



## **Estudo de perdas na rede de baixa tensão e possibilidade da sua redução**

**ANDRÉ DOS SANTOS MOREIRA GOMES EUSÉBIO**

novembro de 2017

# ESTUDO DE PERDAS NA REDE DE BAIXA TENSÃO E POSSIBILIDADE DA SUA REDUÇÃO

André dos Santos Moreira Gomes Eusébio



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2017**



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -  
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: André dos Santos Moreira Gomes Eusébio, Nº 1151519, 1151519@isep.ipp.pt

Orientação científica: Custódio Pais Dias, cpd@isep.ipp.pt

Empresa: EDP Distribuição

Supervisão: Eng. Paulo Nuno Louzinha Alves, paulonuno.louzinhaalves@edp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2017**



"It's fine to celebrate success but it is more important to heed the lessons of failure."

Bill Gates



## *Agradecimentos*

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais, pela dedicação, confiança, incentivo e por me proporcionarem as condições necessárias no meu percurso académico. Um especial obrigado à minha irmã, irmão, e restante família pelo apoio incondicional e pelo incentivo ao longo do percurso académico.

Quero também agradecer ao meu orientador, Doutor Custódio Pais Dias, professor no Instituto Superior de Engenharia do Porto, por todo o apoio, acompanhamento e disponibilidade demonstrada durante a elaboração desta dissertação.

Quero agradecer à empresa que me acolheu neste estágio curricular, EDP Distribuição, pela oportunidade que me proporcionou durante cinco meses. Um agradecimento especial ao Engenheiro Paulo Louzinha, Engenheiro Miguel Figueiredo, Engenheiro Nelson Araújo, ao sr. Jorge Oliveira, sr. Pedro Chivarria e ao sr. Xavier Costa por todo o apoio prestado. De uma forma geral a todos os trabalhadores da Área Operacional Braga - Viana do Castelo que, de uma forma ou de outra, sempre me concederam as melhores condições e oportunidades neste estágio curricular.

Um agradecimento a todos os meus amigos e colegas que me acompanharam. A eles agradeço todo o apoio, disponibilidade e amizade demonstrada.

Resta-me agradecer ao Instituto Superior de Engenharia do Porto e a todos os docentes que de forma direta ou indireta tive o prazer de contactar. A realização deste percurso não seria possível sem o apoio de todos.

Um muito obrigado!



## *Resumo*

As perdas de energia são uma realidade nos sistemas elétricos de energia e estão presentes nos diversos níveis de tensão e nos processos a ele associados. Ora, como as perdas são uma ineficiência no processo associado à produção, transporte e distribuição, é do interesse do operador dos sistemas elétricos de energia otimizar e melhorar os processos nas trocas de energia.

Esta dissertação tem como objetivo estudar as perdas de energia na rede elétrica de baixa tensão (BT). Por isso, e para melhor compreender as perdas de energia na rede elétrica de baixa tensão, procede-se ao estudo do sistema elétrico de distribuição para o nível de baixa tensão, identificando os tipos de perdas e estudando as causas e fatores que as provocam. Posto isto, são propostas várias medidas para a minimização das perdas de energia elétrica.

As formas de cálculo para as perdas de energia estão também contempladas nesta dissertação, tendo sido explicados os processos de cálculo do fator de perdas e a simulação em *software*. Para o cálculo de perdas também pode ser criado um perfil de perdas, cálculo de perdas por estimação, no período de um ano, que é proposto pelos operadores de rede e regulado pela ERSE.

Por último, são analisados dois casos estudos de redes elétricas de baixa tensão numa tentativa de resolução de problemas de tensão, onde estão evidenciadas perdas de energia elétrica para o sistema. Este estudo é elaborado em *software* utilizado pela EDP Distribuição para simulação e resolução de redes elétricas. Este tipo de estudos tem como objetivo a simulação de propostas de resolução e a análise técnica-económica.

### *Palavras-Chave*

Perdas de energia, sistemas elétricos de energia, Produção, Transporte, Distribuição, Baixa Tensão, fator de perdas, perfil de perdas, operadores de rede, ERSE, EDP Distribuição.



## *Abstract*

Energy losses in the electrical energy systems are real. They are present in different voltage levels and in the processes to them associated. Since these losses result from inefficiency in processes such as production, transportation and distribution, it is in the operator's best interest to improve and optimize the energy exchanging processes.

This dissertation aims to study energy losses in the low-voltage (LV) electrical network. To better understand the energy losses in this voltage, the LV distributing system, the diverse types of losses and their causes and factors were studied. Measures to minimize energy losses were also presented.

This dissertation contemplates energy losses calculating methods, as well. These calculations include: the loss factor, the simulating method and the loss profile, the last proposed by the electrical network operator and regulated by ERSE.

Lastly, two cases, in which there are evidences of energy losses in the LV system, were analysed with the attempt to solve them. These studies were developed with software used by *EDP Distribuição* that aims to simulate different solutions and analyse the project technical and economically.

### ***Keywords***

*Energy losses, electrical network systems, Production, Transportation, Distribution, Low-voltage, loss factor, loss profile, network operators, ERSE, EDP Distribuição.*



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>III</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1.ENQUADRAMENTO .....	1
1.2.OBJETIVOS .....	3
1.3.ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	4
<b>2. REDE DE DISTRIBUIÇÃO – BAIXA TENSÃO</b> .....	<b>5</b>
2.1.ABORDAGEM AO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL.....	6
2.2.COMPONENTES DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO .....	7
2.3.ESTRUTURA/TIPOLOGIA DA REDE ELÉTRICA .....	17
<b>3. PERDAS DE ENERGIA ELÉTRICA</b> .....	<b>23</b>
3.1.ABORDAGEM ÀS PERDAS NA REDE ELÉTRICA .....	23
3.2.PERDAS TÉCNICAS .....	26
3.3.PRINCIPAIS CAUSAS DE PERDAS TÉCNICAS .....	32
3.4.PERDAS NÃO TÉCNICAS .....	36
3.5.RELAÇÃO DAS QUEDAS DE TENSÃO COM AS PERDAS TÉCNICAS.....	37
3.6.MITIGAÇÃO DAS PERDAS ELÉTRICAS .....	38
<b>4. METODOLOGIAS PARA CÁLCULO DE PERDAS</b> .....	<b>43</b>
4.1.CÁLCULO DO FATOR PERDAS .....	44
4.2.CÁLCULO POR SIMULAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS .....	46
4.3.CÁLCULO DO PERFIL DE PERDAS .....	47
<b>5. CASOS DE ESTUDO – COM RECURSO A PROGRAMAS DA EDP</b> .....	<b>51</b>
5.1.ATIVIDADES COMPLEMENTARES DESENVOLVIDAS.....	51
5.2.CASOS DE ESTUDO .....	54
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>73</b>

6.1.PRINCIPAIS CONCLUSÕES.....	73
6.2.PERSPETIVAS FUTURAS.....	75
<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>83</b>

## *Índice de Figuras*

Figura 1	- Perdas de energia elétrica no transporte e distribuição	2
Figura 2	- Fluxo energético desde a produção até ao consumidor	6
Figura 3	- Sistema Elétrico Nacional	7
Figura 4	- Interligação da rede MT com a rede BT	8
Figura 5	- Secções dos condutores aéreos LXS	10
Figura 6	- Secções condutores subterrâneos LSVAV	12
Figura 7	- Instalação de um produtor/consumidor	16
Figura 8	- Rede MT tipicamente radial	18
Figura 9	- Rede MT tipicamente malhada/anel	19
Figura 10	- a) Tipologia radial b) Tipologia malhada c) Tipologia mista	19
Figura 11	- Perdas na RNT em 2015	24
Figura 12	- Perdas na rede de distribuição	25
Figura 13	- Perdas na rede de distribuição desde 1997, Fonte ERSE	25
Figura 14	- Energia necessária ao funcionamento de um motor	29
Figura 15	- Triângulo de potências	30
Figura 16	- Compensação de energia reativa com recurso a bateria de condensadores	31
Figura 17	- Variação da resistência de um condutor em função da temperatura absoluta	33
Figura 18	- Típico diagrama de carga	44

Figura 19	- 17 fevereiro de 2016, dia típico de inverno (dia de maior ponta)	48
Figura 20	- 20 de abril de 2016, dia típico de primavera	48
Figura 21	- 6 de setembro 2016, dia característico de verão.	49
Figura 22	- 19 de outubro de 2016, dia típico de outono.	49
Figura 23	- Perfil de perdas do ano de 2016	50
Figura 24	- Localização do PLR e do posto de transformação	55
Figura 25	- Situação inicial do estudo em <i>Dplan</i>	57
Figura 26	- Proposta resolução zona 2 e 3	59
Figura 27	- Proposta resolução zona 1	60
Figura 28	- Localização da 1º e 2º reclamação e dos postos de transformação	63
Figura 29	- Resultados do analisador de tensões – Análise <i>eletrosoft</i>	64
Figura 30	- Situação inicial do estudo em <i>Dplan</i>	66
Figura 31	- Situação inicial das saídas do PT PTL 029 e do PT PTL 201	68
Figura 32	- Proposta resolução da rede em estudo no <i>Dplan</i>	69
Figura 33	- Proposta resolução da rede elétrica do PT PTL 201 no <i>Dplan</i>	70

## *Índice de Tabelas*

Tabela 1	- Potências contratadas e correntes admissíveis	15
Tabela 2	- Perdas (%) em função do fator de carga (Pcu)	28
Tabela 3	- Variação da Queda de Tensão	38
Tabela 4	- Resultados do estudo <i>Dplan</i>	58
Tabela 5	- Resultados da proposta em estudo <i>Dplan</i>	60
Tabela 6	- Resultados do estudo <i>Dplan</i>	67
Tabela 7	- Resultados da proposta em estudo <i>Dplan</i>	71



## *Acrónimos*

AT	–	Alta Tensão
B/C	–	Benefício - Custo
BRA	–	Bloco de Rede em Anel
BT	–	Baixa Tensão
BTE	–	Baixa Tensão Especial
BTN	–	Baixa Tensão Normal
<i>Dplan</i>	–	<i>Distribution-Planning</i>
DST	–	Descarregadores de Sobretensão
EB	–	<i>Energie Box</i>
EDP	–	Energia De Portugal
ERSE	–	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
GSM	–	<i>Global System for Mobile Communications</i>
IAT	–	Interruptor Aéreo Telecomandado
IP	–	Iluminação Pública
LED	–	<i>Light Emitting Diode</i>
MAT	–	Muito Alta Tensão
MT	–	Média Tensão

OCR	– Órgão de Corte e Religação
PLR	– Pedido de Ligação à Rede
PNAC	– Programa Nacional para as Alterações Climáticas
PT	– Posto de Transformação
PTC	– Posto de Transformação de Clientes
PTD	– Posto de Transformação de Distribuição
QGBT	– Quadro Geral de Baixa Tensão
RARI	– Regulamento de Acesso às Redes e às Interligações
REN	– Redes Energéticas Nacionais
RNT	– Rede Nacional de Transporte
RSRDEEBT	– Regulamento de Segurança de Redes de Distribuição de Energia Elétrica em Baixa Tensão
SEE	– Sistema Elétrico de Energia
SEN	– Sistema Elétrico Nacional
SIT	– Sistema de Informação Técnico
SIT-DM	– Sistema de Informação Técnico - <i>Design Manager</i>
TIR	– Valor Atual Líquido
UPAC	– Unidades de Produção para Autoconsumo
UPP	– Unidades de Pequena Produção
VAL	– Valor Atual Líquido





# 1. INTRODUÇÃO

Este documento foi desenvolvido no âmbito da dissertação final de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétrico de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Eletrotécnica.

A dissertação foi desenvolvida em ambiente empresarial, mais concretamente na EDP Distribuição - Área Operacional Braga – Viana do Castelo, como forma de integração na área dos sistemas elétricos de energia, no que diz respeito à manutenção e operação dos mesmos.

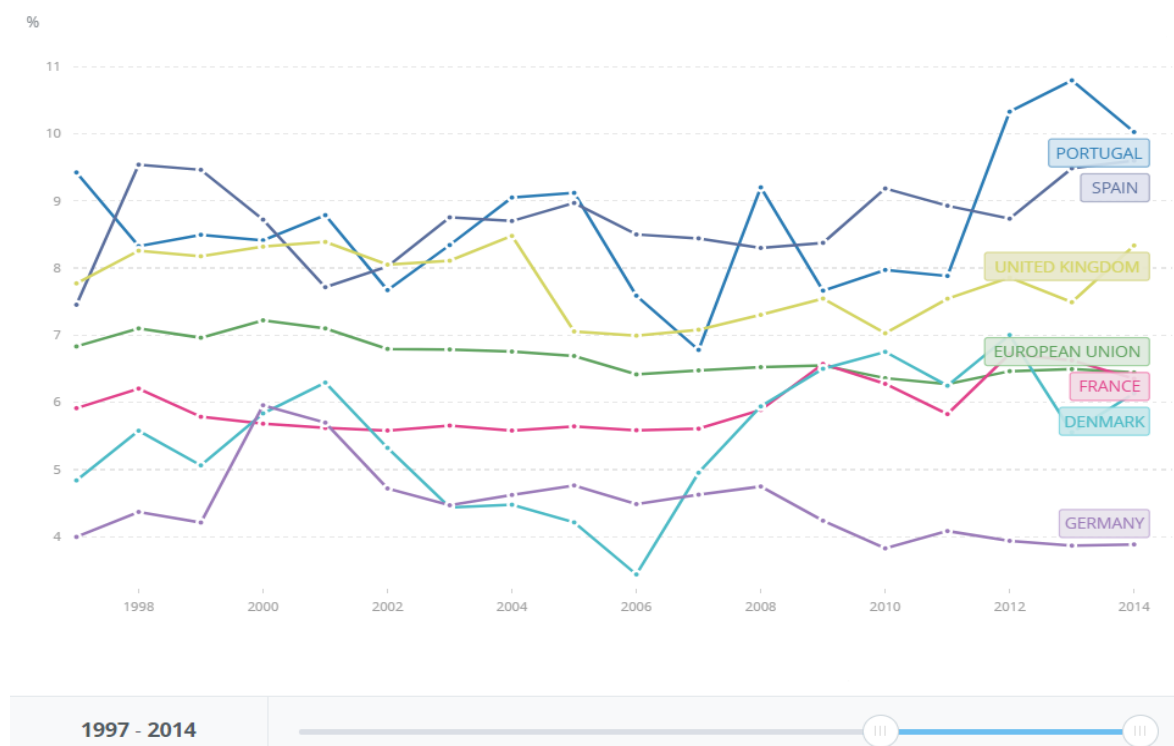
Esta dissertação aborda a temática das perdas na rede elétrica de baixa tensão (BT) e a possibilidade da sua redução, sendo discutidas as perdas técnicas, não descartando as perdas não técnicas, com o intuito de as analisar e estudar, como forma de melhorar a eficiência dos sistemas elétricos de energia.

## 1.1. ENQUADRAMENTO

A energia elétrica apresenta-se como um bem indispensável no quotidiano do Homem. Esta passa por diversos processos desde a sua produção, transporte e distribuição, transitando para diferentes níveis de tensão, distintos em todo o sistema elétrico de energia (SEE). Assim, a procura de energia elétrica incitou a evolução do sistema elétrico de energia e, por isso, surgiram diversas formas de transporte e distribuição da mesma para responder à procura, o que aumentou o desperdício de energia elétrica associada à rede elétrica.

Foi a crescente preocupação com a sustentabilidade do planeta Terra que levou à procura da diminuição do desperdício energético. Em 1997, com o protocolo de *Quioto* negociado entre os vários países do mundo, tendo por objetivo reduzir as emissões de gases que provocam o efeito de estufa, surgiu a necessidade de aproveitar melhor os recursos e reduzir os excessos, encontrando um equilíbrio entre o bom desempenho e a eficiência energética dos sistemas elétricos que compõem as redes elétricas. Foram, então, definidos um conjunto de medidas e políticas das quais resultaram o Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC), que visa o setor energético. Desta forma, e de modo a melhorar o desempenho e a eficiência das redes elétricas, surgiu a necessidade de diminuir a suscetibilidade a falhas dos diversos componentes, reduzindo, assim, as perdas a que a rede está sujeita [1][2].

O estudo das perdas elétricas, tal como a sua mitigação permite ao operador de rede um conhecimento da rede em que opera. Em Portugal, as perdas de energia elétrica representam uma grande parte do desperdício de energia nos SEE. A figura 1 apresenta a comparação entre as percentagens de perdas de energia elétrica na transmissão e distribuição de alguns países da União Europeia (UE).



**Figura 1 - Perdas de energia elétrica no transporte e distribuição**

Atualmente, Portugal apresenta, aproximadamente, 10% de energia sob a forma de perdas de energia elétrica, isto é, energia que não é aproveitada em todo o sistema elétrico de energia. Em comparação com outros países da UE, Portugal apresenta uma margem para evolução, no que se refere ao potencial de redução de perdas elétricas [3].

De todos os níveis de tensão elétrica, a rede elétrica de distribuição em baixa tensão (BT) é a mais suscetível a perdas de energia elétrica, pois esta é a rede elétrica com maior extensão e maior distribuição de cargas, o que faz antever a possibilidade de as perdas de energias se concentrarem, maioritariamente, neste nível de tensão. O estudo das perdas de energia na rede elétrica de baixa tensão é, por isso, muito importante, sendo o principal foco desta dissertação [4].

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo principal desta dissertação é a compreensão da estrutura de perdas de energia elétricas na rede de baixa tensão (BT). Dada a complexidade inerente a este objetivo, surgiu a necessidade de o subdividir em múltiplas tarefas de realização mais simples, tais como:

- Compreender a estrutura e funcionamento da rede de distribuição AT/MT e BT (rede elétrica de distribuição).
- Aprofundar o conhecimento da tecnologia e equipamentos aplicados das redes de baixa tensão (BT) e posto de transformação de distribuição (PTD).
- Identificar principais origens das perdas.
- Propor medidas para reduzir perdas na rede.
- Calcular a energia de perdas associadas à distribuição nas redes de BT, analisando casos concretos.
- Aplicar ferramentas de cálculo usadas pela EDP, com o objetivo de identificar e propor a redução das perdas.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação é constituída por 6 capítulos, apresentando-se com a seguinte estrutura.

O Capítulo 1 é a introdução, onde é feito um enquadramento da importância do estudo e mitigação das perdas de energia elétrica.

No Capítulo seguinte, 2, é caracterizada a rede elétrica de distribuição, nomeadamente no nível da baixa tensão (BT), estando descritos tanto os componentes que a constituem, como a sua estrutura/tipologia.

No Capítulo 3, são abordadas as perdas de energia elétrica: tipos, causas e a sua mitigação.

No Capítulo 4, são abordadas as metodologias de cálculo das perdas de energia elétrica, onde são explicadas as formas de cálculo de perdas de energia.

O Capítulo 5 é o capítulo de demonstração de estudos realizados durante o estágio curricular na EDP Distribuição, tendo como objetivo a discussão de casos reais, onde se verificaram problemas nas redes elétricas. Na análise dos casos de estudo são, também, apresentadas propostas de solução para a rede elétrica como forma de reduzir as perdas nas mesmas.

Por fim, no Capítulo 6, são reunidas as principais conclusões e perspetivadas futuras soluções para o desenvolvimento e estudo das perdas de energia elétrica.

## 2. REDE DE DISTRIBUIÇÃO — BAIXA TENSÃO

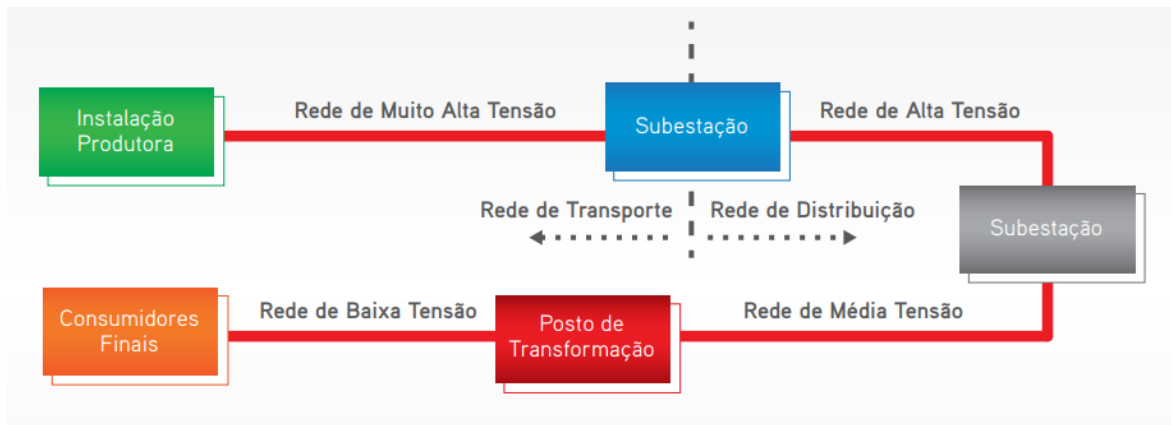
As redes de distribuição são um sistema complexo, que efetuam a distribuição de energia elétrica aos centros de carga. Estas podem ser de diferentes níveis de tensão: alta tensão (AT), média tensão (MT) e baixa tensão (BT). Os níveis de tensão são: 60 kV em AT; 30 kV, 15 kV e 10 kV em MT e 400/230 V em BT, sendo a última tensão composta e simples, respetivamente.

A rede elétrica de distribuição conta, ainda, com uma vasta rede de postos de transformação (PT) de forma a servir todas as cargas do sistema elétrico. Assim, é possível decompor a energia elétrica até ao nível mais baixo da tensão elétrica entregue na rede (400/230V) para o consumidor final [5][6][7].

Neste capítulo, será feita uma abordagem à rede elétrica de distribuição em baixa tensão, bem como aos seus componentes, estruturação e tipologia.

## 2.1. ABORDAGEM AO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL

Atualmente, o Sistema Elétrico Nacional (SEN) tem por base diferentes tipos de energia primária, desde a energia não renovável à energia renovável. Este tem vindo a crescer tendo em conta a liberalização da produção de energia, sendo caracterizado como vasto e complexo. O sistema elétrico é dividido em três setores: Produção, Transporte e Distribuição, figura 2.

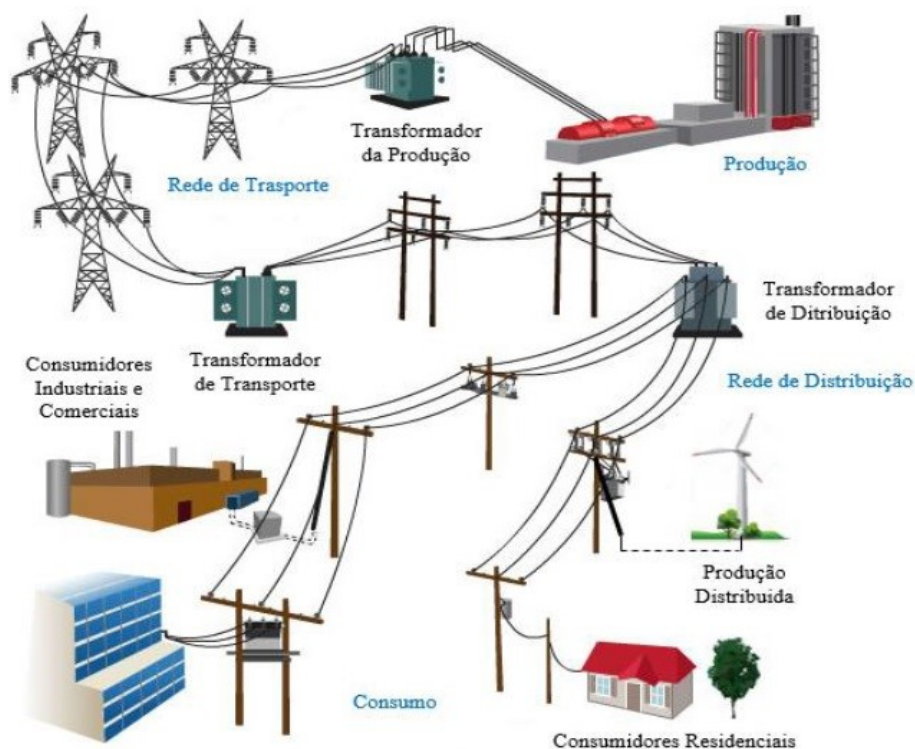


**Figura 2 - Fluxo energético desde a produção até ao consumidor**

Na produção existem vários processos para gerar energia elétrica, tais como: o aproveitamento solar, eólico e hídrico e, ainda, a partir da combustão de biomassa e biogás, o aproveitamento térmico. Em Portugal, ao nível da energia renovável predomina o aproveitamento hídrico e eólico. Já no aproveitamento elétrico não renovável destacam-se as centrais térmicas [8].

No que se refere ao transporte de eletricidade em Portugal, este é assegurado pela Rede Nacional de Transporte (RNT), que é concessionada pela Redes Energéticas Nacionais (REN), sendo o transporte efetuado em muita alta tensão (MAT). A REN opera numa vasta rede de linhas que asseguram o transporte de energia até às subestações, figura 3 [9].

As subestações, que podem ser exploradas pela REN ou pela EDP Distribuição, são responsáveis pela transformação da energia elétrica. Estas estão localizadas em pontos chave da rede e servem para o controlo e transformação da energia elétrica proveniente da rede de transporte. Assim, há a distribuição de energia elétrica aos centros de consumo e aos grandes consumidores industriais [5][10].



**Figura 3 - Sistema Elétrico Nacional**

A energia é então transformada num nível de tensão AT ou MT entre 60 kV, 30 kV, 15 kV e 10 kV, e segue para a rede de distribuição até aos centros de consumo, como postos de transformação (PT). Estes encontram-se localizados em zonas estratégicas para servir da melhor forma e com qualidade de energia os clientes finais [11][12].

## **2.2. COMPONENTES DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

As redes elétricas de baixa tensão são constituídas por diversos componentes que estão interligados entre si e que permitem a distribuição de energia desde os postos de transformação ao consumidor final.

### **2.2.1. POSTO DE TRANSFORMAÇÃO**

Um posto de transformação (PT) é uma instalação elétrica de média tensão (MT) e tem como função a transformação de energia elétrica, sendo o elo de ligação da rede MT à rede BT (figura 4). A energia proveniente da rede de distribuição de média tensão (MT) é transformada, por meio de um transformador de potência, num outro nível de tensão mais baixo, definido na rede de baixa tensão (BT).



**Figura 4 - Interligação da rede MT com a rede BT**

Os postos de transformação são de duas categorias: posto de transformação da distribuição (PTD) ou posto de transformação de cliente (PTC), no caso de uma instalação privada.

Estes são constituídos por vários equipamentos, como: dispositivos de corte e seccionamento, dispositivos de proteção (como por exemplo os descarregadores de sobretensão), um ou mais transformadores, um quadro geral com os diversos componentes de proteção, equipamentos de contagem, controlo de IP, proteções contra contactos quer diretos quer indiretos, entre outros.

Os postos de transformação apresentam vários tipos de construção desde cabine alta ou baixa, subterrâneo, aéreo ou até pré-fabricado. A nível de equipamento de corte MT, podem ser do tipo clássico (isolado a ar), que contém: seccionador, interruptor-seccionador-fusível ou, ainda, isolados a SF<sub>6</sub> com celas do tipo modular ou bloco de rede em anel (BRA). São instalados com diversas potências, de forma a servir os vários tipos de cargas. Os postos de transformação encontram-se distribuídos estrategicamente para servir da melhor forma toda a rede elétrica [13].

Nos diversos tipos de construção é necessário avaliar o meio em que se enquadra a instalação do posto de transformação. Num meio rural ou suburbano, para novas construções, são utilizadas as construções de PT aéreos com potências até 250 kVA. Contudo, para potências mais altas optam-se por PT de cabine baixa ou pré-fabricados. Os PT aéreos podem ser de diversos tipos: A – Aéreo com ligação direta, sem seccionamento; AS - Aéreo com seccionador, com uma potência máxima até 100 kVA ou AI – Aéreos com seccionador-interruptor, com uma potência máxima de 250 kVA. Estes tipos de postos de transformação possuem um transformador com a potência adequada à carga, um quadro geral com vários

circuitos, para a rede de baixa tensão, protegidos por fusíveis. Atualmente, as soluções normalizadas adotadas pela EDP apresentam dois tipos de quadro geral de baixa tensão (QGBT): R100 até potências de 100 kVA inclusive, que possuem uma saída do quadro geral e R250 até potências de 250 kVA, que possui três saídas do quadro geral para a rede elétrica. Dependendo da escolha do posto de transformação, este pode ou não possuir seccionador/seccionador-interruptor. Se o possuir, este é constituído por uma plataforma de manobras para a operação em segurança. É importante referir que a instalação elétrica do PT deve possuir um sistema de proteção das instalações com recurso a esquemas de ligação à terra. Para além disso, cada transformador tem um comutador de tomadas, que pode possuir três a cinco posições. Este permite alterar a razão de transformação, mudando a tensão no secundário. A sua manobra tem de ser efetuada em vazio [14][15].

Num meio urbano são utilizados postos de transformação de cabine baixa, subterrâneos ou pré-fabricados. Estes podem ser alimentados por rede aérea ou por rede subterrânea, sendo a sua constituição semelhante aos postos de transformação aéreos. Quanto à potência instalada, esta apresenta vários níveis que podem ter mais do que um transformador instalado ou quadro elétrico. Este tipo de posto de transformação pode, ainda, possuir um BRA (compacto) ou células modulares (configuradas conforme os requisitos da rede), sendo equipados com fusíveis que permitem a proteção do transformador. É assim, possível o seccionamento/interrupção dos troços MT. Os órgãos de corte podem ser telecomandados, do tipo clássico (isolados ao ar) ou SF<sub>6</sub>, ou manobrados localmente. Estes dispositivos estão protegidos por fusíveis.

A evolução constante da rede elétrica implica a satisfação de novas necessidades. Por isso, procede-se à construção de postos de transformação que exigem um estudo profundo da rede elétrica da área em questão, tanto da rede elétrica de baixa tensão (BT), como da rede elétrica de média tensão (MT). Só assim, é possível assegurar o melhor local para a instalação do PT com o objetivo de melhorar a qualidade de energia [13][16].

### **2.2.2. CONDUTORES ELÉTRICOS**

Os condutores elétricos usados nas redes elétricas de baixa tensão (BT) variam no tipo de material condutor utilizado (cobre (Cu) ou alumínio (Al)). Há, no entanto, formas diferentes

de os aplicar na rede, quer pelo tipo de instalação, quer pelo propósito escolhido pelo operador de rede.

### 2.2.2.1. CONDUTORES ELÉTRICOS EM REDES AÉREAS

O mais comum em toda a rede de baixa tensão é o condutor torçado LXS (figura 5), condutor em alumínio, isolado a polietileno reticulado (PEX). Este tipo de condutor tem elevada resistência à degradação imposta pelas condições climatéricas. Contudo, em caso de condições extremas, como temporais, o condutor eléctrico pode danificar-se e, por isso, causar mais interrupções. Este está, também, sujeito aos raios ultravioletas, que provocam um maior desgaste dos condutores eléctricos.

S (mm <sup>2</sup> )	R <sub>20°C</sub> Ω/km	R <sub>50°C</sub> Ω/km	X Ω/km	Z Ω/km	P.L kW.km	I <sub>Z</sub> A	I <sub>n</sub> =I <sub>s</sub> A	L máx (m)							
								1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
LXS 2 x 16 *	1,910	2,150	0,100	2,190	0,242	85	63	17	33	50	67	83	100	117	133
LXS 4 x 16 *	1,910	2,150	0,100	2,190	0,731	75	63	17	34	50	67	84	101	118	134
LXS 4 x 25 *	1,200	1,340	0,100	1,380	1,159	100	80	21	42	63	84	105	126	147	168
LXS 4 x 50 *	0,641	0,716	0,100	0,756	2,116	150	125	25	49	74	98	123	147	172	196
LXS 4 x 70 *	0,443	0,495	0,100	0,535	2,991	190	160	27	54	81	108	135	163	190	217
LXS 4 x 95 *	0,320	0,357	0,100	0,397	4,030	230	200	29	58	88	117	146	175	204	234

- S - Secções e tipo dos condutores normalizados, constantes do Guia Técnico das Redes em condutores de torçada em BT, editado pela DGE e do Quadro 3.13 do RSRDEEBT (\* - secções em uso na EDP Distribuição).
- R<sub>20°C</sub>/R<sub>50°C</sub> - Resistência dos condutores a 20 °C e a 50 °C (50 °C - temperatura máxima da torçada em rede aérea tensa em apolos).
- X - Admitância dos condutores.
- Z - Impedância dos condutores.
- P.L - Momento eléctrico (L<sup>2</sup>/Z).
- I<sub>Z</sub> - Corrente máxima admissível nos condutores, nas condições de instalação;
- I<sub>n</sub> - Corrente estipulada do fusível para proteger os condutores contra sobreintensidades ( $I_f \leq 1,45 I_Z$  e  $I_f = 1,6 I_n$ ), que deverá ser superior ou igual a I<sub>s</sub>.
- I<sub>s</sub> - Corrente de serviço (corrente de funcionamento dos condutores).
- L<sub>max</sub> - Comprimento máximo dos condutores para uma queda de tensão de 1 % a 8% e para uma corrente igual a I<sub>s</sub> (I<sub>n</sub> fus) para o P.L calculado.

**Figura 5 – Secções dos condutores aéreos LXS**

Os condutores torçados podem estar em apoio de amarração ou em apoio de suspensão, assumindo diferentes formas de instalar os condutores eléctricos consoante a configuração da rede de distribuição de baixa tensão.

As caixas de distribuição, localizadas em pontos chave da rede, servem como proteção e seccionamento da rede. Estas são instaladas em diversas situações, nomeadamente em caso de redução de secção nos ramais da rede elétrica.

Nas ligações dos clientes são utilizados ligadores, resultando em ligações trifásicas ou monofásicas. Todos os condutores elétricos torçados LXS são constituídos por quatro condutores: três condutores que correspondem às várias fases L1, L2 e L3 e um condutor neutro (N). Estes podem ser de diversas secções. Caso a rede elétrica possua iluminação pública (IP), os condutores elétricos torçados LXS são acompanhados, ainda, por um outro condutor, este dedicado à iluminação pública (IP) com uma secção de  $16 \text{ mm}^2$ .

Para além dos condutores torçados, existem condutores nus, de cobre ou alumínio, compostos por cinco condutores: três deles correspondem às fases L1, L2 e L3, um para a iluminação pública (IP) e um condutor neutro (N). Este tipo de condutores tem desvantagens ao nível do tempo de reparação, quando comparados com os condutores torçados, e são mais suscetíveis a furtos pelo elevado valor do cobre. Assim, este tipo de condutores já não são utilizados pelo operador de rede e têm sido substituídos pelos condutores torçados LXS [13] [16].

#### **2.2.2.2. CONDUTORES ELÉTRICOS EM REDES SUBTERRÂNEAS**

Os condutores elétricos são também instalados no subsolo, com regras de instalação distintas dos condutores aéreos. São de vários tipos, sendo o mais comum o LSVAV, figura 6. Estes são normalmente em alumínio, isolados em polietileno reticulado (PEX) ou polietileno de vinilo (PVC). Estes tipos de condutores elétricos, no caso de secções acima de  $95 \text{ mm}^2$ , são dotados de bainha exterior.

Os condutores elétricos subterrâneos são, em diversas situações, instalados dentro de um tubo *eurolec*, de cor vermelha para uma fácil localização.

S (mm <sup>2</sup> )	R <sub>20°C</sub>	R <sub>70°C</sub>	X	Z	P.L	l <sub>z</sub>	l <sub>n</sub> =l <sub>s</sub>	L máx (m)							
	Ω/km	Ω/km	Ω/km	Ω/km	kW.km	A	A	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
LSVAV 2 x 16 *	1,910	2,292	0,100	2,332	0,227	71	63	16	31	47	63	78	94	110	125
LSVAV 4 x 16 *	1,910	2,292	0,100	2,332	0,686	68	50	20	40	60	80	99	119	139	159
LSVAV 4 x 25	1,200	1,440	0,100	1,480	1,081	83	63	25	50	75	99	124	149	174	199
LSVAV 4 x 35 *	0,868	1,042	0,100	1,082	1,479	98	80	27	54	80	107	134	161	188	214
LSVAV 4 x 50	0,641	0,769	0,100	0,809	1,977	113	100	29	57	86	115	143	172	201	229
LSVAV 4 x 70	0,443	0,532	0,100	0,572	2,799	146	125	32	65	97	130	162	195	227	260
LSVAV 4 x 95 *	0,320	0,384	0,100	0,424	3,774	176	160	34	68	103	137	171	205	239	273
LSVAV 3 x 120 + 70	0,253	0,304	0,100	0,344	4,657	203	160	42	84	127	169	211	253	295	337
LSVAV 3 x 150 + 70	0,206	0,247	0,100	0,287	5,571	233	200	40	81	121	161	202	242	283	323
LSVAV 3 x 185 + 95 *	0,164	0,197	0,100	0,237	6,757	266	250	39	78	118	157	196	235	274	313

- S - Secções e tipo dos cabos normalizados (\* - secções em uso na EDP Distribuição).
- R<sub>20°C</sub>/R<sub>70°C</sub> - Resistência do cabo a 20 °C e a 70 °C (70 °C - temperatura máxima no isolamento - PVC).
- X - Admitância do cabo.
- Z - Impedância do cabo.
- P.L - Momento eléctrico (U<sup>2</sup>/Z).
- l<sub>z</sub> - Corrente máxima admissível no cabo, nas condições de instalação.
- l<sub>n</sub> - Corrente estipulada do fusível para proteger os cabos contra sobreintensidades ( $l_n \leq 1,45 l_k$  e  $l_n = 1,6 l_k$ ), que deverá ser superior ou igual a l<sub>k</sub>.
- l<sub>s</sub> - Corrente de serviço (corrente de funcionamento do cabo).
- L<sub>máx</sub> - Comprimento máximo do cabo para uma queda de tensão de 1 % a 8 % e para uma corrente igual a l<sub>k</sub> (l<sub>k</sub> fus) para o P.L calculado.

**Figura 6 - Secções condutores subterrâneos LSVAV**

A vantagem dos condutores eléctricos subterrâneos, quando comparados com os condutores aéreos, distinguem-se no isolamento e, por isso, contribuem para menos avarias e perturbações na rede eléctrica. Contudo, aquando de um defeito num condutor subterrâneo, é difícil a sua deteção como também é dispendiosa a sua reparação. Neste caso, a reparação é feita através de uma união com uma manga nos condutores eléctricos para um melhor isolamento dos mesmos [13][16].

### 2.2.3. APOIOS

Os apoios são o principal elo de ligação das estruturas de suporte dos condutores eléctricos, caixas de distribuição, baixadas, eléctrodos de terra e até o suporte das hastes das armaduras de iluminação pública. No caso das baixadas, estes podem ser suporte para as baixadas quer aéreas, quer subterrâneas.

A sua construção é feita à base de materiais como o betão, a madeira ou aço galvanizado. Estes são escolhidos consoante a sua configuração, a configuração do terreno e os esforços a que estejam sujeitos, desde que estes apoios estejam normalizados pela EDP Distribuição [18].

#### **2.2.4. CAIXAS/ARMÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO**

As caixas de distribuição, tal como os armários de distribuição, são pontos na rede elétrica de baixa tensão destinados a mudanças de secção do condutor, tanto na interligação de ramais das redes elétricas, como na proteção e seccionamento da mesma.

Estas são compostas por: uma entrada e várias saídas, barramentos em cobre, um barramento para o neutro ligado à terra, triblocos seccionáveis, sendo cada tribloco associado a uma saída e é protegido por fusíveis. Estes fusíveis podem ser de vários tamanhos NH00, NH1 ou NH2.

Todas as caixas ou armários devem estar devidamente instalados e marcados para uma boa segurança e percepção de quem os manobra [16][18].

#### **2.2.5. LIGAÇÕES À TERRA**

Como em todas as instalações elétricas, as ligações à terra devem fazer parte das instalações de redes elétricas de baixa tensão.

Nos postos de transformação devem existir circuitos de ligação à terra: circuito de terra de proteção e circuito de terra de serviço. No caso de PT aéreos do tipo A/AS, este deve, como em todos os PT, possuir uma terra de proteção, onde são ligadas as massas de forma a equipotencializar a instalação elétrica. É importante referir que como neste PT não existe terra de serviço, isto é, como não existe uma ligação entre o eletrodo de terra e o condutor neutro (N), deve existir uma ligação à terra suplementar (terra de serviço) no primeiro apoio da rede elétrica. Nos restantes postos de transformação a ligação à terra é feita no próprio PT, por intermédio de uma terra de serviço e uma terra de proteção.

As redes elétricas aéreas devem possuir uma ligação à terra (terra de serviço) no fim dos circuitos elétricos e, pelo menos, uma a cada trezentos metros e ainda nas várias ramificações da rede elétrica, feita nos apoios da rede. Para além disso, cada caixa de distribuição deve possuir uma ligação à terra, onde são ligados os neutros e as massas da mesma.

Nas redes elétricas subterrâneas deve existir uma ligação à terra no início da instalação (posto de transformação) e uma terra de serviço em cada armário de distribuição da rede elétrica, onde são ligadas todas as massas e o condutor neutro [17].

Os condutores de ligação aos elétrodos de terra usados nas redes de distribuição de baixa tensão são colocados e fixados nos apoios protegidos por um tubo de PVC por questões de segurança. Os elétrodos de terra são concretizados em chapas de aço galvanizado/cobreado ou com varetas de aço/cobre [18].

#### **2.2.6. RAMAIS**

O ramal é parte integrante da rede elétrica, que pode ter início no quadro geral (QGBT) do posto de transformação, na caixa de distribuição ou na canalização principal e termina na portinhola/quadro de colunas. O ramal é subterrâneo ou aéreo, consoante a rede elétrica em causa [18].

#### **2.2.7. CONTADORES DE ENERGIA**

Os contadores de energia são parte da instalação elétrica do cliente e devem ser instalados num local de fácil acesso aos operadores de rede. Junto do contador existe a portinhola, que garante a proteção do respetivo ramal contra sobreintensidades e estabelece o ponto de fronteira entre o consumidor e a ligação à rede de distribuição. Esta deve ser de fácil acesso para um controlo por parte do operador de rede. Em ramais monofásicos e trifásicos os sistemas de contagem são diretos e limitados a uma corrente máxima de 60 A e 3 x60 A, respetivamente.

Os contadores têm como função a contagem da eletricidade consumida na instalação. Assim, existem vários tipos de contadores com as mais diversas funções. Estes são aplicados em diferentes tipos de instalações nos vários níveis de tensão, permitindo, assim, contabilizar detalhadamente a energia, mas, também, enviar os dados por telecontagem. Atualmente, existem contadores com as mais diversas funções e tipos de contagens, como a “*Energie Box*” (EB) para clientes BTN. Equipamentos como este permitem uma contagem mais detalhada, com as várias parametrizações possíveis na discriminação das componentes elétricas. Como, por exemplo, a distinção entre a energia ativa e reativa, a distinção entre energia reativa indutiva e energia reativa capacitiva, entre outros. Este tipo de contador tem também a função de telecontagem, o que permite o envio de dados via modem GSM (*Global System for Mobile Communications*) para os operadores de rede [9][18].

### 2.2.8. LIGAÇÃO DO CLIENTE

A rede de distribuição de energia elétrica em baixa tensão (BT) fornece energia a dois tipos de consumidores, que se distinguem na potência contratada: consumidores de baixa tensão normal (BTN), limitado a potências de 41,4 kVA (tabela 1) e consumidores baixa tensão especial (BTE), acima de 41,4 kVA. Os consumidores em baixa tensão especial não têm limite de potência a contratar. No entanto, quando requisitam potências superiores a 200 kVA, o operador de rede aconselha o consumidor a mudar de escalão de tensão para MT, uma vez que poderá ser mais vantajoso para o mesmo.

A alimentação BT é feita em dois níveis de tensão nominal: 400V ligação trifásica e 230V ligação monofásica [9][19].

**Tabela 1 - Potências contratadas e correntes admissíveis**

Monofásico		Trifásico	
P (kVA)	In (A)	P (kVA)	In (A)
1,15	5	6,90	3 x 10
2,30	10	10,35	3 x 15
3,45	15	13,80	3 x 20
4,60	20	17,25	3 x 25
5,75	25	20,70	3 x 30
6,90	30	27,60	3 x 40
10,35	45	34,50	3 x 50
13,80	60	41,40	3 x 60

Aquando do pedido de novos clientes surge a necessidade de ligar os mesmos à rede elétrica. Esta é feita através de ligadores nos condutores elétricos, ou através de uma ligação ao armário/caixa de distribuição, consoante o nível de tensão nominal que irá alimentar o consumidor. Se o nível de tensão nominal for de 230V esta é uma ligação monofásica, necessitando para a sua ligação de um condutor de fase e do condutor neutro. Se o nível de tensão nominal for de 400V, ligação trifásica, este necessita de ligar três condutores de fase e o condutor neutro [18].

### 2.2.9. MINI PRODUÇÕES

As mini produções são hoje parte da rede elétrica de baixa tensão. Estas têm vindo crescer como elementos intervenientes na rede elétrica. Este investimento, feito pelos clientes, tem

como objetivo a produção de energia elétrica, quer para autoconsumo, quer para injeção da energia produzida na rede elétrica. Este tipo de investimento em energias renováveis é efetuado recorrendo a vários tipos de tecnologias de produção de energia renovável, como, por exemplo, energia eólica e energia fotovoltaica.

As instalações podem ser unidades de pequena produção (UPP) ou unidades de produção para autoconsumo (UPAC). A instalação desta tecnologia tem obrigações para os clientes. Os clientes são responsáveis pela instalação destas unidades de produção e devem garantir a sua proteção, para que esta não cause perturbações na rede elétrica de distribuição de baixa tensão. O sistema de proteção da instalação deve possuir um sistema de terra, que deve ser igual ao usado pelo operador de rede elétrica, na rede pública, assim como o regime do condutor neutro. Estas proteções servem para que, em caso de defeito na rede elétrica ou devido a defeito da própria instalação, a instalação do produtor seja automaticamente retirada da rede.

Toda a energia produzida é injetada na rede de distribuição de baixa tensão. Contudo, em caso de consumo da própria instalação, esta é absorvida pela mesma. As UPP e UPAC estão acompanhadas de contadores, quer para produção, quer para o consumo da instalação. Estes devem ser de fácil acesso ao operador de rede de distribuição e junto à portinhola para supervisão do operador de rede, como apresentado na figura 7 [18].

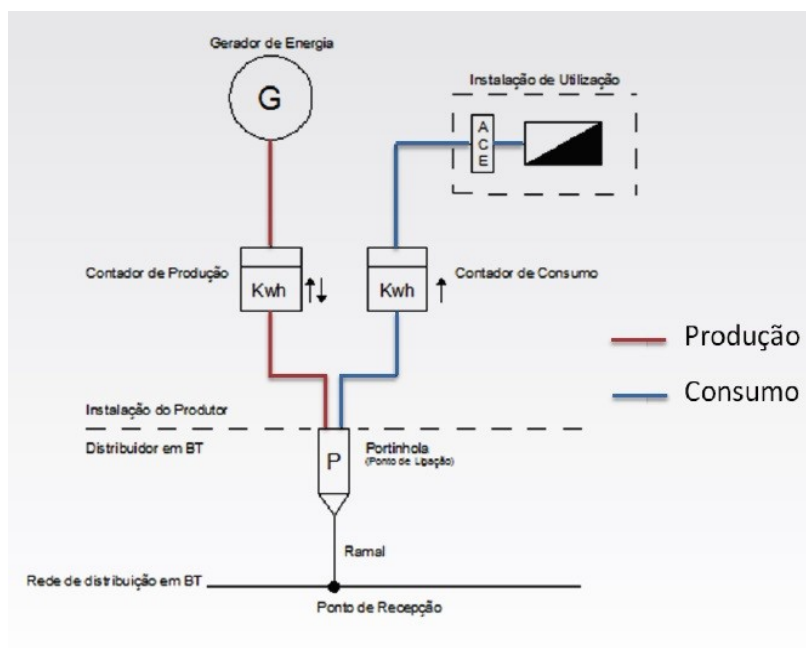


Figura 7 - Instalação de um produtor/consumidor

### **2.2.10. ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

A iluminação pública (IP) está presente em grande parte da rede de distribuição de baixa tensão e é destinada à iluminação da via pública, jardins públicos e outros espaços públicos.

A rede de iluminação pública é independente da restante rede elétrica e é alimentado por um condutor próprio, o condutor de IP, que se encontra à saída do quadro geral do posto de transformação. O circuito de IP é protegido por fusíveis e conta também com relógios, mecânicos ou astronômicos, com o objetivo de determinar as horas de funcionamento.

A iluminação pública da rede elétrica aérea usa um condutor de  $16 \text{ mm}^2$  e pode ser acompanhado por 1 ou 2 condutores de IP, IP1 ou IP2, estando instalados nos apoios acompanhados de um braço metálico e da respectiva luminária.

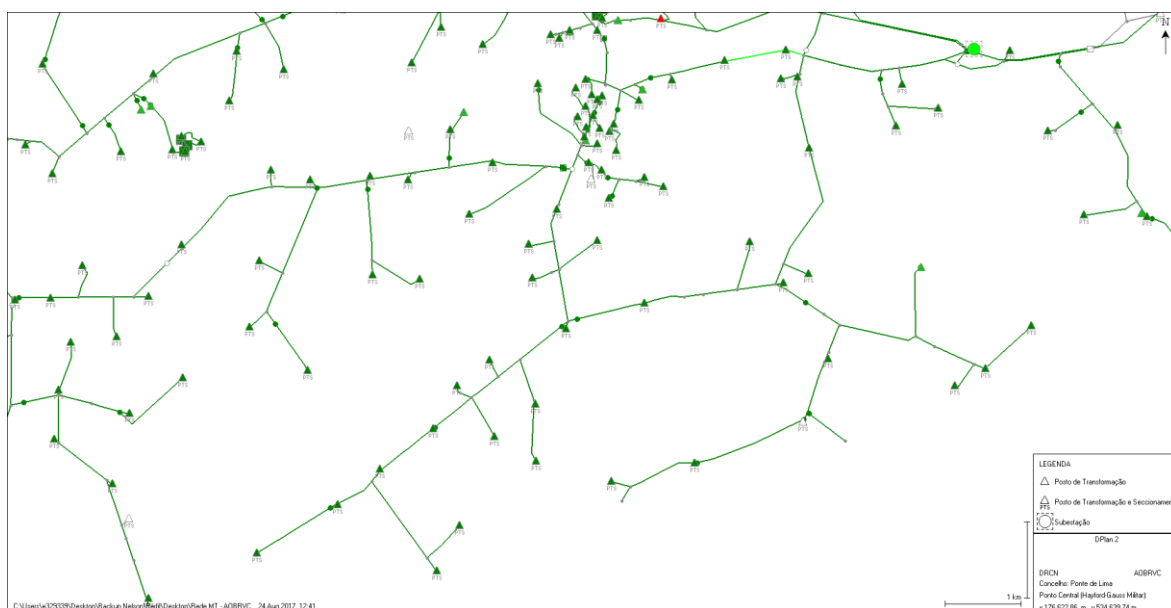
Na rede elétrica subterrânea, a iluminação pública (IP) é feita através de um condutor elétrico de  $16 \text{ mm}^2$  ou superior. As luminárias estão apoiadas ou embutidas nas colunas metálicas, constituídas por um *coffrete*, que permite a ligação dos condutores subterrâneos aos condutores da coluna de IP. Estas possuem fusíveis dimensionados para a proteção do circuito elétrico. As colunas metálicas são dotadas de uma terra de proteção, onde é ligado o neutro e todas as massas da coluna metálica para proteção das pessoas.

A iluminação pública usa maioritariamente armaduras tradicionais, equipadas com lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão com diferentes potências. No entanto, as armaduras tradicionais têm sido progressivamente substituídas por armaduras LED, sendo esta tecnologia mais eficiente [9][18].

### **2.3. ESTRUTURA/TIPOLOGIA DA REDE ELÉTRICA**

A rede elétrica de média tensão (MT) funciona em diferentes níveis de tensão, maioritariamente entre 10 kV, 15 kV e 30 kV, e está situada estrategicamente nos grandes centros de consumo para melhor serviço e qualidade de energia. A interligação da rede elétrica de MT com a BT permite a redução de tensão na razão de transformação 10/0,4 kV, 15/0,4 kV e 30/0,4 kV, por meio de transformadores. Este processo é controlado e protegido pelos postos de transformação.

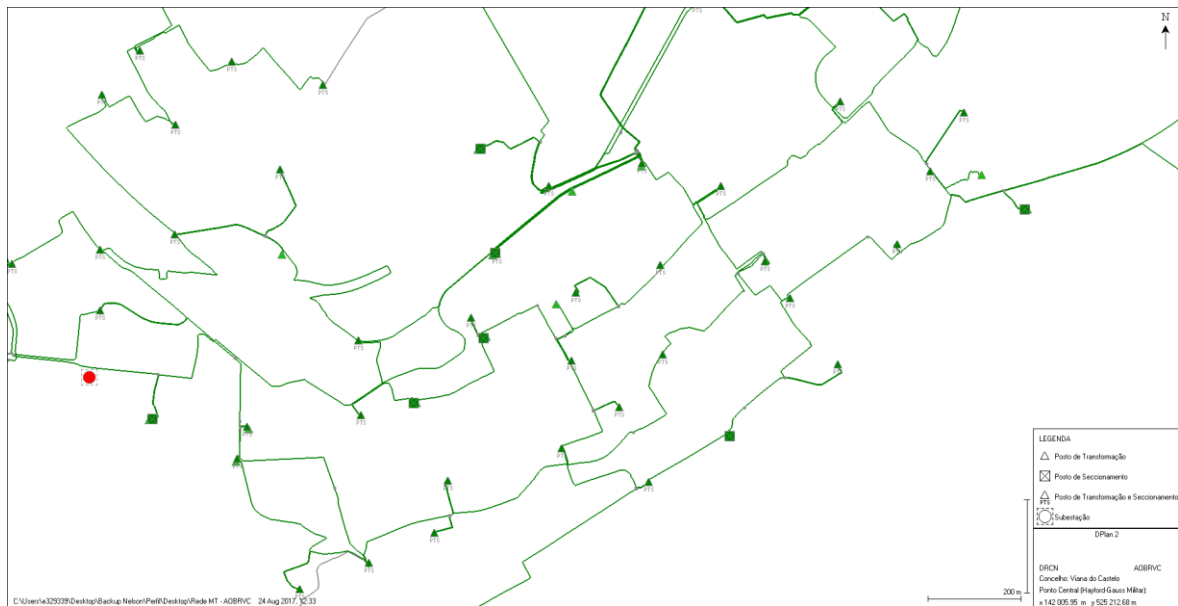
A rede elétrica MT tem dois tipos de exploração: radial e malhada. A rede elétrica do tipo radial (figura 8) tem origem num ponto comum e ramifica-se para zonas distintas, sem cruzamento das ramificações. Esta tipologia não representa um sistema fiável quanto à continuidade e qualidade de serviço, uma vez que, em caso de defeito, provoca uma falha de toda a linha MT da rede elétrica, o que pode afetar um ou mais postos de transformação. Ora, se não existe outra forma de realimentar o troço/ramal, este fica isolado. Este tipo de estrutura de rede elétrica é mais usado em zonas rurais, já que a densidade de consumidores e a carga elétrica é mais baixa. Assim, a escolha da rede elétrica radial representa um menor custo na instalação e exploração para os operadores [20].



**Figura 8 - Rede MT tipicamente radial**

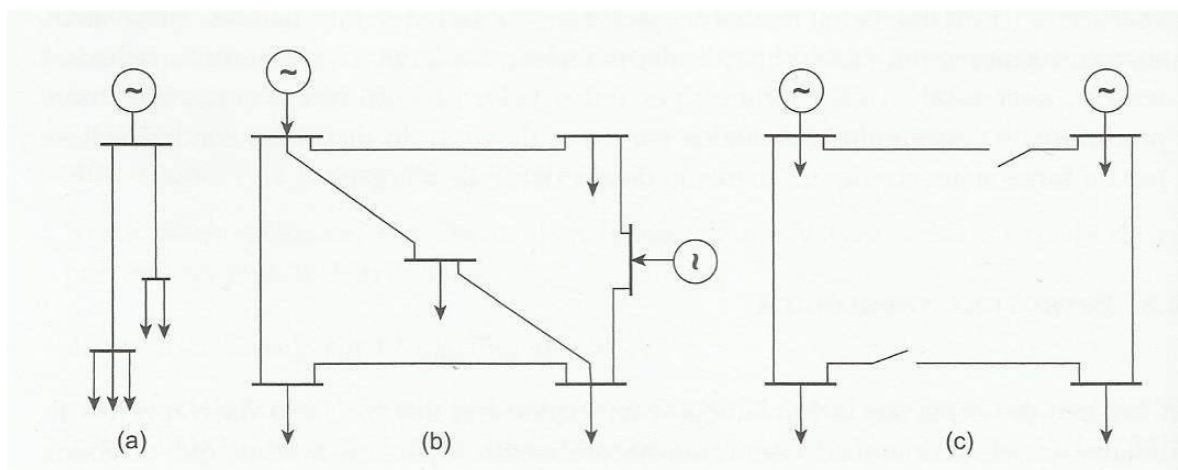
Uma exploração do tipo malhada, representada na figura 9, apresenta maior fiabilidade e qualidade de serviço, uma vez que aquando do aparecimento de um defeito permite o seu seccionamento e a alimentação da rede elétrica por outro nó. Contudo, este tipo de instalação requer um maior investimento em condutores de maior secção por parte do operador de rede. Assim, no caso da ocorrência de um defeito, os condutores elétricos estão melhor dimensionados para um bom suporte das cargas, o que permite uma boa capacidade de resposta. Este processo é executado com um telecomando, caso esteja instalado, que proporciona a reconfiguração da rede elétrica. Desta forma, o ramal em defeito é isolado e alimentado por outro troço/ramal da rede elétrica de distribuição, permitindo assim uma reposição de continuidade e melhor qualidade no serviço prestado ao consumidor pelo

operador de rede. Este tipo de configuração é usado em redes subterrâneas e zonas urbanas, onde existe um grande consumo de energia e concentração de cargas [6][ 9].



**Figura 9 - Rede MT tipicamente malhada/anel**

Toda a rede elétrica de média tensão (MT) de distribuição abrange uma grande área geográfica, dado que apresenta grandes aglomerados de cargas em meio urbano e menor aglomerado de cargas em meio rural ou suburbana. Assim, a rede elétrica MT é de exploração mista, isto é, apresenta tanto tipologia malhada como radial, como apresentado na figura 10.



**Figura 10 - a) Tipologia radial b) Tipologia malhada c) Tipologia mista**

Para uma melhor exploração da rede elétrica MT são usados órgãos de corte e telecomando, como OCR ou IAT, para que em caso de defeito haja um controlo automático. Este tipo de órgãos contribui para melhorar a continuidade e a qualidade do serviço prestado pelo operador de rede [20][21].

É a partir da rede elétrica de média tensão (MT) que a rede elétrica de baixa tensão (BT), maioritariamente de tipologia radial, está estruturada e projetada. É por meio de um PT, com auxílio de um ou mais transformadores, que ocorre a transformação de energia da rede elétrica, de MT para BT. Uma vez transformada a energia no secundário do transformador (num nível de tensão BT), esta segue para o quadro geral de baixa tensão (QGBT), que está protegido por dispositivos de corte. O quadro dispõe de várias saídas para a rede de distribuição, dispostas por triblocos, que formam os ramais da rede elétrica, que se ramificam pela via pública até ao consumidor final. Do QGBT ocorre a distribuição de energia elétrica pelas várias cargas que existem nas ramificações da rede de baixa tensão.

Toda a rede elétrica tem os seus limites, por isso, os condutores elétricos usados nos ramais são dimensionados, tendo em conta a queda de tensão máxima admissível, a corrente de serviço da canalização, os comprimentos máximos protegidos contra curtos circuitos, entre outros. Este dimensionamento é feito para servir da melhor forma todos os consumidores, garantindo uma boa qualidade de serviço, quer na rede aérea, quer na rede subterrânea.

No caso da rede elétrica aérea, esta é tipicamente radial e os condutores elétricos mais usados são do tipo torçado (LXS), em alumínio, suportados por intermédio de pinças em apoios que podem ser de vários tipos de construção. Em alguns destes apoios estão instaladas caixas de distribuição, que servem para o seccionamento e derivação da rede. Assim, surgem mais ramais para a continuação da alimentação da rede elétrica.

No caso da rede elétrica subterrânea, esta também é tipicamente radial, mas no caso de um elevado fluxo de cargas, como em zonas urbanas, os armários de distribuição estão preparados para realimentar outras ramificações da rede elétrica por um processo idêntico ao da rede aérea. Contudo, os condutores usados são, maioritariamente LS VAV, em alumínio, e as suas derivações são os armários de distribuição.

O percurso do ramal é feito com o intuito de alimentar uma ou mais cargas elétricas até satisfazer o consumidor final. Aí encontramos a fronteira entre o operador de rede e o

consumidor final - a portinhola. Toda a energia consumida é contabilizada por um contador, de forma a ajustar a energia distribuída pelo operador de rede e a energia consumida.

A rede de distribuição, à semelhança da rede de transporte, evolui ao longo do tempo, sendo necessário o seu reforço e modernização. De igual modo, as redes elétricas devem adaptar-se à evolução geográfica das cargas e das suas necessidades energéticas, garantindo sempre continuidade e qualidade no serviço prestado por parte do operador de rede [18][21].



# 3. PERDAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Nos diversos processos do sistema elétrico, produção, transporte e distribuição, há perdas de energia elétrica. Contudo, essas perdas são diferentes de processo para processo. Estas ocorrem quer por fenómenos característicos da rede, quer por fenómenos externos à mesma.

Um operador de rede pretende sempre um rendimento máximo da sua rede elétrica. Assim, de forma a rentabilizar a rede, o operador deve realizar um estudo exaustivo para obter um conhecimento profundo dos fenómenos que nela ocorrem, bem como os esforços a que está sujeita.

As perdas de energia elétrica representam uma grande parcela de energia desperdiçada que não é fornecida acarretando, por isso, prejuízo para o operador de rede. Este é o motivo pelo qual é importante o estudo das perdas de energia elétrica, como também, a sua mitigação.

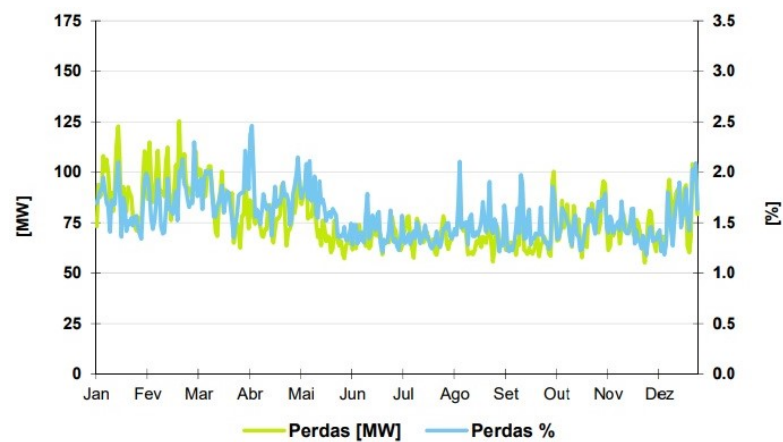
Por este motivo, as perdas de energia na rede elétrica serão o principal foco deste capítulo.

## 3.1. ABORDAGEM ÀS PERDAS NA REDE ELÉTRICA

A Rede Nacional de Transporte (RNT) apresenta perdas de energia elétrica ao longo do seu processo de transporte. Há uma grande diferença de grandeza entre as perdas na rede de transporte, em muita alta tensão (MAT), e na distribuição, alta tensão (AT), média tensão (MT), e as perdas em baixa tensão (BT), como é possível verificar pelas figuras 11 e 12.

Nos centros produtores, depois da geração de energia, produzida tipicamente em níveis de MT, ocorre a elevação da tensão para níveis de MAT reduzindo, desta forma, a corrente elétrica transportada nos condutores. Esta redução, uma vez que os centros produtores distam dos grandes centros consumidores de energia elétrica, permite um transporte eficiente da energia, utilizando menores secções dos condutores no transporte, evitando assim grandes perdas no sistema elétrico de energia (SEE). A utilização de secções reduzidas no transporte

de energia possibilita menores esforços mecânicos nas linhas e um menor custo inerente à sua instalação.



**Figura 11 - Perdas na RNT em 2015**

Por outro lado, noutros processos de transformação de energia, como a transformação de energia proveniente da Rede Nacional de Transporte (RNT) para a rede distribuição, há perdas elétricas. Isto porque ocorre uma nova transformação de energia elétrica, que resulta no aumento da corrente elétrica e no abaixamento da tensão, o que permite a distribuição de energia aos centros de consumo. Com o aumento da corrente na rede elétrica de distribuição, há um aumento da corrente nos condutores elétricos. Ora, quanto maior a corrente elétrica nos condutores, maior a possibilidade de perdas na rede. Dado que a rede de distribuição é composta por tensões em níveis mais baixos do que a rede de transporte (MAT) e, conseqüentemente, correntes elétricas mais altas, a rede de distribuição está sujeita a maiores perdas elétricas.



Fonte - Source : EDP e EDP Distribuição

**Figura 12 - Perdas na rede de distribuição**

Por sua vez, para a alimentação da rede elétrica de baixa tensão (BT) volta a existir uma redução da tensão e um aumento da corrente elétrica. Assim, com o aumento da corrente, há maior possibilidade de ocorrerem perdas. Sendo a rede elétrica de baixa tensão, a rede com maior distribuição de carga elétrica e com grande fluxo de corrente nos condutores elétricos das inúmeras ramificações, é necessário um estudo mais aprofundado para diminuir as perdas elétricas [11].

	Perdas <i>Losses</i>	Fornecimentos energia elétrica (exclui MAT) <i>Electricity supply (VHV excluded)</i>	Taxa de perdas <i>Losses rate</i>
	(GWh)	(GWh)	(%)
1997	2.570	28.032	9,2
1998	2.757	29.645	9,3
1999	2.756	31.538	8,7
2000	2.877	33.546	8,6
2001	3.191	35.248	9,1
2002	2.948	36.056	8,2
2003	3.258	37.842	8,6
2004	3.451	40.094	8,6
2005	3.439	42.495	8,1
2006	3.168	44.042	7,2
2007	3.498	44.481	7,9
2008	3.633	44.802	8,1
2009	3.277	44.608	7,3
2010	3.778	46.312	8,2
2011	3.464	44.734	7,7
2012	3.904	42.754	9,1
2013	4.687	41.783	11,2
2014	4.302	41.696	10,3
2015	4.114	42.104	9,8

**Figura 13 - Perdas na rede de distribuição desde 1997, Fonte ERSE**

Nas perdas na rede de distribuição de eletricidade em Portugal destaca-se a nova redução deste indicador face a 2015, fixando-se nos 9,8%, figura 13, mantendo-se, no entanto, acima da referência regulatória de 9,25% [11][22].

### 3.2. PERDAS TÉCNICAS

As perdas técnicas são perdas que ocorrem por fenómenos naturais na rede elétrica como: o efeito de *Joule* ou fenómenos eletromagnéticos. Apesar das perdas técnicas não poderem ser eliminadas, com um bom dimensionamento dos condutores, com a escolha certa do transformador e com o estudo da rede elétrica, é possível a sua redução [23].

#### 3.2.1. PERDAS POR EFEITO DE *JOULE*

O efeito de *Joule* é um fenómeno que ocorre nos componentes elétricos e que tem um grande relevo para a rede. Este fenómeno traduz-se na potência dissipada e é dado pela lei de *Joule* nos condutores, expressão (3.1):

$$P = R * I^2 \quad (3.1)$$

P - Potência dissipada (W)

R - Resistência Elétrica ( $\Omega$ )

I - Corrente Elétrica (A)

Assim, quanto maior a corrente nos condutores elétricos maior será a potência dissipada e, conseqüentemente, maior a energia libertada sob a forma de calor. Isto gera maiores perdas de energia elétrica no sistema. Um outro exemplo de perdas por efeito de *Joule* ocorre quando um componente elétrico da rede, como um transformador, é sujeito a elevadas correntes elétricas, o que origina uma sobrecarga. Esta causa um aumento da potência dissipada, logo maior calor libertado no posto de transformação (PT) e, conseqüentemente, maiores perdas por efeito de *Joule*. Para colmatar esta situação, os transformadores estão, atualmente, equipados com sistemas de refrigeração forçada. Nestes transformadores, a placa de identificação tem duas potências, uma para a ventilação normal e outra para a ventilação forçada. Esta ventilação forçada tem o propósito de melhorar o desempenho do transformador aumentando a capacidade de fornecimento de potência do mesmo [24][25].

### 3.2.2. PERDAS NO TRANSFORMADOR

Os transformadores são o elo de ligação entre as linhas de transmissão e distribuição de energia com os centros de produção e os locais de consumo. Neste processo são usados transformadores de energia, quer na produção, com a elevação de energia para níveis de muita alta tensão (MAT), quer na distribuição para consumidores em alta tensão (AT), média tensão (MT) e em baixa tensão (BT). É ao nível da transformação de energia nas subestações, nomeadamente nos transformadores, que há as maiores perdas de energia eléctrica no sistema. As principais perdas a ter em conta são as perdas no ferro e as perdas no cobre [9][26].

As perdas no ferro ou perdas em vazio são constantes, não se alteram com a variação da carga do transformador, apenas se alteram consoante o transformador utilizado e ocorrem devido à histerese magnética e correntes parasitas. As perdas no ferro são inevitáveis, mas a evolução dos transformadores permitiu melhorar as suas características e, consequentemente, diminuir a histerese magnética. O facto de os núcleos dos transformadores serem formados por lâminas de ferro isoladas entre si reduziu, também, as correntes parasitas no ferro [27][28].

As perdas no cobre dependem do fator de carga. Assim, quanto maior a carga no transformador, maiores serão as perdas por efeito de *Joule*, que resulta em perdas na rede eléctrica.

Tabela 2 - Perdas (%) em função do fator de carga (Pcu)

Nível Tensão	Pot.(kVA)	Perdas (%) em função do factor de carga (Pcu)			
		<25%	≥25% ; <50%	≥50% ; <75%	≥75%
10 e 15 kV *	50	0,18	0,70	1,58	2,81
	100	0,12	0,47	1,06	1,89
	160	0,10	0,40	0,89	1,58
	250	0,09	0,35	0,79	1,40
	400	0,08	0,31	0,70	1,24
	500	0,08	0,30	0,68	1,20
	630	0,07	0,28	0,63	1,11
30 kV	50	0,23	0,91	2,04	3,62
	100	0,13	0,54	1,21	2,16
	160	0,11	0,43	0,97	1,72
	250	0,10	0,39	0,87	1,55
	400	0,09	0,34	0,77	1,36
	500	0,09	0,34	0,77	1,36
	630	0,07	0,28	0,64	1,14

Na tabela 2 é possível constatar que as perdas no cobre variam consoante as potências dos transformadores para um determinado intervalo de carga. Pode-se verificar, ainda, que com o aumento da carga aumentam as perdas no transformador [26][27].

### 3.2.3. FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência é um indicador do grau de eficiência energética do sistema elétrico e obtém-se pela razão entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S), expressão (3.2). Ora, quanto maior o fator de potência, mais eficiente é a instalação elétrica, pois requer menos potência reativa.

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (3.2)$$

FP – Fator de potência

P – Potência ativa (kW)

S – Potência aparente (kVA)

$\varphi$  – Ângulo de fase de carga

Numa instalação e rede elétrica o objetivo é ter o melhor fator de potência possível, para que as perdas sejam diminutas. Um fator de potência baixo pode ter como causa a solicitação de energia reativa à rede, por parte de algumas cargas, como máquinas de solda, motores superdimensionados, entre outros [29].

### 3.2.4. ENERGIA REATIVA

A energia elétrica é composta por duas componentes: a energia ativa e a energia reativa. A ativa é a energia consumida na execução do trabalho por parte das cargas, essencial ao seu funcionamento e é medida em kWh. Já a energia reativa resulta de comportamentos elétricos que ocorrem nos equipamentos e é medida em kVAR. Esta divide-se em energia reativa indutiva e energia reativa capacitiva.

Como a maior parte das cargas são indutivas, como, por exemplo, os motores elétricos, transformadores, fornos indutivos, lâmpadas de descarga, estas irão solicitar à rede elétrica energia reativa indutiva. Observe-se o seguinte exemplo, um motor com carga indutiva necessita de criar um campo magnético, fundamental ao seu funcionamento, solicitando à rede elétrica energia reativa. Com esta solicitação de energia reativa, esta ocupa parte dos condutores da rede elétrica, causando uma sobreutilização da mesma, figura 14.

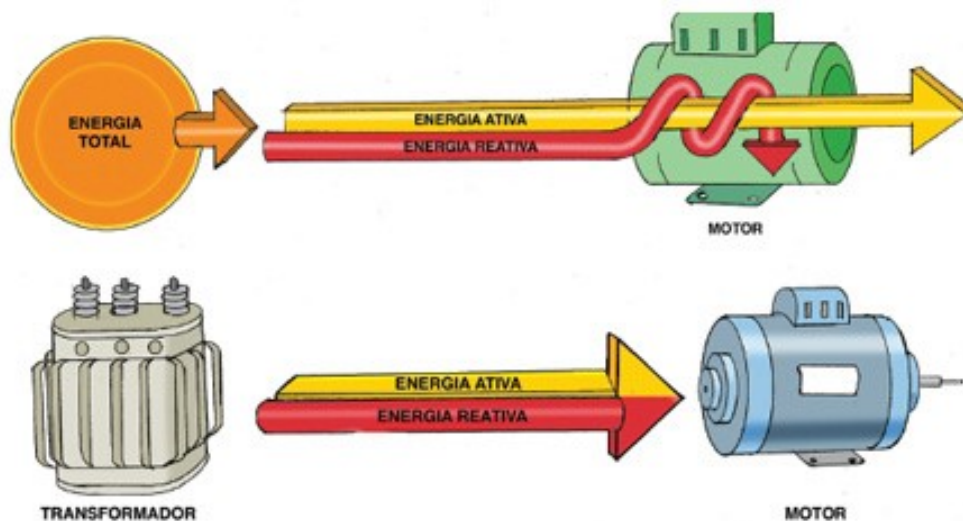


Figura 14 - Energia necessária ao funcionamento de um motor

A energia ativa e reativa são o produto da respetiva potência pelo tempo (t). A potência elétrica é composta por duas componentes: a potência ativa (P) e a potência reativa (Q),

resultando da sua soma cartesiana a potência aparente (S). O triângulo de potências explica a relação entre estas, figura 15 [30].

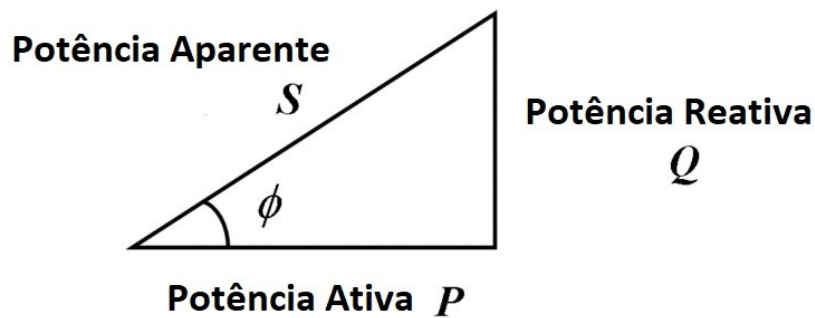


Figura 15 - Triângulo de potências

A potência aparente complexa (S) é dada pela expressão (3.3):

$$S = U * I^* \quad (3.3)$$

S – Potência aparente (kVA)

U – Tensão elétrica (V)

I – Corrente (A)

As fórmulas da potência ativa (P) e da potência reativa (Q) são dadas pelas expressões 3.4 e 3.5, respetivamente:

$$P = U * I * \cos \varphi \quad (3.4)$$

$$Q = U * I * \sin \varphi \quad (3.5)$$

P – Potência ativa (kW)

Q – Potência reativa (kVAR)

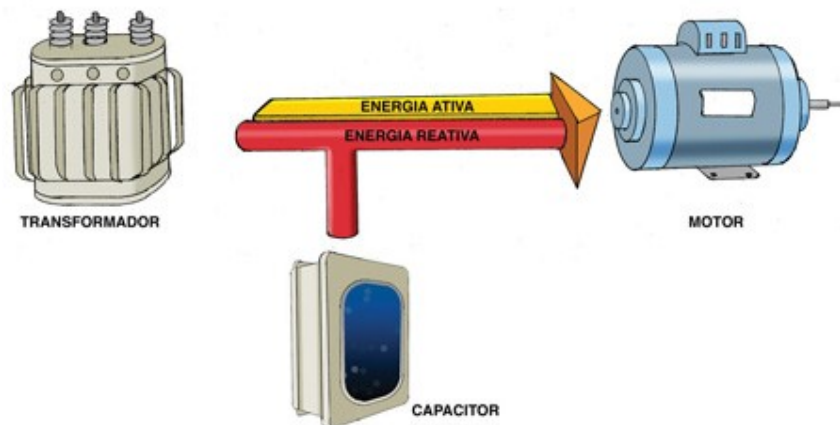
U – Tensão elétrica (V)

I – Corrente (A)

$\varphi$  – Desfasamento entre a componente U e I, ou seja, o ângulo de fase de carga.

Sendo a circulação de energia reativa a causa de perdas elétricas suplementares, há uma constante preocupação por parte dos operadores de rede com a mesma. Quando presente em grande escala no sistema elétrico, a energia reativa pode causar uma sobrecarga de corrente, com conseqüente sobreaquecimento dos condutores elétricos que geram perdas por efeito de *Joule*. Estes condutores têm, assim, de comportar o aumento da energia ativa e reativa, o que causa a diminuição do fator de potência na rede elétrica.

Os consumidores que requisitam energia reativa à rede elétrica num valor superior ao regulado, estão, por isso, sujeitos a uma penalização por parte dos operadores de rede. Assim, a medição de energia reativa indutiva e capacitiva, que circula nos condutores elétricos, é importante, pois, se por um lado o consumidor não quer ser penalizado pela requisição desta energia, por outro o operador de rede de distribuição quer evitar a circulação de energia reativa na sua rede. Há, por isso, uma abordagem por parte do operador de rede de forma a compensar essa energia. Deste modo, aconselha-se a utilização de dispositivos como baterias de condensadores ou outros dispositivos, baseados em eletrónica de potência, que produzem energia reativa capacitiva, na tentativa de anular a energia reativa indutiva requisitada à rede, sendo a sua compensação feita no local. Com a aplicação destes dispositivos o cliente vê as suas penalizações diminuírem, uma vez que já não requisita tanta energia elétrica reativa à rede, figura 16 [22] [24].



**Figura 16 - Compensação de energia reativa com recurso a bateria de condensadores**

O valor limite máximo de requisição de energia reativa está fixado e regulado, pela ERSE, em 30% da energia ativa consumida. Sempre que o consumidor ultrapasse o valor limite de requisição de energia reativa, será penalizado pelo operador de rede. Penalização essa feita em 3 escalões, em função da  $\tan \phi$  (0,3; 0,4; 0,5) [31][32].

### 3.3. PRINCIPAIS CAUSAS DE PERDAS TÉCNICAS

As perdas técnicas, que ocorrem em todos os processos do SEE, podem ser causadas por fenômenos físicos, eletromagnéticos, naturais, cargas defeituosas, entre outros.

#### 3.3.1. RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A resistência elétrica é um dos fatores que contribui para o aumento das perdas nos sistemas elétricos. Na expressão (3.1), da potência dissipada, há uma relação entre a resistência elétrica (R) e o quadrado da corrente (I) que circula nos condutores.

Por isso, quanto maior for a corrente (I) nos condutores elétricos, para uma determinada resistência elétrica (R) no condutor, maior será a potência dissipada, o que representa maiores perdas nos sistemas elétricos de energia (SEE), denominadas perdas por efeito de *Joule* [33][34].

A resistência elétrica (R) está, também, relacionada com a resistividade ( $\rho$ ), o comprimento (L) e a secção do condutor elétrico, pela expressão (3.6):

$$R = \rho * \frac{L}{S} \quad (3.6)$$

R – Resistência elétrica ( $\Omega$ )

$\rho$  – Resistividade ( $\Omega/m$ )

L – Comprimento (m)

S – Área da secção transversal ( $m^2$ )

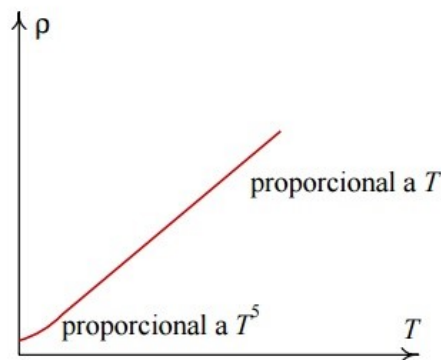
Sendo assim, a resistência (R) varia diretamente com a resistividade ( $\rho$ ) do material (cobre ou alumínio) que compõe o condutor e varia inversamente com a secção do condutor elétrico, isto é, com o aumento da secção, a resistência elétrica diminui, (figura 5 e 6) [36].

Assim, quanto mais baixa for a resistividade de um condutor elétrico melhor será a condução. Desta forma, quando sujeito a grandes correntes, o condutor elétrico apresenta uma potência dissipada baixa e, por isso, menos perdas por efeito *Joule*. Por outro lado, se a

resistividade do condutor elétrico for elevada, quando sujeito a grandes correntes, aumenta a potência dissipada, logo significa mais perdas por efeito *Joule* (expressão (3.1)) [25][35].

No que diz respeito ao material usado nos condutores elétricos, o cobre é o que apresenta melhores características como condutor elétrico ( $\rho = 17,241 \Omega \text{ mm}^2/\text{km}$ ). Contudo, este não é o mais viável devido ao seu elevado valor comercial. Além do mais, suscita interesse a terceiros, sendo alvo de furtos. De forma a evitar estas consequências, têm sido utilizados pelos operadores de rede condutores elétricos de alumínio ( $\rho = 28,264 \Omega \text{ mm}^2/\text{km}$ ). O alumínio caracteriza-se por ser um material leve, o que permite uma boa construção da rede elétrica aérea não causando muito esforço aos apoios.

Outro dos fatores que está diretamente relacionado com a resistividade ( $\rho$ ) é a temperatura, figura 17. Quanto maior a temperatura, maior a resistência ( $R$ ) e, por isso, maior a dissipação de calor pelos condutores elétricos, o que gera maiores perdas de energia elétrica [33][37].



**Figura 17 - Variação da resistência de um condutor em função da temperatura absoluta**

A resistência elétrica ( $R$ ) depende, também, da distância ( $L$ ), expressão (3.6), visto que quanto maior for o percurso da linha ou da rede, maior resistência que este oferece à passagem da corrente e, conseqüentemente, maiores perdas de energia elétrica [33].

### **3.3.2. CARGA ELÉTRICA**

As cargas elétricas, como consumidoras de energia elétrica, são maioritariamente indutivas, mas, também, podem ser capacitivas. As cargas elétricas são de diferentes tipos, como por exemplo: motores elétricos, iluminação, ar condicionado ou uma vasta combinação de aparelhos elétricos, que juntos formam uma carga elétrica. Estas apresentam padrões de consumo tipicamente residencial (monofásica e trifásica), industrial (maioritariamente

trifásicas), comercial e serviços (monofásicas e trifásicas). Portanto, as cargas elétricas representam uma potência requerida à rede elétrica que deve ser retribuída pela mesma. Caso a potência requerida pelo consumidor exceda os limites técnicos dos condutores, estes entram em sobrecarga elétrica. Apesar de os condutores suportarem essa carga, há um aumento da corrente que nele circula, o que contribui para perdas por efeito de *Joule* na rede. Assim, os condutores elétricos estão dimensionados para uma carga elétrica esperada para um determinado número de consumidores, tendo em conta a potência contratada pelos mesmos [25][38].

### **3.3.3. TENSÃO ELÉTRICA**

Em todo o Sistema Elétrico Nacional (SEN) a energia elétrica é transmitida sob a forma de potência, sendo a potência dada pelo produto da tensão elétrica pela corrente elétrica. Como os condutores sujeitos a correntes elétricas maiores propiciam o aumento das perdas por efeito de *Joule*, para transmitir uma potência ao longo de todo o circuito, a tensão elétrica desempenha um papel importante.

Dada a distância entre os centros de carga e os centros electroprodutores, a forma de reduzir as perdas de energia consiste em ajustes entre a corrente e a tensão elétrica. Deste modo, há nos centros electroprodutores uma elevação da tensão para níveis de muita alta tensão (MAT) e uma conseqüente redução da corrente, como forma de reduzir as perdas por efeito de *Joule*. A seguir ao seu transporte procede-se à distribuição da energia. Esta tem como objetivo a entrega de energia aos centros de carga em níveis de tensão AT e MT. Para tal, as subestações transformam a energia elétrica através de uma redução da tensão e conseqüente aumento da corrente elétrica. Contudo, o aumento da corrente na rede de distribuição proporciona maiores perdas.

O objetivo é alimentar os grandes centros de carga, que estão em maior número e dispersos geograficamente, como clientes residenciais e industriais. Como estes são maioritariamente alimentados em níveis de tensão MT e BT, estão ainda mais sujeitos a perdas de energia elétrica, o que provoca maiores perdas por efeito de *Joule* [25].

### **3.3.4. FENÓMENOS ELETROMAGNÉTICOS**

#### **3.3.4.1. EFEITO SKIN (EFEITO PELICULAR)**

O efeito pelicular, ou efeito *skin*, é um fenómeno de origem eletromagnética, que acontece nos condutores elétricos e que é responsável pelo aumento da resistência dos mesmos. Este efeito é negativo, dado que se traduz em perdas de energia para o sistema elétrico.

O efeito pelicular consiste no facto de a densidade da corrente elétrica não ser uniforme, o que faz a corrente concentrar-se na periferia do condutor ao invés de ser uniforme em toda a secção do condutor. Ora, isto conduz a um aumento da reactância local que, consoante a frequência da corrente que percorre o condutor, origina maior ou menor campo magnético junto ao centro do condutor [37].

Este efeito é mais acentuado em condutores elétricos com corrente com uma frequência alta, e que, por isso, geram campos magnéticos maiores. Contudo, este fenómeno também se encontra presente em condutores com correntes de frequências mais baixas.

Uma das formas de reduzir o efeito pelicular nos condutores é o uso de condutores torçados, pois permitem que o campo magnético seja uniforme reduzindo a resistência elétrica nos condutores [33][39].

#### **3.3.4.2. HARMÓNICOS**

Os harmónicos são deformações que ocorrem nas formas de onda, quer de tensão quer de corrente, nos sistemas elétricos de potência. A presença de harmónicos na rede elétrica vai criar condições não favoráveis ao SEE, o que conduz a deformações na onda de tensão ou corrente, variações de frequência ou picos de tensão. Estes fatores levam a uma sobrecarga das redes de distribuição pelo aumento da corrente eficaz, o que sobrecarrega os condutores de neutro, levando, também, a um aumento das vibrações e envelhecimentos nos componentes [15][40].

Os harmónicos são cada vez mais controlados e monitorizados com o objetivo de obter uma boa qualidade e eficiência dos sistemas elétricos. O controlo de harmónicos nos SEE permite à rede elétrica, essencialmente aos transformadores de distribuição de energia, evitar perdas

por histerese e perdas por correntes de *Foucault*. Estas perdas, no núcleo dos transformadores de distribuição, resultam em perdas na rede elétrica [41].

### **3.4. PERDAS NÃO TÉCNICAS**

As perdas não técnicas são perdas que ocorrem por fenômenos não naturais na rede elétrica e passam por: erros de medição, erros de ligação e furtos à rede elétrica. Este último causado por desvios ilícitos de energia na rede de distribuição, que acarretam custos aos operadores de rede [23][35].

#### **3.4.1. ERROS DE MEDIÇÃO**

Perdas não técnicas por erros de medição são perdas associadas a erros na leitura de equipamentos elétricos na rede, causadas por equipamentos em defeito ou defeitos no envio de dados. Este tipo de erros de medição ou de comunicação, leva à não contabilização de energia consumida nas instalações e, por isso, prejuízo para o operador de rede.

#### **3.4.2. ERROS DE LIGAÇÃO**

Aquando da instalação de equipamento elétrico podem ocorrer erros de ligação que originam defeitos e perdas de energia elétrica na rede. Estes são suscetíveis de existir em vários componentes da rede elétrica.

#### **3.4.3. FURTOS**

Os furtos de energia são uma das principais causas de perdas não técnicas que ocorrem na rede elétrica. A energia é furtada na rede de distribuição e não é faturada. Logo, acarreta prejuízo para o operador de rede. Estes são de difícil controlo para o operador, dada a diversidade de clientes e a inacessibilidade de alguns equipamentos.

As principais perdas não técnicas por furto são as ligações clandestinas e fraudes nos equipamentos de contagem. Estas perdas são um dos fatores que as empresas de distribuição de energia mais tentam corrigir, tendo, inclusive, equipas dedicadas apenas a este tipo de ações.

Como forma de evitar furtos de energia têm sido aplicadas medidas, que passam pela evolução tecnológica dos equipamentos e melhorias na rede elétrica, para um melhor

controlo deste tipo de perdas. A aplicação destas medidas observa-se ao nível das redes inteligentes, que permitem a contabilização de energia distribuída de forma mais correta.

### **3.5. RELAÇÃO DAS QUEDAS DE TENSÃO COM AS PERDAS TÉCNICAS**

Um dos problemas comuns nas redes elétricas BT são as quedas de tensão. As quedas de tensão são diminuições de tensão ao longo dos condutores elétricos. Quanto maior for a distância entre a fonte de alimentação (posto de transformação) e a carga (consumidor final) maior será a queda de tensão na rede elétrica.

Outra causa de quedas de tensão na rede é o desequilíbrio entre fases, devido à má distribuição de cargas pelas três fases. Isto deve-se ao facto de a alimentação da rede BT ser feita em dois níveis de tensão nominal: 400V, que requer uma ligação trifásica, e 230V, que requer uma ligação monofásica. Um sistema trifásico é equilibrado quando as tensões são iguais em amplitude e desfasadas em  $120^\circ$ . No entanto, numa rede elétrica BT, como é maioritariamente constituída por consumidores monofásicos, surgem desequilíbrios entre fases, dado que a distribuição não é uniforme e o consumo não é igual entre elas. Ora, isto implica uma variação da tensão elétrica na rede BT, que segundo a NP EN 50160 não deve ser inferior ou superior a 10% da tensão nominal ( $U_n$ ), com uma frequência de rede que pode variar em  $50 \pm 0,5$  Hz durante 99,5% do ano, em condições de normal funcionamento [19].

Este desequilíbrio entre fases pode, também, ser causado pelo aumento de novos consumidores. No caso de clientes monofásicos é necessária uma ligação de um condutor fase e do condutor neutro. Como toda a rede elétrica, quer aérea quer subterrânea, é composta por quatro condutores é preciso ter em consideração a ligação da baixada do novo cliente monofásico na escolha da fase a que este deve ser ligado, de forma a existir um equilíbrio entre fases na rede elétrica. Assim, o operador de rede deve medir e escolher as fases para que não haja desequilíbrios na rede elétrica. Se ocorrer um desequilíbrio entre fases, as correntes nelas ficam desequilibradas, o que leva ao aparecimento de uma corrente no condutor neutro que origina perdas no sistema em causa [23][38].

O Regulamento de Segurança de Redes de Distribuição de Energia Elétrica em Baixa Tensão (RSRDEEBT) estipula que as redes elétricas de distribuição deverão ser concebidas de forma a promover a eficiência energética, em condições de segurança, e tem como limite para a variação de tensão elétrica 8% da tensão nominal ( $U_n$ ), tabela 3 [42].

**Tabela 3 - Variação da Queda de Tensão**

Tensão nominal V	Queda de tensão correspondente a uma percentagem da tensão nominal									
	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%
230	2,3	4,6	6,9	9,2	11,5	13,8	16,1	18,4	20,7	23
400	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40

As quedas de tensão podem ser, também, provocadas por excesso de energia reativa na rede elétrica, o que aumenta a corrente nos condutores. Assim, uma redução/eliminação de energia reativa nos condutores permitirá uma maior capacidade para o transporte de energia ativa aquando de uma grande solicitação pela rede elétrica. Esta estará, assim, em melhores condições para responder a essa solicitação, evitando sobrecargas dos condutores e, por isso, uma melhor qualidade da tensão elétrica na rede.

O operador de rede deve investir no controlo da tensão e da energia reativa nas redes elétricas, de forma a reduzir as quedas de tensão, minimizando as perdas de energia e, por isso, aumentando o rendimento da sua rede elétrica [34][43].

### **3.6. MITIGAÇÃO DAS PERDAS ELÉTRICAS**

A redução das perdas técnicas de energia elétrica é vantajosa, dado que garante melhores condições de operação na rede elétrica, contribuindo para um melhor rendimento e eficácia da rede, bem como melhor qualidade da energia elétrica. A mitigação das perdas não técnicas tem evoluído, sendo que há cada vez mais meios para deteção de perdas não técnicas.

#### **3.6.1. COMPENSAÇÃO LOCAL COM O USO DE BATERIAS DE CONDENSADORES**

Para reduzir o fluxo de energia reativa indutiva na rede elétrica são instaladas baterias de condensadores nas instalações dos consumidores. Assim, consegue-se uma melhor exploração da rede elétrica e conseqüente redução das perdas de energia [43].

As baterias de condensadores têm como objetivo a produção de energia reativa. Com esta compensação local de energia reativa, a carga responsável pelo seu consumo deixa de solicitar esta energia à rede elétrica e, assim, reduzir a energia reativa nos condutores.

Os consumidores com mais potencial para a requisição de energia reativa à rede BT são os consumidores alimentados em baixa tensão especial (BTE), com potências contratadas acima dos 41,4 kVA. Estes são os consumidores com pequenas indústrias e com cargas mais indutivas, pelo que tem maior propensão a requerer energia reativa à rede para satisfação das suas cargas elétricas. Este tipo de clientes é penalizado na fatura elétrica pela solicitação de energia reativa indutiva à rede elétrica. Com a aplicação desta tecnologia, os consumidores BTE reduzem a requisição da energia reativa à rede, com conseqüente eliminação/redução da penalização. Assim, o investimento nas baterias de condensadores, feito pelo próprio, é rapidamente compensado [31].

Se existir um incorreto dimensionamento das baterias de condensadores, a energia reativa capacitiva será produzida em demasia e, por isso, os condutores voltam a ser ocupados, mas com energia reativa capacitiva. Desta forma, investir numa compensação com bateria de condensadores controlada automaticamente é uma boa solução, pois a energia reativa é gerada consoante a necessidade da mesma [44].

A redução de perdas elétricas pela instalação de baterias de condensadores leva a inúmeras vantagens para a rede elétrica e o SEE [32][45]:

- Redução das perdas de energia;
- Diminuição das quedas de tensão;
- Melhor fator de potência;
- Menos perdas por sobrecarga dos condutores;
- Maior disponibilidade na rede de distribuição;
- Adiamento nos investimentos em novos estudos para melhoria da rede elétrica ou em reforço da mesma, como aumentos de secção;

- Redução da fatura elétrica, com vista à redução das penalizações em caso de requisição de energia reativa;
- Aumento da vida útil dos equipamentos, quer da instalação elétrica, quer da rede elétrica;
- Melhor qualidade da energia na rede elétrica.

### **3.6.2. MELHORAR O FATOR DE POTÊNCIA**

Com a redução da energia reativa indutiva, através da instalação de baterias de condensadores, diminui este tipo de energia nos condutores elétricos melhorando as condições a que a instalação está sujeita. Há, também, uma melhoria na tensão elétrica na rede de distribuição, contribuindo tanto para um melhor fator de potência, como também para um menor desgaste dos seus componentes (por comportamentos atípicos), e ainda, a diminuição de perdas de energia na instalação por efeito de *Joule* [ 32][43].

### **3.6.3. REMODELAÇÃO E REFORÇO DA REDE ELÉTRICA**

Com vista a melhorar a qualidade de serviço é necessário investimento na construção e no melhoramento da rede elétrica em todo o SEE. Este investimento passa pela construção de subestações e linhas de AT e MT. Já na rede BT, há uma procura contínua em melhorar a rede elétrica, através da construção de novos postos de transformação (PT) em locais estratégicos, devidamente estudados, para melhorar a qualidade de energia e colmatar as falhas da rede. Também na rede BT procura-se remodelar os vários componentes, como por exemplo, substituindo os condutores nus por condutores de cabo torçado (LXS), dado que os primeiros apresentam um grau de dificuldade no que respeita à manutenção como também apresentam índices de fiabilidade mais baixos [21].

Com um maior investimento na remodelação de redes obsoletas, redes subdimensionadas ou condutores com uma elevada utilização, há uma grande probabilidade da redução de perdas de energia elétrica. Apesar dos investimentos e remodelações na rede elétrica, ainda existem casos de redes desadequadas à sua função, fruto da má distribuição do território e do aumento das zonas de construção. Para além disso, a potência requerida aquando da construção de

novas habitações tem aumentado, o que leva a desequilíbrios e a sobrecargas nos condutores da rede elétrica e provoca quedas de tensão, com consequentes perdas na rede elétrica.

É, também, importante referir que uma adequada distribuição das saídas dos quadros gerais dos postos de transformação, ou a opção por uma nova saída do quadro geral para alimentar outros ramais, leva a uma distribuição mais equilibrada das cargas da rede elétrica. Por vezes, os postos de transformação (PT) são caracterizados por serem redes extensas, que tornam as cargas em fim de rede mais suscetíveis a problemas (sobreaquecimento de condutores, quedas de tensão, entre outros) interferindo na qualidade de energia. Uma das soluções passa por criar um “*feeder*” (ramal com origem no quadro do PT) que esteja dedicado apenas aos ramais em fim de linha para retirar cargas de outras saídas do quadro geral, melhorando o desempenho da rede de distribuição.

Atualmente, existem configurações de redes mais sofisticadas que se baseiam em princípios mais avançados para a construção das redes elétricas, como o exemplo as *Smart grids*. Estas são implementadas em redes elétricas existentes, ou em exploração, e têm melhores condições de acesso, o que permite um constante controlo e monitorização da rede em causa [11].

#### **3.6.4. REDUÇÃO DE PERDAS NOS TRANSFORMADORES**

As principais perdas nos transformadores são causadas por variações sazonais de carga, pelas alterações na rede que causam dimensionamentos incorretos ou transformadores desadequados. Estas situações diminuem a eficiência da instalação elétrica.

Um dos motivos que origina distintas condições de exploração de um transformador é a constante reestruturação e inserção de cargas na rede elétrica ao longo do tempo. Esta solicitação de energia, por novas cargas, origina uma sobrecarga da rede que tem como consequência a sobrecarga do transformador [5].

Para reduzir as perdas nos transformadores, perdas no cobre e no ferro, poderá optar-se pela troca dos transformadores de energia elétrica considerados obsoletos por transformadores mais recentes, uma vez que os transformadores mais antigos da rede elétrica são mais suscetíveis de apresentar um menor rendimento e, por isso, maiores perdas no ferro e no

cobre que os transformadores atuais. Assim, uma substituição dos mesmos levaria a menos perdas para a rede elétrica [26][46].

Outra forma de reduzir as perdas no cobre e no ferro será a opção por transformadores mais eficientes, isto é, transformadores com rendimentos mais elevados. Apesar de apresentarem custo superior, os transformadores de alta eficiência em comparação com os transformadores *low-cost*, são um bom investimento a longo prazo. Têm, também, a vantagem de causarem um menor impacto ambiental [23].

Para efetivar a redução das perdas por efeito de *Joule* causadas por sobrecarga dos transformadores, poder-se-á substituir os transformadores por outros com maior potência. Isto deve-se ao facto de os transformadores não suportarem a carga da rede em que estão inseridos, sobreaquecendo. Este sobreaquecimento implica ainda a redução da vida útil do transformador [6][26].

### **3.6.5. RECURSO À PRODUÇÃO DISTRIBUÍDA**

A aplicação de uma instalação produtora de energia renovável na rede elétrica, como a produção fotovoltaica, é um fator a ter em conta na mitigação das perdas elétricas, dados os benefícios ambientais, técnicos ou até económicos. A instalação deste tipo de tecnologias, em condições adequadas, permite produzir energia que é injetada na rede elétrica para ser consumida pelas cargas da rede. Assim, o recurso a uma segunda fonte de energia na rede elétrica, colocada em pontos chave da rede, nomeadamente no final da canalização principal ou próximo de locais de maior consumo, alivia a carga nos condutores elétricos através da alimentação das cargas onde está inserido, minimizando as perdas de energia na rede. A aplicação deste tipo de tecnologias distribuídas pela rede elétrica não só reduz as perdas de energia, como melhora a tensão que nela circula, com conseqüente melhoria da qualidade de energia.

Contudo, a instalação de uma fonte produtora de energia renovável apresenta desvantagens, pois é um investimento elevado tendo em conta a redução das perdas de energia elétrica na rede e, porque em certos períodos do ano, a produção de energia não é suficiente, poderá não se apresentar como uma boa solução para a redução de perdas de energia elétrica [43][47].

# 4. METODOLOGIAS PARA CÁLCULO DE PERDAS

O estudo detalhado e o cálculo das perdas de energia elétrica são fundamentais para uma rede elétrica, pois permitem quantificar as perdas em cada ponto da rede, de forma a minimizar as mesmas localmente. Assim, consegue-se perceber os pontos onde há maiores perdas e corrigi-los, o que melhora o desempenho e eficiência energética da rede elétrica.

Muitas das vezes, o que dificulta o cálculo das perdas elétricas é o facto de estas existirem nos vários níveis de tensão, que originam diferentes fenómenos nas redes elétricas. O cálculo de perdas não é, por isso, linear. No caso do transporte de energia, o cálculo das perdas técnicas é a diferença entre a energia injetada e a energia de saída, mas no caso da distribuição, o seu cálculo depende de muitos fatores, alguns deles externos à rede de distribuição. Assim, surgem duas metodologias para o cálculo de perdas: o cálculo de perdas através do fator de perdas, ou, pela simulação de redes elétricas em *software* adequado. Há, ainda, o cálculo de perdas de energia elétrica por estimativa, através da criação de um perfil de perdas, no período de um ano, que é proposto pelos operadores de rede e regulado pela ERSE [48][49].

Existe um programa para a redução das perdas de energia, no qual o operador de rede deve cumprir com o limite máximo de perdas na rede elétrica, estabelecido pelo regulador. Por este motivo, há incentivos das entidades reguladoras, para controlar as perdas de energia na rede elétrica, com o objetivo de as reduzir. Com o incentivo à redução de perdas nos sistemas elétricos e um conhecimento da rede elétrica, o operador de energia elétrica consegue encontrar um equilíbrio técnico-económico entre o investimento e os benefícios da redução de perdas, com uma melhor eficiência na rede elétrica [50][51].

#### 4.1. CÁLCULO DO FATOR PERDAS

O cálculo das perdas elétricas é dado pela diferença entre a energia injetada na rede e a energia faturada, nos diversos períodos tarifários. Assim, o cálculo da energia de perdas é dado pela expressão (4.1):

$$E(\Delta t) = E(\Delta t)_{Entrada} - E(\Delta t)_{Saída} \quad (4.1)$$

E – Energia (kWh)

$\Delta t$  – Intervalo de tempo (h)

Contudo, o cálculo das perdas com a aplicação desta equação, apenas determina o balanço da energia elétrica, desconhecendo-se, assim, a origem das perdas, os tipos de perdas e os fatores que as desencadeiam [35].

É necessário um cálculo mais pormenorizado, tendo por base um diagrama de cargas da rede elétrica em causa (figura 18), dada a dimensão da rede elétrica e os vários fatores que causam perdas de energia elétrica na rede, nos diversos períodos tarifários. Desta forma, calcula-se o consumo de energia ao longo de um determinado período de tempo (t), ao invés de um cálculo médio da energia distribuída e faturada, como exemplifica a expressão (4.1).

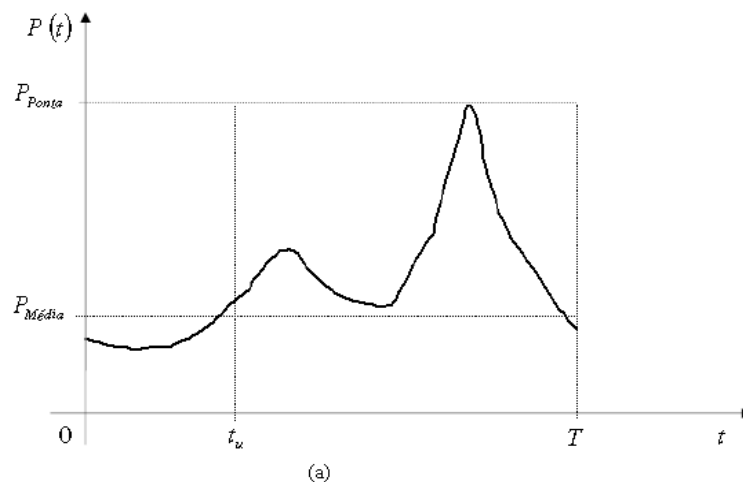


Figura 18 – Típico diagrama de carga

Assim, o cálculo do fator de perdas tem por base um diagrama de carga, onde se encontra potência média ( $P_{média}$ ) e potência de ponta ( $P_{ponta}$ ) necessários para o seu cálculo. Para se

calcular o fator de perdas é preciso calcular o fator de carga. Este último é dado pela razão entre a energia distribuída e a potência de ponta num determinado período T, expressão (4.2). Mas, para este cálculo é necessário conhecer a energia distribuída (expressão 4.3) [50][51].

$$\alpha = \frac{W_{Distribuída}}{P_{ponta} * T} \quad (4.2)$$

$\alpha$  – Fator de carga

$W_{Distribuída}$  – Energia distribuída (kWh)

$P_{ponta}$  – Potência ponta (kW)

T – Período de tempo (h)

$$W_{Distribuída} = P_{média} * T \quad (4.3)$$

$W_{Distribuída}$  – Energia Distribuída (kWh)

$P_{média}$  – Potência média (kW)

T – Período de tempo (h)

Uma vez obtido o fator de carga, segue-se o cálculo do fator de perdas. A expressão (4.4) do fator de perdas ( $\beta_{eq}$ ) estabelecida por F.H.Buller e C.A.Woodrow, está formulada na seguinte forma:

$$\beta_{eq} = X * \alpha + (1 - X) * \alpha^2 \quad (4.4)$$

$\beta_{eq}$  – Fator de perdas

X – Constante característica de perdas da rede elétrica

$\alpha$  – Fator de carga

Considerando que as aproximações dos valores da constante característica de perdas da rede elétrica (X) podem variar consoante o tipo de atividade: no transporte assume o valor típico de 0,3 p.u. e na distribuição assume o valor típico 0,20 p.u., a expressão do fator de perdas é dada pela expressão (4.5):

$$\beta_{eq} = 0,2 * \alpha + 0,8 * \alpha^2 \quad (4.5)$$

Findo o cálculo do fator de carga e do fator de perdas, segue-se o cálculo da energia de perdas, pela expressão (4.6):

$$W_{perdas} = \beta_{eq} * T * P_{perdasPonta} \quad (4.6)$$

$W_{perdas}$  – Energia perdas (kWh)

$\beta_{eq}$  – Fator de perdas

T – Período de tempo (h)

$P_{perdas\ ponta}$  - Calculado através do trânsito de potência.

Este método de cálculo de perdas de energia elétrica é pouco usado, porque é difícil a sua aplicação em grande escala no SEE para o estudo das perdas globais, dada dimensão e a informação necessária para o seu cálculo. Assim, este método só é usado para o cálculo de perdas em redes de estudo de pequena dimensão [48][49].

## 4.2. CÁLCULO POR SIMULAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS

O cálculo de perdas por simulação de redes elétricas com recurso a *software* adequado é um dos métodos utilizados para o cálculo de perdas em todo o SEE. Este é baseado na simulação, em condições normais de exploração, e tem em consideração a ponta máxima de saída das subestações e o fator de carga do diagrama anual.

A simulação de redes elétricas para o estudo das perdas de energia na rede elétrica, em especial na rede elétrica de baixa tensão, exige um grande número de dados. Como a rede elétrica de baixa de tensão é extensa e com uma grande distribuição de cargas, requer de um grande número de dados para a sua simulação. Isto faz com que, muitas vezes, o cálculo das perdas na rede elétrica de baixa tensão seja inviável. Apesar de tudo, os *softwares* para

cálculo e estudo de perdas elétricas são úteis, quando aplicados a redes isoladas, uma vez que permitem o estudo pormenorizado da rede e, ainda, simulam as alterações necessárias para uma redução eficaz das perdas de energia elétrica.

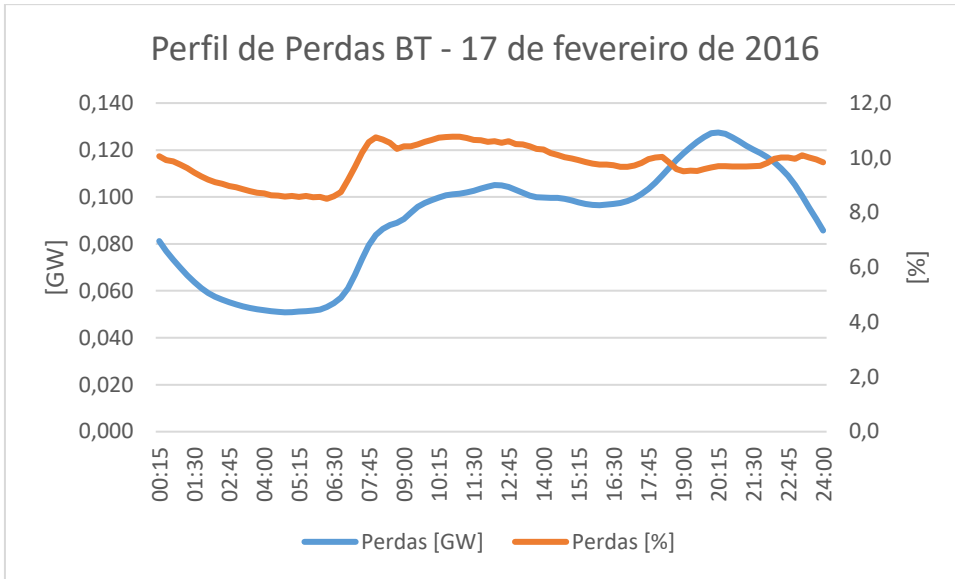
### **4.3. CÁLCULO DO PERFIL DE PERDAS**

Como o cálculo de perdas elétricas em baixa tensão é difícil de calcular, quer pelo fator de perdas, quer pela simulação de redes elétricas, o cálculo é feito através de um perfil de perdas.

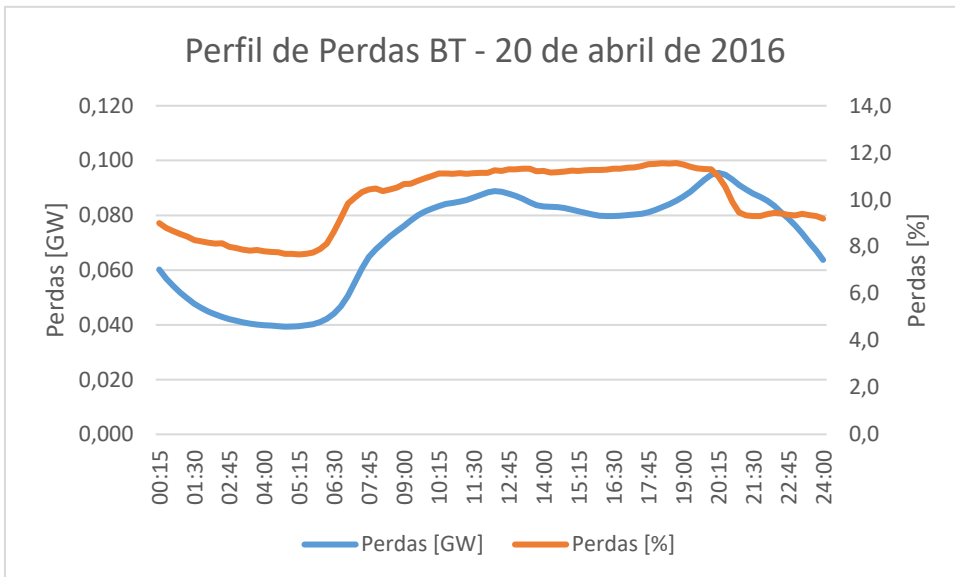
Este perfil tem por base uma estimativa de perdas na energia ativa dos consumidores finais, para cada nível de tensão, e é calculado pelo operador de rede e aprovado e regulado pela ERSE. Este serve, ainda, como referência para determinar as perdas elétricas, como forma de regular a distribuição de energia.

O Regulamento de Acesso às Redes e às Interligações (RARI) é o responsável pelo ajustamento das perdas, para os valores de energia ativa dos consumos previstos e para os valores do preço das tarifas.

A estimativa de perfis de perdas elétricas em baixa tensão, elaboradas pelo operador de rede, e aprovadas pelo regulador ERSE, tem por base um diagrama de carga. O estudo apresentado a seguir, representa o perfil de perdas globais do ano de 2016 (figura 23), no qual foram analisados quatro dias típicos de cada estação do ano, figura 19 a 22. A percentagem de perdas apresentada no gráfico representa a razão entre as perdas de energia e o consumo realizado num determinado período de tempo [52][53].



**Figura 19 - 17 fevereiro de 2016, dia típico de inverno (dia de maior ponta)**



**Figura 20 - 20 de abril de 2016, dia típico de primavera**

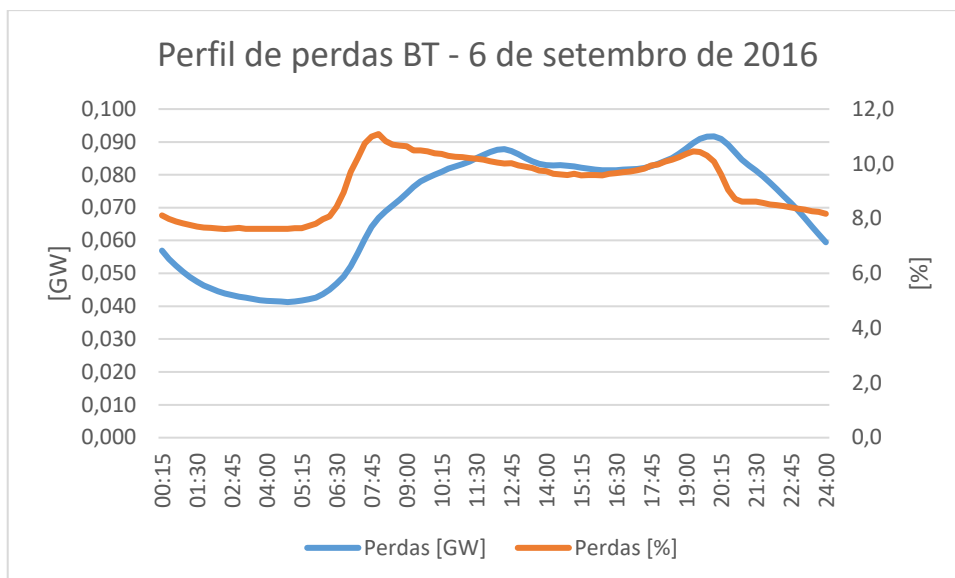


Figura 21 - 6 de setembro 2016, dia característico de verão.

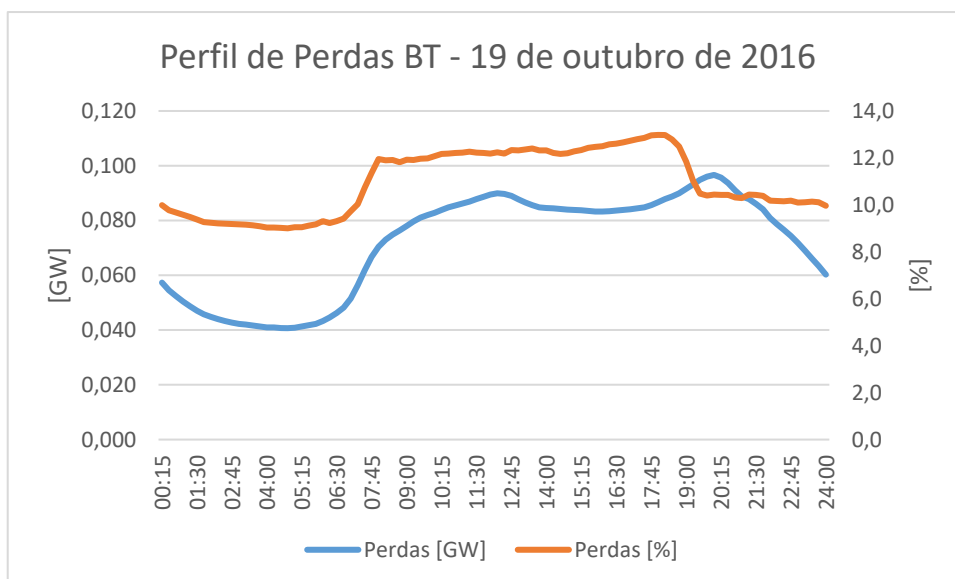
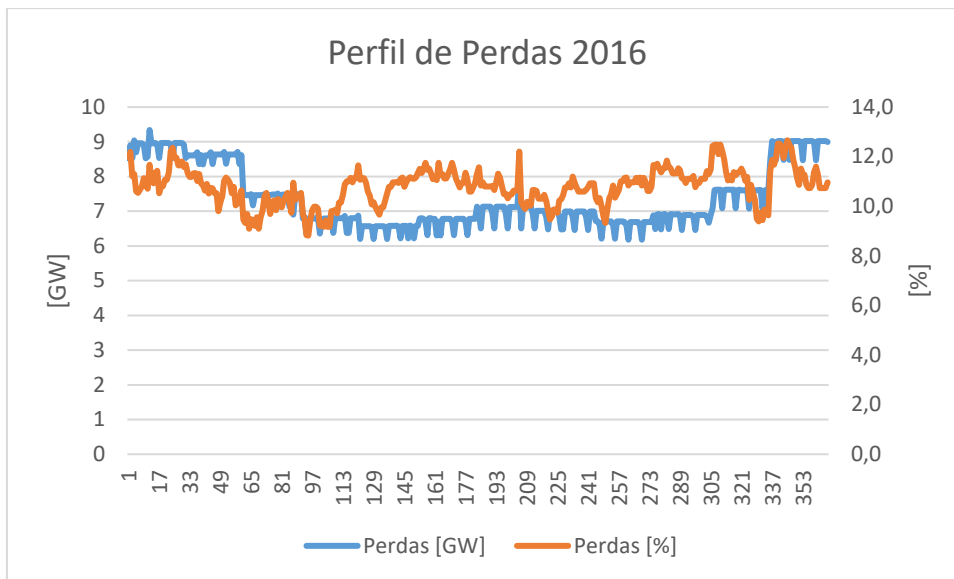


Figura 22 - 19 de outubro de 2016, dia típico de outono.



**Figura 23 - Perfil de perdas do ano de 2016**

Por último, um estudo do perfil de perdas para o ano de 2016, comparando a energia de perdas durante os dias do ano, de 1 de janeiro a 31 dezembro de 2016.

# 5. CASOS DE ESTUDO – COM RECURSO A PROGRAMAS DA EDP

O capítulo que se segue pretende estudar casos de reclamações de consumidores quanto à qualidade de serviço prestada pelo operador de rede. Este surgiu em resultado do estágio realizado na EDP Distribuição entre fevereiro e julho de 2017. Para melhor compreender este capítulo, foram introduzidos não só os *softwares* utilizados pela empresa, mas também algumas das atividades realizadas durante o estágio curricular.

## 5.1. ATIVIDADES COMPLEMENTARES DESENVOLVIDAS

Durante o estágio curricular foram adquiridos conhecimentos complementares, os quais permitiram um conhecimento prático da temática em estudo. Este estágio curricular decorreu na Área Operacional de Viana do Castelo, onde durante cinco meses foram realizadas as seguintes atividades: contacto e exploração do sistema elétrico, abordagem de *softwares* de gestão e planeamento, comissionamento e colocação ao serviço de postos de transformação (PT), deteção de avarias, recolha de dados no terreno, acompanhamento no terreno de obras/manutenção, entre outras atividades que, direta ou indiretamente, contribuíram para uma aprendizagem sobre os sistemas elétricos de energia.

### 5.1.1. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NO TERRENO

Durante o estágio, a segurança foi o pilar principal, tanto a própria segurança, como a do outro, tendo sido o principal ponto em todas as atividades realizadas. Foi, ainda, proporcionada a participação num simulacro, para a compreensão e a aprendizagem de como atuar perante uma situação de emergência (Anexo A). Observar todas as etapas dos diversos processos é, por isso, fulcral para que o risco a que cada um esteja sujeito, seja mínimo. Para garantir que haja segurança aquando de uma operação na rede elétrica, deve delimitar-se a

área de trabalho, usar equipamento próprio de segurança, isolar a instalação ou o local de trabalho (de forma a não existir qualquer fonte de tensão), utilizar proteções por encravamento mecânico, para prevenir possíveis religações do sistema elétrico, garantindo um bloqueio dos órgãos de corte ou seccionamento.

Este estágio permitiu, também, o contacto com todos os componentes do SEE, nomeadamente postos de transformação (PT), redes elétricas de baixa tensão (BT) e média tensão (MT), entre outros. Estes foram determinantes para perceber todo o funcionamento da rede elétrica, quer o conhecimento dos diversos componentes, quer a forma como são usados. Foi, também possível, a observação de manobras efetuadas nos postos de transformação, como a troca de fusíveis em células modulares ou BRA (Anexo B), ou a alteração da posição do comutador de tomadas (Anexo C) para colmatar alguns problemas de tensão em redes elétricas de baixa tensão. Foi possível executar a medição de terras, terra de serviço e terra de proteção (Anexo D) de diversos postos de transformação, para um controlo e garantia de valores regulamentares. Caso contrário, é necessário prever a reposição em caso de valores não aceitáveis. Durante o estágio surgiu, também, a oportunidade do acompanhamento de vários comissionamentos de postos de transformação, quer aéreos quer de cabina baixa, bem como a colocação dos mesmos ao serviço, sendo para isso necessário a execução de uma ordem de manobras em contacto telefónico com o centro de comando e controlo das redes da EDP do Porto, onde se procederam a diversas manobras e operações para uma correta entrada ao serviço dos vários postos de transformação.

O acompanhamento da reparação de avarias foi, também, uma constante durante o estágio curricular, nomeadamente avarias de postos de transformação, avarias nos condutores aéreos ou subterrâneos. Nos postos de transformação foi proporcionada a oportunidade de observar, a troca de um transformador avariado por um novo, este com determinados processos chave, como a consignação das linhas de MT, o uso de um gerador para colmatar a falta de transformador na rede elétrica de baixa tensão, entre outras tarefas fulcrais para o desenvolvimento da operação de troca do transformador.

Para detetar avarias de condutores subterrâneos foram utilizados dispositivos de deteção de avarias, como o RD4000, ou um método de deteção de vibrações no solo. Para o uso destes dois dispositivos foi necessário a consignação do cabo, como forma de proteger as pessoas e os equipamentos. O RD4000 (Anexo E) é um aparelho usado para detetar o campo

magnético ao longo do cabo, onde é induzida uma determinada frequência no condutor em defeito, e é seguido o percurso do cabo através do dispositivo, até encontrar o defeito. Este aparelho serve também para detetar o traçado do condutor, facilitando a sua localização. Quando a localização do defeito do condutor em avaria é de difícil deteção, mesmo com o recurso ao aparelho RD4000, aplica-se um outro método, o método de deteção de vibrações no solo, que tem por base um dispositivo, que injeta ondas de choque no condutor. Deste modo, no local do defeito há um arco elétrico que produz um sinal acústico, que se propaga no solo. Só assim, através de um geofone, é possível perceber a localização aproximada do defeito [37].

### **5.1.2. ABORDAGEM AO SOFTWARE UTILIZADO**

Com o intuito de resolver os vários problemas que a rede elétrica compreende, foram usados *softwares* como o SIT, *Dplan (Distribution-Planning)*, folhas de cálculo em Excel, entre outros.

A plataforma SIT é uma base de dados que comporta toda a rede elétrica nacional. Esta possui uma base cartográfica e topográfica que permite a perceção e posicionamento de cada componente na rede elétrica.

O *Dplan* é uma ferramenta de planeamento e operação em redes de distribuição de energia elétrica com diversas funcionalidades. Este *software* é um apoio na tomada de decisões por parte do operador de rede, pois permite construir uma rede elétrica, tendo por base uma cartografia militar, simular o trânsito de potências, estudar os parâmetros de qualidade de energia, como os parâmetros de tensão, corrente, entre outros. O *Dplan* tem, ainda, a particularidade de poder interagir com a base de dados SIT-DM (Sistema de Informação Técnico - *Design Manager*), sendo assim possível exportar uma rede elétrica para um ficheiro compatível com o *Dplan* (formato .dpx), para mais tarde importar para o *Dplan*.

O Investe, programa de análise económica de investimentos, é outra ferramenta usada pela EDP Distribuição. Esta folha de cálculo permite estimar os custos de investimento para a proposta em causa através do cálculo dos indicadores económicos como o Benefício/Custo (B/C), Valor Atualizado Líquido (VAL) e Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) [51].

Estes *softwares*, usados pela EDP Distribuição para análise dos diversos estudos, são determinantes para um bom acompanhamento de redes elétricas.

Com base nos *softwares* apresentados foram efetuados alguns estudos que levaram à colocação de analisadores de tensões, à realização de levantamentos (recolha de dados no terreno) da rede elétrica, como redes elétricas de baixa tensão em condutores torçados ou condutores nus. Estudos estes na sequência de reclamações por parte de clientes. Sucederam-se, assim, os estudos desses levantamentos no sentido de compreender o motivo da reclamação, na tentativa de resolução da mesma. Estes estudos foram incorporados no programa de estudos de melhoria da qualidade de serviço e no programa redução de perdas técnicas BT.

Todas estas atividades desenvolvidas durante o estágio curricular permitiram um conhecimento direto e indireto dos sistemas elétricos de energia, que proporcionaram um estudo dos diversos componentes da rede elétrica, bem como os seus processos, levando a uma melhor interpretação de todo o SEE, o que contribui para aprofundar conhecimentos valiosos para a realização da dissertação, especialmente o estudo de casos reais de perdas de energia elétrica na rede elétrica BT.

## **5.2. CASOS DE ESTUDO**

O estudo de uma rede elétrica BT, por parte do operador de rede, pressupõe uma reclamação a existência de uma reclamação ou um pedido de ligação à rede elétrica.

Neste subcapítulo serão apresentados dois estudos de perdas de energia elétrica, que tem por base um pedido de ligação à rede e uma reclamação por níveis de tensão irregulares.

### **5.2.1. PEDIDO DE LIGAÇÃO À REDE ELÉTRICA**

O caso de estudo que se segue tem por base um pedido de ligação à rede elétrica (PLR). Para inserir o consumidor na rede, deve ser efetuada uma análise da rede elétrica da área em questão. O cliente pretende ligar-se com uma potência de 6,9 kVA na freguesia de Merufe, no concelho de Monção, distrito de Viana do Castelo.

### 5.2.1.1. ANÁLISE DO PEDIDO

Para analisar o pedido procedeu-se ao levantamento da rede elétrica, onde foi verificada a proximidade do ramal de ligação e a qualidade de energia elétrica. Para tal, em gabinete, averigua-se se a rede elétrica está na base de dados SIT. Caso esta rede não faça parte da base de dados do SIT, procede-se ao levantamento no terreno da rede elétrica BT. Este levantamento tem origem nos postos de transformação (PT), seguindo-se o registo dos diversos ramais existentes na rede elétrica, das cargas e as suas potências contratadas. O levantamento deve ser o mais completo e rigoroso possível, tendo em certas situações de se proceder ao levantamento das redes elétricas vizinhas (outro PT circundante).

Neste caso, a área em que o cliente se pretende inserir encontra-se na plataforma SIT-DM. Verifica-se que o posto de transformação que serve a rede elétrica em que o cliente pretende ser inserido é o posto de transformação PT MNC 020 – Granja de Baixo, como apresentado na figura 24.

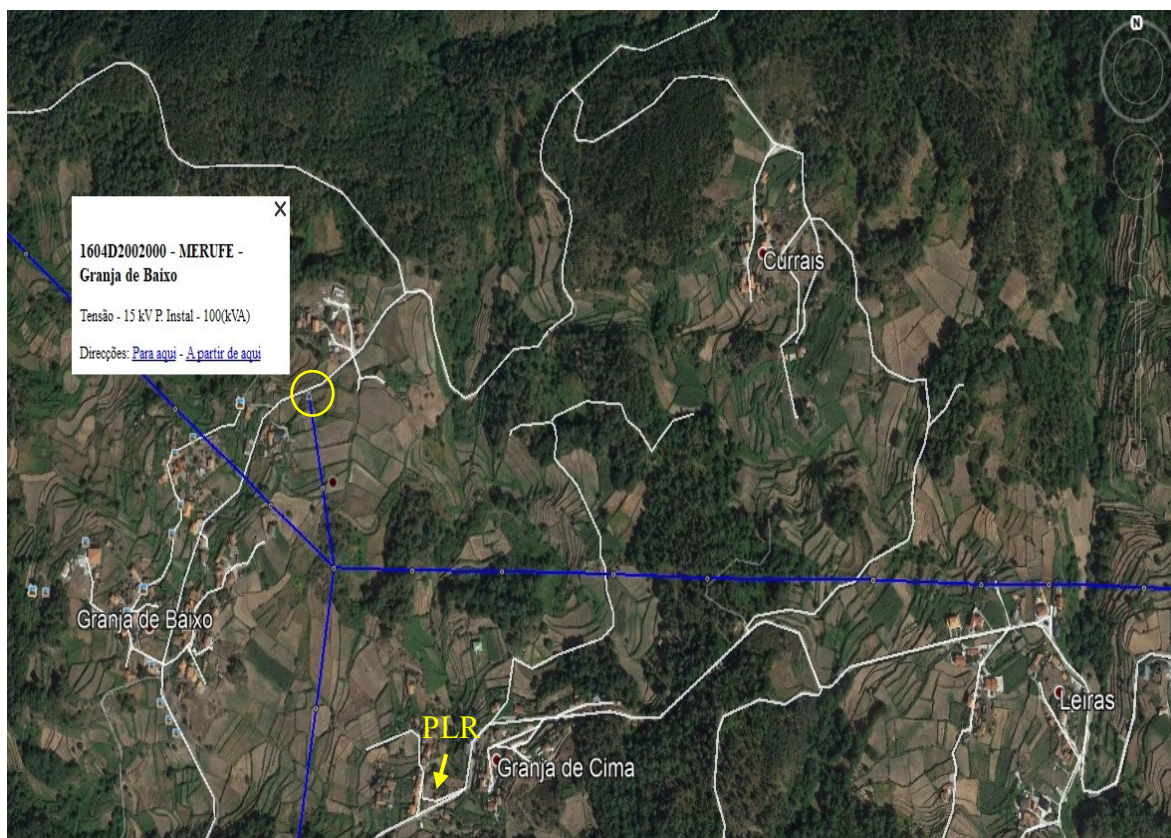


Figura 24 - Localização do PLR e do posto de transformação

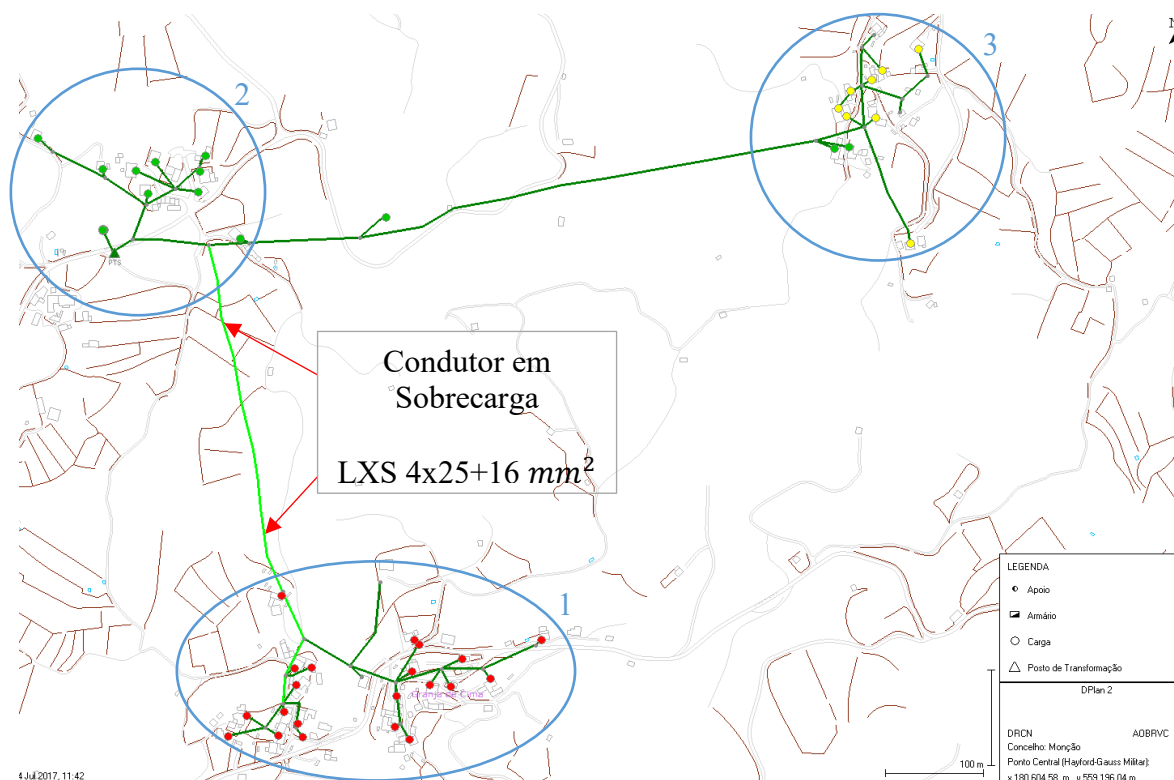
### 5.2.1.2. ESTUDO *DPLAN*

Após a localização do PT segue-se o estudo da rede elétrica com recurso ao *software Dplan*. Como neste caso a rede elétrica se encontra na plataforma SIT, procede-se à exportação de um ficheiro com recurso à aplicação SIT-DM, para importação da rede elétrica para o *software Dplan*. Findo este processo, é necessário configurar os parâmetros do *Dplan* para avaliar o nível da queda tensão máxima admissível na rede, que deverá ser inferior a 8%, como estabelecido no RSRDEEBT.

Uma vez que é difícil aferir com exatidão a fase em que os consumidores estão ligados, tanto no levantamento no terreno, como na rede elétrica da plataforma SIT, a simulação da rede elétrica no *Dplan* é realizada em condições ideais, isto é, com igual distribuição igual das cargas pelas diversas fases, o que faz com que a corrente no neutro seja nula ou mínima e, por isso, não haja desequilíbrio. Será uma situação próxima da realidade.

Como ilustrado na figura 25, esta rede elétrica de baixa tensão caracteriza-se por ter três centros de cargas dispersos, afastados entre si, o que suscita a atenção para problemas como quedas de tensão ou perdas técnicas. O posto de transformação possui duas saídas do quadro geral, mas para este estudo, apenas foi considerada uma das saídas do quadro geral - a saída que alimenta a zona onde é feito o pedido.

De notar que a rede elétrica BT está construída, maioritariamente, em terrenos privados ao invés de instalada na via pública. Este facto é relevante, uma vez que qualquer alteração à rede elétrica só deveria ser feita na via pública, procurando não se proceder a alterações em redes elétricas em locais privados.



**Figura 25 - Situação inicial do estudo em *Dplan***

Como se vê na figura 25, estão representados três centros de carga distintos, da mesma canalização principal de saída do posto de transformação. No centro de carga 2, a cor verde indica que os parâmetros de variação de tensão estão dentro dos valores estipulados pelo RSRDEEBT. No centro de cargas 3, a cor amarela indica que os valores estão próximos do valor limite de variação de tensão regulamentar. Já na zona 1, há um predomínio da cor vermelha, o que significa que estas cargas ultrapassam os limites máximos de variação de quedas de tensão (8%), sendo, por isso, necessário um estudo desta zona de cargas.

O facto de existir um condutor elétrico que ressalta sobre o resto dos condutores (condutor em sobrecarga, indicado na figura 25), antecipa que este está em sobrecarga (cor produzida no programa). É necessária uma abordagem cuidada a esta canalização principal, já que é o condutor que alimenta o centro de cargas 1, onde se localiza o PLR.

### **5.2.1.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ESTUDO *DPLAN***

Uma vez simulada a rede elétrica, procede-se à análise do relatório produzido pelo *software*. Este relatório é em formato Excel e permite a análise de diversos dados, como dados

estatísticos da rede, tipo de condutores utilizados, o desempenho da rede elétrica, a carga a que está sujeita, o trânsito de energia, etc.

**Tabela 4 - Resultados do estudo *Dplan***

<b>Desempenho Saída:</b>	<b>Novo Consumidor</b>	
Ponta na saída (BT)	61,50	kW
Potência de microgeração (BT)	-	kW
Variação de tensão máxima (BT)	29,25	%
Restrição de Potência por v.d.t. Não Regulamentar (BT)	48,20	kW
Potência de Perdas (BT)	15,42	kW
Energia Anual de Perdas (BT)	10,53	MWh
Energia Anual Não Fornecida (ENF)	21,19	kWh

Como ilustrado na tabela 4, a variação da queda de tensão máxima na rede elétrica é de 29,25%, muito acima dos valores regulamentares permitidos pelo RSRDEEBT. O PLR apresenta uma variação de tensão de 28,1%. Estes valores requerem um estudo mais detalhado para a resolução das quedas de tensão apresentadas no presente caso em estudo.

#### **5.2.1.4. PROPOSTA DE RESOLUÇÃO**

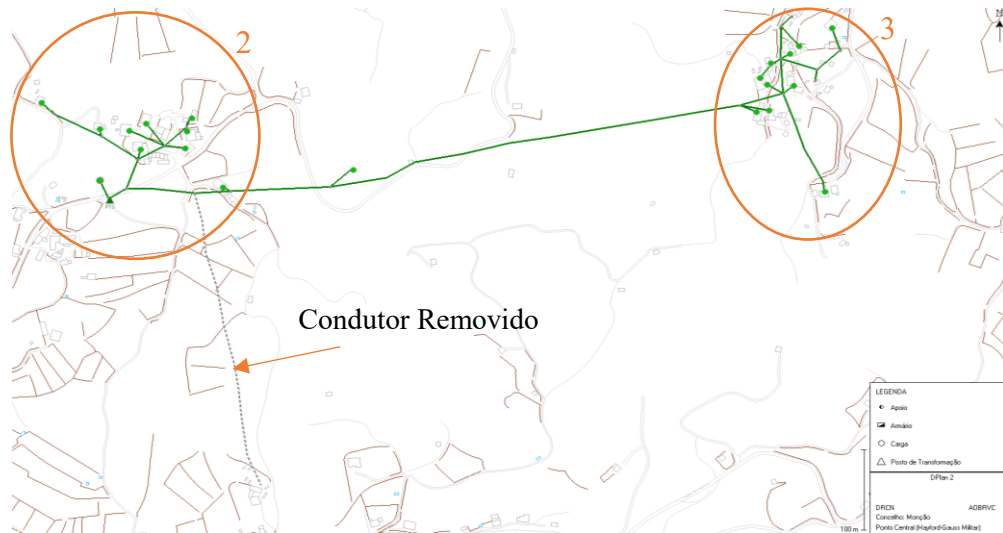
A primeira abordagem seria proceder a uma transferência de cargas para a rede de um outro posto de transformação próximo de forma a equilibrar as mesmas. Mas, uma vez que a zona em estudo é uma zona rural e montanhosa, onde há poucas opções de postos de transformação (o mais próximo dista, em campo aberto, 1400 metros) e não existe rede elétrica BT entre os dois postos de transformação, verifica-se a impossibilidade desta opção.

Segue-se uma outra solução, a troca do condutor em sobrecarga (LXS 4x25 +16) (selecionado na figura 25) por um condutor de uma secção maior, tendo em vista para colmatar o facto de este condutor estar em sobrecarga e tentar reduzir da queda de tensão. Esta hipótese, também não é viável, uma vez que se procura não proceder a remodelações de rede BT em terreno privado.

A terceira opção para resolver a sobrecarga da zona de carga 1, seria a elaboração de uma nova canalização principal pela via pública, desde o PT até ao centro de cargas na zona 1. Esta opção é também inviável, já que a distância pela via pública do PT à zona de cargas a abastecer, é sensivelmente 1300 metros, o que torna inviável a instalação desta canalização principal.

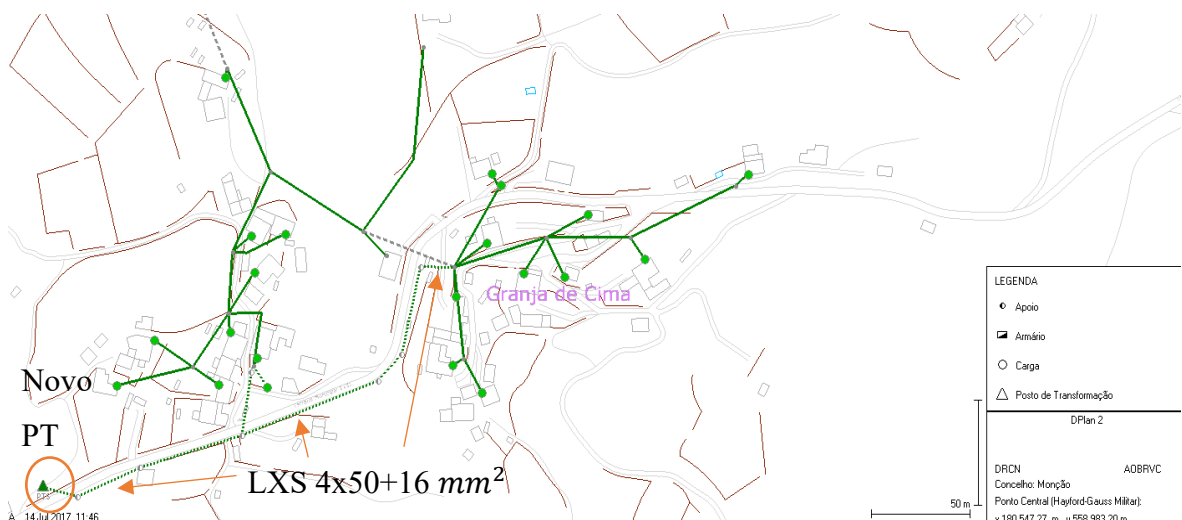
Segue-se, então, a quarta opção, que passa por isolar a zona de cargas 1, com a construção de um novo posto de transformação junto da mesma.

É necessária a remoção do condutor (figura 26), alimentado pelo PT MNC 020, de forma a isolar a zona 1, para que este possa ser alimentado pelo novo posto de transformação.



**Figura 26 - Proposta resolução zona 2 e 3**

Com a remoção do condutor em sobrecarga, verificam-se melhorias no centro de cargas 3, alimentado pelo PT existente. A zona 3, que apresentava valores de variação de tensão máxima de 6,78%, após a remoção do condutor em sobrecarga, apresenta uma variação máxima de tensão de 4,17%. Este valor garante uma boa qualidade de serviço das zonas 2 e 3.



**Figura 27 - Proposta resolução zona 1**

Quanto à construção do novo posto de transformação, optou-se primeiro por escolher um local de instalação, este junto da via pública e o mais perto da linha de média tensão como forma de reduzir os custos de construção de rede elétrica MT. O posto de transformação terá uma potência instalada de 50 kVA e será do tipo aéreo, com seccionador, PT AS 50 kVA.

Segue-se agora, a construção de uma canalização principal BT para a alimentação de cargas pela via pública (a tracejado na figura 27). Para o condutor da canalização principal foi escolhida uma secção de LXS de  $50 \text{ mm}^2$ , LXS  $4 \times 50 + 16 \text{ mm}^2$ , sendo que a restante rede não sofreu alteração. O novo consumidor será alimentado por um condutor LXS  $2 \times 16 \text{ mm}^2$ .

Como é possível verificar pela figura 27, o centro de cargas que é alimentado pelo novo posto de transformação, passou à cor verde. Esta indica que os parâmetros da variação de tensão estão dentro dos valores regulamentares permitidos pelo RSRDEEBT.

Assim, a solução apresentada é eficaz para a resolução dos problemas de variação de tensão apresentada pela primeira simulação no *software Dplan*.

#### **5.2.1.5. ANÁLISE DOS NOVOS RESULTADOS DO ESTUDO *DPLAN***

Com as alterações efetuadas na rede elétrica em estudo, verifica-se uma melhoria significativa da variação de tensão e, também, a redução de perdas técnicas, garantindo assim boas condições de exploração da rede elétrica em questão.

A tabela 5, apresenta os resultados obtidos quer da saída existente do PT MNC 020, que alimenta a zona de cargas 2 e 3, quer do novo posto de transformação que alimenta a zona de cargas 1.

**Tabela 5 - Resultados da proposta em estudo *Dplan***

<b>Desempenho da Saída</b>	<b>PT MNC 020</b>	<b>Novo PT</b>	
Ponta na saída (BT)	20,80	37,1	kW
Potência de microgeração (BT)	-	-	kW
Variação de tensão máxima (BT)	4,17	5,93	%
Restrição de Potência por v.d.t. Não Regulamentar (BT)	0	0	kW
Potência de Perdas (BT)	0,27	2,06	kW
Energia Anual de Perdas (BT)	0,19	1,41	MWh
Energia Anual Não Fornecida (ENF)	4,06	5,70	kWh

É necessário destacar a redução da variação de tensão, que apresentava valores máximos de 29,25%, e que, após alterações na rede elétrica, apresenta uma variação máxima de tensão de 4,17% para a saída do PT MNC 020, e 5,93% no novo posto de transformação. Estes valores encontram-se abaixo dos 8% imposto pelo RSRDEEBT.

A proposta a cima apresentada é então uma boa solução, visto que os clientes da rede elétrica BT em causa têm uma má qualidade de energia elétrica e a adoção desta solução permite restabelecer os parâmetros de qualidade de energia na rede elétrica.

Ressalva-se, ainda, que as perdas elétricas na rede anterior (tabela 4) apresentavam uma energia anual de perdas de 10,53 MWh/ano. Com a proposta de alteração da rede elétrica, o PT MNC 020 apresenta uma energia anual de perdas de 0,19 MWh/ano e o novo posto de transformação apresenta uma energia anual de perdas de 1,41 MWh/ano, tabela 5. Posto isto, a soma das energias de perdas anual da rede elétrica em estudo é de 1,6 MWh/ano, o que implica uma redução de 84,8% de energia anual de perdas, face à rede inicial.

#### **5.2.1.6. VIABILIDADE DA PROPOSTA APRESENTADA**

Findo o estudo da rede elétrica no *software Dplan* e analisando detalhadamente o relatório Excel que o próprio produz, faz-se a análise económica do projeto. Para isso, é usada a folha de cálculo “Investe”.

É necessário definir os parâmetros de vida útil esperada no projeto. No caso de uma remodelação de uma rede elétrica BT, esta tem uma perspectiva de vida útil contabilística de vinte e cinco anos, no caso de um investimento em novos postos de transformação, o projeto tem uma perspectiva de vida útil de trinta anos. Assim sendo, e dado que neste caso optou-se pela instalação de um novo posto de transformação, procede-se à análise ao nível económico para o desenvolvimento da proposta do projeto. Desta forma, inserem-se os materiais necessários à realização do projeto e a folha de cálculo estima o seu valor e calcula o valor total do investimento. É importante referir que, todos os valores estimados contêm mão de obra e custos inerentes à sua instalação. Neste projeto foi necessário o investimento num novo posto de transformação, na ordem dos 6 600 €, o investimento na rede elétrica MT para alimentar o PT, na ordem dos 4 200 € e, por fim, um investimento na realização de uma rede elétrica de baixa tensão de 2 700 €.

Em seguida, se se tratar de um estudo sobre as perdas técnicas, introduzem-se os resultados da energia anual de perdas BT (kWh), quer o valor da situação inicial, quer o valor após a aplicação da solução proposta, obtidos no relatório do *Dplan*, na folha de cálculo *Investe*. Por outro lado, se se tratar de estudo de melhoria da qualidade de serviço, para além de se introduzir o valor da energia anual de perdas BT (kWh), insere-se, também, o valor da restrição de potência por variação de tensão (kW) na folha de cálculo *Investe*. Após serem inseridos estes valores, prossegue-se à análise técnico-económica do projeto através da folha de cálculo obtida no programa.

Este estudo tem um investimento total de 13 500 € e, no caso de ser considerado no âmbito do programa de redução de perdas técnicas BT, este apresenta um benefício/custo (B/C) de 0,7 p.u., um Valor Atual Líquido (VAL) de -5 468€, e uma Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) de 5,13 %. Caso este estudo seja considerado no âmbito de estudos de quedas de tensão na rede BT, apresenta o mesmo investimento na rede elétrica BT e apresenta como B/C 11,19 p.u, um VAL 184 088 € e um TIR de 87,89%.

A EDP Distribuição foca-se no benefício/custo para a aprovação de estudos. Cada ano, consoante a verba disponibilizada para projetos de recuperação ou reforço de ativos em exploração, ou consoante o volume de projetos em estudo, EDP Distribuição coordena os projetos que serão aprovados. No presente ano, o B/C mínimo para o programa de perdas técnicas BT é de 0,5 p.u. e para o programa de redução de quedas de tensão é de 6,94 p.u. para a aprovação do projeto [21].

Em conclusão, o estudo em cima apresentado teria cabimento, quer no programa de redução de perdas técnicas, quer no programa de redução de quedas de tensão.

### **5.2.2. PROBLEMA DE TENSÃO NA INSTALAÇÃO ELÉTRICA**

Este caso de estudo tem por base uma reclamação de um consumidor devido a problemas de tensão na instalação elétrica, cuja potência contratada é de 6,9 kVA. Esta reclamação tem lugar na freguesia de São Martinho da Gandra, no concelho de Ponte de Lima, distrito de Viana do Castelo.

### 5.2.2.1. ANÁLISE DO PEDIDO

A análise desta reclamação requer um estudo do local onde o reclamante se encontra inserido, como forma de perceber qual o posto de transformação pelo qual é alimentado e a rede elétrica em que está inserido. O posto de transformação que o alimenta é o PT PTL 029, existindo nas proximidades uma outra rede alimentada por outro posto de transformação, o PT PTL 201, como representado na figura 28.



**Figura 28 - Localização da 1ª e 2ª reclamação e dos postos de transformação**

Ao abordar a reclamação é importante pesquisar se há mais algum caso similar na rede elétrica alimentada pelo mesmo posto de transformação (PT). Constatou-se que a zona onde está inserido o reclamante já recebeu reclamações de um outro consumidor em 2011 (1ª reclamação). Nesse mesmo ano, foi feito um levantamento no terreno da rede elétrica em

causa (anexo F), tendo sido, também, colocado um analisador de tensões na sua instalação, na qual se verificou a presença de variações de tensão que não respeitavam a NP EN 50160 (anexo G). Aquando da primeira reclamação procedeu-se à troca da alimentação do 1º reclamante, que deixou de ser alimentado pelo PT PTL 029, e passou a ser alimentado pelo posto de transformação PTL 201.

Dada a primeira reclamação, há necessidade de verificar o motivo da mesma, para depois se proceder à análise da segunda reclamação, realizada em 2016. Procede-se, assim, ao contacto com o cliente para a instalação do equipamento para a análise da variação da tensão na instalação, nomeadamente um analisador de tensões (*eletrocorder*).

### 5.2.2.2. ANÁLISE ELETROCODER

O *eletrocorder* é colocado pelo operador de rede elétrica, sendo ligado a uma tomada da instalação durante um período mínimo de uma semana. O analisador faz o registo a cada dez minutos dos valores de tensão mínima, média e máxima. Assim, no final da análise da energia da rede elétrica em que o consumidor está inserido, os dados são carregados no *software eletrosoft*, para uma análise mais detalhada.

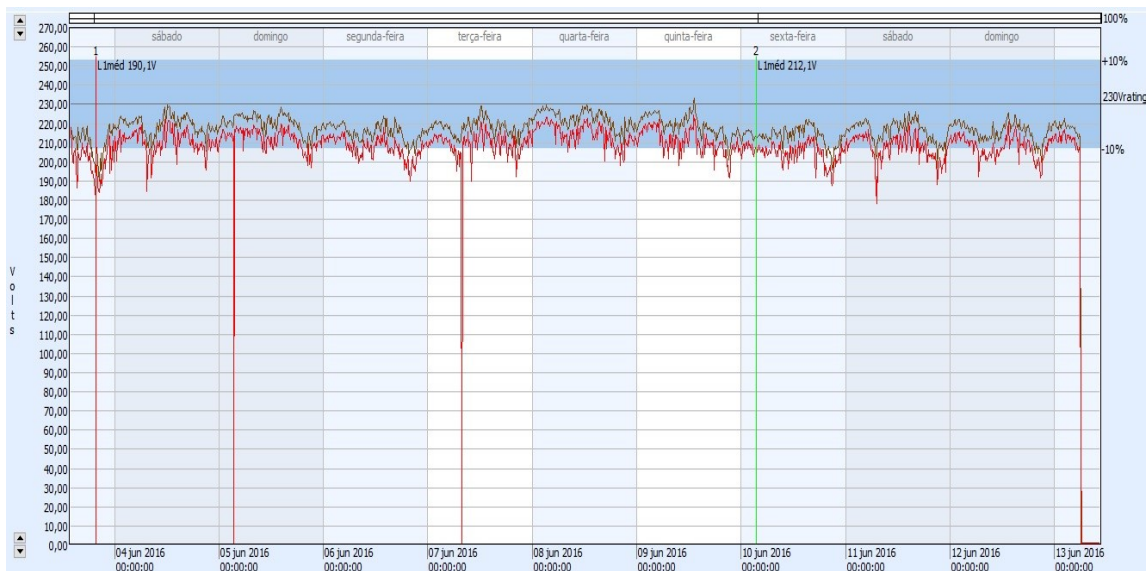


Figura 29 - Resultados do analisador de tensões – Análise *eletrosoft*

Na figura 29 percebe-se a existência de algumas oscilações de tensão na instalação do consumidor. O vermelho representa os valores mínimos de tensão e o castanho os valores médios da tensão.

É perceptível que os valores da variação de tensão estão fora dos valores regulamentares, impostos pela NP EN 50160, representada na figura pela barra azul, onde apresentam os níveis de tensão máximos variáveis de  $\pm 10\%$ , tendo por base a tensão nominal de 230 V.

O *software Eletrosoft* apresenta como valores de tensão:

- $V_{\text{mínimo}} = 179,8 \text{ V}$
- $V_{\text{média}} = 214,3 \text{ V}$
- $V_{\text{máxima}} = 230,5 \text{ V}$

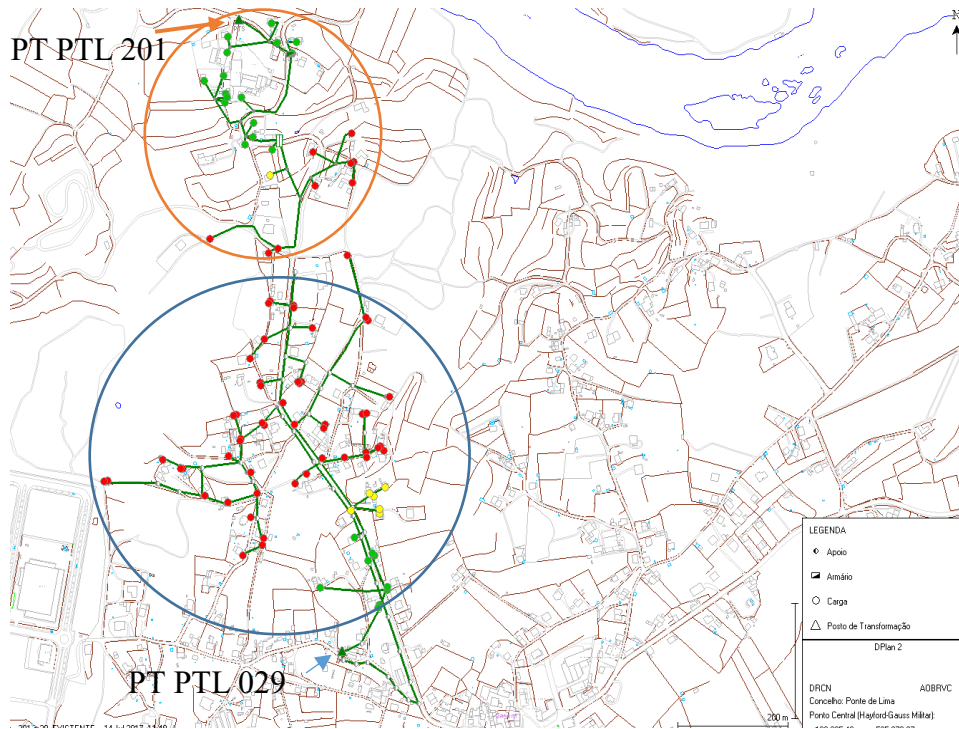
Assim, é possível perceber que os valores de variação de tensão da instalação elétrica do consumidor não se encontram no intervalo regulamentado, verificando-se a legitimidade da reclamação do consumidor.

### 5.2.2.3. ESTUDO *DPLAN*

Segue-se o estudo da rede elétrica em causa no *software Dplan*. Para isso, é necessária a transcrição da rede elétrica para esse *software*. Como esta rede não se encontra na plataforma SIT, é necessário o levantamento no terreno. Esse levantamento foi feito por um colaborador da EDP em 2011 (anexo F), mas como esta rede foi sofrendo alterações até à nova reclamação (como a substituição de linhas de condutores nus para condutores torçados LXS), há que ter em conta essas mesmas alterações, para uma simulação o mais próximo do real possível. É também necessário proceder ao levantamento da rede elétrica adjacente, esta alimentada pelo PT PTL 201.

Como ilustra a figura 30, existem duas redes elétricas de baixa tensão, sendo que o círculo laranja representa a rede elétrica do PT PTL 201 (rede adjacente à rede em estudo) e com um círculo azul, a rede em estudo, a rede do posto de transformação PT PTL 029.

O posto de transformação que alimenta a rede elétrica em estudo, possui três saídas do transformador, mas para este caso de estudo, apenas se procede ao estudo de duas das saídas do quadro geral.



**Figura 30 - Situação inicial do estudo em *Dplan***

De notar que apesar de a rede elétrica BT estar construída na via pública, alguns dos ramais da rede elétrica, encontram-se em terrenos privados.

Como se observa na figura 30 estão representadas duas redes elétricas. As duas à primeira vista aparentam problemas de quedas de tensão, dada a mancha vermelha, que simbolizam cargas com variação de tensão acima do estipulado pelo RSRDEEBT. A rede elétrica do PT PTL 201 apresenta menos cargas com variação de tensão acima do máximo de variação de quedas de tensão, já a rede elétrica do PT PTL 029 apresenta um maior aglomerado de cargas com variações de tensão acima do máximo de variação de quedas de tensão (8%). É, por isso, necessário um estudo desta zona de cargas simbolizadas com a cor vermelha.

#### 5.2.2.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ESTUDO *DPLAN*

Uma vez que a rede elétrica já está simulada, procede-se à análise dos diversos dados produzidos em relatório pelo *software Dplan*.

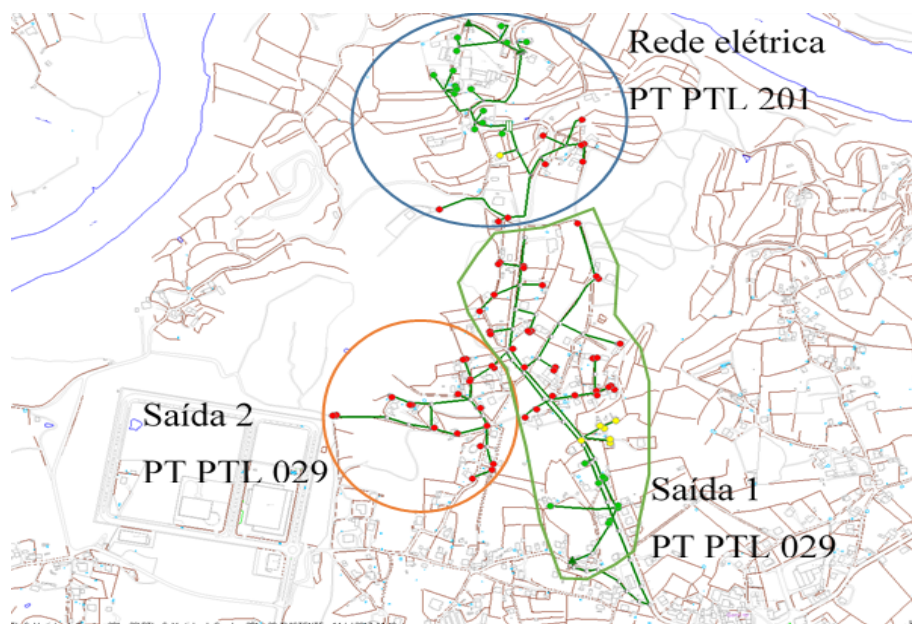
**Tabela 6 - Resultados do estudo *Dplan***

<b>Desempenho: Saída</b>	<b>1 - PT 029</b>	<b>2 - PT 029</b>	<b>PT 201</b>	
Ponta na saída (BT)	62,40	34,00	43,50	kW
Potência de microgeração (BT)	-	-	-	kW
Varição de tensão máxima (BT)	12,48	16,77	13,05	%
Restrição de Potência por v.d.t. Não Regulamentar (BT)	24,30	25,10	18,00	kW
Potência de Perdas (BT)	7,03	5,24	4,48	kW
Energia Anual de Perdas (BT)	4,80	3,58	3,06	MWh
Energia Anual Não Fornecida (ENF)	16,53	8,49	7,54	kWh

Como ilustrado na tabela 6, existem três resultados de três saídas do quadro geral de dois postos de transformação diferentes. Assim, analisa-se primeiramente, o posto de transformação da rede elétrica em estudo, onde foram estudadas duas saídas do quadro geral, uma delas a que alimenta o reclamante.

O reclamante está inserido na saída 1 do PT PTL 029, que apresenta uma saída onde a variação da queda de tensão máxima é de 12,48%, valor que está acima dos valores regulamentares permitidos pelo RSRDEEBT para uma rede elétrica BT. O reclamante tem uma variação de tensão de 10,51%, valor de variação de tensão que, também, se encontra fora dos limites regulamentares permitidos pelo RSRDEEBT e pela norma NP EN 50160.

Foi, também, estudada a saída 2 do PT PTL 029 (circulo laranja da figura 31), que apresenta como resultados da variação máxima de tensão 16,77%, valores que estão, novamente, acima dos valores regulamentares, provados na figura 31 pelo domínio cor vermelha.



**Figura 31 – Situação inicial das saídas do PT PTL 029 e do PT PTL 201**

Com o estudo das duas saídas do posto de transformação PT PTL 029 e da rede elétrica vizinha alimentada pelo PT PTL 201 e, dado que os valores de queda de tensão estão acima dos valores regulamentares, levou à descoberta de mais cargas com variações de tensão superiores aos limites regulamentares.

#### **5.2.2.5. PROPOSTA DE RESOLUÇÃO**

A primeira opção seria proceder a uma transferência de cargas para a rede elétrica mais próxima, neste caso, o posto de transformação PT PTL 201. Contudo, também este faz parte do estudo apresentando quedas de tensão, sendo, por isso, esta opção inviável.

Segue-se outra opção, o aumento de secção dos condutores dos ramais da rede elétrica. Na rede elétrica do PT PTL 201 até apresentaria bons resultados, mas no caso da rede elétrica do PT PTL 029 acaba por não chegar para colmatar todas as cargas da rede elétrica, continuando, por isso, a existir cargas com variações de tensão superior a 8%. A opção pela remodelação da rede elétrica do PT PTL 201, com o aumento de secção dos ramais principais, fica, assim, aberta para futuras reestruturações.

A terceira opção será a construção de um novo posto de transformação num local estratégico de forma a compensar as variações de tensão, pois existem dois postos de transformação distantes das zonas com maiores problemas que não suprimem as necessidades. É, assim,

necessário proceder à escolha do melhor local para construção do novo posto de transformação, de forma a melhorar as condições de serviço das redes em estudo. É importante referir que há a preocupação em reduzir os custos de construção do ramal de média tensão (MT), e que, por isso, têm em conta o apoio de média tensão mais próximo para a escolha do local ideal. Finda a escolha do local, segue-se a escolha do posto de transformação. Neste caso foi escolhido um posto de transformação aéreo com seccionador, com uma potência instalada de 100 kVA, PT AS 100 kVA.

Na rede elétrica do PT PTL 029 não existe a necessidade de remodelação da rede, o posto de transformação é, então, inserido junto ao centro de cargas (figura 32) e requer, apenas, a instalação do mesmo e ligação à rede elétrica. Existe, ainda, a necessidade de inativar a saída dois do transformador, uma vez que esta servia unicamente um dos ramais, agora alimentados pelo novo posto de transformação.



**Figura 32 - Proposta resolução da rede em estudo no *Dplan***

Já na rede elétrica do PT PTL 201 procede-se à remodelação da canalização principal. É necessário o aumento de secção da canalização principal ( $LXS\ 4x25+16\ mm^2$ ), mas, dado que se encontra em terreno privado, surge a necessidade de criar uma canalização principal pela via pública. Assim, opta-se pela escolha de um condutor  $LXS\ 4x70+16$  (representado a tracejado na figura 33). Surge, também, a necessidade com a criação de uma canalização

principal novo e de refazer alguns ramais de alimentação de cargas, optando-se pelo condutor LXS de secção  $4 \times 16 \text{ mm}^2$  e  $2 \times 16 \text{ mm}^2$ .



**Figura 33 - Proposta resolução da rede elétrica do PT PTL 201 no *Dplan***

Note-se, ainda, que o reclamante continua a ser alimentado pelo mesmo ramal do PT PTL 029, mas este fica agora menos sobrecarregado e, por isso, apresenta bons níveis de tensão.

Como é possível verificar pela figura 32 e 33, o centro de cargas alimentado pelo novo posto de transformação, encontra-se no intervalo dos valores da variação de tensão estipulados pelo RSRDEEBT, estando, por isso, representado na figura 32 e 33 pelo domínio da cor verde. Quanto à rede elétrica do PT PTL 201, optou-se pela transferência de três cargas em fim da canalização principal, para a canalização principal do novo posto de transformação.

Assim, a solução apresentada, com a instalação de um novo posto de transformação e um reforço da rede elétrica é eficaz para a resolução dos problemas de variação de tensão apresentada pela primeira simulação no *software Dplan*.

#### **5.2.2.6. ANÁLISE DOS NOVOS RESULTADOS DO ESTUDO *DPLAN***

Com as alterações efetuadas na rede elétrica em estudo, são garantidas as condições de exploração da rede e a resolução da reclamação do consumidor.

A tabela 7 apresenta os resultados obtidos das saídas dos três postos de transformação.

**Tabela 7 - Resultados da proposta em estudo *Dplan***

<b>Desempenho: Saída</b>	<b>1 - PT 029</b>	<b>PT 201</b>	<b>PT Novo</b>	
Ponta na saída (BT)	38,90	33,20	53,00	kW
Potência de microgeração (BT)	-	-	-	kW
Variação de tensão máxima (BT)	7,97	6,08	6,46	%
Restrição de Potência por v.d.t. Não Regulamentar (BT)	0	0	0	kW
Potência de Perdas (BT)	2,38	1,81	2,19	kW
Energia Anual de Perdas (BT)	1,62	1,24	1,50	MWh
Energia Anual Não Fornecida (ENF)	9,10	4,87	11,33	kWh

Como demonstra nesta tabela, a variação de tensão máxima em BT não excede os 8% estipulados pelo RSRDEEBT. A saída 1 do PT PTL 029, saída que alimenta o reclamante, apresentava uma variação de tensão máxima de 12,48%, reduzida, agora, para os 7,97%. O reclamante que é alimentado por esta saída do posto de transformação vê, também, uma redução da variação de tensão dos 10,51% para os 6,11%.

De notar, também, que a saída dois do PT PTL 029 apresentava uma variação de tensão máxima de 16,77%. Esta saída deixa de existir passando a ser alimentada pelo novo posto de transformação, que apresenta uma variação de tensão máxima de 6,08%. A rede elétrica do PT PTL 201 vê, também, reduzida a sua variação máxima de tensão dos 13,05% para os 6,46%.

As perdas elétricas reduziram, também, quando comparadas à rede elétrica anterior, tabela 6, que apresentava uma energia anual de perdas de 11,44 MWh/ano. Com a nova proposta de alteração à rede elétrica há uma redução da energia anual de perdas para 4,36 MWh/ano. Posto isto, existe então uma redução de perdas de 7,08 MWh/ano, o que representa uma redução de 61,89% de energia anual de perdas, face à rede inicial.

A proposta acima apresentada assegura que os níveis de variação de tensão máxima não são excedidos, sendo assim considerada uma boa solução.

#### **5.2.2.7. VIABILIDADE DA PROPOSTA APRESENTADA**

Segue-se o estudo técnico-económico da proposta elaborada, como forma de reduzir a variação de tensão, garantindo qualidade de serviço aos consumidores.

Para este projeto, optou-se pela construção de um posto de transformação, tendo, por isso, uma perspetiva de vida útil de trinta anos. Segue-se a inserção do material usado na proposta

elaborada. Com o investimento num posto de transformação novo na ordem dos 6 900 €, um investimento num troço de rede elétrica MT de forma a alimentar o novo posto de transformação de 4 200 € e, por fim, um investimento na realização de uma rede elétrica de baixa tensão de 2 909 €, num total de investimento de 14 009 €. Este orçamento contém mão de obra e custo inerentes à sua instalação, e serve de estimativa para o projeto proposto.

Com a introdução dos valores da energia anual de perdas em BT (kWh) estes calculados pelo *Dplan*, segue-se a análise dos resultados produzidos pela folha de cálculo *Investe*.

No caso de este estudo ser considerado no âmbito do programa de redução de perdas técnicas BT, este apresenta um benefício/custo (B/C) de 0,53 p.u., um VAL de -8 760€, e um TIR de 1,54 %. Caso este estudo seja considerado no âmbito de estudos de melhoria de qualidade de serviço, apresenta como resultados um B/C 14,67 p.u, um VAL 256 303 € e um TIR de 115,24%.

Em conclusão, à luz dos parâmetros escolhidos na avaliação de mérito económico das alternativas estudadas (referido no ponto 5.2.1.6), o estudo acima realizado seria aprovado tanto pelo o programa de redução de perdas técnicas, como pelo programa de estudos de melhoria de qualidade de serviço.

# 6. CONCLUSÕES

## 6.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Na presente dissertação foi abordada a temática das perdas de energia na rede elétrica de baixa tensão, bem como a possibilidade da sua redução.

Para tal, foi necessário, primeiramente, compreender o funcionamento do sistema elétrico, nomeadamente da rede elétrica nos diferentes níveis de tensão e estudar exaustivamente as redes elétricas de baixa tensão, quer os seus componentes, quer o seu comportamento. Como as redes elétricas de baixa tensão constituem um sistema elétrico vasto, completo e estando este muito dependente da variação de cargas na rede elétrica, isto faz com que o cálculo de perdas seja complexo.

Seguidamente, foram estudadas as perdas de energia elétrica, perdas técnicas e não técnicas, sendo que as técnicas são as responsáveis pelo elevado número de perdas nas redes elétricas. Apesar de as perdas não técnicas terem menor expressão no que se refere à quantidade de perdas na rede, estas não podem ser descartadas, existindo, por isso, muita preocupação por parte do operador de rede no seu controlo e, conseqüente, redução.

Quanto às perdas técnicas, estas ocorrem nos diversos componentes da rede elétrica, sendo os condutores elétricos e os transformadores responsáveis pela sua maioria. O efeito de *Joule* e a energia reativa são os principais fatores que geram estas perdas nas redes elétricas. Para mitigar este tipo de perdas, a remodelação ou reforço das redes elétricas e a implementação de baterias de condensadores localmente, apresentam-se como boas soluções para redes mais vulneráveis. O facto de o operador de rede já penalizar os consumidores de energia reativa é, por si só, uma medida de prevenção/mitigação da energia reativa nas redes elétricas.

Um aspeto a realçar, é a relação das perdas elétricas com as quedas de tensão. Muitas vezes, o aparecimento de quedas de tensão provocadas por desequilíbrios entre fases, excessos de energia reativa, entre outros fatores, originam desequilíbrios na rede, existindo, assim, maior probabilidade de perdas de energia na rede elétrica. Uma redução das quedas de tensão na rede elétrica leva a uma melhoria da qualidade de energia e diminuição de perdas de energia elétrica.

Quanto ao cálculo das perdas de energia, este mostra-se bastante complexo e dependente de diversos fatores. O facto de a rede elétrica de baixa tensão ainda não ser automatizada na sua totalidade, torna a contabilização de energia difícil e, por conseguinte, também o seu cálculo. Este processo seria melhorado com a instalação de dispositivos de telecontagem em toda a rede elétrica, que permitem uma leitura mais detalhada num curto intervalo de tempo.

Nos métodos apresentados no capítulo 4, o cálculo de perdas de energia elétrica através do fator de perdas ou através da simulação de redes elétricas, mostram-se ineficazes quando aplicados em grande escala no SEE, dada a grande quantidade de dados necessária. Assim, o cálculo de perdas por estimação é o método mais eficaz para o cálculo de perdas de energia na rede elétrica BT. Este é baseado nos valores de energia ativa dos consumidores finais e em dados de telecontagem de amostras representativas das instalações.

Por fim, foram apresentados dois casos de estudo, realizados com recurso a *software* utilizado pela EDP Distribuição. Estes casos são significativos, uma vez que utilizam *software* que simula redes isoladas para o estudo de perdas de energia na rede elétrica BT. A utilização deste *software* revela-se uma boa forma para o cálculo de perdas na rede elétrica, permitindo assim, simular novas soluções para a redução das perdas. O operador de rede realiza os seus estudos na sequência de reclamações por parte de clientes insatisfeitos com a

qualidade de energia fornecida ou em função da análise de viabilidade de novos pontos de ligação. Trata-se de um processo que exige a colocação de analisadores de tensões e, por vezes, o levantamento de rede elétrica no terreno. Este é, por isso, um processo demorado e dependente do plano de investimentos do operador de rede.

O estágio curricular num ambiente empresarial, numa empresa como a EDP Distribuição, possibilitou uma aprendizagem bastante enriquecedora, quer pelas oportunidades proporcionadas, quer pela experiência da equipa profissional, permitindo, assim, desenvolver capacidades em diferentes temas e testar os conhecimentos adquiridos durante o percurso académico.

Em conclusão, os objetivos propostos para realização desta dissertação foram cumpridos, tendo sido adquiridos conhecimentos nas diversas áreas dos sistemas de energia. Ao longo desta dissertação ficou patente que o cálculo de perdas de energia elétrica é complexo e é um aspeto a ter em conta nas redes elétricas, nomeadamente a rede elétrica de baixa tensão, dado que em Portugal a percentagem de perdas de energia elétrica é elevada, existindo por isso uma grande margem para a sua melhoria.

## **6.2. PERSPETIVAS FUTURAS**

A redução de perdas de energia na rede elétrica deve ser uma preocupação do operador de rede como forma de melhorar a rede elétrica em que opera, apostando sempre numa rede elétrica mais eficiente.

Num futuro próximo, a instalação de contadores inteligentes na rede elétrica de baixa tensão será com recurso à telecontagem. Isto, permitirá obter mais informação sobre a energia consumida por carga, determinando, desta forma, com maior precisão a diferença entre a energia distribuída e a energia faturada.

O recurso às redes inteligentes, como *smart grids*, melhorará o controlo da energia elétrica e das perdas, pois este será capaz de localizar com maior precisão as perdas de energia na rede elétrica, e assim, a possibilidade de resolução das mesmas.

O combate às perdas não técnicas deve ser uma constante na rede elétrica em BT ou noutros níveis de tensão, devendo existir um investimento na evolução tecnológica dos equipamentos de medida para melhorar o controlo da energia elétrica.

Usar tecnologias cada vez mais eficientes é um dos aspetos a melhorar na rede elétrica, sendo que, por isso, a escolha de melhores transformadores ou o incentivo à aplicação de baterias de condensadores localmente a clientes, como os BTN, para controlo automático da energia reativa, são medidas que visam reduzir significativamente as perdas de energia nas redes elétricas BT.

A redução de perdas de energia deverá ser uma preocupação quer por parte do operador de rede, quer pelo regulador, em todas as redes elétricas, de forma a alcançar os níveis de qualidade de energia desejados, aumentando, assim, eficiência energética.

## Referências Documentais

- [1] Agência portuguesa do Ambiente, 2017. Disponível em:  
<https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=117&sub3ref=299> [último acesso 5 de setembro]
- [2] Adene – Agência para a energia, 2017. Disponível em:  
[http://www.adene.pt/sites/default/files/guiaee\\_v1310.pdf](http://www.adene.pt/sites/default/files/guiaee_v1310.pdf) [último acesso 5 de setembro]
- [3] ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, 2017. Disponível em:  
<http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/distribuicao/Paginas/RND-Perdas.aspx> [último acesso em 9 de setembro]
- [4] EDP Distribuição, 2017. Disponível em:  
[http://www.edpdistribuicao.pt/pt/edpDistribuicao/indicadoresGestao/List%20EDP%20Distribuio%20em%20Nmeros/distribuicao\\_numeros\\_2016.pdf](http://www.edpdistribuicao.pt/pt/edpDistribuicao/indicadoresGestao/List%20EDP%20Distribuio%20em%20Nmeros/distribuicao_numeros_2016.pdf)  
[último acesso em 14 de agosto]
- [5] Ronnie Belmans, Jan Declercq, Hans De Keulenaer, Katsuaki Furuya, Mayur Karmarkar, Manuel Martinez, Mike McDermott, Ivo Pinkiewicz, 2005. *The Potential for Global Energy Savings from High Efficiency Distribution Transformers* disponível em:  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.549.3044&rep=rep1&type=pdf> [último acesso em 24 de junho]
- [6] BATISTA, Samuel Rodrigues - *Localização ótima de aparelhos de corte normalmente abertos e normalmente fechados em redes de distribuição*. Porto: ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2015. Tese de Mestrado.
- [7] DESPACHO N° 13615/99 (2ª. Série), disponível em:  
<https://web.fe.up.pt/~cdm/DE2/rd.pdf> [último acesso em 10 de agosto]
- [8] ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Produção, 2017. Disponível em:

- <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/producao/Paginas/default.aspx> [último acesso em 6 de abril]
- [9] EDP Distribuição, *Manual de ligações à rede elétrica do serviço público*, 2015.
- [10] EDP, *Rede de Distribuição de Energia Elétrica*, 2017. Disponível em: [https://www.edp.pt/pt/sustentabilidade/prevencaoese\\_seguranca2/seg\\_fornecedores/Pages/Rede.aspx](https://www.edp.pt/pt/sustentabilidade/prevencaoese_seguranca2/seg_fornecedores/Pages/Rede.aspx) [último acesso em 17 de agosto]
- [11] EDP Distribuição, 2016. *Relatório e contas*.
- [12] EDP Distribuição, 2017. *Regulamento de Acesso às Redes e as Interligações do setor elétrico*.
- [13] MOREIRA, Ricardo Jorge Mascarenhas - *Operações em Redes de Distribuição*. Porto: FEUP –Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009. Tese de Mestrado.
- [14] MEIRELES, Pedro Jorge Vieira - *Regimes de Neutro em Redes e Instalações de BT-Vantagens/Inconvenientes para a Segurança das Pessoas, Bens e para a Exploração dos Sistemas*. Porto: FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012. Tese de Mestrado.
- [15] MARTINS, Miguel Ângelo Nobre - *Harmónicas e Desequilíbrios Provocados pelos Sistemas de Microgeração*. Lisboa: IST – Instituto Superior Técnico, 2009. Tese de Mestrado.
- [16] BRÁS, Nelson Miguel Caldeira - *Intervenção em Redes Elétricas de Distribuição de Energia*. Coimbra: ISEC – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2011. Tese de Mestrado.
- [17] Portaria nº 596/2010 de 30 de julho. Diária da república, 1.ª série – Nº147 – 30 de julho de 2010. Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento.
- [18] EDA, 2015. *Redes de Distribuição de Baixa Tensão*.
- [19] NP EN 50160, 2010. Norma Portuguesa para referências bibliográficas: Instituto Português da Qualidade, Ministério da Indústria e Energia. Lisboa.
- [20] COELHO, Bruno Miguel Moreira - *Classificação de tipologia de rede da EDP Distribuição*. Porto: FEUP –Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012. Tese de Mestrado.

- [21] EDP Distribuição, 2014. *Plano de Desenvolvimento e Investimento da Rede de Distribuição, 2015-2019*.
- [22] ERSE, 2016. *Estrutura tarifária do Setor Elétrico em 2017*.
- [23] Gurpreet kour, R. K. Sharma, 2013. *Different Techniques of Loss Minimization in Distribution System*. Disponível em:  
[http://www.erpublications.com/uploaded\\_files/download/download\\_01\\_03\\_2013\\_22\\_17\\_30.pdf](http://www.erpublications.com/uploaded_files/download/download_01_03_2013_22_17_30.pdf) [último acesso em 22 de junho]
- [24] Energia reativa excedente, EDP Brasil, 2004. Disponível em:  
<http://www.edp.com.br/distribuicao/edp-escelsa/informacoes/grandes-clientes/normas-e-manuais/Documents/Manual%20de%20Orienta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Energia%20Reativa%20Excedente.pdf> [último acesso em 14 de março]
- [25] BERNARDES, Pedro Nuno Beleza Oliveira - *Caracterização das Perdas na Rede de Distribuição de Alta Tensão*. Porto: FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011. Tese de Mestrado.
- [26] FREITAS, Hélder Miguel Dias - *Análise da eficiência energética em edifícios alimentados em média tensão*. Porto: FEUP –Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012. Tese de Mestrado.
- [27] ERSE, 2016. *Guia de Medição, Leitura e Disponibilização de Dados*.
- [28] Gheorghe Grigora, Bogdan Constantin Neagu, and Florina Scarlatache, 2016. *Estimation of Energy Losses in Distribution Transformers Using a Fuzzy Approach*. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7803183/> [último acesso em 30 de março]
- [29] WEG, *Manual para correção do fator de potência*. Disponível em:  
[www.weg.net/files/products/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf](http://www.weg.net/files/products/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf) [último acesso em 8 de março]
- [30] J. Neves dos Santos, *Compensação do fator de potência*, FEUP, 2006.
- [31] ERSE, 2010. *Informação sobre faturação de Energia Reativa – Princípios de boas práticas*.
- [32] QEnergia, 2011. *Sistemas para Compensação do Fator de Potência*.
- [33] J. Neves dos Santos, *Cabos de energia*, FEUP.

- [34] SILVA, João Carlos Dias da - *Cabos Eléctricos de Alta Tensão - Optimização das Técnicas de Instalação para Redução das Perdas*. Porto: FEUP –Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011. Tese de Mestrado.
- [35] FIGUEIREDO, Gonçalo Alexandre Domingues - *Caracterização das Perdas na Rede de Distribuição de Média Tensão*. Porto: FEUP –Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012. Tese de Mestrado
- [36] Resistência, Documentação para Engenharia e Física, disponível em:  
<https://def.fe.up.pt/eletricidade/resistencia.html> [último acesso em 9 de agosto]
- [37] Solidal, Condutores Eléctricos, SA. *Guia técnico*.
- [38] FERNANDES, Carlos Miguel Marques - *Desequilíbrio entre fases e perdas na rede de baixa tensão*. Lisboa: IST – Instituto Superior Técnico, 2010. Tese de Mestrado.
- [39] COSTA, Paulo Moisés Almeida da – *O efeito pelicular ou efeito skin*. Disponível em:  
[www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/paulomoises/Artigos.../Efeito%20pelicular/skin.PDF](http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/paulomoises/Artigos.../Efeito%20pelicular/skin.PDF) [último acesso em 18 de maio]
- [40] Schneider Electric, *Qualidade de energia Harmónicas*, disponível em:  
<https://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf> [último acesso em 27 de abril]
- [41] T.Dao, B.T. Phung, and T. Blackburn, 2015. *Effects of Voltage Harmonics on Distribution Transformer Losses*. Disponível em:  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/7380953/> [último acesso em 13 de agosto]
- [42] RSRDEEBT – *Regulamento de Segurança de Redes de Distribuição de Energia Eléctrica em Baixa Tensão*, Decreto regulamentar n°9/84.
- [43] L. Ramesh, S. P. Chowdhury, S. Chowdhury, A. A. Natarajan, C. T. Gaunt, 2009. *Minimization of Power Loss in Distribution Networks by Different Techniques*. Disponível em: <http://waset.org/publications/939/minimization-of-power-loss-in-distribution-networks-by-different-techniques> [último acesso em 27 de junho]
- [44] RODRIGUES, Paulo Sérgio Pereira - *Gestão de energia reativa na rede de distribuição da EDP D*. Porto: FEUP –Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012. Tese de Mestrado.

- [45] QEnergia, 2017. *Compensação de energia reativa*. Disponível em: <http://www.qenergia.pt/content/index.php?action=detailfo&rec=262> [último acesso em 2 de agosto]
- [46] Paola Pezzini, Oriol Gomis-Bellmunt, Joan Frau-Valenti, Antoni Sudrià-Andreu, 2010. *Energy efficiency optimization in distribution transformers considering Spanish distribution regulation policy*. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421000514> [último acesso em 23 de agosto]
- [47] Sorin Abagiu, Ionel Lepadat, Elena Helerea, 2016. *Solutions for Energy Losses Reduction in Power Networks with Renewable Energy Sources*. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7754635/> [último acesso em 30 de março]
- [48] J. Dickert, M. Hable, P. Schegner, Member, IEEE, 2009. *Energy Loss Estimation in Distribution Networks for Planning Purposes*. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/224601813\\_Energy\\_loss\\_estimation\\_in\\_distribution\\_networks\\_for\\_planning\\_purposes?enrichId=rgreq-5d51616a7f3db7b36727001a9fa18f92-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIyNDYwMTgxMztBUzo5OTI5NjQxODQ2Nzg0NkAxNDAwNjg1NTE5MTQw&el=1\\_x\\_2&\\_esc=publicationCoverPdf](https://www.researchgate.net/publication/224601813_Energy_loss_estimation_in_distribution_networks_for_planning_purposes?enrichId=rgreq-5d51616a7f3db7b36727001a9fa18f92-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIyNDYwMTgxMztBUzo5OTI5NjQxODQ2Nzg0NkAxNDAwNjg1NTE5MTQw&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf) [último acesso em 2 de setembro]
- [49] REIS, Carlos Eduardo Sanches dos - *Localização ótima de aparelhos de corte normalmente abertos e normalmente fechados em redes de distribuição*. Porto: ISEP –Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016. Tese de Mestrado.
- [50] MARQUES, Marco Alexandre Martins - *Caracterização da Contribuição dos Consumidores BT para as Perdas na Rede*. Porto: FEUP –Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005. Tese de Mestrado.
- [51] EDP Distribuição, 2010. *Guia Técnico de Planeamento De Redes de Distribuição*.
- [52] EDP Distribuição, 2017. *Dados de Energia*. Disponível em: <http://www.edp-distribuicao.com/dados-energia/#> [último acesso em 8 de setembro]
- [53] ERSE, 2017. *Perfis de perdas, perfis de consumo e de autoconsumo, e perfis de produção*. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/regulamentos/acessoasredesaasinterliga>

coes/Paginas/PerfishorariosdeperdasedeconsumoemBTEBTNeIP.aspx [último  
acesso em 6 de setembro]

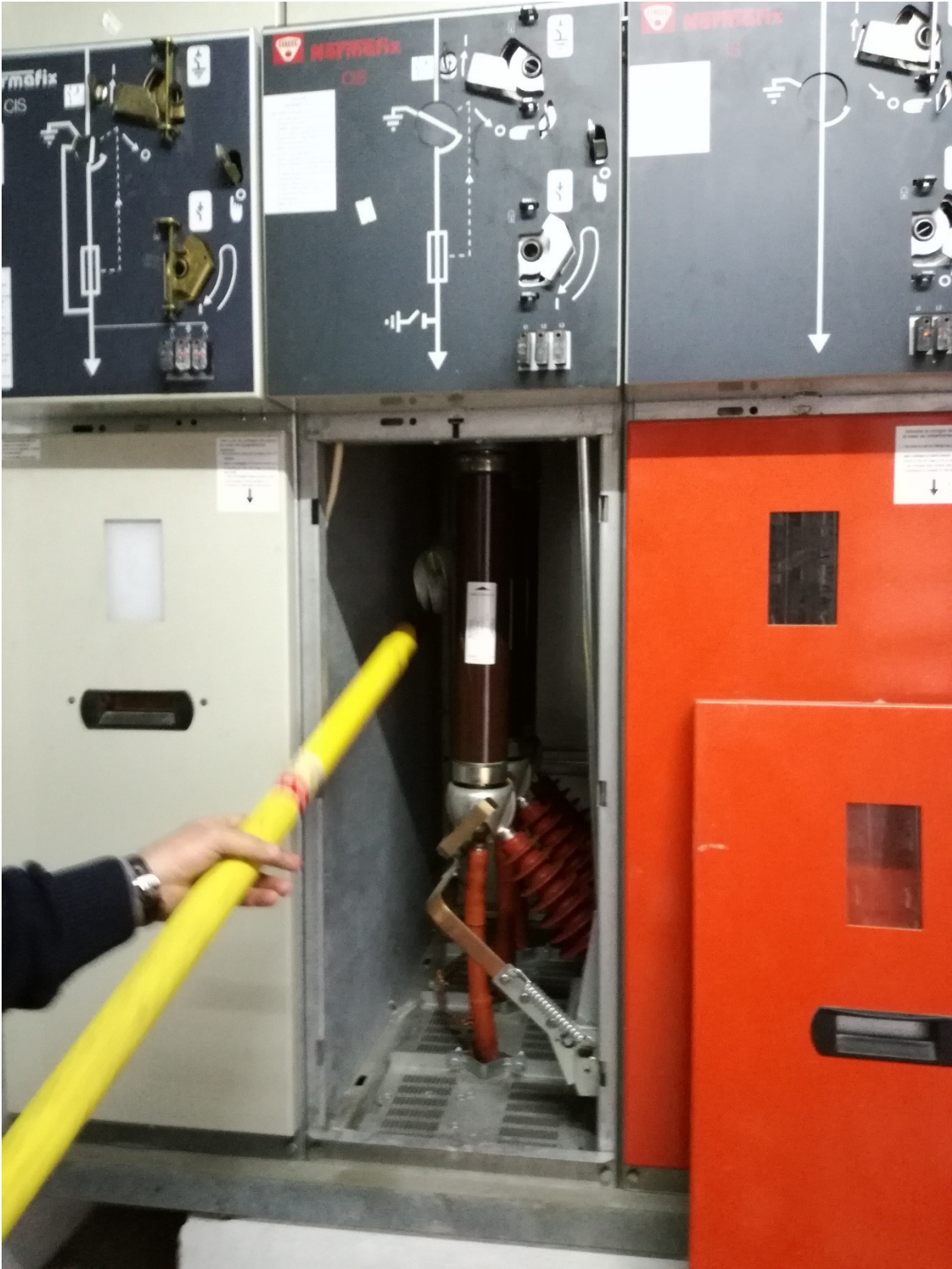
## *Anexos*



Anexo A – Simulacro de salvamento em redes elétricas BT, executado pela EDP e seus colaboradores.



Anexo B – Troca de fusíveis numa cela modular.



Anexo C – Mudança da posição num comutador de tomada de um transformador.



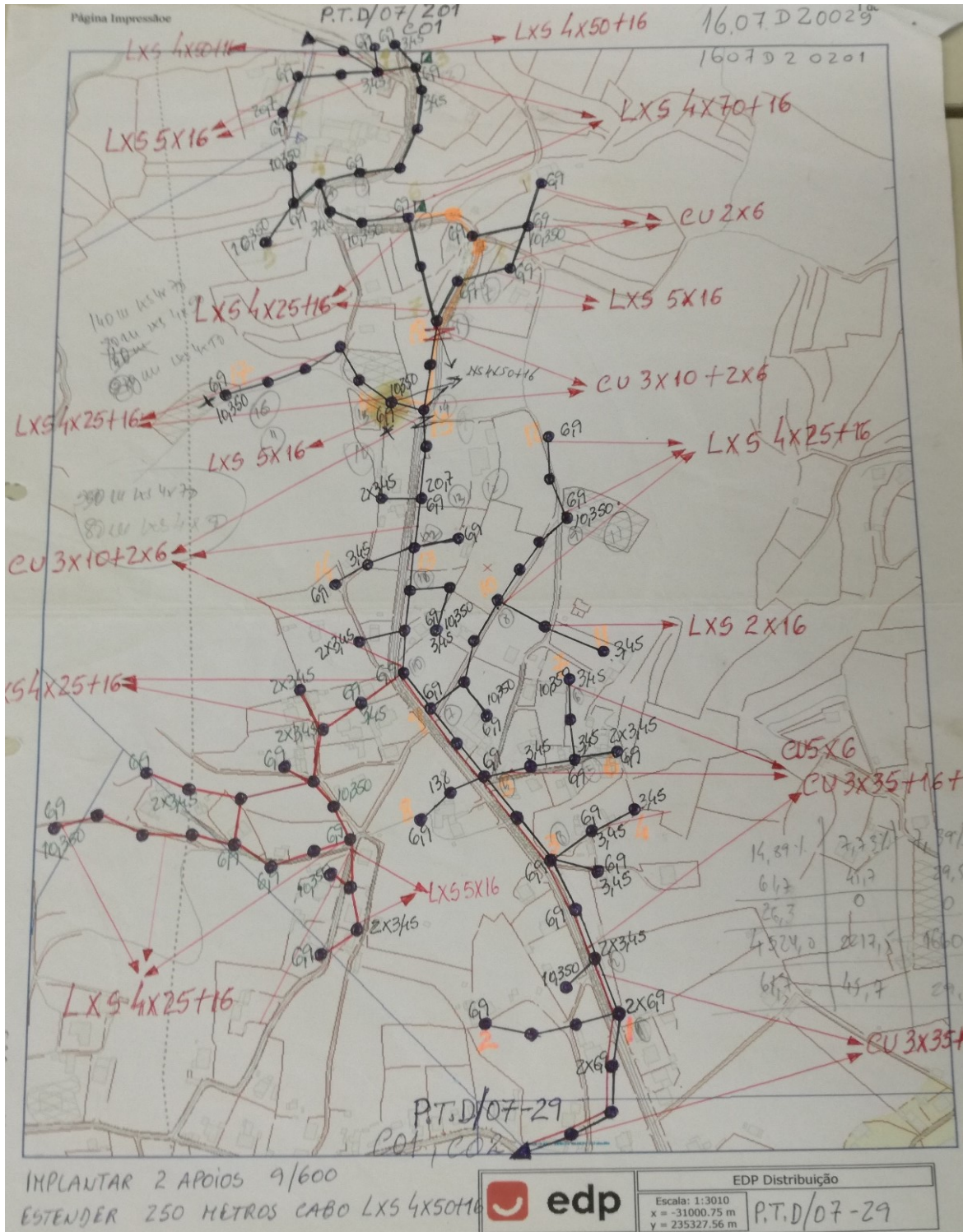
Anexo D – Medição de terras, com recurso ao aparelho C.A 6471  
(Chauvin Arnoux)



## Anexo E – Aparelho de detecção de avarias - RD4000



Anexo F – Levantamento da rede elétrica PT PTL 029 e PT PTL 201, por parte de um colaborador EDP Distribuição



## Anexo G – Resultados do eletrosoft (1º caso de estudo)



