



**Instituto Politécnico de Tomar**

**Escola Superior de Tecnologia de Tomar**

**Miguel Ângelo Semedo Folgado**

# **Subestações de Tração e Postos de Catenária- Engenharia**

Relatório de Estágio na REFER EPE

Orientado por:

Professor Doutor Mário Helder Rodrigues Gomes

IPT

Engenheiro José Manuel Sargento Campaniço

REFER EPE

Júri

Presidente Professor Doutor Paulo Manuel Machado Coelho-IPT

Arguente Professor Doutor Carlos Alberto Farinha Ferreira-IPT

Orientador Professor Doutor Mário Helder Rodrigues Gomes-IPT

Relatório de Estágio

apresentado ao Instituto Politécnico de Tomar para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Controlo e Electrónica Industrial







## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, António e Lucilia, aos quais devo a dádiva da vida, e em grande parte aquilo que hoje sou.

À minha esposa Maria Madalena, pelo estímulo manifestado, nos momentos mais difíceis.

À minha filha Maria Margarida à qual não pude dispensar toda a atenção, amor e carinho que lhe era merecido.



## RESUMO

O presente relatório faz parte integrante do estágio curricular do Mestrado em Controlo e Electrónica industrial efetuado na REFER EPE, que teve como objetivo a descrição dos conhecimentos básicos de energia de tração, e dos trabalhos realizados dentro do mesmo tema. Neste documento são abordados diversos temas, como a caracterização técnica dos sistemas de tração, nomeadamente os como sistemas de alimentação de tração elétrica e a sua exploração, subestações de tensão alternada e subestações de tensão contínua e ainda postos de catenária, bem como a descrição da aparelhagem dos mesmos. Dentro do tema de subestação de corrente alternada são abordadas as proteções próprias dos transformadores, os curto-circuitos entre duas subestações, e a metodologia de cálculo de proteções de distância. No tema das subestações de corrente-contínua, é abordada a metodologia de cálculo de curto-circuitos na catenária (lado DC), e o respetivo estudo do dispositivo de proteção o detetor de defeito de linha e o teste associado, o ensaio de linha que permite ou não a reposição de tensão na catenária. Dentro deste trabalho é ainda abordado o tema do circuito de retorno da corrente de tração, terras e proteções. Estão ainda descritos dois acompanhamentos de trabalhos efetuados no terreno, nomeadamente um ensaio de relés de proteção e religação automática de disjuntor e uma montagem de uma caixa de comando elétrico de um seccionador. Por ultimo, neste trabalho é apresentado um estudo técnico-económico com vista à melhoria da eficiência energética na iluminação exterior das subestações de tração com o objetivo da redução de consumos explorando uma tecnologia inovadora pouco divulgada e bastante promissora no mercado da iluminação, o LEP. Este estágio teve para além dos objetivos mencionados anteriormente a integração no mundo do trabalho.

**Palavras-chave:** Sistemas elétricos de tração, Subestação de tração, Bifásica, DDL, CO<sub>2</sub>, LEP.



## ABSTRACT

This report is a result of the trainee program at REFER EPE as part of the curricula for Master in Control and Industrial Electronics, and it is aimed at describing traction power systems, and the activities developed within the same area of expertise. In this report several aspects are covered, such as the technical characterization of traction systems, including electric power feeding systems and their operation, AC voltage and DC voltage substations and sectioning posts, as well as the description of electrical apparatus. For AC traction substations the issues addressed are: transformer electrical protections, short circuits between different substations and electrical distance protection methodologies. For DC traction substations are addressed: overhead contact line short circuit calculation and protection devices for line fault detection and line test, which will determine whether catenary can be reenergized after a short circuit. In this report are also addressed the traction current return system, earthing and bonding. During the trainee program several field tests and maintenance activities were attended. A detailed description of two types of activities is included in this report: tests for electrical relay and circuit-breaker automatic reconnection; installation of a disconnecter electric operation mechanism. Finally a technical and economic study was developed aiming at energy efficiency of outdoor lighting in traction substations with the objective of reducing electric consumption by using LEP (Light Emitting Plasma). This technology is innovative and promising in the lighting market but it is not yet well known. Besides the objectives mentioned earlier, this trainee program had also as objective the integration into the working environment

**Keywords:** Electric traction systems, Traction Substation, Double-phase, DDL, CO<sub>2</sub>, LEP.



## **AGRADECIMENTOS**

À D<sup>ra</sup> Rita Valentim do Capital Humano da REFER EPE e ao Engenheiro Sérgio Pissarra dos Santos da Catenária e Energia de Tração, que me deram a oportunidade de realizar este estágio, que em muito contribuiu para o meu crescimento académico e profissional.

Ao meu Orientador Científico Professor Doutor Mário Gomes, do Instituto Politécnico de Tomar, o meu obrigado pela sua disponibilidade e apoio prestado ao longo deste estágio, pelas sugestões e indicações nas tomadas de decisão bem como as correções e o fornecimento de informação fundamental na elaboração deste relatório. Acima de tudo, obrigado por continuar a acompanhar-me nesta jornada tal como na anterior e por estimular o meu interesse pelo conhecimento pelos sistemas elétricos de potência.

Quero agradecer de forma muito especial ao meu Orientador da REFER EPE, Engenheiro José Campaniço, pelo plano de estágio cujos temas que tanto me interessaram e entusiasmaram. O seu conhecimento, domínio e competência nas áreas do meu estágio ajudaram-me imenso. Agradeço, acima de tudo, todo o apoio que me prestou, a sua total disponibilidade, acolhimento e empenho na orientação do meu estágio, bem como a bibliografia e os documentos fundamentais que me disponibilizou para a elaboração deste trabalho.

Ao Engenheiro Marco Santos e ao Engenheiro Filipe Peixinho, pela disponibilidade sempre demonstrada, pela abertura e troca de ideias e as conversas sobre energia de tração e pela colaboração e esclarecimento de algumas dúvidas em alguns pontos deste relatório, nomeadamente em Matlab.

Ao Especialista de Energia de Tração Nelson Sousa e ao Especialista de Energia de Tração Pedro Almeida, com quem passei algum tempo no acompanhamento de trabalhos em subestações e postos de catenária, pelos esclarecimentos dos procedimentos efetuados nos trabalhos.

Ao Engenheiro Jorge Graça por me ter proporcionado o acompanhamento de trabalhos de catenária, e algum auxílio em Autocad. Ao Especialista de Catenária Joaquim Pina pela

sua elevada disponibilidade no acompanhamento e esclarecimento nos trabalhos de catenária que assisti.

A todos os colaboradores da REFER EPE que de alguma forma contribuíram para a realização, sucesso, e aprendizagem neste estágio.

A todos os docentes do MCEI, em geral, com quem tive o prazer de conviver e trabalhar, fazendo votos para que os laços de amizade perdurem ao longo do tempo.

Não posso deixar também de agradecer ao Professor José Filipe Correia Fernandes do IPT, cujos temas abordados na disciplina de máquinas elétricas bastante me ajudaram nas matérias estudadas neste estágio.

Agradeço aos meus amigos e colegas do IPT, nomeadamente ao Alexandre Pimenta, pela troca de ideias e à Roberta Oliveira pelos momentos de descontração e boa disposição que ambos me proporcionaram durante todo o curso e nomeadamente neste estágio.

A minha Família, pela inspiração, apoio e motivação, especialmente aos meus pais António e Lucília e à minha esposa Maria, pela preocupação com o meu trabalho e que de maneiras diferentes contribuíram em tudo para o sucesso deste trabalho.

A Todos um Muito Obrigado!

# ÍNDICE

DEDICATÓRIA.....	iii
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vii
AGRADECIMENTOS .....	ix
ÍNDICE.....	xi
Lista de Abreviaturas.....	xv
Glossário.....	xvi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xx
ÍNDICE DE TABELAS .....	xxiv
1 Introdução.....	1
1.1 Âmbito técnico e objetivos .....	2
1.2 Acompanhamento de trabalhos.....	2
1.3 Desenvolvimento de trabalhos.....	2
2 Caracterização Técnica dos Sistemas de Tração.....	5
2.1 Sistemas de Alimentação para Tração Elétrica.....	5
2.1.1 Sistema de alimentação 1500 V DC.....	6
2.1.2 Sistema de alimentação a 25 kV/50Hz AC .....	9
2.1.3 Sistema com alimentação bifásica.....	10
2.1.4 Sistema de alimentação trifásica ou em “V” .....	11
2.1.5 Sistema de alimentação 2× 25 kV/50Hz .....	12
2.1.6 Desfasamentos e diferenças de potencial entre setores de catenária.....	14
2.1.7 Exploração da rede de tração.....	18
2.2 Subestações de tensão alternada .....	20
2.2.1 Esquemas unifilares de subestações .....	20
2.2.2 Módulo GIS .....	25
2.2.3 Proteções, aparelhagem de corte e seccionamento e medidas.....	26
2.2.3.1 Seccionadores .....	27
2.2.3.2 Disjuntores e interruptores.....	28
2.2.3.3 Transformador de corrente ou intensidade .....	29
2.2.3.4 Transformadores de tensão .....	33
2.2.3.5 Tipos de proteções .....	37
2.2.3.6 Proteções próprias dos transformadores .....	45
2.2.4 Encravamentos.....	50

2.2.4.1	Tipos de encravamentos .....	51
2.2.4.2	Exemplo de condicionamento de encravamentos.....	54
2.2.5	Modos de exploração de subestações de tensão alternada .....	55
2.2.5.1	Ligação Bifásica .....	55
2.2.5.2	Ligação trifásica em “V” .....	56
2.3	Subestações de corrente-contínua.....	57
2.3.1	Caracterização .....	57
2.3.2	Esquema unifilar e caracterização da topologia e funcionamento .....	61
2.3.3	Proteções tipo em Subestações de Tração DC .....	65
2.3.3.1	Proteção de corrente alternada das Subestações de Tração DC .....	66
2.3.3.2	Proteção de corrente contínua das Subestações de Tração DC .....	66
2.3.3.3	Cálculo de correntes de curto-circuito – SST DC .....	72
2.4	Postos de catenária.....	74
2.4.1	Caracterização .....	74
2.4.2	Tipos de postos de catenária.....	75
2.4.3	Aparelhagem dos Postos de Catenária .....	82
2.4.3.1	Aparelhagem interior.....	82
2.4.3.2	Aparelhagem exterior .....	84
2.5	Circuito de Retorno da Corrente de Tração, Terras e Proteções .....	88
2.5.1	Conceção geral .....	88
2.5.2	Ligações e montagens tipo .....	88
2.5.3	Sistemas de retorno existentes na REFER EPE .....	89
2.5.3.1	Sistema Standard .....	89
2.5.3.2	Sistema com condutor de retorno .....	90
2.5.3.3	Sistema Autotransformador.....	91
2.5.4	Ligações transversais LTI e LEAE .....	93
3	Acompanhamento de trabalhos.....	96
3.1	Ensaio de relés de proteção e religação automática de disjuntor .....	96
3.1.1	Introdução.....	96
3.1.2	Descrição e enquadramento do trabalho .....	96
3.2	Montagem de caixa de comando elétrico de seccionador .....	105
3.2.1	Introdução.....	105
3.2.2	Descrição do trabalho.....	105
4	Estudo técnico-económico da iluminação exterior das subestações de tração .....	109
4.1	Introdução .....	109
4.2	Definições .....	109

4.2.1	Luminotecnia .....	109
4.2.2	Fluxo Luminoso.....	110
4.2.3	Intensidade luminosa .....	110
4.2.4	Iluminância .....	112
4.2.5	Luminância .....	114
4.2.6	Rendimento luminoso de uma fonte de luz .....	115
4.2.7	Temperatura da cor.....	116
4.2.8	Reprodução da cor .....	117
4.2.9	Tempo de vida das lâmpadas.....	118
4.2.10	Tipos de lâmpadas iluminação .....	119
4.2.10.1	Tecnologia Light Emitting plasma.....	121
4.2.10.2	Princípio de funcionamento da tecnologia LEP.....	121
4.2.10.3	Constituintes do sistema de iluminação LiFi .....	123
4.3	Caso de estudo de substituição de uma solução HPS existente por tecnologia LEP e luminária eficiente .....	125
4.3.1	Caraterísticas das tecnologias de estudo.....	125
4.3.2	Cenários de iluminação em estudo .....	127
4.3.3	Fundamentos de avaliação económico-financeira.....	130
4.3.3.1	Valor líquido atual do <i>cash-flow</i> .....	130
4.3.3.2	Período de Recuperação do Investimento.....	132
4.3.4	Avaliação económico financeira .....	132
4.3.4.1	Cenário 1 .....	132
4.3.4.2	Cenário 2.....	134
4.3.4.3	Cenário 3.....	135
4.3.4.4	Discussão dos cenários económicos .....	136
4.3.4.5	Discussão técnica luminotécnica .....	138
4.3.4.6	Redução das emissões de dióxido de carbono .....	142
4.3.5	Conclusões gerais sobre o estudo de iluminação da tecnologia LEP .....	143
5	Conclusões .....	145
	Bibliografia.....	149
	Anexos.....	155
	Anexo 1-Modelação matemática da retificação .....	157
	Anexo 2-Cálculo de Correntes de Curto Circuito SST-DC.....	159
	Anexo 3-Esquemas unifilares de acompanhamento de trabalhos .....	161
	Anexo 4-Avaliação técnico económica luminotécnica .....	177



## Lista de Abreviaturas

AC	Alternate current (corrente alternada)
AIS	Air Insulated Switchgear (subestação com Isolamento a Ar)
ANSI	American National Standards Institute
BT	Baixa tensão
CCO	Centro de comando operacional
CEI	Comissão Eletrotécnica Internacional
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
CDTA	Condutor de Terra Aéreo
CDTE	Condutor de Terra enterrado
DC	Direct Current (Corrente contínua)
EN	Norma Europeia (European Norm)
f	Frequência [Hz]
GIS	Gas Insulated Switchgear (Subestação isolada a gás)
HPS	High Pressure Sodium (Lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão)
IPT	Instituto Politécnico de Tomar
LDMOS	Laterally-diffused Metal Oxide Silicon
LEAE	Ligação transversal entre cabo(s) de terra enterrado(s) (CDTE) e cabo(s) de terra aéreos (CDTA) de ambas ou mais vias (quando existentes)

LEP	Light Emitting Plasma
LiFi	Light fidelity
LTI	Ligação transversal entre cabo(s) de terra enterrado(s) (CDTE) e Cabo(s ) de terra aéreos CDTA e os carris
PCU	Protection and control unit (unidade de controlo e proteção)
PRT	Posto Regional de Telecomando
REFER EPE	Rede Ferroviária Nacional
SICAFE	Simulador de cargas ferroviárias
SST	Subestação de tração
TI	Transformador de intensidade
TSA	Transformador dos serviços auxiliares
TT	Transformador de tensão
URT	Unidade remota de telecomando
V	Tensão em [V]

## Glossário

Catenária	Linha aérea instalada sobre a via-férrea com o objetivo de fornecer energia elétrica aos comboios. Geralmente é constituída por um fio de contacto, um cabo suporte, pêndulos e todo um conjunto de estruturas de suporte.
Cash flow	É um termo que se refere à quantidade de dinheiro que é recebido e pago por um negócio durante um determinado período.
Circuito de retorno	Caminho de regresso da corrente elétrica à subestação.

Comboios	Consumidores móveis de energia elétrica.
Consignação de Instalação	Conjunto de operações que consiste em isolar (por corte ou seccionamento), bloquear, verificar a ausência de tensão, estabelecer ligações à terra, e em curto-circuito proteger contra peças em tensão adjacentes delimitando um elemento de rede (ou uma instalação) previamente identificada e retirada da sua exploração normal. Esta operação é destinada a garantir condições de segurança necessárias à realização de trabalhos fora de tensão nesse elemento de rede (ou nessa instalação)
Curto-circuito	É o aumento súbito da corrente elétrica quando a impedância se reduz de forma abrupta devido a um defeito no circuito.
Feeder	Cabo aéreo de alimentação elétrica que se estende paralelamente à catenária e que se destina a facilitar a exploração da mesma.
Setor de catenária	É um troço de catenária compreendida entre uma subestação e uma zona neutra ou entre uma subestação e o fim de linha eletrificada.
Sobrecorrente direccional	É uma sobrecorrente que é medida por um relé direccional (sensível ao sentido do fluxo de potência) que compara ângulo de fase relativo entre duas grandezas elétricas, esta comparação é comumente utilizada para determinar a direção da corrente em relação a uma tensão, que serve como referência.
Subestação de tração	Ponto de alimentação e distribuição de energia elétrica à catenária. Transformação do nível de tensão de forma a poder ser utilizado pelos comboios.
Tensão de ripple	É a componente de corrente alternada que se sobrepõe ao valor médio da tensão de uma fonte de corrente contínua,

	<p>cuja origem da ondulação (<i>ripple</i>) está associado ao uso de retificadores</p>
Visão escotópica	<p>É a visão produzida pelo olho em condições de baixa luminosidade. No olho humano, os cones não funcionam em condições de baixa luminosidade (noturna), o que determina que a visão escotópica seja produzida exclusivamente pelos bastonetes, o que impossibilita a percepção das cores.</p>
Visão fotópica	<p>É a designação dada à sensibilidade do olho em condições de intensidade luminosa que permitam a distinção das cores. Na generalidade, corresponde à visão diurna. No olho humano, a visão fotópica faz-se principalmente pela ativação dos cones que se encontram na retina.</p>
Visão mesópica	<p>É a designação dada à combinação da visão fotópica e da visão escotópica, que ocorre em situações de luminosidade baixa, mas não tão baixa que elimine de todo a componente fotópica da visão.</p>
Watchdog	<p>É uma função que pode ser encontrada na maioria dos microcontroladores. Sendo constituído por um oscilador e por um contador binário de <math>N</math> bits. Quando o contador alcança o seu valor máximo, a saída do contador é ativada e é dado um sinal de <i>reset</i> ao microcontrolador. No caso de um relé de proteção o watchdog é uma função que supervisiona as entradas e as saídas durante um ciclo de scan. No caso do relé de proteção de uma subestação se falhar a leitura das entradas e saídas, o mesmo emitirá uma ordem de abertura do disjuntor.</p>
Zona verde	<p>Zona ao longo da via onde não é necessário instalar LEAEs para prevenir a existência de tensões de passo e de contato para além dos limites.</p>

Zona vermelha	Zona ao longo da via onde têm de ser instaladas LTIs e LEAEs para prevenir a existência de tensões de passo e de contato para além dos limites.
Zona neutra	Pequena extensão de catenária não alimentada eletricamente.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Representação esquemática do sistema elétrico de alimentação [3] .....	5
Figura 2-2-Sistemas de alimentação para tração elétrica ferroviária em Portugal, adaptado de [4] .....	6
Figura 2-3- Esquema elétrico de uma SST em corrente-contínua com retificação AC-DC .	7
Figura 2-4 Diagrama vetorial das tensões compostas nos transformadores com ligação Dd0 (a) e Dy11(b) , (c) diagrama das tensões compostas do secundário aplicadas a cada um dos retificadores- adaptado de [7].....	8
Figura 2-5 Formas de onda simples no secundário das ligações Dd0 e Dy11 e respetivas retificações a 6 pulsos, e aplicação do paralelo dos 2 grupos (retificação a 12 pulsos) (Anexo 1).....	8
Figura 2-6 Esquema elétrico de princípio de alimentação da rede de tração em DC a partir de duas subestações em paralelo [4] .....	9
Figura 2-7- Esquema elétrico de princípio de alimentação da rede de tração em AC 1×25 kV adaptado de [4] .....	10
Figura 2-8-Esquema elétrico de princípio de uma subestação bifásica 25kV/50 Hz AC, adaptado de [1] .....	11
Figura 2-9 Esquema elétrico de princípio de uma subestação trifásica .....	12
Figura 2-10 Esquema de ligações do autotransformador [8] .....	13
Figura 2-11 Esquema do sistema de alimentação 2×25 kV [8].....	14
Figura 2-12 Esquema de desfasamentos de tensões entre duas SST com zona neutra. ....	15
Figura 2-13 Desfasamentos de 180° entre duas SST, adaptado de [9].....	16
Figura 2-14 Desfasamento entre SST de Abrantes e SST de Ródão, adaptado de [9].....	16
Figura 2-15 Fluxo de Potência para o caso de defeito na SST Abrantes, adaptado de [9] .	17
Figura 2-16 Defeito observado na SST de Ródão, adaptado de [9].....	18
Figura 2-17 Diagrama de carga da potência ativa máxima em kW em dias uteis para a SST do Entroncamento, obtido pela central de telecontagem da REFER .....	19
Figura 2-18- Deslastre das Cargas SST- Litém, SST V. F. Xira.....	20
Figura 2-19 Circuito unifilar do painel de entrada da linha de alimentação da SST(continua na Figura 2-20).....	21
Figura 2-20 Circuito unifilar do painel de entrada da linha de alimentação da SST (continua na Figura 2-21).....	21
Figura 2-21 Circuito unifilar da SST (continua na Figura 2-22).....	23
Figura 2-22 Módulo GIS (continuação do esquema da Figura 2-23) .....	24
Figura 2-23-Circuito unifilar SST, referente ao troço final de alimentação das cargas (continuação do esquema da Figura 2-22) .....	24
Figura 2-24 Configuração de uma subestação monobloco- subestação de tração (parque 25kV)[7] .....	26
Figura 2-25 Vista aérea da SST da Fatela-Linha da Beira Baixa.....	26
Figura 2-26 Seccionador bipolar de duas posições (à esquerda), símbolo elétrico (cor azul à direita) .....	27
Figura 2-27- Disjuntor de alta tensão (à esquerda),à direita símbolo elétrico a) disjuntor b) interruptor.....	28
Figura 2-28 Funcionamento do disjuntor de acordo com o dispositivo de proteção, disjuntor ligado à (esquerda); disjuntor abre após instrução da proteção (direita) [7].....	29

Figura 2-29 Tipos de transformadores de corrente [14].....	30
Figura 2-30 Diagrama de ligações de um transformador de tensão indutivo [7].....	33
Figura 2-31 Diagrama de um transformador de medida de tensão capacitivo [7].....	34
Figura 2-32 Medida eletro-óptica de tensão [14].....	35
Figura 2-33 Esquema unifilar de princípio da proteção de distância.....	39
Figura 2-34 Esquema unifilar da rede de tração elétrica de via única, adaptado de [16]....	40
Figura 2-35 Diagrama das impedâncias vistas pelo relé de distância da SST de Ródão $R_{sec}$ e $X_{sec}$ .....	44
Figura 2-36 Esquema de princípio de funcionamento da proteção de cuba.....	46
Figura 2-37 Esquema de proteção Buchholz.....	46
Figura 2-38 Princípio de funcionamento do relé Buchholz: A) -Estado de repouso, B)- Passagem de gás pelo relé ou fuga de óleo e deslocamento do flutuador b1, disparo de alarme, C)- Ordem de atuação do disjuntor para proteção do transformador.....	47
Figura 2-39 Proteções próprias do transformador.....	48
Figura 2-40 Termómetros de temperatura do transformador.....	48
Figura 2-41 Princípio de funcionamento da proteção de imagem térmica.....	50
Figura 2-42 Sinótico telecomando com visualização de encravamentos.....	52
Figura 2-43 Encravamento mecânico Tipo A- Seccionador de terra e de linha à ( esquerda), pormenor do encravamento mecânico do seccionador de terra e de linha (direita).....	52
Figura 2-44 Encravamento mecânico Tipo B- Após a abertura do disjuntor (esquerda), é libertada a chave SL2 A2, manobrar o seccionador (direita).....	53
Figura 2-45 Encravamento mecânico Tipo C.....	53
Figura 2-46 Caixa de comando com encravamento mecânico Tipo D (esquerda), pormenor do encravamento (direita).....	54
Figura 2-47 Exemplo de condicionamento do seccionador SEL1.....	55
Figura 2-48 Subestação trifásica com ligação em “V” [1].....	56
Figura 2-49 Configuração da SST de Carcavelos.....	57
Figura 2-50 Quadro AC-SST de Carcavelos.....	58
Figura 2-51 Transformadores da SST de Carcavelos.....	58
Figura 2-52 Quadro elétrico de média tensão e serviços auxiliares da SST de Carcavelos	59
Figura 2-53 Quadro de retificadores e distribuição de corrente-contínua da SST de Cascais .....	60
Figura 2-54 Armário de isolamento da SST de Cascais.....	60
Figura 2-55 - Circuito unifilar da alimentação, corte geral e medida da SST.....	61
Figura 2-56 Circuito unifilar das celas de alta tensão 10 kV <sub>AC</sub> da SST DC.....	62
Figura 2-57 Circuito unifilar dos transformadores de serviços auxiliares.....	63
Figura 2-58 Circuito unifilar do grupo transformador retificador.....	64
Figura 2-59 Circuito unifilar das celas de baixa (1500V DC) e saídas para a catenária.....	65
Figura 2-60 Princípio de proteção di/dt [24].....	67
Figura 2-61 Princípio de funcionamento da proteção $\Delta I$ [24].....	68
Figura 2-62 Correntes de arranque de unidades de tração AC e DC e correntes de curto- circuito [27].....	70
Figura 2-63 Diagrama característico da proteção DDL, adaptado de [24].....	71
Figura 2-64 Esquema de teste/ensaio de linha EDL, baseado em [25].....	72
Figura 2-65 Modelo de exploração normal A) de uma circulação entre duas SST <sub>DC</sub> B) Curto-Circuito franco Catenária-carril entre duas SST <sub>DC</sub> B).....	73
Figura 2-66 Correntes de curto-circuito em sistema de alimentação DC.....	74
Figura 2-67 Posto de de subseccionamento.....	75

Figura 2-68 Posto de subseccionamento e paralelo .....	76
Figura 2-69 Posto de seccionamento e paralelo .....	77
Figura 2-70 Posto de ramal .....	78
Figura 2-71 Posto de barramento .....	78
Figura 2-72 Posto de Barramento de Nine .....	79
Figura 2-73 Posto auxiliar .....	79
Figura 2-74 Esquema unifilar de Posto Autotransformador .....	80
Figura 2-75 Posto de Autotransformador de Alcains .....	81
Figura 2-76 Posto de autotransformador de Alcains (continuação).....	82
Figura 2-77 Quadro de entrada da alimentação elétrica de posto de catenária.....	83
Figura 2-78 Telefone seletivo de posto de catenária.....	83
Figura 2-79 Armário de telecomando .....	84
Figura 2-80 Interruptor usado em posto de catenária (esquerda), caixa de comando do interruptor IB1 (direita).....	84
Figura 2-81 Seccionador de duas posições (fechado/Aberto) em posição FECHADO” (à esquerda) e em posição “ABERTO” (à direita): (1) contacto do terminal móvel; (2) contacto do terminal fixo[7].....	85
Figura 2-82 Transformador de corrente .....	86
Figura 2-83 Fusível de Média tensão de proteção do transformador.....	87
Figura 2-84 Retorno da corrente de tração no sistema <i>standard</i> .....	90
Figura 2-85 Esquema de funcionamento do sistema RT.....	91
Figura 2-86 Transporte de energia a 50 kV e alimentação da locomotiva de tração a 25 kV .....	92
Figura 2-87 Esquema de funcionamento da distribuição de corrente no sistema autotransformador adaptado de [31] .....	92
Figura 2-88 Desenho de LTI para via dupla, princípio do sistema autotransformador .....	93
Figura 2-89 Desenho de ligação LEAE, via dupla, dois CDTE e sistema autotransformador .....	94
Figura 2-90 Representação esquemática da infraestrutura catenária .....	95
Figura 3-1 Mala de ensaios da REFER .....	97
Figura 3-2 Condições do relé de proteção religador (KVTR 102), da SST de Irivo, para existir religação automática.....	99
Figura 3-3 Caixa de comando do disjuntor (esquerda) da SST de Irivo e representação dos mecanismos de manobra (Direita).....	100
Figura 3-4 Procedimentos com aparelhagem de medida em testes de proteções.....	103
Figura 3-5 Teste de proteções e religação (esquerda), painel de comando e sinalização da SST de Irivo(à direita e em cima) , pormenor do disjuntor D1 e sinalizações(à direita e em baixo).....	104
Figura 3-6 Posto de catenária de Canha .....	106
Figura 3-7 Caixa de comando do seccionador telecomandado .....	106
Figura 3-8 Esquema de ligações da caixa de comando do seccionador.....	107
Figura 3-9 Aparelhagem exterior do posto de catenária de canha (esquerda), seccionador (à direita e em cima), caixa de comando montada (à direita e em baixo) .....	108
Figura 4-1 Ângulo sólido .....	111
Figura 4-2 Intensidade luminosa de uma fonte de luz em função do seu ângulo sólido...	111
Figura 4-3 Medição da iluminância através de um luxímetro [36] .....	112
Figura 4-4 Iluminância .....	113
Figura 4-5 Lei do inverso dos quadrados .....	114

Figura 4-6 Luminância .....	115
Figura 4-7 Gráfico da eficiência energética de algumas fontes luminosas [38].....	116
Figura 4-8 Temperatura da cor [36] .....	117
Figura 4-9 Espectro visível de diversas fontes de luz [39].....	118
Figura 4-10 Soluções comercialmente disponíveis .....	119
Figura 4-11 Tecnologia por detrás do LEP [45].....	121
Figura 4-12 Constituição de um LEP [47] .....	122
Figura 4-13 Funcionamento da tecnologia LEP [46] .....	123
Figura 4-14 Constituição do sistema LiFi, pormenor do ressonador cerâmico e o bolbo de quartzo (esquerda), sistema completo (direita) [46].....	124
Figura 4-15 Configuração do sistema LiFi, adaptado [50],[51] .....	124
Figura 4-16 Comparação da eficiência da aplicação: HPS vesus LEP [46].....	126
Figura 4-17 Histograma das horas diárias de iluminação artificial e curva de distribuição normal .....	128
Figura 4-18 Distribuição desagregada dos Horários de Alta tensão em ciclo diário e ciclo normal.....	129
Figura 4-19 Valor atual líquido (anual) entre investir na tecnologia LEP, em detrimento da tecnologia de HPS (cenário 1).....	134
Figura 4-20 Valor atual líquido (anual) entre investir na tecnologia LEP, em detrimento da tecnologia de HPS (cenário 2).....	135
Figura 4-21 Valor atual líquido (anual) entre investir na tecnologia LEP, em detrimento da tecnologia de HPS (cenário 3).....	136
Figura 4-22 Distribuição desagregada dos custos marginais de Alta tensão para o ciclo diário e ciclo normal .....	137
Figura 4-23 Luminária Wave GR 400AP da Alphasite [57] .....	139
Figura 4-24 Simulação da iluminância de um parque de estacionamento de 25x20m [57] .....	140
Figura 4-25 Visualização da iluminância e distribuição espectral da lâmpada de alto vapor de sódio( em cima), visualização da iluminância e distribuição espectral da lâmpada LEP (em baixo) [46].....	141
Figura 4-26 Repartição por tecnologia comercializada pela EDP Serviço Universal [59].....	143
Figura A3- 1 Esquema unifilar SST Irivo, Folha A .....	163
Figura A3- 2 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 1 .....	164
Figura A3- 3 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 2 .....	165
Figura A3- 4 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 3 .....	166
Figura A3- 5 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 10 .....	167
Figura A3- 6 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 14 .....	168
Figura A3- 7 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 18 .....	169
Figura A3- 8 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 29 .....	170
Figura A3- 9 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 30 .....	171
Figura A3- 10 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 32 .....	172
Figura A3- 11 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 48 .....	173
Figura A3- 12 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 51 .....	174
Figura A3- 13 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 58 .....	175

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 Classes de precisão dos TI [10].....	32
Tabela 2-2 Proteções trifásicas das SST DC.....	66
Tabela 2-3 Funções de proteção 1500 V <sub>DC</sub> .....	66
Tabela 2-4 Distâncias entre ligações transversais.....	95
Tabela 4-1 Sinais de controlo do sistema LiFi [51].....	125
Tabela 4-2 Características das tecnologias em estudo.....	126
Tabela 4-3 Intervalo de 50% do somatório das horas.....	129
Tabela 4-4 Dados em avaliação para o cenário 1.....	133
Tabela A4 1 Estatísticas das horas de luz artificial ano 2013.....	177
Tabela A4 2 Estatísticas das horas observadas nos ciclos semanal normal e diário.....	178
Tabela A4 3 Simulação dos Cenários 1, 2 e 3.....	179
Tabela A4 4 Cálculo da desagregação tarifária para ciclo semanal de 1 kWh, e custo associado para mês de janeiro de 2013.....	180
Tabela A4 5 Cálculo das receitas marginais entre o ciclo semanal normal e ciclo diário.....	181
Tabela A4 6 Estatísticas para os ciclos semanal e diário da receita marginal-(custo de energia).....	182
Tabela A4 7 Especificações técnicas da Luminária WAVE- Luminária para áreas / estacionamentos.....	182
Tabela A4 8 Cálculo de emissões específicas de dióxido de carbono [59],[60].....	183

# 1 Introdução

A REFER EPE (Rede Ferroviária Nacional) é a empresa responsável, em Portugal, pela prestação de serviço público de gestão da infraestrutura integrante da rede ferroviária nacional, desenvolvendo as suas atividades de acordo com princípios de modernização e eficácia, de modo a assegurar o fornecimento contínuo de serviço de um modo competitivo e seguro respeitando o meio ambiente. Atualmente, com acréscimo do trânsito ferroviário, é necessário adequar as novas tecnologias e prepará-las para o futuro de novas realidades, tornando-se necessário a existência de novos modos de exploração e manutenção da infraestrutura ferroviária de modo a que se garanta a comodidade e a continuidade do serviço do material circulante propulsionado através da energia elétrica.

Uma rede de tração ferroviária é um sistema único, tanto no ponto de vista do uso como da configuração dos sistemas elétricos relativos à rede de tração.

Os modos de exploração e manutenção de instalações de subestações de tração e postos de catenária são conduzidos para que exista um bom funcionamento, diminuindo as ocorrências e aumentando o ciclo de vida de todo o equipamento constituinte deste tipo de instalações.

O estágio curricular na Rede Ferroviária Nacional, REFER EPE, efetuado na Direção de Engenharia da Infraestrutura -Catenária e Energia de Tração, teve como principal objetivo abordar alguns dos temas inerentes às atividades desenvolvidas por este Órgão.

O início do estágio curricular coincidiu com uma formação de 35 horas de energia de tração para técnicos, tendo servido de base para o estágio.

Por motivos de reorganização da empresa, este estágio curricular teve a sua conclusão na empresa REFER Engineering SA (empresa pertencente ao Grupo REFER), que é uma empresa especializada em consultoria e engenharia dos transportes focada em todos os segmentos e especialidades do setor ferroviário ligeiro e pesado.

## **1.1 Âmbito técnico e objetivos**

Com base no enquadramento e motivação apresentados pela Engenharia da Infraestrutura, definiram-se os objetivos específicos para orientar o desenvolvimento particular deste estágio, que foram os seguintes:

- Sistemas de Alimentação para Tração Elétrica
- Subestações de Tensão Alternada
- Subestações de Tensão Contínua
- Postos de catenária
- Circuito de Retorno de Corrente de Tração, Terras e Proteções
- Procedimentos de consignação de linhas de chegada das subestações

## **1.2 Acompanhamento de trabalhos**

Ao longo do estágio acompanhei a equipa técnica da REFER em diversos trabalhos, especialmente nos seguintes:

- Ensaio de relés de proteção
- Modificação e ensaio de instalações elétricas
- Medição de características dos óleos isolantes dos transformadores de potência
- Trabalhos de Manutenção Preventiva Sistemática
- Consignação de linhas de chegada às subestações

## **1.3 Desenvolvimento de trabalhos**

Para além das atividades referidas nos pontos anteriores, foi-me proposto para desenvolver um estudo técnico-económico com vista à melhoria da eficiência energética/racionalização

da iluminação das subestações de tração. Este estudo visa a redução de consumos e dos custos associados de energia elétrica nas subestações de tração.



## 2 Caracterização Técnica dos Sistemas de Tração

O sistema elétrico (a montante do sistema de tração ferroviário) é composto pelos subsistemas de produção de energia, transporte e distribuição de energia até à subestação de tração [1]. A subestação de tração deve ser projetada de forma a que esteja compatibilizada com a rede a montante (rede pública de transporte ou distribuição) com vista a fornecer a alimentação elétrica à infraestrutura ferroviária, assegurando o cumprimento dos padrões de qualidade de fornecimento de energia (tensão e frequência), conforme a norma EN 50163-Railway applications-Supply voltages of traction systems [2]. O sistema elétrico de tração é constituído pelo sistema de alimentação (subestação de tração), catenária, sistema de retorno da corrente e o material circulante. A Figura 2-1 ilustra a constituição e interligação entre estes dois sistemas através de uma representação esquemática.

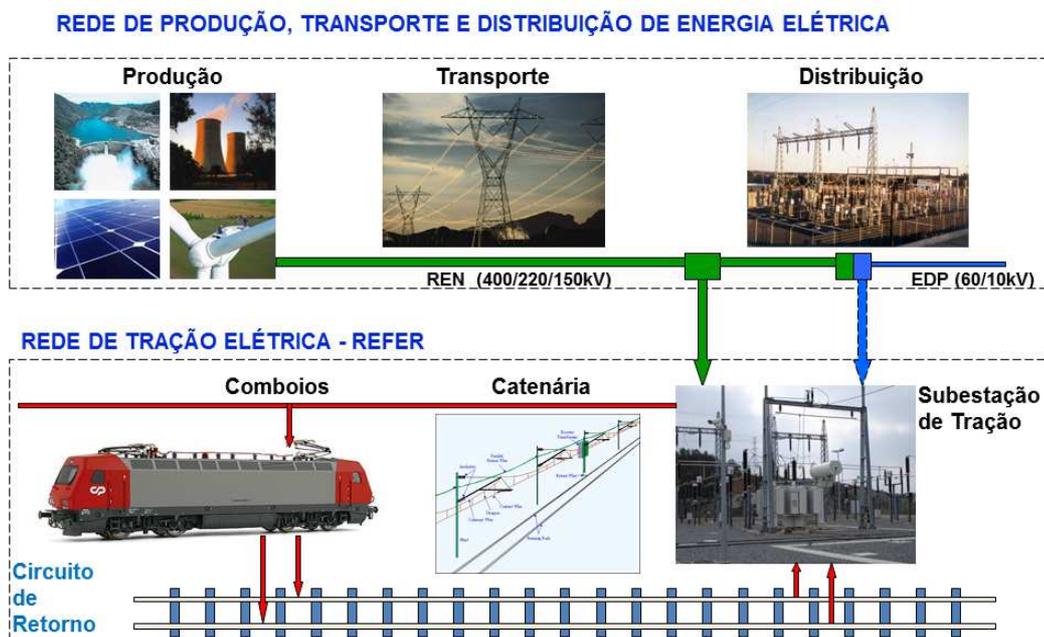
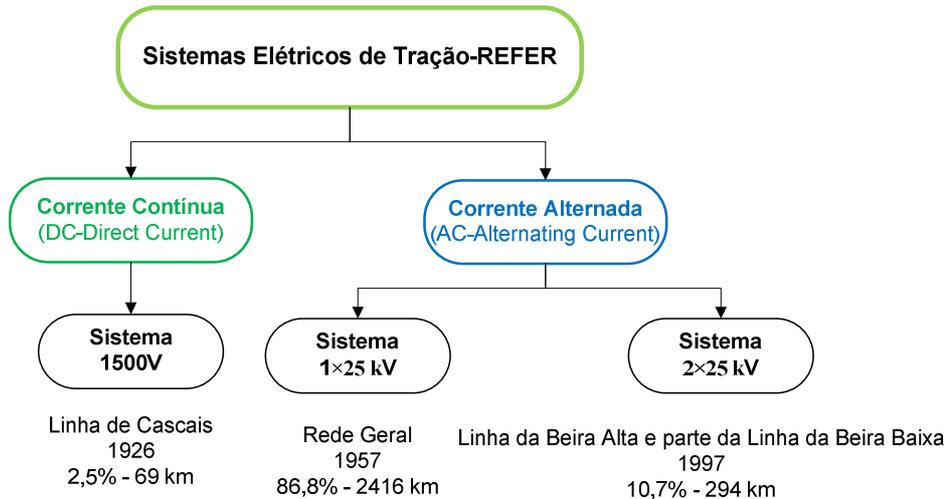


Figura 2-1 Representação esquemática do sistema elétrico de alimentação [3]

### 2.1 Sistemas de Alimentação para Tração Elétrica

Em Portugal os sistemas elétricos de tração são divididos em sistemas de corrente contínua e de corrente alternada, conforme representado na Figura 2-2.



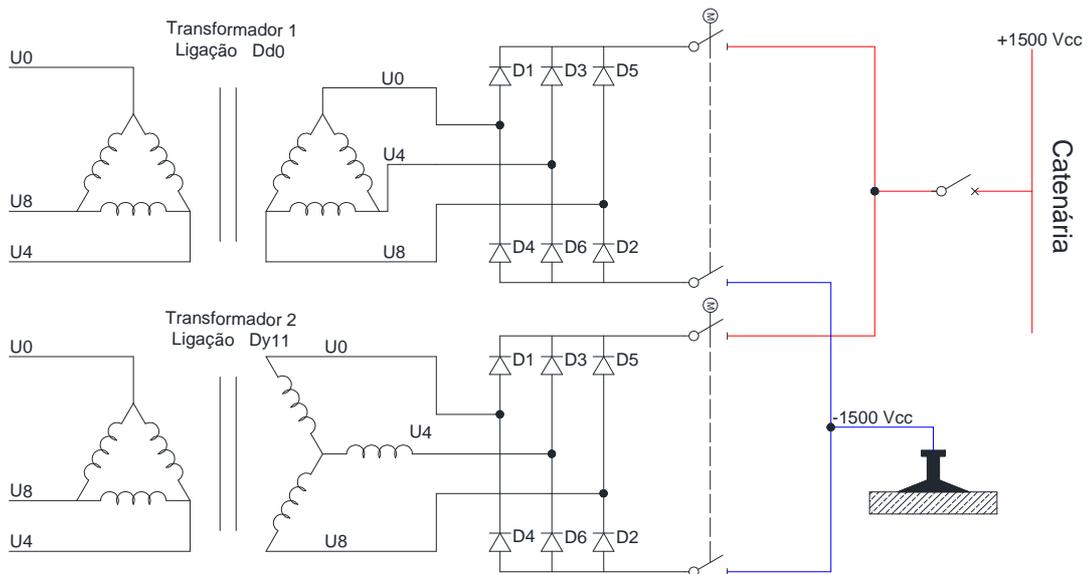
**Figura 2-2-Sistemas de alimentação para tração elétrica ferroviária em Portugal, adaptado de [4]**

A Figura 2-2 ilustra a representação esquemática dos sistemas elétricos de tração, que serão alvo de estudos no âmbito deste estágio que serão apresentados nas secções 2.1.1 a 2.1.5 deste relatório.

### 2.1.1 Sistema de alimentação 1500 V DC

O sistema de alimentação a 1500 V DC, foi o primeiro sistema de alimentação elétrica que surgiu em Portugal em 15 de Agosto de 1926, implementado na linha de Cascais, com a extensão de 26 km onde se encontram atualmente em serviço 6 subestações de tração [4]. Este sistema de alimentação surgiu devido ao facto do controlo dos motores de corrente contínua ser mais simples, bem como no início do século XX, a eletrónica de potência ser ainda rudimentar e de grandes dimensões em termos de peso e volume para tensões elevadas [4]. As subestações de corrente contínua são alimentadas a partir da rede pública, normalmente em média tensão AC. Este tipo de sistema dispõe de grupos de transformação trifásico e retificação para converter a tensão de alimentação AC em DC. A retificação é feita através de díodos, por ser a solução mais económica. Esta solução permite apenas o fluxo de corrente no sentido da carga. A subestação de tração é alimentada na sua entrada por duas linhas trifásicas a 10 kV, sendo as entradas ligadas a um barramento transversal de média tensão [5]. Os dois grupos transformador/retificador convertem e adaptam a tensão alternada em contínua com um nível de 1500V DC.

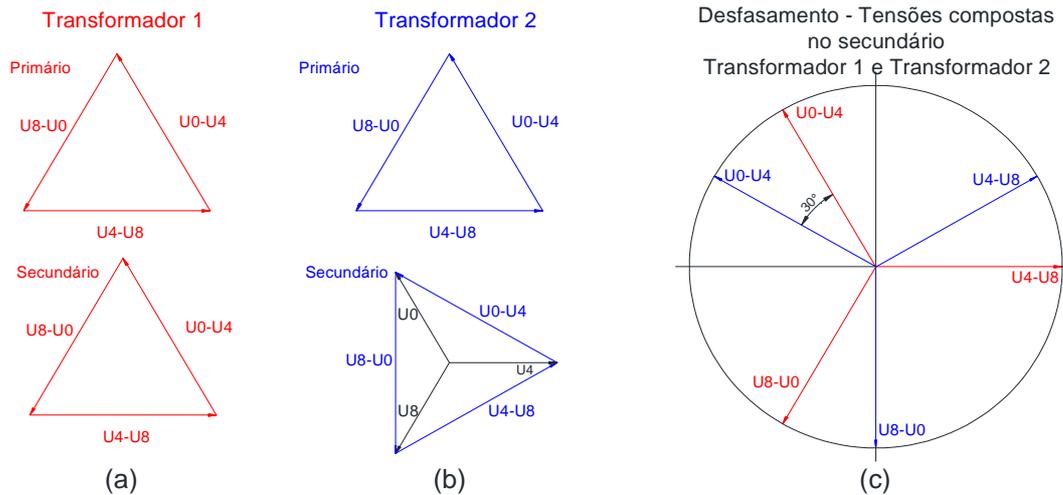
A retificação é feita através de um retificador dodecafásico, conseguida através do paralelo de dois grupos transformador/retificador em ponte trifásica. Um dos transformadores tem um grupo de ligações triângulo-estrela (Dy11) e outro triângulo-triângulo (Dd0), conforme a Figura 2-3. Cada transformador aplica ao respetivo retificador um conjunto de tensões trifásicas compostas de 1250 V.



**Figura 2-3- Esquema elétrico de uma SST em corrente contínua com retificação AC-DC**

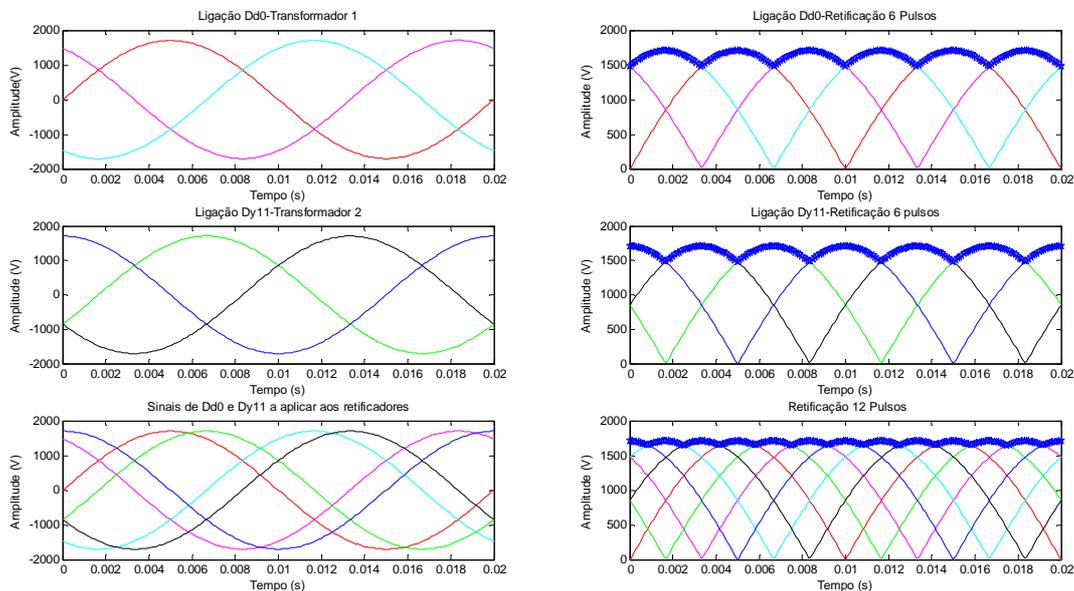
A Figura 2-3, mostra os dois grupos transformador/retificador, em que a sequência de condução para cada par de díodos (D1-D2), (D2-D3), (D3-D4), (D4-D5), (D5,D6) e (D6-D1). O par de díodos que tiver aos seus terminais a maior tensão instantânea, de fase a fase entrará em modo de condução [6].

Os dois conjuntos de tensões compostas encontram-se desfasadas entre si de  $30^\circ$  conforme se representa na Figura 2-4. Como os dois conversores estão colocados em paralelo é possível ter uma retificação de 12 pulsos, obtendo-se uma retificação mais lisa (menor *ripple*)



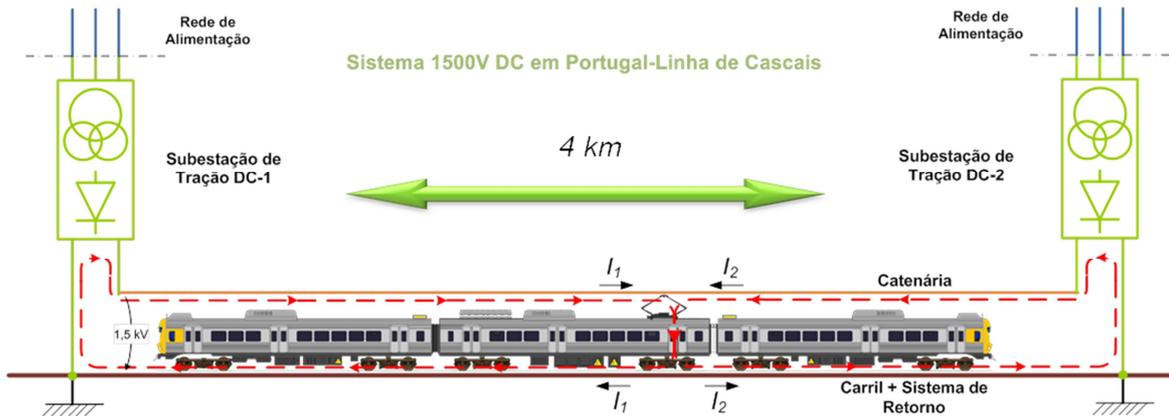
**Figura 2-4 Diagrama vetorial das tensões compostas nos transformadores com ligação Dd0 (a) e Dy11(b) , (c) diagrama das tensões compostas do secundário aplicadas a cada um dos retificadores- adaptado de [7]**

A Figura 2-5 ilustra as formas de onda e a respetiva retificação da tensão para um período de 20ms, para cada grupo transformador/retificador a operar isoladamente (6 pulsos). Pode-se observar ainda na Figura 2-5 o resultado do paralelo dos dois grupos retificadores onde se obtém a retificação a 12 pulsos, resultante do desfasamento de 30°.



**Figura 2-5 Formas de onda simples no secundário das ligações Dd0 e Dy11 e respetivas retificações a 6 pulsos, e aplicação do paralelo dos 2 grupos (retificação a 12 pulsos) (Anexo 1)**

Existem seis subestações de corrente-contínua que estão ligadas eletricamente entre si através da catenária funcionando em paralelo, conforme se pode constatar na Figura 2-6. Nesta situação não é necessário uma zona neutra, como acontece para os sistemas em corrente alternada apresentados mais à frente. A ligação das subestações em paralelo permite alimentar a carga em modo bialimentado, isto é, pelas subestações ligadas à rede de tração.



**Figura 2-6** Esquema elétrico de princípio de alimentação da rede de tração em DC a partir de duas subestações em paralelo [4]

### 2.1.2 Sistema de alimentação a 25 kV/50Hz AC

O sistema de alimentação a 25 kV monofásico é o mais usado nos sistemas elétricos de tração da Rede Ferroviária Nacional, cuja designação convencional é  $1 \times 25$  kV. Neste sistema, o primário do transformador monofásico de potência é ligado a duas fases (tensão composta) da rede de alimentação, apresentando o secundário uma tensão simples aos seus terminais de 25 kV. Um dos terminais secundário é ligado à terra e ao sistema de retorno da corrente de tração (carril), o outro à catenária como se mostra na Figura 2-7.

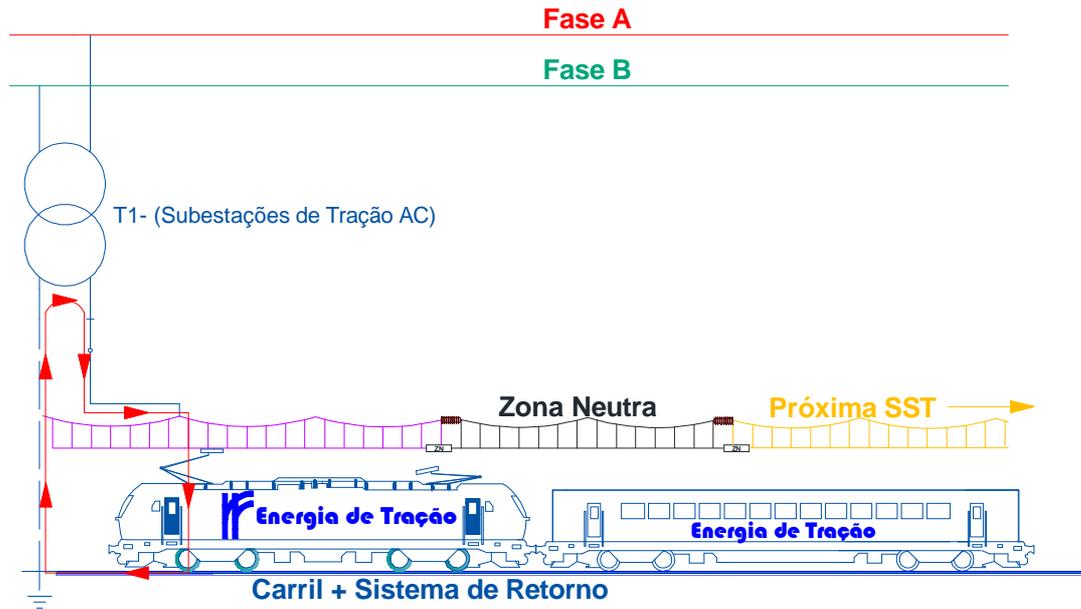


Figura 2-7- Esquema elétrico de princípio de alimentação da rede de tração em AC 1x25 kV adaptado de [4]

### 2.1.3 Sistema com alimentação bifásica

Atualmente nos sistemas de alimentação AC, o esquema de montagem que mais se utiliza é o esquema de ligação bifásica, conforme Figura 2-8. Neste tipo de montagem existem normalmente dois transformadores de potência alimentados pelas mesmas duas fases, funcionando um em carga e o outro fica de reserva.

Neste tipo de ligação não é necessário a existência de uma zona neutra junto à SST para a separação de fases. Poderá no entanto existir uma zona neutra para facilitar a exploração da rede ou permitir a utilização dos dois transformadores de potência em simultâneo, quando os encravamentos o permitirem.

Para transformar a corrente elétrica trifásica numa tensão simples de 25 kV, recorre-se à transformação bifásica.

A montagem bifásica é a que introduz maiores desequilíbrios nas redes de alimentação trifásicas do distribuidor de energia. No sentido de minimizar esse inconveniente, no estágio de projeto escolhem-se as fases cujo impacto é mínimo na relação do desequilíbrio da rede versus cargas elétricas ferroviárias.

Este desequilíbrio é minimizado através da alternância de fases entre subestações, ou seja uma subestação ‘A’ utiliza as fases 0 e 4, a subestação ‘B’ utiliza as fases 0 e 8, a subestação ‘C’ utiliza as fases 4 e 8 e assim sucessivamente. Esta alternância exige o estabelecimento de zonas neutras na catenária, entre subestações, para evitar o curto-circuito entre fases diferentes. A disposição e as combinações de seccionamento permitem minimizar o problema dos desequilíbrios das cargas.

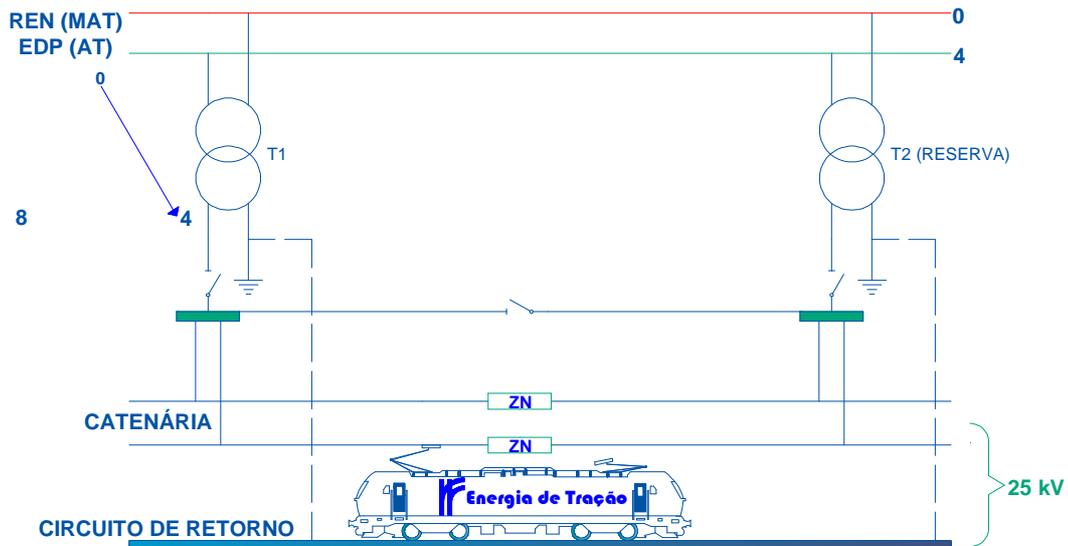


Figura 2-8-Esquema elétrico de princípio de uma subestação bifásica 25kV/50 Hz AC, adaptado de [1]

Em Portugal existem duas exceções a este tipo de ligação bifásica: a SST da Amadora (possui 3 transformadores de potência), e a SST de Pegões (que recebe 3 fases de alimentação mas só utiliza duas). A terceira fase poderá ser utilizada no futuro caso haja necessidade de um aumento de potência instalada.

#### 2.1.4 Sistema de alimentação trifásica ou em “V”

Neste sistema de alimentação as cargas são alimentadas a uma tensão  $1 \times 25$  kV, embora nesta tipologia de ligação existam três transformadores de potência em que dois funcionam em ligação “V”, e o terceiro funciona como reserva que pode substituir qualquer um dos dois. A Figura 2-9 ilustra a configuração com configuração em “V”. Nesta configuração a SST é alimentada através de linhas de alimentação com 3 fases (linhas trifásicas).

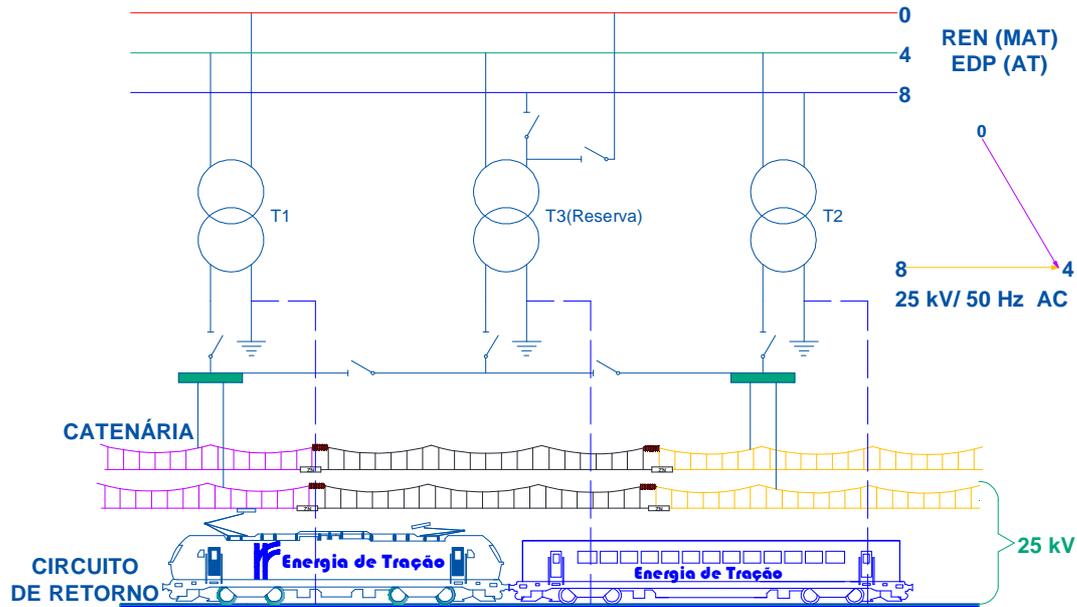


Figura 2-9 Esquema elétrico de princípio de uma subestação trifásica

Nesta tipologia de ligação cada transformador alimenta um setor de catenária e pode funcionar independentemente do outro estar ou não ao serviço. Na ligação em “V” é obrigatória uma zona neutra entre cada setor. A Figura 2-9 ilustra que o desfaseamento entre tensões secundárias é de  $60^\circ$ , equivalente a uma diferença de potencial de 25 kV entre elas. Na Rede Ferroviária Nacional, existem cinco SST com a configuração em “V”: Travagem, Salreu, Alfarelos, Entroncamento e Vila Franca de Xira.

### 2.1.5 Sistema de alimentação $2 \times 25$ kV/50Hz

O sistema de alimentação  $2 \times 25$  kV, surgiu em Portugal em 1996 na eletrificação da linha da Beira Alta. Esta solução inovadora foi encontrada pelos técnicos de energia de tração devido à escassez de pontos de alimentação. Esta solução permitiu ainda um maior espaçamento entre subestações e a redução das perdas elétricas na rede de tração dado que a alimentação se efetua a 50 kV [4].

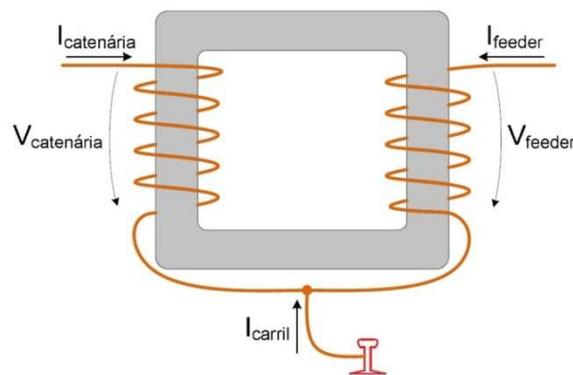
Foram construídas três subestações de tração ligadas à rede nacional de transporte (RNT) a 220 kV, para alimentar os 200 km da linha da Beira Alta [8]. Este sistema tem componentes adicionais em relação ao sistema de alimentação  $1 \times 25$  kV. Este sistema pode ser apresentado como, possuindo nas subestações de tração, transformadores de potência com ponto médio no enrolamento secundário, com uma tensão secundária de 50 kV, cujos terminais são ligados um à catenária e outro ao *feeder*, sendo o ponto médio do

enrolamento secundário do transformador ligado ao carril, de modo a permitir a utilização do material motor habitualmente usado ao nível de tensão dos 25 kV.

Ao longo da linha é instalado o condutor denominado por *feeder* negativo (que apresenta uma diferença de potencial de -25 kV em relação à terra e de 50 kV em relação à catenária) cuja função se relaciona com a alimentação dos autotransformadores.

Cada autotransformador é constituído por dois enrolamentos com número de espiras idêntico. A função dos autotransformadores é distribuir a corrente de tração pela catenária e *feeder* de forma a diminuir as quedas de tensão ao longo da linha e permitir a redução da corrente de retorno pelo carril.

Os autotransformadores, normalmente instalados a 10 km de distância entre si, têm como função efetuar a ligação elétrica entre a catenária, o *feeder* negativo e o sistema de retorno/terra. Na Figura 2-10 apresenta-se um esquema simplificado das ligações do autotransformador.

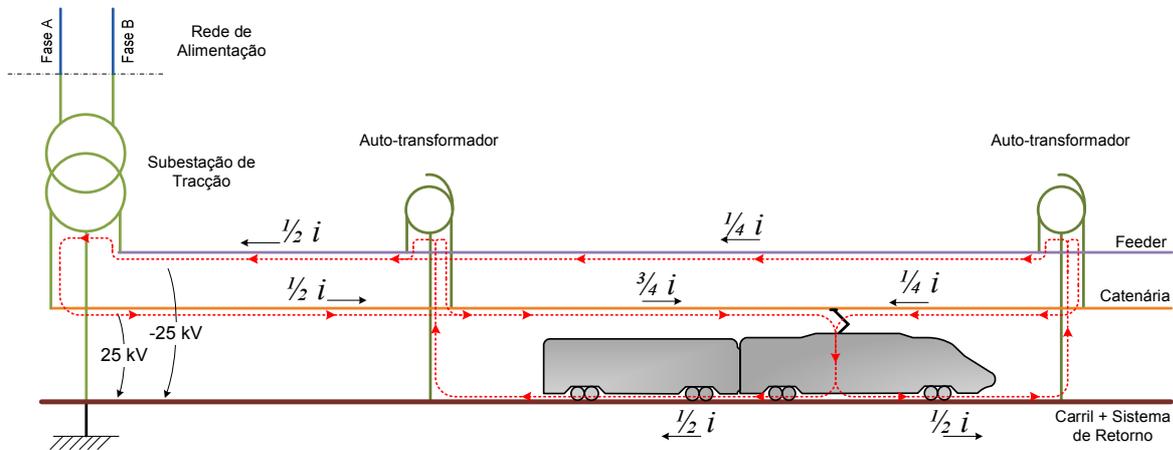


**Figura 2-10 Esquema de ligações do autotransformador [8]**

Quando o autotransformador está em vazio as correntes de catenária e de *feeder*, são muito pequenas (corrente de magnetização) e têm sentidos de forma a que os fluxos gerados pelos dois enrolamentos se somem. Neste caso a corrente que circula entre o ponto médio do enrolamento e o carril é teoricamente nula.

Quando a carga (comboio absorvendo energia da catenária) se encontra entre dois autotransformadores, a alimentação é feita através do troço da catenária a montante e a jusante devido ao efeito dos autotransformadores. A corrente elétrica de tração que circula

através dos dois autotransformadores retorna à subestação através do *feeder*. Assim a corrente que circula nos carris e no solo é mínima como se verifica na Figura 2-11.



**Figura 2-11** Esquema do sistema de alimentação  $2 \times 25$  kV [8]

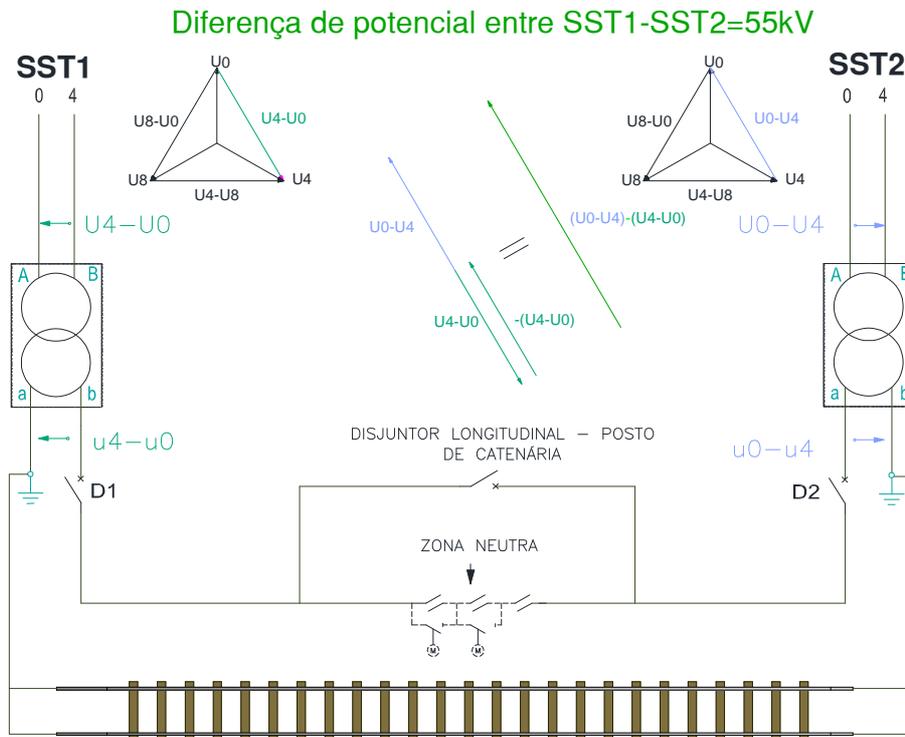
Nesta situação de carga é provocado um desequilíbrio do sistema. A tensão de catenária junto ao autotransformador tem tendência a baixar, no entanto o conjunto dos dois enrolamentos do autotransformador abraçam um circuito magnético comum o que faz com que a corrente se distribua equilibradamente pelo *feeder* e pela catenária logo que esta encontra um autotransformador. Como a corrente está distribuída por estes dois condutores, catenária e *feeder*, a queda de tensão é menos acentuada.

Em conclusão, este sistema permite o transporte de maior quantidade de energia com menores quedas de tensão, o que possibilita uma maior distância entre subestações de tração. O sistema  $2 \times 25$  kV apresenta ainda a vantagem de ter uma impedância equivalente menor quando comparada com o sistema  $1 \times 25$  kV. No entanto tem a desvantagem de ser um sistema de alimentação mais dispendioso, em média, em 25% que o sistema  $1 \times 25$  kV. Este facto deve-se a esta solução dispor de mais equipamentos, com aparelhos de corte/seccionamento bipolares, e por isso apresenta também custos de manutenção superiores [8].

### 2.1.6 Desfasamentos e diferenças de potencial entre setores de catenária

No sistema de alimentação de 25 kV, uma subestação alimenta um conjunto de setores de catenária. Estes setores estão eletricamente separados dos outros setores alimentados por outras subestações para impedir a circulação de correntes paralelas na rede de distribuição

de alta tensão, sendo esta separação feita pela zona neutra. Em caso de avaria de uma subestação é possível alimentar a catenária da subestação adjacente através de um *by-pass* realizado pelo disjuntor longitudinal, localizado no posto de catenária de zona neutra (Figura 2-12).



**Figura 2-12** Esquema de desfasamentos de tensões entre duas SST com zona neutra.

O conhecimento das diferenças de potencial entre duas SST revela-se importante para o dimensionamento do disjuntor do posto de catenária, bem como todos os isoladores para garantir a distância de guarda de ar necessária para que não haja disrupção elétrica entre os dois setores de catenária. Um dos casos mais desfavoráveis é quando temos duas SST com as tensões em oposição de fase, o que origina uma tensão eficaz de 55 kV e de pico até 77,8 kV entre os dois setores de catenária, conforme Figura 2-13. Segundo a norma EN 50163, a tensão máxima admissível permanente num só setor é de 27,5 kV e a tensão não permanente máxima admissível é de 29 kV.

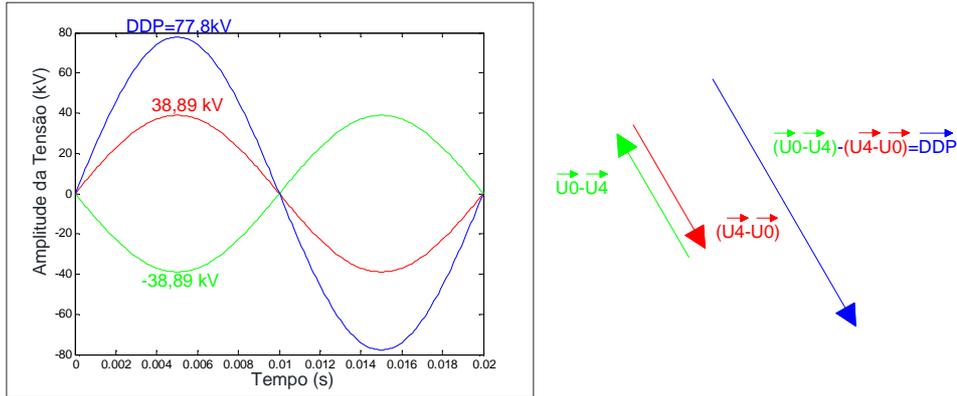


Figura 2-13 Desfasamentos de 180° entre duas SST, adaptado de [9]

O conhecimento dos desfasamentos e diferenças de potencial também se revela importante na determinação de curto-circuitos entre duas subestações, para se poder parametrizar as proteções elétricas. Tomemos o caso entre duas subestações de tração, como mostra na Figura 2-14.

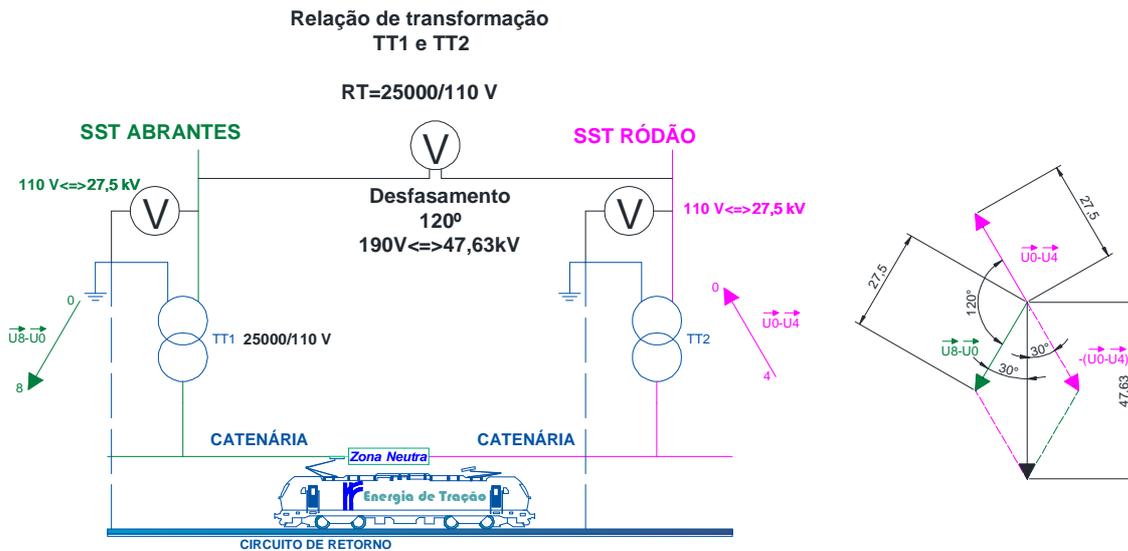


Figura 2-14 Desfasamento entre SST de Abrantes e SST de Ródão, adaptado de [9]

No caso de existir um curto-circuito entre dois setores a potência vista do lado da SST de Abrantes é dada pela equação 2-1.

$$P_{abCC} = U_{ab} \cdot I_{CC} \cdot \cos(70^\circ - 30^\circ) \tag{2-1}$$

Com  $P_{abCC}$  Potência vista do lado de Abrantes;

$U_{ab}$  Tensão da SST de Abrantes, com  $60^\circ$  de defasamento entre  $U_{ab} - U_{rd}$ ;

$U_{rd}$  (a Tensão da SST de Ródão);

$I_{cc}$  Corrente de curto-circuito,  $70^\circ$  relativos à impedância da catenária;

A impedância da catenária é aproximadamente  $\underline{Z} = 0,16 + j0,4 \Omega / km$ , que em situação de curto-circuito entre duas subestações (não existe contacto entre a catenária e carril), o defasamento introduzido pela catenária será aproximadamente de  $70^\circ$ . Neste caso  $P_{abCC} > 0$ , logo a SST de Abrantes fornece energia ativa, pelo que não existe inversão de potência ativa na SST de Abrantes, como se representa na Figura 2-15.

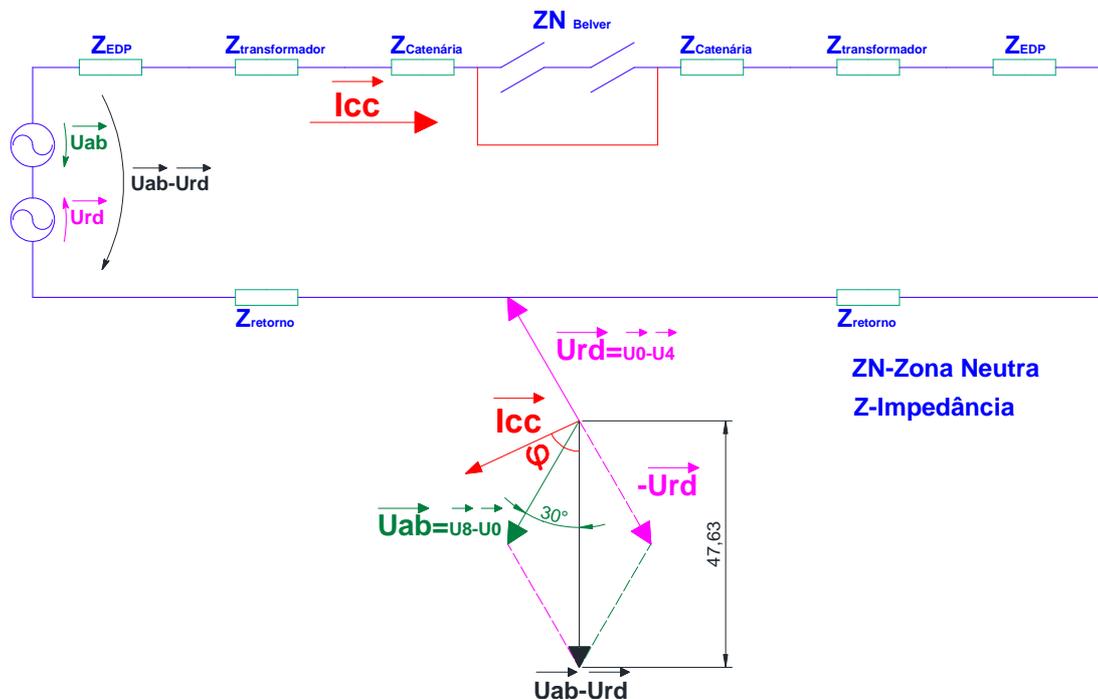


Figura 2-15 Fluxo de Potência para o caso de defeito na SST Abrantes, adaptado de [9]

Da mesma forma, a potência de curto-circuito vista pelo lado da SST de Ródão é dada pela equação 2-2.

$$P_{rd\ CC} = U_{rd} \cdot I_{cc} \cdot \cos(70^\circ + 30^\circ) \quad 2-2$$

Com  $P_{rdCC}$  a potência vista do lado de Ródão;

$U_{rd}$  tensão da SST de Ródão com  $60^\circ$  de defasamento em relação a  $U_{rd} - U_{ab}$ ;

$I_{CC}$  corrente de curto-circuito como representado na Figura 2-16.

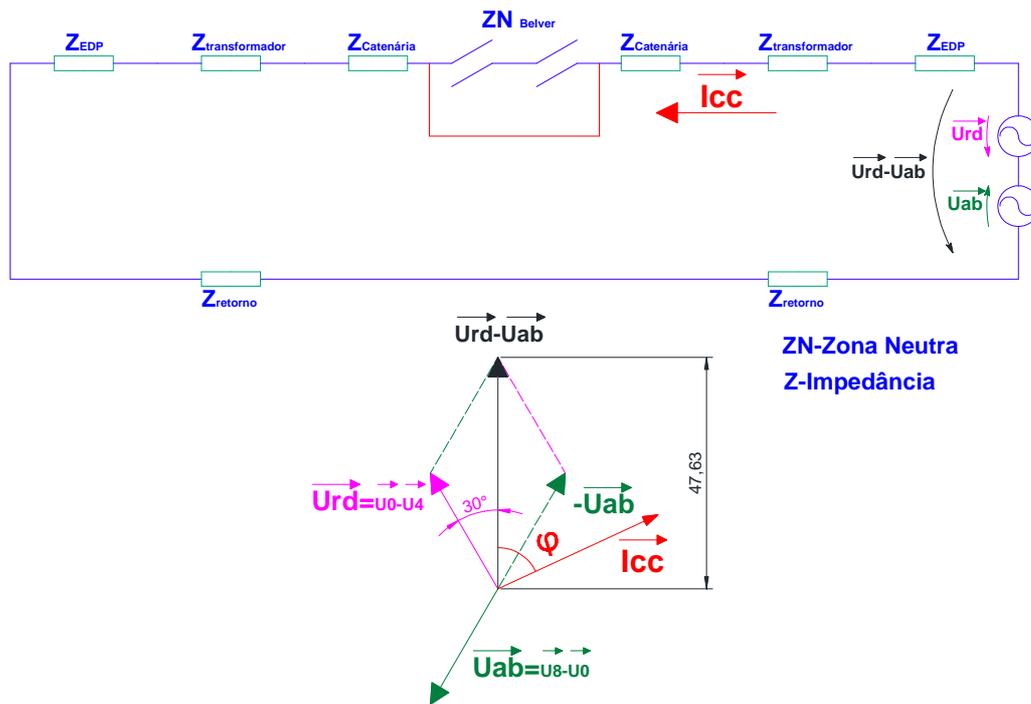


Figura 2-16 Defeito observado na SST de Ródão, adaptado de [9]

Nesta situação  $P_{rdCC} < 0$ , o que significa que a SST de Ródão recebe energia ativa logo houve inversão do trânsito de potência.

### 2.1.7 Exploração da rede de tração

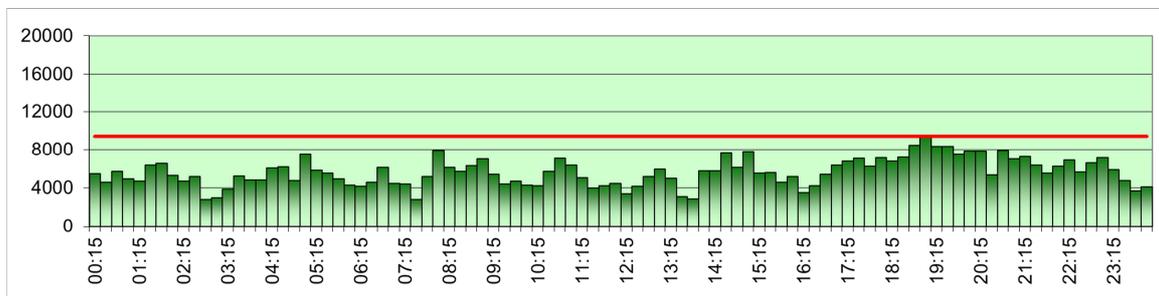
Na exploração da rede de tração tem grande importância o conceito de potência instalada e potência tomada. No caso da exploração de uma rede de tração, a potência contratada é a potência que o distribuidor entrega à entrada da SST.

A potência contratada é atualizada para a máxima potência ativa média registada em qualquer intervalo ininterrupto de 15 minutos durante os doze meses anteriores (incluindo o mês de faturação). Em termos de faturação, se a potência tomada num dos intervalos de 15 minutos for maior que a potência contratada o cliente ficará obrigado a pagar essa

mesma potência ao distribuidor durante um ano, isto é, passará a ser este o valor da potência contratada.

No caso da exploração da rede, se existir a necessidade de ações de manutenção, ou consignação de linhas (numa subestação) existe a necessidade de deslastrar as cargas para as SST adjacentes. Em caso de avaria da SST poderá, no limite, haver a necessidade de alterar horários de circulação do material circulante.

Na Figura 2-17 tem-se a informação referente ao diagrama de cargas da SST do Entroncamento.



**Figura 2-17 Diagrama de carga da potência ativa máxima em kW em dias uteis para a SST do Entroncamento, obtido pela central de telecontagem da REFER**

Se for colocada fora de serviço esta subestação a alimentação dos setores adjacentes à SST do Entroncamento é feita pela SST do Litém e pela SST de Vila Franca de Xira.

Na Figura 2-18 podemos verificar que na SST do Litém não existe qualquer problema com o deslastre de cargas, ao invés da SST de V. F. de Xira em que existem certos períodos, entre as 18:00 e as 19:45, por exemplo, que não se deve deslastrar carga devido à potência tomada ser superior à potência contratada. Só em caso de motivos de força maior, no caso da indisponibilidade da SST com vista a ser assegurada a continuidade de serviço, é que se deve operar neste horário ou tentar deslocar cargas de prioridade menos importantes para outros períodos horários.

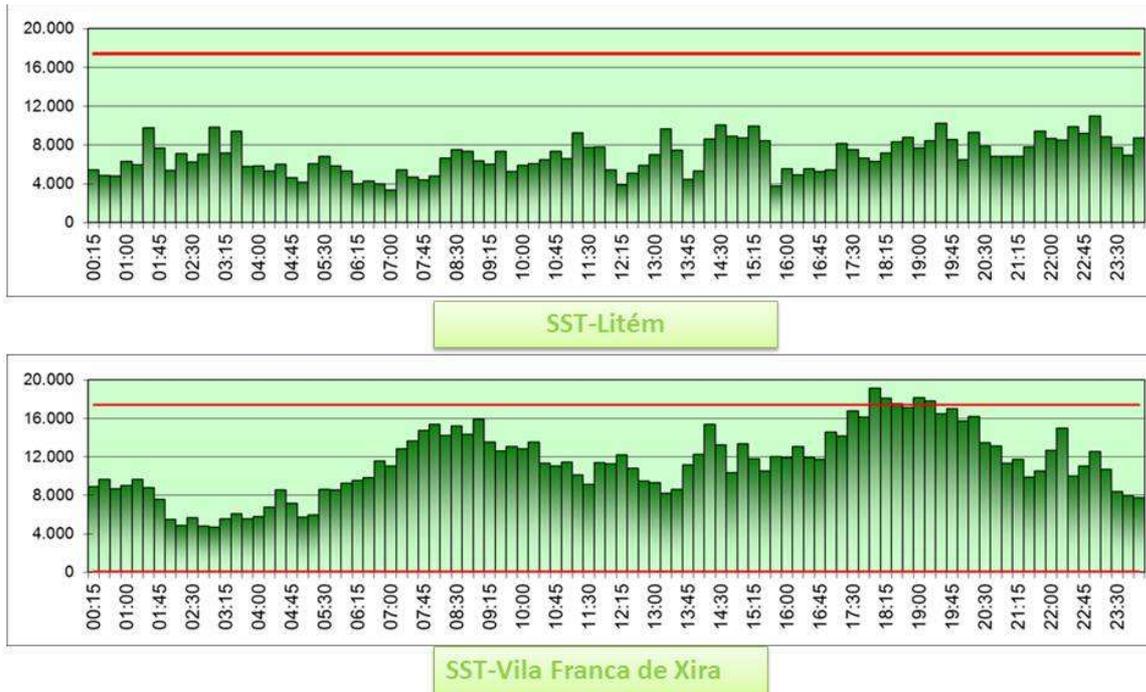


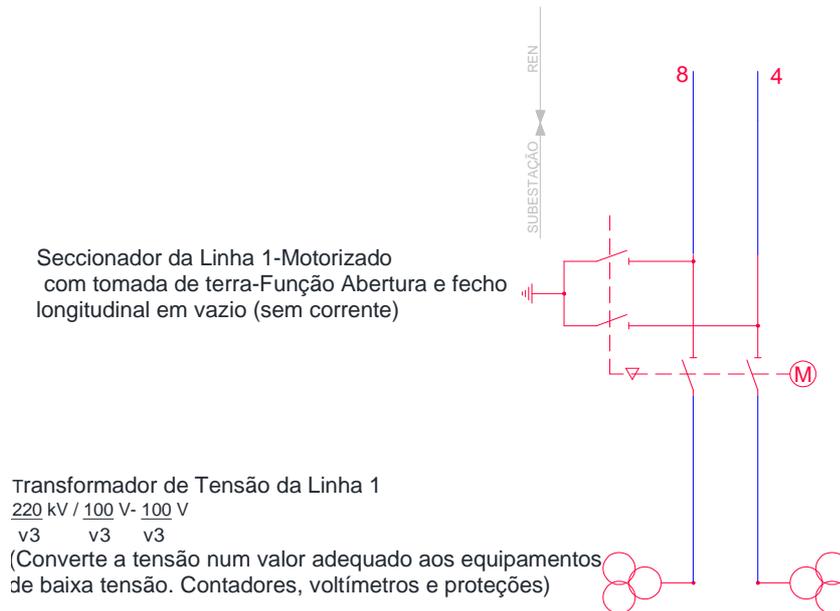
Figura 2-18- Deslastre das Cargas SST- Litém, SST V. F. Xira

## 2.2 Subestações de tensão alternada

### 2.2.1 Esquemas unifilares de subestações

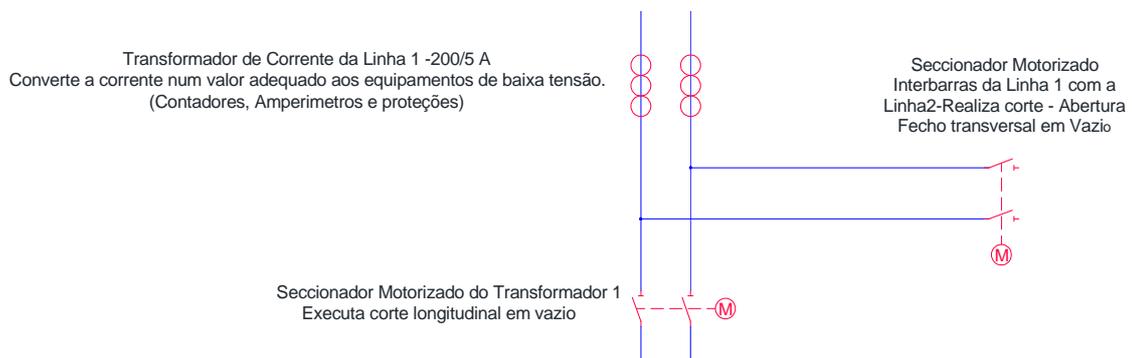
Uma subestação de tração (SST) pode ser definida como uma instalação elétrica de alimentação e distribuição de energia elétrica com o objetivo de transformação do nível de tensão a ser usado pelos comboios, sendo constituída por equipamentos de proteção, equipamentos de corte/seccionamento e transformadores de potência e de medida. As SST possuem dispositivos de proteção capazes de detetar diferentes tipos de defeitos no sistema e isolar partes onde ocorrem. Para se poder compreender o princípio de funcionamento de uma subestação torna-se necessário conhecer a simbologia e o funcionamento básico de todos os equipamentos. O início do painel de linha da SST, conforme a Figura 2-19, incorpora um seccionador motorizado, com a possibilidade de ligação à terra (no caso de consignação), esta operação só é realizada pelo técnico da SST com a linha sem tensão. O transformador de tensão (TT) de linha apresenta três enrolamentos secundários, com classes de precisão diferentes, sendo esta definida pelo erro máximo de tensão (módulo e fase) de acordo com o tipo de aparelhos alimentados pelo secundário [10]. A potência do

TT é especificada tendo em conta a potência absorvida pelos aparelhos de medida e proteção por ele alimentados.



**Figura 2-19 Circuito unifilar do painel de entrada da linha de alimentação da SST(continua na Figura 2-20)**

Ainda no painel de entrada de linha segue-se o transformador de corrente de linha que tal como o TT, tem a potência especificada de acordo com a potência absorvida pelos aparelhos de medida e de proteção por ele alimentado. Como mostra a Figura 2-20, seguem-se dois seccionadores, um no barramento principal e outro no barramento transversal com comando motorizado, que interrompem ou estabelecem a continuidade do circuito elétrico que, sem poder de corte garantido não podem ser manobrados em carga.



**Figura 2-20 Circuito unifilar do painel de entrada da linha de alimentação da SST (continua na Figura 2-21)**

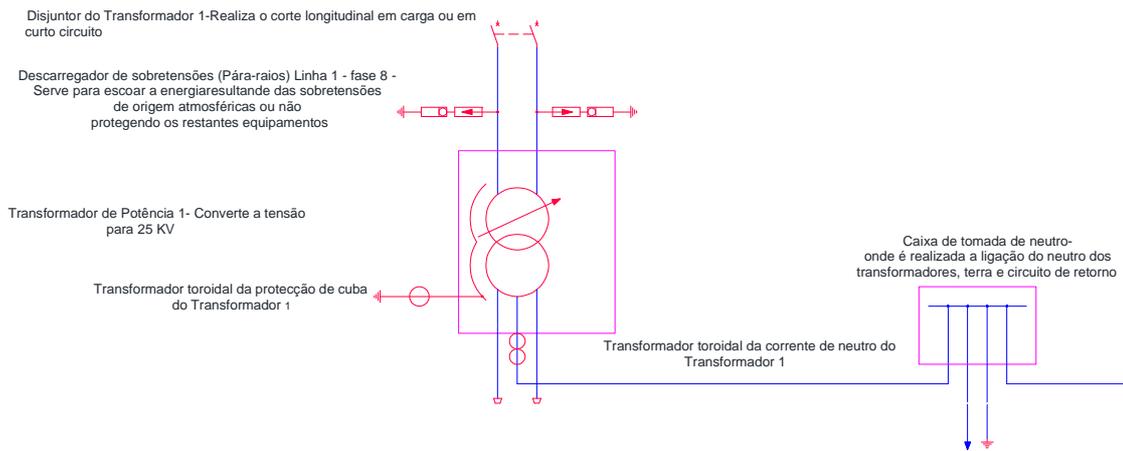
A proteção contra sobreintensidades (sobrecargas e curtos circuitos) e máxima tensão é efetuada pelo disjuntor. A jusante do disjuntor (Figura 2-21) é intercalado o descarregador de sobretensões (ligado em paralelo com o equipamento a proteger), que tem como finalidade escoar as sobretensões existentes na linha de origem atmosférica ou originadas por manobras de equipamentos nas subestações, limitando o valor máximo da tensão, o que permite a continuidade de serviço sem alterações. Por razões históricas [9], este dispositivo também é conhecido por ‘Para-raios’, o que na prática é uma designação incorreta.

Segue-se o transformador de potência que tem como objetivo efetuar a conversão do nível de tensão, neste caso particular 2x25 kV por intermédio de dois enrolamentos secundários. Estes dois enrolamentos estão ligados internamente para que, com o ponto central ligado aos carris, exista uma tensão de +25 kV no fio de contato e de -25 kV no *feeder*.

O mesmo transformador tem associado um TI de proteção de cuba (para detetar eventuais contactos entre os enrolamentos e o núcleo ou a cuba), isto é, quando há um defeito forma-se um circuito fechado pela terra que percorre o primário do TI, que por sua vez alimenta um relé de corrente que atua um contacto, desligando o disjuntor que alimenta o transformador.

A jusante do transformador existe um TI toroidal de corrente, instalado no neutro com dois secundários (um destinado a medidas e o outro a proteções). Na Figura 2-21 está ainda presente a caixa de tomada de neutro.

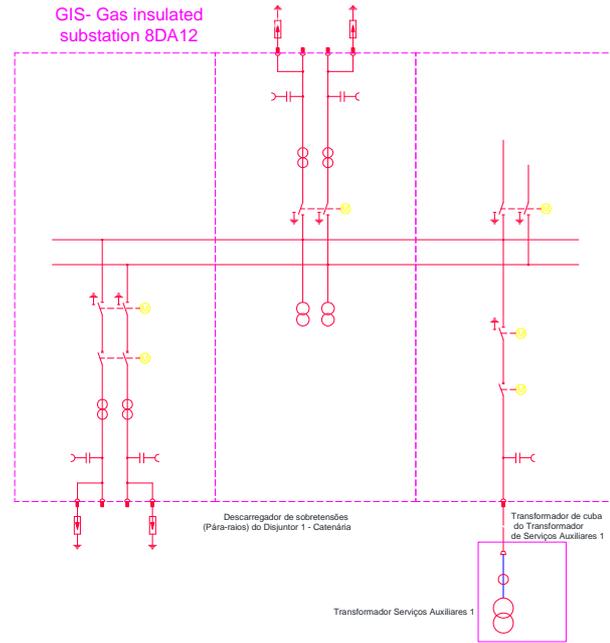
O transformador de potência está equipado com um regulador de tensão em carga, instalado no enrolamento primário, para garantir maior estabilidade de tensão na rede elétrica de tração.



**Figura 2-21 Circuito unifilar da SST (continua na Figura 2-22)**

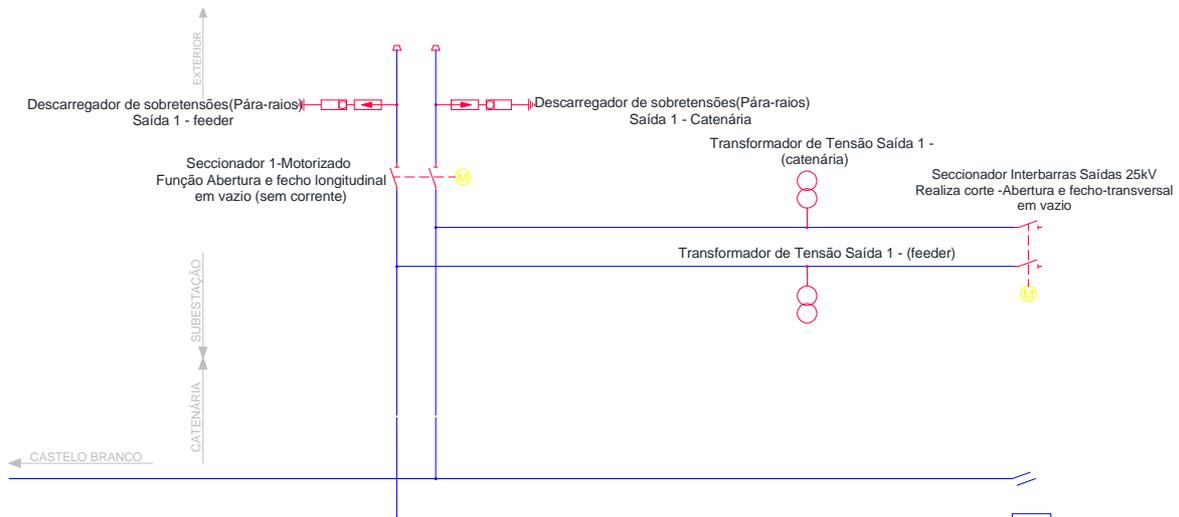
Neste caso particular, o parque exterior de equipamento de 25 kV foi em parte adaptado para uma solução do tipo GIS (Gas Insulated Switchgear) para instalação interior, dado que esta solução ocupa menor espaço em relação aos AIS (Air Insulated Switchgear). O equipamento GIS é constituído por funções modulares, como sejam os dispositivos com função de corte, medida e proteção, conforme apresentado na Figura 2-22. Está ainda representado nesta figura o transformador de serviços auxiliares que é necessário para a operação dos equipamentos principais de uma subestação (quer de corrente-contínua quer de corrente- alternada). Os equipamentos dos serviços auxiliares alimentados em corrente-contínua correspondem a dispositivos de comando dos vários equipamentos exteriores e interiores, à alimentação da iluminação de emergência do edifício, bem como ao conjunto de baterias.

O equipamento destinado a assegurar os serviços auxiliares de corrente-contínua da subestação, é constituído por um conjunto de carregador-bateria de acumuladores a 110V, funcionando em tampão, com autonomia de 12 horas.



**Figura 2-22 Módulo GIS (continuação do esquema da Figura 2-23)**

Finalmente, obtém-se a alimentação dos setores de catenária existentes para cada um dos lados da subestação (Castelo Branco e Covilhã) a partir do módulo GIS, passando por um seccionador longitudinal e outro transversal, que permitem várias alternativas de exploração. Existem ainda dois transformadores de tensão de saídas ligados em paralelo (um com o *feeder* e outro com a catenária), com funções de recolha de informação de falta de tensão e informação da tensão para as proteções, conforme mostra a Figura 2-23.



**Figura 2-23-Circuito unifilar SST, referente ao troço final de alimentação das cargas (continuação do esquema da Figura 2-22)**

### 2.2.2 Módulo GIS

Nas últimas décadas foram desenvolvidas soluções com recurso ao encapsulamento de aparelhagem de corte e seccionamento, proteções, medidas e respetivos condutores e barramentos, em compartimentos estanques a ar ou a gás isolante. Estes equipamentos podem ser agrupados em painéis compactos modulares constituídos por dispositivos de corte, medida e proteção.

A gama de oferta atual permite o desenvolvimento de subestações com base em equipamentos compactos encapsulados [7].

Para as soluções mais convencionais, os painéis modulares são agrupados em monoblocos que em conjunto satisfazem as necessidades funcionais pretendidas para a instalação. Os painéis dispõem de um barramento transversal simples ou duplo onde são ligados os painéis adjacentes.

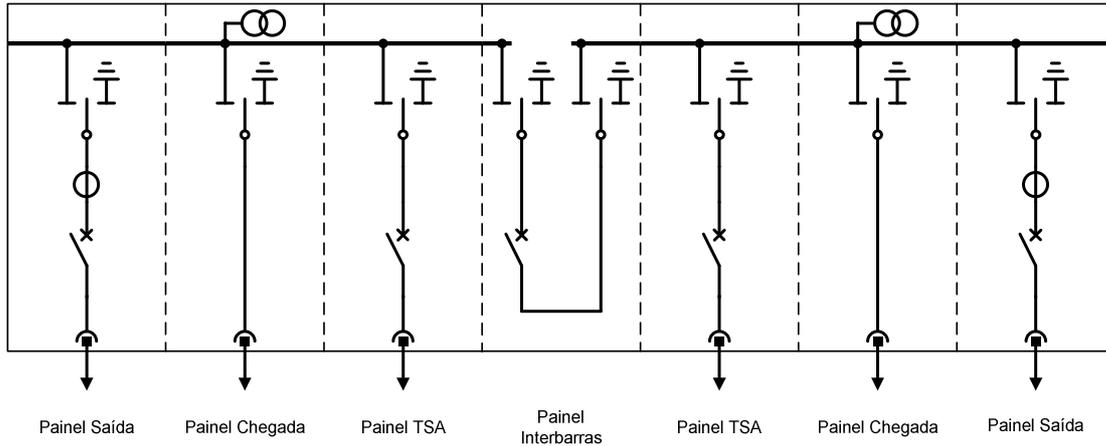
Os painéis têm diversas funções associadas, tais como:

- Chegada/Saída de cabos;
- Seccionamento de barramentos;
- Acoplamento de barramentos.

A estas funções principais de corte podem ser adicionadas outras funcionalidades, nomeadamente:

- Medida de corrente e de tensão;
- Detecção de tensão (sinalização de presença de tensão);
- Proteção contra sobretensões;
- Ligação à terra.

Na Figura 2-24 apresenta-se como exemplo um monobloco-tipo de uma subestação de tração (parque de 25 kV) composto por dois painéis de chegada, dois painéis de saída, dois painéis para os transformadores de serviços auxiliares (TSA) e um painel interbarras.



**Figura 2-24** Configuração de uma subestação monobloco- subestação de tração (parque 25kV)[7]

### 2.2.3 Proteções, aparelhagem de corte e seccionamento e medidas

Uma subestação de tração é uma instalação elétrica, normalmente constituída por seccionadores, disjuntores, barramentos, linhas e transformadores, conforme se mostra na Figura 2-25. Para além destes equipamentos, também existem sistemas de supervisão e controlo.

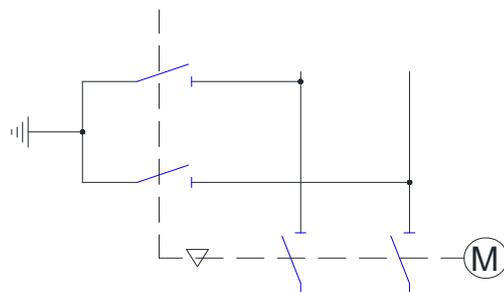


**Figura 2-25** Vista aérea da SST da Fatela-Linha da Beira Baixa.

### 2.2.3.1 Seccionadores

O seccionador é um aparelho de corte, sem poder de corte em carga garantido, destinado a interromper ou estabelecer a continuidade do circuito elétrico e não deve ser manobrado em carga, onde os contactos do mesmo estão visíveis. Este facto é importante pois serve como cláusula de segurança, sendo assim possível verificar o seu estado através de uma simples observação visual. Estes aparelhos são usados para seccionar partes de um painel de linha, como por exemplo isolar um disjuntor, seleccionar barramentos, e no caso de uma consignação separar uma linha da rede de distribuição e ligar à terra a instalação a jusante do seccionador.

Tipicamente, os seccionadores podem ser de duas posições ou de três posições. Os seccionadores de duas posições podem assumir os estados “fechado/aberto” ou “fechado/terra” e os de três posições os estados “fechado/aberto/terra”. A imagem da Figura 2-26 corresponde a dois seccionadores bipolares de duas posições (fechado/aberto) com isoladores tipo coluna, equipado com facas de ligação à terra.



**Figura 2-26 Seccionador bipolar de duas posições (à esquerda), símbolo elétrico (cor azul à direita)**

Os elementos articulados do seccionador podem ser manobrados manualmente ou através de motor elétrico, ou das duas maneiras, conforme a configuração pretendida. Nas SST mais antigas no painel de entrada de linha, o seu comando apenas é feito com manobra

manual. A manobra manual, por razões óbvias, apenas pode ser efetuada localmente, sendo que a comutação do seccionador de terra será sempre manual. Os manípulos assumem configurações diferentes dependendo do movimento necessário para manobrar o polo do seccionador (rotativo, basculante) [7].

### 2.2.3.2 Disjuntores e interruptores

O disjuntor e o interruptor são aparelhos concebidos para interromper ou estabelecer a continuidade de um circuito elétrico Figura 2-27. Ambos os aparelhos têm poder de corte em carga para suportar os esforços que ocorrem quando se ligam ou desligam equipamentos ou partes de instalações sujeitas às condições provocadas por avarias, em particular as de curto-circuito. O interruptor dispõe de poder de corte para correntes de carga nominais enquanto o disjuntor dispõe de poder de corte para correntes de defeito (curto-circuito). Por se tratar de equipamentos muito semelhantes na sua constituição, optou-se por fazer uma abordagem conjunta.

Os disjuntores para efetuarem o corte em carga são concebidos por dois contactos situados numa câmara de corte preenchida com um gás dielétrico para favorecer a extinção do arco elétrico.

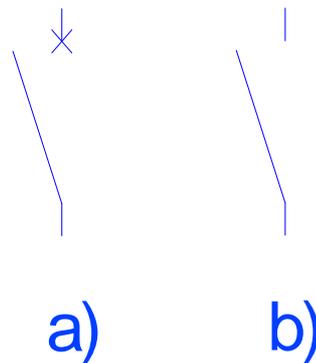
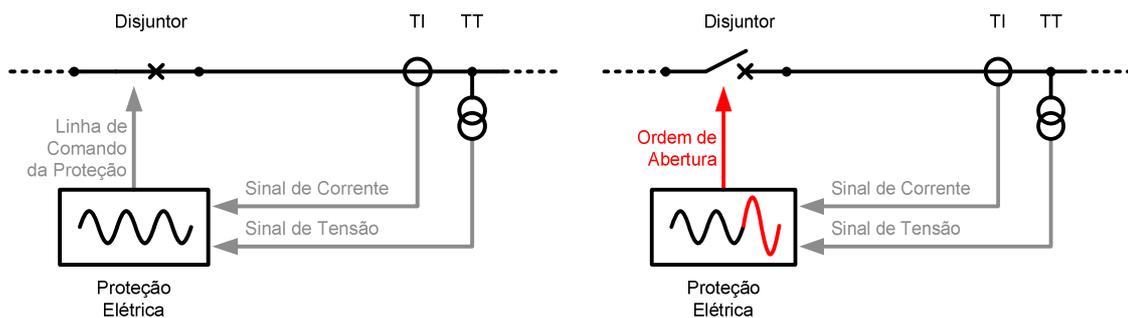


Figura 2-27- Disjuntor de alta tensão (à esquerda), à direita símbolo elétrico a) disjuntor b) interruptor

Os disjuntores aliam às funcionalidades do interruptor a capacidade de operar com correntes de defeito (curto-circuitos). Dado a necessidade de eliminar as correntes de defeito no mais curto intervalo de tempo, os disjuntores são dotados de mecanismos de atuação usualmente mais rápidos que os dos interruptores.

A manobra dos interruptores é feita por comando do operador. Os disjuntores podem ser manobrados por comando do operador ou automaticamente por ordem de uma proteção elétrica, caso seja identificada uma anomalia no normal funcionamento do sistema. Neste caso, o comando de abertura é dado por uma proteção elétrica que monitoriza permanentemente a forma de onda da corrente e/ou da tensão, ou outros que sejam relevantes para o funcionamento do sistema. Sempre que a proteção elétrica identifica uma anomalia nos parâmetros que está a monitorizar, envia uma ordem de abertura ao disjuntor e este interrompe o circuito elétrico [7].

Na Figura 2-28 é apresentado um esquema simplificado do processo de atuação de um disjuntor. Nesta situação é representada uma proteção que monitoriza a tensão e corrente (diagrama à esquerda). Quando a proteção identifica uma grandeza fora do intervalo de parametrização, envia uma ordem de abertura ao disjuntor que por sua vez interrompe o circuito elétrico (diagrama à direita).

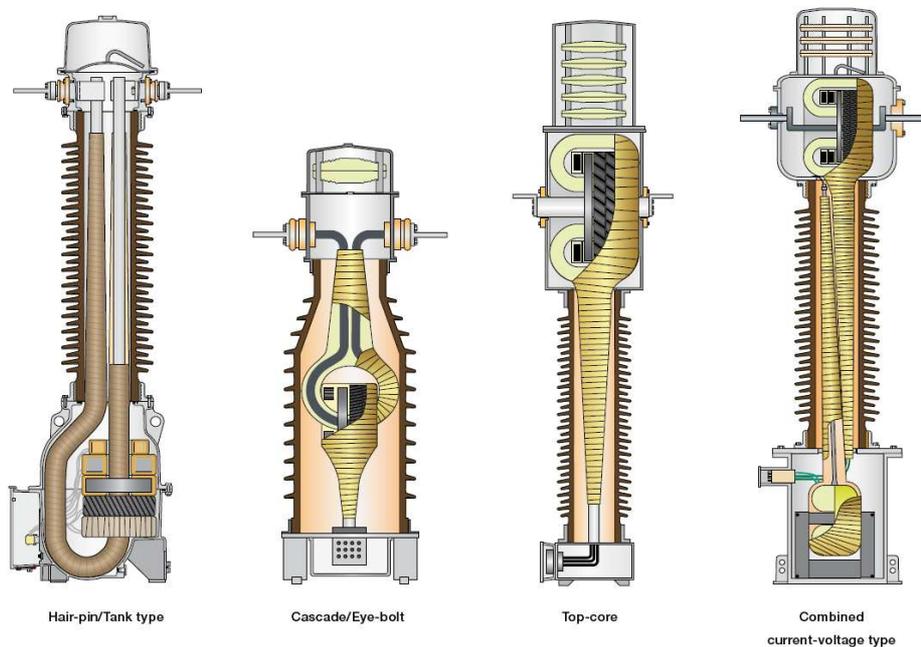


**Figura 2-28** Funcionamento do disjuntor de acordo com o dispositivo de proteção, disjuntor ligado à (esquerda); disjuntor abre após instrução da proteção (direita) [7]

### 2.2.3.3 Transformador de corrente ou intensidade

Um transformador de corrente, (TI), Figura 2-29, é um transformador de medida no qual a corrente secundária, nas condições normais de utilização, é proporcional à corrente

primária e dela difere em fase de um ângulo que é aproximadamente nulo para uma direção apropriada da cablagem [12].



**Figura 2-29 Tipos de transformadores de corrente [14]**

Os (TI) têm como função reproduzir uma “imagem” da corrente que circula nas linhas ou barramentos. Os TI são utilizados quando o circuito a observar é de tensão elevada (isolando o circuito de medida) ou quando os valores de corrente primária são demasiado elevados para permitirem a utilização de aparelhagem de baixo custo e dimensões. Na generalidade das aplicações são usados TI monofásicos ou unipolares. Os TI podem ser dotados de circuitos secundários múltiplos, com características distintas, para as diversas finalidades pretendidas: medida, proteção, contagem de energia, etc [7]. Em muitos casos os TI de alta tensão estão dotados de um enrolamento primário que permite seleccionar relações de transformação distintas (por exemplo 400-200/5 A).

Os tipos de transformadores de corrente concebidos para alimentar os relés de proteção são os seguintes [13]:

- **Indutivos com núcleo saturável** - Os núcleos saturáveis são sem entreferro, saturam-se de uma forma relativamente rápida se não forem suficientemente sobredimensionados.

- **Indutivos com núcleo linearizado** - Os núcleos linearizados possuem um entreferro e por conseguinte reagem de maneira muito diferente da dos núcleos saturáveis, pois o entreferro aumenta a relutância no circuito magnético, o que provoca uma redução da reatância de magnetização, que por seu lado reduz a constante de tempo secundária do TI.
- **Não convencional** - O princípio de funcionamento é baseado no estudo do comportamento do feixe luminoso submetido, em certas condições, a um campo magnético criado na proximidade de um condutor no qual circula uma corrente. A vantagem principal deste tipo de transformadores é a ausência teórica de saturação. As desvantagens são a compensação obrigatória da temperatura, mas sobretudo a ausência quase total de energia no secundário do TI para alimentar os aparelhos de proteção e de medida, obrigando ao emprego de amplificadores [12].

Os TI são tipicamente caracterizados pelos seguintes atributos:

- **Tensão nominal primária** - A tensão nominal primária está relacionada com o nível de tensão da rede. Em sistemas trifásicos a tensão a que vão estar sujeitos é a tensão simples (tensão fase-terra). O TI tem de ser dotado de isolamento suficiente para suportar essa tensão.
- **Corrente nominal primária** - É o valor de corrente para o qual o TI é dimensionado, e no qual se baseia a sua performance, desde o ponto de vista de aquecimento, número de espiras, potência e classe de precisão. As correntes nominais primárias normalizadas são: 10; 12,5; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 75 A; e correspondentes múltiplos de 10 (100; 125; 150, etc.)[7].
- **Corrente secundária nominal** - É o valor da corrente secundária que identifica o TI, para o qual ele foi dimensionado e no qual se baseia a sua performance. do ponto de vista de aquecimento, número de espiras, potência e classe de precisão. Os valores normalizados para a corrente nominal secundária dos TI são: 1; 2 e 5 A. Nas instalações da Rede Ferroviária Nacional habitualmente são utilizados TI com 5 A no secundário [7].

- **Classe de Precisão** - Na zona das correntes nominais (fora da saturação), os TI são agrupados em classes de precisão, conforme o erro máximo admissível quando fornecem a potência de precisão à carga de precisão (valor para os quais os erros se mantêm dentro de certos limites em modo de utilização prescrito). As classes de precisão mais utilizadas estão representadas na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 Classes de precisão dos TI [10]

Tipo	Classe	Erro de Corrente (%)	Desfasamento (Centiradianos)	Aparelhagem
Medida	0,2	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	Contadores (Energia ativa e reativa)
	0,5	$\pm 0,5$	$\pm 0,9$	Medida e contagem
	1	$\pm 1$	$\pm 1,8$	Conversores de medida
Proteção	5P	$\pm 1$	$\pm 1,8$	Relés diferenciais, de distância e Máxima Intensidade
	10P	$\pm 3$		Relés de Máximo de Intensidade

- **Potência de precisão nominal** - É o valor da potência aparente (em VA com um fator de potência especificado) que o transformador pode fornecer a uma carga igual à carga de precisão, para a corrente secundária nominal [12]. As potências de precisão normalizadas são as seguintes: 5; 10; 15; 30; 60 VA. A potência de precisão deve ser determinada em função da totalidade da carga ligada ao enrolamento secundário, nomeadamente consumo próprio dos aparelhos e consumo próprio dos condutores que fazem a ligação entre o enrolamento secundário e os aparelhos [7].
- **Carga de precisão** - É o valor da carga no qual são baseados os valores de precisão, isto é, as condições para os quais os erros se mantêm em determinados limites em modos de utilização prescritos [12].

Sempre que o TI disponha de mais do que um enrolamento secundário devem ser definidas as características individuais de cada um desses enrolamentos, em termos de classe de precisão, potência de precisão e corrente nominal secundária.

#### 2.2.3.4 Transformadores de tensão

Um transformador de tensão (TT) é um transformador de medida, no qual a tensão secundária é, nas condições de normais de utilização, praticamente proporcional à tensão primária e desfasada em relação a essa de um ângulo aproximadamente nulo, para um sentido apropriado das ligações [12]. Os TT podem ser dotados de circuitos secundários múltiplos, com características distintas, para as diversas finalidades pretendidas: medida, proteção, contagem de energia, etc. [7]. A corrente no circuito secundário dos TT assume normalmente valores muito baixos. Deve por isso evitar-se a ligação dos terminais secundários do TT em curto-circuito uma vez que as correntes elevadas podem danificar os enrolamentos do TT. Por esta razão os circuitos do secundário são normalmente protegidos com disjuntores ou fusíveis BT [7].

Os TT são genericamente de três tipos:

- **Indutivos** - Estes transformadores são do tipo magnético bobinado com o circuito magnético suportado por duas bobinas: o primário destina-se a ser ligado a um condutor de fase e a terra, os outros dois terminais são ligados ao aparelho de medida, proteção ou contagem conforme se ilustra na Figura 2-30.

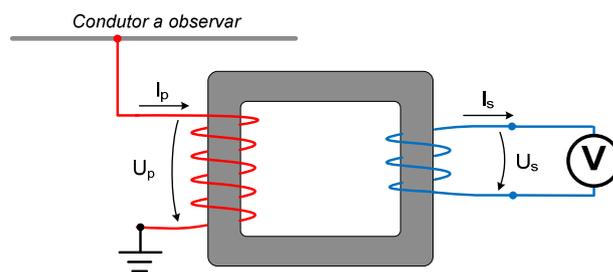
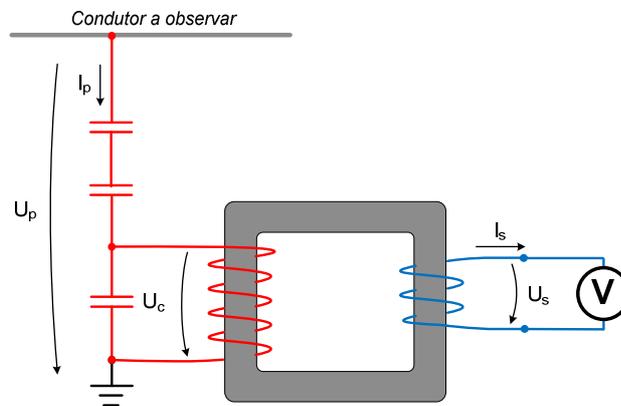


Figura 2-30 Diagrama de ligações de um transformador de tensão indutivo [7]

- **Capacitivos** - Os TT capacitivos são compostos por uma cadeia de condensadores, colocados entre o condutor de fase a observar e a terra associados a um TT bobinado, conforme Figura 2-31. Desta forma, a tensão aplicada ao enrolamento primário ( $U_c$ ) é apenas uma parte da tensão do sistema ( $U_p$ ). Este tipo de TT é

utilizado geralmente quando a tensão primária é igual ou superior a 150 kV, uma vez que apresentam custos de isolamento muito inferiores quando comparados com os TT puramente indutivos [7].



**Figura 2-31 Diagrama de um transformador de medida de tensão capacitivo [7]**

- **Não convencionais** - Estes equipamentos utilizam uma tecnologia que usa fibra óptica multimodo e um cristal dito de Pockels, cujo funcionamento é baseado no efeito de Pockels [12] descrito em seguida.

O sistema ótico compreende um laser que, após um polarizador, permite a injeção de uma onda monocromática polarizada linearmente no cristal. O sensor de alta tensão é constituído por um cristal entre a alta tensão e a terra. Dois eléctrodos transparentes permitem aplicar a alta tensão entre as duas faces opostas do cristal. A onda monocromática polarizada linearmente injetada no cristal vai produzir duas componentes segundo dois eixos perpendiculares. O campo eléctrico provoca um atraso de uma destas componentes, devido à diferença de velocidade de propagação da luz. Na Figura 2-32 observa-se que o sensor inclui o prisma do lado da alta tensão do cristal. Este prisma reflete a luz de volta para o lado da terra.

Depois de sair do sensor a luz é dividida em duas componentes em quadratura, que são transmitidos para o módulo de electrónica onde são convertidos em sinais eléctricos. Estes dois sinais de informação são suficientes para reconstruir a forma de onda e da grandeza da tensão por meio de um processador digital de sinal [14]. A informação de tensão é obtida por interpolação da informação extraída a partir de segmentos de amostragem do sinal, amplificando o sinal para obter no secundário uma tensão proporcional à do primário.

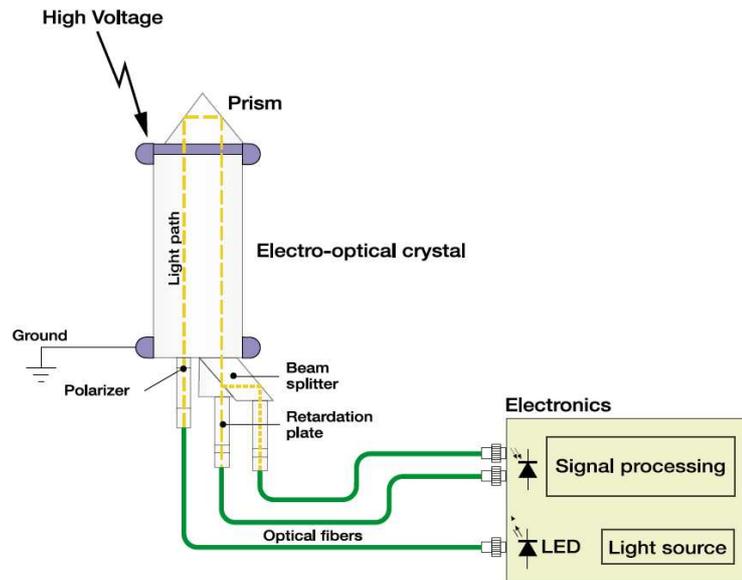


Figura 2-32 Medida eletro-óptica de tensão [14]

Estes dispositivos eletro-óticos, são imunes às interferências eletromagnéticas, tornando-se mais precisos o que torna esta tecnologia muito útil para registrar medidas e condições anómalas em tempo real dentro das subestações [15]. Nas SST da REFER não são usados estes transformadores não convencionais.

Os TT são tipicamente caracterizados pelos seguintes atributos:

- **Tensão nominal primária** - Valor de tensão primária que figura na designação do transformador e segundo o qual são determinadas as suas condições de funcionamento.
- **Tensão nominal secundária** - Valor de tensão secundária que figura na designação do transformador e segundo o qual são determinadas as suas condições de funcionamento. É para este valor de tensão que o TT é dimensionado em termos de aquecimento, número de espiras, potência e classe de precisão [7]. Os valores normalizados para a tensão nominal secundária dos TT são: 100; 110; 200V. Nas instalações da Rede Ferroviária Nacional são utilizados TT com 100V e  $\frac{100}{\sqrt{3}}$  V no secundário.

- **Classe de precisão** - Os TT são agrupados em classes de precisão, de acordo com o erro máximo admissível quando fornecem a potência de precisão à tensão nominal. As classes de precisão mais utilizadas são a Classe 0,2 a 0,5, para medidas de energia de grande precisão e Classe 3, 3P e 6P, para relés de proteção. Os erros correspondentes às classes de precisão estão expressos em percentagem da tensão nominal [7]. Excetuando a classe de precisão vocacionada para os relés de proteção em que a precisão é garantida para uma amplitude elevada de tensão, a precisão nas restantes classes é apenas garantida para valores de tensão próximos da tensão nominal [7].
- **Potência de precisão** - Esta grandeza é determinada em função da potência de precisão da carga que o transformador deve alimentar. A potência de precisão implica a indicação do fator de potência da carga. As potências de precisão normalizadas são as seguintes: 10; 15; 25; 30; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500 VA [7]. A potência de precisão deve ser determinada em função da totalidade da carga ligada ao enrolamento secundário, nomeadamente o consumo próprio de cada um dos aparelhos. Sempre que o TT disponha de mais do que um enrolamento secundário devem ser definidas as características individuais de cada um desses enrolamentos, em termos de classe de precisão, potência de precisão e tensão nominal secundária [7].

No emprego dos TT deve-se ter em conta o fenómeno da ferro-ressonância. A ferro-ressonância, é um fenómeno de ressonância especial que ocorre quando há a interação de indutância não linear adicionado de uma capacidade com um núcleo magnético saturável alimentado por uma fonte sinusoidal. Esta situação pode proporcionar sobretensões de 4 a 5 vezes o valor nominal num TT indutivo, podendo danificar o seu isolamento [10]. Este fenómeno é causado por descargas atmosféricas, manobras de disjuntores, energização ou desenergização de transformadores ou cargas [12].

Face ao acima exposto, os TT indutivos participam nesse fenómeno, mas são indispensáveis nos painéis equipados com proteção de distância, que tem a necessidade de uma imagem correta da tensão mesmo no início do curto-circuito. Por este motivo é

necessário ter associado ao transformador de tensão indutivo uma proteção antiferro-resonância [12]. Este fenómeno não se coloca nos transformadores capacitivos.

### **2.2.3.5 Tipos de proteções**

Em regra as proteções dos sistemas ferroviários têm como função reagirem a condições anormais da rede de tração ou de defeitos nos circuitos primários, através de informações recolhidos em um ou vários pontos da rede. A informação obtida encontra-se na forma de sinais eléctricos. Em alguns casos a informação pode derivar de efeitos eléctricos que são detetados através de formas não eléctricas (por exemplo, a elevação da temperatura dos transformadores, ou a deslocação ou pressão de gás nas cubas dos transformadores). Os sinais eléctricos adquiridos são a tensão, corrente, ou a relação de fase podendo ser estas grandezas combinadas entre elas, tais como a potência e impedância.

A recolha destes sinais é adquirida num ponto da rede por intermédio de TI e TT que fazem parte do conjunto do sistema de protecção. Em caso de curto-circuito o defeito deve ser eliminado de forma seletiva a fim de reduzir as interrupções ao mínimo e no tempo compatível de atuação (os curto-circuitos são assimétricos, fase-terra ou entre fases).

Para o cálculo de um curto-circuito é necessário calcular a potência e a corrente de curto-circuito, com vista ao dimensionamento dos componentes aos esforços eletrodinâmicos, determinação do poder de corte da aparelhagem e escolha da aparelhagem de protecção, tendo em conta o valor da regulação da grandeza atuante, o tempo e a seletividade.

No caso de uma sobrecarga de uma linha ou transformador, o elemento sobrecarregado deverá ser mantido em serviço. Se possível, enquanto esse elemento não atingir uma temperatura perigosa, na espera da mesma desaparecer, evitando o disparo [13].

Um relé de protecção é um equipamento que deteta a variação de uma ou mais grandezas (tensão, corrente, impedância, etc.), tendo como função controlar estas grandezas e provocar o disparo dos disjuntores, ou apenas sinalizar a ocorrência emitindo alarmes.

Os tipos de relés de proteção usados em SST são os seguintes [16]:

- **Relés de tensão** - Este princípio de proteção é de funcionamento temporizado ou não, assim que for ultrapassado o valor da regulação de tensão, tais como máxima tensão, mínima tensão e falta de tensão.
- **Relé de frequência** - Neste tipo de proteção, são fixados dois limites de frequência inferior e superior, para os quais haverá operação.
- **Relé de corrente** - Este princípio de proteção pode ser de funcionamento temporizado ou não, assim que for ultrapassado o valor da regulação de corrente, tais como máxima corrente, corrente diferencial, homopolar, cuba e sobrecarga.
- **Relés de impedância** - Mínima impedância. Este relé na sua forma mais simples, calcula a impedância de defeito a partir, unicamente da tensão e da corrente de curto-circuito medidas no ponto da sua instalação. O seu funcionamento baseia-se na comparação da impedância de curto-circuito com a réplica da impedância da linha para determinar a posição de defeito.
- **Relés de potência** – Estes relés realizam a proteção através da inversão do fluxo de potência ativa. O sentido da potência é determinado pela comparação das correntes de fase e a tensão composta para o cálculo da potência ativa, com magnitude e sentido.

Um dos relés usados na REFER é o TPU S420 da EFACEC, que contém algumas funções acima descritas, bem como funções de automação (tais como religação automática), sendo efetuadas as parametrizações através do *software* WinProt 4 através de portas lógicas básicas.

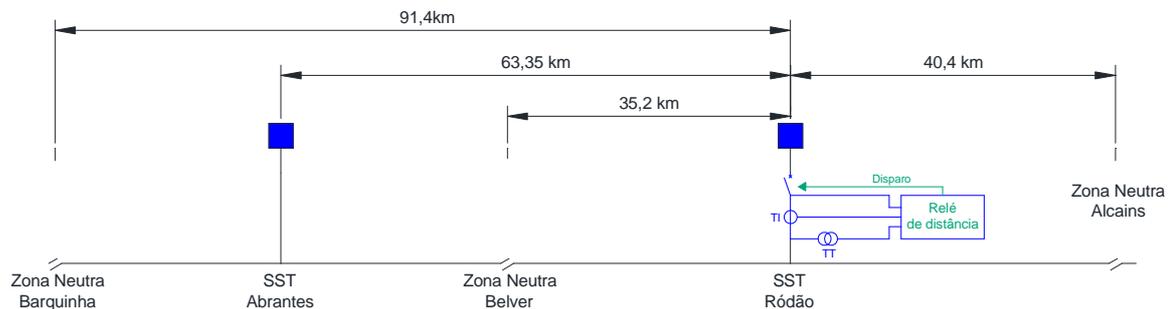
As proteções de distância são proteções que necessitam de duas grandezas atuantes, a tensão e a corrente. Este tipo de proteção é uma das mais usadas no mundo neste tipo de redes, pelas razões que se apresentam [13]:

- Simplicidade do princípio de medida;

- A sua regulação (distância) é função da impedância do circuito a proteger, apresentando também a facilidade de funcionar para valores de corrente de defeito próximos ou inferiores à corrente de carga máxima.

Um relé de distância, durante o seu funcionamento normal monitoriza a impedância de carga ( $Z_{Carga}$ ) que atravessa a catenária para uma determinada zona. Uma zona de medida de distância é caracterizada pelos seus limites em resistência e em reatância (onde entra o valor da distância a proteger) e pela sua direção. No caso do defeito se encontrar nos limites de regulação de uma zona, é enviada ao disjuntor uma ordem de disparo e após um tempo correspondente ao valor da regulação da temporização para a zona em causa.

Para demonstrar a aplicação de um relé de distância em redes elétricas de tração, considere-se um caso prático, com o cálculo dos respetivos valores das parametrizações dos relés. Na Figura 2-33 apresenta-se o esquema unifilar baseado num relé situado na SST de Vila Velha de Ródão.



**Figura 2-33 Esquema unifilar de princípio da proteção de distância**

Para um defeito franco cuja resistência de contato é nula em qualquer ponto da catenária, a tensão ( $V_R$ ) vista pelo relé de distância desde o ponto da sua instalação, será a queda de tensão ao longo da linha até à impedância de defeito  $Z_F$ , provocada pela corrente de curto-circuito que a atravessa  $I_{cc}$  dado pela equação 2-3.

$$V_R = I_{cc} \cdot Z_F \quad 2-3$$

A partir das medidas de tensão e corrente é possível calcular aproximadamente a impedância da catenária até ao defeito  $Z_F$  e compará-la com a regulação de impedância do relé, também conhecido como alcance do relé. Para se calcularem as parametrizações do relé de distância é necessário atender à Figura 2-34 que permite modelizar a rede a proteger.

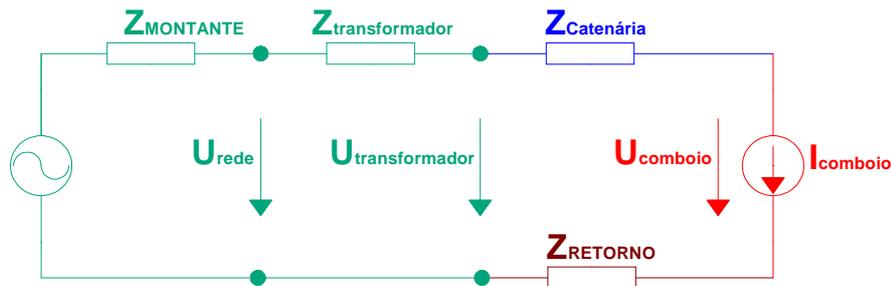


Figura 2-34 Esquema unifilar da rede de tração elétrica de via única, adaptado de [16]

As impedâncias da catenária e de retorno, foram calculadas através do programa interno da REFER ‘SICAFE- Módulo de cálculo elétrico’, onde se obteve o valor da impedância conjunta:  $\underline{Z}_{Catenária} + \underline{Z}_{Retorno} = 0,16 + j0,403 = 0,434 \cdot e^{j68,35^\circ} \Omega / km$  para via única.

Como os relés de distância são usados como relés secundários, isto é, são alimentados com as tensões e correntes obtidas no secundário dos transformadores de tensão e de corrente, o relé mede uma impedância secundária que resulta da relação de transformação dos transformadores de medida.

Como as impedâncias do primário e secundário dos transformadores são dadas respetivamente pelas equações 2-4 e 2-5:

$$Z_{Pr\ imário} = \frac{U_{Pr\ imário}}{I_{Pr\ imário}} \quad 2-4$$

$$Z_{Secundário} = \frac{U_{Secundário}}{I_{Secundário}} \quad 2-5$$

Aplicando as equações 2-4 e 2-5 e respetivas relações de transformação  $r_{Corrente}$  e  $r_{Tensão}$  resulta na equação 2-6.

$$Z_{\text{Secundário}} = \frac{U_{\text{Primário}}}{I_{\text{Primário}}} \cdot \frac{r_{\text{Corrente}}}{r_{\text{Tensão}}} = Z_{\text{Primário}} \cdot \frac{U_{\text{secundário}}}{U_{\text{Primário}}} \cdot \frac{I_{\text{Primário}}}{I_{\text{Secundário}}} \quad 2-6$$

Com:

- $U_{\text{Primário}}$  - Tensão simples aplicada ao enrolamento primário do TT;
- $U_{\text{Secundário}}$  - Tensão simples aplicada ao enrolamento secundário do TT;
- $r_{\text{Tensão}}$  - Relação de transformação de tensão;
- $I_{\text{Primário}}$  - Corrente aplicada ao enrolamento primário do TI;
- $I_{\text{Secundário}}$  - Corrente aplicada ao enrolamento secundário do TI;
- $r_{\text{Corrente}}$  - Relação de transformação de corrente.

As relações de transformação dos transformadores existentes neste caso são:

$$r_{\text{Corrente}} = \frac{900}{5} = \frac{I_n}{I_r} \quad e \quad r_{\text{Tensão}} = \frac{25000}{100} = \frac{U_n}{U_r} \quad 2-7$$

Pela substituição destas relações de transformação na equação 2-6 obtém-se a impedância vista do secundário em função da impedância do primário. Equação 2-8.

$$Z_{\text{Secundário}} = \frac{U_{\text{Primário}}}{I_{\text{Primário}}} \cdot \frac{r_{\text{Corrente}}}{r_{\text{Tensão}}} = Z_{\text{Primário}} \cdot \frac{100}{25000} \cdot \frac{900}{5} = Z_{\text{Primário}} \cdot 0.72 \quad 2-8$$

Os relés de distância são geralmente utilizados para funcionarem em zonas de proteção devidamente identificadas. Assim, são definidas zonas de distância e o respetivo escalonamento de tempo. Neste caso, o relé está na SST de Ródão, sendo a primeira zona definida entre Rodão e a zona neutra de Belver (Zona 1), uma segunda zona entre a SST de Rodão e a SST de Abrantes (Zona 2) e uma terceira zona definida pela SST de Ródão e a

Zona neutra da Barquinha (Zona 3). Está também definida na primeira zona o troço SST de Ródão à Zona Neutra de Alcains.

Segundo [17] e [18], a primeira zona é regulada para cobrir 115% da distância, que irá também servir de proteção de socorro a outros relés adjacentes.

O cálculo do limite de reatância ( $Z_{1-Alcance}$ ) para a zona 1 de proteção, vem dado pela expressão 2-9:

$$Z_{1-Alcance} = 1,15 \cdot (Z_{Catenária} + Z_{Retorno}) \cdot Distância \cdot \frac{r_{corrente}}{r_{tensão}} \quad 2-9$$

Assim, substituindo na expressão 2-8 a expressão 2-9 obtemos a impedância vista pelo relé para a zona 1 que corresponde a  $Z_{1-Alcance} = 1,15 \cdot 35,2 \cdot (0,43 \angle 68,35) \cdot 0,72 = 12,53 \angle 68,35 \Omega$ .

Para o cálculo do limite resistivo do relé ( $Z_{1X}$ ), admite-se uma resistência de contacto catenária e o carril  $R_{contacto}$  de  $15 \Omega$ , ( $Z_{1X}$ ) vem dada pela expressão 2-10:

$$Z_{1X} = R_{contacto} \cdot \frac{r_{corrente}}{r_{tensão}} + Re(Z_{Catenária} + Z_{Retorno}) \cdot Distância \cdot \frac{r_{corrente}}{r_{tensão}} \quad 2-10$$

Aplicando a expressão 2-10 obtém-se  $Z_{1X} = 15 \cdot 0,72 + 0,16 \cdot 35,2 \cdot 0,72 = 14,85 \Omega$ .

O limite de reactância ( $Z_{2-Alcance}$ ) vista pelo relé para a zona 2 corresponde a:

$$Z_{2-Alcance} = 1,15 \cdot 63,348 \cdot 0,43 \angle 68,35 \cdot 0,72 = 22,56 \angle 68,35 \Omega$$

Para calcular o limite de parametrização resistivo ( $Z_{2X}$ ) do relé, temos de ter em consideração as cargas que poderão circular no circuito da rede de tração.

A potência aparente de uma unidade de tração (Loc 5600) é de  $S=5600$  kVA, sabendo que

a tensão de catenária é de 25 kV, a corrente nominal será  $I = \frac{S}{U} = \frac{5600}{25} = 224$  A.

O caso mais desfavorável ocorre quando circulam 3 cargas, o resultando em uma corrente nominal de 672 Ampére.

Deste modo a resistência da carga do lado do secundário é  $R_{carga} = \frac{25000}{672} \cdot 0,72 = 26,79 \Omega$

O defasamento da carga tem o valor de 0,95 indutivo, no caso mais desfavorável, pelo que a impedância de carga vista pela proteção da subestação de tração é de,  $Z_{carga-proteção} = 26,79 \cdot \cos(18,2^\circ) + j26,79 \cdot \sin(18,2^\circ) = 25,48 + j8,37 \Omega$

Segundo [18], o limite resistivo do relé para a zona 2 ( $Z_{2X}$ ), deverá manter-se afastado da zona de carga máxima com uma margem de 20% obtendo-se assim,  $Z_{2X} = 0,8 \cdot \text{Re}( Z_{carga-proteção} ) = 20,384 \Omega$

O limite de reatância ( $Z_{3-Alcance}$ ) vista pelo relé para a zona 3 é:

$$Z_{3-Alcance} = 1,15 \cdot 91,4 \cdot 0,43 \angle 68,35^\circ \cdot 0,72 = 32,54 \angle 68,35 \Omega$$

Para garantir o afastamento de 20% da zona de carga máxima o limite resistivo ( $Z_{3X}$ ) virá igual ao limite resistivo ( $Z_{2X}$ ), caso contrário a zona de carga entraria na zona 1 de disparo.

O ângulo de inclinação/regulação será o da impedância do conjunto catenária e retorno. Estando na presença de todos os limites que caracterizam os relés de distância pelos seus limites de resistência e reatância, estamos então em condições de traçar o diagrama de impedâncias vista pelo relé de distância (Figura 2-35).

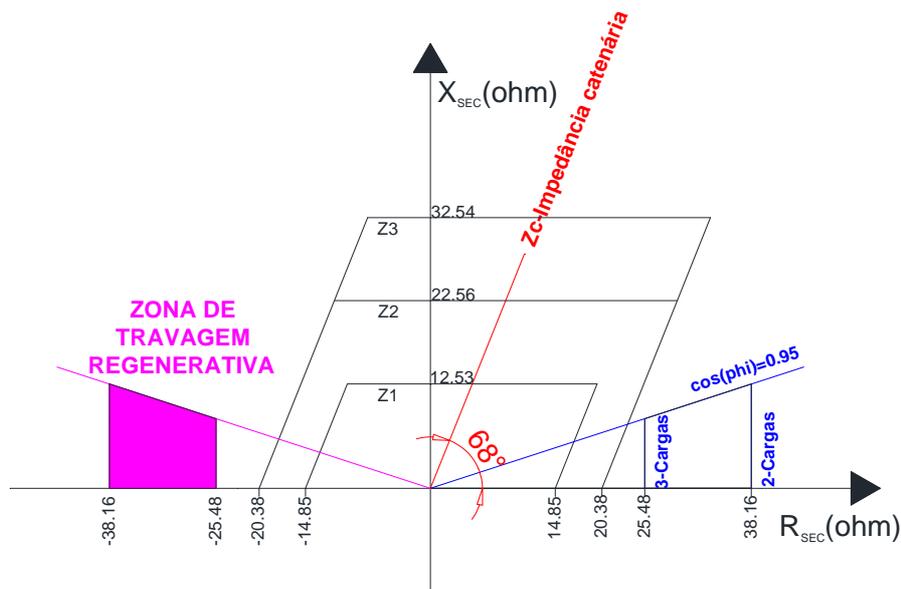


Figura 2-35 Diagrama das impedâncias vistas pelo relé de distância da SST de Ródão  $R_{sec}$  e  $X_{sec}$ .

Sempre que a impedância de defeito  $Z_F$  for menor que a impedância  $Z_{catenária} + Z_{retorn}$  (qualquer ponto que caia dentro de qualquer uma das zonas 1, 2 e 3), significa que o defeito ocorre na zona de proteção do relé, pelo que será emitida uma ordem de disparo para o disjuntor correspondente ao valor da regulação da temporização para essa zona.

O funcionamento das zonas de distância deverão ser geridas pelos temporizadores de zonas, podendo ainda depender de outros sinais de autorização ou de bloqueio de outras proteções a montante, ou a jusante, da SST que está a proteger ( $Temporização_{zona1} < Temporização_{zona2} < Temporização_{zona3}$ ). Dadas as proteções de *back-up*, isto é, de proteção de 115% face ao comprimento do troço a proteger, a impedância da catenária e retorno (reta representada a vermelho na Figura 2-35) encontra-se completamente protegida no troço pretendido. Segundo [17] é comum aplicar na zona 1 a direção direta (quando a corrente transita da subestação para a catenária). Contudo tanto esta como as outras zonas podem ser definidas para ter um alcance inverso, que é usado quando o comboio efetua uma frenagem regenerativa, embora geralmente os comboios apresentem um fator de potência elevado (quase 1), para evitar o aparecimento de uma sobretensão na catenária.

### 2.2.3.6 Proteções próprias dos transformadores

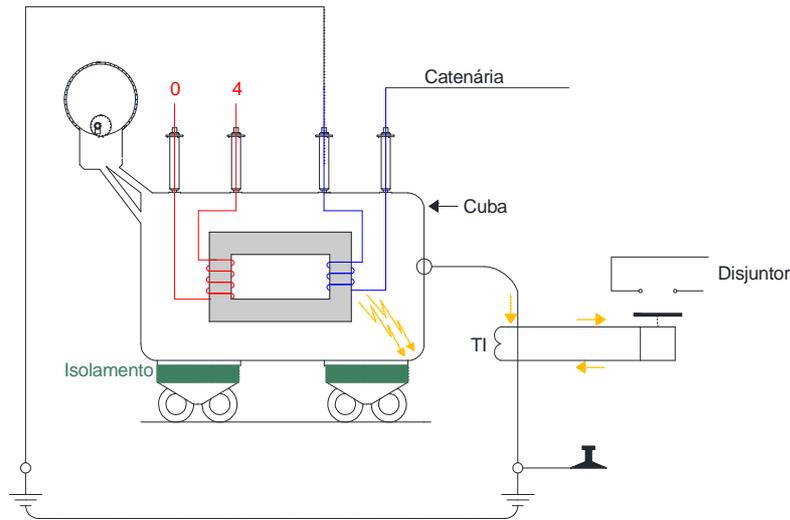
Os defeitos internos de um transformador são aqueles que se dão no interior da cuba do transformador. As avarias mais prováveis em transformadores poderão ser [13]:

- Defeitos entre um enrolamento e a massa;
- Curto-circuitos entre enrolamentos de fases diferentes;
- Defeitos entre espiras de um mesmo enrolamento;
- Defeitos provocados por correntes de Foucault no circuito magnético;
- Defeitos motivados pela perda de óleo, provocando um aquecimento interno excessivo;
- Defeitos nas conexões entre os transformadores de corrente e os terminais do transformador de potência;

Quando se verifica este tipo de avarias no transformador, além dos danos que o mesmo pode sofrer nas partes afetadas, existe o perigo de incêndio, pelo que é necessário usar aparelhos de deteção e proteção de rápida intervenção. As proteções próprias normalmente usadas são:

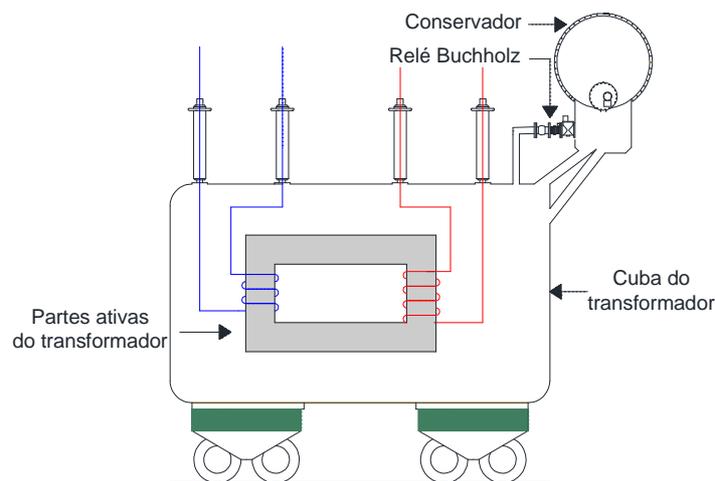
- **Proteções de massa (cuba)** - Esta proteção só protege o transformador contra os defeitos à massa da cuba. A sua aplicação exige um grande isolamento da massa da cuba em relação à terra, sendo a resistência de isolamento mínima  $>10M\Omega$  [19]. A cuba está ligada à terra por uma conexão que passa no seu trajeto para a terra por um transformador toroidal que alimenta uma proteção de máxima intensidade.

Em caso de defeito forma-se um circuito fechado pela terra, percorrendo o primário do TI, que por sua vez alimenta um relé de corrente que atua um contato desligando o disjuntor de alimentação do transformador, conforme Figura 2-36.



**Figura 2-36 Esquema de princípio de funcionamento da proteção de cuba**

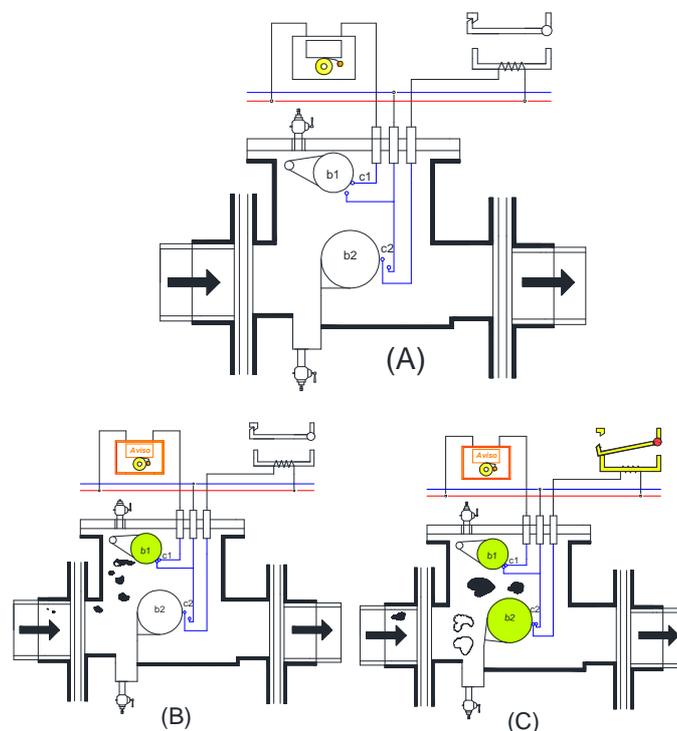
- Proteção de formação de gás (Buchholz)** - Este tipo de proteção destina-se à detecção de gases no óleo, resultantes de combustões orgânicas originadas por pontos quentes devido à abertura de espiras e ao aparecimento de curto-circuitos no interior dos transformadores. Esta proteção baseia-se num princípio de funcionamento mecânico, sendo aplicado apenas a transformadores imersos em óleo com reservatório de expansão, ou conservador de óleo, e serve para detetar defeitos internos dos enrolamentos ou do circuito magnético, Figura 2-37.



**Figura 2-37 Esquema de proteção Buchholz**

O princípio de funcionamento consiste no seguinte: todo o defeito de isolamento num transformador produz bolhas de gás muito antes do curto-circuito. Por sua vez, este dá lugar a uma produção de gás muito mais intensa e ao deslocamento de óleo. Quando o

transformador tem um conservador, a tubagem que liga a cuba do transformador ao conservador é atravessada pelo gás, que se produz lentamente e que se acumula (caso de um simples ponto quente) ou por um jato de óleo que atravessa a tubagem com uma certa velocidade (caso de arcos eléctricos intensos). Na Figura 2-38 apresenta-se o princípio de funcionamento do relé Buchholz, em que na Figura 2-38 A) se observa no interior do depósito do relé a existência de dois flutuadores b1 e b2 (que no estado de repouso se encontra na posição superior), associados a contactos eléctricos c1 e c2. Se ocorrer uma fuga de óleo contínua, o nível de óleo do relé baixa e com ele o flutuador superior (b1) baixa para a posição inferior, conforme se observa na Figura 2-38 B). A cerca de meio caminho o ímã acoplado magneticamente ao flutuador passa pelo interruptor magnético que atua um contacto eléctrico (c1), provocando a atuação de um sinal de alarme. Se (depois do alarme) continuar a existir perda de óleo, o nível deste baixará o que vai provocar o abaixamento do flutuador inferior (b2), fechando o contacto c2, conforme se observa na Figura 2-38 C), dando-se assim o corte do aparelho a proteger através da atuação do disjuntor.



**Figura 2-38 Princípio de funcionamento do relé Buchholz: A) -Estado de repouso, B)- Passagem de gás pelo relé ou fuga de óleo e deslocamento do flutuador b1, disparo de alarme, C)- Ordem de atuação do disjuntor para proteção do transformador**

- **Proteção de nível de óleo** - É usado para detetar eventuais fugas de óleo. O detetor de nível encontra-se montado no compensador, conforme Figura 2-39. Quando o nível atinge um valor baixo faz atuar um contacto elétrico que despoleta o desarme do disjuntor do lado da alimentação do transformador.

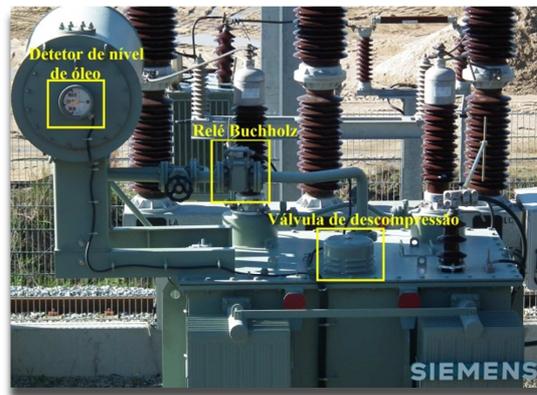


Figura 2-39 Proteções próprias do transformador

- **Proteção de temperatura** - São usados termómetros equipados com micro-interruptores de mercúrio para detetar a temperatura dos óleos e dos enrolamentos. O aumento da temperatura provoca no fluido do tubo capilar o movimento dos ponteiros e a atuação dos ponteiros micro-interruptor. Normalmente são utilizados dois níveis, o primeiro de alarme e o segundo de desarme do disjuntor de proteção do transformador, conforme se mostra na Figura 2-40.

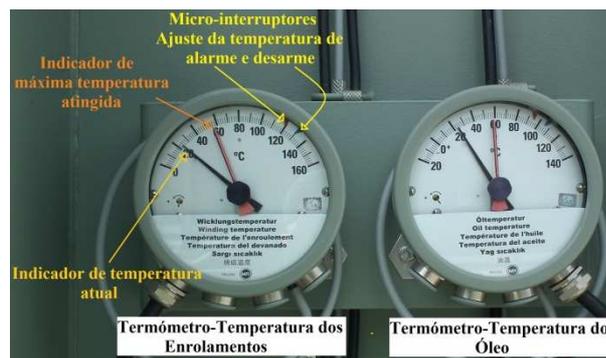


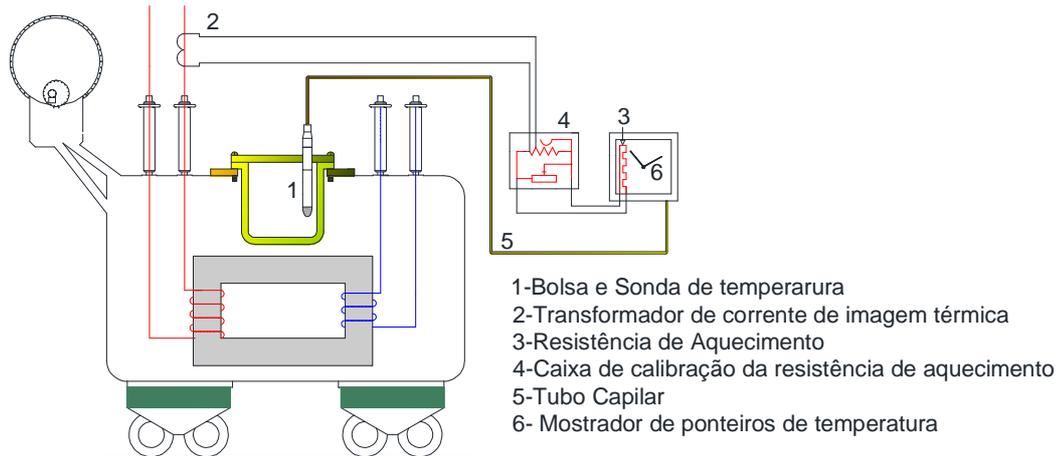
Figura 2-40 Termómetros de temperatura do transformador

- **Proteção de sobrepressão** - Nos transformadores imersos em óleo, a formação intensa de gases, resultantes de descargas elétricas, pode fazer aumentar

exageradamente a pressão interna. Assim, uma válvula de descompressão montada na cuba do transformador, Figura 2-39, permite libertar a pressão interna e evitar consequências graves no transformador. A válvula está equipada com um micro-interruptor que ao ser atuado provoca o desarme do disjuntor do transformador.

- **Proteção de imagem térmica** - Dado os elevados níveis de tensão nos enrolamentos do transformador, é impeditivo a instalação de sondas de medição diretamente nos seus terminais. Logo, a medição da sua temperatura é efetuada por uma imagem térmica, um processo de inferência direta da temperatura através da temperatura do óleo e da corrente de carga do transformador. Essa medição é feita numa bolsa constituída por um recipiente metálico montado no tampo do transformador. A medição direta da temperatura do óleo superior é feita por imersão de uma sonda na bolsa de óleo alojada na tampa da cuba, conforme Figura 2-41, combinada com o aquecimento verificado na resistência percorrida por uma corrente reduzida (proporcional à corrente do transformador). Esta resistência é ajustada de acordo com parâmetros definidos em projeto e pelo ensaio de aquecimento do transformador, de modo a obter uma leitura da temperatura do “ponto mais quente”. A este acessório dá-se o nome de termómetro de enrolamentos ou imagem térmica. A corrente do TI ao aquecer a sonda em relação à temperatura do topo do óleo, correspondente à carga do transformador, moverá o líquido expansível através do tubo capilar, fazendo com que o líquido expansivo no interior da sonda sofra uma expansão que vai colocar em marcha os ponteiros de medição, produzindo uma indicação correspondente à temperatura do enrolamento.

Mecanicamente acoplados ao sistema de medida, existem blocos de contactos, constituídos por micro-interruptores, como se pode ver na Figura 2-40, que geram um sinal de desarme do disjuntor quando a temperatura atinge valores perigosos.



**Figura 2-41 Princípio de funcionamento da proteção de imagem térmica.**

### 2.2.4 Encravamentos

Qualquer manobra efetuada numa SST, para colocar ou retirar determinada aparelhagem de serviço para testes, exploração e manutenção tem o seu risco associado. A ordem das manobras a executar obedece a regras impostas pelas características físicas dos aparelhos a manobrar, de modo a evitar a sua destruição e garantir a segurança na sua operação. No campo da segurança das SST, existem sistemas mecânicos e elétricos destinados a condicionar os modos de exploração das instalações para evitar as manobras incorretas dos equipamentos, os quais são designados de encravamentos. Designa-se “condicionado” o aparelho que se pretende manobrar e designam-se “condicionantes” as funções ou posições dos aparelhos que condicionam a manobra do aparelho condicionado [5].

As condicionantes normais são as seguintes:

- Posição do seccionador aberto;
- Posição do disjuntor aberto;
- Sinalização de falta de tensão;
- Posição de seccionador “não à terra”;
- Número da tomada de regulação do transformador de potência;
- *Watchdog* de relés de proteção;

Os encravamentos nas SST destinam-se essencialmente a controlar a supervisão da permissão/inibição das respetivas manobras, evitando falsas manobras quando é emitido um comando elétrico:

- Evitam manobras em carga dos seccionadores;
- Evitam curto-circuitos entre fases;
- Evitam a ligação em paralelo de linhas de alimentação REN/EDP, quando o fornecedor não o permite;
- Evitam a ligação em paralelo dos secundários dos transformadores de potência, nos sistemas de corrente alternada;
- Evitam ligar duas alimentações através dos disjuntores para a catenária (paralelo de disjuntores);
- Evitam a colocação de tensão nos transformadores de potência quando a tomada é demasiado alta;

#### **2.2.4.1 Tipos de encravamentos**

Os encravamentos podem ser de dois tipos, elétricos e mecânicos.

Os encravamentos elétricos têm por base a lógica booleana. Os encravamentos elétricos implementados nas SST são na sua maioria efetuados através da conjugação de relés auxiliares que refletem as condições lógicas necessárias, condicionando a manobra de equipamentos e os modos de exploração. Os sistemas de encravamento com autómato, são baseados em lógica, implementada através de *software* e *hardware* (autómatos-PLC).

Os encravamentos com relés eletromagnéticos ou com autómato são replicados através do sistema de telecomando, permitindo um reforço da segurança dos mesmos quando acionados por telecomando, uma vez que as condições de segurança são verificadas duplamente, ficando ainda residentes de uma forma distribuída ao nível dos dispositivos eletrónicos inteligentes do sistema de proteção. Como resultado são produzidas ordens para atuação específicas de cada função, bem como sinalizações por órgãos de manobra, que permitam a inibição ou execução de um comando elétrico, conforme se pode observar na

Figura 2-42. Todos os aparelhos de manobra, que têm um cadeado, estão encravados eletricamente, não permitindo ao operador do telecomando efetuar manobras não permitidas .

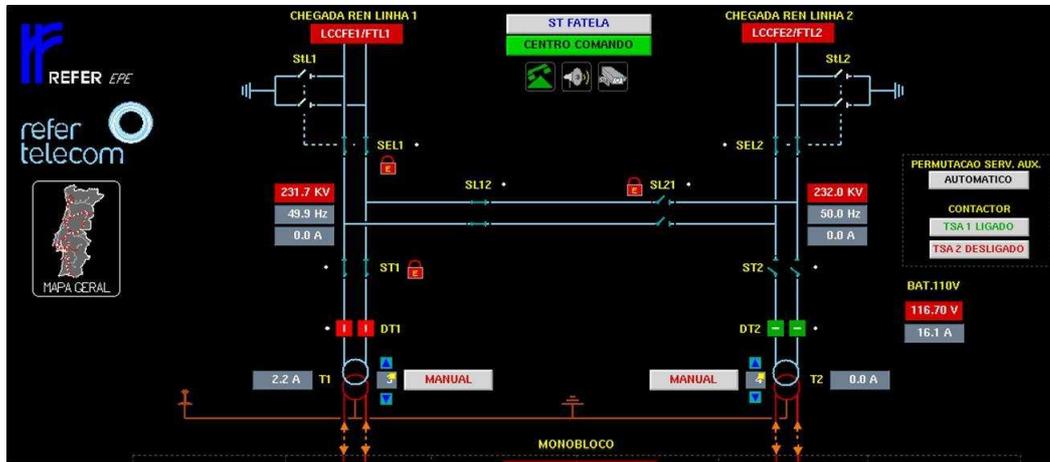


Figura 2-42 Sinótico telecomando com visualização de encravamentos.

Segundo [5], existem diversos encravamentos mecânicos implementados nas SST que podem ser classificados por:

- **Tipo A-** Encravamento mecânico próprio entre dois equipamentos (seccionador de linha/seccionador, de terra conforme mostra a Figura 2-43;



Figura 2-43 Encravamento mecânico Tipo A- Seccionador de terra e de linha à ( esquerda), pormenor do encravamento mecânico do seccionador de terra e de linha (direita)

- **Tipo B-** Encravamento mecânico com cadeado de libertação/retenção de chave (cadeado tipo *bouré*) conforme mostra a Figura 2-44. Este encravamento é usado quando existem seccionadores laterais de isolamento do disjuntor, para se garantir que a manobra dos seccionadores não será efetuada com corrente.



**Figura 2-44 Encravamento mecânico Tipo B- Após a abertura do disjuntor (esquerda), é libertada a chave SL2 A2, manobrar o seccionador (direita)**

- **Tipo C-** Encravamento de bloqueio simples com cadeado e chave conforme mostra a Figura 2-45;



**Figura 2-45 Encravamento mecânico Tipo C**

- **Tipo D-** Encravamento mecânico próprio (por atuação de seletor de posição) com corte de força motriz usado em seccionadores de subestações, conforme ilustra a Figura 2-46.

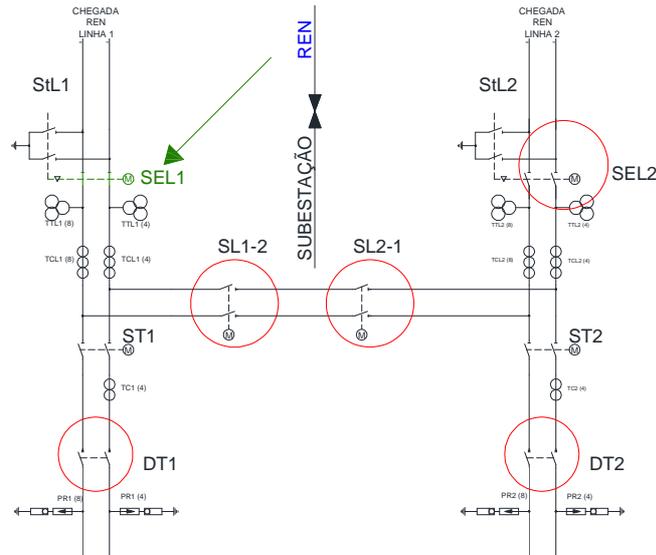


**Figura 2-46** Caixa de comando com encravamento mecânico Tipo D (esquerda), pormenor do encravamento (direita)

#### 2.2.4.2 Exemplo de condicionamento de encravamentos

Dado o esquema unifilar que se apresenta na Figura 2-47, se quisermos condicionar (neste caso abrir) o seccionador de entrada da linha SEL1, tem de se verificar uma das duas condicionantes (aparelhos abertos) possíveis:

- StL1 e DT1 e ((SL1-2) ou SL2-1);
- StL1 e DT1 e (DT2 e SEL2);



**Figura 2-47 Exemplo de condicionamento do seccionador SEL1**

### 2.2.5 Modos de exploração de subestações de tensão alternada

Para compreender os modos de exploração de uma subestação de corrente alternada, torna-se necessário compreender a tipologia das subestações. Para as diferentes tipologias existem modos de exploração e encravamentos distintos, dependendo da alimentação disponibilizada pelo fornecedor de energia, do modo de ligação dos transformadores de potência, bem como do número de vias férreas a alimentar [5]. Na Rede Ferroviária Nacional, para subestações de corrente alternada existem dois tipos de ligações:

- Ligação Bifásica;
- Ligação trifásica em “V”;

#### 2.2.5.1 Ligação Bifásica

Nesta tipologia de ligação existem normalmente dois transformadores de potência alimentados pelas mesmas duas fases, funcionando um em carga e outro como reserva, conforme ilustrado na Figura 2-8 da secção 2.1.3 deste relatório. Usualmente as SST bifásicas recebem linhas de alimentação com duas fases de linhas bifásicas. Para este caso não é necessário existir uma zona neutra junto à SST para a separação de fases, podendo no entanto existir uma zona neutra para facilitar a exploração da rede ou permitir a utilização dos dois transformadores de potência em simultâneo, quando os encravamentos

assim o permitirem. Na Rede Ferroviária Nacional existem dezassete SST a funcionar com este tipo de configurações com duas exceções:

- SST da Amadora- Existem três transformadores de potência, utilizando as fases de alimentação 0 e 4. A exploração desta SST é feita com dois transformadores em carga e um em reserva.
- SST de Pegões- Nesta SST, os dois transformadores funcionam em carga, e apesar de a instalação receber 3 fases de alimentação, atualmente só são utilizadas duas.

### 2.2.5.2 Ligação trifásica em “V”

Nesta tipologia de ligação existem três transformadores de potência em que dois funcionam em ligação “V”, e o terceiro funciona como reserva que pode substituir qualquer um dos dois. As SST com configuração em “V”, recebem linhas de alimentação com 3 fases (linhas trifásicas). Na Figura 2-48 apresenta-se a ligação em “V”, em que cada transformador é alimentado por duas fases sendo uma comum aos dois transformadores, daí a denominação em “V”.

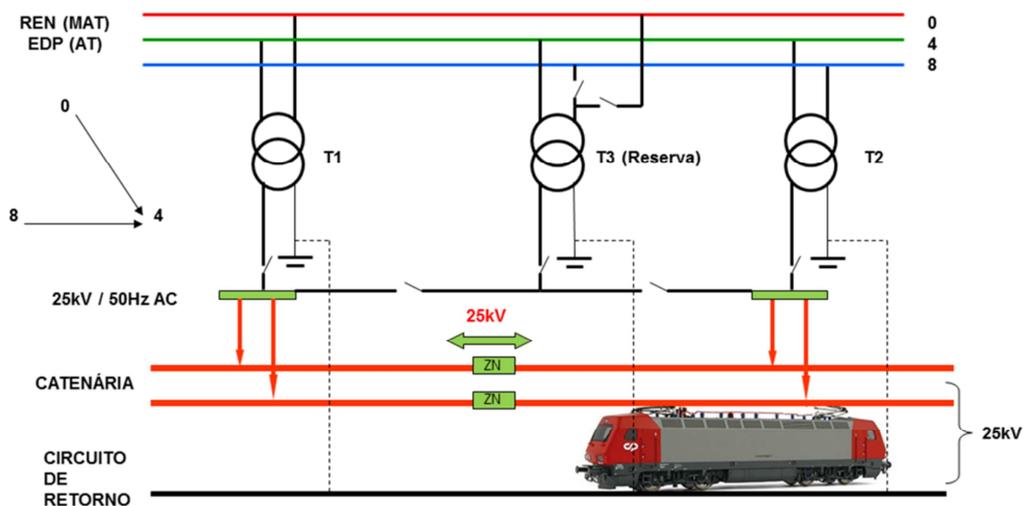
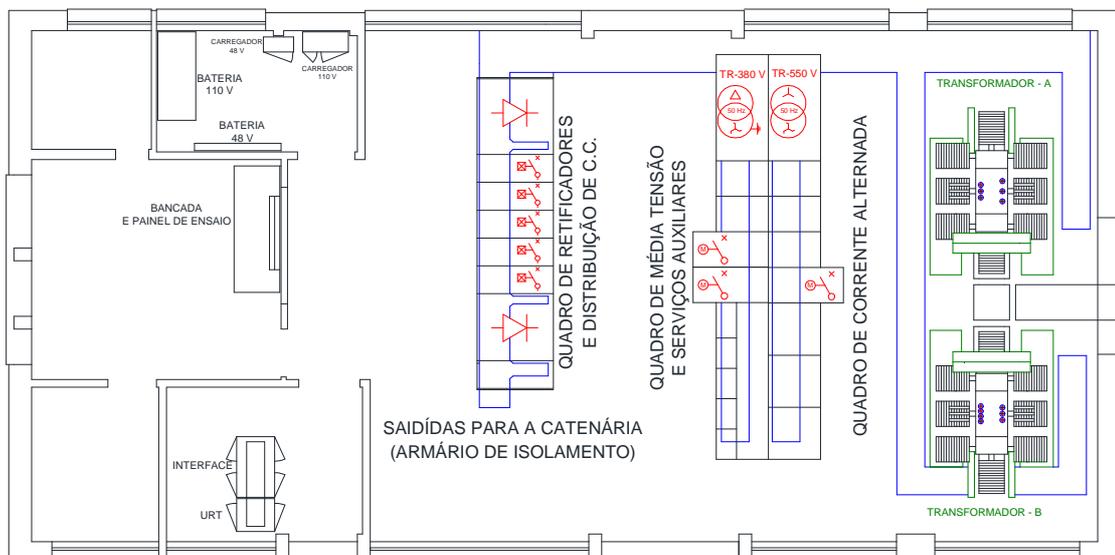


Figura 2-48 Subestação trifásica com ligação em “V” [1]

## 2.3 Subestações de corrente-contínua

### 2.3.1 Caracterização

As subestações de tração de corrente-contínua da Rede Ferroviária Nacional são caracterizadas pela ligação trifásica com retificação (SST de corrente-contínua) [5]. Neste tipo de SST existem pelo menos duas linhas trifásicas de 10 kV que alimentam as suas entradas. Nestas SST existem dois grupos de transformador-retificador que adaptam e convertem a tensão alternada de 10 kV numa tensão contínua dodecafásica que é ligada à catenária através do barramento transversal com o valor de  $1500V_{DC}$ . Para este tipo de alimentação não é necessário a existência de zonas neutras de separação de setores. Este tipo de SST encontra-se instalada em edifício de alvenaria. A exploração da instalação é feita na forma de subestação desguarnecida, ficando sob supervisão por telemedida e telecomando a partir do CCO de Lisboa. Todos os equipamentos serão instalados no interior do edifício e distribuídos de forma criteriosa, como se mostram na Figura 2-49.



**Figura 2-49 Configuração da SST de Carcavelos**

A alimentação é feita em nível de tensão de média tensão através de uma linha de alimentação trifásica. O quadro de corrente-alternada (ilustrado na Figura 2-50) é composto com os equipamentos AC com funções de corte, proteção e medição.



**Figura 2-50 Quadro AC-SST de Carcavelos**

Os transformadores de potência da subestação têm a função de reduzir o nível de tensão a aplicar aos retificadores. A Figura 2-51 corresponde às imagens dos transformadores usados na SST de Carcavelos com a potência nominal de 2 MVA.



**Figura 2-51 Transformadores da SST de Carcavelos**

A Figura 2-52 ilustra o quadro elétrico de média tensão e serviços auxiliares. É composto pelos vários quadros parciais de serviços auxiliares com aparelhagem de medição de tensão e corrente, sinalizações luminosas de presença de tensão, bem como outro tipo de sinalizações de defeitos nas subestações. O quadro serviços auxiliares de 550 V<sub>AC</sub> destina-se a alimentar armários de sinalização situados em plena via. O quadro de serviços auxiliares de 48V<sub>DC</sub> destina-se a alimentar a unidade remota de telecomando da subestação

(URT). O quadro elétrico de alimentação 110 V<sub>AC</sub> destina-se a alimentar circuitos de comando de aparelhagem e proteção de equipamentos bem como o quadro de sinalização local de alarmes que surjam por defeito na instalação. Estão ainda presentes (Figura 2-52) os disjuntores dos grupos transformador/retificadores A e B.



**Figura 2-52** Quadro elétrico de média tensão e serviços auxiliares da SST de Carcavelos

A Figura 2-53 ilustra os retificadores envolvidos por um armário de forma a evitar contactos diretos com partes ativas, bem como o armário de comando dos disjuntores da catenária.

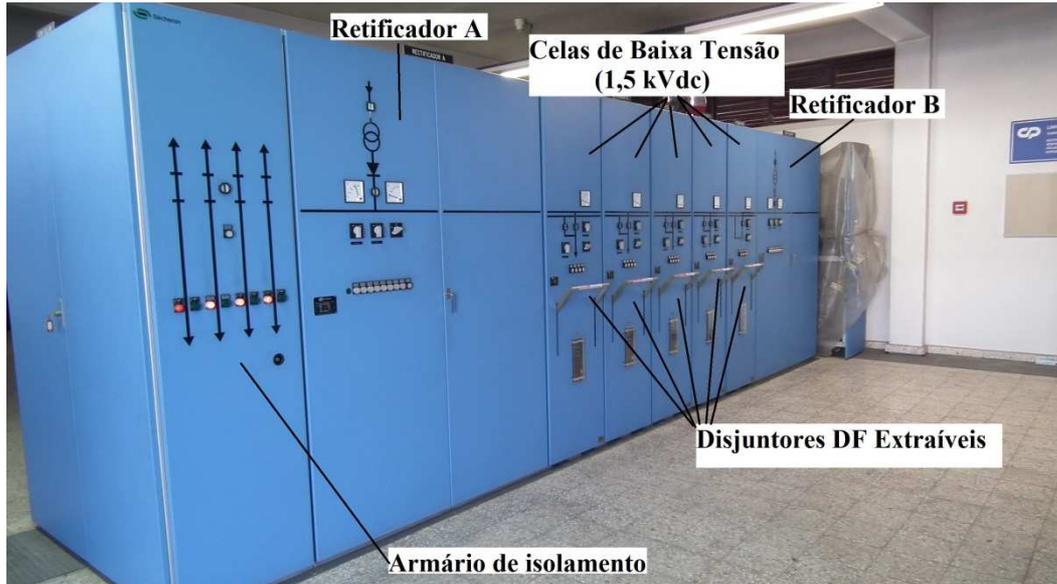


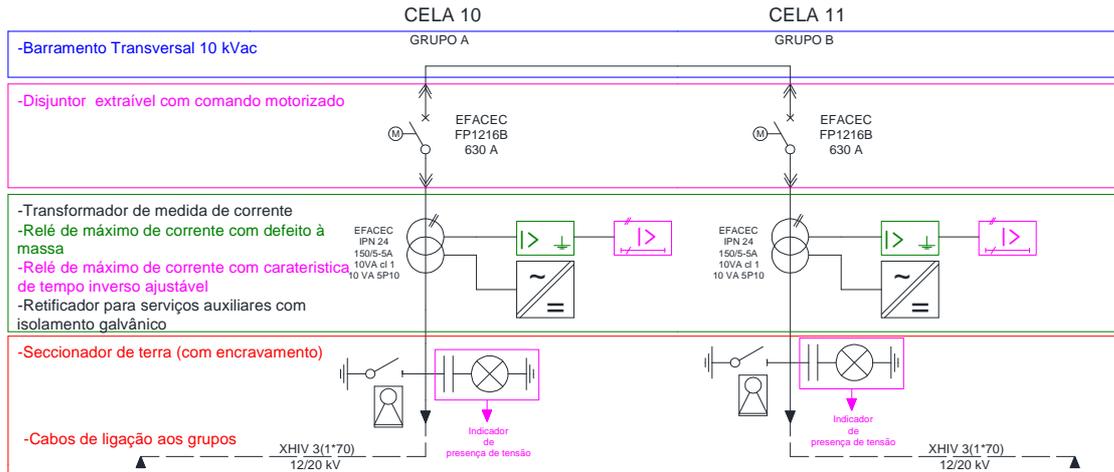
Figura 2-53 Quadro de retificadores e distribuição de corrente-contínua da SST de Cascais

A Figura 2-54 ilustra o armário de isolamento que possibilita o corte simultâneo de todas as saídas para a catenária, evitando a possibilidade de eventuais retornos da tensão da catenária. Este armário tem instalado uma proteção acrílica entre o exterior e os barramentos com indicação de perigo de morte.



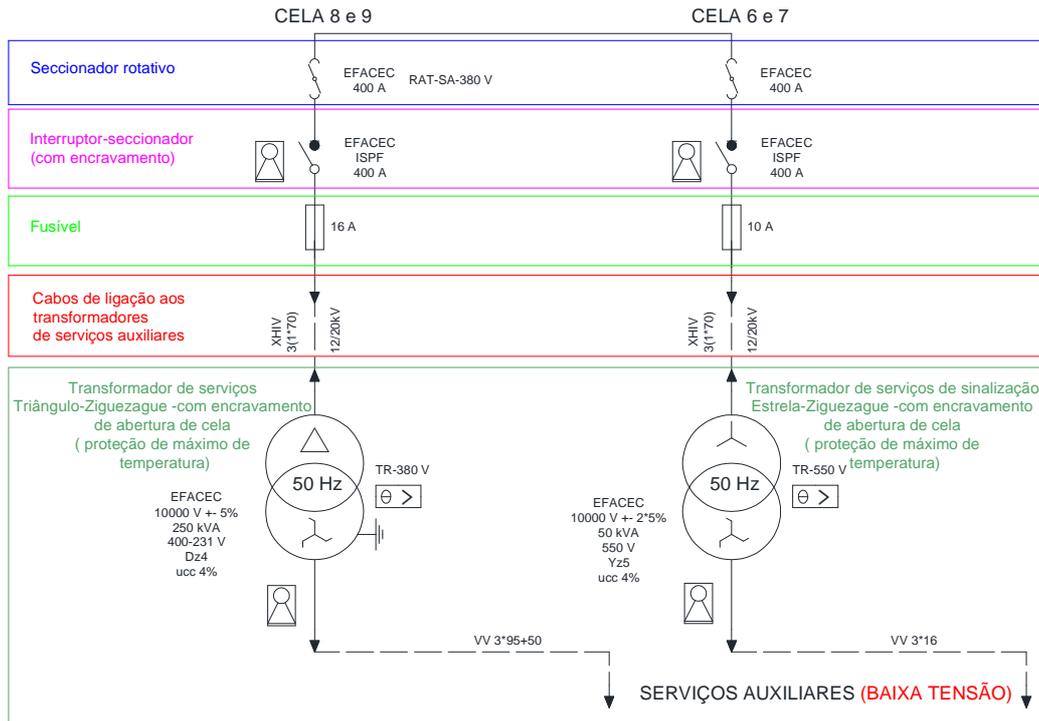
Figura 2-54 Armário de isolamento da SST de Cascais





**Figura 2-56** Circuito unifilar das células de alta tensão 10 kV<sub>AC</sub> da SST DC

Esta subestação tem a função de alimentar não só a catenária a 1500 V<sub>DC</sub>, mas também o sistema de sinalização a 550 V<sub>AC</sub> e o sistema de socorro da estação também a 550 V<sub>AC</sub>, e os serviços auxiliares a 230-400V<sub>AC</sub>. Para isso a subestação possui transformadores de serviços auxiliares, como se mostra na Figura 2-57, instalados dentro de uma cela protegida que não permita qualquer contacto acidental do exterior com qualquer parte do equipamento, só podendo ser aberta após desencravamento. A chave para abertura da porta de acesso ao transformador dos 230-400V<sub>AC</sub> só estará disponível se o disjuntor de média tensão correspondente estiver extraído, o seccionador de terra ligado e com o disjuntor geral do quadro de baixa tensão de 230/400 V<sub>AC</sub> desligado, de forma a garantir que não há retorno pelo secundário. De igual modo, a chave para abertura da porta de acesso só estará disponível se o disjuntor de média tensão correspondente estiver extraído, o seccionador de terra ligado e com o disjuntor geral do quadro de baixa tensão 550 V desligado, de forma a garantir que não há retorno pelo secundário. A proteção de ambos os transformadores é efetuada por fusível. As cargas a alimentar por estes transformadores são lineares e não lineares, e dado que existem retificadores de potência (Figura 2-58), são produzidas harmónicas de corrente e tensão que podem ser nefastos para outros equipamentos eléctricos dado que as cargas não lineares consomem correntes harmónicas que circulam na rede de distribuição [22]. A injeção destas harmónicas nos sistemas de corrente alternada é indesejável em virtude de provocarem interferências nos sistemas de telecomunicações, perdas adicionais nos circuitos, e poderem-se, ainda, originar sobretensões em caso de ressonância [23].



**Figura 2-57 Circuito unifilar dos transformadores de serviços auxiliares**

A escolha do tipo de ligação Yz5 (estrela zigue-zague), deve-se ao facto de as duas metades do enrolamento estarem dispostas entre duas colunas diferentes e agrupadas em série, tendo como consequência a eliminação da terceira harmónica da tensão em estrela (primário), dado que se ligar duas bobinas de fases diferentes em série, uma em sentido contrário da outra as terceiras harmónicas das tensões nas respectivas bobinas anulam-se reciprocamente [20]. Esta ligação também tem a finalidade de compensar desequilíbrios das tensões devido ao desequilíbrio de carga nas três fases. No tipo de ligação Dz4 (triângulo zigue-zague), as correntes de terceira harmónica circulam na malha do triângulo e as forças eletromotrizes induzidas no secundário não são sinusoidais. Em, carga este transformador comporta-se como a ligação (Yz) anterior.

Os grupos transformador/retificador podem ser visualizados na Figura 2-58. Os transformadores de potência são em banho de óleo.

Os retificadores satisfazem as normas CEI-146-1976 Classe VI, relativas a grande tração [21]. Estes retificadores são à base de electrónica de potência usados para a retificação de tensão para sistemas de tração ferroviários que usam tensão DC. A topologia usada é a ponte de *Graëtz* que na configuração trifásica é retificada a seis pulsos. Ao estarem os dois retificadores ligados, dado também o desfasamento entre o transformador A ser Dd0

(triângulo-triângulo com fase 0°) e o transformador B ser Dy5 (triângulo-estrela com desfasamento de 150°), obtém-se uma retificação a doze pulsos. Com a retificação a doze pulsos reduzem-se os harmónicos de maior amplitude que são os de frequência mais baixa, ficando apenas ficam os de frequência mais alta (que tem menor amplitude) [22]. Os díodos estão protegidos por fusíveis (para efeitos térmicos de correntes de curto-circuitos) e circuitos RC, dado que estes funcionam como comutadores na sua operação e durante a passagem à não condução é provocado aos terminais do díodo durante o processo de recuperação inversa, logo o circuito de proteção é um “snubber RC” [22].

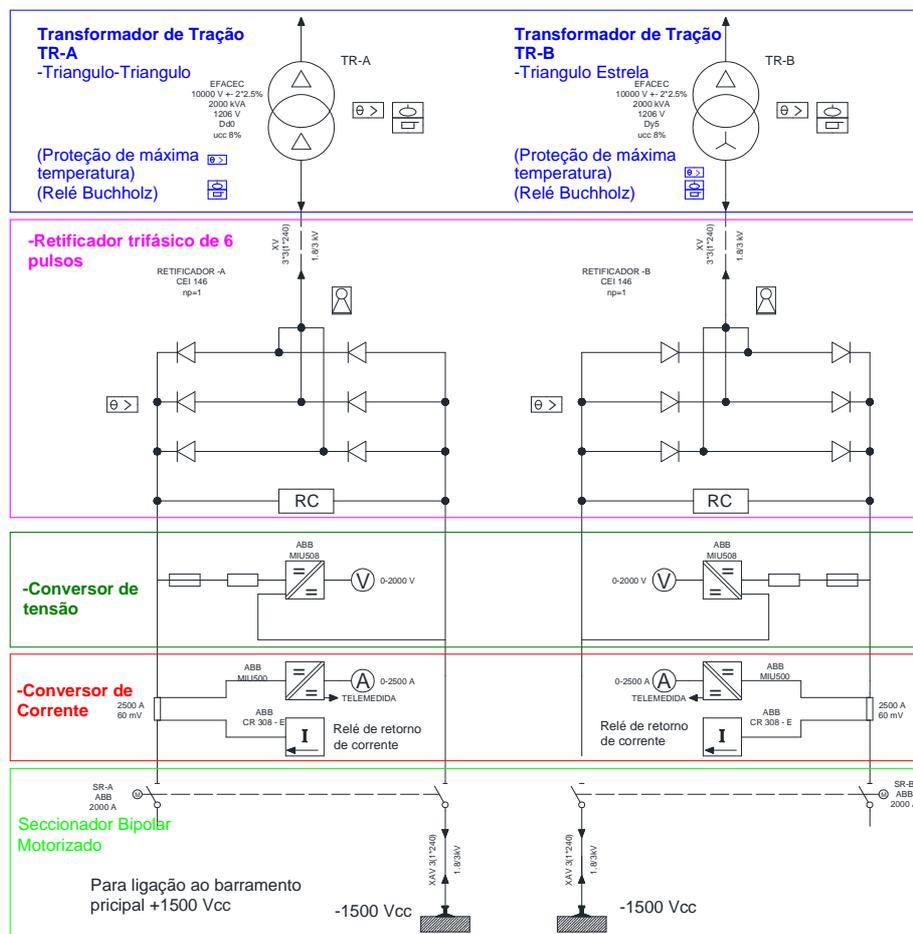
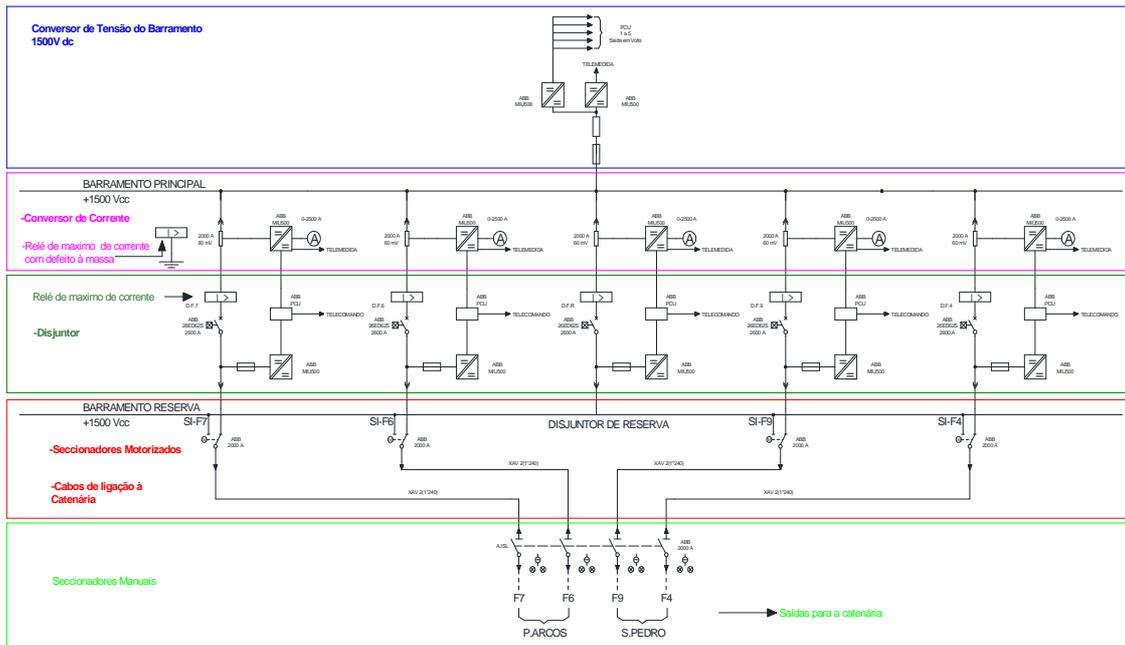


Figura 2-58 Circuito unifilar do grupo transformador retificador

Também se apresenta no esquema da Figura 2-58, a conversão de tensão DC bem como o respetivo voltímetro para leitura da tensão na catenária e um conversor de corrente DC, com o respetivo amperímetro para leitura da corrente na catenária, bem como um relé de deteção de retorno de corrente (relé direcional) com função de controlo e deteção de

correntes inversas para os díodos. Pode ainda observar-se, na mesma figura, o seccionador bipolar (motorizado) para injetar tensão no barramento principal e no negativo.

A Figura 2-59 mostra a última etapa da alimentação da catenária. Observa-se a alimentação da unidade de proteção e controlo PCU (protection and control unit) com proteção de efeitos térmicos de correntes de curto-circuito, e shunts de 60 mV-2000 A para garantir uma queda de tensão adequada para a alimentação dos respetivos conversores de tensão.



**Figura 2-59** Circuito unifilar das células de baixa (1500V DC) e saídas para a catenária

Na Figura 2-59 observa-se a proteção de máxima corrente de defeitos à massa, visto que toda a aparelhagem se encontra dentro de armários metálicos. Ainda na mesma figura é observado o relé direto de deteção de máxima intensidade cuja ação é efectuar a abertura do disjuntor a jusante após a deteção de uma máxima intensidade proveniente da catenária. Estão presentes os seccionadores de motorizados para mudança para o barramento de reserva, bem como os seccionadores de catenária.

### 2.3.3 Proteções tipo em Subestações de Tração DC

Em SST DC existem dois tipos de proteções a efetuar, a proteção do lado da corrente-alternada, e a proteção do lado da corrente-contínua.

### 2.3.3.1 Proteção de corrente alternada das Subestações de Tração DC

Estes tipos de proteção serão do tipo trifásico, incluem diversas funções com vista a ações de alarme e de ações de disparo de disjuntor (Tabela 2-2).

Tabela 2-2 Proteções trifásicas das SST DC

FUNÇÃO	AÇÃO
Máxima Tensão ( $U>$ ) temporizada	Abertura de disjuntor de 10 kV
Mínima Tensão ( $U<$ ) temporizada	Actuação de Alarme
Falta de Tensão temporizada	Abertura de disjuntor de 10 kV
Máxima Tensão Homopolar ( $U_0$ )	Abertura de disjuntor de 10 kV
Máxima Intensidade ( $I>$ , $I>>$ , $I>>>$ )	Abertura de disjuntor de 10 kV
Máxima Intensidade Homopolar ( $I_0$ )	Abertura de disjuntor de 10 kV

### 2.3.3.2 Proteção de corrente contínua das Subestações de Tração DC

As proteções de corrente contínua serão ao nível dos disjuntores 1500 V<sub>DC</sub> com diversas funções com vista à deteção de falhas nas linhas elétricas de tração (Tabela 2-3).

Tabela 2-3 Funções de proteção 1500 V<sub>DC</sub>

FUNÇÃO	AÇÃO
Máxima intensidade sentido direto ( $+I>$ )	Abertura disjuntor 1500 V <sub>DC</sub> e religação automática
Máxima intensidade sentido inverso ( $-I>$ )	Abertura disjuntor 1500 V <sub>DC</sub>
Subida de corrente $\frac{di}{dt}$	Abertura disjuntor 1500 V <sub>DC</sub> e religação automática
Proteção térmica ( $I_{therm}$ )	Abertura disjuntor 1500 V <sub>DC</sub>
Máxima tensão ( $U>$ )	Abertura disjuntor 1500 V <sub>DC</sub>
Mínima tensão ( $U<$ )	Abertura disjuntor 1500 V <sub>DC</sub>
Ensaio de linha (EDL)	Efetuar antes da ligação de tensão à linha
Relé direto de sobreintensidade com possibilidade de regulação ( $I>$ )	Abertura disjuntor 1500 V <sub>DC</sub>

A proteção DDL significa proteção de defeito de linha, a principal proteção em sistemas de tração de corrente-contínua. Esta nomenclatura é derivada da terminologia Francesa “*détection défaut ligne*” [24].

Mais recentemente a proteção DDL tem-se tornado a principal proteção em sistemas de tração DC [24]. A proteção DDL mede as variações bruscas da corrente da alimentação, e efetua uma distinção entre uma corrente de defeito e uma corrente de tração.

O sistema de proteção DDL é baseado na proteção de taxa de elevação da corrente ( $di/dt$ ), na proteção de incremento da corrente ( $\Delta I$ ) e no tempo de duração ( $\Delta T$ ) [24]. Estes dois critérios de proteção determinam o funcionamento do relé associado para fazer atuar o disparo do disjuntor de proteção.

A Figura 2-60 ilustra o princípio de proteção  $di/dt$ , baseado na taxa de elevação da corrente. As correntes de arranque dos comboios são geralmente elevadas no início, mas de curta duração, embora a magnitude da corrente continue a aumentar, enquanto um defeito distante do ponto de alimentação da catenária tem uma menor taxa de crescimento mas com uma duração mais longa. A proteção ilustrada na Figura 2-60 tem duas parametrizações, uma para a taxa de crescimento da corrente ( $di/dt$ ) e outra para o tempo de duração ( $\Delta T$ ) que faz acionar o mecanismo de ordem de disparo do disjuntor se a taxa de subida da corrente ultrapassar a duração definida.

Existe uma parametrização adicional de tempo ( $\Delta T_{re}$ ) que, quando excedida, efetua o “reset” à temporização  $\Delta T$ . Este parâmetro é explicado nos exemplos da Figura 2-61.

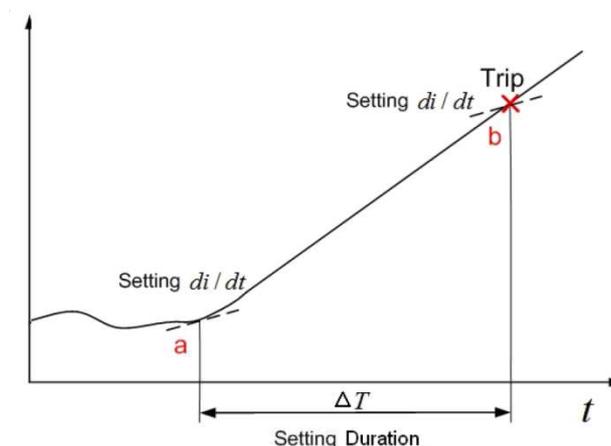
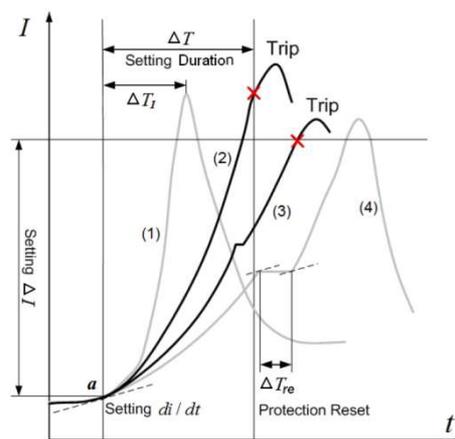


Figura 2-60 Princípio de proteção  $di/dt$  [24]

Conforme ilustra a Figura 2-60, a proteção  $di/dt$  inicia a contagem quando a taxa de elevação da corrente (inclinação) é superior à taxa de variação parametrizada  $(di/dt)_{Parametrização}$  efetuando a atuação do circuito de disparo se esta persistir para além da duração parametrizada  $(\Delta T)$

A Figura 2-61 ilustra o princípio de proteção por incremento de corrente  $(\Delta I)$ . Esta proteção baseia-se na variação da magnitude da corrente de alimentação e a sua temporização inicia-se simultaneamente com a proteção  $di/dt$ , quando verificada a condição  $(di/dt)_{Parametrização}$ . A atuação do circuito de disparo acontece se a variação da corrente for superior à parametrização  $(di/dt)_{Parametrização}$  com duração superior a  $\Delta T$ .



**Figura 2-61 Princípio de funcionamento da proteção  $\Delta I$  [24]**

Ainda na Figura 2-61, observam-se quatro situações distintas numeradas de (1) a (4).

- Situação (1) - Os valores de  $di/dt$  e  $\Delta I$  são mais elevados que os valores parametrizados. Contudo a duração  $\Delta T_1$  é menor que a duração parametrizada  $(\Delta T)$ . Neste caso não vai existir ordem de disparo.
- Situação (2) -  $\Delta I$  é superior ao valor parametrizado e a sua duração também é superior a  $\Delta T$ . Neste caso vai acontecer um disparo.

- Situação (3) - No decurso da subida da corrente, existe uma redução momentânea na sua taxa de variação para valores inferiores à parametrização  $(di/dt)_{Parametrização}$ . Este intervalo de tempo é no entanto menor que a parametrização de “reset”  $(\Delta T_{re})$  pelo que a contagem continua e, logo que a corrente atingir a parametrização  $\Delta I$ , o disparo é efetuado.
- Situação (4) - No decurso da subida da corrente, existe uma redução momentânea na sua taxa de variação para valores inferiores à parametrização  $(di/dt)_{Parametrização}$ . Este intervalo de tempo é superior à parametrização de “reset”  $(\Delta T_{re})$  pelo que a contagem  $\Delta T$  é reiniciada, não se efetuando o disparo.

Segundo [24], os estudos sobre a forma de onda de correntes de curto-circuito e correntes de arranque indicam que as correntes de curto-circuito têm uma menor taxa de crescimento  $di/dt$  e um menor incremento de corrente  $\Delta I$  relativamente às correntes de arranque dos comboios mas apresentam uma maior duração  $\Delta T$ . Baseado nos estudos das proteções de deteção dos defeitos de linha, conclui-se que este tipo de proteção faz a distinção entre as correntes de curto-circuito e de arranque nos comboios e protege toda a catenária [24]. Segundo o estudo [27] e por observação da Figura 2-62, a deteção das correntes de curto-circuito e a deteção das correntes de arranque dos motores AC e motores DC, são bastante diferentes, onde podemos observar as seguintes situações:

- O incremento  $(\Delta I)$  e a taxa de crescimento  $(di/dt)$  da corrente de arranque do motor DC é mais semelhante a um curto-circuito distante do que a corrente de arranque de um motor AC;
- O incremento  $(\Delta I)$  e a taxa de crescimento  $di/dt$  da corrente de curto-circuito é menor que as correntes de arranque de ambos os motores DC e AC. A duração  $(\Delta T)$  das correntes de arranque do motor DC é menor do que as correntes de arranque do motor AC;

- As correntes de arranque têm uma taxa de crescimento inicial bastante elevada, mas de curta duração, ao passo que a corrente de defeito tem uma menor taxa de crescimento mas continua a subir durante mais tempo.
- Baseado nos estudos sobre as características da corrente de arranque de uma locomotiva de tração com motor DC ou uma Locomotiva com motor AC, e nas características da corrente de curto-circuito podem-se distinguir as correntes de arranque das correntes de curto-circuito.

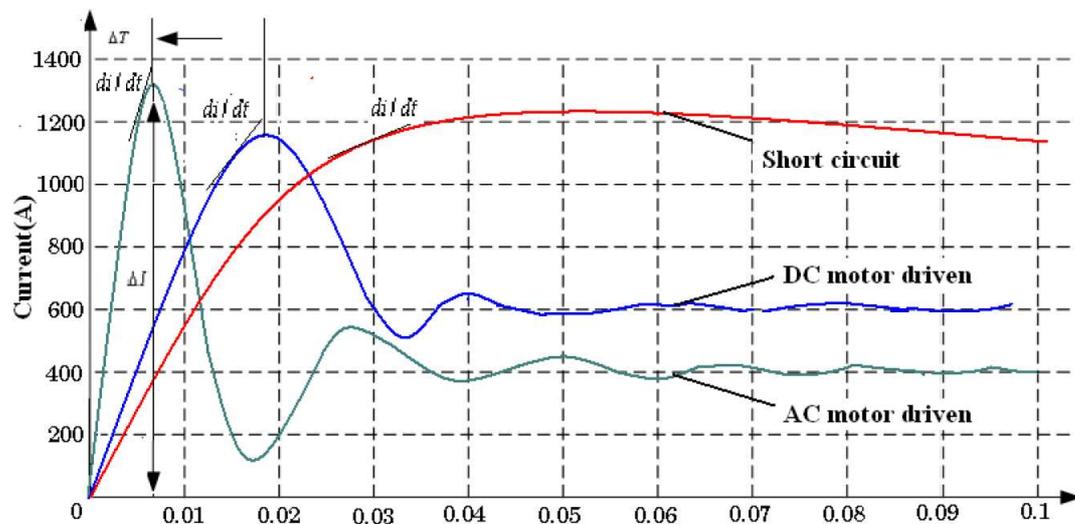
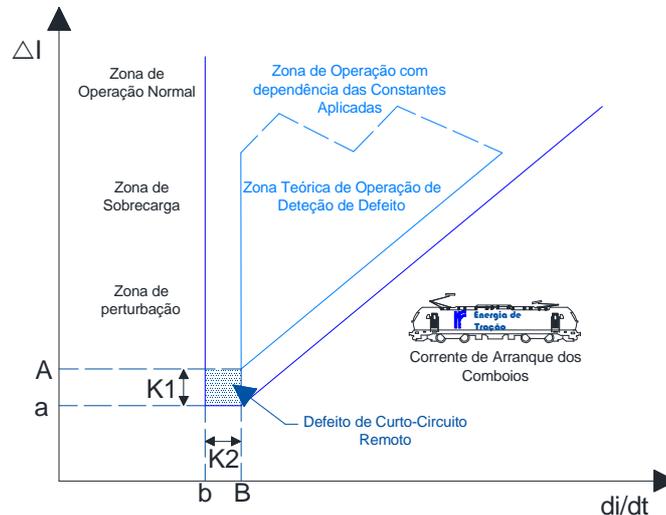


Figura 2-62 Correntes de arranque de unidades de tração AC e DC e correntes de curto-circuito [27]

Dado que as características das correntes de arranque dos motores de tração, e de curto-circuito são diferentes ( $di/dt$ ,  $\Delta I$  e  $\Delta T$ ) o método de proteção DDL faz a distinção das características das correntes de arranque e de defeito, de modo a que a proteção dispare apenas quando existe um defeito. Daqui advém a importância do conhecimento das correntes de arranque das cargas para o método de proteção DDL, para que se possa efetuar uma parametrização correta.

Na Figura 2-63 é representado o diagrama esquemático da proteção DDL em que a proteção inicia com a parametrização  $di/dt$  no ponto B.

Para o parâmetro da duração  $\Delta T$ , necessário para permitir o disparo da proteção, ambos os parâmetros  $di/dt$  e  $\Delta I$  são monitorizados e calculados.



**Figura 2-63 Diagrama característico da proteção DDL, adaptado de [24]**

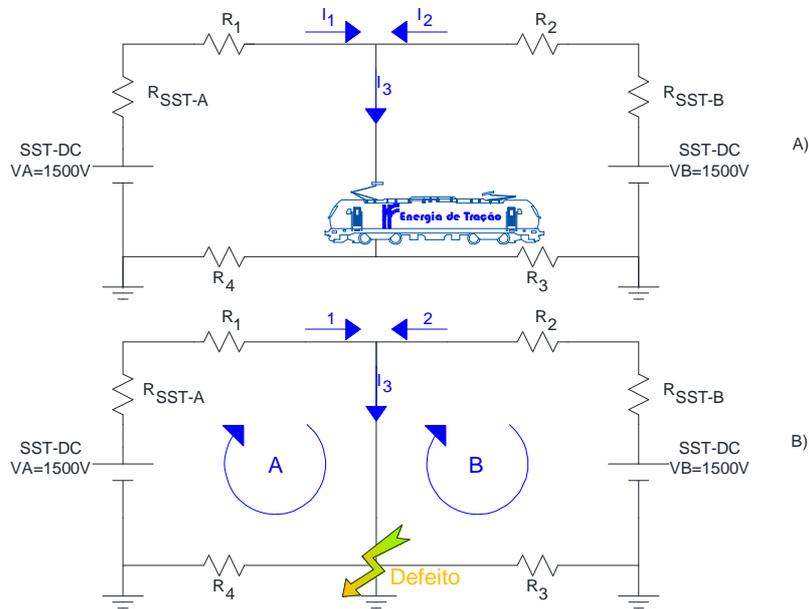
Devido às diferentes características das correntes de arranque do comboio e da corrente de defeito, depois do parâmetro de duração  $\Delta T$  estar ativo, só as correntes de curto-circuito devem cair na zona de operação. As constantes de parametrização  $K1$  e  $K2$ , são usadas para assegurar margens de sensibilidade para proteger toda a catenária.

Os disjuntores de proteção das saídas de catenária são componentes importantes que devem ser protegidos contra desgastos excessivos e grande fluxo de corrente. Quando o disjuntor (tendo este associado a função de religação) está aberto devido a um defeito detetado pelo DDL, é aconselhável efetuar um ensaio na linha de alimentação para verificar se a linha ainda está em curto-circuito.

É realizada uma função de segurança designada por proteção de ensaio de linha (EDL) que confirma a eliminação de um defeito na catenária antes de se ligar o disjuntor para voltar a colocar a catenária em tensão. Este teste é realizado por um equipamento externo chamado EDL que se encontra na PCU (Protection and Control Unit). A Figura 2-64 ilustra o esquema de ensaio de linha/proteção de disjuntor numa SST-DC da REFER-EPE, logo que se dá um defeito nas saídas para a catenária, o disjuntor fica na posição aberto e antes de o mesmo ser ligado é iniciado o teste de ensaio através do fecho dos contactos P 2/5 e P 1/2. O fecho destes contactos origina a alimentação das bobinas dos contactores K300 e K301,



contacto franco catenária-carril (assinalado com uma seta). A determinação da intensidade de corrente de defeito  $I_3$  é efetuada através do estudo das leis de *Kirchhoff* (malhas e nós).

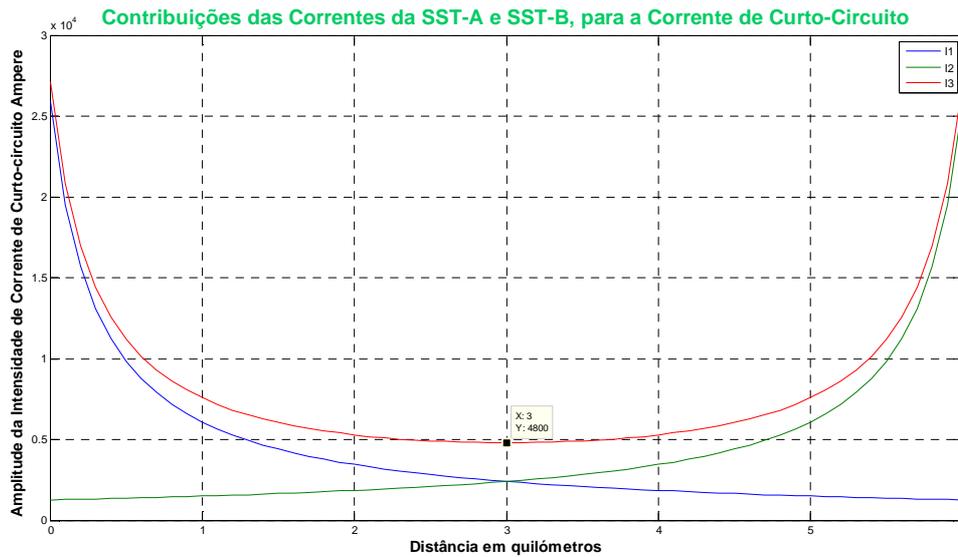


**Figura 2-65 Modelo de exploração normal A) de uma circulação entre duas SST<sub>DC</sub> B) Curto-Circuito franco Catenária-carril entre duas SST<sub>DC</sub> B)**

Por inspeção do circuito da Figura 2-65 B), obtém-se as equações das tensões e correntes com vista a determinar a corrente de defeito  $I_3$ , ao longo de 6 quilómetros da linha.

$$\begin{bmatrix} R_{SST-A} + R1 + R4 & 0 & 0 \\ 0 & -(R_{SST-B} + R2 + R3) & 0 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} VA \\ -VB \\ 0 \end{bmatrix} \quad 2-11$$

As impedâncias da catenária e de retorno (carril), foram calculadas através do programa interno da REFER ‘SICAFE- Módulo de cálculo elétrico’. A Figura 2-66 ilustra os valores das intensidades de corrente de curto-circuito ao longo de seis quilómetros para que as proteções das duas SST<sub>DC</sub> atuem simultaneamente, de modo a não existir alimentação do defeito. A intensidade de corrente a ter em conta para a parametrização das proteções será  $I_3=4800$  A, calculada através da equação 2-11. O valor máximo de corrente  $I_3=27139$  A indica o valor para o qual deve ser escolhido o poder de corte dos equipamentos de proteção.



**Figura 2-66** Correntes de curto-circuito em sistema de alimentação DC

## 2.4 Postos de catenária

### 2.4.1 Caracterização

A corrente elétrica fornecida ao material circulante através da catenária é captada do fio de contacto através de um dispositivo chamado pantógrafo. A catenária por questões de exploração ou manutenção, pode dividir-se em setores, subsetores e secções elementares. Um setor de catenária, alimentado por uma fase de uma SST, corresponde ao troço compreendido entre a zona neutra dessa subestação e a zona neutra existente a meio entre duas subestações. Um subsetor é o troço de catenária compreendido entre dois postos de seccionamento consecutivos ou entre uma subestação e o posto de catenária mais próximo. Os postos de catenária são instalações elétricas localizadas ao longo da via-férrea, que têm como função assegurar a continuidade elétrica longitudinal e de paralelo transversal da catenária, permitindo ainda o corte e/ou seccionamento da alimentação de um ou mais troços de catenária (sempre que necessário), quer localmente, quer a partir do Posto Regional de Telecomando (PRT).

Através da sua utilização é possível alterar a forma de exploração de catenária e também o isolamento elétrico de parte da catenária e estruturas existentes para a sua manutenção.

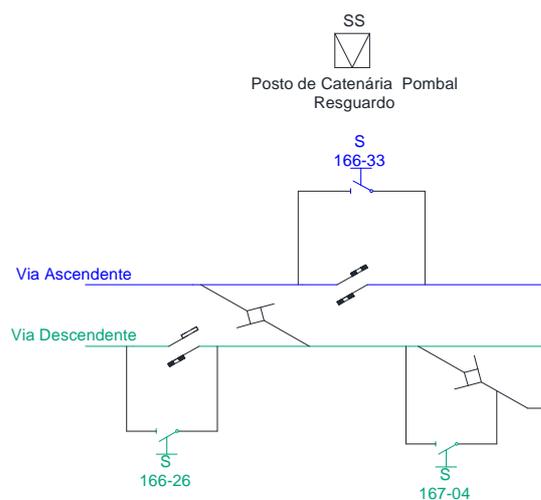
Todos os postos de catenária possuem indicação de falta de tensão nos troços que permitem desligar. A operação de paralelo transversal é realizada em postos de catenária através de interruptores ou disjuntores e só excepcionalmente por seccionadores [3].

As instalações elétricas dos postos de catenária da REFER obedecem ao regulamento de segurança de subestações e postos de seccionamento na sua parte aplicável. Os equipamentos de comando dos postos de catenária são instalados em sala do edifício técnico, ou em alternativa, em cabina própria construída para o efeito, se esta opção for técnica e economicamente mais vantajosa [28].

### 2.4.2 Tipos de postos de catenária

De acordo com [29] os postos de catenária podem classificar-se de acordo com as suas configurações e funções conforme o fim a que se destinam:

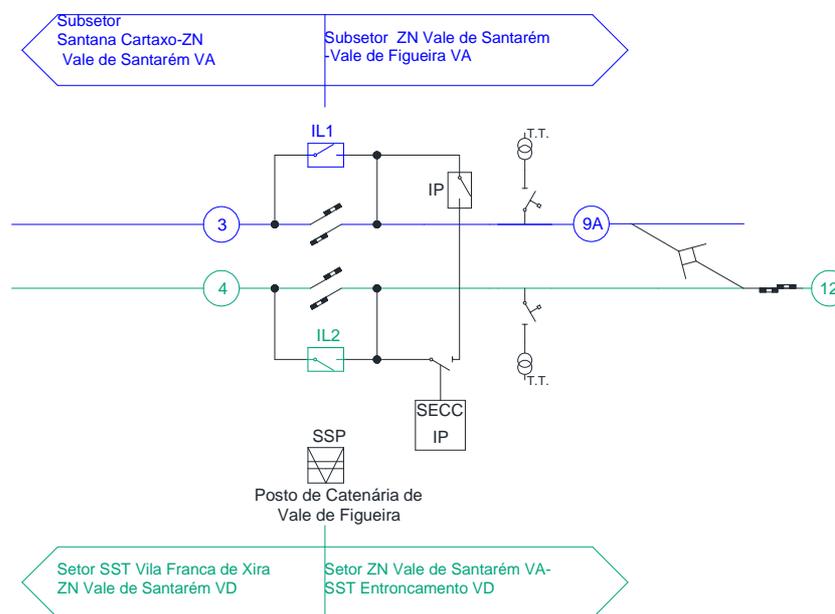
- Postos de Subseccionamento (SS)- São postos de catenária que estão ligados a um seccionamento de lâmina de ar (ou isolador de secção) e realizam a operação de continuidade longitudinal. O esquema apresentado na Figura 2-67 apresenta três seccionadores de comando elétrico destinados a assegurar a continuidade longitudinal (S 166-33, S 166-26, 167-04). O fecho ou a abertura de qualquer destes seccionadores, permite o estabelecimento ou corte de tensão nas respetivas secções elementares.



**Figura 2-67 Posto de de subseccionamento**

- Postos de Subseccionamento e Paralelo (SSP)- São postos de catenária que estão ligados a seccionamentos de lâmina de ar (um em cada via) e realizam em cada uma delas a operação de continuidade longitudinal. A operação paralelo transversal é feita geralmente do lado da subestação.

No esquema apresentado na Figura 2-68 visualiza-se que a continuidade é assegurada através dos interruptores IL1 e IL2. O paralelo transversal é assegurado pelo interruptor com a designação de IP, que se encontra na via ascendente sul da SST do entroncamento.

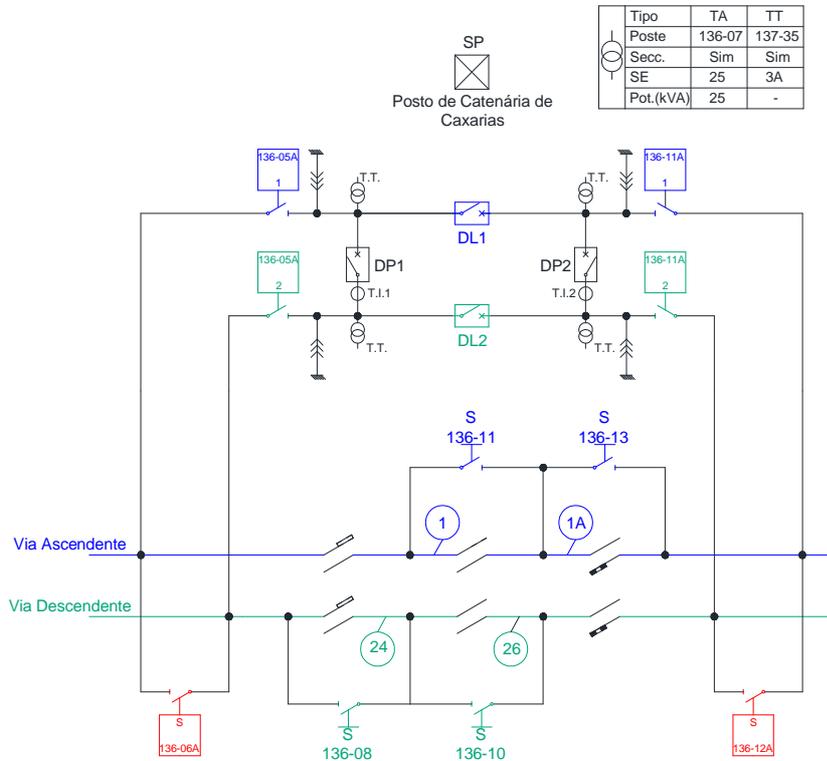


**Figura 2-68 Posto de subseccionamento e paralelo**

- Postos de Seccionamento e Paralelo (SP)- São postos de catenária que estão eletricamente ligados a zonas neutras entre subestações. Permitem ligar a continuidade longitudinal a montante e a jusante da zona neutra (operação que se realiza em exploração normal), e a operação de paralelo transversal para cada um dos lados;

A, Figura 2-69 mostra a continuidade longitudinal efetuada para a via ascendente pelo disjuntor DL1 conjuntamente com os seccionadores 136-05 A1 e 136-11 A1. Para a via descendente a continuidade longitudinal é efetuada pelo disjuntor DL2 conjuntamente com os seccionadores 136-05 A2 e 136-11 A2. O paralelo

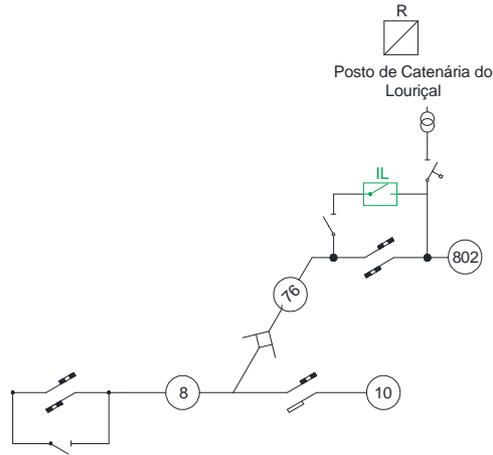
transversal é assegurado pelos disjuntores DP1 e DP2, conjuntamente com os seccionadores 136-05 A1, 136-11 A1, 136-05 A2, 136-11 A2.



**Figura 2-69** Posto de seccionamento e paralelo

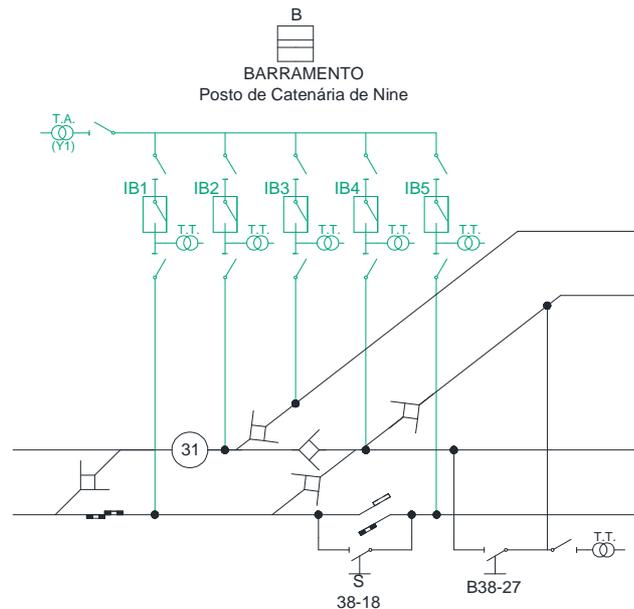
Os seccionadores S-136-06 A e S-136-12 A destinam-se a substituir os disjuntores DP1 e DP2 quando o posto de catenária está fora de serviço para manutenção. Os seccionadores S-136-11, S-136-13, S-136-8, S-136-10 designam-se seccionadores de socorro, servindo para alimentar a zona neutra quando existe uma composição elétrica parada no meio dessa zona.

- Postos de Ramal (R)- São postos de catenária que permitem realizar a operação de alimentação de linhas desviadas em relação a entroncamentos de linhas ou ramais importantes. Por vezes estes postos podem permitir a operação de paralelo transversal. A Figura 2-70 ilustra um posto de ramal constituído por um interruptor longitudinal, IL.



**Figura 2-70 Posto de ramal**

- **Postos de Barramento (B)**- São postos de catenária onde várias secções elementares são ligadas a um barramento através de interruptores. Em bifurcações ou em entroncamentos permitem realizar operações de paralelo transversal e alimentação de linhas desviadas, realizando também a operação de corte longitudinal. O esquema apresentado na Figura 2-71 mostra a configuração de um posto de barramento constituído por um conjunto de interruptores (IB1, IB2, IB3, IB4, IB5), e os seus respectivos transformadores de tensão. Os transformadores de tensão, tem como função a verificação da presença ou falta de tensão em cada secção elementar a que está associado. É ainda apresentado o transformador de alimentação TA.



**Figura 2-71 Posto de barramento**

A Figura 2-72, ilustra alguns dos equipamentos descritos na Figura 2-71.

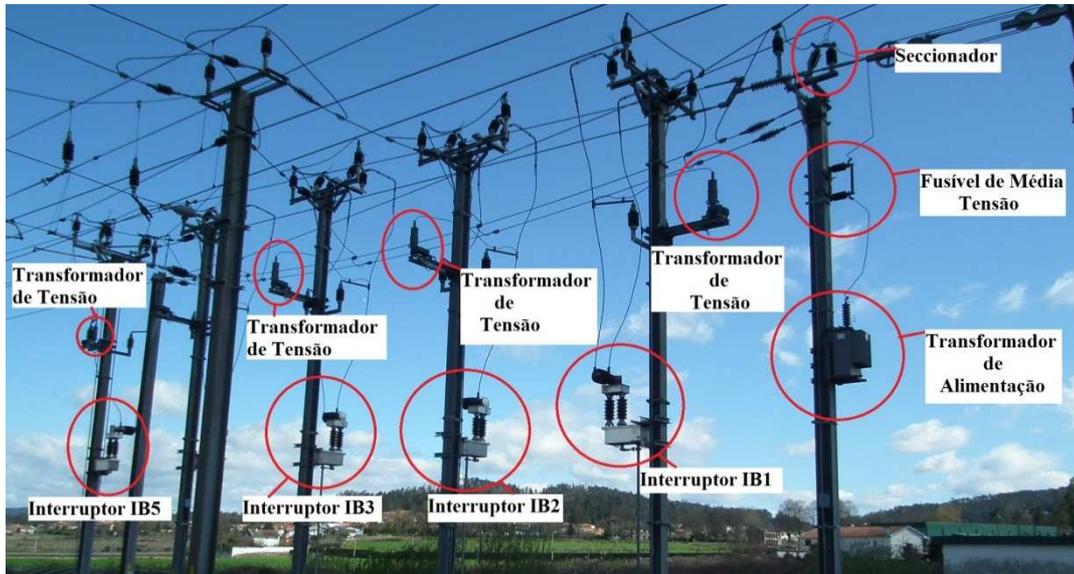


Figura 2-72 Posto de Barramento de Nine

Na REFER existem ainda instalações similares designadas por:

- Postos Auxiliares (PX)- São postos de catenária equipados com seccionadores e ligados geralmente a um seccionamento de lâmina de ar. Permitem efetuar a operação de continuidade longitudinal, tendo a indicação de falta de tensão na secção elementar a jusante em relação à subestação. Por vezes podem executar a operação de alimentação de linhas desviadas tendo então a indicação de falta de tensão do lado do ramal. O esquema apresentado na Figura 2-73 refere-se a um posto auxiliar com um seccionador de comando elétrico S comandado à distância.

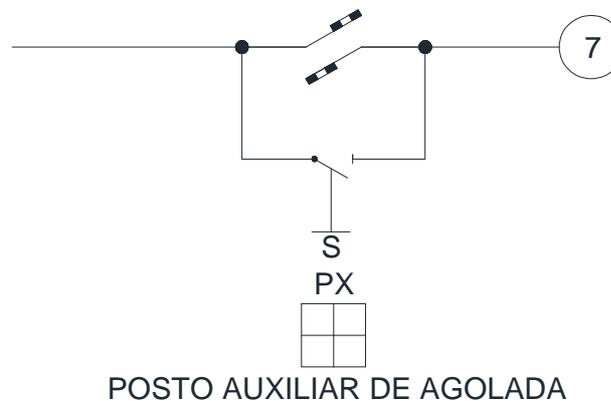
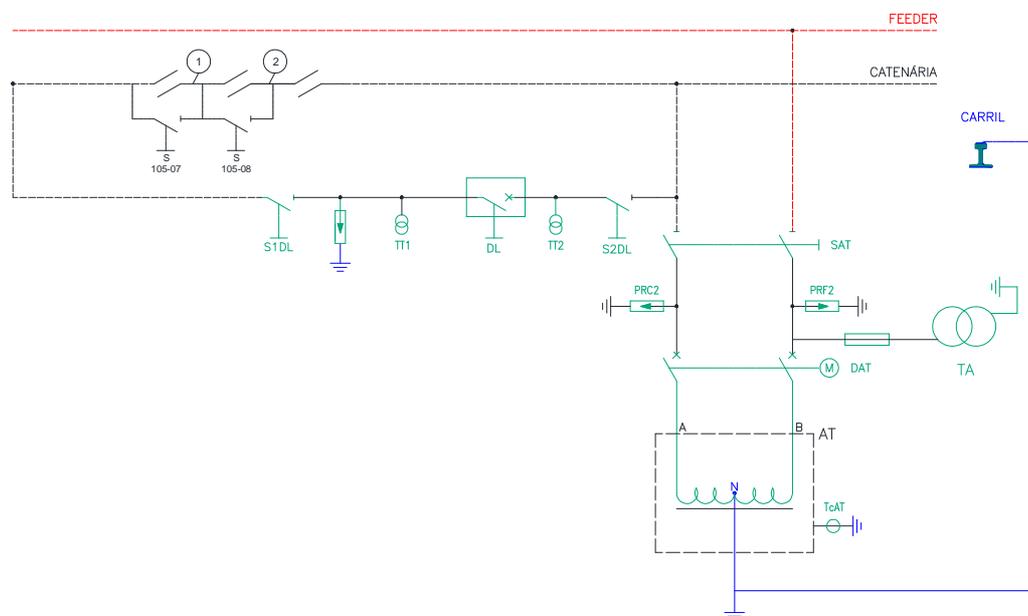


Figura 2-73 Posto auxiliar

- Postos de Autotransformadores – São postos equipados com autotransformadores ao longo dos troços do sistema  $2 \times 25 \text{ kV}$ . Permitem uma repartição mais equilibrada da corrente de tração pela catenária e pelo *feeder*, diminuindo a corrente de retorno pelo carril. Estes postos são compostos por barramentos, seccionadores bipolares (SAT), disjuntores de SF6 (DAT), transformadores monofásicos para os serviços auxiliares (TA), descarregadores de sobretensão (PRC2) e (PRF2), transformadores de intensidade toroidais (TcAT), autotransformadores monofásicos (AT), seccionadores monopulares (S1DL) e (S2DL), transformadores de Tensão (TT1) e (TT2) e disjuntor monopolar (DL). A Figura 2-74 ilustra o esquema de princípio de um posto de autotransformador (neste caso associado a uma zona neutra de transição do sistema  $1 \times 25 \text{ kV}$  para  $2 \times 25 \text{ kV}$ ).

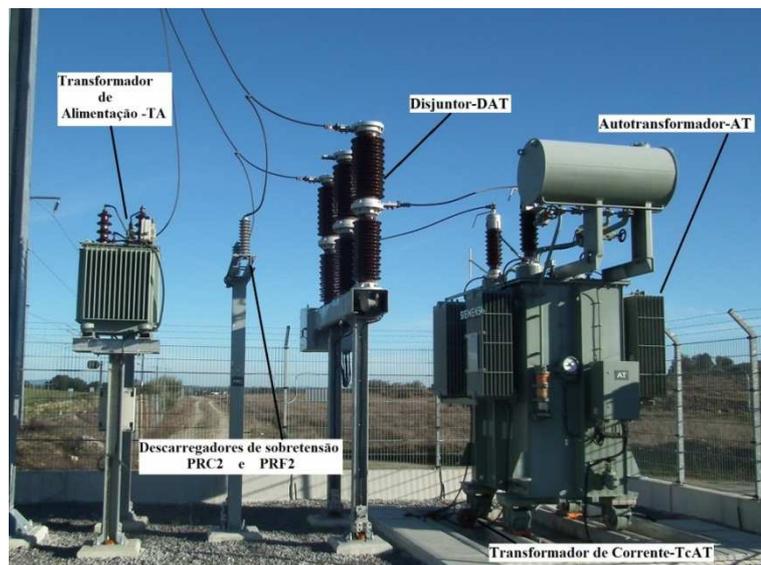


**Figura 2-74 Esquema unifilar de Posto Autotransformador**

A Figura 2-75 mostra o autotransformador de fabrico SIEMENS, imerso em banho de óleo mineral, relação de transformação nominal  $55\,000 / 27\,500 \text{ V}$  ( $55 \text{ kV}$  entre terminais e  $27,5 \text{ kV}$  entre terminais e o ponto médio), com potência de  $5 \text{ MVA}$ . O arrefecimento é do tipo natural ONAN, equipado com indicador de nível de óleo, relé Buchholz, termostato e válvula de sobrepresão. O autotransformador tem instalado o transformador de corrente TcAT junto ao solo para funcionamento de proteção de cuba.

O disjuntor DAT SIEMENS, é tripolar com poder de corte de 31,5 kA, e corrente nominal de 2000 A. Incorpora comando elétrico a uma tensão 110V<sub>DC</sub>, possui mecanismo de disparo por molas e está instalado numa estrutura metálica. Este disjuntor é tripolar por razões económicas, é mais barato que os disjuntores bipolares. Os descarregadores de sobretensão são de fabrico SIEMENS, para uma corrente de descarga 8/20 $\mu$ s de 10 kA.

A Figura 2-75 ilustra ainda o transformador de alimentação TA de fabrico SIEMENS, com relação de transformação 26500/231V, e potência especificada de 50 kVA. O transformador possui comutador de tomadas em vazio para a tensão primária em escalões de +/- 2x2,5%. O transformador está equipado com proteção Buchholz, termostato e indicador de nível de óleo. Os transformadores auxiliares estão protegidos por fusíveis para uma tensão específica de 36kV, com vista à sua proteção contra sobrecorrentes passíveis de causar danos nos equipamentos elétricos instalados a jusante. O fusível está montado em suporte próprio (porta-fusível), imediatamente a montante do primário do transformador, embora não se visualize nesta Figura 2-75.



**Figura 2-75 Posto de Autotransformador de Alcains**

A Figura 2-76 ilustra o disjuntor longitudinal DL, de fabrico SIEMENS, com poder de corte 31,5 kA, corrente nominal 2000 A. O comando do DL é elétrico operando à tensão 110V<sub>DC</sub>, possui mecanismo de disparo por molas e está instalado na estrutura metálica. O descarregador de sobretensão é de fabrico SIEMENS, para uma corrente de descarga 8/20 $\mu$ s de 10 kA.

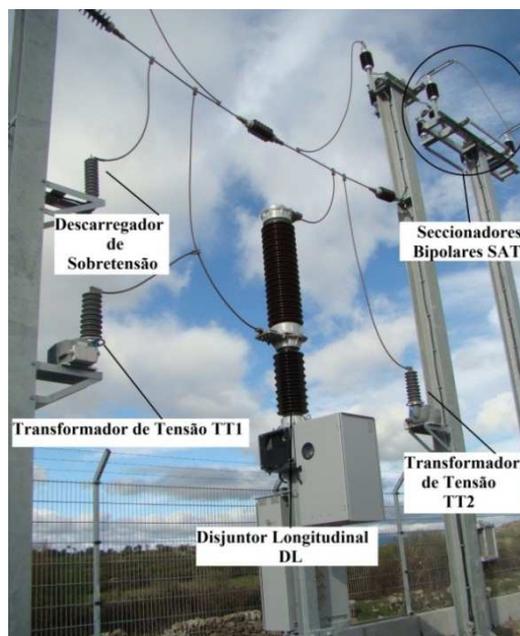


Figura 2-76 Posto de autotransformador de Alcains (continuação)

Na Figura 2-76, observam-se os transformadores de tensão TT1 e TT2 de fabrico SADTEM, com tensões de isolamento 52/95/250kV, frequência especificada 50Hz, relação de transformação 27500/100V, possui uma potência aparente de 30VA e classe de precisão CL 1. Observam-se ainda os seccionadores bipolares de comando manual.

### 2.4.3 Aparelhagem dos Postos de Catenária

Nos postos de catenária existe aparelhagem em interior e aparelhagem exterior como se descreve nas secções seguintes.

#### 2.4.3.1 Aparelhagem interior

Os postos de catenária possuem como aparelhagem no seu interior diversos equipamentos: quadro elétrico de entrada, o telefone seletivo, e o quadro de comando e telecomando da aparelhagem.

- **Quadro de entrada-** Este recebe e distribui a energia a 230V<sub>AC</sub> para os serviços auxiliares do Posto de Catenária. O quadro é alimentado através de um

transformador ligado à catenária, ou através de um ramal EDP. A Figura 2-77 ilustra um quadro de entrada de um posto de catenária da REFER EPE.



**Figura 2-77** Quadro de entrada da alimentação elétrica de posto de catenária

- **Telefone seletivo-** Este telefone permite a comunicação direta com o (PRT). Na Figura 2-78 observa-se o telefone seletivo de um posto de catenária, localizado geralmente junto à porta.



**Figura 2-78** Telefone seletivo de posto de catenária

- **Armário de telecomando-** Este equipamento permite estabelecer as comunicações entre o PRT e o posto de catenária, permitindo executar manobras locais e de telecomando, dos aparelhos de corte/seccionamento e telessinalizar diversos alarmes. Estes armários permitem a escolha de comando normal ou remoto (PRT), bem como o corte da alimentação ao motor dos aparelhos de seccionamento. A Figura 2-79 ilustra um armário de telecomando existente em posto de catenária da REFER EPE, onde se visualizam os sinalizadores de verificação de tensão nas secções elementares, bem como o comando da aparelhagem (disjuntores, seccionadores e interruptores).



Figura 2-79 Armário de telecomando

### 2.4.3.2 Aparelhagem exterior

Os equipamentos e aparelhagem que fazem parte dos postos de catenária são os seguintes:

- **Interruptores** - Os interruptores são aparelhos de corte dotados de poder de corte. Permitem o corte ou estabelecimento de tensão em carga ou em vazio, em condições normais de serviço e de sobrecarga, mas não a cortar correntes de curto-circuito. Estes equipamentos são dotados de uma câmara de corte para extinguir arcos elétricos, sendo que esta extinção pode ser efetuada a hexafluoreto de enxofre (SF6) ou a óleo. Nos postos de catenária são usados para efetuar a continuidade longitudinal e/ou paralelo transversal da catenária. Estes equipamentos podem ser comandados eletricamente à distância, ou localmente de forma manual. A Figura 2-80 ilustra um interruptor usado em posto de barramento.

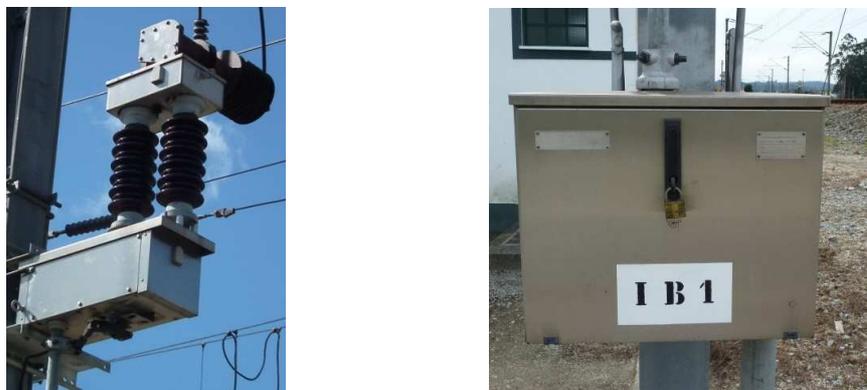
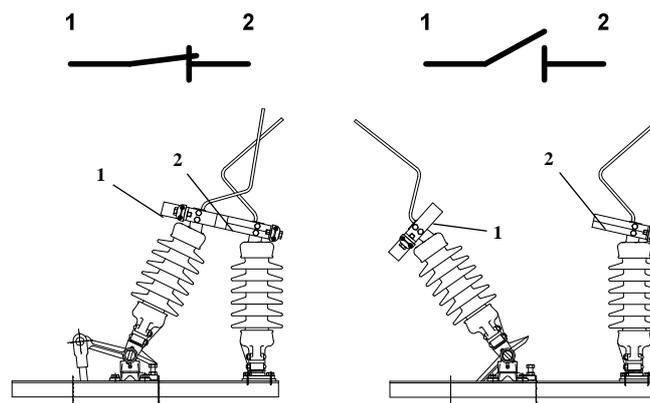


Figura 2-80 Interruptor usado em posto de catenária (esquerda), caixa de comando do interruptor IB1 (direita)

Quando o comando é manual a manobra é realizada através de um manípulo colocado em local acessível. Esta manobra apenas pode ser executada localmente. Quando o comando é elétrico o manípulo é substituído por uma caixa de comando motorizada. Nestes casos a manobra pode ser executada local ou remotamente

- **Disjuntores** - O disjuntor é um aparelho de corte e proteção, dotado de conveniente poder de corte para correntes de curto-circuito e cuja atuação se pode produzir automaticamente em condições predeterminadas. Estes equipamentos podem ser comandados eletricamente à distância, ou localmente de forma manual. Na Figura 2-75, é visível um disjuntor instalado em posto de catenária.
- **Seccionadores** - Os seccionadores são aparelhos que permitem seccionar um determinado troço de catenária ou isolar um determinado equipamento, como sejam transformadores de tensão, transformadores de alimentação ou de sinalização. Estes equipamentos não possuem poder de corte, e como tal não devem ser manobrados em carga. Estes dispositivos nos postos têm a finalidade de efetuar a continuidade/seccionamento da catenária. Quanto à sua forma de comando poderão ser de comando elétrico (permite a manobra à distância) ou de comando local. Na Figura 2-81 é ilustrado um seccionador de duas posições.



**Figura 2-81 Seccionador de duas posições (fechado/Aberto) em posição FECHADO” (à esquerda) e em posição “ABERTO” (à direita): (1) contacto do terminal móvel; (2) contacto do terminal fixo[7]**

No seccionador, quando o comando é manual, a manobra é realizada através de um manípulo colocado em local acessível. Esta manobra apenas pode ser executada localmente. Quando o comando é elétrico, o manípulo é substituído por uma caixa de comando motorizada. Nestes casos a manobra pode ser executada local ou remotamente

- **Transformadores de tensão** - Este equipamento destina-se a adaptar a tensão a medir para um nível adequado. É constituído por 2 partes: primário e secundário. Nos postos de catenária a sua relação de transformação é de 25.000/100V. A sua função é “obter” uma imagem da tensão da linha ou barramento e transmiti-la, quer para dispositivos de proteção, quer para dispositivos de monitorização existentes na cabina de comando. A sua principal função sinalizar a falta de tensão na catenária. Na Figura 2-76, pode-se observar um transformador de tensão instalado em posto de catenária.
- **Transformadores de corrente** - Este equipamento destina-se a adaptar a corrente a medir para um nível adequado. É constituído por 2 partes: primário e secundário. Nos postos de catenária a sua relação de transformação é de 600/5A. A sua função é “retirar” uma imagem da corrente da linha ou barramento e transmiti-la, quer para dispositivos de proteção, quer para dispositivos de monitorização existentes na cabina de comando. Na Figura 2-82 está ilustrado um transformador de corrente usado na REFER EPE.

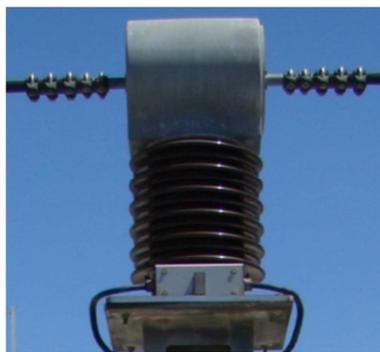


Figura 2-82 Transformador de corrente

- **Descarregadores de sobretensões** - Estes equipamentos destinam-se a proteger a instalação contra sobretensões que possam surgir na rede provocadas por descargas

atmosféricas ou manobras de equipamentos. Encontram-se instalados normalmente em Subestações e Postos de Zona Neutra. Na Figura 2-76 pode-se observar um descarregador de sobretensão instalado em posto de catenária.

- **Transformadores de Alimentação** - Os transformadores de alimentação ligados à catenária destinam-se a alimentar os serviços auxiliares dos Postos de Catenária, as instalações elétricas da Sinalização e as instalações elétricas das estações em caso de falha do sector público. Estes equipamentos possuem uma relação de transformação 25000/230V permitindo transformar a tensão existente na catenária num sistema monofásico de baixa tensão. Na Figura 2-75 pode-se observar um transformador de alimentação instalado em posto de catenária.
- **Fusível** - São aparelhos que se destinam a proteger os transformadores de alimentação contra sobreintensidades. Estes equipamentos são dotados de conveniente poder de corte para correntes de curto-circuito previstas, atuando por fusão de um elemento fusível quando a corrente que o percorre ultrapassa o valor estipulado. Comparativamente a outros dispositivos de proteção, nomeadamente o disjuntor, o fusível tem um tempo de resposta mais rápido para correntes de curto-circuito mais elevadas. Trata-se também de um dispositivo mais barato que o disjuntor [7]. A Figura 2-83 ilustra um fusível de média tensão colocado no seu respetivo suporte para efetuar a proteção do transformador.



**Figura 2-83 Fusível de Média tensão de proteção do transformador**

## **2.5 Circuito de Retorno da Corrente de Tração, Terras e Proteções**

### **2.5.1 Conceção geral**

O normativo RTC+TP (circuito de retorno da corrente de tração, terras e proteções), é a especificação de retorno da corrente de tração, terras e proteções [30], cujo objetivo principal é criar um ambiente seguro para os seres humanos e sistemas (eletrónicos) na vizinhança da via-férrea e, ainda, garantir o retorno da corrente de tração. O sistema de terras em instalações elétricas de tração, terá de ser compatível com os sistemas elétricos de sinalização ferroviária e telecomunicações, instalados na rede eletrificada em conformidade com as Normas Internacionais relativas às emissões de alta-frequência [31].

O circuito de retorno da corrente de tração está associado às ligações de proteção dos elementos metálicos da infraestrutura, tendo como objetivo garantir que em nenhum elemento da infraestrutura ferroviária, bem como no material circulante em contacto direto com o carril, se verifica uma tensão de contacto superior a 60V em regime permanente e de 842V durante 100ms em regime de curto-circuito [30]. Para todos os condutores necessários aos sistemas de terras e retorno da corrente de tração (LTI, carris, CDTE, CDA) uma interrupção no sistema de retorno de corrente não pode originar tensões de contacto para além dos limites. Também a instrução técnica de retorno de correntes de tração [30], impõe que todas as terras sejam comuns, ou seja, não deverão existir terras independentes ou separadas para cada especialidade. Desta forma reduzem-se as interferências eletromagnéticas e tensões de passo nas instalações de terceiros, sobretudo nos sistemas de sinalização.

### **2.5.2 Ligações e montagens tipo**

Para se garantir um caminho de retorno controlado para a corrente de tração com baixa impedância longitudinal, tem de existir vários condutores paralelos distribuídos ao longo da via, nomeadamente, os carris, os Condutores de Terra Aéreos (CDTA), os Condutores de Terra Enterrados (CDTE), as blindagens dos cabos de sinalização e telecomunicações e o solo (terra), desde a zona neutra até à subestação. O sistema de retorno tem de ser

eletricamente contínuo, existindo sempre dois caminhos por via para o retorno da corrente de tração (critério de redundância).

Os paralelos entre condutores são efetuados por intermédio de ligações transversais tipo, equidistantes, destinadas a garantir que as tensões de passo e de contactos se conservam abaixo dos limites exigidos pela Norma EN 50122-1.

As ligações transversais principais dividem-se em dois tipos [32]:

- LTI – Ligação Transversal Integral;
- LEAE – Ligação Equipotencial Aéreo Enterrado.

As LTI são instaladas ao longo da via a distâncias regulares equidistantes.

As LEAE de projeto são necessárias para garantir as tensões de contacto abaixo dos limites estabelecidos, em regime de curto-circuito. As LEAE associadas a elementos de catenária são necessárias para garantir a proteção dos referidos elementos e/ou pessoas em contacto com os mesmos.

### **2.5.3 Sistemas de retorno existentes na REFER EPE**

Na REFER EPE existem três tipos de sistemas de retorno:

- Sistema Standard (Sistema ST);
- Sistema com condutor de retorno (Sistema RT);
- Sistema de Autotransformador (Sistema AT).

#### **2.5.3.1 Sistema Standard**

O sistema (ST), apresentado na Figura 2-84, é o mais simples e económico dado que a catenária se baseia apenas na utilização de um fio de contacto (e eventualmente num cabo

de suporte). Neste sistema, o retorno da corrente de tração é feito pelos carris e por um cabo de terra enterrado.

Este sistema, apresenta algumas desvantagens, dado que a corrente circula numa malha de grande extensão, (desde a subestação até à carga através da catenária, e de novo até à Subestação através dos carris, do cabo de terra enterrado e do solo). Logo a impedância vista pelo pantógrafo é bastante elevada o que limita a distância para o fornecimento de energia [31]. Uma segunda consequência está no facto do sistema (ST) produzir campos magnéticos elevados, devido à grande distância que separa os condutores que transportam a maior parte da corrente de tração, apresentando maiores interferências eletromagnéticas com os sistemas de sinalização. Devido ao número limitado de condutores para o retorno da corrente de tração, a fração da corrente transportada pelo solo também é relativamente elevada [31].

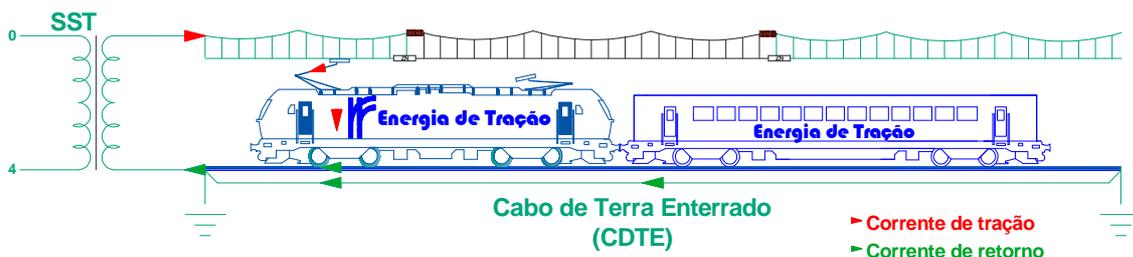


Figura 2-84 Retorno da corrente de tração no sistema *standard*

### 2.5.3.2 Sistema com condutor de retorno

No sistema RT, o sistema de terras e de retorno da corrente de tração tem como base os carris, o cabo de terra aéreo (CDTA) contínuo e pelo menos num cabo de terra enterrado (CDTE). Os condutores do sistema de retorno da corrente são ligados entre si em intervalos regulares, para que a corrente de retorno no sistema se distribua pelos vários condutores. Na Figura 2-85 é apresentado o esquema de funcionamento do sistema RT.

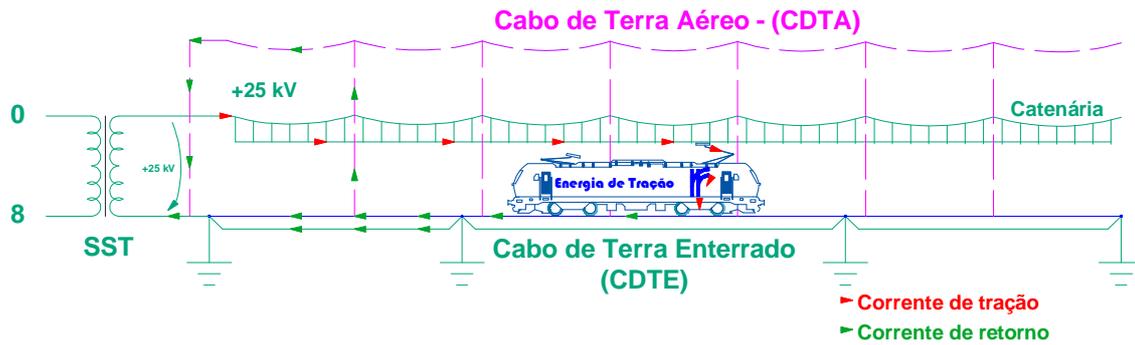


Figura 2-85 Esquema de funcionamento do sistema RT

O CDTA está na proximidade do fio de contacto (existe um acoplamento magnético mútuo entre o CDTA e o fio de contacto) o que reduz a impedância do sistema. Este fenómeno tem um comportamento idêntico ao de um transformador com enrolamentos primário e secundário. Como consequência, uma parte considerável de corrente circula no CDTA (aproximadamente 20%) [31], que é superior ao que se obteria se o circuito de distribuição fosse puramente resistivo. Como consequência a intensidade de corrente de retorno que circula no solo é menor do que a que se verifica no sistema ST.

O CDTE (Cabo de Terra Enterrado) tem como finalidade assegurar a terra das instalações, funcionando como plano de massa da instalação. Os objetos metálicos nas imediações do corredor ferroviário tem de ser ligados ao CDTE (terra mãe).

### 2.5.3.3 Sistema Autotransformador

No sistema de autotransformador a subestação alimenta a catenária (fio de contacto e cabo de suporte) a uma tensão de 25 kV e, simultaneamente, alimenta os postos de autotransformador através do *feeder* que se encontra em oposição de fase em relação à catenária (tensão a -25 kV). Neste sistema há que distinguir entre o transporte e o fornecimento de energia às composições [31], como é ilustrado na Figura 2-86. Como resultado, o transporte de energia entre a Subestação e os Autotransformadores é efetuado a uma tensão de 50 kV.

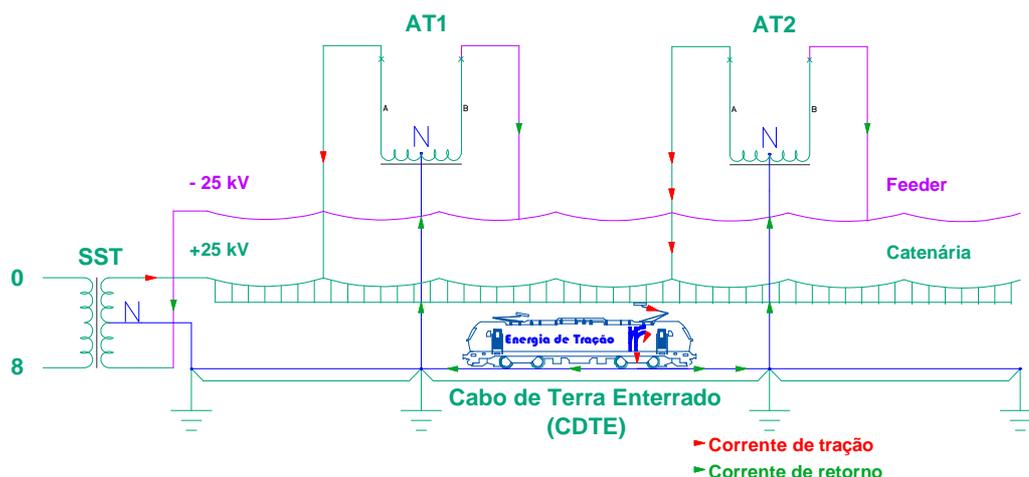


Figura 2-86 Transporte de energia a 50 kV e alimentação da locomotiva de tração a 25 kV

Quando uma composição ocupa uma secção situada entre dois autotransformadores, Figura 2-87, a SST está a alimentar a composição por intermédio de dois postos AT. Por outro lado, a corrente de tração flui através de dois autotransformadores, e retorna à Subestação essencialmente através do *feeder*, pois segundo estudos efetuados, verifica-se que uma corrente mínima flui para o lado da SST [8]. Ainda nesta situação, a corrente de retorno nas secções adjacentes do sistema AT (nas quais a composição não se encontra) circula essencialmente através do *feeder*.. A Figura 2-87 representa o fluxo teórico de corrente no sistema autotransformador (o número de setas traduz a intensidade de corrente em cada condutor).

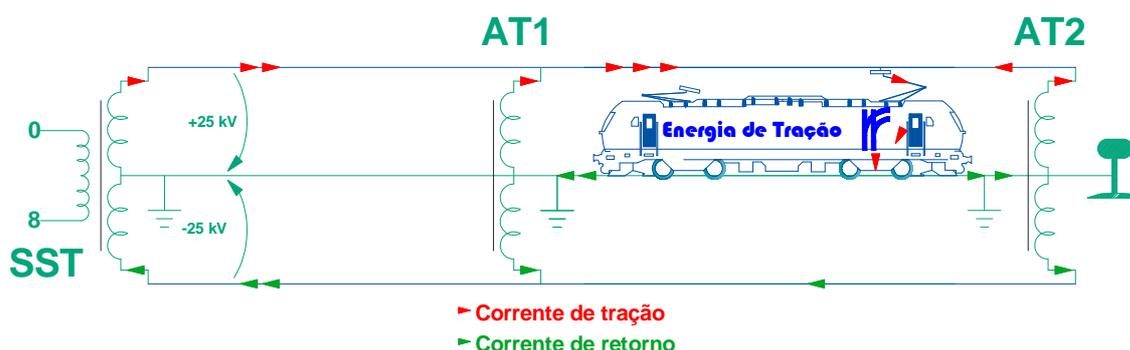


Figura 2-87 Esquema de funcionamento da distribuição de corrente no sistema autotransformador adaptado de [31]

Assim, a corrente de tração nos carris e no solo nestas secções adjacentes é mínima, comparada com a totalidade da corrente de tração [31]

### 2.5.4 Ligações transversais LTI e LEAE

A ligação LTI tem como função assegurar a redistribuição da corrente de retorno entre as várias artérias longitudinais e garantir que os valores limite da tensão não são ultrapassados em regime estacionário ou de curto-circuito. A Figura 2-88 ilustra o CDTA ligado ao poste, bem como a ligação do poste e da via ao CDTE por intermédio de uma barra de terra. Observa-se ainda na Figura 2-88 a ligação da via à barra de terra, estando esta representada pela caixa de impedância através de um acoplamento indutivo. A mesma figura mostra ainda a existência de dois CDTE, situação em que existem dois caminhos de cabos, ambos contendo condutores com cabos metálicos.

Este tipo de ligações é usado em subestações de tração, nos postos de catenária (quando compatível com a sinalização), na fronteira entre zona de estação ou parque e a plena via, em intervalos regulares entre a subestação e o fim do setor de catenária ( as distâncias dependem da potência da subestação) e nos autotransformadores dos sistemas AT.

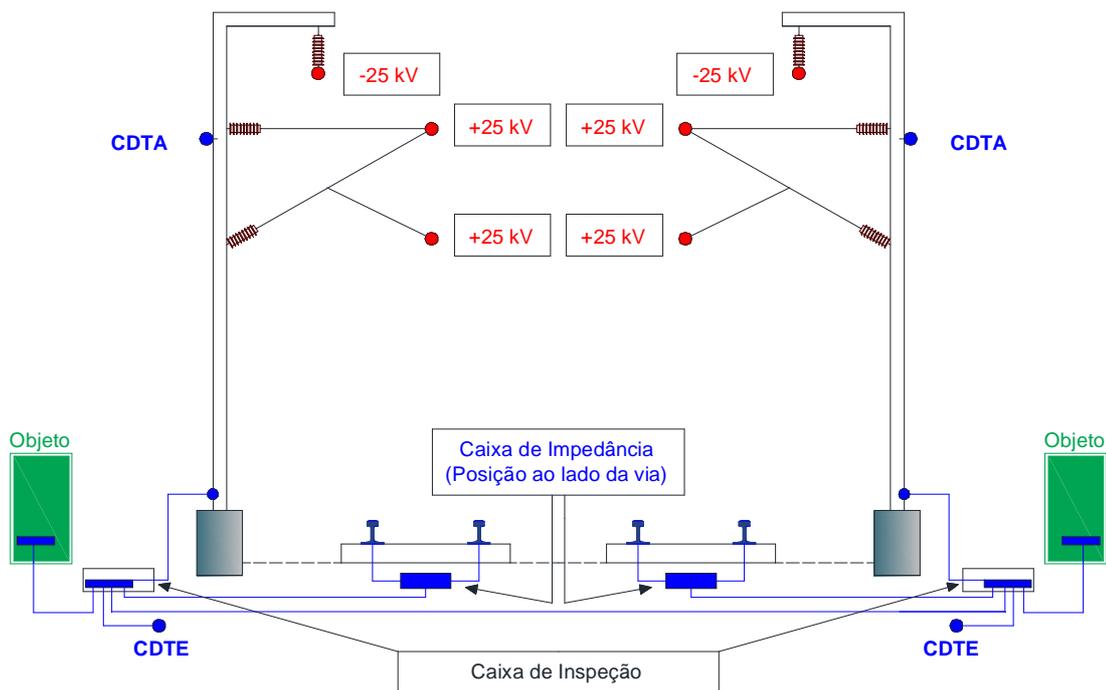
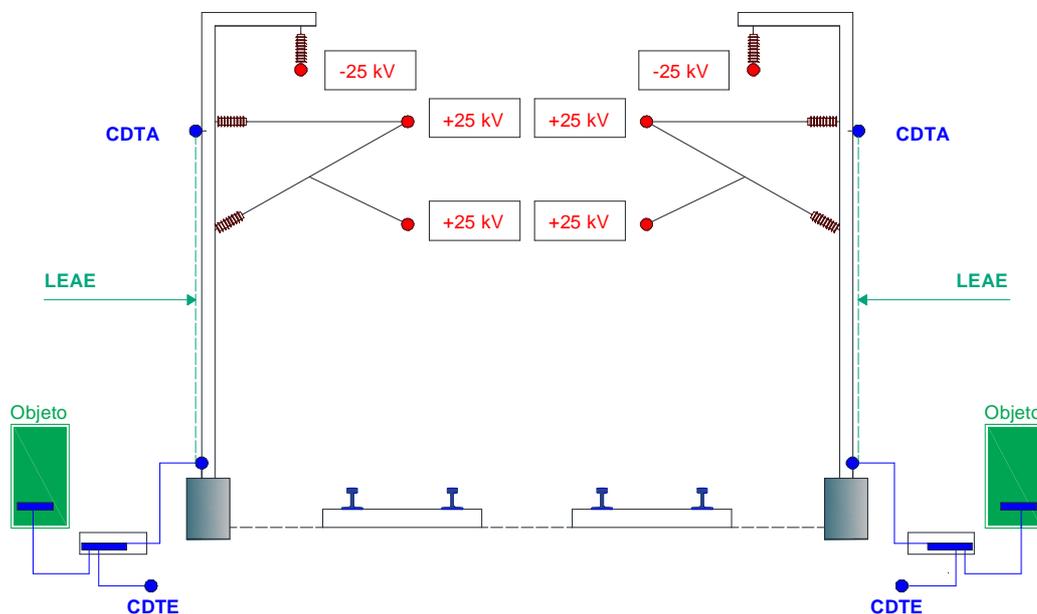


Figura 2-88 Desenho de LTI para via dupla, princípio do sistema autotransformador

A LEAE é uma ligação transversal entre o cabo de terra enterrado e o cabo de terra aéreo em ambas as vias. As LEAE destinam-se a garantir que as tensões de contacto estejam abaixo dos limites estabelecidos em regime de curto-circuito. As LEAE associadas a elementos de catenária são necessárias para garantir a proteção dos referidos elementos e das pessoas que possam estar em contacto com os mesmos elementos.

A Figura 2-89 mostra o CDTA ligado ao poste e o poste ligado ao CDTE por intermédio de uma barra de terra, em conformidade com as normas aplicáveis.



**Figura 2-89 Desenho de ligação LEAE, via dupla, dois CDTE e sistema autotransformador**

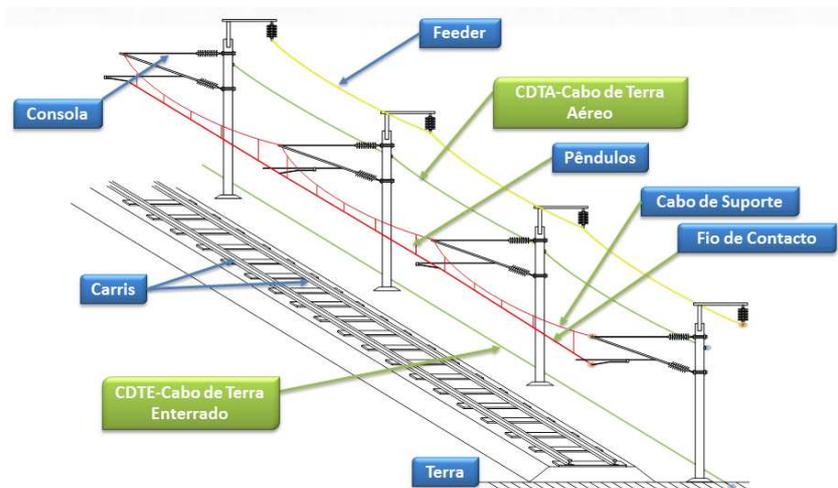
A distância ao longo da via entre ligações transversais varia consoante o tipo de ligação (tanto para LTI como para LEAE). Estas distâncias tendem a ser reduzidas com o aumento da potência instalada numa subestação, de forma a que as tensões de passo e de contacto estejam dentro dos limites estabelecidos na norma EN50122-1 [30]. As correntes de curto-circuito determinam a classificação de zonas (verde ou vermelha) da via. No local da via onde a corrente de curto-circuito é superior à normalizada essa zona é classificada de zona vermelha, caso contrário é zona verde.

A Tabela 2-4 apresenta alguns exemplos das distâncias entre as ligações transversais de forma a criar um sistema de segurança ferroviário, onde as tensões de passo e as tensões de contacto estejam dentro dos limites estabelecidos (EN 50121-1) [30]. As distâncias de ligação variam com o sistema de sinalização utilizado, zona em relação à subestação e a potência da SST.

**Tabela 2-4 Distâncias entre ligações transversais**

Tipo	Situação	Sinalização	Zona	Distância [m]		
				15 MVA (presente especificação)	17,5 MVA (aumento de potência)	20 MVA (aumento de potência)
LTI-LTI	Normal	Bicarril	Verde	1400	1300	1200
LTI-LEAE	Normal	Bicarril	Vermelha	700	650	600
LTI-LTI	Normal	Monocarril	Verde	700	650	600
LTI-LEAE	Normal	Monocarril	Vermelha	350	325	300
LTI-LTI	Especial	Bicarril	Verde	900	840	750
LTI-LEAE	Especial	Bicarril	Vermelha	450	420	375
LTI-LTI	Especial	Monocarril	Verde	450	420	375
LTI-LEAE	Especial	Monocarril	Vermelha	225	210	190

A Figura 2-90, representa a infraestrutura catenária, onde se pode visualizar o cabo de terra aéreo e o cabo de terra enterrado.



**Figura 2-90 Representação esquemática da infraestrutura catenária**

### **3 Acompanhamento de trabalhos**

Ao longo do estágio acompanhei a equipa técnica da REFER em diversos trabalhos, dos quais irei apresentar dois deles (secção 1.2).

#### **3.1 Ensaio de relés de proteção e religação automática de disjuntor**

##### **3.1.1 Introdução**

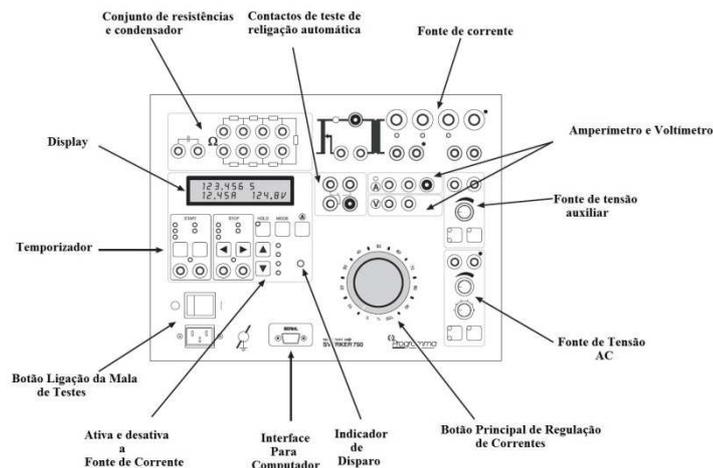
Um dos trabalhos acompanhados no estágio foi a modificação de parte da instalação de uma subestação de tração. Previamente iniciou-se um estudo sobre o funcionamento da religação automática de um disjuntor após defeito, com o objetivo de implementar um encravamento da religação automática do disjuntor de saída da subestação. Posteriormente foi efetuada a verificação de funcionamento da religação por injeção de sinais de defeito por intermédio de uma mala de testes de relés.

##### **3.1.2 Descrição e enquadramento do trabalho**

Os relés são os equipamentos de comando do sistema de proteção (atuando como sensores de vigia do circuito elétrico). É através dos relés que se identificam e localizam os defeitos, fazendo com que os disjuntores atuem, interrompendo as correntes de curto-circuito e impedindo que o circuito onde estão inseridos seja afetado. Neste tipo de testes são também injetados sinais no relé, nas condições normais de curto-circuito e durante o tempo definido para interromper as correntes em intervalos de tempo considerados normais. Hoje em dia existem malas (modernas) de testes para relés, que permitem avaliar várias funções sob condições de curto-circuito tais como sobrecorrente direcional e sobrecorrente instantânea. Estas malas de testes são malas geradoras de sinais de corrente, tensão e frequência que permitem estudar e observar a atuação do relé sob determinadas condições de curto-circuito pré-estabelecidas, bem como a execução de testes às parametrizações dos relés e a possível identificação de problemas funcionais dos mesmos. Os sinais de tensão e corrente representam o transformador de tensão (TT) e o transformador de corrente (TC), respetivamente.

A mala de testes é necessária para a verificação de determinados ajustes no relé, mesmo antes do mesmo entrar em operação, e também para a verificação do seu estado após um certo tempo de vida útil e de acordo com o plano de manutenção definido pelo fabricante. A mala de ensaio que a REFER EPE possui é da marca *Sverker 750*, destinada para testar relés de proteção. Quando o relé de proteção dispara as tensões e correntes de saída da mala são interrompidas. As faixas de saída de corrente são [0,10] A, [0,40] A e [0, 100] A. A saída de corrente depende da carga do relé. A mala possui também uma fonte de tensão alternada que varia entre 0 e 120VAC que pode ser usada para fornecer tensão de entrada ao relé. As resistências e o condensador podem ser ligados ao circuito para provocar desfasamentos no sinal.

A Figura 3-1 ilustra a mala de testes que a REFER EPE utiliza nos seus testes e ensaios de proteções.



**Figura 3-1 Mala de ensaios da REFER**

A religação automática, é uma das funções de automatismo do sistema de comando e controlo das SST, sendo efetuada por intermédio de um relé religador que proporciona o restabelecimento da tensão após tempo de isolamento definido.

Um ciclo de religação automático é iniciado pela operação de um relé de proteção, desde que o disjuntor esteja fechado até ao momento da operação da proteção. A contagem do tempo de religação inicia quando o disjuntor disparou. No final do tempo pré-definido é dado um sinal de fecho ao disjuntor.

Após ter decorrido o tempo de religação é enviada uma ordem de fecho ao disjuntor, e caso o defeito já não esteja presente o disjuntor permanece fechado, caso contrário o relé tornará a acionar a abertura do disjuntor.

A religação automática destina-se a eliminar automaticamente defeitos não permanentes (como por exemplo a queda de um ramo) assegurando reposição da alimentação da catenária após interrupções de curta duração (assegurando o tempo de rearme do disjuntor), realizadas sem colaboração humana (realizadas automaticamente)

Na subestação de tração de Irivo (linha do Douro), quando o relé de proteção por mínima impedância ou máxima corrente atuam, os mesmos dão ordem de abertura ao disjuntor de alimentação à catenária. Na Figura A3- 1, disponível no Anexo 3, podemos observar a zona de intervenção dos trabalhos.

Por razões de segurança houve a necessidade de efetuar um encravamento, para impedir a manobra de fecho do disjuntor via telecomando em caso de a catenária estar sobre defeito, como se pode observar na Figura A3- 8 do Anexo 3.

Foi então necessário realizar a análise dos esquemas elétricos de princípio que se disponibilizam no Anexo 3.

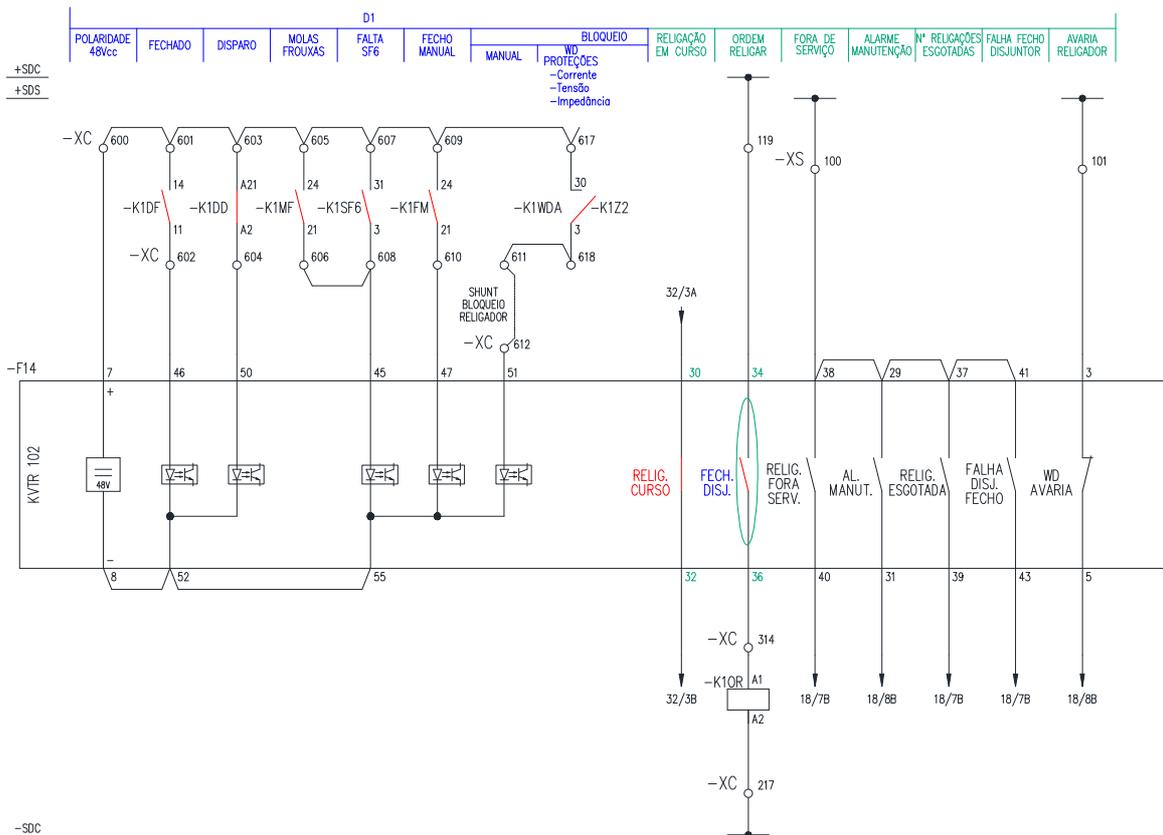
No esquema da Figura A3- 8 observa-se que pode ser dada uma ordem de fecho do disjuntor por telecomando. O sinal associado a ordem sai do borne 303, ao qual está ligado o borne 304, e que o contato 14-11 é acionado pelo contactor (-K1WD0) presente no Anexo 3 Figura A3- 11, fechando-se o disjuntor pois a bobina de ligação BL do mesmo fica alimentada por +SDC e - SDC.

Quando o contacto 14-11 está fechado temos a indicação que a proteção por falta/máxima tensão KVFG 122, a proteção de máxima intensidade KCEC 142 e a proteção de mínima impedância LFZP141 não apresentam nenhuma avaria interna, como se constata na na Figura A3- 11. Caso contrário se os “*watch-dog*” das proteções atuassem o relé -K1WDA irá fechar os contactos 41-4 (Figura A3- 9) e por sua vez o relé -K1DD ao estar alimentado irá fechar os contactos A11-A1 originando o fecho do disjuntor dado que a bobina de disparo BD é alimentada, como esquematizado na Figura A3- 8 do anexo 3.

Posteriormente foi necessário estudar o esquema de principio da religação automática para perceber como estava a ser executado o seu modo de funcionamento, (Figura 3-2). Neste também foi estudado o modo de funcionamento da caixa de comando do disjuntor para interpretar os seus sinais e as suas funções.

Na Figura 3-2 são mostradas as condições para que possa existir religação automática.

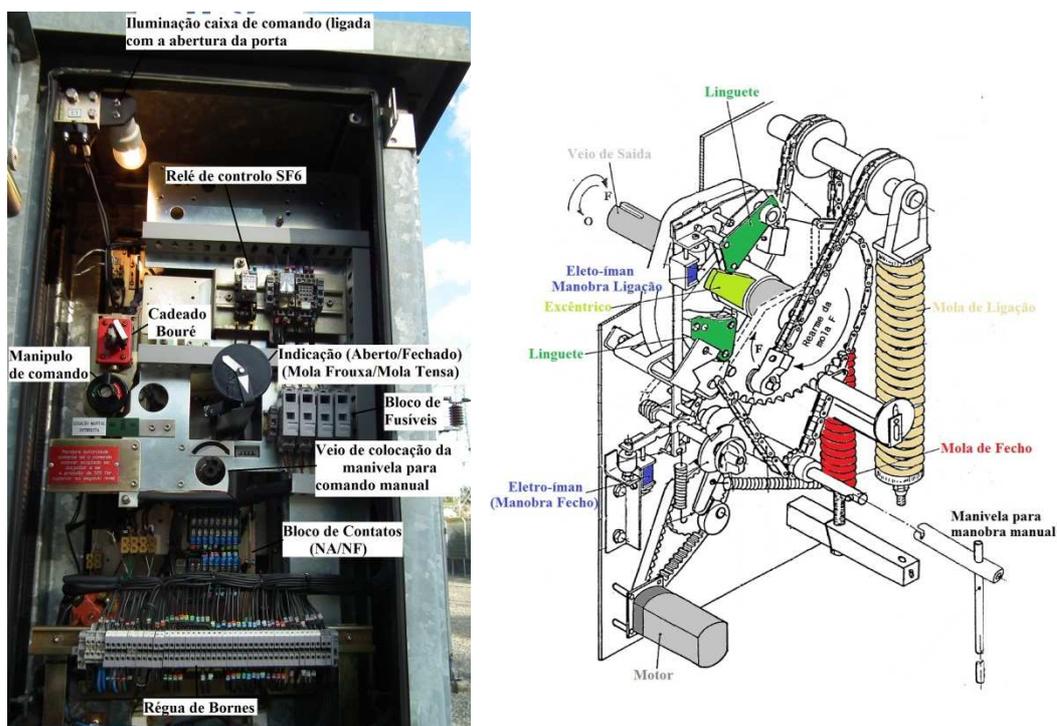
Na mesma figura visualiza-se que, para a religação se realizar, é necessário ter existido um disparo do disjuntor, o que implica que os contactos 14-11 acionados pelo relé -K1DF estão abertos (Figura A3- 9). Quando a bobina do relé não é energizada, contactos 5-6 abertos ligados aos bornes 70-71 (Figura A3- 13 do Anexo 3), logo os contactos A21-A2, acionados pelo relé -K1DD, têm de se encontrar fechados o que implica ter existido um disparo da proteção de máxima intensidade, ou da proteção de mínima impedância, ou então um disparo por “watch dog” por avaria em qualquer uma das proteções.



**Figura 3-2 Condições do relé de proteção religador (KVTR 102), da SST de Irivo, para existir religação automática**

Na caixa de comando do disjuntor (Figura A3- 13, Anexo 3) estão presentes os contactos auxiliares (contactos mecânicos) S1 (comutador de sinalização), S2 (comutador de sinalização), S4 (interruptor do motor) que mudam de posição à medida que o veio do disjuntor roda. Está ainda presente o circuito de aquecimento (que é composto por uma resistência para evitar o aparecimento de humidade), existe um circuito de iluminação e o circuito de força motriz que alimenta o (motor que tem a função de rearme da mola de abertura e mola de ligação). Ainda na caixa de comando do disjuntor (Figura A3- 13, Anexo 3) estão presentes circuitos de comando e sinalização de estados (estes circuitos são alimentados a corrente-contínua, com exceção do circuito de aquecimento e iluminação).

A Figura 3-3 ilustra a caixa de comando do disjuntor e os mecanismos de manobra, nomeadamente, a mola de ligação para rearme do disjuntor e a mola de abertura.



**Figura 3-3 Caixa de comando do disjuntor (esquerda) da SST de Irivo e representação dos mecanismos de manobra (Direita)**

O disjuntor possui o seu dielétrico a SF6 (Hexafluoreto de enxofre). A injeção deste gás sobre pressão por sopragem térmica é feita em sincronismo com a abertura dos contactos para ajudar na extinção do arco elétrico, na câmara de extinção do arco. A vigilância volumétrica do SF6 é efetuada por um densímetro com dois monocontactos de pressão, o monocontacto P1 11-12 que serve de aviso (para prever o complemento de enchimento) e o

monocontacto P2 21-22 é um alarme que serve para encravar o disjuntor em posição quer para provocar o desarme, como esquematizado no Anexo 3 Figura A3- 13.

O monocontacto P1 ao ser fechado vai acionar a alimentação do relé -K1SF6 que se encontra no Anexo 3 Figura A3- 12, este por sua vez vai fechar os contactos com o mesmo nome (monocontacto de pressão de SF6) que se encontram no Anexo 3 Figura A3- 6 e Figura A3- 7, que são de sinalização de alarme local e telecomando, e envia um sinal também para o religador (Figura 3-2).

O monocontacto P2 ao ser fechado (Anexo 3, Figura A3- 13) vai alimentar o relé de pressão de SF6 (K3) originando a abertura do disjuntor. Este relé K3 por sua vez irá alimentar o relé -K1DSF6 que se encontra no (Anexo 3 Figura A3- 12) que por sua vez irá fechar os contactos 14-11 (Anexo 3, Figura A3- 6) bem como os contactos 24-21 (Anexo 3 Figura A3- 7) que são de sinalização de alarme local e telecomando.

Outra condição observada na Figura 3-2 é que para existir religação do disjuntor a mola de religação tem de estar armada (não pode estar frouxa), esta informação é enviada pelo contacto auxiliar S4 (13-14) presente no Anexo 3 Figura A3- 12. Se o mesmo contacto se encontrar fechado, o relé -K1MF que se encontra no chassi de relés vai ser alimentado e vai indicar ao módulo religador KVTR 103 (Figura 3-2) o fecho dos contactos 24-21.

Após o estudo de todos os esquemas a opção tomada para que a religação fosse bloqueada, para não ser permitida a ordem de fecho do disjuntor por telecomando, foi a de desfazer a ligação do borne 305-304 (a vermelho no Anexo 3 Figura A3- 8) e efetuar a ligação 303-405 (representado a vermelho no mesmo esquema).

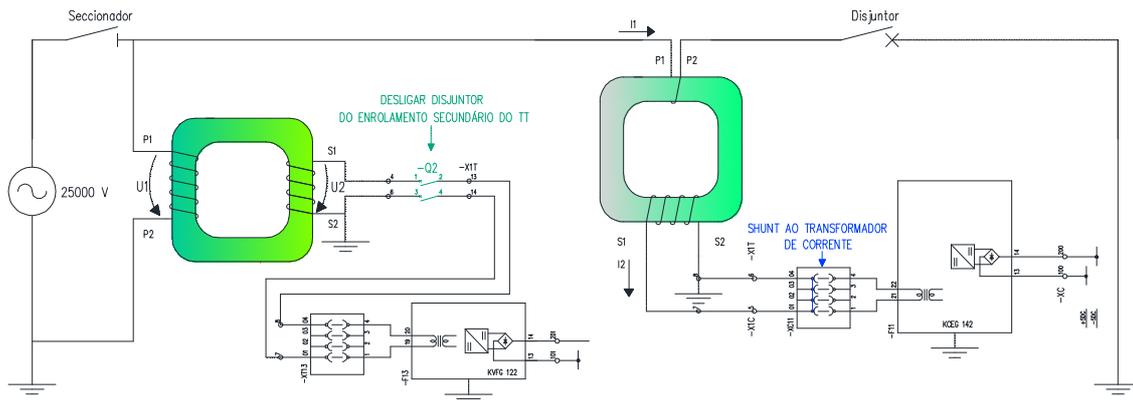
Com esta solução encontrada, ao ser enviada uma ordem de fecho ao disjuntor via telecomando (Anexo 3, Figura A3- 8) será excitado o relé -K1FM, que é o relé de acionamento de comando local, dando ordem de fecho ao contacto 24-21 do relé religador, o que irá inibir a religação automática. Com esta solução toda a ligação manual através do painel de comando, ou ligação automática sobre um defeito, não poderá provocar a religação automática do disjuntor, o mesmo só poderá ser ligado na caixa de comando após a análise da causa do disparo.

Esta solução foi alvo de testes para fazer disparar o relé de corrente para iniciar a religação automática e fazer a tentativa de religação manual. A injeção de correntes foi realizada com a mala de testes de ensaio da REFER-EPE. Antes dos ensaios foram tomadas medidas necessárias para que estes decorressem em segurança contemplando três fases, como se descreve nos parágrafos seguintes.

A primeira fase do teste foi a de desligar o disjuntor e retirar as chaves dos seccionadores manuais para os poder desencravar e manobrar manualmente para ficar com uma zona seccionada (com ausência de tensão) (Anexo 3 Figura A3- 3).

A segunda fase consistiu em efetuar um shunt ao transformador de corrente (Figura 3-4). Não se deve deixar em aberto os terminais do secundário do transformador de corrente, dado que quando se desligam aparelhos de medida a ele ligados, como o transformador de corrente em funcionamento é imposto ao primário a corrente a medir, a qual cria um fluxo elevado no seu núcleo. Nestas condições a corrente no secundário cria um fluxo que contraria o fluxo do primário, pelo que o fluxo resultante é reduzido. Em vazio apenas existe o fluxo da corrente primária (bastante elevado), devido a este facto aparecerão aos seus terminais tensões elevadas por não existir efeito desmagnetizante no secundário, dado que a corrente de excitação toma o valor da corrente do primário. Esta situação originará um fluxo muito intenso no núcleo provocando grandes perdas no ferro [34], podendo resultar em uma explosão do núcleo.

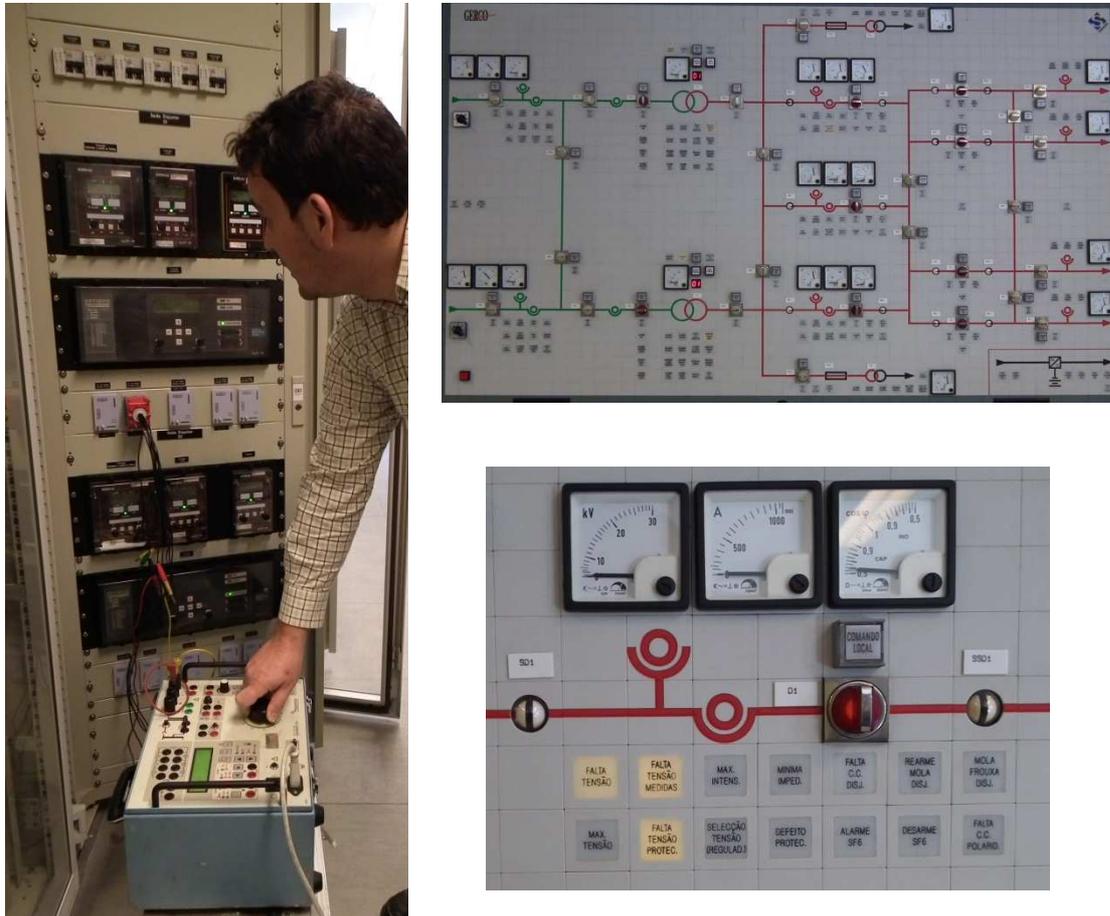
Ainda na segunda fase, ao contrário do transformador de corrente, quando se desliga uma carga do secundário do transformador de tensão (TT), o mesmo tem de ser desligado, para evitar curto-circuitos que danificariam o isolamento do mesmo [34]. Esta operação consistiu em desligar o disjuntor do transformador de tensão (TT). Nas folhas 3 e 10 do Anexo 3 Figura A3- 4 Figura A3- 5 encontram-se os esquemas da subestação onde se trabalhou nesta fase.



**Figura 3-4 Procedimentos com aparelhagem de medida em testes de proteções**

Na terceira e última fase foram injetados sinais de corrente, ao relé de máxima corrente provocando o seu disparo dando assim ao iniciar da religação automática. Durante a religação foram dadas ordens de fecho ao disjuntor pelo painel de comando da subestação e a religação bloqueou com sucesso. Após o ensaio do disjuntor D1, efetuou-se também a modificação na instalação afeta à religação dos disjuntores D1 e D2.

Na Figura 3-5 observa-se o teste relativo à injeção de corrente através da mala de ensaios realizado para testar a religação automática, e ao mesmo tempo também testar a proteção de corrente.



**Figura 3-5** Teste de proteções e religação (esquerda), painel de comando e sinalização da SST de Irivo (à direita e em cima), pormenor do disjuntor D1 e sinalizações (à direita e em baixo)

A religação ao ficar bloqueada através da ligação manual, efetuada a partir do painel de comando Figura 3-5, implica que o fecho do disjuntor só poderá ser efetuado a partir da caixa de comando do próprio disjuntor, e só após se ter eliminado a causa do disparo.

## **3.2 Montagem de caixa de comando elétrico de seccionador**

### **3.2.1 Introdução**

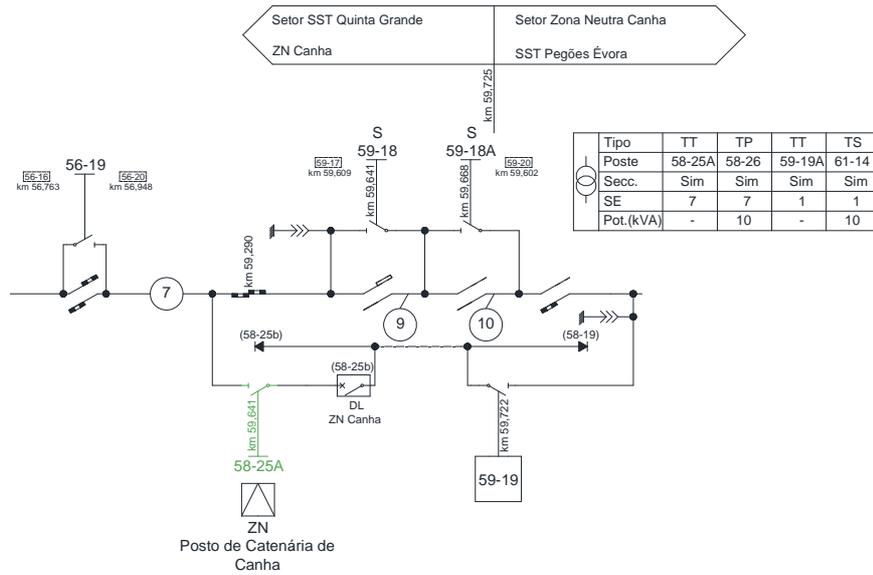
Outro dos trabalhos acompanhados no estágio foi a instalação de uma caixa de comando de um seccionador, no posto de catenária de Canha (Linha de Vendas Novas). Este trabalho foi realizado em parceria com uma empresa do grupo REFER, a REFER TELECOM para fazer a sua integração ao telecomando.

### **3.2.2 Descrição do trabalho**

Os servo-motores de seccionadores de catenária destinam-se a comandar seccionadores de catenária. Estes seccionadores podem ser comandados localmente através de duas maneiras:

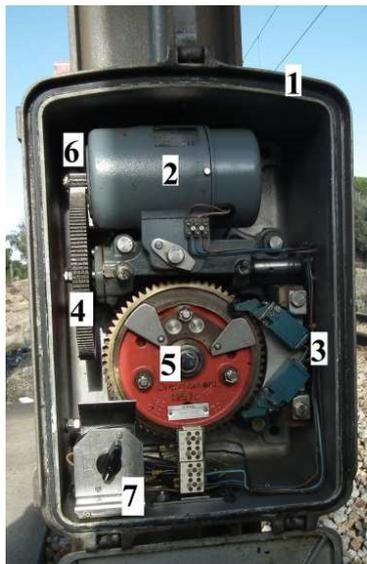
- Eletricamente através dos painéis de comando instalados nos postos de catenária;
- Manualmente através de uma manivela, que é acoplada a um sem-fim, que por sua vez transmite movimento ao servo-motor.

O seccionador pode ser comandado à distância, por telecomando a partir do PRT. A montagem da caixa de comando foi realizada no posto de catenária da zona neutra de Canha, no poste 58-25 A, representado a verde na Figura 3-6. Em condições normais, o seccionador instalado no poste 58-25A e o disjuntor DL instalado no poste 58-25B encontram-se na posição de aberto. Foi apenas necessário abrir o seccionador instalado no poste 59-19 que é de abertura manual, situado no quilómetro 59,722.



**Figura 3-6 Posto de catenária de Canha**

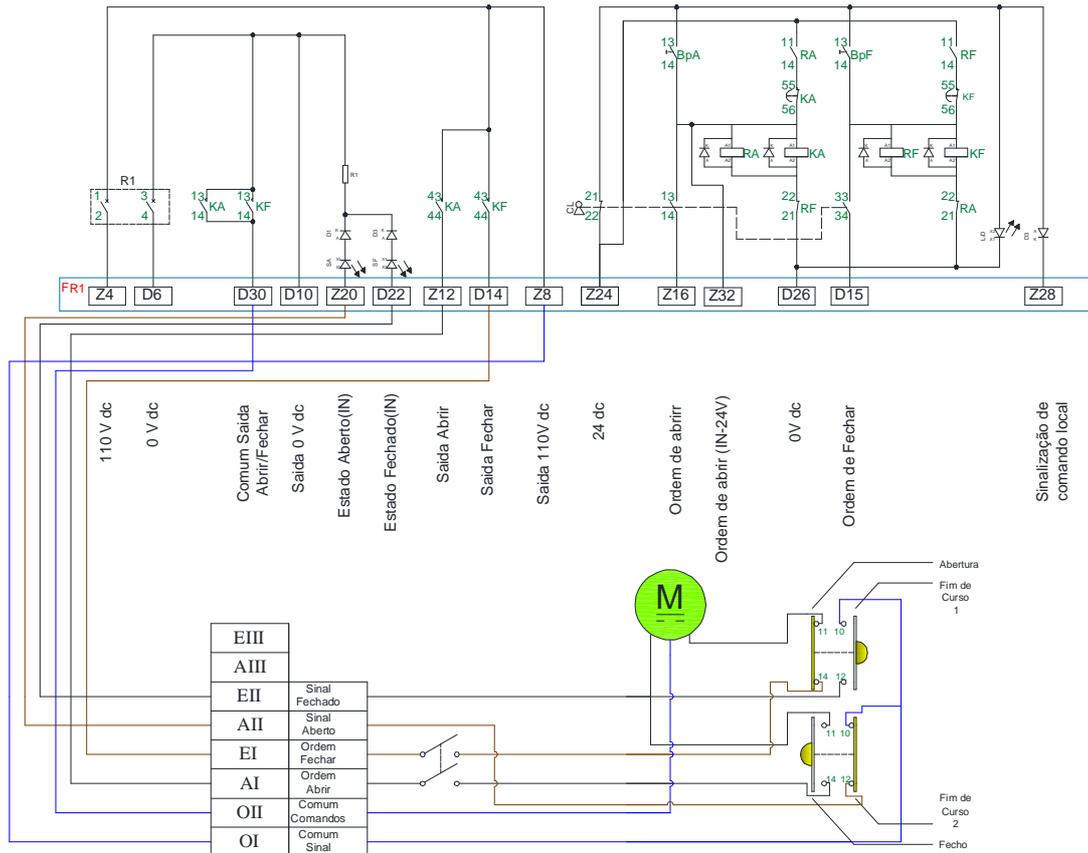
A Figura 3-7 ilustra a caixa de comando do seccionador e os seus componentes principais.



- 1-Caixa de comando
- 2-Motor
- 3-Interruptores de fim de curso
- 4-Engrenagem
- 5-Acoplamento de fricção (tipo embraiagem)
- 6-Pinhão
- 7-Interruptor de segurança

**Figura 3-7 Caixa de comando do seccionador telecomandado**

Na Figura 3-8 podemos visualizar o funcionamento da caixa de comando do seccionador.

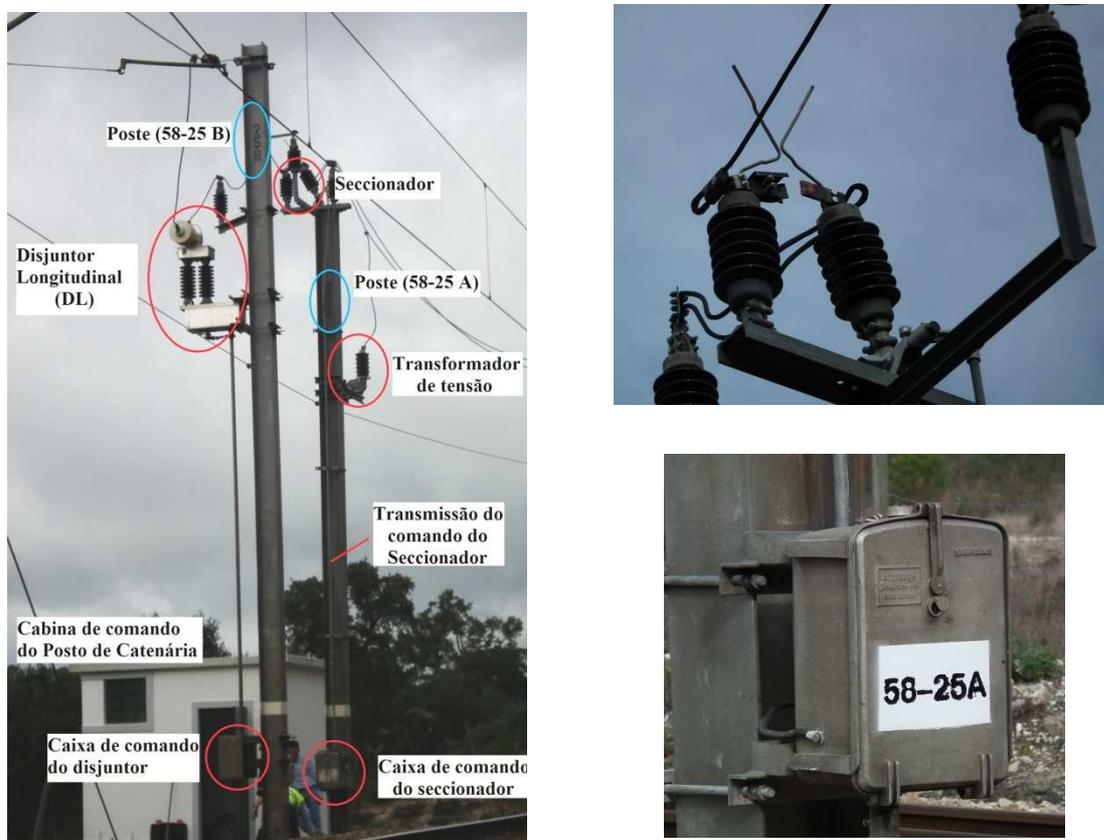


**Figura 3-8 Esquema de ligações da caixa de comando do seccionador**

Se o seccionador estiver no estado aberto e estando em comando local (CL), o que implica os contactos 21-22 fechados, ao premir o botão de fecho e retorno automático BpF (ordem de comando impulsional) alimentando os contactos 13-14 vai ser alimentado o relé RF abrindo o contato RF (21-22). Simultaneamente o contacto RF (11-14) será fechado e daí passar corrente ao contacto de abertura temporizado KF (55-56), alimentando o relé KF. O relé KF (ao estar alimentado) dá ordem de fecho dos contactos KF (13-14) e (43-44), ficando assim disponível a alimentação da caixa de comando do motor (110 V<sub>DC</sub>). Com o seccionador ainda na posição de aberto, é assinalada a entrada Z20 e o led SA aceso (interruptor de fim de curso 1 com os contactos 11-12 fechados). Ao iniciar o movimento (o motor) contactos 11-12 do interruptor de fim de curso 1 irão ser desfeitos (limite da rotação do motor) provocando a interrupção da alimentação do motor e efetuando a ligação dos contactos 10-12 do mesmo fim de curso o que vai indicar a posição de fechado pela alimentação da entrada D22 e consequentemente acenderá o led SF. À medida que se dá a ordem de ligação, o contacto 10-12 do interruptor de fim de curso 2 irá ser desfeito, saindo a sinalização de aberto e no final da manobra irá fechar os contactos 11-14, ficando assim

pronto para uma ordem de abertura se for premido o botão de fecho e retorno automático BpA. Nesta situação, a sequência será inversa pois a troca de polaridades é feita internamente no motor. Se o seccionador estiver a ser comandado por telecomando, a ligação CL é desfeita e, por estar encravada mecanicamente com os contactos 13-14 da entrada Z16 e 33-34 da entrada D15 (entradas de abertura e fecho respetivamente), os comandos de abertura e fecho passam a ser enviados por essas entradas.

A Figura 3-9 ilustra a aparelhagem exterior do posto de catenária de Canha onde foi instalada a caixa de comando do seccionador.



**Figura 3-9** Aparelhagem exterior do posto de catenária de canha (esquerda), seccionador (à direita e em cima), caixa de comando montada (à direita e em baixo)

## **4 Estudo técnico-económico da iluminação exterior das subestações de tração**

### **4.1 Introdução**

Hoje em dia existem várias tecnologias de iluminação disponíveis no mercado, estando outras em fase de investigação e desenvolvimento e por isso em avaliação do seu potencial. A área focada neste estudo é a iluminação das subestações de tração da REFER, com vista à redução do consumo elétrico através do uso de equipamentos energeticamente mais eficientes.

Este estudo baseou-se numa metodologia faseada com o objetivo de atingir as condições de iluminação desejadas para a subestações de tração, recorrendo a sistemas de iluminação energeticamente mais eficientes. As fases consideradas consistem na hipótese da substituição das lâmpadas, das luminárias ou mesmo dos circuitos elétricos. Após o estudo das tecnologias de iluminação, prossegue-se a uma análise de custos das diversas soluções para selecionar a melhor solução técnica e económica.

### **4.2 Definições**

Nesta secção vai-se aprofundar os fundamentos de iluminação para efeitos de estudos luminotécnicos. São expostas as principais grandezas e as relações entre elas, bem como as unidades em que se exprimem.

#### **4.2.1 Luminotecnia**

A luminotecnia é uma ciência multidisciplinar, onde é necessário avaliar vários fatores que serão os que irão definir o processo visual [35], com o objetivo de obter boas condições de visão associadas à visibilidade e segurança dentro de um determinado ambiente atendendo não só a aspetos técnicos mas também a fatores comportamentais.

### 4.2.2 Fluxo Luminoso

O fluxo luminoso ( $\Phi$ ) pode definir-se pela quantidade total de luz radiada visível ( $W_{visivel}$ ) ou emitida por uma fonte em cada segundo, medida em lúmens (lm). Esta grandeza influencia a eficiência do equipamento, mas não é uma medida da eficiência energética, porque existem lâmpadas com a mesma potência irradiando fluxos luminosos diferentes.

Daí que quando propomos uma melhoria temos de ter em conta que a proposta tem de ter um fluxo luminoso equivalente à lâmpada existente.

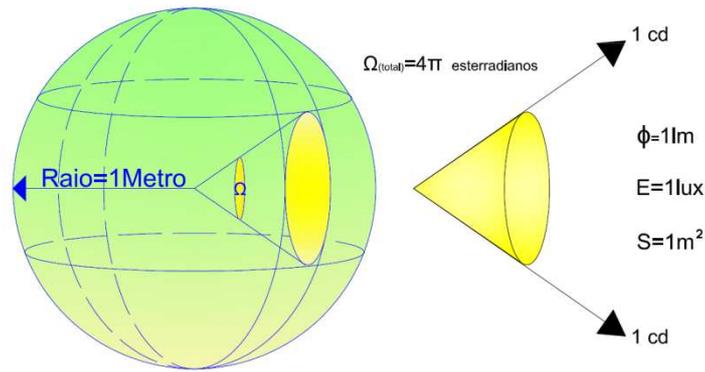
$$\Phi = \frac{W_{visivel}}{t} \quad 4-1$$

### 4.2.3 Intensidade luminosa

A intensidade luminosa  $I$  é a concentração de luz emitida por uma fonte de luz, por segundo numa determinada direção. Esta grandeza é definida pelo fluxo luminoso irradiado ( $\Phi$ ) por unidade de ângulo sólido  $\Omega$ , isto é, irradiado numa determinada direção [37]. A sua unidade de medida é a candela (cd).

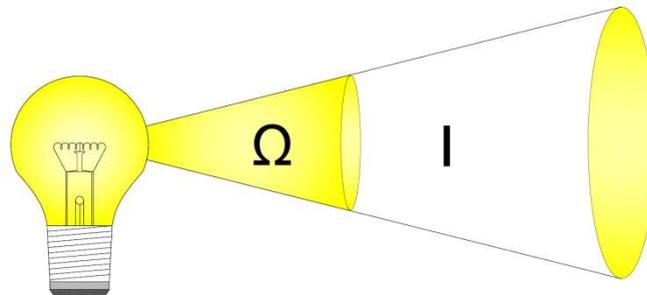
O ângulo sólido ( $\Omega$ ) define-se como o quociente entre a área abraçada por uma esfera com centro no vértice do ângulo e o quadrado do raio dessa esfera, a unidade é o esterradiano (sr). A Figura 4-1 ilustra uma esfera de raio  $r$  com o seu centro coincidente com o vértice de um cone. Assim, a área  $S$  da superfície da esfera abrangida pelo cone é proporcional ao ângulo sólido do cone  $\Omega = S/r^2$ .

Dado que a área total da superfície de uma esfera tem o valor de  $4 \cdot \pi \cdot r^2$ , o maior ângulo sólido possível, que abrange toda essa superfície, terá o valor de  $\Omega = 4 \cdot \pi$ .



**Figura 4-1 Ângulo sólido**

Para melhor se perceber o conceito de ângulo sólido em luminotecnica observe-se a Figura 4-2.



**Figura 4-2 Intensidade luminosa de uma fonte de luz em função do seu ângulo sólido.**

Uma fonte de luz não deverá, em geral, emitir um fluxo luminoso constante em todas as direções mas, considerando um cone suficientemente estreito com o seu vértice situado na fonte de luz, pode-se considerar que o fluxo luminoso emitido nesse cone é uniforme. A concentração desse fluxo  $\Phi$  no cone dividido pela abertura do cone, expressa por meio do seu ângulo  $\Omega$ , indica a intensidade luminosa que vem dada pela expressão 4-2.

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad 4-2$$

Esta medida indica como se distribui, a energia irradiada em todas as direções. Assim, duas fontes luminosas podem ter igual potência e, no entanto, uma delas, numa dada direção, emitir muito mais energia que outra.

#### 4.2.4 Iluminância

A Iluminância ( $E$ ), Iluminamento ou Nível de Iluminação é expressa em lux. Esta grandeza indica o fluxo luminoso ( $\text{lm}$ ) de uma fonte de luz que incide sobre uma superfície ( $\text{m}^2$ ) situada a uma certa distância dessa fonte. Dado que o fluxo luminoso não é distribuído uniformemente, a iluminância não será a mesma em todos os pontos da área em questão. Considera-se então a iluminância média ( $E_m$ ). Existem normas que definem a iluminância mínima. Para os locais em Portugal é a Norma EN 12464-1. Este fator possui uma relevância na substituição por lâmpadas mais eficientes, porque os níveis médios de iluminância dependem dos locais de acordo com a tarefa a executar.

Esta grandeza pode ser medida com o auxílio de um luxímetro representada na Figura 4-3.

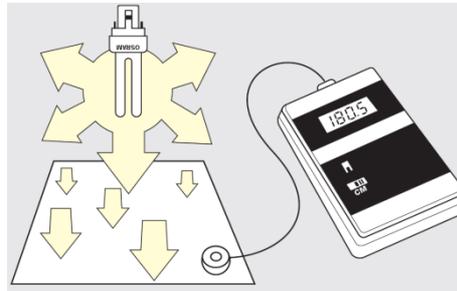


Figura 4-3 Medição da iluminância através de um luxímetro [36]

Segundo a norma EN 12665, a iluminância, é o quociente entre o fluxo luminoso ( $d\Phi$ ) incidente num elemento de superfície e a área ( $dS$ ) desse elemento [37], ou seja é a quantidade de fluxo luminoso recebido pela quantidade de área iluminada. Assim  $E$  (lux) pode ser calculada através da expressão 4-3.

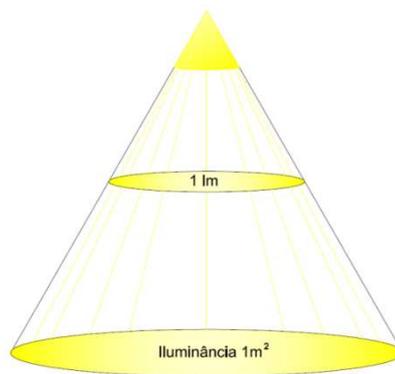
$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \int_{2\pi r} L \cdot \cos(\theta) d\Omega \quad 4-3$$

Em que:

- $E$  - Iluminância;
- $L$  - Luminância num dado ponto nas várias direções dos raios incidentes no angulo sólido;

- $d\Omega$  - Ângulo sólido;
- $\theta$  - Ângulo entre qualquer um dos raios incidentes e a normal à superfície num ponto.

A Figura 4-4 ilustra o fluxo luminoso incidente sobre uma superfície. Quanto maior for o fluxo luminoso incidente sobre a superfície maior será a iluminância. Do mesmo modo, mantendo-se o fluxo luminoso, a iluminância será tanto maior quanto menor for a área a iluminar.



**Figura 4-4 Iluminância**

A iluminância é uma grandeza base para a luminotecnia e é normalmente muito usada para fazer alusão ao nível de iluminação necessária para as diversas aplicações. Alguns valores de iluminância típicos são os seguintes [34]:

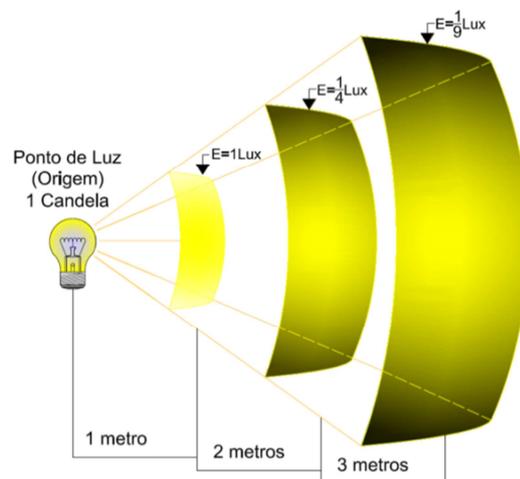
- 100000 lux, um dia limpo de sol.
- 1000 lux, um escritório de trabalho.
- 30 lux, iluminação artificial de via pública.
- 0,25, lux, noite de lua cheia sem nuvens.
- 0,01lux, noite à luz das estrelas.

A iluminância num dado ponto, pertencente a um plano perpendicular à direção da intensidade luminosa, varia proporcionalmente com a intensidade luminosa e inversamente proporcional com o quadrado da distância.

Se designarmos  $D$  a distância entre a fonte de luz (pontual) e a superfície iluminada, podemos considerar a relação 4-4:

$$E_{(P)} = \frac{I}{D^2} = (cd / m^2) \quad 4-4$$

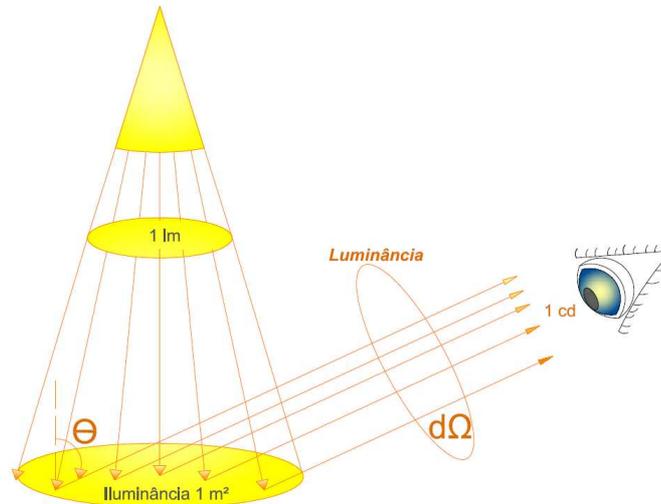
A relação anterior é designada pela lei do inverso do quadrado da distância. A Figura 4-5 ilustra essa lei que para o ponto de origem de uma candela, à distância de 1 metro tem um nível de iluminação de 1 lux. Quanto mais afastado estiver o ponto de luz da área a iluminar verifica-se que a sua iluminância diminui com o quadrado da distância ao ponto de luz.



**Figura 4-5 Lei do inverso dos quadrados**

### 4.2.5 Luminância

A luminância ( $L$ ) é uma medida de intensidade de luz refletida numa dada direção, que descreve a quantidade de luz que atravessa ou é emitida de uma superfície, segundo um ângulo sólido ( $d\Omega$ ). A luminância tem a unidade candela por metro quadrado ( $cd/m^2$ ) [37]. A Figura 4-6 mostra a luminância refletida numa dada direção.



**Figura 4-6 Luminância**

A luminância ( $L$ ) é entendida como o quociente entre a intensidade luminosa ( $I$ ) e a área que a reflete segundo uma determinada direção. A equação 4-5 permite determinar a luminância.

$$L = \frac{I}{S \cdot \cos(\theta)} \quad (\text{cd} / \text{m}^2) \quad 4-5$$

Ao denominador da equação anterior dá-se o nome de área aparente, que é a área projetada na direção do observador correspondente à área de superfície iluminada.

#### 4.2.6 Rendimento luminoso de uma fonte de luz

O rendimento de uma fonte de luz ( $\varepsilon$ ) é a relação entre o fluxo luminoso emitido pela mesma e a unidade de potência elétrica ( $P$ ) consumida para o obter. A unidade é  $\text{lm}/\text{W}$ . O rendimento da fonte de luz obtém-se pela expressão 4-6.

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{P} \quad (\text{lm} / \text{W}) \quad 4-6$$

A Figura 4-7 ilustra como as lâmpadas se diferenciam entre si não só pelos diferentes Fluxos Luminosos que elas irradiam, mas também pelas diferentes potências que consomem. Este é um parâmetro que se deve ter em conta na aquisição de uma lâmpada (lúmens gerados por Watt absorvido).

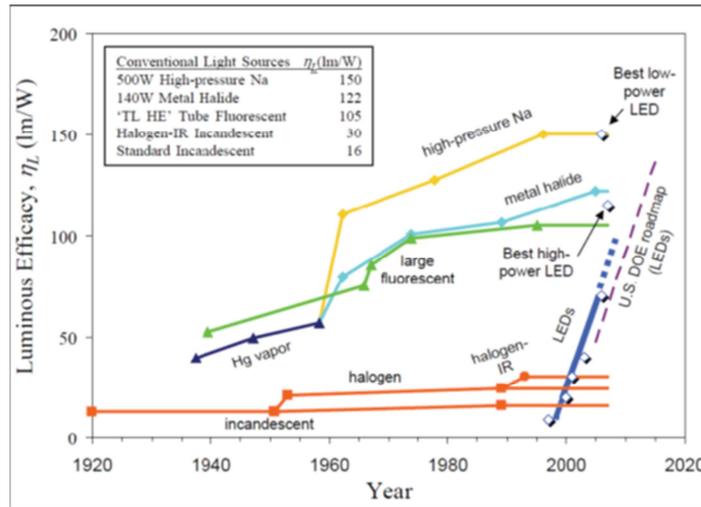


Figura 4-7 Gráfico da eficiência energética de algumas fontes luminosas [38]

O rendimento luminoso é um indicador da eficiência do processo de emissão de luz utilizada sob o ponto de vista do aproveitamento energético, logo quanto maior o valor da eficiência luminosa de uma determinada lâmpada, maior será a iluminância produzida com o mesmo consumo.

#### 4.2.7 Temperatura da cor

A temperatura de cor é uma característica da luz visível, determinada pela comparação da sua saturação cromática com a de um corpo negro radiante ideal. Ou seja, é a temperatura a que um corpo negro irradiaria a mesma cor da fonte luminosa (medida em Kelvin – K). Quanto mais alta a temperatura de cor, mais clara é a tonalidade de cor da luz. A noção de luz quente ou fria relaciona-se com a tonalidade de cor que a fonte de luz apresenta ao ambiente. A Figura 4-8 ilustra três valores de temperatura de cor diferentes para a iluminação de objetos.

As fontes luminosas podem variar entre 2.000 K até mais de 10.000 K. Do ponto de vista técnico a tonalidade da luz que irradia uma fonte de luz conhece-se pela sua temperatura de cor [37].

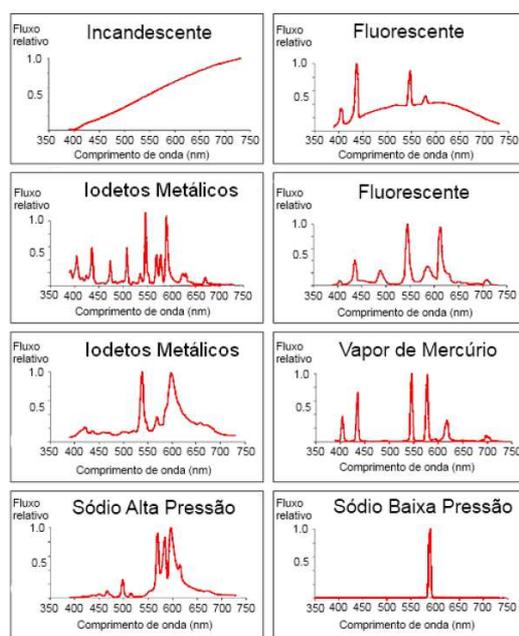


**Figura 4-8 Temperatura da cor [36]**

A luz amarelada, como de uma lâmpada incandescente, situa-se na temperatura de 2700 K. É importante destacar que a cor da luz em nada interfere na eficiência energética da lâmpada, não sendo válida a noção de que quanto mais clara, mais potente é a lâmpada [36].

#### **4.2.8 Reprodução da cor**

Objetos iluminados podem parecer diferentes, mesmo se as fontes de luz tiverem idêntica tonalidade. As variações de cor dos objetos iluminados sob fontes de luz diferentes podem ser identificadas através de um outro conceito, designado por Reprodução de Cores, e da sua escala qualitativa, o Índice de Reprodução de Cores (Ra ou IRC). O IRC (Índice de Reprodução Cromática) pode variar entre 0 e 100 conforme a radiação da fonte luminosa se distribui menos ou mais na gama do visível [36]. Quanto mais componentes espectrais uma fonte luminosa contiver na sua radiação, melhor será para o olho humano distinguir as diversas cores logo quanto maior o IRC melhor. A Figura 4-9 representa as intensidades relativas do fluxo luminoso emitido por diversos tipos de lâmpadas em função do comprimento de onda na gama do visível.



**Figura 4-9 Espectro visível de diversas fontes de luz [39]**

Ainda na Figura 4-9, observa-se que algumas das lâmpadas apresentam um IRC bastante baixo o que leva a que seja difícil ou quase impossível ao olho humano distinguir as cores em ambientes iluminados por fontes de luz desse tipo [39]. Um caso extremo é o das lâmpadas de vapor de sódio de baixa pressão que emitem um feixe luminoso amarelo, fazendo com que tenham uma reprodução de cores muito fraca. Contudo, são as fontes luminosas que apresentam maior eficiência como também se observa na Figura 4-7, podendo ser úteis em algumas situações.

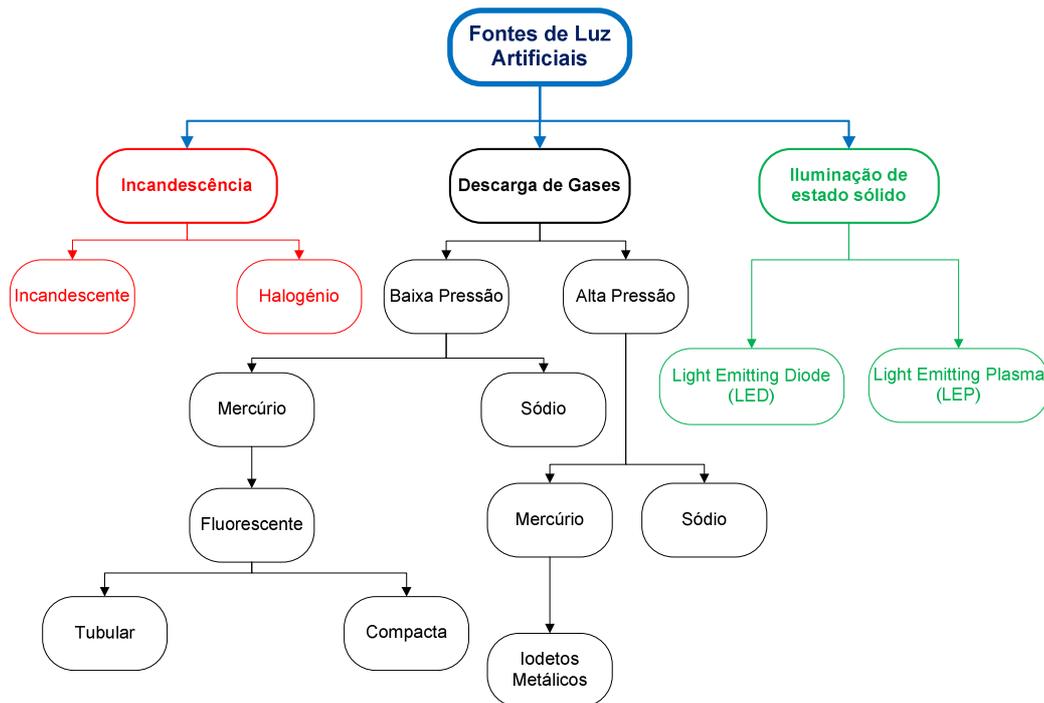
#### 4.2.9 Tempo de vida das lâmpadas

Este parâmetro refere-se ao tempo de funcionamento de uma lâmpada até deixar de poder operar nas suas condições normais. É impossível de uma forma geral prever a duração de uma lâmpada individual, pois isso depende de um grande número de fatores como as tensões e correntes de funcionamento, temperatura ambiente, condições de operação,[39] e [40]. O indicador mais usual relacionado com o tempo de vida útil é a duração de vida média que é definida como o tempo após o qual 50% de um número significativo de lâmpadas deixa de emitir fluxo luminoso [41]. Para além deste indicador, os fabricantes podem definir outros valores de referência como um tempo de vida mínimo ou a depreciação de lúmen emitido ao longo do seu tempo de funcionamento. Quanto maior a

vida útil de uma lâmpada, maior a economia, pois o custo de manutenção com as trocas destas lâmpadas será menor.

#### 4.2.10 Tipos de lâmpadas iluminação

A Figura 4-10 apresenta algumas soluções de iluminação disponíveis no mercado.



**Figura 4-10 Soluções comercialmente disponíveis**

As soluções de iluminação encontradas no mercado estão divididas em grupos primários, relacionados com a sua natureza de operação.

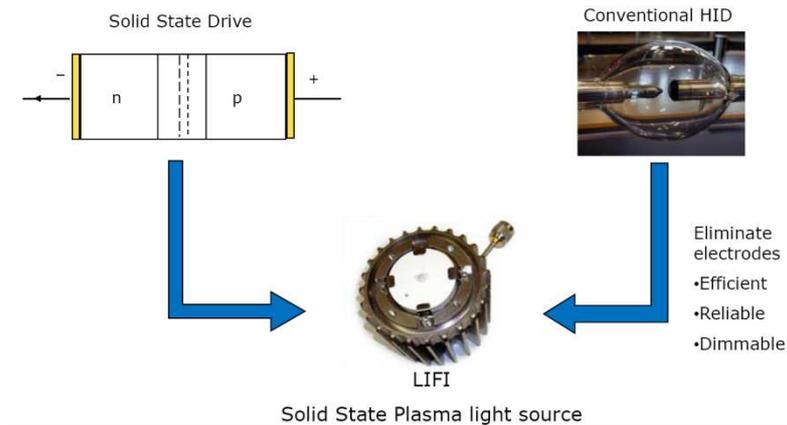
O primeiro grupo é formado pelas lâmpadas de incandescência que funcionam recorrendo ao efeito de Joule. Quando se faz passar uma corrente elétrica num filamento, o seu aquecimento cria radiação na gama do visível. As lâmpadas incandescentes apresentam como vantagens um excelente *IRC*, próximo de 100% devido ao espectro contínuo que produzem, e permitem o controlo da intensidade da iluminação sem acréscimo de equipamento. A maior desvantagem destas lâmpadas é a baixa eficácia luminosa ( $\leq 15$  lm/W) e uma duração de vida curta (até 1 000 horas) [42].

O segundo grupo é formado pelas lâmpadas de descarga. Estas dependem da descarga elétrica em um gás entre dois eletrodos que excitam um pó fluorescente. Dentro deste

grupo existem muitas formas de realizar essa descarga, bem como diversos elementos fluorescentes possíveis de serem utilizados [41] e [43].

O terceiro grupo é formado pela iluminação de estado sólido, recorrendo a semicondutores. O primeiro tipo de fonte é formado por lâmpadas de LED (Díodo Emissor de Luz) é baseado na emissão de luz por eletroluminescência através de um díodo semicondutor [40]. É usualmente uma fonte de luz com uma pequena área onde se aplica uma lente para projetar a luz emitida. A cor da luz emitida pode variar conforme o tipo de material semicondutor utilizado, podendo ser infravermelha, visível ou até ultravioleta [39]. O segundo tipo de fonte é formado pelas lâmpadas LiFi mais recentemente encontramos a iluminação com lâmpadas LiFi, recurso a LEP (*Light Emitting Plasma*) [44]. O Emissor de LEP é constituído por uma pequena lâmpada LiFi de quartzo sem eléctrodos, encapsulada dentro de um ressonador cerâmico. Esta nova tecnologia emite luz, a partir de uma pequena área, na direção frontal, num padrão lambertiano. Esta característica de fonte pontual providencia algumas vantagens na performance de uma luminária. Uma pequena fonte de luz reduz a quantidade de lentes e refletores necessárias para atingir o nível de iluminação pretendido, não comprometendo a uniformidade e o *design*. Esta irá ser a tecnologia alvo de estudo na secção seguinte, dado ser uma tecnologia inovadora pouco divulgada e bastante promissora para a iluminação de espaços cujas alturas de suspensão das luminárias são significativas.

A Figura 4-11 apresenta as bases que levaram à investigação da tecnologia LEP, a tecnologia de semicondutores que geram potência e a tecnologia das lâmpadas de descarga de gases a alta pressão, também conhecidas por descarga de alta intensidade (HID).



**Figura 4-11 Tecnologia por detrás do LEP [45]**

#### 4.2.10.1 Tecnologia Light Emitting plasma

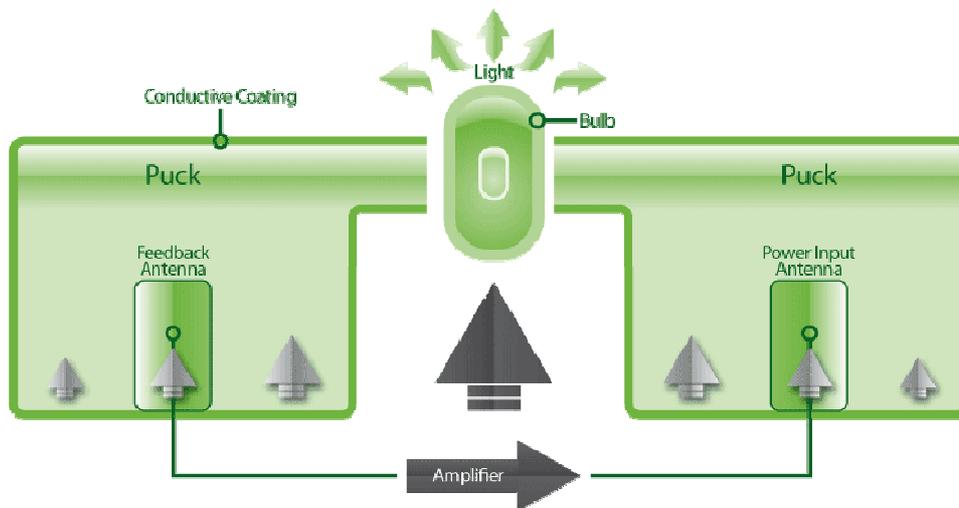
A lâmpada LIFI utiliza uma tecnologia exclusiva (micro-ondas) que fornece energia de radiofrequência um plasma emissor de luz sem a necessidade de eléctrodos. Um guia de ondas dieléctrico gera um campo eletromagnético dentro de uma cavidade ressonante que eficientemente acopla energia para que haja maior temperatura no plasma de alta densidade[44] e[46].

#### 4.2.10.2 Princípio de funcionamento da tecnologia LEP

A arquitetura LEP consiste em duas partes fundamentais:

- O emissor - A lâmpada de quartzo encaixado em um ressonador cerâmico;
- Amplificador de Radio Frequência (Driver) - Um gerador de RF de estado sólido e um microcontrolador.

A Figura 4-12 mostra a arquitetura básica de um plasma emissor de luz (LEP).



**Figura 4-12 Constituição de um LEP [47]**

Um sinal de radiofrequência é gerado e amplificado pelo controlador de radiofrequência (RF), o qual é guiado para um ressonador cerâmico (*puck*) através de um cabo coaxial de baixas perdas. A estrutura do ressonador faz com que o campo elétrico se concentre, para o fornecimento de energia à lâmpada de quartzo totalmente selada e sem elétrodos.

O campo elétrico fortemente concentrado ioniza os gases e vaporiza os halogenetos da lâmpada promovendo a criação de um estado de plasma no seu centro resultando numa intensa fonte de luz branca.

No interior da parte de trás da lâmpada, um material altamente refletor e difuso é usado para refletir toda a luz para a frente, num padrão Lambertiano (dispersa a luz igualmente em todas as direções e a radiância não varia em função do ângulo de observação). A cor da luz é adaptada pela química de enchimento no interior da lâmpada proporcionando uma luz branca natural e numa alta reprodução de cor. A Figura 4-13 mostra o princípio de funcionamento da tecnologia (LEP) [46],[47].



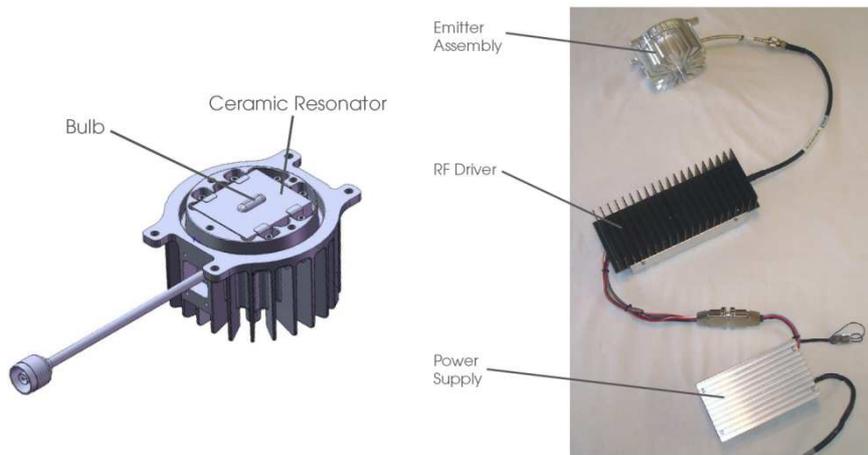
**Figura 4-13 Funcionamento da tecnologia LEP [46]**

Resumidamente, o princípio de funcionamento de uma lâmpada LEP, pode ser descrito assim:

- (1) Um circuito de RF é estabelecido pela ligação de um amplificador de potência de RF para um ressonador cerâmico conhecido como o "disco". O centro do disco é uma lâmpada de quartzo selada que contém materiais de haletos metálicos e outros gases.
- (2) O disco, impulsionado pelo amplificador de potência, cria uma onda estacionária confinada dentro dos seus limites. O campo elétrico é mais forte no centro da luz, o que provoca a ionização dos gases, criando um brilho roxo.
- (3) O gás ionizado, aquece e evapora os materiais de iodetos metálicos, formando uma coluna de plasma intenso dentro da lâmpada. Esta coluna de plasma é centrada dentro do envelope de quartzo e irradia luz de forma muito eficiente.

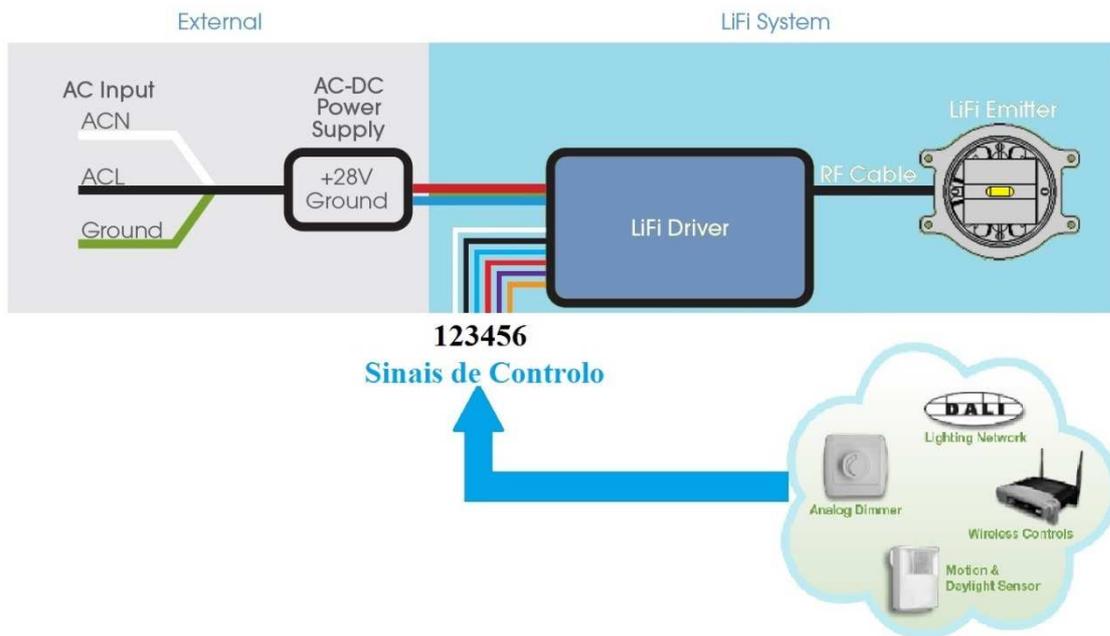
#### **4.2.10.3 Constituintes do sistema de iluminação LiFi**

Este sistema é constituído pela montagem do emissor que contém o ressonador cerâmico e o bolbo de quartzo, o driver de radiofrequência constituído pelo amplificador de potência que usa dispositivos de tecnologia LDMOS que convertem a energia elétrica em potência de radiofrequência. O *driver* de radiofrequência também contém o circuito de controlo para o controlo de iluminação. O sistema LiFi é então constituído pela montagem do emissor e pelo driver de radiofrequência conectados por um cabo de radiofrequência como mostra a Figura 4-14. O sistema LiFi, é alimentado por uma fonte de tensão que requer 28 volt DC à entrada.



**Figura 4-14 Constituição do sistema LiFi, pormenor do ressonador cerâmico e o bulbo de quartzo (esquerda), sistema completo (direita) [46].**

O sistema LiFi, pode efetuar o controlo de iluminação, criando uma enorme capacidade de redução de consumo de energia e custos operacionais na instalação, quando combinada com a utilização de reguladores de tensão, e de sensores de luminosidade, Figura 4-15 . O driver da tecnologia LEP, apresenta inúmeras funcionalidades, e tem a vantagem de conseguir regular 20% a produção de luz em apenas alguns segundos [50].



**Figura 4-15 Configuração do sistema LiFi, adaptado [50],[51]**

As funções dos sinais de controlo estão descritas na Tabela 4-1

**Tabela 4-1 Sinais de controlo do sistema LiFi [51]**

Pin	Função	Descrição	Níveis
1	Sinal de entrada	Linha de entrada analógica que pode ser ocupada com um sensor de movimento.	0-24V
2	Sinal de Terra	Retorno corrente DC	-
3	Lâmpada RxD	A linha de controlo digital série, que recebe comandos de um monitor externo / controlador	-
4	Lâmpada TxD	A linha de controlo digital de série que envia comandos de status e ecos a um monitor externo / controlador.	-
5	1-10V Dim	Controlo de escurecimento (entrada analógica)	1-10V
6	Sinal de saída	Tensão DC para componentes externos	5 V

### **4.3 Caso de estudo de substituição de uma solução HPS existente por tecnologia LEP e luminária eficiente**

Nesta secção, será efetuada uma análise da poupança obtida mediante substituição de uma solução existente por tecnologia LEP, nomeadamente, menor potência para obtenção das mesmas especificações luminotécnicas ou superiores, menor consumo, menos emissões de CO<sub>2</sub>.

#### **4.3.1 Características das tecnologias de estudo**

As tecnologias em estudo são a tecnologia LEP (STA-41-01) e a tecnologia de vapor de sódio de alta pressão é são usada maioritariamente nas subestações de tração da REFER EPE, segundo [46] a lâmpada equivalente com a tecnologia LEP é a lâmpada (HPS-400W) com a designação comercial GE HID 400 watt ED 18 [52]. Um sistema LEP com o consumo total de 280W, pode substituir uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão com o consumo total [46].

As LEP fontes de luz LEP podem ser utilizadas para atingir uma eficiência de aplicação mais comparado com as fontes de luz de alta intensidade de descarga e fontes de LED devido à sua direccionalidade e tamanho, e ao facto à fonte emitir luz num padrão lambertiano, evitando uma difusão indesejada.

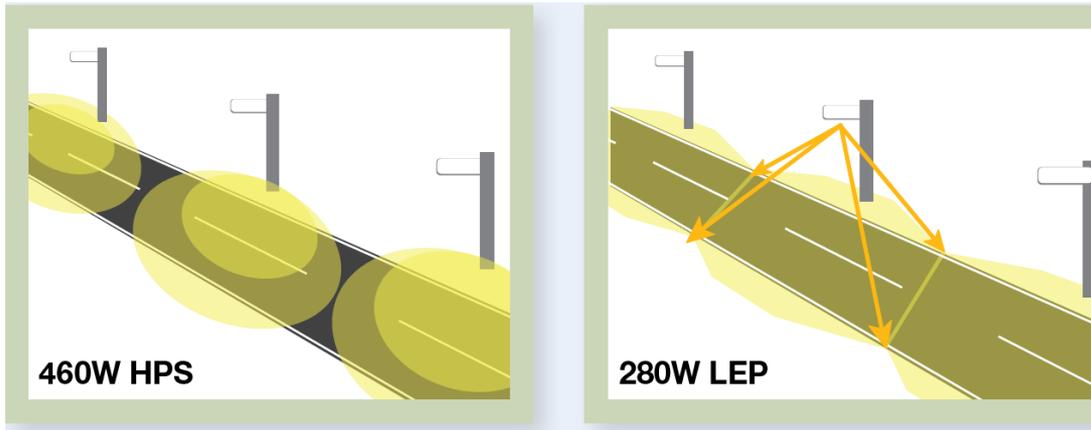


Figura 4-16 Comparação da eficiência da aplicação: HPS versus LEP [46]

A Tabela 4-2 ilustra as principais características técnicas das tecnologias em estudo.

Tabela 4-2 Características das tecnologias em estudo

	Fonte de Luz tradicional Vapor de sódio de Alta Pressão (HPS 400W)	Fonte de Luz LEP (STA-41-01)
Potência total do sistema	460W	280W
Fluxo luminoso	50000 lm	23000 lm
Tempo de vida	24000	50000
CCT	2100 K	5750 K
IRC	22	75

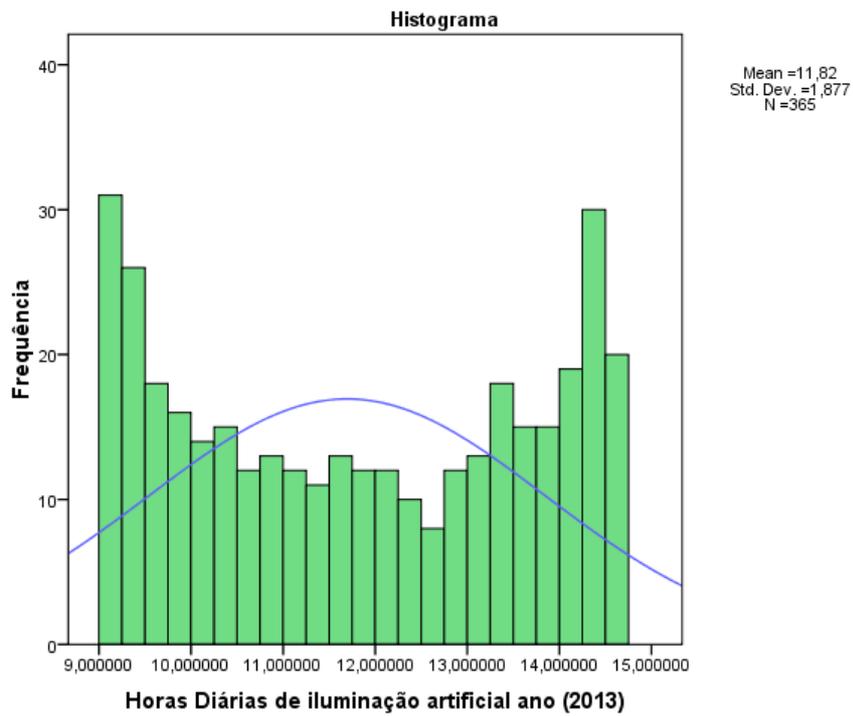
As implementações das substituições em iluminação baseiam-se num decréscimo da potência instalada. Apesar das virtudes técnicas da tecnologia LEP, ela apresenta uma eficácia luminosa inferior à da tecnologia de vapor de sódio de alta pressão, que é a mais frequente neste tipo de instalações, torna-se difícil de justificar o porquê dessa diminuição de eficiência, no caso da fonte de luz tradicional apresenta uma eficiência de 108%, ao invés da fonte de luz LEP apresentar uma eficiência de 82%. São várias as vantagens que esta tecnologia LEP tem para esta aplicação, como uma melhor restituição de cores, temperatura de cor e um maior aproveitamento do fluxo luminoso de forma útil para a área a iluminar.

### 4.3.2 Cenários de iluminação em estudo

Para o presente estudo de iluminação foram simulados dois cenários para ciclo semanal normal para alta tensão em Portugal Continental com tarifa de longas utilizações, um com receita constante e um outro com aumento da receita 2,5% ao ano. Um outro cenário simulado foi para ciclo diário para alta tensão em Portugal Continental com tarifas de longas utilizações [53].

No que diz respeito ao estudo das horas de iluminação artificial, este foi efetuado com base no nascimento e ocaso do sol em Lisboa para o ano de 2013 [54], considerando-se os 365 dias do ano aliado às tarifas e horários para alta tensão.

Com base no estudo das horas ‘sem sol’ efetuei ainda uma análise estatística das mesmas que é útil para estudos rápidos para avaliação técnico-económica de iluminação, Anexo 4 Tabela A4 1. Com base neste estudo concluí que o ano de 2013 apresenta em média 11,82 horas de luz artificial e uma soma anual de 4313,96 horas, 50% das horas de iluminação artificial estão compreendidas entre [9,99 - 13,63] horas. A Figura 4-17 apresenta o histograma de frequências das horas de iluminação artificial para o ano de 2013.



**Figura 4-17 Histograma das horas diárias de iluminação artificial e curva de distribuição normal**

Efetuei ainda a análise dos horários de Alta tensão para o ciclo semanal normal e diário, com o horário de inverno e verão respetivamente, Anexo 3

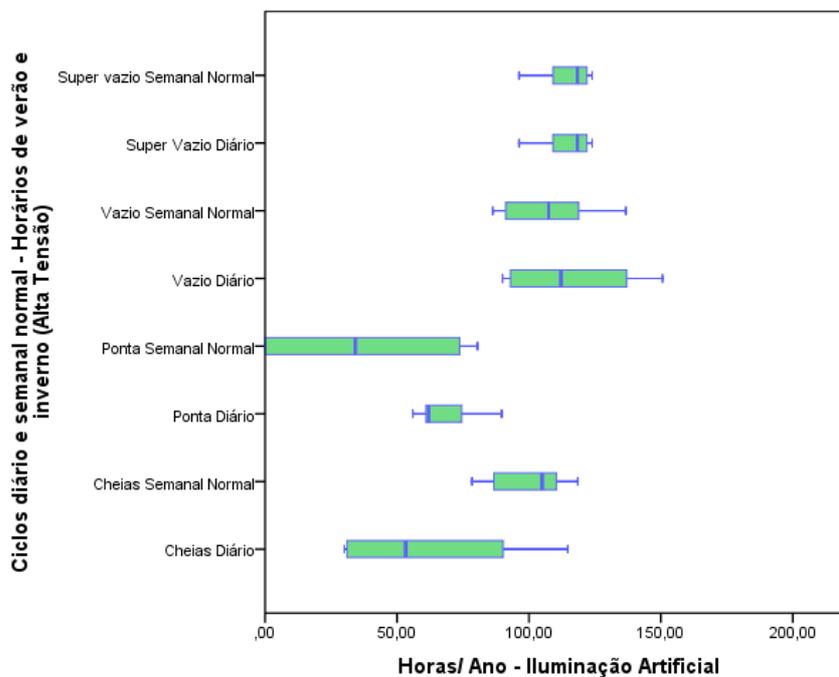
Tabela A4 2. Existem diferenças significativas na utilização das horas entre o por e o nascer do sol no uso dos dois ciclos.

A Tabela 4-3 mostra o intervalo de 50% das horas utilizadas pela iluminação artificial nos respectivos ciclos.

**Tabela 4-3 Intervalo de 50% do somatório das horas**

Horário de Verão e Inverno	Horas
Horas Cheias, Ciclo Diário	[31 - 96,52]
Horas Cheias, Ciclo Normal Semanal	[85,60 – 110,93]
Horas de Ponta, Ciclo Diário	[60,5 – 76,25]
Horas Ponta, Ciclo Normal Semanal	[0 – 73,87]
Horas Vazio, Ciclo Diário	[93 – 140,75]
Horas Vazio, Ciclo Normal Semanal	[90,57 – 119,26]
Horas Super Vazio, Ciclo Diário	[107,68 – 122,96]
Horas Super Vazio, Ciclo Normal Semanal	[107,68 – 122,96]

A Figura 4-18 mostra a distribuição desagregada para os ciclos em estudo (diário e semanal normal em alta tensão), incluindo os horários de verão e de inverno.



**Figura 4-18 Distribuição desagregada dos Horários de Alta tensão em ciclo diário e ciclo normal**

### 4.3.3 Fundamentos de avaliação económico-financeira

Nesta avaliação da avaliação económico-financeira, irão ser usados os conceitos de valor líquido atual do *cash flow*, e do período de recuperação ou retorno do investimento.

#### 4.3.3.1 Valor líquido atual do *cash-flow*

Para se falar em valor Atual Líquido, é bom primeiro ter uma ideia do conceito de atualização. Este é conceito é inerente à possibilidade de aplicar capitais num dado momento, com o objetivo de obter um rendimento futuro. Os agentes económicos, independentemente da inflação, preferem rendimentos imediatos a rendimentos futuros [55]. Independentemente das variações pessoais e institucionais, os agentes económicos estão dispostos a pagar um prémio (juro) pelo sacrifício de deferir o consumo atual em troca de um consumo futuro [55]. Esta preferência pelo presente leva a comprovar que o valor do dinheiro no decorrer do tempo decorre da possibilidade de ele ser aplicado em ativos durante o período de deferimento, possibilitando, com isso, a realização (expetável) de um rendimento futuro, independentemente da inflação. Isto permite concluir que uma unidade monetária no momento presente e uma unidade monetária no próximo ano são dois bens financeiros distintos, com isto não podem ser comparados e muito menos adicionados [55].

Podemos afirmar então que o dinheiro recebido no futuro vale menos que o dinheiro recebido hoje. Um euro hoje vale mais que um euro dentro de um ano. É o conceito de capitalização. O valor temporal do dinheiro obtém-se através da expressão 4-6.

$$VF = VA \cdot (1 + j)^n \quad 4-6$$

Com:

- VF - Valor Futuro do Dinheiro;
- VA - Valor Atual do Dinheiro;
- j - Taxa de capitalização efetiva (taxa de juro);
- n - Número do ano relativamente ao momento inicial (n = 1;2;3;etc.).

Se um investimento valer VF daqui a um ano, temos de descontar valores futuros para o presente, é o conceito de atualização (cash flows descontados), nesse caso a expressão 4-6, pode ser escrita do seguinte modo que dará origem à expressão 4-7.

$$VA = \frac{VF}{(1+j)^n} \quad 4-7$$

Com:

- j - Taxa de atualização, ou taxa de juro.

É útil agora a definição de capital investido, como sendo o montante de fundos que uma empresa dedica à realização de um projeto de investimento. Este capital compreende principalmente as despesas de aquisição e construção, mas também todos os custos para colocar em funcionamento os equipamentos [55].

Chegou-se então à altura de definir o valor atual líquido (VAL) como um critério financeiro destinado a avaliar investimentos através da comparação entre os *cash-flows* gerados por um projeto e o capital investido.

A determinação do VAL de um projeto é feito em cinco etapas:

- Fixar a taxa de atualização (j);
- Determinar o capital investido (se o projeto necessitar de várias despesas de capital durante vários períodos, é necessário atualizar essas saídas de fundos (cash out flows) para o período zero);
- Atualizar cada *cash flow* de exploração utilizando a expressão 4-7.
- Somar os *cash flows* de exploração atualizados (representa o valor atual do cash flow de exploração);
- Subtrair o valor atual dos *cash flows* de exploração do custo do investimento.

Um projeto de investimento é considerado rentável quando o seu VAL é positivo.

No caso de estudo em questão, como existe um único investimento no momento inicial, aplica-se a seguinte expressão **4-8**:

$$VAL = \sum_{P=1}^n \frac{CF_P}{(1+j)^P} - I \quad \mathbf{4-8}$$

Com:

- $CF_P$  - *Cash flow* de exploração do período P;
- I - Despesa de investimento inicial;
- J - Taxa de atualização.

#### **4.3.3.2 Período de Recuperação do Investimento**

Esta técnica mede o número de períodos de tempo que decorrem até que os capitais investidos no projeto sejam recuperados. O período de recuperação do investimento (*payback period*) pode ser observado graficamente, como o espaço de tempo entre o início do projeto e o momento em que o fluxo de caixa acumulado se torna positivo [56].

#### **4.3.4 Avaliação económico financeira**

Pretende-se avaliar os méritos deste investimento com base nos indicadores descritos na secção 4.3.1. Com os resultados finais vão-se obter o nível de poupança energética, a consequente redução de emissões e o tempo de retorno do investimento.

##### **4.3.4.1 Cenário 1**

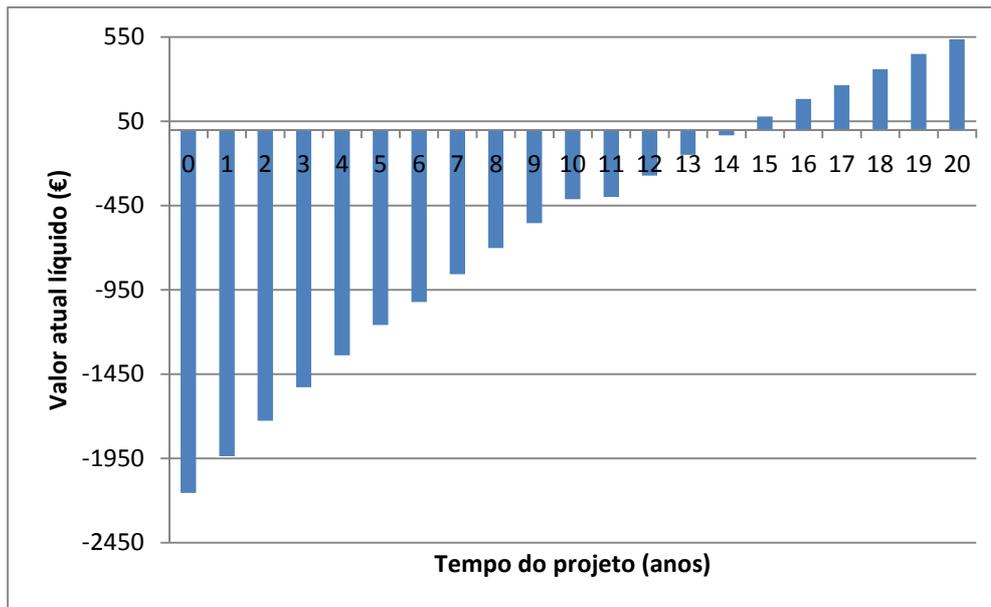
Neste caso, pressupõem-se que a instalação já se encontra equipada com as luminárias de vapor de sódio de alta pressão (HPS), e como tal pretende-se determinar se existe retorno do investimento durante o tempo de vida útil das novas luminárias associadas à tecnologia LEP. Neste cenário o custo energético está associado ao ciclo semanal normal do horário de alta tensão, com tarifa de longas utilizações, sendo o resultado marginal entre a tecnologia HPS e a tecnologia LEP a receita. O número de horas tendo em conta um tempo

efetivo de funcionamento anual de 4313,967 horas. Os dados relevantes dos equipamentos encontram-se na Tabela 4-4.

**Tabela 4-4 Dados em avaliação para o cenário 1**

Indicadores do Cenário 1	Fonte Luz Tradicional	Fonte Luz
	HPS 400W	LEP STA-41-01
Número de Horas Funcionamento	24000	50000
Potência do Sistema (Watt)	460	280
Preço Lâmpada (€)	22,445	52,372
Número de Luminárias	4	4
Sistema Luminária (€)	299,267	486,309
Custo de substituição (€)	89,780	209,487
Substituição (Anos)	5	11
Receita Marginal (€)	-	230,163
Despesas manutenção (€)	46,61	46,61
Preço Luminária e Lâmpada (€)	321,712	538,680
Número de Luminárias	4	4
Investimento (€)		2154,721

O horizonte temporal do projeto , tendo em conta o tempo máximo de vida útil entre as fontes em avaliação de 50000 horas para as luminárias LEP, e uma taxa de utilização de 4313 horas, será de 20 anos. Nas despesas são consideradas os custos de manutenção e os custos de substituição das lâmpadas. A Figura 4-19, mostra os resultados do valor atual líquido do cenário 1, bem como o período de retorno do investimento no tempo de duração do projeto.



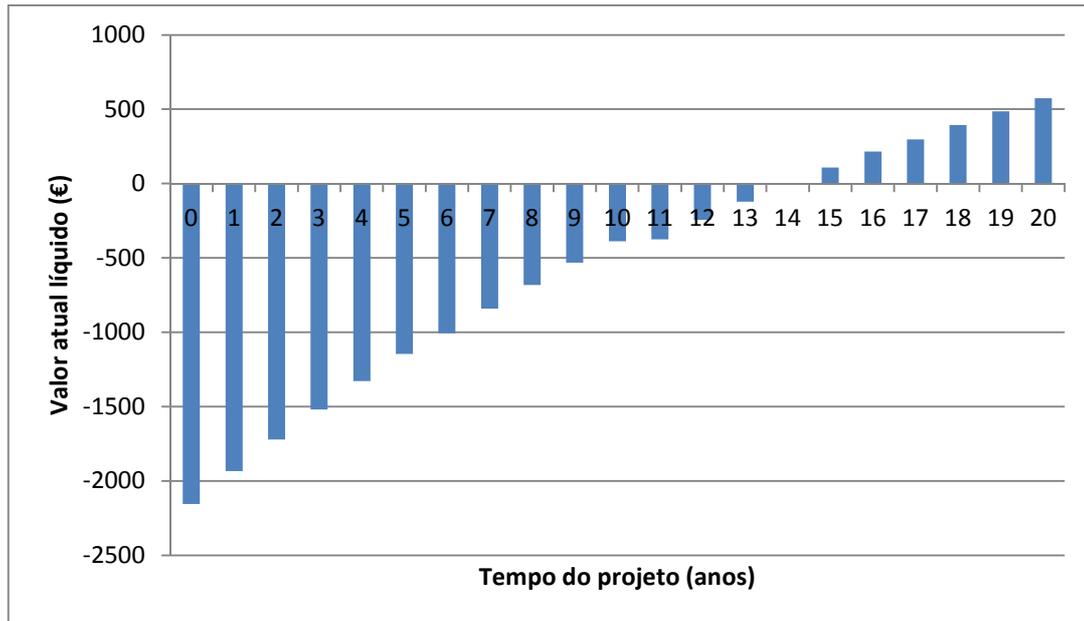
**Figura 4-19** Valor atual líquido (anual) entre investir na tecnologia LEP, em detrimento da tecnologia de HPS (cenário 1).

Neste cenário o retorno do investimento deve ocorrer ao fim de quinze anos. Este cenário gera um valor líquido atual ao fim de 20 anos de 536,02€. Os cálculos destes valores estão apresentados no Anexo 4, na Tabela A4 3.

#### 4.3.4.2 Cenário 2

Neste caso, também se pressupõe que a instalação já se encontra equipada com as luminárias de vapor de sódio de alta pressão (HPS), e como tal pretende-se determinar se existe retorno do investimento durante o tempo de vida útil das novas luminárias associadas à tecnologia LEP. Neste cenário o custo energético está associado ao ciclo diário do horário de alta tensão, com tarifa de longas utilizações, sendo o resultado marginal entre a tecnologia HPS e a tecnologia LEP a receita. O número de horas tendo em conta um tempo efetivo de funcionamento anual de 4313,967 horas. Os dados relevantes dos equipamentos são iguais ao do cenário 1, que se encontram na Tabela 4-4.

O horizonte temporal será o mesmo descrito na secção 4.3.4.1. Nas despesas são consideradas os custos de manutenção e os custos de substituição das lâmpadas que se encontram na Tabela 4-4 da secção 4.3.4.1. A Figura 4-20, mostra os resultados do valor atual líquido do cenário 2, bem como o período de retorno do investimento no período de duração do projeto.

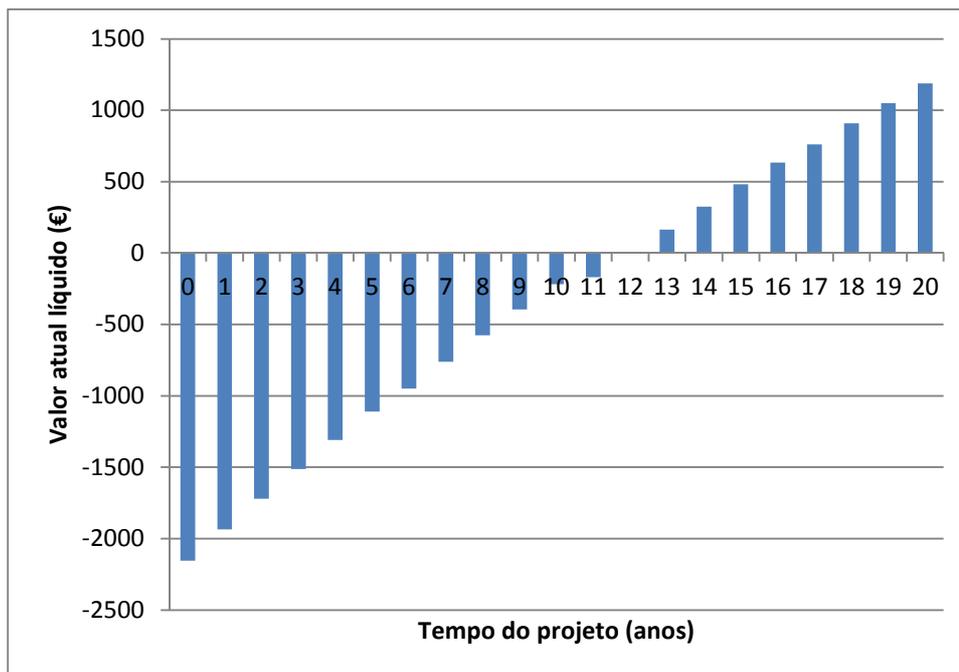


**Figura 4-20 Valor atual líquido (anual) entre investir na tecnologia LEP, em detrimento da tecnologia de HPS (cenário 2).**

Neste cenário o retorno do investimento deve ocorrer ao fim de quinze anos tal como o cenário 1. Este cenário gera um valor líquido atual ao fim de 20 anos de 574,11€. Estes cálculos encontram-se indicados no Anexo 4, na Tabela A4 3.

#### 4.3.4.3 Cenário 3

Neste cenário todas as condições de simulação e dados relevantes são iguais ao do cenário 1 (secção 4.3.4.1), à exceção da receita, esta aumenta 2,5% ao ano como resultado da inflação dos preços da energia elétrica. A Figura 4-21, mostra os resultados do valor atual líquido do cenário 3, bem como o período de retorno do investimento no período de duração do projeto. Neste cenário não foi inserido o aumento dos custos de manutenção e de substituição das lâmpadas.



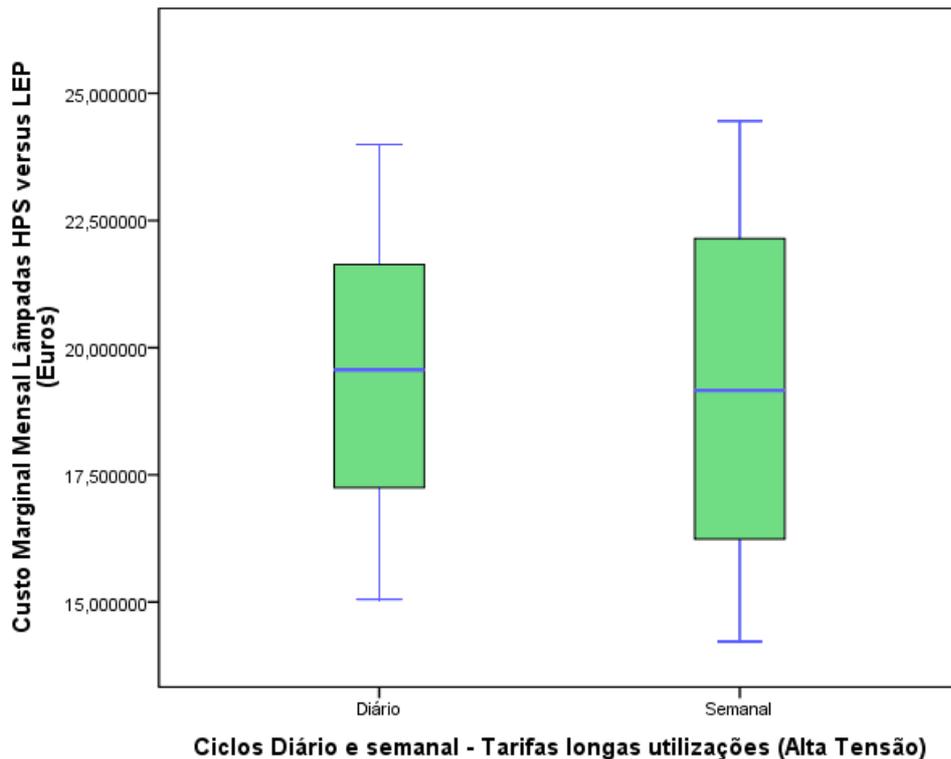
**Figura 4-21** Valor atual líquido (anual) entre investir na tecnologia LEP, em detrimento da tecnologia de HPS (cenário 3).

Neste cenário o retorno do investimento deve ocorrer ao fim de treze anos. Neste cenário o valor líquido atual ao fim de 20 anos é de 1188,47€. Os cálculos destes valores estão apresentados no Anexo 4, na Tabela A4 3.

#### 4.3.4.4 Discussão dos cenários económicos

Com base nos dois primeiros cenários efetuados, o tempo de retorno do investimento dos cenários 1 e 2 são de quinze anos. No cenário 1 verifica-se que o valor atual líquido ao fim de 20 anos é de 536,02€ que é inferior ao do segundo cenário que gera um valor atual líquido de 574,11€. Neste caso optar-se-ia pelo cenário 2 dado que nos gera um maior retorno de capital ao fim de 20 anos.

Para o cenário 2 o investimento teria um retorno superior no valor de 38,09 € que o cenário 1, dado que as diferenças nas tarifas para os períodos de utilização das luminárias são pouco significativas. Ambos os cenários 1 e 2 apresentam valores médios mensais de retorno de 19 €. A Figura 4-22 mostra a distribuição da receita marginal (custo) dos ciclos, diário e semanal para a tarifa de longas utilizações em alta tensão.



**Figura 4-22 Distribuição desagregada dos custos marginais de Alta tensão para o ciclo diário e ciclo normal**

Ainda na Figura 4-22 visualiza-se que no ciclo semanal (cenário 1) 50% do custo marginal mensal situa-se entre os 15,98€ e os 22,49€, e no ciclo diário (cenário 2) 50% do custo marginal mensal situa-se entre os 16,94€ e os 22,02€. Tanto para o cenário 1 como para o cenário 2, tendo em conta o tempo de utilização das lâmpadas é sempre preferível o que gera um valor atual maior neste caso o cenário 2, mas este estudo tem de ser feito individualmente para cada subestação de tração. Na realidade os contratos de energia para as SST da REFER EPE, são de ciclo semanal. No Anexo 4 Tabela A4 4, visualiza-se um exemplo da metodologia empregue de desagregação horária e tarifária efetuada para este trabalho, no mesmo Anexo 4, Tabela A4 5 visualiza-se a comparação dos resultados dos custos marginais entre o ciclo semanal normal e o ciclo diário.

#### A

Tabela A4 6 presente no Anexo 4 apresenta mais algumas estatísticas importantes dos custos marginais. O cenário 3 é o que se apresenta mais próximo da realidade, dado que todos os anos na generalidade o custo da energia é inflacionado o que este cenário gera um

aumento de receita (ganho). O tempo de retorno dos cenários é superior a metade do tempo do projeto dado que o preço da energia elétrica consumida é em alta tensão, onde o preço da energia é bastante menor que em média e baixa tensão. De um ponto de vista estritamente económico não é absolutamente evidente a execução deste investimento já que os tempos de retorno são elevados especialmente no caso de substituição.

#### **4.3.4.5 Discussão técnica luminotécnica**

O cálculo luminotécnico com as novas luminárias que usam a tecnologia LEP não pode ser feito, pois não foi possível obter os ficheiros fotométricos para simulação para o programa de cálculo luminotécnico denominado de DIALUX. Convém referir que, embora as grandezas fotométricas não sejam adequadas para avaliar a perceção ocular nas condições de visão mesópica, elas são as únicas internacionalmente reconhecidas pelo que será necessário que o cálculo luminotécnico seja validado segundo as normas em vigor.

Os custos iniciais do sistema LEP, são superiores aos sistemas tradicionais, mas é compensado pelo baixo custo de operação das mesmas. Relativamente às luminárias, o aspecto mais importante a tomar em consideração é a escolha correta do sistema ótico, que permitirá tirar o melhor partido possível das características da lâmpada, bem como evitar que haja propagação de fluxo luminoso para o hemisfério superior, que constitui um desperdício.

A possibilidade de apresentar uma solução alternativa para a iluminação exterior, proponho a instalação de uma conjunto de luminárias, com lâmpada com fonte de luz LEP, montado em poste de 6m de altura, e distribuídas pela plataforma da subestação de forma a obter um nível de iluminação uniforme. A solução comercial encontrada que usa a fonte de luz LEP STA-41-01, foi a luminária ‘wave GR400AP’ (Figura 2-23) destinada para áreas e estacionamento [57].

## 'Wave' Iluminação de Área



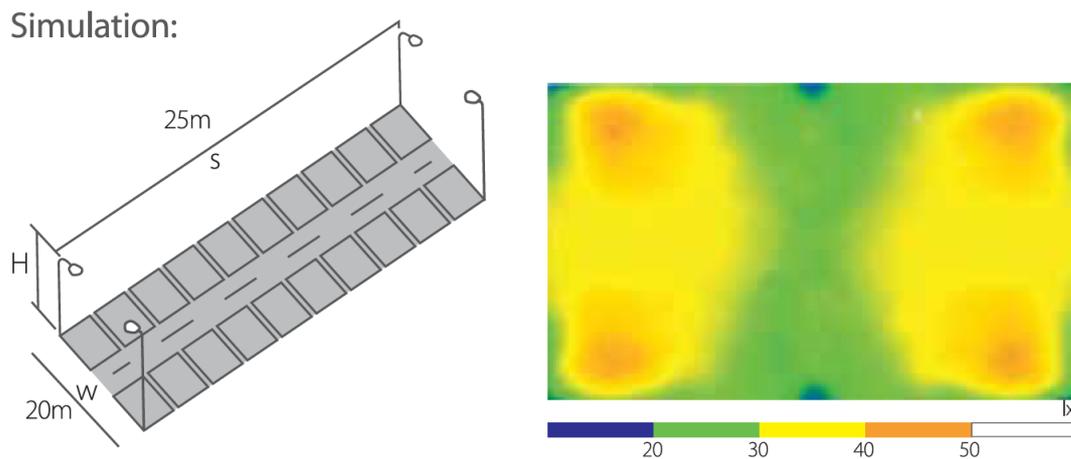
**Figura 4-23 Luminária Wave GR 400AP da Alphalite [57]**

A luminária GR400AP, apresenta as seguintes características e benefícios [57]:

- Poupança de energia até 50% em comparação com a iluminação de descarga de alta intensidade (HID);
- Custos de manutenção inferiores com uma esperança de vida 3 vezes superior quando comparado com iluminação comercial *standard*;
- Desenho aerodinâmico para um arrefecimento eficiente;
- Construção em magnésio com peso reduzido o que facilita a instalação e uma boa dissipação térmica;
- Disponível opção para um sistema de controlo para redução de iluminação (*dimming*).

As especificações técnicas da luminária 'wave GR400AP' encontram-se no Anexo 4 Tabela A4 7.

A Figura 4-24 apresenta uma simulação para quatro luminárias GR400 AP efetuada pelo fabricante a uma altura de 12m[57].



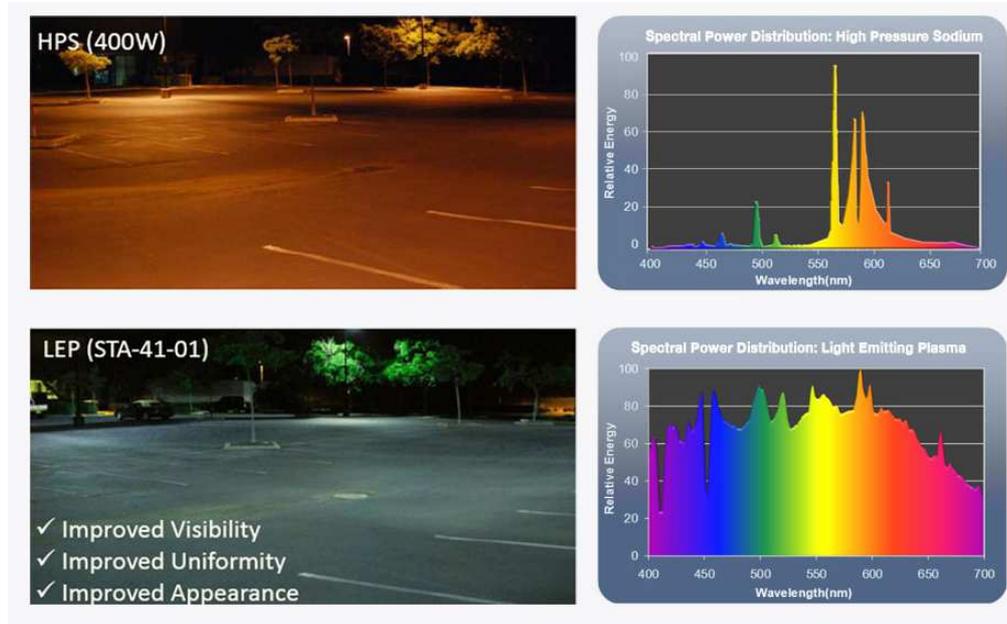
**Figura 4-24 Simulação da iluminância de um parque de estacionamento de 25x20m [57]**

Esta simulação levou a um nível de iluminância média de 39 lux, uma iluminância máxima de 51 lux, uma iluminância mínima de 22 lux.

Os valores de iluminância anteriormente descritos encontram-se compatíveis com uma subestação onde efetuei algumas medições, onde medi a iluminância nos arruamentos de 16 lux (onde se poderia andar com segurança), nas proximidades dos transformadores (quadro de comando- regulação das tomadas) 24,5 lux, bem e na proximidade da caixa de comando dos disjuntores 40 lux. Esta subestação onde efetuei as medições era composta 14 torres de projetores compostas por luminárias NAV-T 250 W situados a uma altura de 10 metros onde o valor médio de iluminância tem 61 lux, o valor máximo 184 lux e o valor mínimo de 1 lux. As dimensões da instalação que ilumina são de 56x40m.

Na subestação de tração da Fatela os valores de projeto calculados tem uma iluminância mínima de 4,5 lux, uma iluminância média de 32 lux o que é inferior à da simulação efetuada por [57], e uma máxima de 86,2 lux.

A Figura 4-25 mostra a diferença da visualização das cores entre o uso de uma fonte de luz de vapor de sódio de alta pressão (HPS) e uma fonte de luz LEP.



**Figura 4-25** Visualização da iluminância e distribuição espectral da lâmpada de alto vapor de sódio( em cima), visualização da iluminância e distribuição espectral da lâmpada LEP (em baixo) [46]

Na Figura 4-25 pode visualizar-se que a fonte de luz LEP emite diretamente um espectro integral de luz branca sem a necessidade de uma substância fosforescente secundária como em fontes de LED ou de indução. A fonte de luz LEP gera uma iluminação quase natural melhorando a visibilidade e a aparência da cor dado possuir um IRC bastante alto (75), ao invés da fonte de luz HPS que fornece um IRC de 22. A vasta cobertura de espectro completo também fornece um aumento da iluminação mesópica e escotópica o que clareia extremamente a visibilidade noturna proporcionando um ambiente mais diurno. A iluminação natural da fonte de luz LEP permite criar um ambiente seguro e acolhedor aumentando as cores reais dos objetos melhorando a qualidade de iluminação.

As temperaturas de cor proporcionadas pela fonte de luz LEP permitem a sua adequação a uma maior variedade de aplicações como a iluminação de espaços importantes tais como subestações ou outras instalações críticas, ao passo que as lâmpadas de vapor de sódio transmitem sempre a mesma tonalidade de cor quente já que no caso da fonte de luz HPS 460 a sua temperatura de cor não ultrapassa os 2100 °K, ao invés da fonte LEP em que a sua temperatura vai até aos 5750 °K.

#### **4.3.4.6 Redução das emissões de dióxido de carbono**

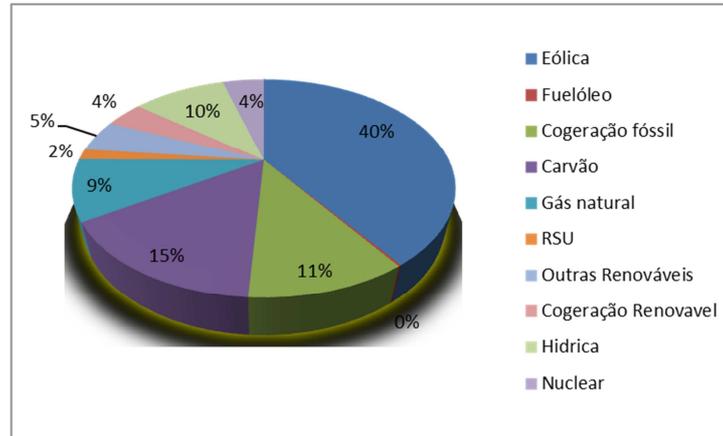
Cada vez mais a produção de eletricidade incluindo as atuais tecnologias libertam gases de efeito de estufa provocando alterações climáticas no nosso planeta resultando em fenómenos climáticos adversos tais como secas, inundações e tempestades[58]. Diariamente a produção de eletricidade tenta acompanhar a procura, e dado a intermitência das energias renováveis o diagrama de carga elétrico é compensado com energia hidráulica, e por vezes com a entrada em funcionamento de centrais elétricas a gás, com isto quanto mais energia elétrica for pedida à rede maior é a produção e como consequência em quanto as fontes de energia renovável não forem suficientes entrarão outras tecnologias de produção fóssil que geram mais gases poluentes, nomeadamente o dióxido de carbono.

O dióxido de carbono é o principal gás libertado, vulgarmente conhecido por CO<sub>2</sub>, que é responsável pelo aumento do efeito de estufa (“prisão” do calor na atmosfera)

Para se contabilizar o dióxido de carbono evitado com uso da tecnologia de iluminação LEP em detrimento da tecnologia de iluminação de HPS, é necessário analisar o peso de cada fonte para a produção de eletricidade.

De acordo com [59], foi calculado a quantidade de dióxido de carbono libertado por quilowatt-hora de energia produzido.

A Figura 4-26 mostra o mix de eletricidade por tecnologia da energia comercializada pela EDP-SU [59]



**Figura 4-26 Repartição por tecnologia comercializada pela EDP Serviço Universal [59]**

De acordo com [60], as emissões específicas (Em esp de CO<sub>2</sub>) por comercializador são calculadas pela expressão 4-9.

$$Em\ esp\ de\ CO_2 = \sum_{Fontes\ de\ Energia_i} Fator\ de\ emissão\ de\ CO_2 \cdot Fração\ do\ mix_i \quad 4-9$$

Por aplicação da expressão 4-9, a emissão específica anual de dióxido de carbono é de 243,172 g CO<sub>2</sub>/kWh, este valor encontra-se calculado no Anexo 4 Tabela A4 8.

O consumo anual de uma fonte de energia é pela expressão 4-10

$$Energia\ Consumida = Potência\ da\ Fonte\ de\ Luz \cdot Tempo \quad 4-10$$

No caso de estudo para 4 luminárias, a energia consumida anualmente pela tecnologia HPS é de 7937,70 kWh, e a energia consumida anualmente pela tecnologia LEP é de 4831,64 kWh. A margem de optar pela tecnologia LEP auferir uma economia de 3106,06 kWh.

Este valor de economia de 3106,06 kWh, traduzido numa economia de dióxido de carbono equivale a menos 775,30 kg libertado anualmente para a atmosfera, o que ao fim de 20 anos se traduz numa economia de 15106,12 kg a menos libertado para a atmosfera.

#### 4.3.5 Conclusões gerais sobre o estudo de iluminação da tecnologia LEP

Após ter realizado o estudo das tecnologias de iluminação existentes no mercado e ter efetuado algumas simulações sou levado às seguintes conclusões:

- Uma das principais conclusões a reter é a ter uma ideia dos níveis de poupança que se podem obter considerando que há projetos de iluminação de subestações a funcionar com tecnologias bem menos eficientes do que a de vapor de sódio de alta pressão aqui considerado. Por outro lado viu-se que, num horizonte temporal de treze anos, a redução no custo energético ao optar por uma solução LEP, e por consequência económico e ambiental, são consideráveis para que pelo menos valerá a pena o estudo da introdução desta tecnologia numa futura subestação de tração a ser projetada;
- Uma outra conclusão é a de o aparecimento de um recurso ou de uma tecnologia promissora, como é o caso da iluminação de estado sólido neste caso o LEP, a sua aplicabilidade ao mundo real pode decorrer um elevado período de tempo. Por um lado tem que ser feita a sensibilização para as vantagens do uso de fontes de iluminação eficientes, mas também deve ser avaliada a superioridade em situações concretas que decorrem da sua aplicação;
- Deve-se também ter em atenção a colocação de novos desafios, quando aparece uma nova tecnologia, que podem por vezes por em causa conceitos que se davam como garantidos;
- É uma tecnologia amiga do ambiente no ponto de vista do consumo de energia dado que indiretamente com a sua utilização reduz-se as emissões poluentes para a atmosfera.

## 5 Conclusões

Todos os temas e trabalhos abordados durante o meu estágio curricular, bem como o acompanhamento de trabalhos tiveram uma grande importância para mim. O pouco conhecimento que tinha na área eletrotécnica de correntes fortes, adquirido na minha formação académica foi agora complementado e reforçado com novos conhecimentos através do estudo de sistemas elétricos de energia de tração. Toda a orientação do estágio foi excelente, o que me permitiu clarear certas dúvidas e ideias que me tinham surgido outrora. Os objetivos do programa de estágio foram atingidos, nestes estavam previstos numa fase inicial a aquisição de conhecimentos técnicos de energia de tração e regulamentação aplicável, da qual resulta a secção 2 deste relatório. Na primeira fase, as principais matérias abordadas foram o estudo de sistemas de alimentação para tração elétrica, subestações de tensão alternada, subestações de tensão contínua, circuito de retorno de corrente de tração, terras e proteções, e procedimentos para consignação de linhas de chegada das subestações, nesta última matéria assistí a uma consignação na Subestação de Tração de Abrantes, embora não esteja descrito o procedimento em relatório. Os conhecimentos teóricos sobre os procedimentos de consignação de linhas de tração foram abordados numa formação inicial que tive no início do estágio. Neste estágio tive oportunidade de aprender a leitura de esquemas elétricos desenvolvidos tanto para subestações de tração, como para postos de catenária. No que respeita às proteções, tive a oportunidade de consolidar conhecimentos das proteções próprias de transformadores, e efetuar o cálculo simples de proteções de distância e perceber o seu modo de funcionamento, estudar o curto-circuitos entre subestações. Ao nível das subestações de tensão contínua tive a oportunidade de perceber e efetuar o cálculo de curto-circuitos catenária-carril e estudar as especificidades dos disjuntores denominados por DDL, e as suas características próprias de parametrização que lhe permite efetuar a distinção entre uma corrente de curto-circuito e uma corrente de arranque do material circulante. Tive ainda a oportunidade de estudar o Normativo de Retorno da Corrente de Tração, Terras e Proteções (Normativo RCT+TP).

Numa segunda fase, acompanhei diversos trabalhos no terreno em instalações técnicas (Subestações de Tração e Postos de Catenária), nos quais destaco, o ensaio de relés de

proteção e religação automática de disjuntor, e montagem de uma caixa de comando elétrico de um seccionador. Neste estágio acompanhei trabalhos noturnos na infraestrutura fixa de tração mais propriamente a catenária o que me possibilitou um complemento na aquisição de conhecimento. Ainda na fase de acompanhamento de trabalhos tive a hipótese de observar as normas e procedimentos de segurança nos trabalhos de infraestrutura, visto que as instalações fixas de tração elétrica em tensão e a circulação ferroviária são os principais fatores de risco durante a realização dos trabalhos.

Numa terceira fase desenvolvi um estudo técnico-económico com vista à melhoria da eficiência energética na iluminação exterior das subestações de tração com o objetivo da redução de consumos e custos associados de energia elétrica, explorando uma tecnologia inovadora pouco divulgada e bastante promissora no mercado da iluminação, o LEP.

O estágio teve como objetivos secundários a consolidação de conhecimentos adquiridos no Instituto Politécnico de Tomar, não só no mestrado mas também na licenciatura, bem como a aquisição de novos conhecimentos, através do acompanhamento prático de atividades relacionadas com a manutenção de subestações, bem como todo o trabalho efetuado para a realização deste relatório de estágio. Sem menosprezar as outras disciplinas do mestrado de controlo e eletrónica industrial, as disciplinas de sensores e atuadores inteligentes, a modelação e simulação matemática, geração e armazenamento de energia, e a disciplina de controlo digital, tiveram uma relevante importância e utilidade para compreensão de certas matérias.

Foi bastante benéfico entrar no esquema da organização e funcionamento de uma empresa de grande prestígio e renome a não só a nível nacional como europeu como a REFER EPE, nomeadamente o conhecimento dos trabalhos que se realizam nos órgãos onde estagiei e como é a sua interação na realização de projetos, obras, e realização de outros trabalhos.

Desde o princípio até ao fim do estágio, todo o tempo foi aproveitado para conhecer mais algumas realidades não só das matérias de estágio em questão mas também mas também algumas realidades antigas e modernas que se relacionam com o tema caminho de ferro em geral, por vezes até na hora de almoço.

Em suma, nos órgãos onde estagiei, Catenária e Energia de Tração da REFER EPE e na REFER ENGINEERING, todo o trabalho, documentação e acompanhamento de trabalhos contribuíram de uma forma extremamente positiva para a minha realização pessoal e profissional futura, uma vez que me deram novos conhecimentos, alguma experiência de trabalhos no terreno.



## Bibliografia

- [1] Formação em Energia de tração para técnicos, 'Subestações, Configuração de subestações', Rede Ferroviária Nacional REFER EPE, Direcção Geral de Engenharia de Infraestrutura - Catenária e Energia de Tração, Novembro 2012.
- [2] Formação em Energia de tração para técnicos, 'Subestações, Qualidade de Energia', Rede Ferroviária Nacional REFER EPE Direcção Geral de Engenharia de Infraestrutura-Catenária e Energia de Tração, Novembro 2012.
- [3] REFER EPE, 'Segurança Ferroviária-Volume1', Lisboa, Edição Outubro de 2009.
- [4] Formação em Energia de tração para técnicos, 'Subestações, Sistemas de eletrificação', Rede Ferroviária Nacional REFER EPE Direcção Geral de Engenharia de Infraestrutura-Catenária e Energia de Tração, Novembro de 2012.
- [5] REFER-EPE, Documento interno, IT.ENT.003- 'Esquemas eléctricos de princípio e encravamentos em subestações', Lisboa, 18-04-2012.
- [6] Rashid, Muhammad H. Rashid, 'Power Electronics Handbook', San Diego, Academic Press 2001.
- [7] REFER-EPE, 'Manual de Equipamentos de Alta Tensão'- EI-Catenária e Energia de Tração/CH-Recursos e Desenvolvimento Profissional edição Maio 2012.
- [8] Santos, Marco Filipe Pereira dos Santos, 'Análise de redes em sistemas de tracção' Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Outubro 2008.
- [9] Formação em Energia de tração para técnicos, 'Desfasamentos, diferenças de potencial e curto-circuitos' Rede Ferroviária Nacional REFER EPE Direcção Geral de Engenharia de Infraestrutura-Catenária e Energia de Tração, Novembro de 2012.
- [10] Guia Técnico de Subestações de distribuição. Disponível em <http://paginas.fe.up/~ee97153/>

- [11] SIEMENS, “Fixed-Mounted Circuit-Breaker Switchgear Type 8DA and 8DB up to 40.5 kV, Gas Insulated”. Disponível em <http://www.siemens.com/entry/cc/en/>
- [12] Delgado, Manuel, ‘Sistemas eléctricos trifásicos a média, alta e muito alta tensão, análise de problemas de exploração’, Publindústria edições técnicas Abril 2010.
- [13] Delgado, Manuel, ‘Protecção de redes eléctricas de distribuição, transporte e interligação Fundamentos e aplicações práticas’, Publindústria edições técnicas Abril 2011.
- [14] ABB, “Instrument Transformers-Application Guide”, 2009. Disponível em (<http://www.abb.com>)
- [15] Ribeiro, Bessie de Assumpção, ‘Transformador de potencial óptico baseado em FBG\_PZT com desmodulação por redes gémeas e filtro de Fabry-Perot’, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Abril de 2011.
- [16] Formação em Energia de tração para técnicos, ‘Relés de protecção’ Rede Ferroviária Nacional REFER EPE Direcção Geral de Engenharia de Infraestrutura-Catenária e Energia de Tração, Novembro de 2012.
- [17] AREVA, ‘Network Protection and Automation Guide’, ISBN-2-9518589-0-6, AREVA T&D, 2002.
- [18] Notas de aplicação do relé – “Type LFZP 141 Optimho Distance Protection for Single Phase Electrified Railway Systems”- Alstom, 1994.
- [19] Formação em Energia de tração para técnicos- Subestações, ‘Protecções próprias dos transformadores’, Rede Ferroviária Nacional REFER EPE Direcção Geral de Engenharia de Infraestrutura -Catenária e Energia de Tração, Novembro de 2012.
- [20] Martigoni, Alfonso, ‘Transformadores’- 8 edição-São Paulo: Globo 1991 ISBN 85-250-0223-2.
- [21] Rede Ferroviária Nacional, Documento Interno, “Linha de Cascais –Modificação da Subestação de Belém-Equipamento Electromecânico” Novembro de 1994.

- [22] Barbosa, Rui Manuel Couto, 'Sistemas de detecção de falhas em rectificadores de tracção', Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Fevereiro de 2008.
- [23] Paiva, José pedro Sucena, 'Redes de Energia Eléctrica-Uma análise sistémica', Lisboa, Portugal, IST Press, segunda edição 2007.
- [24] Li, Moxue X; He, Jinghan H.; Bo, Zhi-quian Q.; Yip, H.T.; Yu, Liu; Klimek, Andrzej 'Simulation and Algorithm Development of Protection Scheme in DC Traction System', PowerTech 2009 IEEE Bucharest E-ISBN 978-1-4244-2235-7 .
- [25] REFER-EPE, Documento interno, 'Subestação de Rectificação da Linha de Cascais Projecto nº 800375', Lisboa, 10 -01-1997.
- [26] REFER-EPE, Documento interno, 'Certificado de parametrização da PCU 6000- da Subestação de Tração do Cais do Sodré Lisboa', 20-10-1993.
- [27] F Du, J H He, L Yu, M X Li, Z Q Bo, A Klimek, 'Modeling and Simulation of Metro DC Traction Systems with Different Motor Driven Trains', Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific E-ISBN 978-1-4244-4813-5 .
- [28] REFER EPE, Documento interno, IT.ENT.001,' Postos de Catenária 25 kV / 50 Hz', 20-03-2011.
- [29] REFER EPE, Documento interno, 'Regulamento Geral de Segurança IV, Exploração de catenária 25 kV- 50 Hz', Junho 1995.
- [30] REFER EPE, Documento interno, IT.GER002-1.05,'Retorno da Corrente de Tracção, Terras e Protecções – Parte 1, Generalidades', 15-07-2003.
- [31] REFER EPE, Documento interno, IT.GER002-2.05, 'Retorno da Corrente de Tracção, Terras e Protecções –Parte 2, Funcionamento do sistema de 25kV', 15-07-2003.
- [32] REFER EPE, Documento interno, IT.GER002-3 'Retorno da Corrente de Tracção, Terras e Protecções – Parte 3, Introdução ao Sistema RCT+TP', 15-07-2003.

- [33] REFER EPE, Documento interno, IT.GER002-12.05 ‘Retorno da Corrente de Tração, Terras e Protecções-Parte 12, Terceiros’, 15-07-2003.
- [34] Mamede Filho, João, ‘Instalações Eléctricas Industriais’. 6ª Edição Editora LTC. Rio de Janeiro. 2001.
- [35] Salomão, Thais Mazzioti, ‘Eficiência energética: Projetos luminotécnicos em Plantas Industriais’, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- [36] OSRAM. ‘Manual Luminotécnico prático’. Disponível em <http://eletricaeficiente.blogspot.pt/2009/02/manual-luminotecnico-pratico-osram.html>
- [37] Secretaria de Estado da Energia e da Inovação do Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento, “Eficiência energética na iluminação pública – Documento de referência”, Janeiro de 2011. Disponível em [http://www.adene.pt/pt-pt/Publicacoes/Documents/RNAE\\_DocReferencia\\_EficienciaEnergetica\\_Iluminacao.pdf](http://www.adene.pt/pt-pt/Publicacoes/Documents/RNAE_DocReferencia_EficienciaEnergetica_Iluminacao.pdf)
- [38] Marcelo Paschoal Dias, Danilo Pereira Pinto e Henrique A. C. Braga, ‘simplified technique of lighting performance evaluation applied to led-based modern luminaires’, Published in Power Electronics Conference, IEEE 2009. COBEP 09 Brazilian E-ISBN 978-1-4244-3370-4
- [39] Lourenço, Daniel Ribau. ‘Sistemas de Iluminação Pública com Gestão Inteligente de Consumo’ Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática, 2010
- [40] Silva, Ruben “Estudo da Eficiência Energética na Iluminação-Desenvolvimento de uma Ferramenta de Cálculo Luminotécnico e Rentabilidade”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 4 de Fevereiro de 2013.
- [41] DG Industria, Energía y Minas, “Guía Técnica de Iluminación Eficiente – Sector Residencial y Terciario”, Comunidad de Madrid, 2006

- [42] P. Van Tichelen, T. Geerken, B. Jansen , M. Vanden Bosch (Laborelec),V. Van Hoof, L. Vanhooydonck (Kreios), A. Vercalsteren.’ Final report Lot 19:Domestic lighting- Study for European Commission DGTREN unit D3’, disponível em <http://www.eup4light.net/>
- [43] P. Van Tichelen, T. Geerken, B. Jansen , M. Vanden Bosch (Laborelec),V. Van Hoof, L. Vanhooydonck (Kreios), A. Vercalsteren .’Final Report Lot 9: Public street lighting-Study for the European Commission DGTREN unit D3’. Disponível em <http://www.eup4light.net/>
- [44] Lep Gilliard, R.P. DeVincentis, M. Hafidi, A. O'Hare, D. Hollingsworth, G. ‘Operation of the LiFi light emitting plasma in resonant cavity’, IEEE Transactions on Plasma Science, v.39, no.4, 2011 April, p.1026(8) (ISSN: 0093-3813)
- [45] Luxim,’Introduction to Solid State Plasma Light’, Midwest Energy Solutions Conference’, Chicago, IL , Site <http://www.lifi.com/pdfs/LUXIM-MEEA-2009.pdf>
- [46] Site <http://www.luxim.com/>
- [47] Site <http://www.alphalite.com/US/technology/technology.html>
- [48] Hafidi,A.,’Increased collection efficiency ofLIFI™ high intensity electrodeless light source’,SPIE08,San José convention center. Disponível em <http://www.lifi.com/pdfs/LUXIM-SPIE08.pdf>
- [49] Luxim,’Introduction to solid state plasma lighting’,Chicago,2009. Disponível em <http://www.lifi.com/pdfs/LUXIM-MEEA-2009.pdf>
- [50] Luxim, ‘Clean Light Solutions’. Disponível em <http://www.luxim.com/downloads/lep-brochure.pdf>
- [51] LUXIM Corporation, ‘OEM Luminaire Design GuideSTA SeriesLight Emitting Plasma™’,2010. Disponível em <http://www.luxim.com/downloads/lep-sta-luminaire-design-guide.pdf>
- [52] GE, Dados da lâmpada GE HID 400. Disponível em <http://genet.gelighting.com>

- [53] EDP SU, 'Tarifas e horários'.Disponível em <http://www.edpsu.pt/pt/tarifasehorarios/horarios/Pages/HorariosAT.aspx>
- [54] Observatório Astronómico de Lisboa,'Nascimento e Ocaso do Sol (Lisboa)', 2013.
- [55] Barros, Carlos,'Decisões de Investimento e Financiamento de Projectos, Edições Sílabo, 1991.
- [56] Assis, Rui,'Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos', Lidel – edições técnicas, Março 2010, ISBN:978-972-757-605-0 .
- [57] Alphalite, 'Wave-Area/Parking Lot Light '. Disponível no site [http://www.alphalite.com/US/brochure/WAVE-EN\\_210x297mm\\_s.pdf](http://www.alphalite.com/US/brochure/WAVE-EN_210x297mm_s.pdf)
- [58] Folgado, Miguel Ângelo Semedo, 'Energia Eléctrica e Ambiente', Revista Militar da Brigada Mecanizada nº 23, Santa Margarida, Abril de 2010. Disponível no site <http://www.exercito.pt/sites/BrigMec/Publicacoes/Paginas/23.aspx>
- [59] EDP,Serviço Universal,'Origens da eletricidade'. Disponível no site <http://www.edpsu.pt/pt/origemdaenergia/Pages/OrigensdaEnergia.aspx>
- [60] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos - ERSE, 'Recomendação N.º 2/2011 - Rotulagem de Energia Eléctrica', Lisboa, Dezembro 2011. Disponível no site, <http://www.erse.pt/pt/desempenhoambiental/rotulagemenergetica/documentacao/Documents/Recomendacao%202011%20Rotulagem.pdf>

## **Anexos**



## Anexo 1-Modelação matemática da retificação

```

f=50%Hz
V=1206*sqrt(2);

t =0:0.0001:0.02;

V0=V*sin(2*pi*f*t)
V4=V*sin(2*pi*f*t+2*pi/3)
V8=V*sin(2*pi*f*t-2*pi/3)
V0a=V*sin((2*pi*f*t)-pi/6)
V4a=V*sin((2*pi*f*t+2*pi/3)-pi/6)
V8a=V*sin((2*pi*f*t-2*pi/3)-pi/6)

V0abs=abs(V0)
V4abs=abs(V4)
V8abs=abs(V8)
V0aabs=abs(V0a)
V4aabs=abs(V4a)
V8aabs=abs(V8a)
vrect=max(V0abs,V4abs)
vrect2=max(vrect,V8abs)
  vrectA=max(V0aabs,V4aabs)
  vrect2A=max(vrectA,V8aabs)
  vret3A=max(vrect2,vrect2A)
% plot(t,V0abs,t,V4abs,t,V8abs,t, V0aabs,t,V4aabs,t,V8aabs)
  xlabel('Tempo');ylabel('Amplitude');
subplot(3,2,1)
plot(t,V0,'r',t,V4,'m',t,V8,'c')
  xlabel('Tempo (s)');ylabel('Amplitude(V)');
  title('Ligação Dd0-Transformador 1')
subplot(3,2,2)
plot(t,V0abs,'r',t,V4abs,'m',t,V8abs,'c',t,vrect2,'p')
  xlabel('Tempo (s)');ylabel('Amplitude (V)');
  title('Ligação Dd0-Retificação 6 Pulsos')
subplot(3,2,3)
plot(t,V0a,'g',t,V4a,'b',t,V8a,'k')
  xlabel('Tempo (s)');ylabel('Amplitude (V)');
  title('Ligação Dyll-Transformador 2')
subplot(3,2,4)
plot(t, V0aabs,'g',t,V4aabs,'b',t,V8aabs,'k',t,vrect2A,'p')
  xlabel('Tempo (s)');ylabel('Amplitude (V)');
  title('Ligação Dyll-Retificação 6 pulsos')
subplot(3,2,5)
plot(t,V0,'r',t,V4,'m',t,V8,'c',t,V0a,'g',t,V4a,'b',t,V8a,'k')
  xlabel('Tempo (s)');ylabel('Amplitude (V)');
  title('Sinais de Dd0 e Dyll a aplicar aos retificadores')
subplot(3,2,6)
plot(t,V0abs,'r',t,V4abs,'m',t,V8abs,'c',t,
V0aabs,'g',t,V4aabs,'b',t,V8aabs,'k',t, vret3A,'p')
  xlabel('Tempo (s)');ylabel('Amplitude (V)');
  title(' Retificação 12 Pulsos')

```



## Anexo 2-Cálculo de Correntes de Curto Circuito SST-DC

```

%Calculo correntes Curto-Circuito SST-DC
clear all
clc
format short

%Definição parametros
R1=0.087;%resistência catenária ohm/km
R2=0.087;%resistência catenária ohm/km
R3=0.102;%resistência carril ohm/km
R4=0.102;%resistência carril ohm/km
%RSST-A=RSST-B=Rdc
Rdc=0.057959;%Resistência SST---> Rdc0.057959
Va=1500;
Vb=1500;

L=6;%Comprimento do troço
pos=0;%Posição Inicial
inc=0.1;%incrementos de 100 metros
it=floor(L/inc)+1;%iterações

for n=1:it

    %Definição Matrizes
    A=[Rdc+(R1+R4)*pos,0,0,0,-((R2+R3)*(L-pos)+Rdc),0;1,1,-1];
    C=[Va;-Vb;0];

    %Solução
    I=inv(A)*C;
    I1(n)=I(1);
    I2(n)=I(2);
    I3(n)=I(3);
    if (I1(n)==I2(n))
        print(I1(n))
    end
    pos=pos+inc;

end

arr=10^6;
I1=round(I1*arr)/arr;
I2=round(I2*arr)/arr;
I3=round(I3*arr)/arr;

indminI3=find(I3 == min(I3))%Encontra o indice correspondente ao valor
mínimo de I(3)
%Que é o indice de intercepção I1=I2
igual=find(I1==I2)
%Controlo
[I1;I2]
[I1' I2']

```

```
MaximoI1=max(I1)
MaximoI2=max(I2)
MaximoI3=max(I3)
MinimoI3=min(I3)
I1intercept=I1(indminI3)
I2intercept=I2(indminI3)
coordx=Va/((Rdc+R1+R3)*I1(indminI3))
f=figure
plot(linspace(0,L,it),[I1;I2;I3])
legend('I1','I2','I3')
grid on
%text(coordx,I1(indminI3),'o')%I1(indminI3)

title('Contribuições das Correntes da SST-A e SST-B, para a Corrente de
Curto-Circuito','fontsize',18,'fontweight','b','Color',[0 204 102]/255);
xlabel('Distância em quilómetros','fontsize',14,'fontweight','b');
ylabel('Amplitude da Intensidade de Corrente de Curto-circuito
Ampere','fontsize',14,'fontweight','b');
```

## **Anexo 3-Esquemas unifilares de acompanhamento de trabalhos**



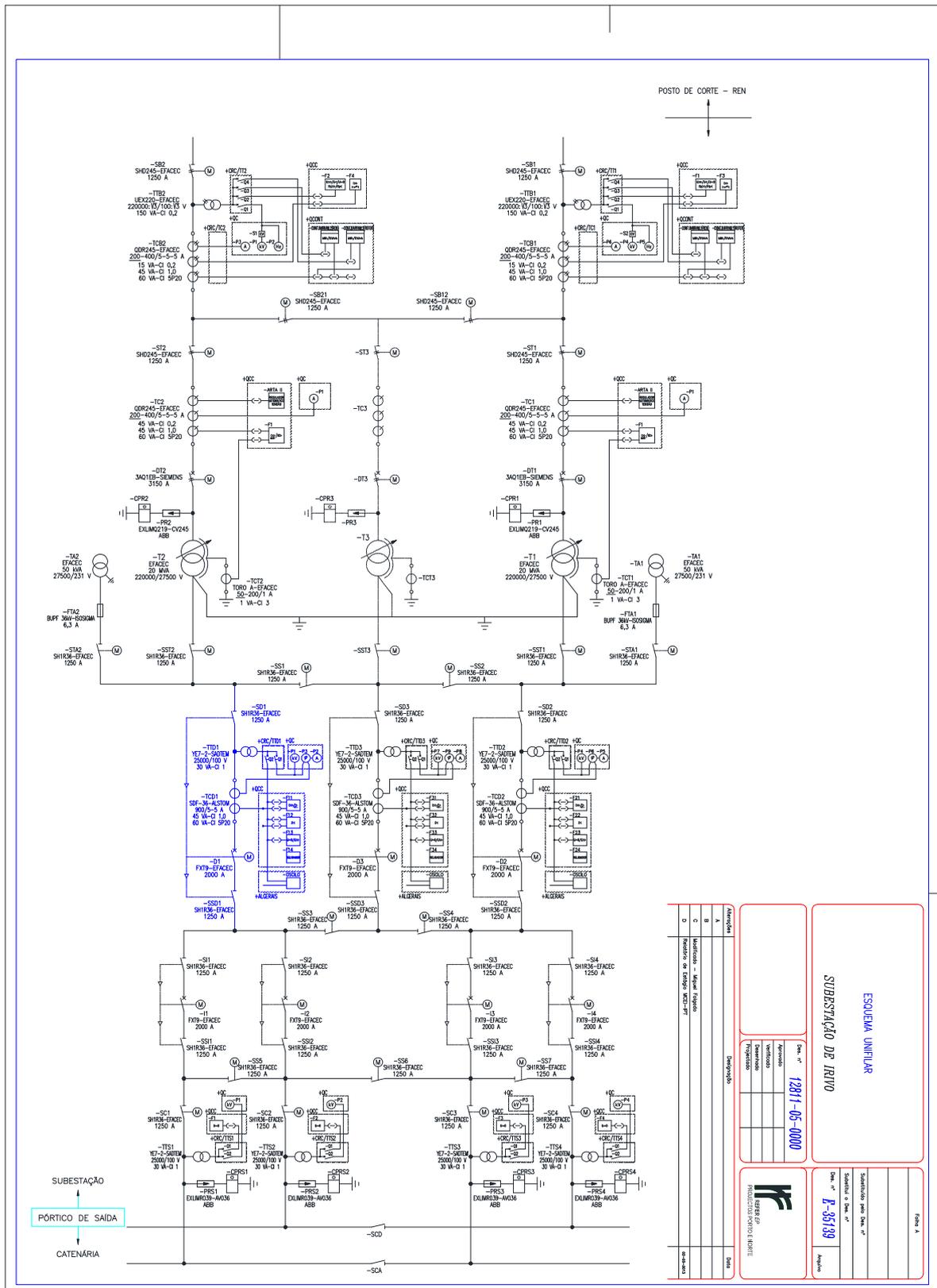


Figura A3- 1 Esquema unifilar SST Irivo, Folha A

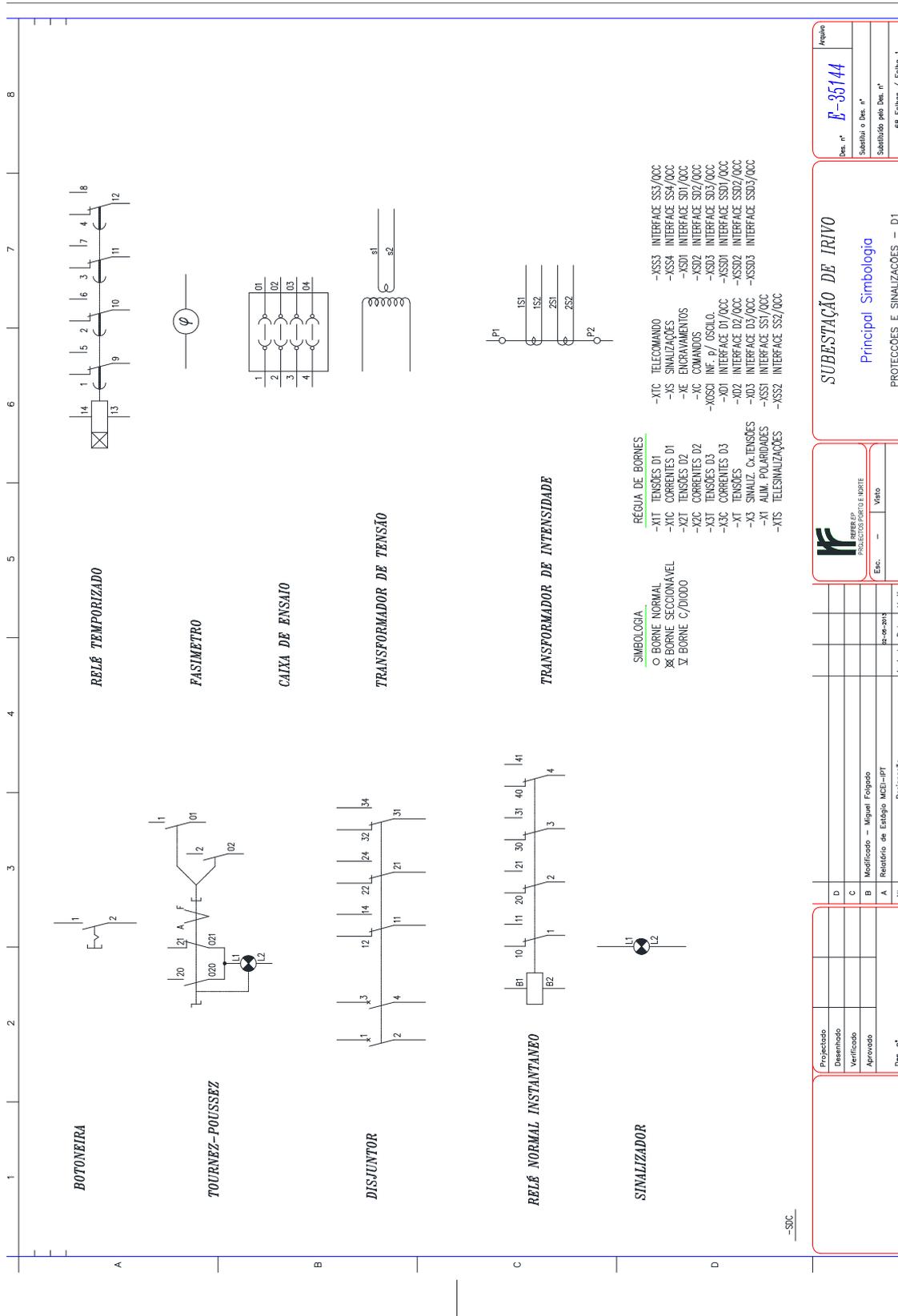


Figura A3- 2 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 1

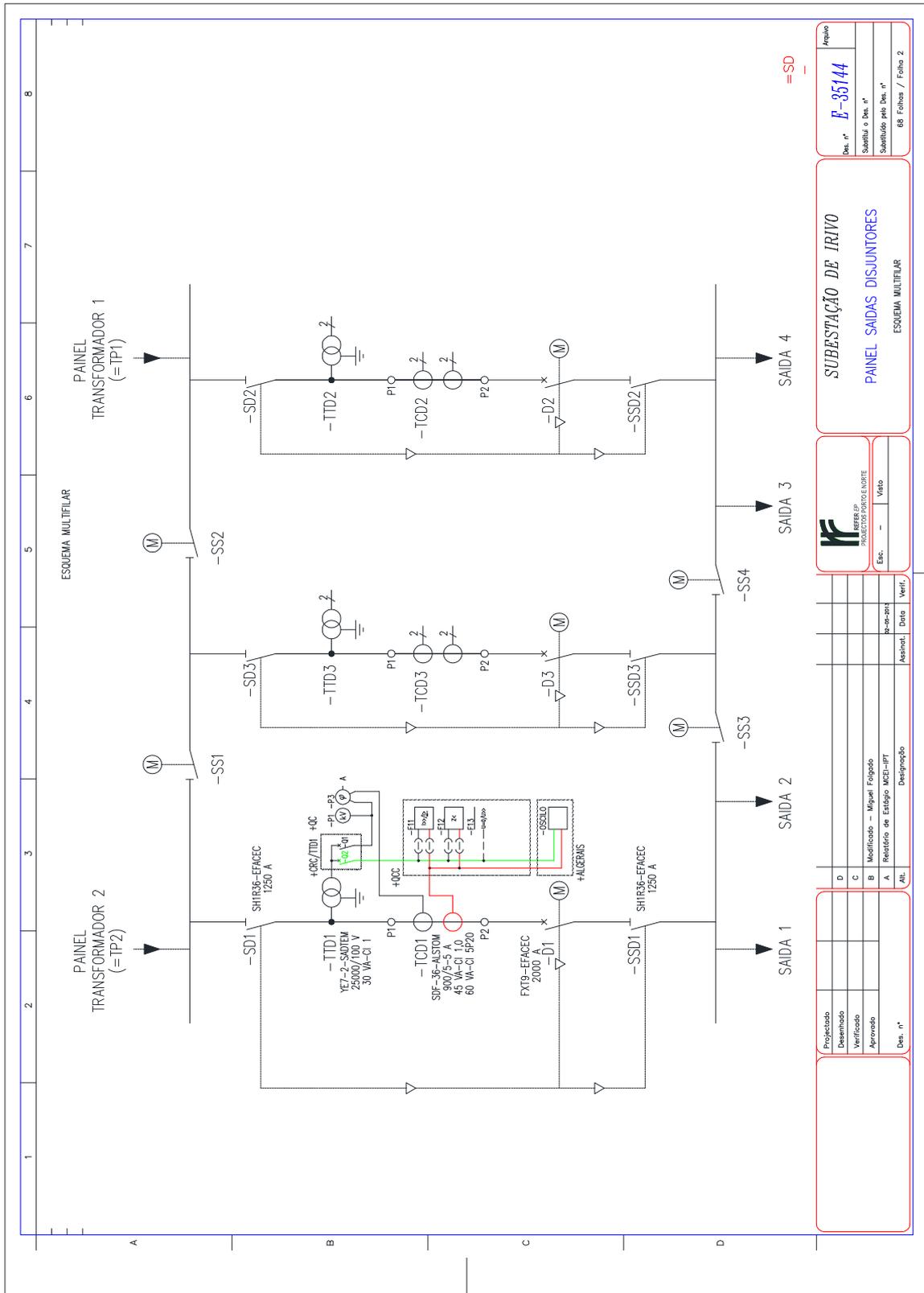


Figura A3- 3 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 2

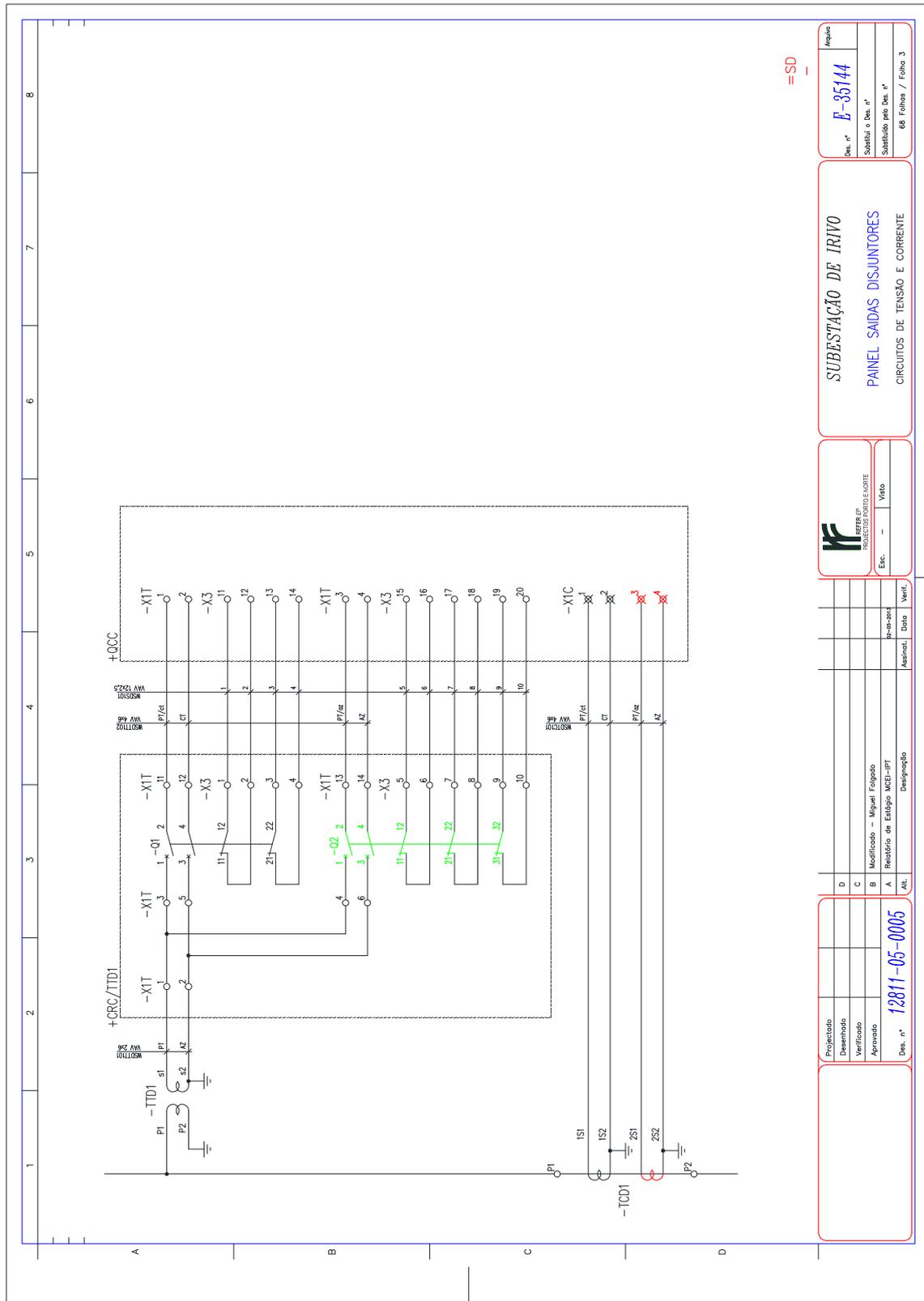


Figura A3- 4 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 3





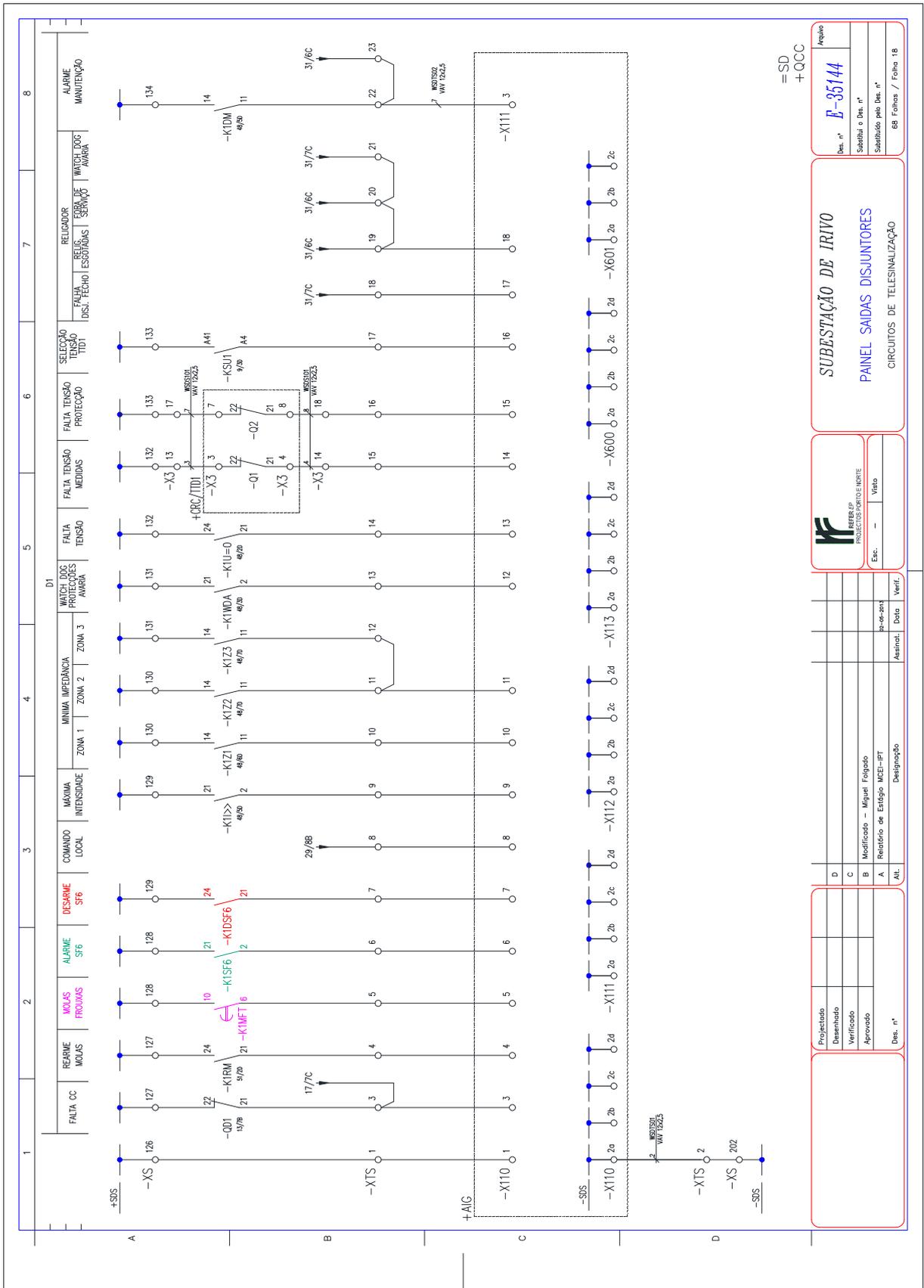


Figura A3- 7 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 18

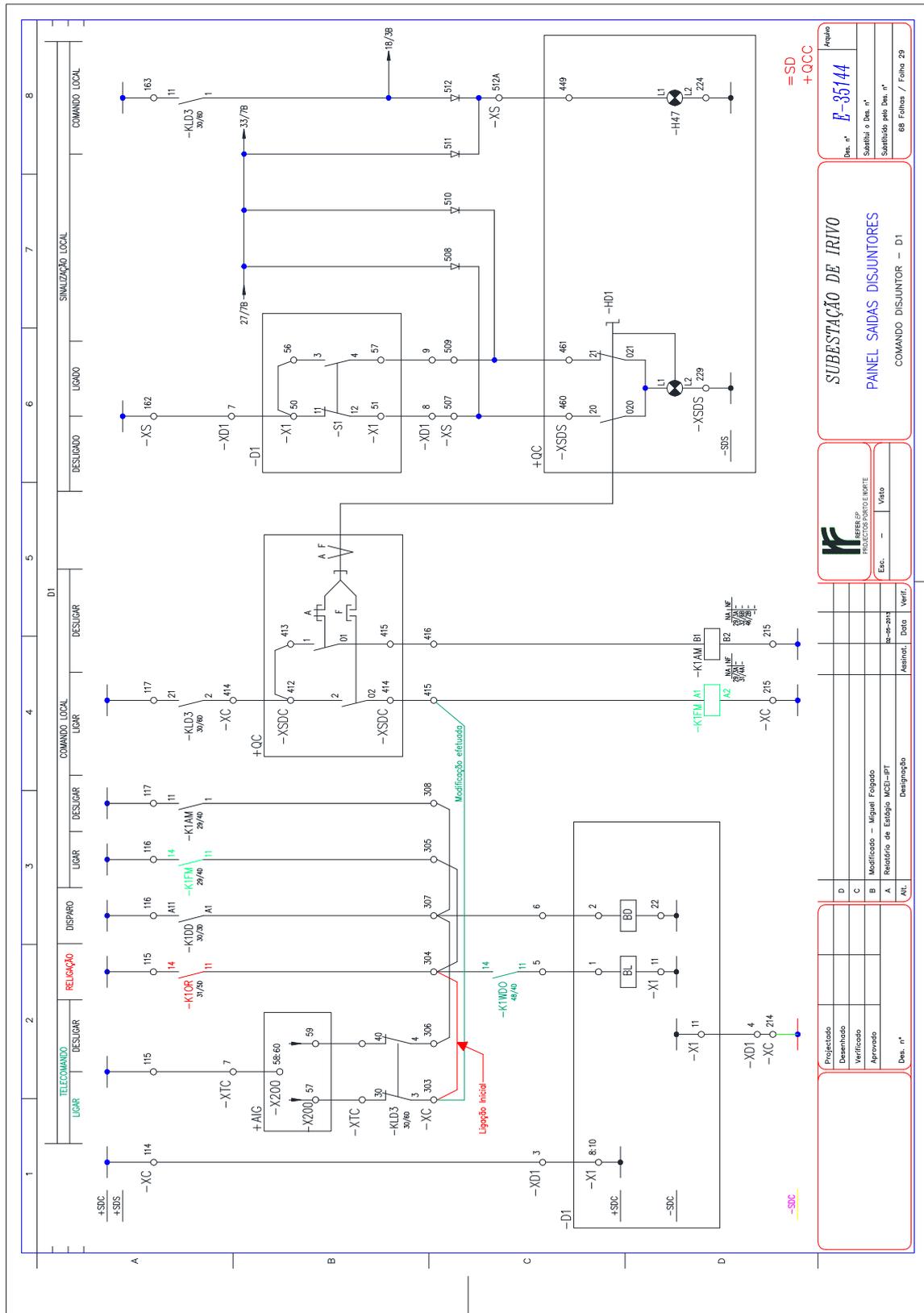


Figura A3- 8 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 29

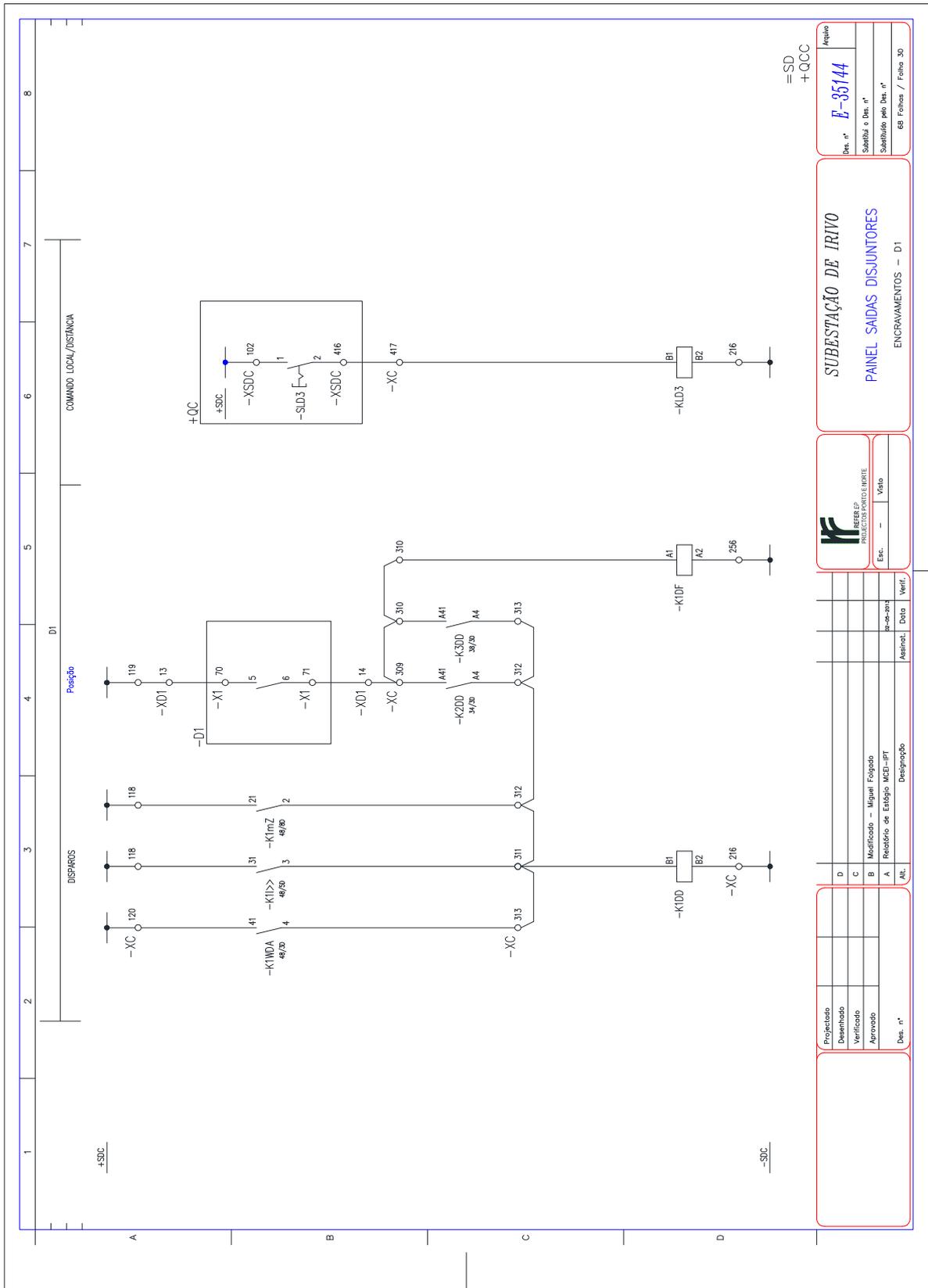


Figura A3- 9 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 30



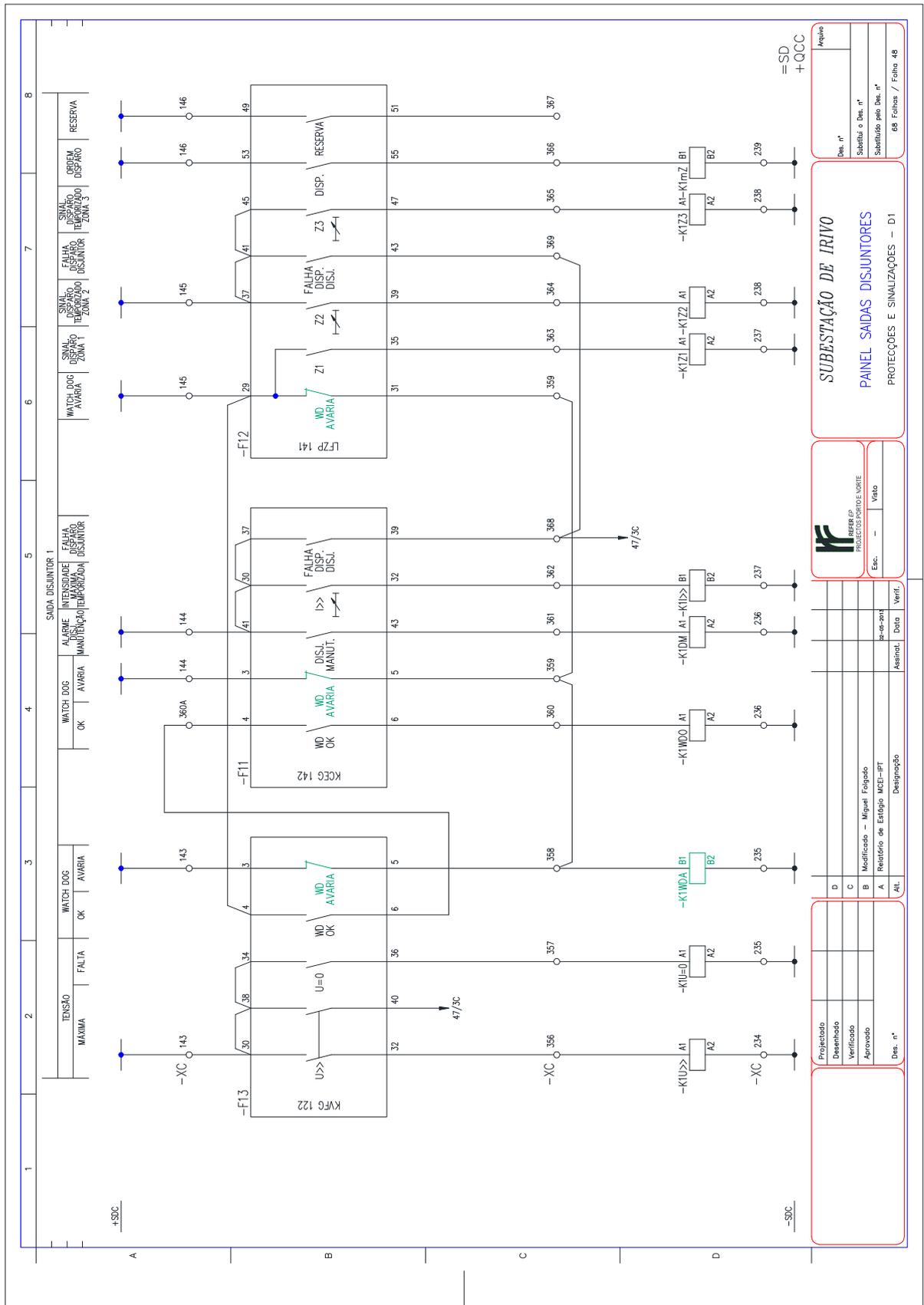


Figura A3- 11 Esquema unifilar SST Irivo, Folha 48







## Anexo 4-Avaliação técnico económica luminotécnica

Tabela A4 1 Estatísticas das horas de luz artificial ano 2013

			Estatísticas
Horas Diárias Iluminação artificial	Média		11,81908676
	Intervalo de Confiança a 95% para a média	Limite Inferior	11,62585160
		Limite superior	12,01232192
	Média aparada 5%		11,81775748
	Mediana		11,76666667
	Soma		4313,966667
	Variância		3,524
	Desvio Padrão		1,877318937
	Mínimo		9,116667
	Máximo		14,550000
	Amplitude		5,433333
	Amplitude inter-quartís		3,641667
	Enviesamento		,010
	Curtose		-1,469

Tabela A4 2 Estatísticas das horas observadas nos ciclos semanal normal e diário

	Observações	Amplitude	Mínimo	Máximo	Soma	Média	Desvio Padrão
Horas Cheias – Ciclo Semanal Normal	12	40,10	78,37	118,47	1200,20	100,0167	13,76999
Horas Ponta Ciclo Semanal Normal	12	80,50	,00	80,50	443,95	36,9958	38,75228
Horas Vazio Ciclo Semanal Normal	12	50,42	86,28	136,70	1284,37	107,0306	17,14256
Horas Super Vazio Ciclo SemanalNormal	12	27,73	96,27	124,00	1385,45	115,4542	8,72493
Horas Cheias – Ciclo Diário	12	84,733	30,000	114,733	731,533	60,96111	33,53616 4
Horas Ponta Ciclo Diário	12	33,68	56,00	89,68	807,03	67,2528	10,71120
Horas Vazio Ciclo Diário	12	60,65	90,00	150,65	1389,95	115,8292	24,37523
Horas Super Vazio Ciclo Diário	12	27,73	96,27	124,00	1385,45	115,4542	8,72493

Tabela A4 3 Simulação dos Cenários 1, 2 e 3

		Ciclo Semanal Normal (Cenário 1)																				
Anos		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Investimento inicial LEP(€)		-2154,720934																				
Custos das substituições (€)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Despesas de O&M (€)			0	0	0	0	0	46,61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46,61	0	0
Receitas líquidas Poupança (€)			230,1631188	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631
Fluxo monetário(€)		-2154,720934	230,1631188	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	183,5531	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	20,68312	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	230,1631	183,5531	230,1631	230,1631	230,1631
Fluxo monetário atualizado(€)		-2154,720934	219,2029703	208,7647	198,8236	189,3558	180,3388	136,9702	163,5726	155,7835	148,3652	141,3002	12,09299	128,1634	122,0604	116,248	110,7124	105,4404	80,08362	95,63753	91,08336	86,74606
Fluxo monetário acumulado(€)		-2154,720934	-1935,517963	-1726,75	-1527,93	-1338,57	-1158,24	-1021,26	-857,692	-701,909	-553,544	-412,243	-400,15	-271,987	-149,927	-33,6786	77,03382	182,4742	262,5578	358,1953	449,2787	536,0248
Taxa de atualização 0,5 %		0,05																				
Retorno(anos)		15																				
VAL exel(Confirmação 20 anos)		536,02 €																				
		Ciclo Diário (Cenário 2)																				
Anos		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Investimento inicial LEP(€)		-2154,720934																				
Custos das substituições (€)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Despesas de O&M (€)			0	0	0	0	0	46,61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46,61	0	0
Receitas líquidas Poupança (€)			233,2194612	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195
Fluxo monetário(€)		-2154,720934	233,2194612	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	186,6095	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	23,73946	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	233,2195	186,6095	233,2195	233,2195	233,2195
Fluxo monetário atualizado(€)		-2154,720934	222,1137726	211,5369	201,4637	191,8702	182,7336	139,2509	165,7447	157,8521	150,3353	143,1765	13,87997	129,8653	123,6813	117,7917	112,1825	106,8405	81,41709	96,9075	92,29286	87,89796
Fluxo monetário acumulado(€)		-2154,720934	-1932,607161	-1721,07	-1519,61	-1327,74	-1145	-1005,75	-840,007	-682,155	-531,82	-388,643	-374,763	-244,898	-121,217	-3,42494	108,7576	215,5981	297,0152	393,9227	486,2156	574,1135
Taxa de atualização 0,5 %		0,05																				
Retorno(anos)		15																				
VAL exel(Confirmação 20 anos)		574,11 €																				
		Ciclo Semanal Normal com aumento 2,5% preço da receita por ano (Cenário 3)																				
Anos		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Investimento inicial LEP(€)		-2154,720934																				
Custos das substituições (€)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Despesas de O&M (€)			0	0	0	0	0	46,61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46,61	0	0
Receitas líquidas Poupança (€)			230,1631188	235,9172	241,8151	247,8605	254,057	260,4084	266,9187	273,5916	280,4314	287,4422	294,6283	301,994	309,5438	317,2824	325,2145	333,3448	341,6784	350,2204	358,9759	367,9503
Fluxo monetário(€)		-2154,720934	230,1631188	235,9172	241,8151	247,8605	254,057	213,7984	266,9187	273,5916	280,4314	287,4422	85,14825	301,994	309,5438	317,2824	325,2145	333,3448	295,0684	350,2204	358,9759	367,9503
Fluxo monetário atualizado(€)		-2154,720934	219,2029703	213,9839	208,889	203,9155	199,0603	159,5397	189,6941	185,1776	180,7686	176,4646	49,78442	168,1615	164,1577	160,2492	156,4337	152,7091	128,7374	145,5238	142,059	138,6766
Fluxo monetário acumulado(€)		-2154,720934	-1935,517963	-1721,53	-1512,65	-1308,73	-1109,67	-950,13	-760,436	-575,258	-394,489	-218,025	-168,24	-0,07885	164,0788	324,328	480,7617	633,4708	762,2082	907,732	1049,791	1188,468
Taxa de atualização 0,5 %		0,05																				
Retorno(anos)		13																				
VAL exel (Confirmação 20 anos)		1.188,47 €																				



Tabela A4 5 Cálculo das receitas marginais entre o ciclo semanal normal e ciclo diário

		Ciclo semanal Normal-2013												
	Horas	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Total
	Cheias	103,8	78,36666667	79,26666667	113,0333333	106,55	88,96666667	100,2666667	109,3666667	118,4666667	84,4833333	106,1833333	111,45	
	Ponta	80,5	74	68,38333333	0	0	0	0	0	0	70,56666667	73,5	77	
	Vazio	131,2	106,0666667	112,65	92,61666667	88,41666667	89,88333333	86,28333333	93,91666667	108,9	119,65	118,0833333	136,7	
	Super Vazio	124	112	116,4	117,3666667	105,8333333	96,26666667	106,2333333	119,4	120	123,95	120	124	
	<b>Total (Horas)</b>	<b>439,5</b>	<b>370,4333333</b>	<b>376,7</b>	<b>323,0166667</b>	<b>300,8</b>	<b>275,1166667</b>	<b>292,7833333</b>	<b>322,6833333</b>	<b>347,3666667</b>	<b>398,65</b>	<b>417,7666667</b>	<b>449,15</b>	<b>4313,967</b>
Custo	Tradicional (460w)	61,3322232	51,7291344	51,94891013	43,04771387	40,1771268	36,3466608	38,91558293	42,81627253	46,1971008	54,8355543	58,355094	62,4932632	
Custo	LEP(280w)	37,3326576	31,4872992	31,62107573	26,20295627	24,4556424	22,1240544	23,68774613	26,06207893	28,1199744	33,3781635	35,520492	38,0393776	
	<b>Custo Marginal (Euros)</b>	<b>23,9995656</b>	<b>20,2418352</b>	<b>20,3278344</b>	<b>16,8447576</b>	<b>15,7214844</b>	<b>14,2226064</b>	<b>15,2278368</b>	<b>16,7541936</b>	<b>18,0771264</b>	<b>21,4573908</b>	<b>22,834602</b>	<b>24,4538856</b>	<b>230,1631</b>
	<b>(Custo C. Semanal)-(Custo C. Diário)</b>	<b>0,6565284</b>	<b>0,6374412</b>	<b>0,4091592</b>	<b>-1,175556</b>	<b>-0,9211212</b>	<b>-0,8325528</b>	<b>-0,7619568</b>	<b>-1,1000616</b>	<b>-1,449846</b>	<b>0,5888304</b>	<b>0,4337292</b>	<b>0,4590636</b>	<b>-3,05634</b>
		Ciclo Diário-2013												
	Horas	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Total
	Cheias	102,85	77,51666667	68,83333333	30	31	30	31	31	38,31666667	68,2833333	108	114,7333333	
	Ponta	62	56	62	82,96666667	70,96666667	58,85	62,55	78,01666667	89,68333333	62	60	62	
	Vazio	150,65	124,9166667	129,4666667	92,68333333	93	90	93	94,26666667	99,36666667	144,416667	129,7666667	148,4166667	
	Super Vazio	124	112	116,4	117,3666667	105,8333333	96,26666667	106,2333333	119,4	120	123,95	120	124	
	<b>Total (Horas)</b>	<b>439,5</b>	<b>370,4333333</b>	<b>376,7</b>	<b>323,0166667</b>	<b>300,8</b>	<b>275,1166667</b>	<b>292,7833333</b>	<b>322,6833333</b>	<b>347,3666667</b>	<b>398,65</b>	<b>417,7666667</b>	<b>449,15</b>	<b>4313,967</b>
Custo	Tradicional (460w)	59,6544284	50,100118	50,90328107	46,05191253	42,5311032	38,47429573	40,86280587	45,62754107	49,9022628	53,3307655	57,24667493	61,32010067	
Custo	LEP(280w)	36,3113912	30,495724	30,98460587	28,03159893	25,8884976	23,41913653	24,87301227	27,77328587	30,3752904	32,4622051	34,84580213	37,32527867	
	<b>Custo Marginal (Euros)</b>	<b>23,3430372</b>	<b>19,604394</b>	<b>19,9186752</b>	<b>18,0203136</b>	<b>16,6426056</b>	<b>15,0551592</b>	<b>15,9897936</b>	<b>17,8542552</b>	<b>19,5269724</b>	<b>20,8685604</b>	<b>22,4008728</b>	<b>23,994822</b>	<b>233,2195</b>

Tabela A4 6 Estatísticas para os ciclos semanal e diário da receita marginal-(custo de energia)

Ciclos	Diário	Semanal
	Estatísticas	Estatísticas
Média	19,43495510	19,18025990
Intervalo de confiança a 95% para a média	Limite inferior	17,61213420
	Limite superior	21,25777600
Média aparada 5%	19,42495116	19,16270589
Mediana	19,56568320	19,15948080
Variância	8,231	12,431
Desvio Padrão	2,868913859	3,525757467
Mínimo	15,055159	14,222606
Máximo	23,994822	24,453886
Amplitude	8,939663	10,231279
Amplitude Interquartis	5,072277	6,510638
Enviesamento	0,139	0,171
Curtose	-0,946	-1,404

Tabela A4 7 Especificações técnicas da Luminária WAVE- Luminária para áreas / estacionamentos

<b>Consumo:</b>	280 W
<b>Tensão:</b>	100-270V +/- 10%
<b>Dimensões:</b>	490x350x240mm
<b>Peso:</b>	14,5 kg
<b>Fluxo Luminoso:</b>	23000 Lumens
<b>IRC:</b>	75
<b>Tempo para acender</b>	45 segundos
<b>Classificação:</b>	IP 65, resistente à água e humidade
<b>Vida útil:</b>	50000 horas
<b>Disponível com refletor:</b>	Tipo II, III, IV, e V

<b>Altura de montagem recomendada:</b>	6-12 m
<b>Eficiência da fixação</b>	Fonte direcional
<b>Eficiência de aplicação</b>	Controle ótico

Tabela A4 8 Cálculo de emissões específicas de dióxido de carbono [59],[60]

<b>Fonte de energia</b>	<b>Mix energético (1)</b>	<b>Fator de emissão de CO2 por tecnologia (g/kWh) (2)</b>	<b>Total (g) (1)x(2)</b>
<b>Eólica</b>	0,401	0	0
<b>Fuelóleo</b>	0,002	1000	2
<b>Cogeração fóssil</b>	0,107	327	34,989
<b>Carvão</b>	0,151	973	146,923
<b>Gás natural</b>	0,09	350	31,5
<b>RSU</b>	0,016	735	11,76
<b>Outras Renováveis</b>	0,048	0	0
<b>Cogeração Renovavel</b>	0,04	400	16
<b>Hídrica</b>	0,1	0	0
<b>Nuclear</b>	0,045	0	0
<b>Emissão de CO2 g/kWh</b>			243,172
<b>Consumo Total / ano (HPS) kWh</b>	7937,698667		kWh
<b>Consumo Total /ano (LEP) kWh</b>	4831,642667		kWh
<b>Diferença (HPS-LEP)</b>	3106,056		kWh
<b>CO2-Poupado/ano-(g)</b>		755305,8496	g de CO2
<b>CO2-Poupado ano-(Kg)</b>		755,3058496	kg de CO2
<b>CO2-Poupado 20 anos - (Kg)</b>		15106,11699	kg de CO2
<b>CO2</b>	<b>Dióxido de carbono</b>		