS [3]



Figura 2.4: Subestação de isolamento híbrido [4]

Por fim, ainda temos uma solução híbrida, representada figura acima. Esta solução resulta da combinação das técnicas utilizadas nas GIS e AIS, que tornam a subestação mais compacta, minimizam a necessidade de manutenção e maximizam a disponibilidade e fiabilidade. Esta tecnologia mista diminui em 50% a pegada da subestação e oferece uma solução eficiente economicamente e fidedigna para novos projetos e extensões, assim como projetos de reabilitação [4].

2.3 Equipamento

Nesta secção irei falar sobre o funcionamento e descrição das características dos equipamentos constituintes das subestações, havendo os mais variados tipos, sendo eles equipamentos de transformação, de manobra, proteção e de compensação reativos.

2.3.1 Transformadores de Medida

Vários equipamentos como aparelhos de medida, contadores de energia e relés de proteção são feitos para funcionarem com tensões e correntes fornecidas pelos transformadores de tensão e de corrente. O funcionamento correto dos relés de proteção e contadores de energia dependem do quão precisos são os dados fornecidos pelos transformadores de medida. No sentido de proteger os equipamentos, a saturação do circuito magnético dos núcleos do transformador de corrente que irão alimentar os aparelhos de medida, deve ser relativamente rápida. Por outro lado, o transformador de corrente deve ser dimensionado de modo a que não fique saturado antes do funcionamento dos relés de proteção que lhe são ligados. Este na sua função de alimentação de relés de proteção e equipamentos vão permitir: [21]

- Isolar ou separar da alta tensão os circuitos e aparelhos de medida e de proteção;
- Proteger o pessoal de exploração;

- Permitir a utilização de níveis de isolamento e de correntes compatíveis com os relés e dar às grandezas, valores correspondentes ao calibre dos aparelhos de utilização;
- Evitar perturbações eletromagnéticas das correntes elevadas e reduzir para valores admissíveis as correntes de curto-circuitos, que teriam de ser suportadas pelos aparelhos de proteção e de medida;
- Obter intensidades de correntes e valores de tensão, na medida do possível proporcionais às que se quer medir ou vigiar e transmiti-los aos aparelhos apropriados.

2.3.1.1 Transformadores de Tensão

Um dos tipos de transformadores de medida, é o transformador de tensão, em condições normais de utilização, a tensão secundária e a primária são praticamente proporcionais e tem um desfasamento entre si de aproximadamente 0° , para um sentido apropriado de ligações.

São semelhantes aos transformadores de distribuição, no entanto tem uma fraca compensação e capacidade para uma razão real a uma dada carga. As suas características secundária relativas aos núcleos dos transformadores de tensão são: razão de transformação tensões nominais, classe de precisão e potência secundária de transformação.[21]

Existem três tipos de transformadores de tensão:

- Indutivos;
- Capacitivos;
- Não-convencionais.

Os indutivos são do tipo magnético bobinado, tem o circuito magnético a suportar duas bobinas: o primário, que se destina a ligar um condutor de fase à terra ou a outro condutor de fase e o secundário. Quando ocorrem variações bruscas da tensão primária, a tensão ao secundário segue rigorosamente as variações da tensão da rede de Alta Tensão. Os capacitivos possuem uma cadeia de condensadores que estão colocados entre a fase da Alta Tensão e a terra. Durante variações bruscas da tensão primária, a tensão do secundário vai apresentar um desvio em relação à rede de Alta Tensão nos primeiros 10 a 20 ms. Para alguns relés de proteção isto não é conveniente visto que já fazem esta medida em menos tempo. Os não convencionais usam tecnologia de fibra ótica e um cristal de Pockels que funciona à base do efeito Pockels. Sendo os capacitivos os mais baratos e os não convencionais os mais caros [21].

Localização na subestação

Os transformadores de tensão indutivos participam no aparecimento de ferorressonância, mas são indispensáveis nos painéis equipados com proteções rápidas, que necessitam de uma imagem correta da tensão, mesmo no início do curto-circuito. A ferorressonância é um fenómeno de ressonância produzido entre uma capacidade e uma indutância com núcleo magnético saturável, alimentado por uma fonte sinusoidal e é caracterizada por várias oscilações sinusoidais sobrepostas. Consequências disto podem ser o mau funcionamento de proteções devido a formas de onda

caóticas. A estes devemos associar uma proteção antiferroressonância [21]. Os capacitivos não tem este problema de ferroressonância mas devem ser só em casos excepcionais em painéis equipados com proteções menos exigentes em termos de velocidade de operação[21].

2.3.1.2 Transformadores de Corrente

Os transformadores de corrente são utilizados nas subestações com funções de medida e proteção. São usados para medida de corrente alternada, retirando amostras de corrente mais elevada do sistema e para instalação e manutenção dos relés de corrente na subestação para proteção. Em termos de circuito elétrico, o enrolamento do primário do transformador de corrente é composto por apenas algumas espiras, com diâmetro compatível com a corrente que pretendemos avaliar, enquanto que o secundário tem um numero maior de espiras e um diâmetro mais pequeno. Geralmente estes enrolamentos são constituídos por fios de cobre. Na aplicação de relés de proteção, de contagem e medida, a grandeza mais corretamente utilizada é a corrente. Para essas aplicações, estes transformadores são divididos em duas categorias gerais: os do tipo bobinado e do tipo Tore [21] [22].

Tipo Tore

Este tipo não tem um "enrolamento primário", mas utilizam o condutor primário que passa uma vez pelo centro do núcleo toroidal. Por construção tem um fluxo de dispersão muito reduzido [21].

Tipo Bobinado

Por norma são fabricados com mais que uma espira primária e enrolamentos não distribuídos de forma uniforme. Tem uma certa quantidade de fluxo de dispersão.



Figura 2.5: Transformador de Corrente [5]

2.3.2 Transformadores de Potência

O transformador de potência é a base da subestação. Através dele alteramos os níveis de tensão de forma a tornarmos mais rentável o seu funcionamento a nível de segurança, económico e técnico. Possui alto rendimento e a sua dimensão aumenta com os níveis de tensão, podendo atingir grandes dimensões. Tendo em conta o seu grande valor económico, é necessário um estudo aprofundado antes da sua escolha. De forma a controlar a tensão secundária, para que se possa adaptar a regimes de carga em que possa vir a trabalhar, o transformador de potência vai possuir um comutador de tomadas que permite modificar a sua relação de transformação.

Os transformadores de potência podem ser classificados segundo as suas características, nomeadamente o tipo de enrolamento (dois ou mais enrolamentos isolados eletricamente, o primário que vai receber a energia a transformador e um secundário, que vai fornecer energia com perdas, poderá existir um terciário, também conhecido como enrolamento de compensação, que tem como função estabilizar o ponto neutro das tensões do enrolamento secundário do transformador, quando estiver na presença de cargas desequilibradas ligadas entre uma fase e o neutro do secundário, ou autotransformador e de forma a haver vários níveis de tensão, iremos ter um enrolamento com ramificações), o isolamento (a seco ou óleo) e o número de fases (monofásico e trifásico) [23].



Figura 2.6: Transformador de Potência [6]

2.3.2.1 Constituição

A construção do transformador de potência passa por vários constituintes:

- **Núcleo Magnético** — É fundamental, aumenta a densidade do fluxo magnético gerado por correntes que percorrem os enrolamentos;

- **Bobinas** — Constituem os enrolamentos, são condutores em cobre isolados. O tipo de enrolamento depende da tensão e potência do transformador. Têm por norma uma secção retangular. As perdas são influenciadas pela resistência do transformador. São uma parte ativa do transformador;
- **Buchas** — Permitem cabos de linha do interior para o exterior, sem que haja contacto entre o exterior e interior;
- **Comutador de Tomadas** — modifica a relação de transformação do transformador, adapta-se a regimes de carga que possam entrar em vigor;
- **Sistema de Arrefecimento** — Existem vários tipos de arrefecimento nos transformadores de potência sendo eles o ONAN (Oil Natural Air Natural), ONAF (Oil Natural Air Forced) e OFAF (Oil Forced Air Forced). No ONAN a convecção natural do óleo quente é usada para dissipar calor utilizando radiadores, é a solução mais barata. No ONAF utiliza-se a convecção natural do óleo em conjunto com ventilação, a dissipação de calor é aumentada nas superfícies de arrefecimento através do movimento do ar, é também a forma de arrefecimento mais utilizada. Na OFAF a dissipação de calor é aumentada nas superfícies de arrefecimento através da circulação de ar e o óleo circula utilizando bombas, consegue mais arrefecimento para níveis de carga maiores [24];
- **Relé Buchholz** — Serve para proteger o transformador de falhas internas. Nomeadamente falhas que provoquem perda de óleo ou que alterem o seu fluxo, assim como falhas que provoquem a produção de gás.

Os parâmetros necessários para dimensionar o transformador de potência são a tensão de entrada exigida pela carga elétrica ligada ao secundário do transformador, o fluxo de corrente exigido pela carga elétrica e os requisitos de potência da carga.

2.3.3 Seccionadores

2.3.3.1 Definição e funcionalidade

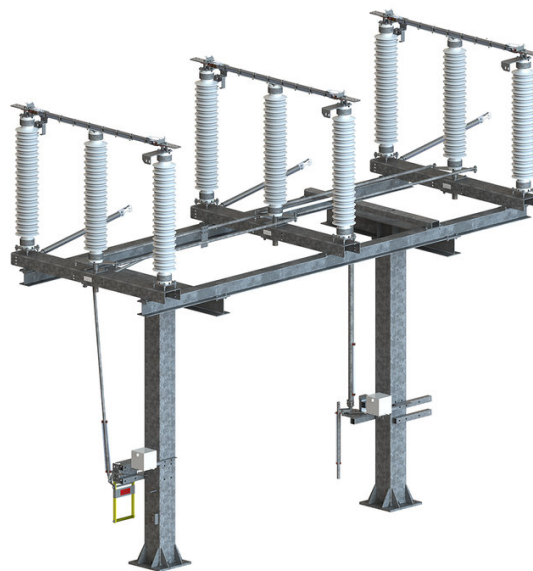


Figura 2.7: Seccionadores [7]

Seccionadores ou isoladores, são aparelhos mecânicos que conduzem corrente elétrica e providenciam um ponto aberto num circuito para isolamento de equipamentos das subestações. São de extrema importância nas subestações, são feitos para não funcionarem em carga para desconectar cabos/cargas de uma fonte de forma a se poder trabalhar em segurança. Como funcionam a baixa velocidade, não trabalham em carga e não tem nada para contrariar o arco elétrico. Operam depois dos disjuntores atuarem no corte da carga. As três funções mais importantes que os seccionadores tem de realizar são as de abrir e fechar de forma fiável quando se requisita o seu funcionamento, de forma a levar as correntes das cargas de forma contínua sem sobreaquecer e manter-se fechados quando tiverem que lidar com correntes de defeito. [13]. Tipicamente estarão instalados em cada lado de uma parte do equipamento da subestação para providenciar uma confirmação visual de que os condutores estejam abertos, de modo a se poder realizar manutenção em segurança. Assim que forem operados para abrir, podemos ligar terras de segurança à parte desenergizada para proteção do trabalhador. Também podemos utilizar facas de terra em substituição ou como medida de segurança extra, tendo como desvantagem de não poderem ser mudadas de local, oferecendo uma proteção fixa. Os seccionadores também são feitos para isolar disjuntores e podem ser usados para seccionar barramentos.

2.3.3.2 Formas de Operação

Há mecanismos de operação que são utilizados para abrir e fechar seccionadores trifásicos por um operador que se encontra ao nível do solo. Os mecanismos de operação incluem a alça de balanço ou uma manivela. O tipo de mecanismos escolhido depende da quantidade de força necessária para a operação do seccionador. Por convenção, o que se faz é que para seccionadores de 69kV e abaixo ou de corrente contínua de 1200A e abaixo usamos a alça de balanço, enquanto que os de 115kV e acima ou de 1600A de corrente contínua por norma usam a manivela. Esta convenção varia de acordo com o tipo de seccionador utilizado, pois diferentes tipos requerem diferente tipo de força. Também há mecanismos de operação mecanizados e aplicados quando a operação remota é necessária ou desejada e quando o seccionador está integrado num sistema de supervisão e controlo (SCADA) [13].

2.3.4 Disjuntores

O disjuntor é o equipamento de proteção mais importante na subestação. São aparelhos de corte destinados a abertura e fecho de circuitos em vazio ou em carga, por manobra. Tem abertura automática em situação de defeito e são comandados por relés que são sensíveis a um ou mais tipos de defeitos como sobrecargas e situações de curto-circuito. Tem poder de corte e poder de fecho para correntes de serviço, sobrecarga e correntes de curto-circuito. Os disjuntores definem-se como "interruptores mecânicos capazes de criar, transportar e cortar correntes em condições de circuito normais e também criam, transportam e cortam correntes em condições de defeito. São classificados de acordo com o meio de interrupção utilizado. Os tipos de disjuntores são: [13]

- Óleo;
- Gás (Hexafluoreto de Enxofre- SF₆);
- Ar Comprimido;
- Vácuo.



Figura 2.8: Disjuntor numa subestação [8]

2.3.4.1 Disjuntores a óleo

Disjuntores a óleo têm sido amplamente utilizados pela indústria de serviços no passado, mas foram substituídos por outras tecnologias de disjuntores em instalações mais recentes. Nestes disjuntores existe um contacto móvel e um contacto fixo que são imersos e dentro do óleo isolador. Quando ocorre a separação de corrente, o arco no disjuntor é inicializado no momento de separação dos contactos, e devido a este arco, o óleo é vaporizado e decompõe-se em hidrogénio e finalmente forma-se uma bolha à volta do arco. Esta bolha de gás altamente comprimido previne o reacendimento do arco após a corrente atingir o zero [25].

2.3.4.2 Hexafluoreto de Enxofre

O Hexafluoreto de Enxofre(SF₆) é utilizado como isolador e tem uma grande afinidade para absorver eletrões livres. Os iões negativos são formados quando os eletrões livres colidem com a molécula do SF₆. Os iões negativos são muito mais pesados que os eletrões livres. Quando comparados com outros gases comuns, a mobilidade das partículas carregadas no SF₆ é muito mais reduzida. Esta mobilidade é responsável por conduzir corrente através do gás. Então para partículas mais pesadas e carregadas com menos mobilidade no SF₆, este adquire grande força dielétrica. O SF₆ é 100 vezes mais eficaz a extinguir o arco elétrico do que o ar. É utilizado para média e alta tensão, dos 33kV aos 800kV [25].

2.3.4.3 Ar comprimido

São utilizados para sistemas de tensão de 245kV, 420kV e até mais, especialmente onde se necessita de uma operação mais rápida do disjuntor. Tem elevado poder de corte. Possui várias câmaras de corte, devido à pequena capacidade de corte de cada uma delas. Utilizam-se vários condensadores ligados em paralelo para se conseguir uma divisão de tensão apropriada. Existe uma elevada possibilidade de fugas, o que torna a sua manutenção custosa, isto deve-se ao facto de serem utilizadas grandes pressões. Provoca elevada poluição sonora, pelo que se esta solução existir em zonas de residência, dever-se-ão utilizar silenciadores. Tudo isto torna o equipamento volumoso, o que representa maior área ocupada e maiores custos.

2.3.4.4 Vácuo

Os disjuntores de vácuo utilizam um interruptor, que é um pequeno cilindro que contém contactos em movimento, sujeitos a um vácuo alto. Aquando da operação do disjuntor, os contactos separam-se e forma-se o arco resultando na erosão do contacto. Os produtos do arco são forçados a serem depositados num escudo metálico que cerca os contactos. Sem uma tensão transitória de restabelecimento para sustentar o arco, este é rapidamente extinto. São pouco volumosos e por isso são menos custosos a nível monetário e a nível de espaço. São os mais utilizados na distribuição em média tensão. Requer uma manutenção muito reduzida quando comparada com os outros tipos de disjuntores. São utilizados em comutadores com revestimento metálico. São uma solução mais interessante a nível ambiental por serem menos nocivos para o ambiente que o óleo e o SF₆ [26].

2.3.5 Disjuntores-Seccionadores

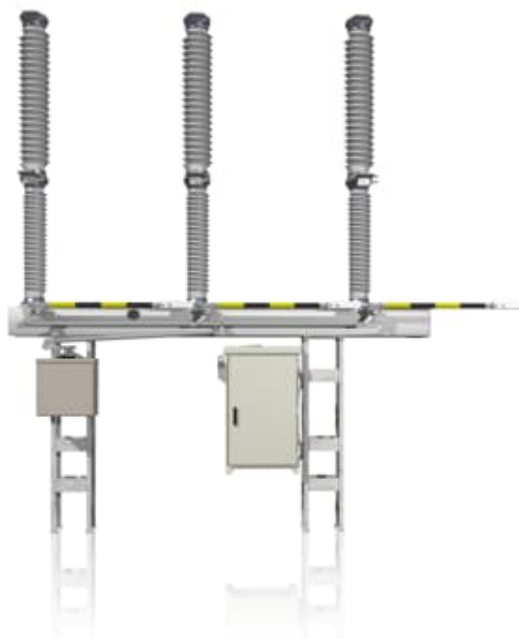


Figura 2.9: Disjuntor-Seccionador 72.5 – 550 kV [9]

O disjuntor-seccionador combina a função do disjuntor com o seccionador num só aparelho, reduzindo a pegada da subestação e aumenta a disponibilidade. Estão equipados com isoladores de borracha de silicone. Estes isoladores possuem propriedades hidrofóbicas. Funcionam muito bem em ambientes poluídos e a corrente de fugas é minimizada. Reduzem significativamente a manutenção da subestação com isolamento de ar (AIS) e reduz o risco de falha devido a poluição. Substituindo a combinação de disjuntores com seccionadores ao ar-livre por disjuntores-seccionadores, a disponibilidade aumentará significativamente. A diminuição das atividades de manutenção traz vantagens, tais como:

- Maior satisfação dos clientes (dependendo da subestação/topologia da rede, o trabalho de manutenção pode levar à falha de fornecimento de energia aos consumidores);
- Menor risco de perturbações no sistema (black-outs) desde que o risco para falhas primárias durante a situação de manutenção é maior do que durante o serviço normal e durante a manutenção o sistema é mais "fraco" porque nem todo o equipamento está de serviço;
- Menores custos laborais para trabalhos de manutenção no local;
- Maior segurança do pessoal já que o trabalho de alta tensão da subestação tem o potencial risco de ferimento devido a choque elétrico, queda de uma altura, etc.

São aplicadas nas configurações de subestação mais tradicionais e substituem diretamente a combinação disjuntor/seccionador. Isto reduz substancialmente a pegada da subestação, reduz manutenção, diminui o número cortes devido a manutenção e falhas e aumenta a disponibilidade. A disponibilidade acrescida pode ser utilizada para simplificar as configurações single-line e manter e mesmo assim manter a disponibilidade ao nível a que estava antes. Com diminuição da manutenção e de cortes, o custo de operação também será menor [27].

2.3.6 Proteção contra Sobretenção

A protecção contra sobreensões é feita por dois tipos de dispositivos: os descarregadores de sobreensão e os disjuntores. Criam um arco entre o condutor, visto que permitem alisar as sobreensões. Então vai ser criado um defeito à terra. Há uma limitação da tensão fase-terra em consequência da corrente que circula para a terra. Os dispositivos contra sobreensões devem apresentar as seguintes características: [21]

- Após a dissipação da sobreensão deve voltar ao seu estado inicial;
- Deve ter uma fraca impedância quando é solicitado por uma sobreensão para se garantir um limite de tensão;
- Inversamente uma impedância forte (preferencialmente infinita), que garanta um número mínimo de perdas durante o serviço normal, em regime estacionário;
- A energia que acompanha a sobreensão, deverá ser dissipada ou armazenada sem deterioração.

2.3.6.1 Disruptores

São mais económicos mas só devem ser utilizados e certas situações, por exemplo em redes MT. Quanto à sua constituição, estes são duas hastes, uma delas ligada à terra e a outra ligada ao condutor que queremos proteger, com um intervalo ajustável que permite a disrupção quando o nível de protecção desejado é ultrapassado pelas sobreensões na rede. Estes não vão limitar nem interromper a corrente de descarga. A disrupção irá dar lugar a pelo menos um defeito fugitivo monofásico que deverá ser interrompido por um disjuntor, acionado pelas suas proteções. Não são utilizados para sobreensões de manobra dos aparelhos da rede, logo são regulados para sobreensões de manobra normais que não provoquem disrupção. Só se utilizam para sobreensões de descarga atmosférica [21].

2.3.6.2 Descarregadores de Sobretensão

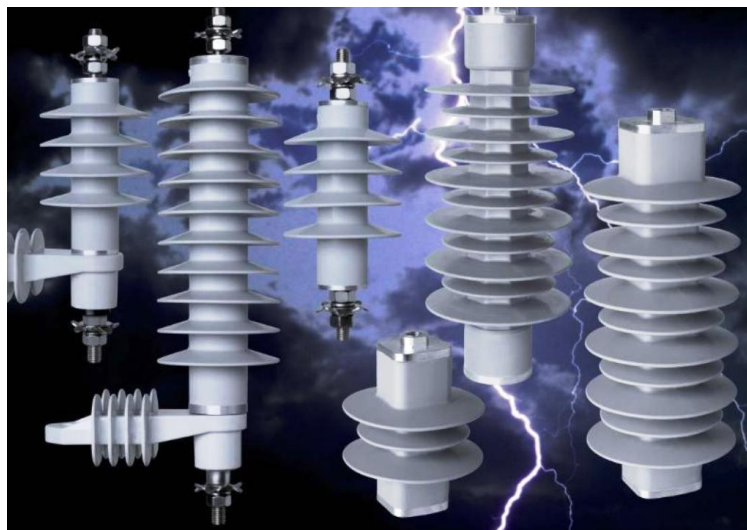


Figura 2.10: Descarregadores de sobretensão [10]

De forma a manter a sobretensão em certos limites, temos de regular os descarregadores para veicular uma onda de corrente, quando uma sobretensão chega aos seus bornes. Os descarregadores impedem o disparo do disjuntor da linha AT, limitando a corrente de descarga e interrompendo a mesma quando a sobretensão desaparece. São mais caros que os disruptores, mas para compensar não tem os inconvenientes dos mesmos. São utilizados dois tipos: os de óxido de zinco e os convencionais [21].

2.3.7 Para-Raios

As hastes de Franklin ou para-raios, são aparelhos protetores para limitar a corrente no equipamento, descarregando ou desviando-se de picos de corrente. Previne que o fluxo contínuo siga a corrente à terra. Um para-raios não absorve nem para os relâmpagos, mas desvia os mesmos, limita a tensão e protege os equipamentos ligados em paralelo. Os para-raios tem várias funções como proteger casas e subestações onde estão instalados [28].

2.3.8 Banco de Condensadores

São constituídos por conjuntos de baterias de condensadores em paralelo ou em série. Tem como função fornecer energia reativa de forma a melhorar o fator potência. Com a geração de energia reativa o consumo da mesma é anulado, melhorando assim o funcionamento da instalação e maximiza o rendimento da potência instalada [?].



Figura 2.11: Banco de Condensadores [11]

2.3.9 Reactância do Neutro

O neutro é ligado à terra com uma reactância a servir de intermédio. Temos dois casos, um em que o neutro é acessível e outro em que o neutro não é acessível. Para o primeiro caso, podemos utilizar uma bobine de indução, um exemplo deste caso é no enrolamento em estrela de um transformador estrela/triângulo. No segundo caso usamos com frequência o transformador de ponto neutro e pertence ao grupo de ligação zigzague/estrela. As redes estão expostas a oscilações transitórias quando a reactância é muito elevada, com valores de pico 3 vezes a tensão fase-terra máxima normal. Deve ser escolhida uma reactância de valor baixo, sabendo que esta estará em série com a reactância do transformador ou do alternador, dos quais os neutros estão ligados à terra. Por norma, submetemos as fases sãs a tensões que não ultrapassem a tensão composta. Quando comparado com o caso de utilização de uma resistência, este permite uma dissipação térmica fraca. Utiliza-se proteções de máxima intensidade de corrente simples e seletiva com a condição $I_L \gg I_C$ [21].

2.3.10 Isoladores

Utilizamos isoladores nas subestações como elementos de montagem. O seu revestimento varia com a sua utilização. Para interiores utilizamos isoladores de porcelana ou materiais epóxicos, já nos exteriores usamos isoladores de porcelana e vidro. Os exteriores são dotados de saias destinadas a aumentar o comprimento da linha de fuga, procurando conseguir um melhor comportamento contra a humidade.

São usados isoladores de apoio, tanto nas instalações interiores como exteriores, e isoladores de amarração (cadeia de isoladores), que são empregues nos tendidos [29].

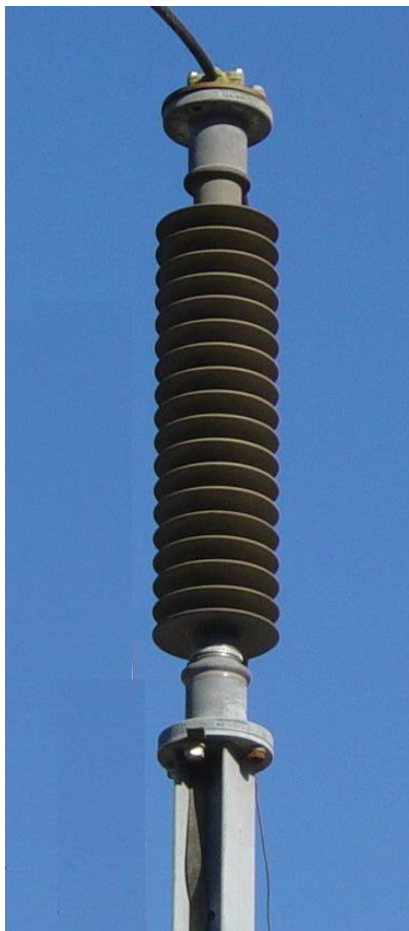


Figura 2.12: Isolador na subestação de Linoperamata, Grécia [12]

2.4 Proteção

A proteção elétrica tem como objetivo isolar o defeito do resto do sistema elétrico, por isso não desligamos a alimentação da parte funcional do sistema, aumentando assim a a fiabilidade e eficiência. O sistema de proteção é um sistema discriminativo, projetado de acordo com as características e requisitos do sistema de energia e em condições anormais, atua sobre a aparelhagem de corte de forma a isolar o defeito [30]. Possui um conjunto de elementos de uma cadeia completa que compreende transformadores de medida, relés de proteção, cabos de conexão que os ligam, bateria de alimentação. A boa funcionalidade do sistema de proteção implica que cada um dos elementos que o constituem esteja em perfeito estado de efetuar a sua função. [31] Um dos dispositivos de proteção mais importantes são os relés, estes detetam anomalias no sistema com a finalidade de enviar informação para abertura do equipamento de corte. Ao receber esta informação relativa a uma ocorrência de proteção ou relé de proteção procede à aplicação de critérios de

decisão pré-definidos mediante funções básicas de proteção. Os sistemas devem ser projetados de modo a ter uma proteção primária e uma secundária ou de recurso [32].

2.4.1 Características de Proteção

Nos sistemas elétricos a importância de não desligar elementos com defeito e não colocar fora de tensão elementos sãos é a mesma. O objetivo desses sistemas é garantir, de forma rápida, a eliminação de apenas e só elemento elétrico em defeito. Estes sistemas devem ter certas qualidades, sendo elas [31]:

2.4.1.1 Seletividade

É a capacidade da proteção isolar apenas a parte defeituosa da rede. Existem dois tipos de seletividade: a de fase e a de zona de proteção. A de fase é relativa à religação automática e a de zona de proteção é que nos permite isolar o elemento atingido através dos sistemas de proteção mais próximos. A seletividade da zona, também conhecida por coordenação de relés, assegura uma maior continuidade de serviço com um mínimo de interrupção de fornecimento de energia aos utilizadores [32] [31].

2.4.1.2 Fiabilidade

A fiabilidade é a qualidade do sistema de proteção vai atuar corretamente no caso de avaria ou falha. Esta tem duas características, sendo elas a dependabilidade e a segurança. A dependabilidade é a capacidade do sistema de proteção não ter falhas ao atuar quando solicitado e a segurança é capacidade do sistema de proteção só funciona quando for estritamente necessário e de forma seletiva, ou seja, o sistema de proteção evitará assim operações desnecessárias ou que estejam fora da sua zona de atuação [31].

2.4.1.3 Rapidez

A rapidez de operação do sistema de proteção é fundamental, o defeito deve ser eliminado o mais rapidamente possível de modo a minimizar o seu impacto. O defeito deverá ser eliminado num tempo que permita a segurança das pessoas e uma boa conservação dos elementos constituintes do sistema de proteção, evitando também ruturas de sincronismo tardias que podem advir de uma eliminação não atempada (em caso de defeito trifásico). Em altas tensões, é exigido, em geral, que o tempo de disparo seja instantâneo. Para grupos nucleares na rede, de 380kV o tempo máximo de disparo, em reserva, deverá ser de 250ms. Uma desvantagem do funcionamento muito rápido é que poderá levar a que ocorram um maior número de operações indesejáveis [32] [31].

2.4.1.4 Sensibilidade

A proteção deve ser, em geral, o mais sensível possível para detetar defeitos de forma mais rápida possível com o mais baixo nível de grandeza considerada. Isto permite que o sistema de

proteção opere com corrente de defeito reduzidas, seja por resistência de defeito ou por diminuição momentânea da potência de curto-circuito [31].

2.4.1.5 Compatibilidade

Permite a adaptação do sistema ao meio onde está instalado. Trata-se principalmente de ligações externas. Para proteções digitais vamos acrescentar outra dimensão que tem a ver com a coordenação com outras funções ou com a sua integração. A compatibilidade está ligada a hardware e software. A compatibilidade é mais importante em subestações com um sistema de controlo-comando digital [31].

2.4.1.6 Flexibilidade

Esta qualidade do sistema indica a sua capacidade de ser utilizada para vários tipos de aplicações. Dá-nos possibilidade de regulação [31].

2.4.1.7 Disponibilidade

Fração de tempo em % que nos diz as expectativas em relação a uma proteção estar assegurada. É a exigência de todos os elementos que asseguram uma operação correta. Teremos dois tipos de exigências, as externas e as internas [31].

As internas são:

- Grande qualidade de componentes de maneira a garantir um reduzido número de defeitos;
- Conceção sã, principalmente a nível de software;
- Capacidade de deteção rápida de indisponibilidade, conseguindo assim reduzir a mesma.

As externas são:

- A proteção é disponível se as grandezas de medida são disponíveis e se a ordem de disparo pode ser dada;
- Para proteção diferencial de corrente, a corrente deve estar presente nas duas extremidades.

2.5 Zonas de Proteção

É necessário eliminar os defeitos de forma rápida e seletiva, para este fim devemos separar por zonas de proteção, através da utilização de disjuntores, todos os elementos que necessitem de ser postos fora de tensão, quando ocorre um defeito.

Quando ocorre um defeito, o resto do sistema deve-se manter em serviço, logo as zonas de proteção deverão ser o mais pequenas possíveis. As zonas de proteção devem ser divididas por elementos, sendo eles:

- Alternadores;
- Transformadores;
- Barramentos
- Ligações de Interligação, de Transporte e de Distribuição;
- Baterias de condensadores.

Zonas de proteção devem ser delimitadas por transformadores de corrente que irão assegurar a alimentação dos relés de proteção [31].

2.5.1 Seletividade de Sistemas de Proteção

Temos dois tipos de proteções para selecionar zonas em defeito, as proteções seletivas dependentes e as independentes. As proteções seletivas dependentes dependem dos valores correspondentes a um só ponto do sistema elétrico que é vizinho do disjuntor a comandar, tem uma seletividade limitada da localização do defeito, por responder não só a valores do elemento protegido, mas também a valores de outros elementos elétricos. As proteções seletivas independentes baseiam-se na comparação de certas grandezas nas extremidades do elemento protegido e tem uma seletividade total da localização do defeito, visto que mede as grandezas nas duas extremidades do elemento, dando resposta somente a defeitos internos do elemento protegido. [31].

2.6 Relés

Os relés são elementos lógicos que processam entradas (na sua maioria tensão e corrente) do sistema que comandam decisões de interrupção se for detetada uma falha na sua zona. As entradas são correntes de transformadores de corrente e tensões de transformadores de tensão. Aquando do aparecimento de uma falha, a corrente, a tensão, a frequência, e outras variáveis elétricas vão comportar-se de forma peculiar, por exemplo, um aumento brusco de corrente ou uma diminuição brusca de tensão. Os relés podem medir correntes e tensões e detetar se existe uma sobrecorrente ou uma subtensão ou uma combinação das duas.

2.7 Topologias de Barramentos

Vários fatores contribuem para a fiabilidade numa subestação elétrica, um dos quais é a configuração de barramentos.

2.7.1 Barramento Simples

Esta é a configuração mais simples, um único barramento e todas as conexões ligadas diretamente ao mesmo. A fiabilidade de configurações como esta é baixa, mesmo com a proteção adequada através de relés, uma falha no barramento principal ou entre este e disjuntores, poderá provocar uma falha que afetará toda a instalação. No que toca a manutenção, teremos de interromper a linha a qual está ligado. E ainda, para uma interrupção do barramento, toda a instalação terá de ser desenergizada. O custo deste tipo de barramento também é relativamente baixo, assim como a flexibilidade operacional. Ligações de linhas a este tipo de barramento são bastante simples, visto que estão todas ligadas ao mesmo barramento principal. A sua baixa fiabilidade, requer esforços significativos de manutenção e baixa flexibilidade operacional, a aplicação deste tipo de barramento deverá estar limitada a instalações com baixos níveis de carga e com baixa disponibilidade [13].



Figura 2.13: Barramento Simples [13]

2.7.2 Barramento Principal e de Transferência

Esta configuração interliga todos os circuitos entre o barramento principal e o de transferência. Esta configuração é semelhante à configuração de barramento simples no sentido em que durante as operações normais, todos os circuitos estão ligados ao barramento principal. Daí que a fiabilidade é baixa, visto que uma falha no barramento principal desenergiza todos os circuitos. A principal vantagem é que toda a carga é transferida para o barramento de transferência quando são realizadas ações de manutenção ou de reparação ao barramento principal. Move-se a linha do disjuntor do circuito para o barramento de transferência. Alguns sistemas são operados com o barramento de transferência desenergizado. O custo desta configuração é mais elevado que o de barramento simples devido ao barramento extra e os aparelhos de comutação. Cruzamentos de barramento e circuitos dentro das subestações também são mais prováveis. Esta configuração é mais adequada onde a transferência de carga e uma maior fiabilidade de operação são importantes. Apesar de que adicionar o barramento de transferência para melhorar a manutenção, implicará área adicional e maior número de aparelhos de comutação, o que poderá aumentar o custo da estação [33] [13].

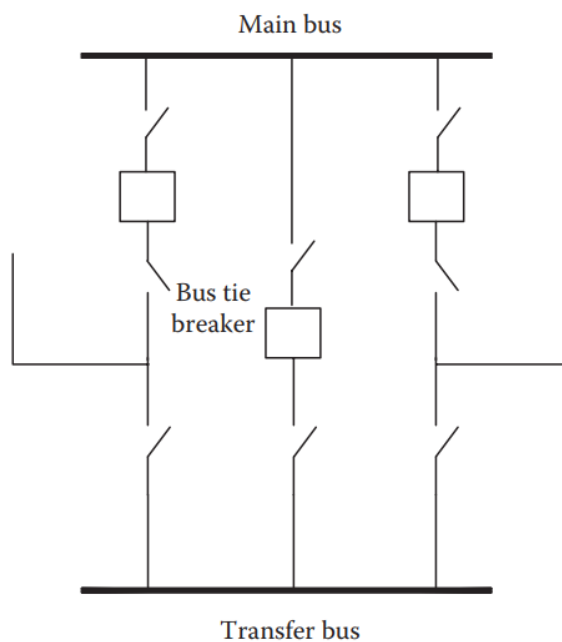


Figura 2.14: Barramento Principal e de Transferência [13]

2.7.3 Barramento Duplo com Disjuntor Simples

As subestações que utilizam esta configuração tem dois barramentos. Cada circuito é equipado com um disjuntor simples que está ligado aos dois barramentos utilizando isoladores. Um disjuntor liga os dois barramentos principais e está normalmente fechado. Uma falha num dos barramento requer isolamento no barramento enquanto que os circuitos são alimentados pelo outro barramento. Este esquema é mais caro e requer maior área de instalação que a configuração de barramento simples. É comum encontrar este esquema com um barramento de transferência adicional em subestações de transmissão de MAT.

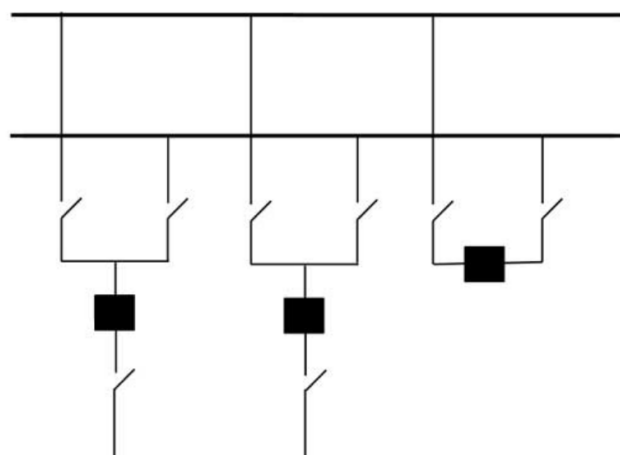


Figura 2.15: Barramento Duplo com Disjuntor Simples [14]

2.7.4 Barramento Duplo com Disjuntor Duplo

Este tipo de configuração envolve dois barramentos e dois disjuntores. Com dois disjuntores e dois barramentos por circuito, uma única falha de barramento pode ser isolada sem interromper qualquer circuito ou carga. E ainda, uma falha de um circuito não interromperá outros circuitos ou barramentos. Então, a fiabilidade deste esquema é extremamente alta. A manutenção dos aparelhos de comutação neste esquema é muito fácil, visto que os aparelhos de comutação podem ser retirados de serviço quando necessário e os circuitos podem continuar a sua operação com proteção parcial de relés e alguns aparelhos de comutação da linha em serviço. Com o dobro dos aparelhos de comutação e barramentos, o custo irá aumentar consideravelmente relativamente às configurações mais simples. Conexões de linhas externas a subestações com este tipo de configuração não causam normalmente conflito entre eles, mas requerem uma área substancial adjacente à instalação à medida que a estação se expande. Esta configuração de barramento é aplicável a cargas que requerem uma elevado grau de fiabilidade e tempo mínimo de interrupção [13].

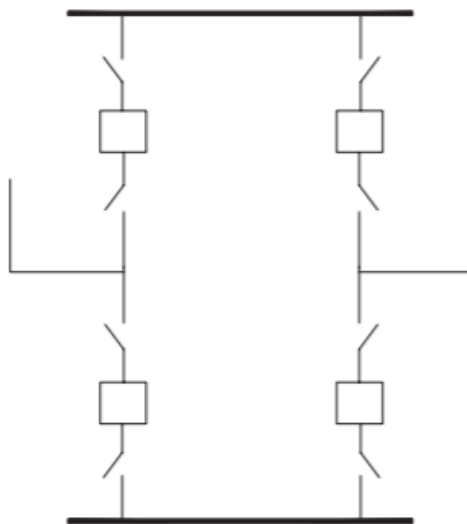


Figura 2.16: Barramento Duplo com Disjuntor Duplo [13]

2.7.5 Barramento em Anel

Todos os disjuntores são dispostos num anel com circuitos ligados entre dois disjuntores. De um ponto de vista de fiabilidade, este esquema consegue uma maior fiabilidade para os circuitos, com uma proteção através de relés com um funcionamento correto, uma falha numa secção do barramento só interromperá o circuito nessa secção do barramento e uma falha no circuito não afetará outro aparelho. Num ponto de vista de manutenção, o barramento em anel oferece boa flexibilidade. Podemos fazer manutenção a um disjuntor sem transferir ou baixar a carga, já que um dos disjuntores pode manter-se de serviço e fornecer proteção à linha enquanto o outro está em manutenção. A operação instalação com o barramento em anel dá ao operador boa flexibilidade já que um circuito ou secção do barramento pode ser isolada sem afetar as cargas de outro circuito.

corte de forma a isolar o defeito [30]. Possui um conjunto de elementos de uma cadeia completa que compreende transformadores de medida, relés de proteção, cabos de conexão que os ligam, bateria de alimentação. A boa funcionalidade do sistema de proteção implica que cada um dos elementos que o constituem esteja em perfeito estado de efetuar a sua função. [31] Um dos dispositivos de proteção mais importantes são os relés, estes detetam anomalias no sistema com a finalidade de enviar informação para abertura do equipamento de corte. Ao receber esta informação relativa a uma ocorrência de proteção ou relé de proteção procede à aplicação de critérios de decisão pré-definidos mediante funções básicas de proteção. Os sistemas devem ser projetados de modo a ter uma proteção primária e uma secundária ou de recurso [32].

2.8.1 Características de Proteção

Nos sistemas elétricos a importância de não desligar elementos com defeito e não colocar fora de tensão elementos sãos é a mesma. O objetivo desses sistemas é garantir, de forma rápida, a eliminação de apenas e só elemento elétrico em defeito. Estes sistemas devem ter certas qualidades, sendo elas [31]:

2.8.1.1 Seletividade

É a capacidade da proteção isolar apenas a parte defeituosa da rede. Existem dois tipos de seletividade: a de fase e a de zona de proteção. A de fase é relativa à religação automática e a de zona de proteção é que nos permite isolar o elemento atingido através dos sistemas de proteção mais próximos. A seletividade da zona, é também conhecida por coordenação de relés, assegura uma maior continuidade de serviço com um mínimo de interrupção de fornecimento de energia aos utilizadores [32] [31].

2.8.1.2 Fiabilidade

A fiabilidade é a qualidade do sistema de proteção vai atuar corretamente no caso de avaria ou falha. Esta tem duas características, sendo elas a dependabilidade e a segurança. A dependabilidade é a capacidade do sistema de proteção não ter falhas ao atuar quando solicitado e a segurança é capacidade do sistema de proteção só funciona quando for estritamente necessário e de forma seletiva. Ou seja, o sistema de proteção evitará assim operações desnecessárias ou que estejam fora da sua zona de atuação [31].

2.8.1.3 Rapidez

A rapidez de operação do sistema de proteção é fundamental, o defeito deve ser eliminado o mais rapidamente possível de modo a minimizar o seu impacto. O defeito deverá ser eliminado num tempo que permita a segurança das pessoas e uma boa conservação dos elementos constituintes do sistema de proteção, evitando também ruturas de sincronismo tardias que podem advir de uma eliminação não atempada(em caso de defeito trifásico). Em altas tensões, é exigido, em

geral, que o tempo de disparo seja instantâneo. Para grupos nucleares na rede, de 380kV o tempo máximo de disparo, em reserva, deverá ser de 250ms. Uma desvantagem do funcionamento muito rápido, é que poderá levar a ocorrerem um maior número de operações indesejáveis [32] [31].

2.8.1.4 Sensibilidade

A proteção deve ser, em geral, o mais sensível possível para detetar defeitos de forma mais rápida possível com o mais baixo nível de grandeza considerada. Isto permite que o sistema de proteção opere com corrente de defeito reduzidas, seja por resistência de defeito ou por diminuição momentânea da potência de curto-circuito [31].

2.8.1.5 Compatibilidade

Permite a adaptação do sistema ao meio onde está instalado. Trata-se principalmente de ligações externas. Para proteções digitais vamos acrescentar outra dimensão que tem a ver com a coordenação com outras funções ou com a sua integração. A compatibilidade está ligada a hardware e software. A compatibilidade é mais importante em subestações com um sistema de controlo-comando digital [31].

2.8.1.6 Flexibilidade

Esta qualidade do sistema indica a sua capacidade de ser utilizada para vários tipos de aplicações. Dá-nos possibilidade de regulação [31].

2.8.1.7 Disponibilidade

Fração de tempo em % que nos diz as expectativas em relação a uma proteção estar assegurada. É a exigência de todos os elementos que asseguram uma operação correta. Teremos dois tipos de exigências, as externas e as internas [31].

As internas são:

- Grande qualidade de componentes de maneira a garantir um reduzido número de defeitos;
- Conceção sã, principalmente a nível de software;
- Capacidade de deteção rápida de indisponibilidade, conseguindo assim reduzir a mesma.

As externas são:

- A proteção é disponível se as grandezas de medida são disponíveis e se a ordem de disparo pode ser dada;
- Para proteção diferencial de corrente, a corrente deve estar presente nas duas extremidades.

2.9 Sustentabilidade Ambiental de uma Subestação

O impacto relacionado com a construção e a operação de uma subestação depende do seu tamanho assim como da topografia, cobertura do solo e terreno existente no local. Alguns impactos são temporários, no entanto, a maior parte dos impactos na comunidade são permanentes. A extensa devastação de terreno e atividades de escavação que são requeridas para a construção da subestação, criam impactos permanentes na cobertura do solo do local. Além disso, são necessários acessos permanentes de forma a se poder executar manutenção e monitorização a longo prazo. Grandes subestações podem ainda necessitar de bacias de retenção para escoar águas da chuva, bermas, estruturas adicionais de transmissão construídas fora da área vedada e outras alterações paisagistas [34].

2.9.1 Impactos Temporários

Os impactos temporários são associados aos que aparecem durante a construção, como barulho de máquinas, poeira e interrupção do serviço elétrico local. Barulho e grandes quantidades de poeira podem ser provocados pelo equipamento de escavação, camiões de cimento e gravilha que trazem material para o local, atrelados de tratores que trazem o material elétrico. Podem ser necessárias pequenas interrupções elétricas locais para fazer ligações de linhas de distribuição e/ou de transmissão.

A erosão do solo e o escoamento da água das chuvas também podem ocorrer durante a construção, quando se retira a vegetação durante a escavação do local da fundação, visto que o solo fica temporariamente exposto. Logo, são necessárias medidas de prevenção de erosão, tal como vedações de lodo ou troncos de palha, que estarão no local até que a vegetação do local estabilize. É colocada uma camada de gravilha no solo, dentro da zona vedada que atua como uma superfície impermeável e que aumenta o escoamento durante alturas de chuva. A construção de pequenos lagos permanentes adjacentes à área vedada, principalmente em subestações maiores, ajudam a mitigar os efeitos adversos do escoamento de águas das chuvas na qualidade da água em riachos e zonas pantanosas [34].

2.9.2 Impactos Permanentes

Os impactos permanentes da construção e operação de uma subestação (ou até a expansão de uma) dependem do local ou da proximidade de residências. Os maiores impactos serão mudança da utilização do terreno e a perda de habitats, mudança da estética do local e alteração de paisagem, barulho e iluminação. Iremos discutir seguidamente estes impactos [34].

2.9.2.1 Estético

O impacto de uma nova subestação a nível estético irá depender muito do local e do tamanho da instalação. Algumas mais pequenas poderão ser camufladas facilmente através de bermas, vedação ou paisagismo. Subestações de maiores dimensões que fazem ligação de linhas de

transmissão tem um aspeto bastante industrial no meio da natureza. Em localidades rurais, os proprietários locais poderão não ser contra o impacto visual da instalação. No entanto, em áreas residenciais, os habitantes poderão achar que o aspeto físico dos transformadores, interruptores e vedações altas poderão alterar a personalidade da área. Devido à altura de algumas subestações, é necessário desobstruir à volta das instalações de transmissão, sendo difícil reduzir o impacto visual de subestações de transmissão. Os projetos de subestações poderão incluir planos paisagísticos e ilustrações de forma a mostrar à população como a nova estrutura irá ficar comparativamente ao resto da área [34].

2.9.2.2 Património Cultural

Património cultural inclui edifícios históricos, sítios arqueológicos e locais de culto. Impactos que podem ocorrer podem ser [34]:

- Atividades que causem a perturbação do solo podem causar dano ou perda de artefactos arqueológicos ou locais de enterro que não estejam marcados;
- As vistas de e para um local histórico podem ser afetadas devido à presença física da subestação.

2.9.2.3 Campos Eletromagnéticos

Os níveis de campo magnético e campo elétrico dentro da área vedada podem ser muito mais elevados do que na área à volta, especialmente em subestações de maior dimensão com vários transformadores. Estes níveis diminuem rapidamente com a distância dos transformadores e de outros equipamentos elétricos. Por norma, os níveis do campo eletromagnético diminuem para níveis da área à volta, dos 30 aos 60 metros de distância da área vedada [34].

2.9.2.4 Utilização do Terreno e Perda de Habitats

As subestações construídas em zonas residenciais podem ser percebidas como construções industriais, inconsistentes com a estética da comunidade. Tem o potencial de afetar o carácter e a desejabilidade da zona residencial a não ser que seja feito um levantamento paisagístico ou que tenha um design menos intrusivo. Alguns exemplos de levantamento paisagístico de subestações incluem colocar bermas cobertas por árvores à volta da subestação, vedações em madeira atrativas ou utilizar um design discreto para a subestação. Subestações em áreas rurais também poderão provocar a diminuição de produção agrícola. Subestações em áreas florestais também poderão resultar em perda de árvores e habitats para aves, assim como alterar a rota migratória dos mesmos devido ao ruído, e outros tipos de vida selvagem. Dependendo do tamanho da subestação, esta poderá afetar áreas que vão desde menos de 1 acre até 10 acres [34].

2.9.2.5 Barulho e Iluminação

Uma subestação em produção pode provocar muito barulho para os donos de propriedade adjacente. Um zumbido constante ou ruído pode ser audível até vários metros de distância da vedação da subestação. O som é especialmente notório durante a noite quando os níveis de som ambiente são mais baixos. Pode-se utilizar uma barreira de árvores maduras ou bermas de solo altas entre a subestação e residências próximas para reduzir o impacto sonoro. A poluição luminosa pode ser um problema em zonas residenciais e pode diminuir a beleza do céu noturno em áreas rurais. As subestações podem ter luzes ligadas durante a noite toda de modo a desencorajar vandalismo ou indivíduos não autorizados. Luzes de segurança direcionadas mais para baixo podem ajudar a evitar ou a reduzir a poluição luminosa [34].

2.9.2.6 Gestão de Vegetação

Enterrado debaixo da gravilha no local da subestação está um rede de fios que funciona como aterramento para o equipamento de alta tensão. De forma a garantir a segurança dos trabalhadores e do público em geral, é importante prevenir que esta rede de terras seja comprometida pelo crescimento de vegetação. Por esta razão faz-se manutenção regular nas subestações através do uso de herbicidas [34].

2.9.2.7 Zonas Pantanosas/Vias Fluviais

Devido a ser necessário superfícies estáveis, a nível térreo, as subestações raramente vão ser construídas em zonas pantanosas. Se não houver alternativas, são necessárias licenças para localizar a subestação numa zona pantanosa e inclusive minimizar o enchimento colocado na zona e o impacto nas zonas pantanosas/ vias fluviais adjacente ao local de construção. Pode ser necessário criar, restaurar ou prevenir zona pantanosa adicional. Com este tipo de zonas próximas é necessário aplanar o sítio da subestação e é muito provável ser necessário a construção de um pequeno lago para águas das chuvas para reter escoamento [34].

Capítulo 3

Sistema de Proteção, Comando e Controle Numérico

Neste capítulo iremos falar do Sistema de Proteção, Comando e Controle Numérico (SPCC) das subestações de distribuição AT/MT, nomeadamente da arquitetura, das funções de proteção (incluindo funções complementares) que os vários painéis devem ter e características técnicas das mesmas. Este capítulo usou como base o documento [35].

A arquitetura da subestação está dividida em três níveis hierárquicos que estão ligados entre si, são eles:

- **Nível 0** — Processo (constituído pelos equipamentos primários AT/MT da subestação com os quais o SPCC interage);
- **Nível 1** — Unidade de painel/dispositivo eletrónico inteligente (IED);
- **Nível 2** — Unidade Central (funções relacionadas com o comando e controlo de toda a instalação no local e à distância).

Os painéis integrantes do SPCC tem um conjunto de funções de proteção, que envolvem funções de vigilância do funcionamento da subestação, detetam defeitos, e tentam sempre eliminar os mesmos de forma mais rápida possível, de forma a que se garanta uma maior fiabilidade e segurança na exploração. Devemo-nos guiar por um conjunto de princípios de forma de forma a atingirmos os objetivos de proteção:

- A atuação da proteção deverá ser seletiva, incidindo só na área afetada;
- O deficiente funcionamento de qualquer componente da área afetada deverá ser colmatada de forma redundante;
- Coexistência com os restantes funcionalismos do SPCC.

3.1 Painel de Linha AT

A função de proteção encontra-se distribuída em dois equipamentos distintos sendo eles o IED (Intelligent Electronic Device- norma IEC/TR 61850-1) que garante as funções de máxima intensidade de fase (MIF) e máximo de intensidade homopolar direcional (MIHD). As restantes funções estão a cargo da unidade principal. Deverá ser possível bloquear as funções. O IED tem lógica programável e torna flexível a implementação de condições específicas. Iremos ter o canal de comunicação do IED nos extremos do cabo/linha terá que será o referido na tabela dos equipamentos.

3.1.1 Distância

É a principal função do painel de linhas AT, tem um funcionamento rápido e seletivo na detecção de defeitos entre fases e fase-terra, graças à característica de funcionamento tempo/distância. Existem 5 escalões de medida direcionais com característica poligonal e regulação independente dos alcances resistivos(R) e reativos(X) para cada escalão. A função terá de estar sempre ativa. Terá de ter um processamento independente por escalão e por tipo de defeito. O tempo total da operação deverá ser inferior a 30ms. Sem esquema de teleproteção deveremos utilizar com a função de religação o alongamento do 1º escalão.

3.1.1.1 Princípio de Operação

Os relés utilizados na proteção de distância, são os relés de distância, estes medem o quociente entre a tensão e a corrente "observadas" no ponto de instalação do relé considerando o ângulo de fase entre as mesmas. No caso do defeito franco (defeito com resistência nula), temos por exemplo um ponto F numa linha, a tensão V_r é a tensão "vista" pelo relé de distância no ponto da sua instalação, é a queda de tensão provocada por I_{cc} que está presente ao longo da linha, ou seja, a impedância Z_F , é representado pela seguinte equação:

$$V_r = I_{cc} * Z_F$$

Sendo assim o valor que o relé mede do defeito será :

$$\frac{I_{cc} * Z_F}{I_{cc}} = Z_F$$

Se a impedância da linha (Z_L) for mais pequena que Z_F , estaremos na presença de um defeito interno e poderá ser emitida uma ordem de disparo para o disjuntor. Caso isto não se verifique, temos um defeito externo e o relé de distância ficará estável.

Existe proporcionalidade entre o comprimento da linha, o ponto onde está instalado o relé e onde se dá o defeito. Nas linhas MAT e AT, temos normalmente, para frequências de 50Hz, ângulos entre 80° e 85° e impedâncias entre 0,3 e 0,4 Ω /km [31].

$$Z_L = z \text{ ohm/km} * L \text{ km}$$

A proteção de distância é uma impedância de mínima distância direcional.

3.1.1.2 Princípio de Escalonamento de Tempo

Idealmente deverá ser protegido um troço com toda a seletividade e de forma total com um tempo de base bem definido e que ao mesmo tempo deve ser possível proteger as linhas adjacentes. Isto claro seria no caso ideal, mas existem sempre erros que não tornam isto possível como por exemplo, imprecisões no sistema de proteção, imprecisão no conhecimento da impedância da linha, influências das variações das impedâncias homopolares, entre outros. De forma a podermos cobrir o máximo da linha, de forma mais eficaz possível, teremos de decompor a extensão da linha a proteger em zonas de operação e estabelecer uma relação entre o tempo de operação e o defeito [31].

3.1.1.3 Zonas de Distância

São os alcances dos elementos de medida da proteção de distância da rede e decorrem da aplicação do princípio de escalonamento de tempo. A proteção deve ser regulada para funcionar em três zonas, nomeadamente a zona 1, zona 2 e zona 3. Na zona 1 em tempo de base, até 80-85% do comprimento da linha. Na zona 2 o resto da linha é protegida com uma determinada temporização, ainda protegendo parte da linha seguinte a jusante. Na zona 3 é regulada entre 120 e 150% de forma a ser utilizado como último recurso para defeitos na linha seguinte a jusante [31].

3.1.2 Máxima Intensidade de Fase

Proteção de máxima intensidade de fase (MIF) deverá ser trifásica. Terá dois níveis de proteção ($I_0 >$ e $I_0 >>$) e de funcionamento por tempo independente. Esta função terá de estar em serviço permanente.

3.1.3 Máximo de Intensidade Homopolar Direcional

Este tipo de proteção deverá ter um nível de proteção ($I_0 >$) com funcionamento por tempo independente ou inverso. Esta função deverá ser implementada nos dois IED. Para teleproteção deverá ser possível MIHD.

3.1.4 Máximo de Intensidade Homopolar de Terras Resistentes

Os trabalhos em tensão implicam proteção do máximo de intensidade homopolar de elevada sensibilidade (terras resistentes) de tempo independente com possibilidade de atuação instantânea.

3.1.5 Power Swing Detection

Função para detetar oscilações de potência no sistema de distribuição, bloqueia a função de proteção de distância de modo a impedir a mesma de atuação intempestiva.

3.1.6 Weak End Feed

A direção de corrente numa linha sã (no caso específico das linhas paralelas), pode mudar com a abertura dos disjuntores associado à linha com defeito. A função de corrente inversa, deteta a inversão da corrente, bloqueia o envio do sinal de teleproteção para o outro extremo. Evita a atuação intempestiva da função distância.

3.1.7 Ligação sobre defeito

Função que deteta uma ligação sobre defeito, garante o disparo instantâneo e definitivo do disjuntor pela função distância e/ou direcional de terra, no momento da ligação manual do disjuntor.

3.1.8 Condutor Partido

Função de Teleproteção, eliminação instantânea de defeito localizado ao longo da linha.

3.1.9 Teleproteção

De forma a obtermos um disparo em simultâneo dos disjuntores nas duas extremidades, será necessário melhorar o funcionamento dos relés de distância através da implementação de um sistema de teleproteção. Isto permite a comunicação dos relés nas duas extremidades da linha ou do cabo, permitindo assim a realização de programas de religação automática e de disparo de qualidade [31].

3.1.10 Verificação de Sincronismo

Função que garante funções de sincronismo entre sistemas provenientes de fontes de energia distintas. Tem como objetivo verificar as condições de fecho de um determinado disjuntor, devendo ser previstos diferentes modos de funcionamento. Esta função deverá ser inibida pelo disparo de qualquer um dos disjuntores de proteção dos secundários dos transformadores de tensão.

3.1.11 Funções Complementares

- **Monitorização do disjuntor** — A informação relativa à energia cumulativa cortada pelo disjuntor do painel será disponibilizada, calculada e armazenada à distância e/ou no local. O número de manobras de abertura e de fecho do disjuntor também deverão ser disponibilizadas;
- **Localização de defeitos** — Deverá ser sempre possível aceder à informação relativa à distância em km do defeito no local a à distância;
- **Registo cronológico de defeitos** — Quando as funções de proteção (assim como complementares) atuam, será registado por esta função. Tal é verdadeiro também para sinais

digitais internos e externos do sistema. O utilizador irá identificar os acontecimentos assim como os definir. Os acontecimentos deverão ser exportados para formato digital, terão de ter compatibilidade com o Microsoft Excel;

- **Osciloperturbografia** — Sempre uma das condições de arranque seja ativada, todas as formas de onda de sinais digitais e transições de sinais digitais, sejam eles externos ou internos, deverão ser registados. Toda a informação contida nos registos da unidade de proteção deverá ser exportada utilizando o COMTRADE;
- **Comutação de parâmetros** — Deverá ser possível a regulação do valor de no mínimo quatro parâmetros diferentes, no comando local e/ou através de telecomando.

3.1.12 Modos de Funcionamento

Tem dois modos de funcionamento sendo eles:

- Regime normal de exploração: Todas as funções de protecção temporizadas e função de religação em serviço;
- Regime Especial de Exploração TET: O Regime Especial de Exploração (REE) é uma situação específica em que é colocado um elemento da rede, ou da instalação elétrica, durante a realização de TET, ou na vizinhança de tensão, de modo a diminuir o risco elétrico e minimizar os seus efeitos. Assim, evita-se as reposições de tensão automáticas, ou voluntárias, no seguimento do disparo das proteções [36].

3.1.13 Ensaio de funções de proteção

Instalação de módulos de teste que permitem a execução de ensaios às diferentes funções de proteção, com interrupção de ordens de disparo, fecho de correntes provenientes dos TI e interrupção das tensões provenientes dos TT.

3.2 Painel de Barras AT

IED com lógica programável, implementa-se de forma flexível em condições específicas de funcionamento. Funções devem poder ser bloqueadas.

3.2.1 Diferencial

Função principal do barramento AT, permite detetar e eliminar defeito de forma instantânea defeitos entre os transformadores de intensidade localizados nos painéis AT interligados no mesmo barramento. Tem processamento independente por fase de modo a efetuar a comparação vetorial das correntes.

As suas características principais são:

- Possui uma unidade central a instalar no painel de tensão de barras que comunica com os restantes IED, através da rede de processamento de dados da própria fibra ótica;
- supervisão do esquema da subestação;
- Estabilidade perante situações de defeito externos às zonas a proteger e de saturação dos transformadores de intensidade;
- Não deve necessitar de transformadores de intensidade intermediários;
- Os IED deverão possuir um interface próprio com o operador;
- Deverá ser modular de forma a facilitar a expansão do sistema.

3.2.2 Mínimo de Tensão

Esta função deverá ser trifásica e associada a cada semi-barramento AT, tendo por missão desencadear a função de automatismo. Deteta a falta de tensão, para que se proceda ao deslastre das cargas alimentadas pelo semi-barramento em causa. Deverá possuir dois níveis distintos de deteção ($U < U_{\min}$ e $U < U_{\min}$) do mínimo de tensão, um para o deslastre e outro para a normalização de tensão.

3.2.3 Verificação de Sincronismo

Devem ser garantidas as condições de sincronismo entre sistemas de fontes de energia distintas. Verifica-se as condições de fecho de um determinado disjuntor, que interliga barramentos AT da instalação. A permissão de ligar o disjuntor é dada pelo desvio da amplitude de tensão, da frequência e da desfasagem.

3.2.4 Funções Complementares

As funções complementares deste painel são:

- Registo cronológico de acontecimentos;
- Oscilopertubografia.

3.2.5 Ensaio das Funções de Proteção

Prevê-se a instalação de módulos que permitem a execução de ensaios às diferentes funções de proteção.

3.3 Painel de Transformador de Potência

As suas funções são distribuídas por dois equipamentos de proteção IED distintos que garantem a duplicação da função MIF. As restantes funções deverão encontrar-se na unidade principal. Deve haver possibilidade de bloquear funções.

3.3.1 Diferencial

Proteção principal do transformador de potência, tem como missão reduzir ao mínimo as consequências nefastas de uma avaria ou defeito interno nestes equipamentos. Detecção instantânea de defeitos na zona protegida, zona entre os TI do lado AT e do lado MT do TP, partir da comparação vectorial das correntes dos dois lados do transformador.

3.3.2 Máximo de Intensidade de Fase

Esta função deverá ser trifásica com dois níveis de deteção ($I>$, $I>>$) e de funcionamento por tempo independente. Protege o transformador de potência contra sobrecargas.

3.3.3 Funções Complementares

As funções complementares são:

- Função de Monitorização do Disjuntor;
- Registo de Acontecimentos;
- Osciloperturbografia.

3.3.4 Ensaio das Funções de Proteção

Prevê-se a instalação de módulos que permitem a execução de ensaios às diferentes funções de proteção.

3.4 Painel de Chegada MT

Os IED devem ser dotados de lógica programável, de forma a ser possível implementar de forma flexível condições específicas (bloqueios e encravamentos).

3.4.1 Máximo de Intensidade de Fase

Esta função deverá ser trifásica com pelo menos dois níveis de deteção ($I>$, $I>>$). Protege o barramento MT contra defeitos fase-fase, desempenha um papel de reserva às funções semelhantes dos painéis da linha MT.

3.4.2 Mínimo de Tensão

Função trifásica e associada a cada semibarramento MT, tem por missão desencadear a função de automatismo "deslastre por falta de tensão/reposição por regresso de tensão". Tem dois níveis distintos ($U < U_{cr}$) de funcionamento por tempo independente, considera-se atuação instantânea e outra temporizada.

3.4.3 Máximo de Tensão

Esta função tem as seguintes características:

- Trifásica;
- 2 níveis de deteção ($U > U_{cr}$ e $U >> U_{cr}$);
- Tem funcionamento por tempo independente, considera-se atuação instantânea e outra temporizada.

Tem por objetivo detetar elevações anormais de tensão nas barras MT.

3.4.4 Mínimo de Frequência

Este tipo de proteção tem:

- 2 níveis ($F < F_{cr}$ e $F << F_{cr}$) de deteção de funcionamento;
- Deverá ser considerada atuação instantânea;
- Deteta abaixamentos de frequência na rede;
- Informa posteriormente a função de automatismo “deslastre por mínimo de frequência/reposição por normalização de frequência”.

3.4.5 Funções Complementares

- **Seletividade lógica** — Em caso de falha de funções equivalentes de proteção dos painéis de bateria de condensadores, linhas MT e TSA+RN, esta função diminuirá o tempo de atuação de determinadas funções de proteção. Esta função reconhecerá a topologia de exploração da subestação. A seletividade lógica deverá reconhecer a cada momento a topologia de exploração da subestação;
- Função de monitorização do disjuntor;
- Registo de acontecimentos;
- Osciloperturbografia.

3.4.6 Ensaio das Funções de Proteção

Prevê-se a instalação de módulos que permitem a execução de ensaios às diferentes funções de proteção.

3.5 Painel de Bateria de Condensadores

IED com lógica programável, deverá possibilitar a implementação de condições específicas, nomeadamente bloqueios e encravamentos.

3.5.1 Desequilíbrio do Neutro

Deverá haver uma previsão desta função por escalão, de forma a ser possível a deteção de defeitos internos nas baterias.

Características deste tipo de proteção:

- Monofásica;
- 2 níveis de deteção ($I_o >$ e $I_o >>$) de funcionamento por tempo independente;
- Deve ser considerada atuação instantânea e temporizada para cada um dos níveis de deteção.

3.5.2 Máximo de Intensidade de Fase

Função trifásica com 2 níveis de deteção ($I >$ e $I >>$) de funcionamento por tempo independente, considerando sempre atuação instantânea e temporizada.

3.5.3 Máximo de Intensidade Polar

Tem um nível de deteção de funcionamento ($I_o >$) por tempo independente, onde é considerada atuação instantânea e temporizada. Obtemos o valor da corrente homopolar através do transformador toroidal.

3.5.4 Máximo de Tensão

Características desta função:

- Trifásico;
- Um nível de deteção de funcionamento ($U >$) por tempo independente;
- Considera-se atuação instantânea e temporizada;
- Deteta elevações anormais de tensão de barras MT através do disparo do disjuntor de painel de baterias de condensadores.

3.5.5 Funções Complementares

- Função de monitorização do disjuntor;
- Registo de acontecimentos;
- Osciloperturbografia.

3.5.6 Ensaio de Funções de Proteção

Deverá ser possível a instalação de módulos de modo a ser testadas as várias funções de proteção, assim como o fecho de correntes e tensões em TT.

3.6 Saída MT

Os IED devem ser dotados de lógica programável, de forma a ser possível implementar de forma flexível condições específicas (bloqueios e encravamentos).

3.6.1 Máximo de Intensidade de Fase

Este tipo de proteção deverá ter:

- No mínimo 3 níveis de deteção ($I_o>$, $I_o>>$, $I_o>>>$) de funcionamento;
- Para os níveis de funcionamento deve-se considerar atuação instantânea e temporizada;
- Possibilidade de configuração de direcionalidade individual dos níveis de deteção;
- Possibilidade de cálculo, através da soma vetorial para o nível $I_o >>>$, da corrente homopolar;
- Possibilidade de desencadear a função automatismo “religação rápida e/ou lenta de disjuntores”, ver documento DEF-C13-101.

3.6.2 Máximo de Intensidade Homopolar para Terras Resistentes

Características deste tipo de proteção [35]:

- Proteção homopolar de alta sensibilidade (PTR);
- Tem por objetivo eliminar defeitos fase-terra de elevada resistência;
- Nível de deteção $I_o>$ que dispõe de uma curva do tipo "tempo muito inverso" que garanta a seletividade de saída relativamente às outras saídas MT. Tem um patamar na ordem dos 16,5 kΩ.

Ainda deveremos considerar uma curva característica de PTR. Tendo em conta as correntes observadas, aproximaremos a curva de PTR à seguinte expressão:

$$t_{op} = \frac{459.14 \times TM}{I^{0.655}}, 0.5 \leq I < 5A \quad (3.1)$$

$$t_{op} = \frac{800 \times TM}{I}, 5A \leq I < 200A \quad (3.2)$$

$$t_{op} = 0.8, I \geq 200A \quad (3.3)$$

A implementação da curva PTR, poderá ser obtida através da definição do utilizador de diversos pontos (I,T) ou através das curvas de tempo inverso ou independente.

Esta função deverá ser capaz de desencadear a função de automatismo “religação rápida e/ou lenta de disjuntores”, que está especificada no documento DEF-C13-101.

3.6.3 Condutor Partido

Deteta uma interrupção na fase da linha a proteger, através do aparecimento da componente inversa da corrente ou de qualquer outro método.

3.6.4 Presença de Tensão

Poderemos incluir um detetor de presença de tensão no caso de introduzirmos um unidade independente de produção energética numa das saídas da linha MT da subestação.

A sua função principal é verifica a presença de tensão na saída MT.

3.6.5 Cold Load Pickup/ Inrush Restraint

Esta função tem como objectivo evitar actuações intempestivas das funções de protecção associadas os picos de corrente, na sequência de ligação de cargas (colocação em carga de uma linha ou arranques diretos de motores de potência elevada). A unidade de protecção deverá ser capaz de detectar estas situações e alterar, temporariamente, a regulação da função de protecção de máximo de intensidade de fase. Para a função Cold Load Pickup deverá ser tido em conta a ordem de fecho do disjuntor, enquanto que a função Inrush Restraint deverá ter em conta o conteúdo harmónico da corrente da linha.

3.6.6 Funções Complementares

As funções complementares deste painel são:

- Função de monitorização
- Registo cronológico de acontecimentos;

- Oscilopertubografia;
- Comutação de parâmetros.

3.6.7 Ensaio das Funções de Proteção

Deverão ser possível a instalação de módulos de modo a ser testadas as várias funções de proteção.

3.7 Painel TSA + Reatância do Neutro

Poderemos explorar a subestação através do regime do neutro isolado ou de neutro ligado à terra utilizando uma impedância limitadora(reatância ou resistência).

Disj. de interbarras	Disj. TSA+RN1	Disj. TSA+RN2	Regime de neutro
Aberto	Aberto	Aberto	Barr. 1 e 2 isolado
Aberto	Fechado	Aberto	Barr. 1 à terra, 2 isolado
Aberto	Aberto	Fechado	Barr. 1 isolado, 2 à terra
Aberto	Fechado	Fechado	Barr. 1 e 2 à terra
Fechado	Aberto	Aberto	Barr. unif. isolado
Fechado	Aberto	Fechado	Barr. unif. à terra
Fechado	Fechado	Aberto	Barr. unif. à terra

Figura 3.1: Possibilidades de Regime do Neutro Referentes à Exploração da Subestação

Estas configurações irão afetar as várias funções de proteção pelo que se deve fazer um reconhecimento do regime de neutro em vigor e do regime da topologia de exploração da subestação, no IED do painel em questão. Os IED tal como nos outros painéis deverão ter lógica programável, tornando assim flexível a implementação de condições específicas. As funções deverão poder ser bloqueadas.

3.7.1 Máximo de Intensidade de Fase

Função trifásica com dois níveis de deteção ($I>$ e $I>>$), com funcionamento por tempo independente, considerando sempre a atuação instantânea e temporizada.

3.7.2 Máximo de Intensidade Homopolar de Barras AT

Tem dois níveis de deteção ($I_o>$ e $I_o>>$) com funcionamento por tempo independente, considerando sempre a atuação instantânea e temporizada. Tem função de deteção de defeitos fase-terra pouco resistivos no barramento MT, servido como "*backup*" de funções de proteção que estão instalados nos painéis da linha MT. Utiliza-se um transformador toroidal entre o ponto de ligação à terra da instalação e o ponto do neutro da impedância limitadora para medir o valor da corrente homopolar. O disparo do TP que está ligado ao semi-barramento onde o defeito é detetado tem origem na proteção máxima de tempo independente.

3.7.3 Máximo Intensidade Homopolar de Terras Resistentes

Função destinada a eliminar defeitos fase-terra com resistência elevada, é uma proteção com alta sensibilidade. Tem dois níveis de proteção ($I_o >$ e $I_o >>$) com funcionamento por tempo independente, considerando sempre a atuação instantânea e temporizada. Deteta defeitos monofásicos resistivos que estejam presentes no barramento MT e servirá de "backup" da função de terras resistentes das saídas MT. Deverá ter sensibilidade para detetar defeitos resistentes no valor de 16,5k.

3.7.4 Máximo de Tensão Homopolar de Terras Resistentes

Deteta defeitos à terra resistivos no andar MT, quando o andar MT da subestação é explorado em regime do neutro. Tem um nível de deteção ($U_o >$) com funcionamento por tempo independente, considerando sempre a atuação instantânea e temporizada. De acordo com imposições regulamentares, 3 minutos após o arranque de TP associado ao semibarramento no qual foi detetado o defeito, é dado o disparo em TP.

3.7.5 Funções Complementares

- **Seletividade Lógica da Função Máximo de Intensidade Homopolar** — Em caso de falha de funções de proteção equivalentes dos painéis de bateria de condensadores e de linhas MT, esta função diminuirá o tempo de atuação de determinadas funções de proteção. Esta função reconhecerá a topologia de exploração da subestação a cada momento;
- Função de monitorização do disjuntor;
- Registo de acontecimentos;
- Osciloperturbografia.

3.7.6 Ensaio das Funções de Proteção

Prevê-se a instalação de módulos que permitem a execução de ensaios às diferentes funções de proteção.

Capítulo 4

Guia Orientador para a Escolha de Proteções

Neste capítulo iremos falar dos problemas que podem ocorrer numa subestação de um parque eólico, onde as proteções vão atuar, como vão atuar e quais as proteções que deveremos utilizar para os vários tipos de problemas. Seguidamente daremos os passos a seguir para implementarmos o sistema de proteção na subestação.

4.1 Defeitos e Proteções Possíveis

4.1.1 Defeitos

Defeitos entre Fases e Fase-Terra

Este tipo de defeitos poderá ocorrer nas linhas MAT/AT e nos barramentos MT. Defeitos entre fases ocorrerão mais nas linhas MAT/AT e os defeitos fase-terra ocorrerão nos barramentos MT.

Oscilações de Potência

Este tipo de problema irá ocorrer no sistema de distribuição, quando ocorrem fenómenos transitórios que duram mais que o tempo de oscilação configurado.

Condutor Partido

Este defeito ocorre quando existe uma interrupção numa fase das linhas.

Problemas de Sincronismo

Devem estar sempre garantidas as condições de sincronismo, por exemplo entre sistemas que tenham fontes de energia distintas.

Problemas de Mínimo de Tensão

Poderá ocorrer falta de tensão nos semi-barramentos AT assim como nos semi-barramentos MT.

Problemas de Máximo de Tensão

Poderá ocorrer situações de elevação anormal de tensão nos barramentos AT e MT.

Baixas de Frequência

Poderão ocorrer abaixamentos de frequência para qual a subestação deverá estar preparada.

Desequilíbrio do Neutro

Isto poderá ocorrer através de defeitos internos nas baterias.

Atuação Intempestiva de Proteções

Um problema do qual também nos deveremos de precaver será o de atuação intempestiva de proteções que estejam associadas a picos de corrente, oscilações de potência, oscilações de impedâncias, alterações nos sentidos de correntes de defeito etc.

4.1.2 Defeitos Específicos a Alguns Equipamentos das Subestações

4.1.2.1 Transformadores de Potência

Defeitos Internos

Defeitos que apareçam na zona de proteção dos transformadores são chamados de defeitos internos, sendo eles defeitos que possam ocorrer dentro e fora da cuba do transformador estando estes localizados entre os transformadores e corrente do painel correspondente aos terminais do nosso transformador de potência.



Figura 4.1: Defeitos Internos do Transformador de Potência

Defeitos Externos

Defeitos que se manifestam devido a causas externas, sendo eles:



Figura 4.2: Defeitos Externos do Transformador de Potência

4.1.2.2 Barramentos

Os barramentos das subestações são considerados de alta fiabilidade, no entanto nunca devem deixar de ter um sistema de proteção dedicados. Podemos ter defeitos externos e defeitos internos.

Defeito Interior

Saberemos que existe um defeito interno no caso de as correntes, num determinado instante, estarem todas no mesmo sentido e a corrente diferencial possuir um valor muito grande, sendo esta à imagem da corrente de defeito.

Defeito Exterior

Num determinado instante, as correntes não estão todas no mesmo sentido. A corrente diferencial é igual à soma fasorial das correntes de serviço normais dos painéis de chegada e das correntes dos painéis de saída (situação normal de exploração da rede) ou à soma fasorial das correntes dos painéis, levando as correntes de curto-circuito aos barramentos e da corrente de curto-circuito, que sai do barramento, em direção ao defeito. Poderemos ter fenómenos semelhantes para correntes secundárias desses painéis, se todas as razões de transformação dos transformadores de corrente forem idênticas e se os erros introduzidos pelos transformadores de corrente forem insignificantes. Se todos os secundários são ligados entre eles e com um relé de intensidade máxima, a corrente que atravessa o relé comum é nula em serviço ou no caso de um defeito fora dos barramentos. Nestas condições o relé diferencial não opera visto que não recebe nenhuma corrente [31].

4.1.2.3 Baterias de Condensadores

- **Sobrecargas Permanentes** — Uma tensão de frequência fundamental excessiva nos barramentos de conexão da bateria poderá provar correntes de sobrecarga ou por harmônicos ou pelos dois ao mesmo tempo;
- Sobretensões;
- Falta de tensão;
- **Defeitos Internos** — Disrupção de uma ou de várias unidades (dependendo da bateria) provocará uma corrente de desequilíbrio que vai percorrer o circuito de ligação entre os dois neutros de dupla estrela.

4.1.2.4 Transformadores de Corrente

Curto-circuitos em transformadores mal dimensionados poderão provocar falta de fidelidade de imagem da corrente secundária em relação à primária, conduzindo a operações incorretas dos relés de proteção. Os curto-circuitos nas rede elétricas onde estão instalados irão impor aos transformadores de corrente dois regimes, o regime de curto-circuito simétrico e o de curto-circuito assimétrico [31].

4.1.3 Proteções

4.1.3.1 Proteção de Distância

A proteção de distância é e continua a ser a proteção principal de linhas aéreas e de cabos. Tem uma grande fiabilidade, é rápida e consegue em grande parte eliminar as quantidades variáveis de carga e fornecer fora do cálculo de proteção. A proteção de distância é no fundo uma medida de impedância, que compara a impedância conhecida de uma linha com um sistema de medida de impedância. Uma proteção moderna de distância como o IED tem de lidar com muito mais coisas como seleção de fases, delimitação de carga, deteção de oscilação de potência, comunicação de esquemas, medidas fasoriais, monitorização, proteção de controlo e de backup, toda uma variedade de tarefas é realizada, diferindo de instalação para instalação e de cliente para cliente [37].

Relé de Distância

O sistema de medida de distância é o coração do relé de distância. Este tipo de relé funciona dependendo da distância da falha da linha. Mais especificamente, o relé vai operar dependendo da impedância entre o ponto da falha e o ponto onde o relé está instalado. Também é conhecido por relé de impedância.

Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento deste relé é muito simples. Existe um elemento de tensão de um transformador de tensão e um elemento de corrente alimentado de um transformador de corrente do sistema. O torque defletor é produzido pela corrente secundária do transformador de corrente e o torque restaurador é produzido pela tensão do transformador de tensão.

Em condições normais de operação, restaurar o torque é mais importante do que defletir torque. Consequentemente o relé não operará. Mas em condições de defeito, a corrente torna-se muito elevada ao invés da tensão que irá baixar. Então o torque defletor torna-se maior que o torque restaurador e partes dinâmicas do relé começam a mover-se. Então o funcionamento do relé depende do rácio entre a corrente e a tensão.

A operação deste relé depende de um valor pré-determinado de rácio de tensão para corrente. Este rácio não é nada mais do que uma impedância. O relé só operará quando o rácio se tornar menor do que o valor pré-determinado. Podemos dizer que o relé só opera quando a impedância da linha é menor do que impedância pré-determinada [38].

Grandezas de Medida a considerar nos cálculos da impedância do defeito efectuados pelos relés de distância

Existem dois tipos de relés de distância:

- Relé de distância definida;
- Relé distância de tempo.

IED

Os IED providenciam proteção versátil, monitorizando e controlando a funcionalidade com o máximo de flexibilidade e performance otimizado para linhas aéreas e cabos. O IED fornece proteção de distância para duplo circuito, operação em paralelo e linhas compensadas em séries. Isto, juntamente com a flexibilidade e expansibilidade de hardware, permite ao IED atingir requisitos específicos. Como resultado, poderemos beneficiar de múltiplos algoritmos e funcionalidade de bay control, incluindo sincronização, verificação de sincronismo, detecção de linhas mortas e religação automática.

São ainda capazes de proteger e controlar vários objetos, por exemplo, uma combinação de uma linha e um transformador com um único IED.

Poderemos ainda ter soluções de proteção personalizadas ou pré-configuradas. Os IED pré-configurados são equipados com funcionalidade completa adaptada a 4 configurações alternativas [39].

Equipamento onde se aplica: Linhas de MAT/AT.

4.1.3.2 Proteção Diferencial de Linha

Um forma alternativa de proteção de linhas, que é cada vez mais comum, é a proteção diferencial. A proteção diferencial é baseada nas leis de Kirchhoff, mais precisamente na lei dos nós. Isto quer dizer que para uma aplicação de proteção é que a corrente medida na entrada na linha deverá ser a mesma medida na saída, caso tivéssemos um sistema ideal.

Isto não se verifica visto que o sistema está longe de ser ideal. A integração de um sistema de proteção diferencial numa filosofia de proteção de distância é fácil, de forma que é uma proteção unitária. Tem uma performance mais consistente, com o custo de ser mais dependente de

hardware. É ainda necessária alguma forma de largura de banda elevada, baixa latência de comunicação é necessária entre os terminais das linhas de forma a trocar informação análoga para o algoritmo da linha diferencial processar. Tipicamente isto é um cabo de fibra ótica [40].

Equipamento onde se aplica: Linhas de MAT/AT.

4.1.3.3 Proteção contra Sobretensões

As sobretensões são diferenças de potencial anormais que podem provocar estragos nos equipamentos da subestação, provocam a diminuição da sua vida útil assim como podem prejudicar a flora e a fauna na área à volta. Podemos dividir as sobretensões em tendo em conta as suas causas sendo elas:

- Descargas atmosféricas;
- Manobras de comutação nos circuitos;
- Frequência normal da rede ou frequências múltiplas dessa frequência normal (harmónicas).

Também as podemos dividir quanto à sua origem, tendo estas origem interna (provocadas por manobras de disjuntores, defeitos, ferroressonância, etc) ou externa (essencialmente cargas atmosféricas) [31].

Proteção contra Descargas Atmosféricas

Seguidamente falaremos dos 3 métodos mais utilizados para proteger de descargas atmosféricas, são eles [41]

- **Descarregadores de Sobretensão** — O descarregadores de sobretensão providenciam um caminho de impedância muito baixo para a terra para ondas de alta tensão viajantes. Este aparelho funciona como uma resistência elétrica não linear. A resistência diminui à medida que a tensão aumenta e vice-versa, após um determinado nível de tensão. Sobre condições normais, os para descarregadores de sobretensão e os "*surge dividers*" conseguem aguentar bem a tensão do sistema como isoladores e não deixam que haja um caminho para a corrente do sistema. Quando ocorre um pico no sistema, estes aparelhos fornecem uma impedância muito baixa para o excesso de carga do pico em direção à terra. Após isto, a tensão volta ao seu nível normal. Depois o descarregador de sobretensões volta a funcionar como isolador e volta a não deixar passar corrente para a *terrapush*;
- **Cabos de Guarda ligados à terra** — Neste método, utilizam-se fios de ferro galvanizados por cima da subestação elétrica. Estes fios são utilizados como cabos de guarda, são aterrados através de diferentes estruturas da subestação. Esta rede de fios de ferro galvanizado, providenciam um caminho de impedância muito baixo para a terra para quando ocorre uma descarga. Este método de proteção de alta tensão é muito simples e económico com a desvantagem de não conseguir proteger o sistema de ondas viajantes que poderão atingir a subestação através de diferentes cabos que ligam a subestação aos aerogeradores;

- **Cabo de Terra** — Este método de proteção de sobretensão é semelhante aos cabos de guarda ligados à terra. A única diferença que ao invés de ser colocado acima da subestação elétrica, é colocado sobre a rede de transmissão elétrica. Um ou dois fios de ferro galvanizado de secção adequada são colocados acima dos condutores de transmissão. Estes fios são ligados à terra devidamente em cada torre de transmissão. Os mesmos irão desviar descargas para a terra e não os deixarão atingir diretamente os condutores de transmissão.

Equipamento onde se aplica:

- Linhas;
- Transformadores;
- Bancos de condensadores;
- Serviços auxiliares.

4.1.3.4 Proteção de Sobreintensidade do Neutro

Esta função de proteção detetará defeitos fase-terra pouco resistivos na barramento de MT e serve, ainda, como reserva às funções de proteção idênticas instaladas nos painéis de saída MT.

A função de proteção deve detetar defeitos fase-terra pouco resistivos localizados no barramento de MT e serve, ainda, como reserva às funções de proteção idênticas instaladas nos painéis de saída MT. A medida da corrente homopolar deve ser obtida a partir de um transformador toroidal instalado para o efeito, situado entre o ponto neutro da impedância limitadora e o ponto de ligação à terra da instalação. A atuação da função Proteção de Máxima de Intensidade Homopolar de tempo independente deve originar o disparo do TP ligado ao barramento em que se deteta o defeito.

Equipamento onde se aplica:

- Linhas;
- Transformadores;
- Bancos de condensadores;
- Serviços auxiliares.

4.1.3.5 Proteção de Máximo/Mínimo de Tensão

A proteção de máximo (ou mínimo) de tensão atua quando tivermos um valor de tensão acima (ou abaixo) do regulado no escalão de tensão sendo essa atuação é temporizada.

Seguidamente apresentarei algumas aplicações na rede para máximo e mínimo de tensão.



Figura 4.3: Aplicações para Mínimo de Tensão

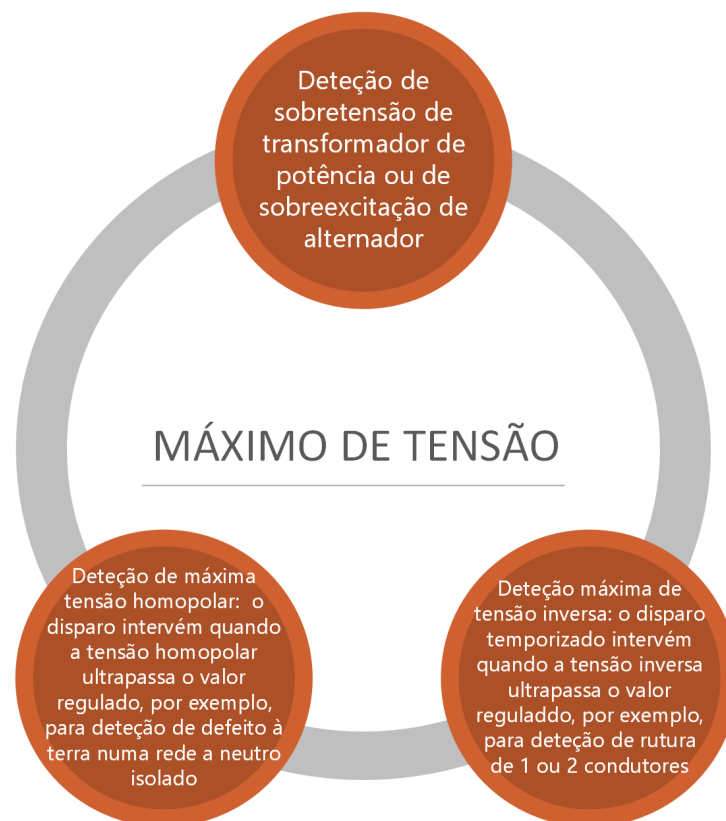


Figura 4.4: Aplicações para Máximo de Tensão

Equipamento onde se aplica:

- Linhas;
- Transformadores;
- Bancos de condensadores.

4.1.3.6 Proteção de Máximo/Mínimo de Frequência

Existe operação para um escalão mínimo e máximo de frequência. A tensão da rede influencia o valor da frequência. Quando há uma passagem da tensão por zero, mede-se a frequência. Para contrariar isto, o valor da frequência poderá basear-se em vários valores que correspondam a vários pontos da curva de tensão. Estas alterações de frequência poderão indicar desequilíbrio entre consumo e produção.

Uma forma de aumentar a fiabilidade da proteção será retardar a mesma. Razões para utilizarmos esta proteção poderão ser o remedeio do colapso da rede, segundo uma gradação específica (deslastre), que provoca a desligação dos consumidores. Neste caso utilizaremos a proteção mínima de frequência. Outra razão para utilizarmos proteção de frequência será detetar uma sobre velocidade do alternador, neste caso iremos utilizar uma proteção de máximo de frequência.

Equipamento onde se aplica:

- Linhas;
- Transformadores;
- Bancos de condensadores;
- Serviços auxiliares.

4.1.3.7 Proteção de Sincronismo

A permissão de ligar e desligar um disjuntor é condicionada pelo desvio da amplitude de tensão (ΔU), da frequência (Δf) e da defasagem ($\Delta \varphi$). Podem ocorrer os seguintes modos de funcionamento:

- Barramento morto/linha morta;
- Barramento morto/linha viva;
- Barramento vivo/linha morta.

Equipamento onde se aplica:

- Linhas;
- Bancos de condensadores;
- Serviços auxiliares.

4.1.3.8 Proteção de Falhas de Disjuntores

A proteção contra falhas de disjuntores é necessária para toda a subestação. Para contrariar estas falhas utilizaremos "*Breakure Failure Relays, BFR*" que traduzem para relés de falhas de disjuntores. É necessário que estes relés atuem de forma rápida quando o disjuntor primário não conseguir fazer o corte de forma correta quando, por exemplo, ocorrer um curto-circuito na rede. A secção da rede com defeito pode ser "cortada" de forma separada. É importante que o defeito seja removido o mais rapidamente possível através da ativação do disjuntor. Há sempre o risco que o disjuntor não consiga "cortar" o defeito e então o tempo total da falha passará a depender do tempo de atuação do disjuntor adjacente. Uma forma simples e fiável de isolar o defeito é verificar a corrente após um tempo determinado. O tempo deverá ser o suficiente para permitir que o disjuntor atue. O impulso para o disjuntor funcionar ou para que a proteção dos barramentos atue, dá também um impulso para que o BFR comece a funcionar. No caso da corrente que atravessa o disjuntor exceda um certo valor de corrente após tempo determinado, o BFR dará um impulso para os disjuntores adjacentes funcionarem [42].

Equipamento onde se aplica:

- Linhas;
- Transformadores.

4.1.3.9 Religação

A religação é uma função utilizada para corrigir defeitos fugitivos. Por exemplo uma folha de árvore que caia por cima de um dos condutores e comece a arder, o local onde isso acontece deixará de ser alimentado. Passado um tempo determinado se já não houver defeito a religação é realizada e o local do defeito volta a ser alimentado.

Equipamento onde se aplica: Linhas.

4.1.3.10 Relé de Bloqueio

O relé de bloqueio é um relé eletromecânico que está colocado no contacto de saída. Tal como o nome indica tem função de bloquear o circuito. Este bloqueio é feito até o circuito voltar ao normal. Este relé possui dois tipos de bobine: bobine de disparo e bobine de religação. Quando a bobine de operação recebe tensão o relé entra em funcionamento e quando a de reposição é recebe tensão o relé volta ao estado inicial. O relé necessitará de uma reposição manual para normalizar a proteção e o circuito de disparo. Os contactos de saída do relé de bloqueio estão ligados ao circuito da bobine de disparo. Sendo assim, sempre que o relé receber tensão, é enviado um comando de acionamento para o relé.

Princípio de Funcionamento

A condição de falha é dada pela configuração do relé. Se o parâmetro do sistema exceder o valor definido, o relé assume como condição de falha.

Suponhamos que o valor definido para um valor de sobreintensidade de corrente é de 200% do valor nominal. Se o relé perceber que a corrente do circuito é maior que o valor definido, vai então assumir a condição de falha e vai mudar o contacto de saída da bobine de reposição de "normalmente aberto"(NO) para "normalmente fechado"(NC). Assim os 220 V CC para operar a bobine de (OC) irão ser utilizados durante mais tempo e o relé voltará a receber tensão.

A figura seguinte representa o funcionamento deste relé.

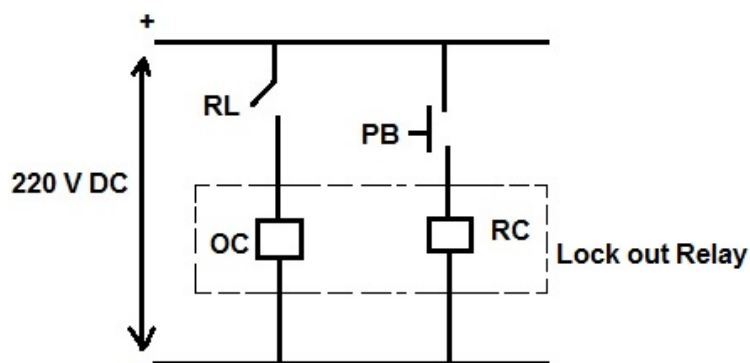


Figura 4.5: Funcionamento do Relé de Bloqueio [15]

Quando recebe tensão, os contactos de saída mudarão o seu estado. Contactos NO passarão a NC e então a fonte de 220V DC continuará a fornecer energia. Isto acionará o disjuntor.

É utilizado um botão PB para repôr o relé. Assim a bobine de reposição será alimentada e o relé será reposto [15].

Equipamento onde se aplica:

- Linhas;
- Transformadores.

4.1.3.11 Relé Buchholz

O relé de Buchholz é uma proteção que se aplicará nos transformadores a óleo com conservadores de óleo ou reservatórios de expansão, com o fim de detetar defeitos do circuito magnético ou defeitos internos do enrolamento. Deteta pontos quentes com origem no aparecimento de curto-circuitos ou abertura de espiras no interior do transformador. Permite detetar, muitas vezes, detetar defeitos desde as suas primeiras manifestações e intervir antes que os seus estragos sejam importantes. É eficaz contra todos os defeitos de isolamento que apareçam no interior da cuba do transformador, contra ruturas de condutores e os maus contactos dos comutadores de tomada do regulador em carga. É um tipo de proteção baseado mais em princípios mecânicos do que eléctricos. Este relé é um objeto cilíndrico que estará instalado no tubo que liga o reservatório principal ao tanque principal [31] [16].

Princípio de Funcionamento

Falhas que ocorram dentro de um transformador com óleo geram calor, calor que é suficiente para decompor o óleo de isolamento. A decomposição do óleo produz gás como hidrogénio, monóxido de carbono, metano, etc. Estes gases irão mover-se gradualmente para o conservador através do tubo de conexão, mas parte deles fica preso dentro do relé de Buchholz. Os gases presos deslocam o óleo dentro do relé. Então o nível de óleo dentro dele cai, ativando os flutuadores que se encontram lá.

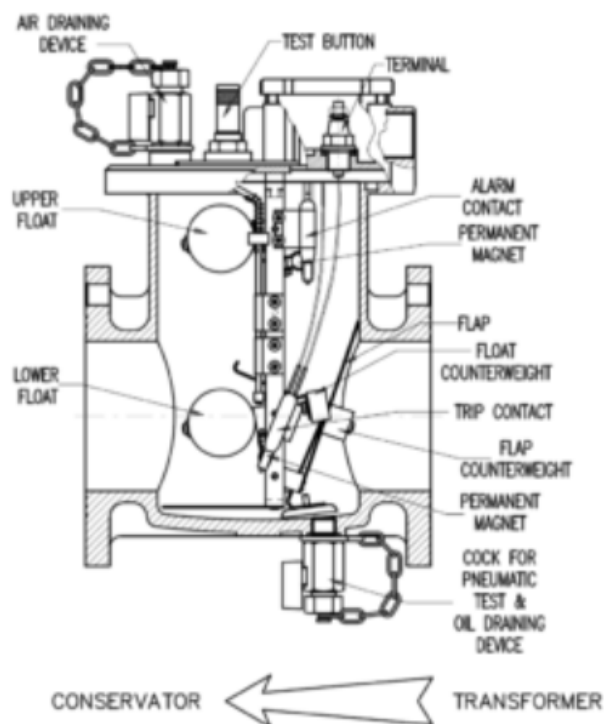


Figura 4.6: Esquema de um Relé Buchholz [16]

No caso de falhas grandes, é produzida uma grande quantidade de gases através da decomposição do óleo. Isto resulta num aumento do óleo que se move para o conservador de óleo. Este aumento de óleo empurra a aba ligada à tomada lateral do transformador do relé de Buchholz [16].

Equipamento onde se aplica: Transformadores.

4.1.3.12 Verificação do Nível e Temperatura do Óleo do Transformador

Os transformadores deverão possuir indicadores magnéticos que indicam de forma extremamente rigorosa o nível do líquido isolador, podendo ainda possuir contactos que poderão ativar um alarme ou provocar um desligamento, servindo assim de proteção do transformador. Para verificação do nível de temperatura utilizaremos um termómetro, esse que terá três ponteiros, sendo um para indicar a temperatura máxima atingida num determinado período e os outros dois são ponteiros de ligação.

4.1.3.13 Proteção Imagem Térmica

A proteção de imagem térmica simula a constante de tempo do motor e permite uma boa proteção do transformador no caso de sobrecarga. A curva característica da atuação da proteção é exponencial de acordo com a norma para relés térmicos. Quando se aplicar esta proteção se o

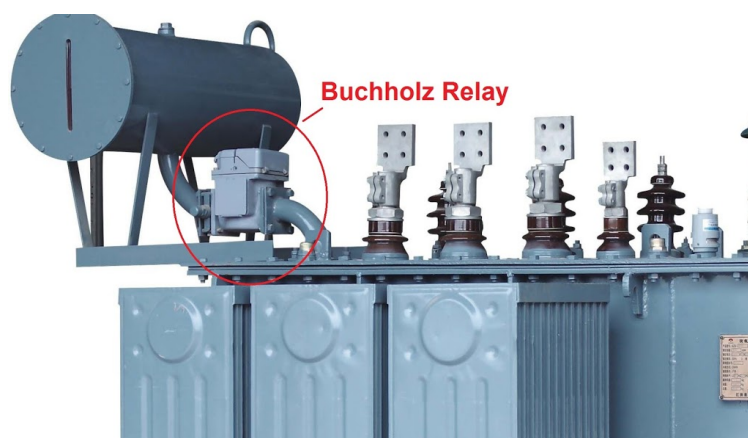


Figura 4.7: Relé de Buchholz num Transformador [16]

transformador for visto como "quente" ao recomeçar, deve ser verificado se a curva térmica equivalente é tal que permita a passagem de corrente de arranque para o tempo correspondente. Para a proteção térmica normalmente é possível definir uma constante de tempo de aquecimento e uma constante de tempo de arrefecimento [43].

4.1.3.14 Regulador de Tensão

Os reguladores de tensão são utilizados nas subestações e nas linhas de distribuição ajudam a manter o nível de tensão constante ao longo de toda a linha. São utilizados especialmente em linhas de distribuição mais compridas. A sua operação é basicamente a mesma que nos reguladores das subestações. Elevam ou baixam a tensão nas linhas de distribuição para fornecer tensão a um nível mais ou menos constante à medida que o nível de carga nas linhas se for alterando.

Quando a carga na linha é baixa, a queda de tensão não é muito elevada e os clientes perto do fim da linha terão uma tensão adequada. Quando a carga na linha é alta, a queda de tensão a queda de tensão também é mais elevada e os clientes no fim da linha poderão receber tensão menos elevada. Os reguladores de tensão ajustam-se automaticamente para situações de carga baixa ou alta de forma a assegurar que todos os clientes tenham tensão apropriada para o seu equipamento elétrico [44].

Equipamento onde se aplica: Transformadores

4.2 Escolha e Aplicação da Proteção Passo a Passo

Esta parte utiliza como base a especificação técnica do sistema de proteção da subestação Duna Huambos [45].

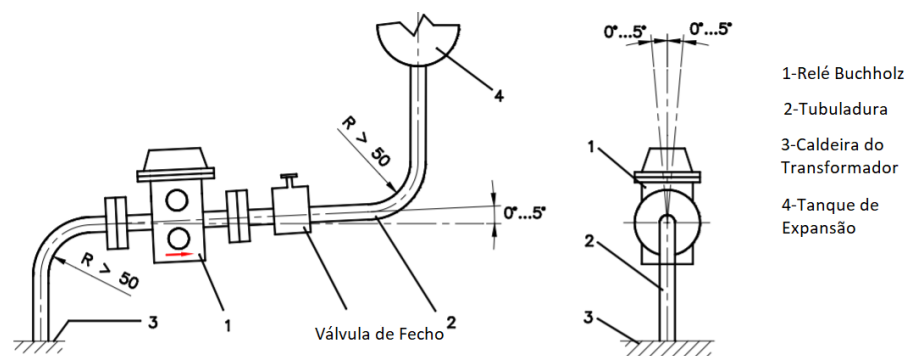


Figura 4.8: Esquema de Montagem de um Relé Buchholz [17]

4.2.1 Parametrização da Subestação

A primeira coisa a fazer será saber as características da subestação para a qual queremos criar um sistema de proteção. Essas características serão:

- **Condições ambientais onde se encontra** — Temperatura máxima e mínima do ambiente, nível de contaminação(IEC 60815), altitude, clima, humidade relativa e condições sísmicas;
- **Condições gerais do sistema elétrico** — nº de fases, frequência nominal e operação;
- **Características do sistema elétrico para os dois lados** — por exemplo AT/MT, sabendo a tensão nominal, tensão máxima de serviço, frequência e nº de fases.
- **Características dos serviços auxiliares** — nomeadamente os níveis de tensão para os serviços auxiliares e de controlo.

4.2.2 Normas

O fabricante deverá fornecer os equipamentos elétricos e/ou de controlo para as condições ambientais e normas estabelecidas e nas bases técnicas gerais. Devem ser consideradas as especificações e normas, na sua última edição, seguinte, ou as suas equivalentes ANSI:

- IEC *International Electrotechnical Commission*;
- ANSI *American National Standards Institute*;
- IEEE *Institute of Electrical and Electronic Engineers*;
- NEMA *National Electrical Manufacturer's Engineers*;

- NEC *National Electrical Code*;
- ISA *Instrumentation Society of America*;
- ASTM *American Society for Testing Material*;
- ICEA *Insulated Cable Engineering Association*;
- NFPA *National Fire Protection Association*;
- UL *Underwrites Laboratory*;
- OSHA *Occupational Safety and Health Act*;
- NESC *National Electric Safety Code*;
- PR-20 *Procedimiento Técnico del Comité de Operación Económica des SEIN*.

4.2.3 Condições do SPCC

A equipa responsável deverá fornecer um serviço confiável, adequado e seguro para todas as condições de operação. Devem ser conhecidas as técnicas mais modernas de fabrico e desenho do sistema. Deveremos ter conhecimento de tudo com detalhe para uma montagem correta da operação, de acordo com a finalidade da mesma. O equipamento a escolher deve ser sempre novos e de design mais recente possível. Nunca se deve aceitar trabalhar com protótipos ou equipamento utilizado anteriormente. O equipamento deve ser robusto o suficiente para trabalhar de forma adequada (e constante) nas condições ambientais onde se vai inserir. Também devem ser de fácil manutenção e operação. Componentes eletrónicos também deverão ser facilmente substituíveis. As unidades eletrónicas também deverão ter capacidade de auto diagnóstico.

4.2.4 Níveis de Controlo

A seguir devem ser definidos os níveis de controlo. A receção dos sinais de estado e alarmes nos equipamentos de controlo e proteção serão independentes do nível de controlo selecionado.

4.2.5 Requisitos Técnicos

4.2.5.1 Alimentação

A alimentação a uma tensão V_{cc} será feita pelos bancos de baterias alimentados de forma permanente por carregadores no modo de flutuação. Isto significa que a tensão esperada nos circuitos será de $V_{cc} + 10\%$, de maneira que os equipamentos deverão ser capazes de se manter alimentados a esse nível de tensão. Por outro lado, os equipamentos deverão ser capazes de funcionar dentro dos tempos especificados para o valor mínimo de tensão de $V_{cc}-15\%$ e corresponderá ao valor final do tempo de descarga das baterias, isto é, em caso de falha de alimentação de corrente alternada dos carregadores de baterias. Todos os equipamentos de controlo deverão operar de forma satisfatória dentro dos intervalos de variação aceitáveis para as redes de serviços auxiliares.

4.2.5.2 Sistema de Controlo e Proteção

Os relés de Controlo e Proteção serão equipamentos do tipo digital numérico, multifunções e programáveis. As funções vitais para um equipamento de Controlo e Proteção não dependerão da lógica associada a outros equipamentos, complementares ou não. Deverão possuir com autodiagnóstico e monitorização. A deteção automática de uma anomalia, se comprometer a segurança, deverá provocar um bloqueio imediato, além de que deverá soar um alarme local e um remoto. O alarme local deverá utilizar leds. Todos os defeitos possíveis devem estar bem documentados no manual do equipamento, devendo incluir pelo menos, o significado do alarme e medidas corretivas que deve o utilizador executar e além disso deve ser reportada a ocorrência ao fornecedor e ao fabricante. As funções de proteção devem ser sensíveis, seletivas e redundantes, com sensibilidade suficiente para detetar falhas tanto no elemento protegido como no elemento adjacente. Deve ser possível fazer ajustes às características de operação e da variação de calibração, garantindo assim o corte seletivo do elemento em falha. O equipamento deverá ter processadores independentes para comunicação e funções de proteção, de maneira a que as comunicações não afetem as funções específicas de proteção. Deverá haver um interface compatível com Windows para proceder a configuração, editar e carregar todos os parâmetros de ajuste e lógicas de proteção e controlo necessário para a operação do relé. Uma ligação Ethernet também é importante. A disponibilidade mínima do sistema de proteção deverá ser de 99.95%.

Devemos ter em conta:

- **Valores Nominais dos Equipamentos de Proteção** — Corrente nominal, frequência e tensão de alimentação;
- **Capacidade de Sobrecarga de Relés** — Para valores de corrente nominal e VAC.

4.2.5.3 Relés de Controlo de Proteção, Blocos de Ensaio de Proteções

Linhas

Estas proteções, deverão ser do tipo numérico de última geração, localizar-se-ão, no armário de proteção correspondente da proteção de linha. Seguidamente apresentarei uma lista de funcionalidades de proteção mínimas:

- Proteção diferencial- Só na proteção principal;
- Proteção de distância;
- Proteção de sobreintensidade;
- Proteção de falhas de disjuntor;
- Proteção de máximo e mínimo de tensão;
- Função de verificação de sincronismo;
- Função de religação monopolar e tripolar;

- Teleproteções;
- Características de proteção do tipo quadrilátero;
- Função de oscilação de potência;
- Função de falha de fusível (perda de potencial);
- Seleção de fase;
- Função de fecho contra falhas;
- Capacidade de armazenamento de eventos na memória não volátil;
- Elementos de programação para automação e relatórios sequenciais de acontecimentos (na memória não volátil) para as funções mencionadas nos outros pontos;
- Análise completa de medidas gráficas de amplitudes de corrente de fase e residual locais e remotas, tensões de fase e fase-neutro, tensão de sincronização, potência ativa e reativa, energia ativa e reativa, fator potência, correntes de sequência (+), (-) e (0), tensões de sequência (+), (-) e (0), frequência e armazenamento de eventos;
- Sincronização horária;
- Devem existir os recursos para comunicação, que deverão suportar parametrização e inter-rogação de forma local e remota através de software;
- Deve existir um sistema de comunicação direta via fibra ótica entre equipamentos para comparação de sinais de corrente.

Transformadores Estas unidades de proteção multifunção do transformador, do tipo numérico de última geração, localizar-se-ão no armário de proteção do transformador. Seguidamente segue uma lista de funções mínimas que o equipamento de proteção deverá possuir:

- Proteção com desenho específico para transformadores;
- Proteção diferencial de transformador;
- Proteção de sobretensão de fases e residual para os enrolamentos;
- Proteção de falhas do disjuntor;
- Proteção de máximo e mínimo de tensão;
- Proteção térmica da máquina;
- Relé de intensidade para equilíbrio ou inversão de fases;
- Não requer transformadores de corrente de interposição;

- Sincronização horária;
- Capacidade de armazenamento de acontecimentos na memória não volátil;
- Capacidade de armazenamento de osciloperturbografia na memória volátil;
- Facilidade de comunicação remota;
- Lógica programável flexível;
- Elementos de programação para automação e relatórios de acontecimentos sequenciais(na memória não volátil) para as funções mencionadas nos outros pontos;
- Análise gráfica completa das medidas amplitudes de corrente de operação e restrição de função diferencial e diferencial restrita, corrente de fase e residual para todos os enrolamentos, tensão fase-fase e fase-neutro, fator potência, correntes de sequência (+), (-) e (0), tensões de sequência (+),(-) e (0), frequência e armazenamento de eventos;
- Devem ter meios de comunicação, deverá suportar parametrização e interrogação de forma local e remota através de software;
- As unidades devem ter sinais de entrada opto-acopladas e contactos de saída tipo relé para disparos.

Blocos de Ensaio de Proteção

Por norma existem três blocos para ensaios de proteção, sendo eles:

- Blocos de ensaio de correntes;
- Blocos de ensaio de tensões;
- Blocos de ensaio para bloqueio de sinais de arranque e disparos.

4.2.5.4 Unidade de Controlo de Pannel-UCP

O controlo local(UCP) que será executado pela proteção principal será constituído, em geral pelos seguintes módulos:

- Controlador;
- Interface de comunicação com capacidade para redes com o sistema SCADA;
- Interface de entradas digitais de sinalização e estado;
- Interface de entradas analógicas;
- Interface de saída de comandos;
- Fontes de alimentação.

Estes módulos estarão interligados através de barramentos.

4.2.5.5 Unidade de Controlo Centralizada- UCC/RTU

O fornecedor deverá fornecer este sistema com o objetivo de supervisão remota do sistema de potência da subestação, a partir do centro de controlo centralizado. Este poderá ser a RTU ou um equipamento concentrador de dados. O fornecedor deverá indicar de forma clara na sua oferta, referindo as características que cumpre de acordo com a arquitetura, quais as características que não cumprem e quais se aplicam ao equipamento proposto:

- Capacidade de processamento de linguagens de alto nível;
- A configuração da UCC/RTU deverá consistir numa unidade central de processamento, uma dupla fonte de alimentação e um processador de comunicações;
- A substituição de módulos ou componentes deve ser feita sem necessidade de reprogramação, redefinição de configuração ou religação. A fonte de potência deverá operar a partir da fonte de alimentação contínua da subestação;
- Prevenir danos na lógica interna do UCC/RTU causados através do dano de componentes da fonte de potência;
- Prevenir instabilidade na lógica interna da UCC/RTU que produzam falhas na operação, causadas por flutuação de tensão;
- A UCC/RTU deve ser capaz de reter o estado de toda a informação durante uma falha de alimentação elétrica;
- A UCC/RTU deve ter a capacidade de inicialização e arranque automático depois da restauração do fornecimento de potência sem a necessidade de intervenção manual do sistema SCADA;
- Restauração do fornecimento de potência sem a necessidade de intervenção manual do sistema SCADA;
- Cada UCC/RTU deve ter uma tensão de operação que suporte $\pm 20\%$ de variação de tensão de forma contínua, sem que a sua vida útil e parâmetros sejam afetados;
- A UCC/RTU projetada deverá ter capacidade de comunicação entre equipamentos. Esta comunicação será feita através de fibra ótica.

4.2.6 Armários

O fornecedor deverá fornecer armários metálicos completos e elementos menos, tal como relés auxiliares, disjuntores magnetotérmicos, montagem de equipamento principal, fios para todos os elementos e ensaios. Os equipamentos principais serão montados na placa frontal metálica. A marca e modelos do equipamento também deverão ser detalhados. Equipamentos e acessórios menores deverão ser fornecidos e montados pelo fabricante. Os armários deverão ser entregues completamente montados, com todos os cabos, testados e prontos para instalação.

4.2.7 Requerimentos e Proteção Interna

Deverão possuir:

- Réguas de terminais;
- Disjuntores automáticos;
- Relés auxiliares: cada relé deverá vir equipado com 4 contactos, independentes uns dos outros dos quais teremos de ter em conta a tensão nominal, variação de tensão de operação dos contactos, capacidade da bobina, capacidade de contactos e tensão máxima de contactos;
- Barramentos de Terra: Os armários devem ter um barramento de terra na parte inferior. A este barramento ligar-se-á a blindagem dos cabos de sinal, a caixa de equipamento e a estrutura do armário, isto é, uma terra comum para todo o armário.

4.2.8 Ensaaios de Proteção

Os ensaios deverão ser realizados na fábrica e serem documentadas para informar o cliente. O cliente poderá recorrer a um inspetor, que poderá assistir ao ensaios na fábrica. Para a realização dos ensaios, o fabricante deverá informar o cliente quando ocorrerão os ensaios com uma antecedência de 3 semanas da data.

4.2.8.1 Ensaaios de Rotina

Todos os equipamentos integrados nos armários definitivos, deverão ser submetidos a testes individuais de receção de fábrica, de acordo com as especificações e com as recomendações das normas de fabrico do equipamento.

4.2.8.2 Ensaaios Funcionais

O sistema de proteções e registo de defeitos, já integrados no seu armário definitivo, deverão ser submetidos, na fábrica, a testes funcionais para verificar se os sistemas estão a cumprir as funções para os quais foram feitos e a operar dentro dos valores aceites.

4.2.9 Protocolos dos Ensaaios

Para cada teste realizado na fábrica, deverá ser realizado um relatório ou protocolo, que contenha a seguinte informação:

- Identificação do equipamento sujeito ao ensaio;
- Descrição da prova;
- Resultados obtidos, incluindo uma descrição dos defeitos ocorridos;

- Descrição das intervenções, correções, modificações e reparações efetuadas nos equipamentos;
- Uma declaração de que o equipamento sujeito aos ensaios cumpre os requerimentos necessários.

4.2.9.1 Ensaios no Terreno

O fornecedor deverá considerar os especialistas necessários para o aconselhamento e implementação do sistema de controlo, proteção e sistema de medição. Essas funções serão executadas no terreno. O fornecedor será o responsável por preparar e concluir os protocolos.

4.3 Aplicação a uma Subestação de Produção Eólica

A central eólica Huambos possui 7 aerogeradores de 2.625MW (potência instalada total de 18.375 MW), ligar-se-à ao SEIN através do corte da linha de transmissão de 138kV de Espina Colorado - Cutervo, onde será instalada uma subestação com capacidade de transformação de 40/40/9 MVA através de um transformador elevador, de 138/34.5/22.5kV e regulação automática de tensão do lado de 34.5kV. Do lado dos 34.5kV teremos uma configuração de barramento simples. A ligação entre os aerogeradores é feita através de cabos de alumínio XLPE de $95mm^2$, $150mm^2$, $240mm^2$ e $500mm^2$. Assim, os 7 aerogeradores estão agrupados na cela de 34.5kV que liga à subestação Duna Huambos(nova). Nos anexos estará um plano do sistemas de proteções desta mesma subestação.

Capítulo 5

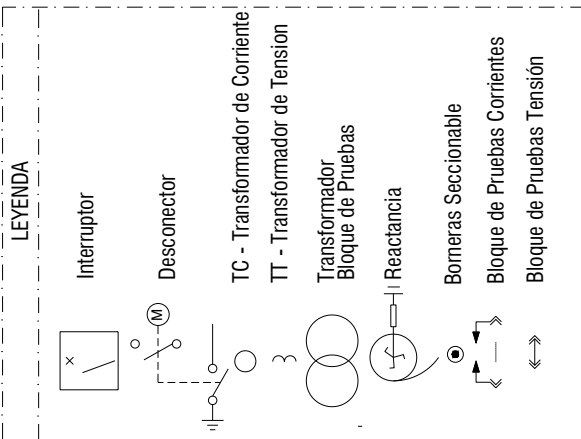
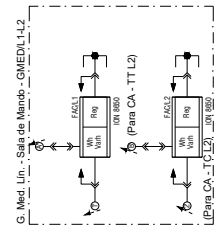
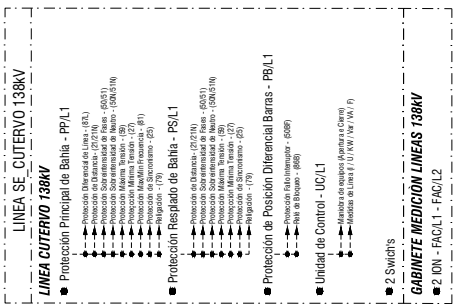
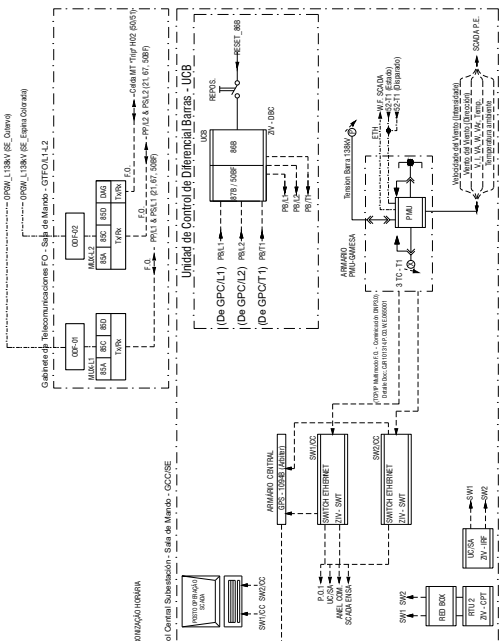
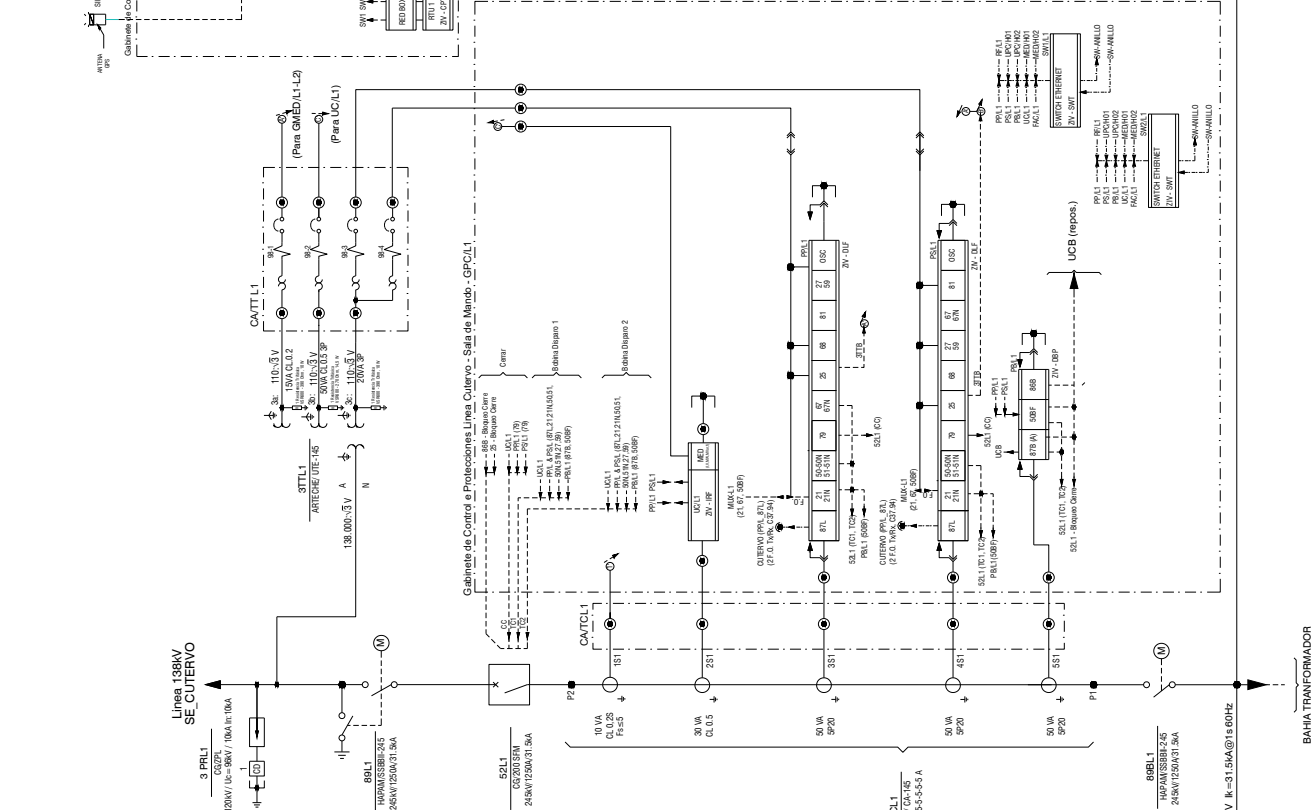
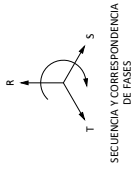
Conclusões e Trabalho Futuro

Fazer um guia de proteções não seria uma tarefa fácil, nem seria possível num espaço tão curto de tempo. O que se apresenta aqui é um guia simples que aborda o tema de forma generalizada. Poderia ter feito os cálculos e uma escolha mais aprofundada das proteções, mas para trabalho futuro seria mais fácil fazer um guia para determinados tipos de proteções, dado que existe uma grande variedade das mesmas. Assim sendo, tive de mudar um pouco os objetivos durante a tese, não só pela enormidade do tema, mas também pela impossibilidade de o estudar melhor devido à ocorrência do COVID-19. Posto isto, sinto que é um trabalho a ser continuado no futuro, mas de uma maneira mais metódica, criando talvez uma série de guias para cada tipo de proteção e um guia, como este, servindo apenas como base introdutória para se ter uma ideia de como funcionam as subestações, os problemas que poderão ocorrer nelas e que tipo de proteção poderemos usar.

5.1 Satisfação dos Objetivos

Sinto que cumpri o objetivo de tornar isto um guia para iniciados. As coisas estão de forma simples, resumida como era a única maneira possível devido ao contexto atual e temporal. É uma tarefa que poderá ser concluída em anos. Mas o que pretendia era criar um guia de escolha e aplicação de proteções, pelo qual consegui uma aproximação.

Anexo A



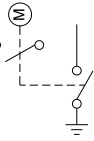
CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL DISEÑO

SISTEMA 138 kV	138 kV	TENSIÓN DE SERVICIO	138 kV	TENSIÓN MÁS ELEVADA PARA EL MATERIAL	145 kV
	650 kV	NIVEL BÁSICO DE IMPULSO (T ₁ , PR)	650 kV	NIVEL BÁSICO DE IMPULSO (T ₂ , PR)	1050 kV
	750 kV	NIVEL BÁSICO DE IMPULSO (52, 89) (LÍNEA)	750 kV	NIVEL BÁSICO DE IMPULSO (52, 89) (TRAFO)	1050 kV
	60 Hz	FRECUENCIA	60 Hz		
	RÍGIDO A TIERRA	RÉGIMEN DE NEUTRO	RÍGIDO A TIERRA		
	31.5 kA	INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO NOMINAL	31.5 kA		
	110 Vcc; 380 Vca	TENSIÓN DE CIRCUITOS AUXILIARES	110 Vcc; 380 Vca		
	0.5 s	DURACIÓN DE CORTOCIRCUITO	0.5 s		
SISTEMA 34.5 kV	34.5 kV	TENSIÓN DE SERVICIO	34.5 kV	TENSIÓN MÁS ELEVADA PARA EL MATERIAL	38 kV
	250kV	NIVEL BÁSICO DE IMPULSO	250kV		
	60 Hz	FRECUENCIA	60 Hz		
	P.A.T. A TRAVÉS DE REACTANCIA	RÉGIMEN DE NEUTRO	P.A.T. A TRAVÉS DE REACTANCIA		
	25kA	INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO NOMINAL	25kA		
	110 Vcc; 380Vca	TENSIÓN DE CIRCUITOS AUXILIARES	110 Vcc; 380Vca		

LEYENDA



Interruptor



Desconector

TC - Transformador de Corriente

TT - Transformador de Tension

Transformador
Bloque de Pruebas



Reactancia

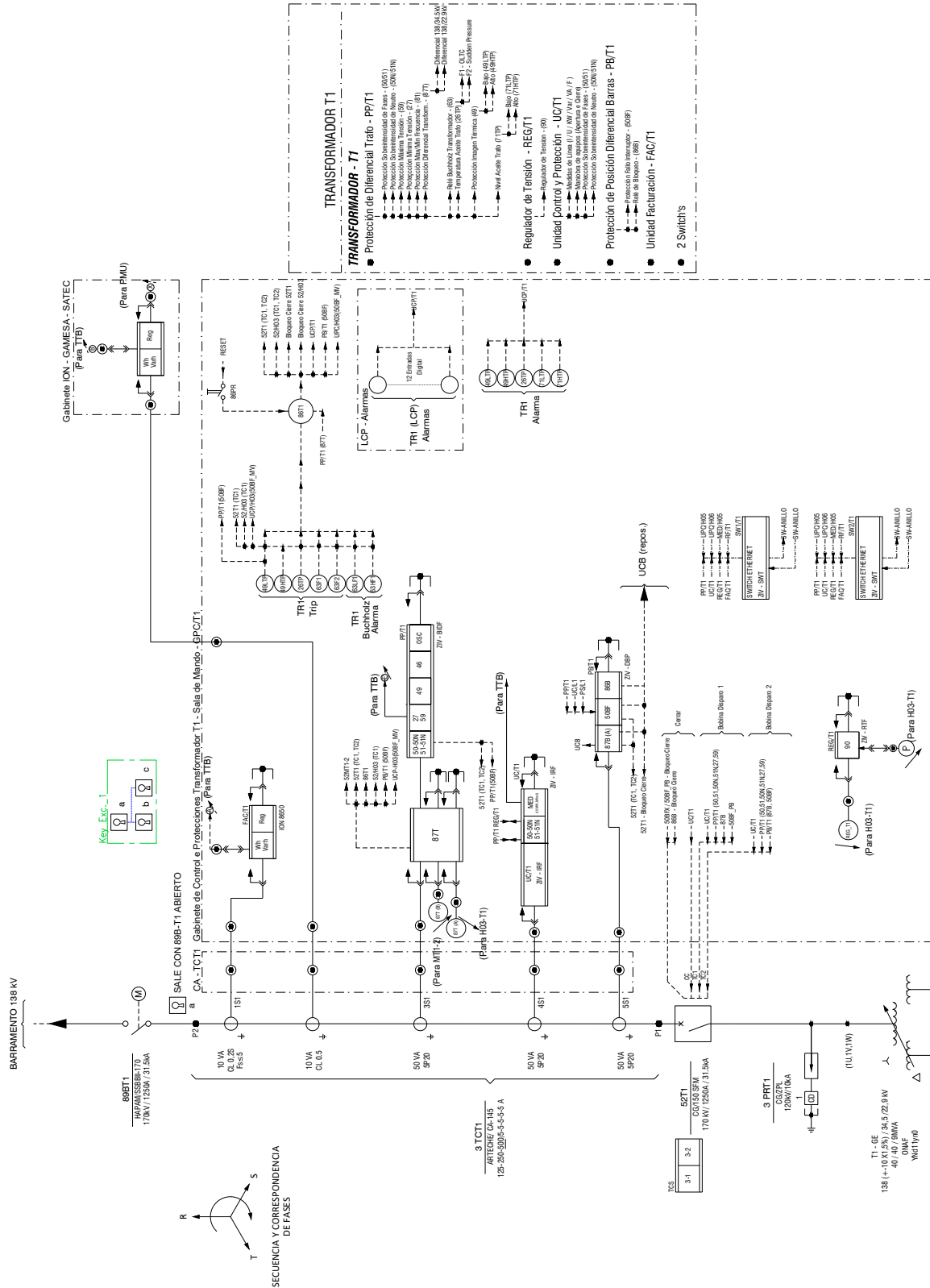
Bornas Seccionable

Bloque de Pruebas Corrientes

Bloque de Pruebas Tension

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL DISEÑO

SISTEMA 138 kV	138 kV
TENSION MAS ELEVADA PARA EL MATERIAL	145 kV
NIVEL BASICO DE IMPULSO (TC, TT, PR)	650 kV
NIVEL BASICO DE IMPULSO (52, 89) (LINEA)	1050 kV
NIVEL BASICO DE IMPULSO (52, 89) (TRAFO)	750 kV
FRECUENCIA	60 Hz
REGIMEN DE NEUTRO	RIGIDO A TIERRA
INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO NOMINAL	31.5 kA
TENSION DE CIRCUITOS AUXILIARES	110 Vcc; 380 Vca
DURACION DE CORTOCIRCUITO	0.5 s
SISTEMA 34.5 kV	34.5 kV
TENSION MAS ELEVADA PARA EL MATERIAL	38 kV
NIVEL BASICO DE IMPULSO	250kV
FRECUENCIA	60 Hz
REGIMEN DE NEUTRO	P.A.T. ATRAVÉS DE REACTANCIA
INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO NOMINAL	25kA
TENSION DE CIRCUITOS AUXILIARES	110 Vcc; 380Vca



Greenery

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

Proyecto

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

Proyecto

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

Proyecto

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

Proyecto

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

Proyecto

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

Proyecto

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

Proyecto

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

Proyecto

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

Proyecto

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

Proyecto

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

Proyecto

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

Proyecto

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

Proyecto

SEIEMAS S.A.

P.E. DUMA & HIAWES (86.75 MW)

CHOTA, CAMARCA, PERU

PROYECTO DE DETALLE

Trabajo

LEYENDA

Interruptor

Desconector

TC - Transformador de Corriente

TT - Transformador de Tension

Transformador
Bloque de Pruebas

Reactancia

Bomeras Seccionable

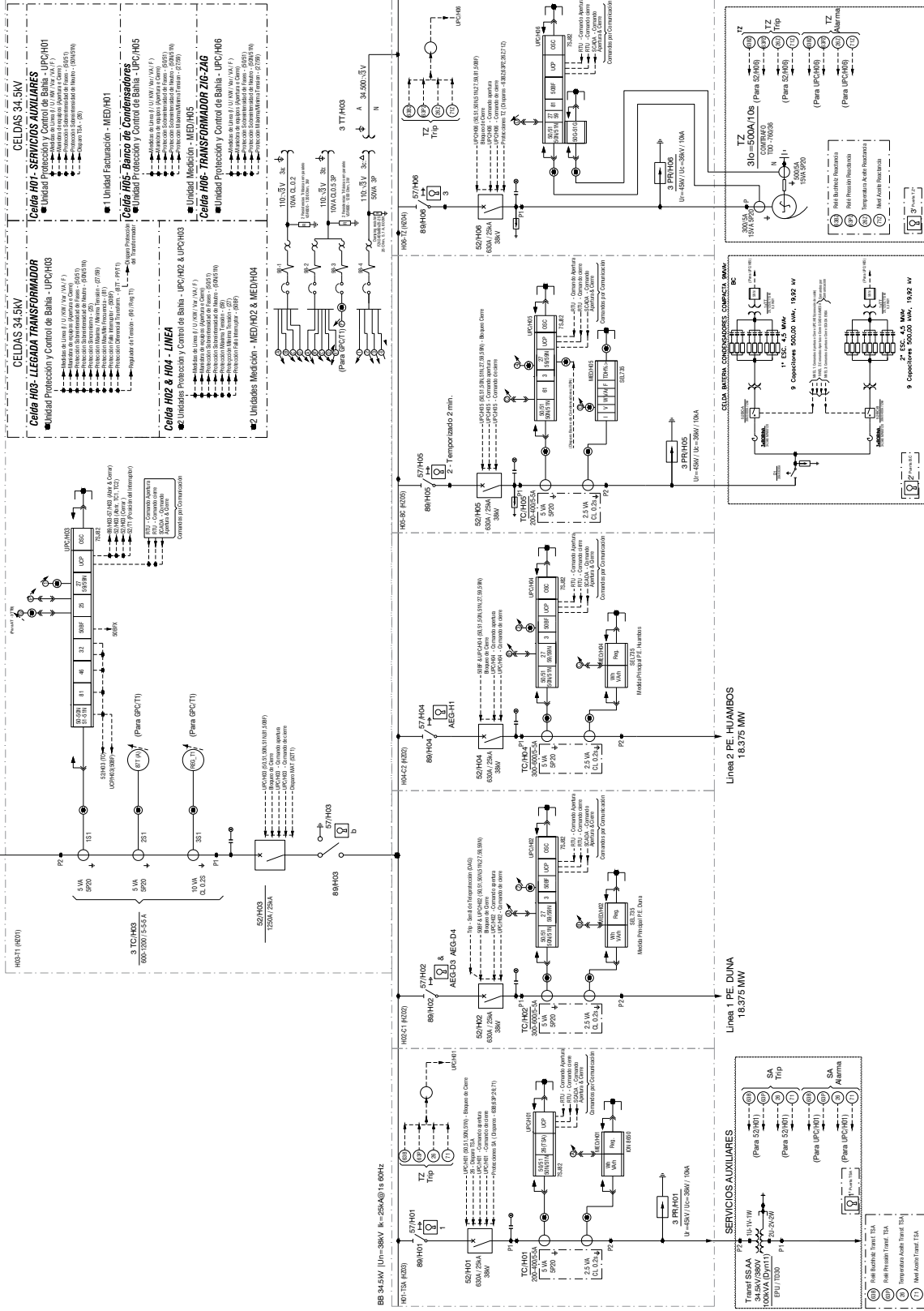
Bloque de Pruebas Corrientes

Bloque de Pruebas Tension

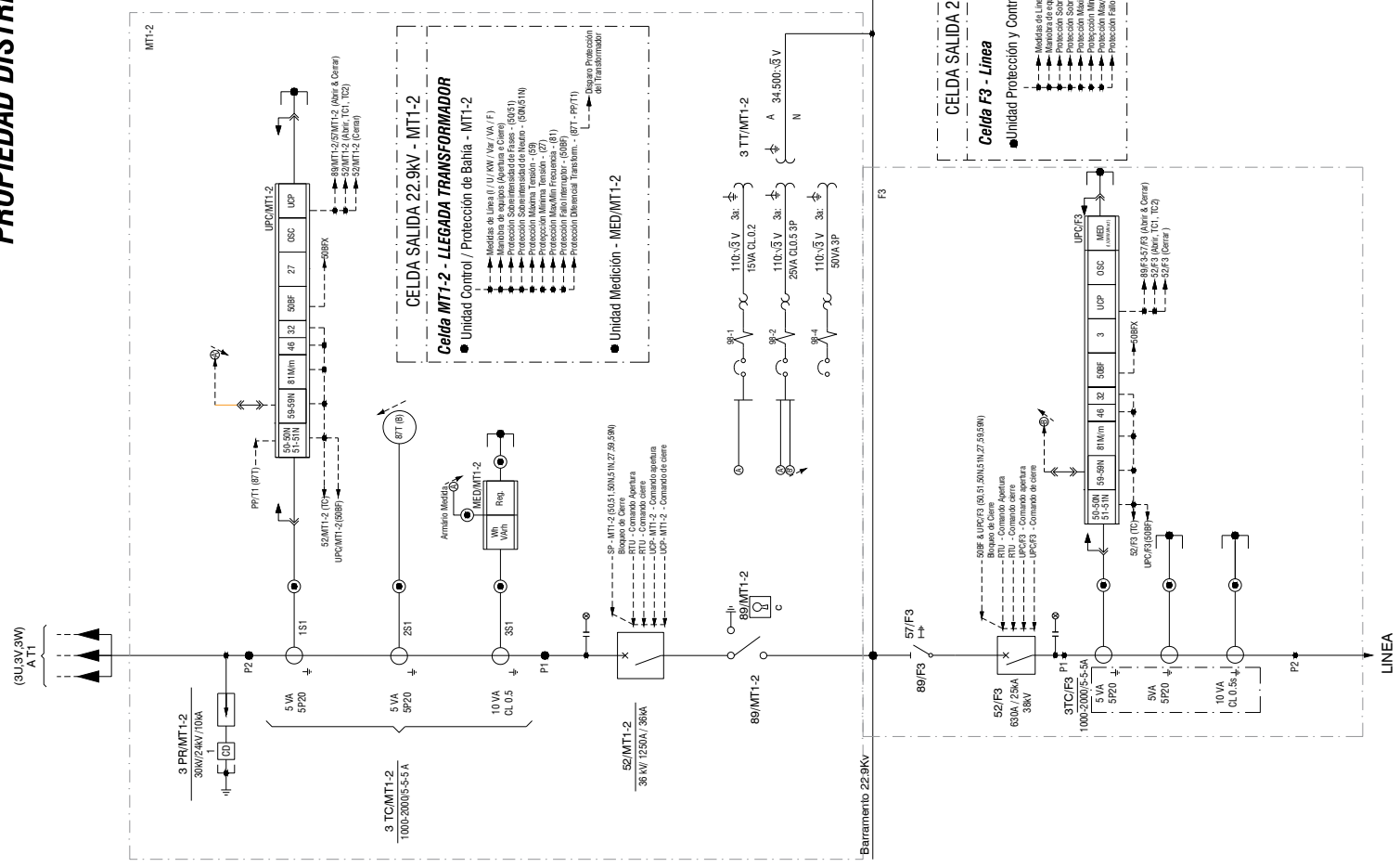
CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL DISEÑO

SISTEMA 138 kV	138 kV
TENSION DE SERVICIO	145 kV
TENSION MAS ELEVADA PARA EL MATERIAL	650 kV
NIVEL BASICO DE IMPULSO (TC, TT, PR)	1050 kV
NIVEL BASICO DE IMPULSO (52, 89) (LINEA)	750 kV
NIVEL BASICO DE IMPULSO (52, 89) (TRAFO)	60 Hz
FRECUENCIA	RGIDO A TIERRA
REGIMEN DE NEUTRO	31.5 kA
TENSION DE CORTOCIRCUITO NOMINAL	110 Vcc; 380 Vca
DURACION DE CORTOCIRCUITO	0.5 s
SISTEMA 34.5 kV	34.5 kV
TENSION DE SERVICIO	38 kV
TENSION MAS ELEVADA PARA EL MATERIAL	250kV
NIVEL BASICO DE IMPULSO	60 Hz
FRECUENCIA	P.A.T. ATRAVÉS DE REACTANCIA
REGIMEN DE NEUTRO	25kA
TENSION DE CORTOCIRCUITO NOMINAL	110 Vcc; 380Vca
DURACION DE CORTOCIRCUITO	

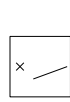
Celdas - SIEMENS - INPLUS C V2.0



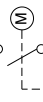
PROPIEDAD DISTRIBUIDORA



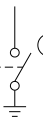
LEYENDA



Interruptor



Desconector



TC - Transformador de Corriente.



TT - Transformador de Tension



Transformador Bloque de Pruebas



Reactancia



Borneras Seccionable



Bloque de Pruebas Corrientes



Bloque de Pruebas Tensión

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL DISEÑO

SISTEMA 138 kV	138 kV
TENSIÓN DE SERVICIO	145 kV
TENSIÓN MÁS ELEVADA PARA EL MATERIAL	650 kV
NIVEL BÁSICO DE IMPULSO (1 C, 2 PR)	1050 kV
NIVEL BÁSICO DE IMPULSO (52, 89) (LINEA)	750 kV
NIVEL BÁSICO DE IMPULSO (52, 89) (TRAFO)	60 Hz
FRECUENCIA	RÍGIDO A TIERRA
REGÍMEN DE NEUTRO	31.5 kA
TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO NOMINAL	110 V/ 380 Vca
TENSIÓN DE CIRCUITOS AUXILIARES	0.5 s
DURACION DE CORTOCIRCUITO	
SISTEMA 34.5 kV	34.5 kV
TENSIÓN DE SERVICIO	38 kV
TENSIÓN MÁS ELEVADA PARA EL MATERIAL	250 kV
NIVEL BÁSICO DE IMPULSO	60 Hz
FRECUENCIA	25kA
REGÍMEN DE NEUTRO	P.T. ATRAVÉS DE REACTANCIA
TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO NOMINAL	110 V/ 380Vca
TENSIÓN DE CIRCUITOS AUXILIARES	

[illegible]

Referências

- [1] Substations.
- [2] Reference for ABB GIS - Ardnacrusha GIS substation in Ireland - Gas-insulated switchgear. <https://new.abb.com/high-voltage/gis/reference-ardnacrusha-gis-substation-in-ireland>.
- [3] AIS substations | ABB. <https://new.abb.com/substations/ais-substations>.
- [4] Hybrid substations | ABB. <https://new.abb.com/substations/hybrid-substations>.
- [5] Current transformer. *Wikipedia*, Março 2020. Page Version ID: 944672552.
- [6] Transformadores de potência das subestações elétricas, Julho 2017.
- [7] Substation Disconnectors. <https://insulect.com/products/substation-disconnectors>.
- [8] Electrical Substation Components List - Diagram, Working & Functions, Dezembro 2018.
- [9] Disconnecting Circuit Breaker (DCB) 72.5 - 550 kV - Air-insulated switchgear | ABB. <https://new.abb.com/high-voltage/AIS/dcb>.
- [10] Média Tensão - Descarregadores sobretensões até 60kV. <http://www.iso-sigma.pt/media-tensao/descarregadores-sobretensoes-ate-60kv>.
- [11] Bancos de condensadores e filtros em estrutura | Artech. <https://www.artech.com/pt/produtos/bancos-de-condensadores-e-filtros-em-estrutura>.
- [12] (a) 150kV post SIR insulator installed at Linoperamata Substation (b)... | Download Scientific Diagram. https://www.researchgate.net/figure/a-150kV-post-SIR-insulator-installed-at-Linoperamata-Substation-b-Leakage-current_fig1_231179698.
- [13] John D. McDonald. *Electric Power Substations Engineering*. 3ª edição edição, 2012.
- [14] Electrical Substation Bus Schemes Explained. <https://testguy.net/content/256-electrical-substation-bus-schemes-explained>.
- [15] admin. What is a Lock Out Relay / Master Trip Relay?, Maio 2018.
- [16] Buchholz Relay – Working Principle, Construction and Operation. <https://www.electricalclassroom.com/buchholz-relay-buchholz-relay-principle-html/>.
- [17] EMB. Bedienungsanleitung Transformatoren-Schutzrelais (Buchholzprinzip).
- [18] Jorge Pedro Lourenço Gonçalves. *Estudo Do Projeto Elétrico de Uma Subestação Elevadora*. Tese de doutoramento, Universidade do Porto.

- [19] Fernando Maciel Barbosa. Sobretensões de Manobra, Outubro 2015.
- [20] EEP-Electrical Engineering Portal. Gas-Insulated Substations - GIS, Novembro 2010.
- [21] Manuel Delgado. *Sistemas Eléctricos Trifásicos- A Média, Alta e Muito Alta Tensão*. Publindústria, Outubro 2010.
- [22] Thiago de Carvalho Batista, Benedito Antonio, e Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda. Current transformer with nanocrystalline alloy core for measurement. Em *2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, páginas 1–4, Hangzhou, China, Maio 2011. IEEE. doi:10.1109/IMTC.2011.5944192.
- [23] Ricardo Brás. *Papel Do Enrolamento Terciário No Diagnóstico de Avarias Nos Enrolamentos de Transformadores Trifásicos*. Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra, Setembro 2013.
- [24] Kevin Riley Pe. Transformer@CDoooblilengEnBgainseicesring Company. página 31.
- [25] Different Types of Circuit Breakers and Its Applications. <https://www.elprocus.com/types-of-circuit-breakers-and-its-application/>, Outubro 2016.
- [26] Vacuum Circuit Breaker Construction, Working And Its Applicatons. <https://www.elprocus.com/vacuum-circuit-breaker-working-applications/>, Maio 2017.
- [27] Hans-Erik Olovsson, Carl Ejnar Sölver, e Richard Thomas. Disconnecting Circuit Breaker (DCB).
- [28] Surge Arresters: Fundamentals of surge arresters. <https://www.eaton.com/us/en-us/products/medium-voltage-power-distribution-control-systems/lightning-arresters/surge-arresters-fundamentals-of-surge-arresters.html>.
- [29] Nas subestações. <https://paginas.fe.up.pt/~ee97153/Isol22.htm>.
- [30] José Rui Ferreira. Sistemas de Protecção.
- [31] Manuel Delgado. *Protecção Das Redes Eléctricas de Distribuição, Transporte e Interligação-Fundamentos e Aplicações Práticas*. Publindústria, 2011.
- [32] Hélder Leite. Introdução aos Sistemas de Protecção, Outubro 2018.
- [33] Main and Transfer Busbar Arrangement | Electricalunits.com. <http://www.electricalunits.com/main-and-transfer-busbar-arrangement/>.
- [34] Impacts of Substations.
- [35] INTS, ICTS, ISTS, DNT. SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO AT/MT- Sistemas de Protecção, Comando e Controlo Numérico (SPCC). Funções de protecção, 2013.
- [36] João Tiago Veríssimo Ferreira. *Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Média e Baixa Tensão – Estágio Na Helenos, S.A*. Tese de doutoramento.
- [37] Line Distance Protection - Substation Automation Protection and Control (Substation Automation Products) | ABB. <https://new.abb.com/substation-automation/products/protection-control/line-distance-protection>.

- [38] Electrical4U. Distance Relay or Impedance Relay Working Principle Types | Electrical4U. <https://www.electrical4u.com/distance-relay-or-impedance-relay-working-principle-types/>.
- [39] REL670 - Line Distance Protection (Substation Automation Protection and Control) | ABB. <https://new.abb.com/substation-automation/products/protection-control/line-distance-protection/rel670>.
- [40] Line Differential Protection - Substation Automation Protection and Control (Substation Automation Products) | ABB. <https://new.abb.com/substation-automation/products/protection-control/line-differential-protection>.
- [41] Electrical4U. Overvoltage Protection | Electrical4U. <https://www.electrical4u.com/overvoltage-protection/>.
- [42] ABB. Breaker Failure Relay.
- [43] ABB. Technical guide Protection criteria for medium voltage networks.
- [44] Fundamentals of Electricity. <https://c03.apogee.net/mvc/home/hes/land/el?utilityname=screc&spc=foe&id=4>
- [45] CJR. SUBESTACIÓN DUNA & HUAMBOS Especificación técnica Sistema de Control, Protecciones, Medida, Facturación y SCADA.