



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Faculdade de Engenharia

# **Contribuição das perdas nos cabos na análise de investimentos em equipamentos elétricos eficientes**

**João António Lobão Andrade**

Tese para obtenção do Grau de Doutor em  
**Engenharia e Gestão Industrial**  
(3º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor João Paulo da Silva Catalão  
Co-orientador: Prof. Doutor Tesseleno Campos Devezas

**Covilhã, Abril de 2015**

# Dedicatória

Aos meus Filhos e à minha Esposa.

# Agradecimentos

Ao Professor Doutor João Paulo da Silva Catalão, Professor Auxiliar com Agregação no Departamento de Engenharia Eletromecânica da Universidade da Beira Interior, principal responsável como orientador científico, desejo expressar o meu agradecimento pela motivação e orientação da presente tese, e por direcionar a investigação de acordo com um “fio condutor” coerente e profícuo. Acresce salientar o acompanhamento, os incentivos que me proporcionou e a convivência amigável com que sempre trabalhámos.

Ao Professor Doutor Tessaleno Campos Devezas, Professor Associado com Agregação no Departamento de Engenharia Eletromecânica da Universidade da Beira Interior, responsável como coorientador, desejo expressar o meu agradecimento pela motivação e pela confiança que depositou em mim desde a primeira hora, quando lhe apresentei o tema a desenvolver no âmbito desta tese.

À minha família, a quem privei da merecida atenção, desejo expressar o meu profundo agradecimento pelo apoio e pela força que me deram. Espero vir a poder compensá-la de todos os momentos que os privei por estar a realizar este doutoramento.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração desta tese desejo ainda expressar o meu agradecimento.

# Resumo

Esta tese incide sobre o tema da eficiência energética, incluindo a contribuição das perdas nos cabos na análise de investimentos em equipamentos elétricos eficientes, sejam domésticos, industriais ou de iluminação pública. É proposta uma nova aplicação computacional de apoio à decisão baseada na inclusão do efeito conjunto de todos os equipamentos e respetivos diagramas de carga que partilham os troços das várias tipologias de instalações. Nomeadamente, é tida em consideração a influência das perdas nos condutores, frequentemente negligenciada na análise económica de equipamentos elétricos eficientes e sustentáveis, em instalações industriais e de iluminação pública, bem como a influência na diminuição de emissões de gases com efeito de estufa. A aplicação computacional apresentada, englobando a influência simultânea de todos os pontos de consumo na análise económica para a escolha do melhor equipamento, concretiza uma contribuição original relativamente ao estado da arte. A nova aplicação computacional desenvolvida permite analisar a instalação e sugerir o equipamento elétrico eficiente e sustentável mais adequado em função de todas as componentes existentes na instalação, ajudando assim no apoio à decisão de um empresário do setor energético ou do consumidor em geral, aspeto muito importante num ambiente competitivo como o da energia. Os resultados obtidos em casos de estudo realísticos, apresentando simulações computacionais validadas com resultados experimentais em laboratório, permitem concluir sobre o desempenho da nova aplicação computacional proposta nesta tese.

## Palavras-chave

Eficiência energética, apoio à decisão, perdas nos cabos, consumo de eletricidade, iluminação eficiente, emissões de CO<sub>2</sub>.

# Abstract

This thesis focuses on the issue of energy efficiency, including the contribution of cable losses in the investment analysis on efficient electrical equipment, whether domestic, industrial or public lighting. A new decision support computational application is proposed based on the inclusion of the joint effect of all equipment's and respective load diagrams that share sections of various installation types. Particularly, the influence of the conductors' losses is taken into account, which is often overlooked in the economic analysis of efficient and sustainable electrical equipment in industrial installations and public lighting, taking also into account the influence on the reduction of greenhouse gases emissions. The computational application presented, encompassing the simultaneous influence of all consumption places in the economic analysis for choosing the best equipment, poses an original contribution over the state-of-the-art. The new computational application developed allows analyzing the installation and suggesting the most adequate electrical equipment, efficient and sustainable, in light of all the existing components in the installation, helping to support the decision of entrepreneurs in the energy sector or of the general consumer, which is an important aspect in the competitive energy environment. The results obtained in realistic case studies, having computational simulations validated with experimental results in the laboratory, allow concluding about the performance of the new computational application proposed in this thesis.

# Keywords

Energy efficiency, decision support, cable losses, electricity consumption, efficient lighting, CO<sub>2</sub> emissions.

# Índice

<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento	2
1.2. Estado da arte	5
1.3. Motivação	20
1.4. Organização do texto	22
1.5. Notação	23
<b>2 Situação energética</b>	<b>24</b>
2.1. Situação energética mundial	25
2.2. Situação energética europeia	32
2.3. Situação energética Portuguesa	36
2.4. Conclusão	43
<b>3 Instalações elétricas domésticas, industriais e de iluminação pública</b>	<b>44</b>
3.1. Configurações das instalações elétricas	45
3.2. Quedas de tensão nas instalações elétricas	48
3.3. Perdas por efeito de joule	52
3.3.1. Contribuição das perdas por efeito de proximidade	55
3.3.2. Contribuição das perdas por efeito de <i>skin</i>	56
3.3.3. Influência da temperatura na resistência dos condutores	57
3.4. Eficiência em instalações de iluminação exterior	59
3.5. Conclusão	65
<b>4 Análise de investimentos em sistemas energéticos sustentáveis</b>	<b>66</b>
4.1. Métodos estáticos	67
4.2. Métodos dinâmicos	69
4.2.1. <i>Payback</i> atualizado	69
4.2.2. Valor atual líquido “VAL”	70
4.2.3. Taxa interna de rentabilidade “TIR”	74
4.3. Outros Métodos	76
4.4. Conclusão	76
<b>5 Resultados de simulação computacional e resultados experimentais</b>	<b>78</b>
5.1. Nova aplicação computacional de apoio à decisão	80
5.1.1. Aplicação em instalações domésticas e industriais	82
5.1.1.1. Parâmetros da instalação	82

5.1.1.2. Caracterização dos principais cálculos	85
5.1.1.3. Saída de dados gerados pela aplicação	90
5.1.2. Aplicação em instalações de iluminação pública	92
5.1.2.1. Parâmetros da instalação de iluminação pública	92
5.1.2.2. Caracterização dos principais cálculos	95
5.1.2.3. Saída de dados gerados pela aplicação	99
5.2 Resultados de simulação computacional	101
5.2.1- Simulação computacional em instalação industrial	102
5.2.2- Simulação computacional em instalação de iluminação	106
5.3 Resultados experimentais em laboratório	109
5.3.1- Validação de resultados para instalações industriais	109
5.3.2- Validação de resultados para instalações de iluminação pública	120
5.4 Conclusão	129
<b>6 Conclusão</b>	<b>130</b>
6.1 Contribuições	131
6.2 Publicações	132
6.2.1. Capítulo de livro	133
6.2.2. Publicações científicas em revistas	133
6.2.3. Comunicações científicas em atas de conferências	133
6.3 Direções de investigação	134
<b>7 Referências bibliográficas</b>	<b>136</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1 - Níveis hierárquicos da fiabilidade do SEE	6
Figura 1.2 - Níveis hierárquicos da fiabilidade do SEE incluindo instalações de utilização	7
Figura 1.3 - Equivalência entre os sistemas de classificação da eficiência de motores elétricos	13
Figura 2.1 - Procura de energia primária em 2035 (Mtep)	26
Figura 2.2 - Quota de crescimento global de 2012 a 2035	26
Figura 2.3 - Previsão da evolução do consumo mundial de energia pelas diferentes fontes	28
Figura 2.4 - a) Produção mundial de energia primária	29
Figura 2.4 - b) Produção mundial de energia primária por novas formas de energia	29
Figura 2.5 - a) Intensidade energética	30
Figura 2.5 - b) Intensidade carbónica	31
Figura 2.5 - c) Potencial por explorar de eficiência energética no mundo	31
Figura 2.6 - a) Perfil energético da Europa em 2011	32
Figura 2.6 - b) Perfil energético da Europa previsto em 2030	33
Figura 2.7 - a) Percentagem do combustível importado no consumo total da UE (petróleo).	33
Figura 2.7 - b) Percentagem do combustível importado no consumo total da UE (Gás)	34
Figura 2.7 - c) Percentagem do combustível importado no consumo total da UE (Combustíveis sólidos)	34
Figura 2.8 - Evolução dos preços ao nível do utilizador final da eletricidade para a indústria	35
Figura 2.9 - Dependência energética do exterior (%)	37
Figura 2.10 - a) Consumo de energia primária (ktep)	37
Figura 2.10 - b) Consumo de energia final (ktep)	38
Figura 2.11 - Produção de eletricidade por energias renováveis (GWh)	38
Figura 2.12 - Intensidade energética (2011)	39

Figura 2.13 - Instalações registadas no SGCIE	40
Figura 2.14 - Consumo anual de Energia Final e principais formas de energia	40
Figura 2.15 - a) Redução do consumo das emissões CO <sub>2</sub> dos PREn	41
Figura 2.15 - b) Redução do consumo de energia dos PREn	41
Figura 2.16 - Potencial de economia de energia por tipologia de medida (tep/ano)	42
Figura 2.17 - Potencial de economia de energia por tipologia de medida (Custo/tep)	42
Figura 3.1 - a) Rede malhada; representação esquemática	45
Figura 3.1 - b) Rede malhada; exemplo da rede de transporte portuguesa	46
Figura 3.2 - a) Rede de distribuição em anel	46
Figura 3.2 - b) Rede de distribuição radial	47
Figura 3.3 - Esquema de instalação elétrica alimentada por PT	47
Figura 3.4 - Esquema de instalação elétrica alimentada por rede de distribuição em baixa tensão	48
Figura 3.5 - Circuito monofásico RL	49
Figura 3.6 - Diagrama vetorial	50
Figura 3.7 - Distribuição da corrente como resultado de efeito de <i>skin</i>	53
Figura 3.8 - Distribuição da corrente devido a efeito de proximidade	53
Figura 3.9 - Distribuição da corrente como resultado da combinação dos efeitos de <i>skin</i> e de proximidade	53
Figura 3.10 - Esquema de instalação elétrica de iluminação exterior	60
Figura 3.11 - Iluminância num ponto P da superfície de estrada	62
Figura 3.12 - Eficiência de energia da instalação de iluminação	64
Figura 4.1 - Fluxo de caixa da opção A	68
Figura 4.2 - Fluxo de caixa da opção B	69
Figura 4.3 - Fluxo de caixa da opção A (Exemplo)	72
Figura 4.4 - Fluxo de caixa da opção B (Exemplo)	72
Figura 4.5 - Fluxo de caixa da opção A replicado	73
Figura 4.6 - Fluxo de caixa da opção B replicado	73

Figura 4.7 - Situações de análise com zonas indefinidas	75
Figura 5.1 - Fluxograma da aplicação computacional de apoio à decisão	81
Figura 5.2 - Esquema de uma instalação de utilização	83
Figura 5.3 - Matriz de ligação	83
Figura 5.4 - Matriz de resistências	84
Figura 5.5 - Diagrama de carga diário	85
Figura 5.6 - Exemplo de diagrama de carga da saída 1 do quadro 2	87
Figura 5.7 - Exemplo de diagrama de carga da saída 2 do quadro 2	87
Figura 5.8 - Exemplo de diagrama de carga da saída 2 do quadro 2	87
Figura 5.9 - Aspeto geral da saída	90
Figura 5.10 - Fluxograma seguido pelo código da aplicação desenvolvida	91
Figura 5.11 - Esquema de uma instalação de iluminação pública	92
Figura 5.12 - Matriz de ligação dos nós de derivação	93
Figura 5.13 - Matriz de resistências dos ramos	94
Figura 5.14 - Exemplo de diagrama de carga do ramo 1 do nó 6	96
Figura 5.15 - Exemplo de diagrama de carga do ramo 2 do nó 6	96
Figura 5.16 - Exemplo de diagrama de carga do ramo 2 do nó 4, obtido por sobreposição	97
Figura 5.17 - Aspeto geral da saída para iluminação eficiente	99
Figura 5.18 - Fluxograma seguido pelo código da aplicação desenvolvida, para instalações de iluminação pública	100
Figura 5.19 - Fluxograma total seguido pelo código da aplicação desenvolvida	101
Figura 5.20 - Exemplo de uma instalação usada para simulação	102
Figura 5.21 - Diagrama de carga da carga [1,1]	103
Figura 5.22 - Diagrama de carga da carga [2,1]	103
Figura 5.23 - Diagrama de carga da carga [2,2]	103
Figura 5.24 - Diagrama de carga da carga [2,2], opção 1	104
Figura 5.25 - Diagrama de carga da carga [2,2], opção 2	104
Figura 5.26 - Resultados obtidos para o exemplo apresentado na figura 5.20	105
Figura 5.27 - Exemplo de uma instalação usada para simulação	106

Figura 5.28 - Diagrama de carga das luminárias iniciais (em toda a instalação)	107
Figura 5.29 - Diagrama de carga das luminárias com balastro bi potência a utilizar na rua D (Opção 1)	107
Figura 5.30 - Diagrama de carga das luminárias com balastro bi potência a utilizar na rua D (Opção 2)	108
Figura 5.31 - Resultados obtidos para o exemplo apresentado na figura 5.27	108
Figura 5.32 - Aspeto geral da montagem de laboratório de uma instalação industrial	110
Figura 5.33 - Parâmetros físicos da instalação de utilização montada em laboratório	110
Figura 5.34 - Diagrama de carga do aquecedor alimentado pelo quadro 2 na saída 1	111
Figura 5.35 - Diagrama de carga das lâmpadas alimentadas pelo quadro 2 na saída 2, situação de análise inicial	112
Figura 5.36 - Diagrama de carga da lâmpada alimentada pelo quadro 3 na saída 1	112
Figura 5.37 - Diagrama de carga do motor de indução alimentado pelo quadro 3 na saída 2	113
Figura 5.38 a) - Diagrama de carga das lâmpadas de halogénio alimentadas pelo quadro 2 na saída 2, situação de análise no caso da opção 1	113
Figura 5.38 b) - Diagrama de carga das lâmpadas de halogénio alimentadas pelo quadro 2 na saída 2, situação de análise no caso da opção 2	114
Figura 5.39 - Resultados obtidos para o exemplo apresentado na figura 5.32	114
Figura 5.40 - Resultados obtidos da medição feita no início do cabo B (situação inicial)	115
Figura 5.41 - Resultados obtidos da medição feita no final do cabo B (situação inicial)	116
Figura 5.42 - Resultados obtidos da medição feita no início do cabo B (opção 2)	116
Figura 5.43 - Resultados obtidos da medição feita no final do cabo B (opção 2)	117
Figura 5.44 - Resultados obtidos da medição feita no início do cabo A (situação inicial)	117
Figura 5.45 - Resultados obtidos da medição feita no final do cabo A (situação inicial)	118
Figura 5.46 - Resultados obtidos da medição feita no início do cabo A (opção 2)	118
Figura 5.47 - Resultados obtidos da medição feita no final do cabo A (opção 2)	119
Figura 5.48 - Aspeto geral de um bairro usado para iluminação pública e destaque da fachada de um edifício.	121
Figura 5.49 - Parâmetros físicos da instalação	122

Figura 5.50 - Aspeto geral da montagem de laboratório da instalação de iluminação pública	123
Figura 5.51 - Diagrama de carga das luminárias em geral (R[3,2], R[2,3], R[4,3], R[5,1], R[5,2], R[6,1], R[6,2])	123
Figura 5.52 - Diagrama de carga do projetor inicial (R[2,1])	124
Figura 5.53 - Diagrama de carga do projetor LED (R[2,1])	124
Figura 5.54 - Resultados obtidos para o exemplo apresentado na figura 5.49	125
Figura 5.55 - Resultados obtidos da medição feita no início do cabo R[1,1] (situação inicial)	126
Figura 5.56 - Resultados obtidos da medição feita no fim do cabo R[1,1] (situação inicial)	126
Figura 5.57 - Resultados obtidos da medição feita no início do cabo R[1,1] (opção1)	127
Figura 5.58 - Resultados obtidos da medição feita no fim do cabo R[1,1] (opção1)	127

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Intensidade energética na UE (kgep/1000€)	35
Tabela 2.2 - Percentagem da Intensidade energética na UE (2001=100%)	35
Tabela 3.1 - Queda de tensão máxima entre a origem da instalação e qualquer ponto de utilização	49
Tabela 3.2 - Temperatura máxima de funcionamento dos condutores em função do tipo de isolamento	58
Tabela 3.3 - Classificação das vias e respetivos valores de referência	60
Tabela 3.4 - Classificação das vias pedonais e respetivos valores de referência	61
Tabela 5.1 - Resumo dos resultados das medidas efetuadas em laboratório I	119
Tabela 5.2 - Resumo dos resultados das medidas efetuadas em laboratório II	128

## Lista de Siglas

ADENE	Agência para a energia
AIE	Agência Internacional de Energia
AT	Alta Tensão
BP	<i>British Petroleum</i>
BT	Baixa Tensão
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CELE	Comércio Europeu de Licenças de Emissão
E4	Programa de Eficiência Energética e Energias Endógenas
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
EUA	Estados Unidos da América
FER	Fontes de Energia Renovável
GEE	Gases com Efeito de Estufa
MAT	Muito Alta Tensão
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
ORC	Oportunidade de Racionalização de Consumos
PIB	Produto Interno Bruto
PNAC	Programa Nacional para as Alterações Climáticas
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAER	Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
PNALE	Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão
PRE	Produção em Regime Especial
PREn	Plano de Racionalização do Consumo de Energia
PT	Posto de Transformação
REN	Rede Elétrica Nacional
RGCE	Regulamento de Gestão de Consumo de Energia
RTIEBT	Regras Técnicas de Instalações Elétricas de Baixa Tensão
SGCIE	Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia
tep	Tonelada equivalente de petróleo
TIR	Taxa Interna de Rentabilidade
UBI	Universidade da Beira Interior
UE	União Europeia
URE	Utilização Racional de Energia
VAL	Valor Atual Líquido

# Índices

k	Quadro de distribuição que fornece energia
i	Quadro de distribuição que recebe energia
ii	Número da saída no quadro
kk	Nó de derivação que fornece energia
iii	Nó de derivação que recebe energia
iB	Número do ramo no nó de derivação

# Constantes e variáveis

$\vec{J}_S$	Vetor densidade de corrente
$\vec{J}_{ei}$	Vetor densidade de corrente de indução
$V$	Volume
$T$	Período da corrente alternada
$P_{skin}$	Perdas devido ao efeito <i>skin</i>
$P_{prox}$	Perdas devido ao efeito de proximidade
$\delta$	Profundidade de <i>skin</i>
$R$	Raio do condutor
$D$	Diâmetro do condutor
$R_{ac}$	Resistência do condutor em corrente alternada
$R_{dc}$	Resistência do condutor em corrente contínua
$I_{rms}$	Intensidade de corrente ( <i>true rms</i> )
$\sigma$	Condutividade
$\epsilon_e$	Preço da energia elétrica
$\epsilon_c$	Preço das emissões CO <sub>2</sub> /kWh
$P$	Potência
$\Delta P[k, ii]$	Diferença de perdas no cabo da saída ii do quadro de distribuição K
$R[k, ii]$	Resistência do condutor da saída ii do quadro de distribuição K
$I[k, ii]$	Corrente do condutor da saída ii do quadro de distribuição K
$N_i$	Investimento inicial
$O_i$	Poupanças anuais

$SPBT$	Período de retorno simples do investimento
$\Delta P[kk, iB]$	Diferença de perdas no cabo do ramo iB do Nó de derivação Kk
$R[kK, iB]$	Resistência do condutor do ramo iB do Nó de derivação Kk
$I[kk, iB]$	Corrente do condutor do ramo iB do Nó de derivação Kk
$E_{av}$	Iluminância média
$\bar{L}$	Luminância média da estrada
$L_v$	Luminância encandeante equivalente
$a$	Taxa de juro
$d$	Dias de funcionamento por mês
$DD$	Custo de funcionamento
$E$	Nível médio de serviço calculado
$E_p$	Iluminância no ponto P
$f$	Frequência da corrente alternada
$I$	Intensidade de corrente
$II$	Investimento
$IRR$	Taxa interna de rentabilidade
$L$	Luminância
$m$	Meses de funcionamento por ano
Nó	Nó de derivação
$Q$	Quadro de distribuição
$RR$	Ganhos ou benefícios
$S$	Área
$TI$	Encandeamento perturbador
$VAL$	Valor atual líquido
$W_{el}$	Poupanças de energia elétrica
$\Delta P$	Diferença de perdas nos cabos de transmissão de energia
$\eta$	Eficiência luminosa
$\varepsilon$	Eficiência energética da instalação

# Capítulo 1

## Introdução

# Introdução

Neste capítulo é apresentada uma introdução ao tema da contribuição das perdas nos cabos na análise de investimentos em equipamentos elétricos eficientes, evoluindo no contexto atual do ambiente competitivo como é o da energia. Apresenta-se o enquadramento da investigação, o estado da arte e a motivação para abordar o tema. É descrita, ainda, a forma como o texto está organizado e a notação utilizada nesta tese.

## 1.1 Enquadramento

O aumento da procura de energia elétrica determinado pela exigência de crescimento dos níveis de bem-estar da sociedade, leva a que os países com elevada dependência das combustíveis fósseis, elevada intensidade energética e carbónica sejam confrontados com a necessidade de melhorar os sistemas de conversão de energia utilizados, de desenvolver formas alternativas de produção de energia elétrica, não contribuindo para o aumento das emissões antropogénicas de GEE (Gases com Efeito de Estufa) para a atmosfera e reduzindo a dependência externa dos combustíveis fósseis. A redução de consumos, por via direta ou indireta pelo uso de equipamentos eficientes, é outra forma de diminuir a dependência externa dos combustíveis de origem fóssil e, também, é motivação para a exploração de sistemas e equipamentos eficientes, tendo em consideração todos os seus componentes e ciclo de vida.

As crises energéticas, económicas ou financeiras, se por um lado têm consequências por vezes trágicas em termos sociais para as gerações que as atravessam, por outro lado, despertam consciências e motivação para seguir novos caminhos, desenvolvimento de novas tecnologias, novas atitudes e novos modos de racionalizar e utilizar os recursos disponíveis.

Em termos energéticos, a crise energética de 1973 em que foi sextuplicado o preço do barril de petróleo e o embargo dos países produtores de petróleo à Dinamarca, Holanda, Portugal, África do Sul e Estados Unidos, alteraram a economia mundial. A sua repercussão levou a considerar as energias renováveis e a eficiência energética como um caminho para a diminuição da dependência dos combustíveis fósseis.

No caso particular da energia elétrica, esta está no cerne da sociedade moderna, sendo uma componente essencial do nosso estilo de vida e um fator determinante na competitividade da economia. Os sistemas de produção de energia elétrica são sistemas complexos e de grande dimensão, tendo como objetivo satisfazer a procura de energia elétrica de forma racional, permitindo aproveitar de uma forma eficiente os recursos energéticos disponíveis.

No caso de Portugal, embora o peso das energias renováveis na produção de energia elétrica tenha vindo a aumentar consideravelmente nos últimos anos, o peso da produção de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis continua elevado. O país possui escassos recursos energéticos endógenos, nomeadamente aqueles que asseguram a generalidade das necessidades energéticas atuais (como o petróleo, o carvão e o gás).

A escassez de combustíveis fósseis conduz a uma elevada dependência energética do exterior (79,3% em 2011), designadamente das importações de fontes primárias de origem fóssil. É importante, assim, aumentar a contribuição de todas as formas que contribuam para a diminuição da dependência do país relativamente ao exterior, permitindo diminuir a fatura energética, a intensidade energética e a intensidade carbónica.

As atividades do sector elétrico, desde a produção ao consumo, têm ainda implicações em quase todos os grandes problemas ambientais da atualidade. As emissões de GEE são um dos impactes ambientais mais significativos associados à produção de energia elétrica resultante da queima de combustíveis fósseis. Perante os novos compromissos internacionais estabelecidos pelo Protocolo de Quioto, os custos provenientes das emissões de GEE devem ser internalizados nos sectores de produção.

Considerando ainda a atual situação económica mundial, em especial a Portuguesa, e o aumento dos custos de energia elétrica devido à variação da cotação do preço do petróleo e do carvão nos mercados internacionais, todo o contributo para a diminuição do consumo será pertinente, permitindo a diminuição, mesmo que reduzida, da fatura de energia nas indústrias e nas famílias, aumentando assim o rendimento disponível.

Em Portugal, vários programas e legislação têm sido desenvolvidos pelos vários governos, evidenciando preocupação crescente ao nível da política energética nacional; é possível destacar:

-O Programa E4 - Programa de Eficiência Energética e Energias Endógenas, aprovado em Resolução do Conselho de Ministros n.º 154/01 de 27 de Setembro de 2001 e o Programa PNAC - Programa Nacional para as Alterações Climáticas, aprovado em Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/03 de 28 de Abril de 2003, modificado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 104/06 de 23 de Agosto de 2006, reforçam a proposta na promoção, na eficiência e na produção de eletricidade a partir de fontes de energia de origem renovável porquanto estas contribuem para mitigar as emissões antropogénicas de GEE associadas ao sistema electroprodutor.

-O Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética – Portugal Eficiência 2015 (PNAEE), é um plano de ação agregador de um conjunto de programas e medidas de eficiência energética, num horizonte temporal que se estende até ao ano de 2015.

O plano é orientado para a gestão da procura energética, conforme o âmbito do documento que lhe dá enquadramento, a Diretiva n.º 2006/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 5 de Abril de 2006, relativa à eficiência na utilização final de energia e aos serviços energéticos, estando em articulação com o Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC), aprovado pela Resolução de Conselho de Ministros n.º 119/2004, de 31 de Julho, revisto pela Resolução de Conselho de Ministros n.º 104/2006, de 23 de Agosto, e o Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão (PNALE), aprovado pela Resolução de Conselho de Ministros n.º 1/2008, de 4 de Janeiro.

-Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia, abreviadamente designado por SGCIE, Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de Abril, ainda em vigor, instituído com o objetivo de promover a eficiência energética e monitorizar os consumos energéticos de instalações consumidoras intensivas de energia. As metas de redução estão sujeitas aos seguintes valores:

- a) No mínimo, uma melhoria de 6% dos indicadores da intensidade energética e consumo específico, em seis anos, quando se trate de instalações com consumo intensivo de energia igual ou superior a 1000 tep/ano, ou melhoria de 4% em oito anos para as restantes instalações;
- b) No mínimo, a manutenção dos valores históricos de intensidade carbónica.

-Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, aprova o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética para o período 2013 -2016 (Estratégia para a Eficiência Energética - PNAEE 2016) e o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis para o período 2013-2020 (Estratégia para as Energias Renováveis - PNAER 2020), revisão dos anteriores PNAEE e do PNAER, olhando para os dois planos de forma integrada e tendo em conta as medidas de eficiência energética e de promoção das fontes de energia renováveis já constantes do Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC), aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 104/2006, de 23 de agosto, revista pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 1/2008, de 4 de janeiro.

No âmbito da Estratégia para a Eficiência Energética - PNAEE 2016, o Programa Ip1 - Sistema de Eficiência Energética na Indústria e outros setores, relativamente ao SGCIE as medidas a implementar são desagregadas da seguinte forma:

- a) Medida Ip1m1 - SGCIE - Medidas Transversais;
- b) Medida Ip1m2 - SGCIE - Medidas Específicas;
- c) Medida Ip1m3 - SGCIE - Outros setores.

-Os orçamentos do estado dos últimos anos, devido à crise económica e à assistência externa a que Portugal esteve sujeito, têm vindo a efetuar cortes ao nível de funcionamento dos ministérios, diminuição de investimentos nos vários setores de atividade e redução do rendimento dos cidadãos individuais, seja por diminuição direta dos salários ou aumento de impostos diretos e indiretos.

Assim, a gestão de energia e a redução do consumo, nomeadamente nos cabos das instalações, podem desempenhar um papel importante, visto que, podem contribuir para o não consumo de energia elétrica que de outro modo, se fosse consumida, seria produzida usando fontes de energia com uma percentagem significativa baseada em combustíveis fósseis, fonte de emissões antropogénicas de GEE para a atmosfera.

Estando as perdas presentes em qualquer sistema, a sua redução e o objetivo de melhoria constante na exploração e eficiência nos sistemas elétricos de energia, têm mantido o interesse, desafios e linhas de investigação a nível internacional, com especial destaque na produção, transporte e distribuição de energia, ou no desenvolvimento de equipamentos eficientes, como analisado em particular no ponto seguinte.

Este trabalho enquadrado no âmbito da investigação da redução das perdas nos cabos na análise de investimentos em equipamentos elétricos eficientes, é uma nova contribuição para a procura da melhoria constante na exploração e eficiência nos sistemas elétricos, englobando as instalações elétricas de utilização, promovendo a utilização racional de energia (URE). Abrange o desenvolvimento e estudos de simulação computacional e resultados experimentais em laboratório, juntando todos os equipamentos já instalados e em funcionamento com os respetivos diagramas de carga, características físicas da instalação e interesses económicos do investidor na escolha eficiente e sustentável de novos equipamentos, incluindo as perdas nos condutores das instalações elétricas, habitualmente desprezadas.

## **1.2 Estado da arte**

A reestruturação do sector eléctrico teve um forte impacto nos sectores da produção e transporte de energia. Com a evolução das tecnologias da produção em regime especial (PRE) foram abertas novas perspectivas para as empresas deste sector. O incremento da incidência de geração de energia eléctrica a partir de fontes renováveis, por particulares, veio modificar consideravelmente o comportamento dinâmico dos sistemas eléctricos e pode dar lugar a uma nova estratégia de controlo e procura de eficiência energética dos sistemas. Os operadores da rede devem assegurar aos consumidores que a estabilidade do sistema e a qualidade da energia fornecida não sejam comprometidas. As sociedades modernas são cada vez mais dependentes da energia eléctrica e as redes eléctricas são extraordinariamente complexas.

Isto implica que os consumos devem ser satisfeitos com uma elevada continuidade e qualidade de serviço [Barbosa13a]. Sendo as redes de produção, transporte, distribuição e utilização interligadas, a continuidade, a qualidade de serviço e a eficiência dos sistemas dependem de todos os seus intervenientes.

A função de um sistema elétrico de energia (SEE) é alimentar as cargas dos consumidores de uma forma tão económica quanto possível, com "adequada" qualidade e garantindo continuidade de serviço. De uma forma simples, tradicionalmente podemos considerar um sistema elétrico de energia como sendo um conjunto de três subsistemas: produção, transporte e distribuição, correspondendo a cada um nível hierárquico de fiabilidade diferente, como apresentado na figura 1.1 [Barbosa13b].

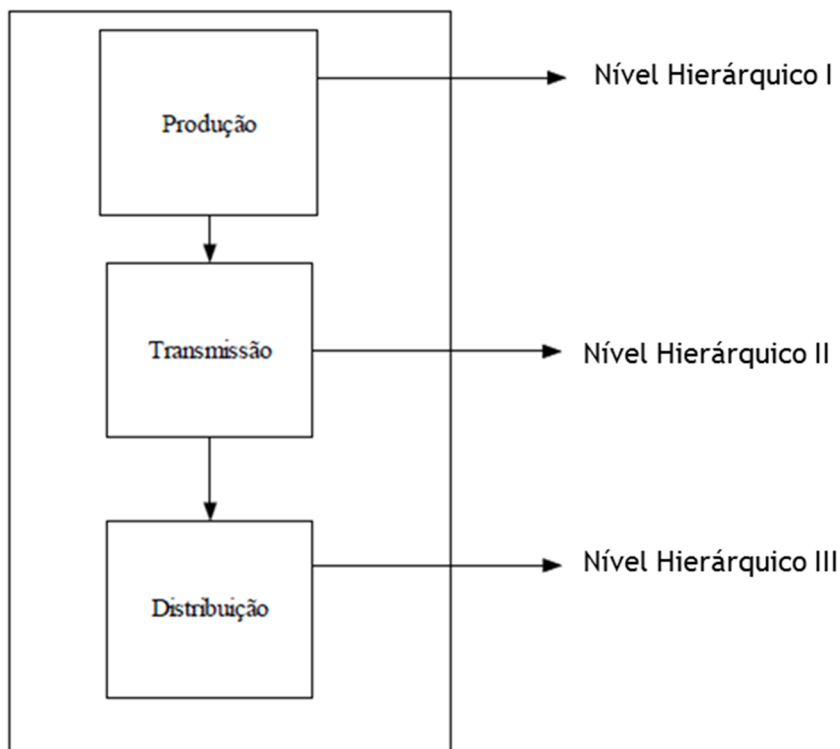


Figura 1.1- Níveis hierárquicos da fiabilidade do SEE (Fonte: [Barbosa13b]).

Num mundo em que se prevê que o consumo possa aumentar 38% antes de 2030, as redes elétricas inteligentes, ou “*Smart grids*”, que permitam a interligação de todos os intervenientes [Fritz12], desde a produção ao consumidor final, serão inevitáveis. Decisores políticos, produtores, comercializadores e consumidores necessitam fundamentar tomadas de decisão em tempo real. Todos os agentes podem reagir adaptando-se em função das flutuações dos consumos e modos de produção, contribuindo assim diretamente para o aumento da eficiência energética e diminuição dos consumos energéticos [Karnouskos07].

A otimização em sistemas elétricos de energia desde a produção ao consumo, designadamente o modo de operação eficiente e económico, dimensionamento económico das instalações, redução das perdas nos condutores elétricos usados na produção, transporte e distribuição de energia, eficiência dos sistemas de utilização, nomeadamente motores e iluminação, bem como a redução de emissão de GEE para a atmosfera, vêm constituindo temas de permanente investigação isolada ao longo do tempo. Devido à crescente complexidade e interligação dos problemas e aos benefícios económicos resultantes do uso da melhor solução possível, dita “solução ótima”, deve-se hoje em dia interligar o maior número possível de temas. As empresas produtoras e os consumidores finais têm hoje que encarar os seus investimentos com maior racionalidade económica para fazer face à concorrência e à crise económica no contexto atual, visando o bom aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis para a produção e utilização de energia elétrica.

Podemos considerar todos os intervenientes como um conjunto, incluindo na representação anterior o subsistema das instalações de utilização, figura 1.2, como um quarto nível hierárquico tendo em consideração o peso de cada um dos subsistemas.

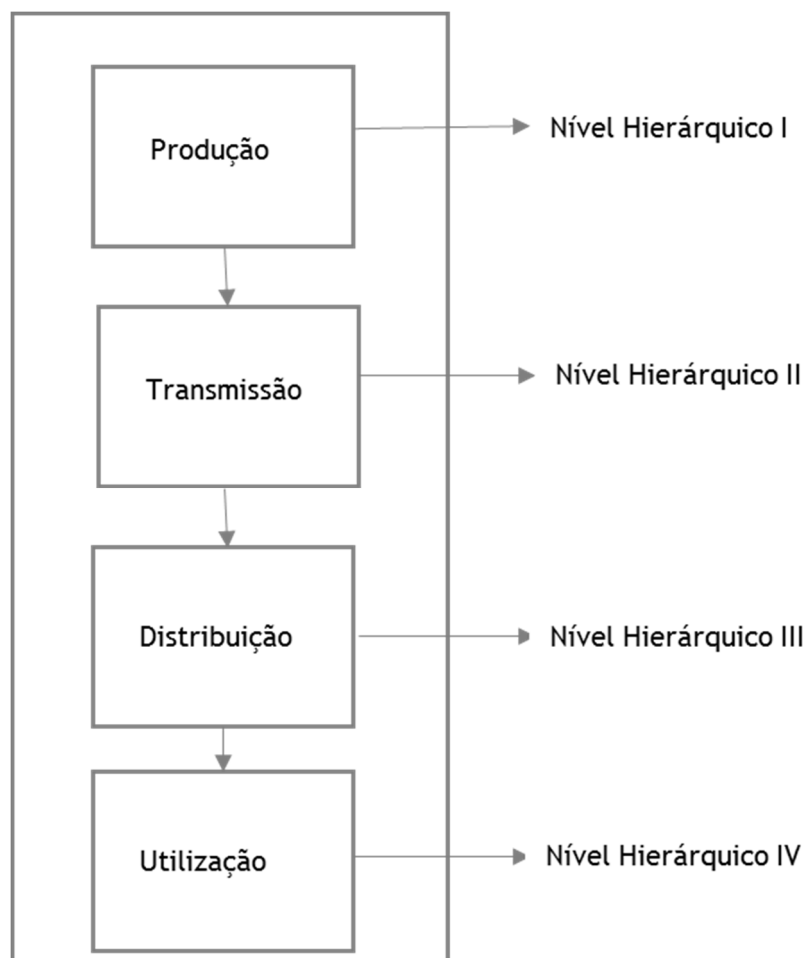


Figura 1.2- Níveis hierárquicos da fiabilidade do SEE incluindo instalações de utilização (adaptado).

Dado o constante desenvolvimento tecnológico, é dada preferência na revisão bibliográfica a referências com data recente em detrimento das mais antigas, relativamente aos temas apresentados. Seguidamente, é apresentada uma perspectiva dos assuntos abordados nesta tese.

Tendo em consideração que os sistemas de energia fornecem uma ligação por cabos elétricos entre o sistema de transmissão, normalmente de alta tensão, e as instalações dos consumidores de baixa tensão, em todo o percurso se verificam perdas por efeito de joule proporcionais à resistência dos condutores e ao quadrado da corrente que o percorre. Todos os intervenientes têm interesse económico ao reduzir as perdas nas suas redes de exploração.

Devido ao rápido aumento da procura de energia elétrica, e às restrições ambientais, os sistemas estão muitas vezes muito sobrecarregados, aumentando a corrente e conseqüentemente as perdas, tornando-se a sua redução mais uma preocupação pertinente, criando um clima favorável para a necessidade de estudo e desenvolvimento de técnicas de minimização de perdas e práticas operacionais inovadoras. Para além da bem conhecida utilização de diferentes níveis de tensão, permitindo reduzir a corrente ao elevar a tensão e conseqüentemente reduzir as perdas de exploração, outras técnicas têm sido objeto de pesquisa e estudo ao longo do tempo.

Fazendo uma pesquisa pela literatura especializada, verificamos que vários métodos de minimização de perdas podem ser utilizados, dos quais se destacam os três seguintes:

- 1- Dimensionamento e colocação de condensadores em pontos estratégicos da instalação.
- 2- Reconfiguração da instalação, permitindo percursos alternativos com diminuição das perdas.
- 3- Geração de energia distribuída, ou geração local, em especial por energias renováveis diminuindo assim, a corrente que circula nos condutores.

Relativamente ao ponto, “dimensionamento e colocação de condensadores”, pode ser usado para melhoria do perfil de tensão, correção de fator de potência e redução de perdas de energia. Inicialmente, a tendência de minimização de perdas foi por dimensionamento e colocação de condensadores nas subestações, mas a tendência tem evoluído para a instalação de condensadores fora dos alimentadores primários e colocá-los distribuídos e mais perto das cargas de consumo final. A geração de energia reativa no local de consumo permite a redução de corrente e conseqüentemente as perdas em todo o percurso das instalações. Podemos destacar os estudos ao longo do tempo efetuados por:

Em 1961, [Cook61] apresentou um trabalho destacando-se por considerar condensadores em paralelo fixos e comutados, analisando os efeitos das perdas, bem como a capacidade ou a redução da potência aparente em kVA liberado.

Em 1968, [Duran68] desenvolveu um método que determina as condições em que os condensadores não são economicamente viáveis. Os estudos tinham algumas restrições importantes; não consideravam o problema de controlo da tensão, utilizavam o tamanho dos condutores uniformes e o número de condensadores era limitado na análise.

Em 1981, em [Grainger81] são eliminadas algumas deficiências anteriores e estabelecidos procedimentos para dimensionamento e localização de condensadores fixos em instalações radiais, possibilitando múltiplas seções e diferentes tamanhos de cabos para qualquer necessidade de carga reativa ao longo do alimentador.

Em 1983, em [Grainger83] é apresentado um controlador continuamente controlável, sistema de compensação capacitiva para o controlo de potência reativa em sistemas de distribuição primários. Em [Ponnaivaikko83] sugere-se um modelo matemático que apresenta a redução de custos devido à redução de perdas de energia. Os modelos não eram capazes de determinar o número ideal de condensadores, e o tipo e o tamanho do banco de condensadores selecionado não era necessariamente um tamanho padrão da indústria.

Em 1996, [Jiang96] propõe um único algoritmo para alterar a reconfiguração da instalação e controlo de energia reativa por condensadores. Foi avaliada a minimização das perdas de potência com cargas uniformemente distribuídas.

Em [Souza04], é proposto um algoritmo englobando a Lógica *Fuzzy* para resolver o problema de colocação de condensadores. A função deste estudo é incluir as economias obtidas pela redução de perdas de energia, em comparação com os custos de aquisição e instalação de condensadores fixos e controlados.

Em 2008, [Ulinuha08] desenvolveu um algoritmo evolucionário capaz de otimizar sistemas de distribuição de grande dimensão, com diferentes tipos de cargas não-lineares. Neste algoritmo foi realizada a programação ótima de controlo e comutação de capacidade de condensadores em paralelo para minimizar simultaneamente a perda de energia e melhorar o perfil de tensão.

Em 2011, [Ulinuha11] propôs um algoritmo híbrido para otimizar o controlo da tensão da energia reativa e a distorção harmónica total de sistemas de distribuição com cargas não-lineares.

Mais recentemente, em [Farahani13], é apresentado um algoritmo de otimização conjunta para substituição de condutores de linhas aéreas e colocação de condensadores para minimizar as perdas de energia na presença de harmónicas num sistema de distribuição, de modo a que a distorção de tensões seja mantida dentro de níveis aceitáveis.

Em [Shilpa14] foi apresentada uma pesquisa bibliográfica abrangendo o tema com trabalhos desenvolvidos ao longo dos últimos anos.

Relativamente ao ponto “Reconfiguração da instalação”, permitindo percursos alternativos com diminuição das perdas, pode ser usado para melhoria do perfil de tensão, restaurar o serviço aquando da ocorrência de um defeito, de equilíbrio de cargas e de redução de perdas; também neste campo têm sido desenvolvidos vários estudos.

A operação de reconfiguração é a ação de controlo básica de interruptores estrategicamente colocados na instalação. Uma reconfiguração consiste em mudar o estado de um interruptor numa posição da instalação e em sentido contrário e, de outro, em sítio diferente mantendo a configuração de rede operacional e a alimentação das cargas.

Porém, se há muitos interruptores no sistema, a reconfiguração da rede de modo a garantir as condições de diminuição das perdas torna-se num problema complexo. A natureza discreta das posições do interruptor, fechado ou aberto, conduz a um problema de otimização discreto. Assim, a maioria dos algoritmos na literatura está baseado em técnicas heurísticas.

A redução das perdas através de reconfiguração foi proposta em 1975 por Merlin [Merlin75], para um sistema de distribuição. Tinha como objetivo diminuir as perdas, começando com uma rede malhada e os interruptores da rede fechados. Os interruptores são então abertos, um de cada vez, até uma rede radial nova ser alcançada usando técnicas de procura exaustiva.

Em 1989, [Shirmohammadi89] tendo também como objetivo reduzir as perdas, introduziu melhorias usando um algoritmo de aproximação heurística, diminuindo as aproximações e convergindo para uma solução próxima da solução ótima. Depois disso foram feitas pesquisas e avanços consideráveis neste campo, usando e misturando várias técnicas, sendo de seguida apresentados alguns estudos e contribuições mais recentes.

Com o objetivo de diminuir as perdas e atingir o seu valor mínimo, Wu Yuan-Kang usa um algoritmo de colónia de formiga [Wu Yuan-Kang10], permitindo uma procura eficiente da solução e evitando uma convergência prematura, embora seja complicada a aplicação para sistemas de grandes dimensões.

Um algoritmo de procura de harmónicas foi usado por Rao [Rao RS11]; embora efetue uma procura exaustiva, converge muito rapidamente para a solução ótima até mesmo para instalações de grande porte. Bayat usou um novo algoritmo heurístico [Bayat Akbar13], aceitável para sistemas de distribuição grandes, que permite aumentar a velocidade de convergência da solução pretendida de minimização das perdas da instalação.

É vasto o conjunto de trabalhos que desenvolveram algoritmos diversos de pesquisa de soluções de redução das perdas nos cabos das redes de distribuição, sintetizados em [Shilpa14].

A redução de perdas em instalações elétricas usando geração distribuída, depende da disponibilidade de pequenos geradores distribuídos; sendo geradores de potência reduzida em comparação com as centrais geradoras convencionais, permitem a sua interligação em qualquer ponto da instalação. Tem tido um grande incremento com o aproveitamento da energia a partir de energias renováveis com pequenos centros produtores, como a implementação de energia renovável por particulares ligados à rede. Com a produção da energia elétrica junto aos consumidores evita-se a circulação nos condutores das instalações e a redução das perdas é obtida por esse meio. A inclusão de Geradores Distribuídos (DG) em sistemas de distribuição tem aumentado rapidamente em muitas partes do mundo permitindo obter, para além da diminuição das perdas, o incremento do uso das energias renováveis, aliviar as sobrecargas dos condutores da instalação e reduzir os impactos ambientais de uma forma geral. Este método tem pouca aplicação em instalações de utilização, sendo mais aplicado em instalações de distribuição de energia e iluminação pública.

O aumento da geração distribuída está a alterar a estrutura das redes ganhando peso aos sistemas centralizados tradicionais que foram durante muito tempo a base para a operação das instalações de distribuição. Assim, o problema de planeamento em sistemas de geração distribuída tem recebido atenção por parte dos investigadores. Apresentam-se alguns trabalhos e objetivos que têm sido desenvolvidos.

Em 1994 foi proposta geração distribuída por Rau [Rau94] para minimização das perdas das linhas, desenvolvendo um algoritmo de aproximação analítica para alcançar o aperfeiçoamento desejado na redução das perdas recorrendo a posições selecionadas. Era baseado num procedimento iterativo longo, não garantia convergência da solução e apresentava-se pouco satisfatório para instalações grandes.

Com o objetivo de prever a variação de perdas anual devido a geração distribuída na distribuição, considerando aspetos da dispersão e de tecnologias da geração distribuída, Méndez [Méndez02] em 2002 apresentou um método de aproximação analítica para minimizar as perdas, sendo contudo complexo em termos de aplicação em sistemas de grande porte.

Em 2008, Hedayati [Hedayati08] testou num sistema de 34 barramentos um método de colocação de geração distribuída que permitia melhoria de perfil de tensão, redução das perdas e aumentar a capacidade de transmissão de energia, com estabilidade de tensão.

Atwa propõe em 2010 [Atwa10] o planeamento baseado em técnicas probabilísticas para determinar a combinação ótima de tipos diferentes de unidades renováveis de geração distribuída, para minimizar as perdas de energia anuais num sistema de distribuição de energia.

Embora não tenha precisão muito elevada quando requerida, garante a distribuição ótima das unidades renováveis de geração distribuída para todas as possíveis condições operacionais.

Em 2013, Hung [Hung13] testou um método analítico com fórmula exata das perdas em instalações radiais com 16, 33 e 69 barramentos, para colocação de geradores únicos ou múltiplos geradores distribuídos em redes de distribuição para minimizar a redução de perdas, não apresentando problemas de convergência da solução e sendo rápido em termos de cálculos.

Da vasta literatura publicada, pode ser analisado um grande conjunto de artigos publicados nos últimos anos em [Shilpa14]. Podemos considerar que este método de minimização de perdas é promissor e está a atrair a atenção dos investigadores, tendo sido aplicadas várias técnicas avançadas em algoritmos de solução ótima [Keane05], [Kumar10], [Abu-Mouti11], [Zou Kai12]. Esta técnica não tem grande exequibilidade em instalações de consumidores finais, pois raramente podem ser introduzidas fontes de geração distribuída.

Analisando os artigos publicados nas principais revistas internacionais da especialidade, verifica-se que o tema das perdas em instalações elétricas, de uma forma geral, tem revelado muito interesse em termos de minimização das perdas em sistemas de distribuição de modo a beneficiar as entidades exploradoras. No entanto, verifica-se um défice de estudo na influência e benefícios do lado do consumidor final, quando este contribui para a redução das perdas na instalação do distribuidor ou da sua própria instalação quando reduz a corrente pelo uso de equipamentos eficientes.

Os estudos analisados mostram que as pesquisas, muitas vezes, são isoladas por temas como os apresentados resumidamente a seguir, por não serem o essencial desta tese, para a eficiência em equipamentos de utilização, de iluminação e GEE, ficando a sensação que é da responsabilidade de alguma legislação a obrigatoriedade de projetar eficientemente em instalações elétricas do consumidor final, como sejam as regras técnicas de instalações elétricas de baixa tensão e o documento de referência da Eficiência Energética na Iluminação Pública de 2011.

### *Equipamentos elétricos eficientes*

De extrema importância são os equipamentos de utilização final, pois são estes os responsáveis pelo consumo de energia e pelas perdas provocadas nos cabos das instalações elétricas que os alimentam. Neste ponto podemos e devemos destacar os grandes consumidores como os motores elétricos, em especial os de indução e as lâmpadas.

A evolução da eficiência energética em termos de motores elétricos, particularmente os motores de indução, tem tido um incremento significativo e tem sido objeto de interesse e estudo por parte de indústria e investigadores.

Saidur e Mahlia analisaram os benefícios energéticos, económicos e ambientais na substituição de motores *standard* por motores de alto rendimento na indústria da Malásia. Foi estimada uma redução de 1940 e 892 GWh em motores de 20 e 120 kW, respetivamente, no período de 10 anos [R. Saidur10a]. Verificou-se, ainda, que os períodos de recuperação de diferentes potências de motores são inferiores a um ano. A Informação e conhecimento da eficiência energética do motor é um passo importante, tendo alguns países adotado a classificação de EFF 1, EFF 2 e EFF 3 (em 1998, acordo voluntário apoiado pelo Comité Europeu de Fabricantes de Máquinas Elétricas e Eletrónica de Potência e da Comissão Europeia), sendo o mais eficiente o EFF1 e o menos eficiente o EFF3.

Em 22 de julho de 2009, a União Europeia aprovou o Regulamento (CE) n. 640/2009, que especifica os requisitos relativos à conceção dos motores elétricos e ao uso de controlo eletrónico de velocidade. O regulamento aprovado, a norma internacional IEC 60034-30 para motores polifásicos AC, estabelece um cronograma de implantação; a classificação foi substituída por IE1, IE2, IE3, ... sendo o índice superior mais eficiente que o anterior. Deste modo, podemos sempre evoluir em termos de classificação energética em função da evolução tecnológica; a figura 1.3 apresenta a equivalência entre os dois sistemas de classificação. O objetivo da classificação é sensibilizar a indústria dos benefícios provenientes do uso dos motores mais eficientes.

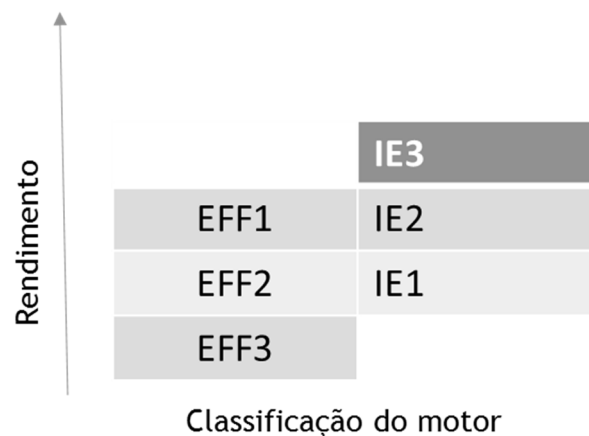


Figura 1.3- Equivalência entre os sistemas de classificação da eficiência de motores elétricos.

Saidur apresenta [R. Saidur10b] uma síntese das perdas em motores elétricos; as perdas fixas independentes da carga do motor consistem em perdas no núcleo magnético no atrito e ventilação do próprio motor; as perdas variáveis dependentes da carga consistem em perdas na resistência do estator e do rotor em função da carga. É referido que os motores padrão funcionam com rendimentos típicos que variam entre 83% e 92% e, um pequeno ganho de eficiência, atingindo rendimentos de 92% a 94%, tendo como consequência uma redução de 25% nas perdas.

Em [R. Saidur10b] é ainda apresentada a comparação de perdas de motores-padrão relativamente a motores eficientes; é descrita a obrigatoriedade de classificação energética em alguns países, e modos de escolha eficiente e contabilização das perdas nas auditorias energéticas, onde se verifica que as perdas nos cabos não são contabilizadas.

Em 2011, [Hasanuzzaman11] analisou as poupanças de energia e reduções de emissões devido à substituição de motores-standard por motores de alta eficiência e ainda a substituição de motores rebobinados por motores de alta eficiência na indústria. Foi estimado que 67.868 MWh de energia por ano e 44.582 toneladas de CO<sub>2</sub>, 333 toneladas de SO<sub>2</sub> e 122 toneladas de emissões de NO<sub>x</sub> podem ser reduzidas através da economia de energia obtida através da introdução de motores de alto rendimento. As perdas de energia do motor foram agrupadas em grandes áreas, onde se incluíram o processo de rebobinagem do motor, pois muitas vezes resulta numa perda de rendimento do motor. Analisaram um conjunto significativo de motores, calcularam as perdas provenientes da reparação e respetivos períodos de retorno do investimento em função da sua substituição. Verificaram que numa parte significativa, aproximadamente 70%, era economicamente vantajosa a substituição. No entanto, nas perdas apenas foram contabilizadas as perdas diretas do motor, desprezando-se as perdas indiretas provocadas na instalação. A economia de energia foi calculada com base no levantamento de 59 indústrias na Malásia. Mostrou-se que motores de alto rendimento podiam reduzir, em média, 5,5% da energia.

A análise do fator de carga dos motores elétricos e respetiva redução do consumo de energia foi contemplada em [D. Devaraj11], sendo aplicada a uma indústria de cimento na Índia, dado que a produção de cimento requerer a utilização maciça de energia. Verificou-se um desajuste da potência dos motores em função da carga acoplada; alguns funcionavam mesmo entre 3 e 16 % da sua potência nominal. Estas cargas baixas podem ser otimizadas com a aplicação de acionamentos de velocidade variável para combinar as exigências de carga. Com base em estimativas, verificaram que anualmente cerca de 1.865.925 MWh de energia podem ser reduzidos por regulação e adaptação do funcionamento dos motores à potência da carga, com períodos de retorno de investimento baixos. A análise do investimento pelo período de retorno do mesmo utiliza o incremento do investimento efetuado; também, as reduções das perdas usadas para o cálculo dos benefícios obtidos são as obtidas diretamente no motor, ignorando as perdas indiretas que poderiam ter influência na análise.

O Japão fechou mais de 70 % das suas centrais nucleares desde o terremoto de Tohoku [Chun Ni13], Março de 2011, a que se seguiu o acidente na central nuclear de Fukushima Daiichi. Pelo facto, o país tem sido confrontado com a escassez de energia. Em 2013, Chun Ni estudou as potenciais economias de energia e as reduções das emissões de CO<sub>2</sub> no Japão através do uso de padrões de eficiência mais elevados para os motores elétricos polifásicos.

No Japão, embora se tenha apostado na eficiência energética em muitos setores, em especial eletrônicos, a política para motores elétricos polifásicos é considerada inferior à dos padrões internacionais. O estudo estimou potenciais economias de energia e redução das emissões de CO<sub>2</sub> para o período de 2014-2043. Foi estimado que se fossem usados motores de eficiência IE2 reduziria o consumo de energia em 8,3 TWh anuais, ao passo que a utilização de motores de eficiência IE3 permitiria uma redução de cerca de 13,3 TWh. Em qualquer dos cenários, o cálculo do consumo médio anual de energia elétrica de um motor elétrico tem em consideração a potência do motor, a média de horas de funcionamento por dia (assumiu-se cerca de 5 h), a percentagem de carga em funcionamento, fixada em 80%, e o rendimento dos motores para as diversas situações de funcionamento e classificação energética em análise (IE2 ou IE3).

Outros estudos em desenvolvimentos e classificação de motores elétricos de indução eficientes e sustentáveis, trifásicos e monofásicos, podem ser analisados nas referências [Wang10, Sola11, Almeida11]. No entanto, verifica-se que as perdas das instalações elétricas não têm sido contabilizadas nas análises económicas.

A evolução em termos de iluminação, em especial nas lâmpadas, teve um desenvolvimento lento desde a invenção da lâmpada de incandescência por Edison até há bem pouco tempo. Em termos de iluminação residencial, só no final da década de oitenta é que surgiu a concorrência com o aparecimento das lâmpadas fluorescentes compactas [Philippe Menanteau00].

Após a invenção inicial, no final do século dezanove, a trajetória tecnológica da iluminação incandescente foi lenta, tendo como principal objetivo o aumento da sua vida útil e a eficiência luminosa.

A vida útil da lâmpada incandescente aumentou rapidamente de apenas algumas horas para as primeiras lâmpadas experimentais, para cerca de 600 h na década de 1880, 800 h no início do século 20, atingindo um limite de 1000 h. Por volta de 1960, com o surgimento da lâmpada de halogéneo, foi melhorada significativamente a sua vida útil. Ao mesmo tempo, foram obtidos progressos significativos em termos de eficiência luminosa, de 1,4 lm/W para a lâmpada de Edison; passou-se a 10 lm/W em 1910, 12,5 lm/W em 1917 e 15 lm/W em 1936 [Philippe Menanteau00], mantendo-se basicamente até aos dias de hoje.

Paralelamente e tendo em consideração a baixa eficiência das lâmpadas incandescentes, foram sendo desenvolvidas novas tecnologias, com especial destaque para a iluminação fluorescente. Embora a vida útil de lâmpadas fluorescentes fosse 5 a 10 vezes maior que a das lâmpadas incandescentes e a sua eficiência luminosa cinco vezes superior, não tiveram muito sucesso a nível doméstico, mormente devido à sua restituição de cor, forma física desenvolvida e luz fria emitida.

Tendo em consideração a dimensão do mercado da iluminação, sobretudo a residencial, associada às crises petrolíferas da década de 70 e aos preços crescentes da energia, ressurgiu o interesse por tecnologias que, embora mais caras no ato de aquisição, produziram redução de consumo na sua utilização. A partir do final da década de 1980 a lâmpada fluorescente compacta (CFL) baseada no princípio da fluorescência, muito superior em termos de eficiência luminosa e vida útil, foi introduzida no mercado de modo a concorrer com a lâmpada incandescente.

A evolução tecnológica permitiu desenvolver lâmpadas fluorescentes compactas com características luminotécnicas idênticas e eficiências energéticas muito superiores às incandescentes. No entanto, o preço bastante superior e a falta de informação têm contribuído para a sua lenta introdução no setor residencial.

A substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes compactas poderia contribuir para uma significativa redução de energia, sendo o investimento compensado devido à redução de consumo direto das lâmpadas e indireto relativo à diminuição da corrente nos circuitos das instalações. Vários estudos foram desenvolvidos, relativamente à substituição tecnológica, seja das lâmpadas ou sistemas de controlo do fluxo.

Em [T.M.I.Mahlia05] foi estimada a redução de energia e realizada a análise económica da substituição massiva da iluminação incandescente por tecnologias mais eficientes (CFL) nas instalações residenciais na Malásia. Lâmpadas incandescentes de 40, 60 e 100 W foram substituídas por lâmpadas (CFL) equivalentes, mas energeticamente mais eficientes de 8, 14 e 18 W, respetivamente, tendo como referência 427 famílias. Previam que esta substituição poderia levar a uma economia de energia até 2322 GWh e o investimento teria Valor Atual Líquido muito elevado.

Kostic *et al.* em 2009 analisaram as poupanças energéticas e a viabilidade económica através do período de recuperação do investimento da substituição de um balastro convencional por um balastro binível, permitindo a diminuição do fluxo em lâmpadas de iluminação pública. Para o controlo de uma lâmpada de 150W com o balastro binível verificaram-se valores de período de recuperação de 4,5 anos para uma taxa de juro de 7,5%.

Mahlia *et al.*, em 2011, estudaram a economia de energia e o período de retorno do investimento para o ciclo de vida do sistema de iluminação em prédios do campus da Universidade da Malásia. O estudo inclui várias situações possíveis: a substituição de balastros eletromagnéticos por balastros eletrónicos, lâmpadas fluorescentes Standard T8 de 36W por lâmpadas de alto rendimento HPT8 de 32W e lâmpadas T5 de 28W. O consumo de energia diminui 12% no caso de substituir todas as lâmpadas do sistema de iluminação existente pelas lâmpadas HPT8, ao passo que a redução é de 23% no caso de se substituir a iluminação existente por lâmpadas T5.

O período de retorno do investimento varia de 0,689 anos para a substituição de balastros convencionais por balastros eletrônicos e 1,95 anos para a substituição do sistema de iluminação para lâmpadas fluorescentes T5, devido ao elevado investimento inicial. Ainda assim, se for considerado o ciclo de vida da instalação comprova-se que o mais adequado seria a substituição por tecnologia T5, devido ao menor consumo verificado ao longo de todo o ciclo de vida.

Analisando os estudos apresentados apura-se que ao calcular as poupanças energéticas para analisar o investimento, não são contabilizadas as perdas indiretas provocadas por exemplo nos cabos dos condutores, que podem efetivamente fazer a diferença como será examinado nesta tese.

As perdas dependem da resistência dos condutores e esta é influenciada pelo tipo de corrente que os percorre, em especial a frequência em corrente alternada, tema que tem sido desenvolvido em termos de pesquisa; apresentamos aqui algumas referências, sendo desenvolvidas em tema próprio, posteriormente.

#### *Influência da corrente alternada e da disposição dos condutores na resistência*

Uma instalação elétrica, pequena ou grande, produz calor (perdas) nos condutores quando em funcionamento, proporcional à resistência do respectivo condutor.

Os sistemas elétricos industriais e domésticos operam principalmente em corrente alternada; nesta situação a resistência pode ser influenciada pelo efeito de *skin*, da disposição e da proximidade dos condutores na instalação, devido à criação de correntes induzidas e campos magnéticos criados pelos próprios condutores. O efeito de *skin* altera a resistência efetiva do condutor, dependendo da frequência utilizada nos sistemas de energia.

O efeito da disposição dos condutores nas instalações e o efeito de *skin* na resistência efetiva num condutor elétrico foi analisado em [Spang08,Zhang11].

O desenvolvimento e utilização de supercondutores na transmissão e distribuição de energia elétrica em grande escala foi analisado em [Jones08, Vysotsky11].

Em [Pirouti13] foi analisado o dimensionamento ótimo da seção de cabos para reduzir o consumo de energia e otimizar sistemas de distribuição operacional.

Um estudo de interligação das perdas nos condutores de uma instalação elétrica e a análise econômica de equipamentos elétricos eficientes pode ser verificada em [Lobão14a].

### *Iluminação pública*

No projeto de novas instalações de iluminação pública já são utilizados regulamentos nacionais contendo diretrizes eficientes relativamente ao consumo de energia. No entanto, quer em novas instalações ou ao lidar com reconstruções de sistemas de iluminação existentes, geralmente, não são considerados todos os meios disponíveis para economizar energia. Neste campo podemos referir a legislação e os estudos seguintes.

A legislação e documentos com indicação de linhas orientadoras, como o Documento de Referência para a Eficiência Energética na Iluminação Pública em Portugal, EN13201 norma e CIE 115:2010, referem os valores de referência a utilizar de modo a garantir segurança aos utilizadores dos sistemas [CEN03, CIEn°115, DGEG11].

Em [Miomir09, Manuel13, Sadhan09, Mahlia11, Mockey13] foram realizados vários estudos relativamente ao desenvolvimento tecnológico nas lâmpadas e luminárias usadas em iluminação de espaços públicos e privados.

O desempenho na associação das energias renováveis na iluminação é apresentado em [Sperber12].

Estudo e desenvolvimento de sistemas para o controlo de lâmpadas e luminária que, sob as condições do projeto, permite a redução do consumo de energia, como por exemplo, a utilização de equipamento que permita a variação do fluxo luminoso em função do tempo e das condições de trânsito, das ruas ou estradas, foram objeto de análise em [Wei Yan09, Xiao10, Burgos-Payan12, Siddiqui12].

A integração de todos os componentes da instalação (normalmente analisados em separado), com a finalidade de classificação de uma instalação de iluminação pública do ponto de vista de energia e iluminação foram objeto de análise em [Dusko08, DGEG11, Lobão14].

### *Gases com efeito de estufa*

O uso da energia elétrica, desde a produção ao consumo, passando pelo transporte e distribuição, tem implicações em quase todos os grandes problemas ambientais da atualidade, nomeadamente na emissão de GEE para a atmosfera.

Se, por um lado, a produção de energia elétrica liberta GEE para a atmosfera contribuindo para as alterações climáticas, por outro lado, as alterações climáticas influenciam a produção de energia elétrica, em especial, no uso e planeamento de novas centrais de produção em função das suas próprias implicações.

Nesta complexa relação e interligação de influências, vários estudos têm sido desenvolvidos. A influência das alterações climáticas na produção de energia elétrica foi objeto de estudo nas várias fontes, em especial na das energias renováveis, mais vulneráveis devido à sua dependência do tempo e do clima.

O impacto das alterações climáticas em geral sobre a energia eólica foi desenvolvido por [Pryor10], sobre a água usada nas centrais nucleares [Kopytko11], sobre a produção de hidroeletricidade [Lucena09] ou, em regiões específicas, como a análise dos impactos das mudanças climáticas, sobre a produção bruta hidroelétrica na Europa [Lehner05].

Uma revisão sobre a vulnerabilidade do setor energético para as mudanças climáticas, nas suas várias vertentes, desde a produção, transporte, distribuição, utilização e procura de energia é abordada em [Roberto Schaeffer12].

A quantificação de GEE por tecnologia de produção de energia elétrica, permitindo a tomada de decisão dos agentes económicos e políticos que consintam a redução efetiva de GEE emitidos para a atmosfera tem, também, sido objeto de estudo. A quantificação é complexa e nem sempre coincidente, pois depende dos métodos de cálculo utilizados e das componentes englobadas. Se forem contabilizados apenas os gases na central de produção, o valor encontrado é muito diferente do que poderá ser se incluirmos as influências indiretas a montante e a jusante; fazendo a avaliação do ciclo de vida, esta contribuição pode atingir os 25% para tecnologias de combustível fóssil e os 90% para tecnologias de energias renováveis, como referido em [Weisser07].

Vários estudos e métodos foram elaborados de modo a quantificar as emissões diretas e/ou indiretas de GEE em função da tecnologia de produção utilizada, para centrais a carvão, gás natural [Dones04], nuclear [Hondo05], biomassa [Pehnt06], fotovoltaica [Kopytko11], compilados e explicados para as várias tecnologias de abastecimento de energia elétrica e respetivo ciclo de vida em [Weisser07].

Vários métodos podem ser utilizados no cálculo dos GEE referentes ao sistema elétrico de um país em particular, considerando a produção de eletricidade ou o respetivo consumo, tendo como resultado valores diferentes como analisado em [Graus11, Sampo12], pois o consumo não é sempre coincidente com a produção no respetivo país; teremos que considerar as perdas e importações e exportações.

A redução das emissões é importante, pois a limitação das emissões de GEE por legislação e protocolos internacionais leva a que a diminuição seja cada vez mais importante e objeto de estudo. Desde a redução das emissões na origem, através da conversão mais eficiente dos combustíveis fósseis, ao aumento da utilização de fontes renováveis ou descarbonização de combustíveis, até às medidas de gestão da procura e redução de consumos, todas são contribuições importantes.

A presente tese sobre a contribuição das perdas nos cabos na análise de investimentos em equipamentos elétricos eficientes, nomeadamente o desenvolvimento de uma nova aplicação computacional de apoio à decisão engloba todas as componentes, tendo influência em todo o sistema elétrico e nos problemas ambientais a ele associados.

### **1.3 Motivação**

Em Portugal, a produção de energia elétrica embora tenha vindo a diminuir a sua dependência é caracterizada, atualmente, por uma acentuada dependência externa dos combustíveis fósseis. No país, a intensidade carbónica que relaciona as emissões de GEE em kg CO<sub>2</sub> com o consumo total de energia em tep (tonelada equivalente de petróleo) é elevada, sendo também elevada a intensidade energética do Produto Interno Bruto (PIB), que traduz a quantidade de energia necessária para produzir riqueza.

Esta intensidade para Portugal, sendo mais elevada do que na maioria dos países da União Europeia (UE) resulta, não só, de um problema estrutural da economia nacional, mas também da menor eficiência de exploração do sistema electroprodutor nacional no que respeita aos recursos endógenos e renováveis da utilização de equipamentos menos eficientes, em termos de utilização final da energia elétrica, implicando perdas nos condutores elétricos nos sistemas de transporte, distribuição e instalações industriais do consumidor industrial ou doméstico.

Assim, aumentar a eficiência de exploração do sistema electroprodutor nacional, no que respeita à eficiência de conversão e redução das perdas, ou aumentar a exploração dos recursos de origem renovável é uma política energética que contribui para diminuir a dependência externa dos combustíveis de origem fóssil, muito importante em países com elevada exposição ao exterior como Portugal.

As linhas de investigação têm tido um papel importante na evolução dos sistemas elétricos de energia, contribuindo para a continuidade e qualidade de serviço cada vez mais exigente pelo consumidor final. Este esforço de investigação tem tido especial destaque, por um lado, na produção, transporte e distribuição de energia e, por outro lado, no desenvolvimento de equipamentos eficientes por parte dos construtores.

No entanto, verifica-se que não tem sido objeto de estudo, a nível das instalações de utilização, a interligação e a influência de todo o sistema na análise dos investimentos por parte dos particulares em equipamentos elétricos eficientes, de modo a poder contribuir para o bem-estar das populações, aumentar o rendimento e diminuir a fatura energética, não esquecendo a contribuição para a diminuição dos GEE emitidos para a atmosfera.

O desenvolvimento do tema da contribuição das perdas nos cabos na análise de investimentos em equipamentos elétricos eficientes tem como principais pontos de motivação os seguintes:

#### 1- Gerais

- Contribuição para a preservação dos recursos energéticos;
- Contribuição para a diminuição das emissões de GEE;
- Redução do consumo e diminuição da intensidade carbónica e energética do país.

#### 2- Específicos

- Redução do consumo e diminuição da intensidade carbónica e energética industrial;
- Diminuição da fatura energética numa indústria específica;
- Diminuição da fatura energética dos consumidores.

A elaboração da pesquisa e estado da arte, onde se verifica um défice de investigação na área das perdas em instalações de utilização e a interligação da área da engenharia e gestão em sistemas industriais, que possa contribuir diretamente para o bem-estar e melhoria económica das pessoas associada à evolução recente da crise do país e à dificuldade crescente das pessoas e das empresas, reforçou a motivação para trabalhar o tema da contribuição das perdas nos cabos na análise de investimentos em equipamentos elétricos eficientes. Especialmente, em instalações elétricas do consumidor final, doméstico ou industrial, de modo a contribuir diretamente na redução da fatura de energia elétrica. Contribui, ainda, para a necessidade de dar resposta aos problemas relacionados com a forte dependência do país relativamente aos combustíveis fósseis, de mitigar as emissões antropogénicas de GEE associadas ao consumo de eletricidade, e de reduzir a fatura de energia elétrica global do país, muito penalizado nos últimos anos pela crise internacional.

Assim, esta tese trata um tema de investigação com grande interesse e de suma importância para Portugal, visando uma abordagem no âmbito da simulação computacional e verificação experimental de resultados em laboratório. Visa, também, o tema da eficiência energética; é desenvolvida e aplicada uma nova aplicação computacional que permite analisar a instalação e sugerir o equipamento elétrico eficiente e sustentável a escolher, incluindo a contribuição das perdas nos cabos na análise de investimentos, em equipamentos elétricos eficientes, sejam domésticos, industriais ou de iluminação pública. Uma nova aplicação computacional baseada na inclusão do efeito conjunto de todos os equipamentos e respetivos diagramas de carga que partilham os troços das várias tipologias de instalações é proposta, tendo em consideração a influência das perdas nos condutores, frequentemente negligenciada na análise económica de equipamentos elétricos eficientes e sustentáveis em instalações industriais e de iluminação pública, ponderando também a influência da diminuição de emissões de GEE.

## 1.4 Organização do texto

O texto da tese está organizado em 6 capítulos.

O Capítulo 2 é destinado à descrição e caracterização da situação energética mundial e nacional. O Capítulo 3 é destinado à descrição da estrutura das instalações elétricas. O Capítulo 4 é destinado à apresentação dos indicadores usados na análise de investimentos em sistemas energéticos sustentáveis. O Capítulo 5 é destinado ao estudo e desenvolvimento de aplicações de equipamentos elétricos eficientes, nomeadamente ao desenvolvimento de uma nova aplicação computacional de apoio à decisão. O Capítulo 6 conclui a tese. Seguidamente, é apresentada uma descrição mais detalhada do conteúdo de cada capítulo.

No Capítulo 2 é realizada uma análise da situação energética mundial. São apresentadas as perspectivas de evolução dos consumos energéticos até 2040. É analisada a situação europeia, no que concerne aos objetivos a atingir no futuro próximo, terminando com a situação particular dos principais indicadores de Portugal e fazendo, ainda, um resumo da principal legislação nacional englobada na política energética dos últimos governos.

No Capítulo 3 é apresentada a descrição da estrutura das instalações elétricas. São desenvolvidos os conceitos referentes às quedas de tensão, à influência da estrutura das instalações e ao tipo de energia utilizada na resistência dos condutores elétricos, destacando as regras e cálculos permitidos pela legislação portuguesa, em especial, a aplicada a instalações elétricas de baixa tensão, como sejam as “Regras Técnicas de Instalações Elétricas de Baixa Tensão” (RTIEBT).

No Capítulo 4 é enunciado e descrito o problema da análise de investimentos em sistemas energéticos sustentáveis. São apresentados os principais indicadores usados e referenciadas as principais limitações de cada um deles, apontando sugestões de modo a minorar a possibilidade de escolhas ineficientes.

O Capítulo 5 descreve o problema da eficiência energética em instalações e equipamentos elétricos, nomeadamente no que concerne à contribuição das perdas nos cabos na análise de investimentos em equipamentos elétricos eficientes. Uma nova aplicação computacional é proposta para a resolução deste problema tendo em consideração o efeito de Joule. Apresenta-se também uma nova aplicação computacional de apoio à decisão, incluindo resultados de simulação computacional e resultados experimentais em laboratório que validam o seu desempenho.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões. Ainda, são apontadas algumas direções para desenvolvimento futuro.

## 1.5 Notação

Em cada um dos capítulos desta tese é utilizada a notação mais usual na literatura especializada, harmonizando, sempre que possível, aspectos comuns a todos os capítulos. Contudo, quando necessário, em cada um dos capítulos é utilizada uma notação apropriada. As expressões matemáticas, figuras e tabelas são identificadas com referência ao capítulo em que são apresentadas e são numeradas de forma sequencial no capítulo respectivo, sendo a numeração reiniciada quando se transita para o capítulo seguinte. A identificação de expressões matemáticas é efetuada através de parênteses curvos ( ) e a identificação de referências bibliográficas é efetuada através de parênteses retos [ ].

## **Capítulo 2**

### **Situação energética**

# Introdução

A concentração de recursos energéticos em regiões específicas, a necessidade de assegurar a diversidade e segurança no fornecimento de energia a nível mundial, regional ou local, associadas à obrigação de proteger o ambiente cuja degradação é acentuada pelo uso de combustíveis fósseis, leva a uma preocupação constante em termos de utilização eficiente dos recursos disponíveis a nível mundial.

Neste capítulo será feita uma análise da situação energética atual, em termos mundiais, europeus e, em especial, da situação energética nacional em termos de oferta, procura e índices energéticos de relevância para caracterização da situação atual e perspectivas de futuro. Será ainda apresentado um resumo da legislação, políticas e ações a desenvolver de modo a atingir as propostas e metas definidas internacionalmente, em termos energéticos e ambientais.

## 2.1 Situação energética mundial

A evolução da utilização da energia está estritamente ligada à evolução demográfica, económica e tecnológica, presente e futura. Se se considerar que cerca de 1,2 biliões de pessoas não têm acesso à eletricidade e que 2,8 biliões dependem da lenha ou de outra biomassa para cozinhar e aquecer as suas casas, facilmente se depreende que o consumo, no futuro, deve crescer de modo a satisfazer as expectativas de melhoria das condições da população mundial. A projeção para o futuro contém sempre um grau de incerteza, trabalhando-se normalmente com vários cenários.

Várias instituições públicas e privadas, com ou sem fins lucrativos, têm desenvolvido e publicado estudos e projeções relativamente à evolução da situação energética mundial; nesta tese serão resumidos os dados e considerações publicados recentemente.

A Agência Internacional de Energia (IEA) divulgou, em novembro de 2013, o relatório “*World Energy Outlook 2013*” [IEA13]. O relatório divulgado apresenta um cenário central em que a previsão da procura mundial de energia aumenta em 33,3% até 2035. O peso da procura global de energia para a Ásia aumenta; a Índia e países do Sudeste Asiático assumem a liderança no consumo na década de 2020. O Médio Oriente também aumenta o consumo de energia, tornando-se a segunda maior região do mundo no consumo de gás em 2020 e o terceiro maior consumidor de petróleo em 2030. A procura de energia nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) tem um crescimento diminuto e, em 2035 é inferior a metade da procura de países não membros da OCDE. Na figura 2.1 pode-se verificar a procura de energia primária e na figura 2.2 a quota (em percentagem) de crescimento global de 2012 a 2035.

## Primary energy demand, 2035 (Mtoe)

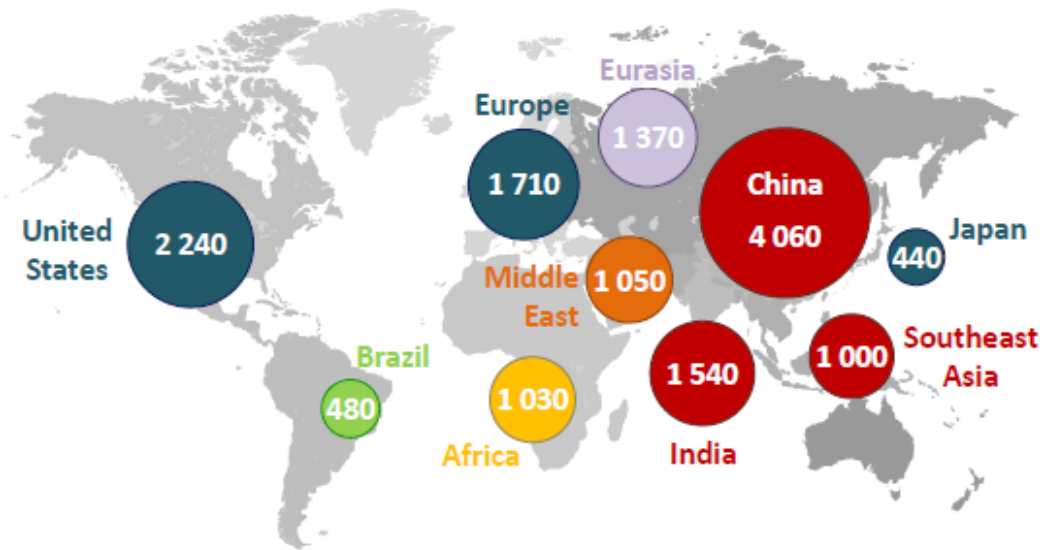


Figura 2.1- Procura de energia primária em 2035 em Mtep (Fonte: [IEA13]).

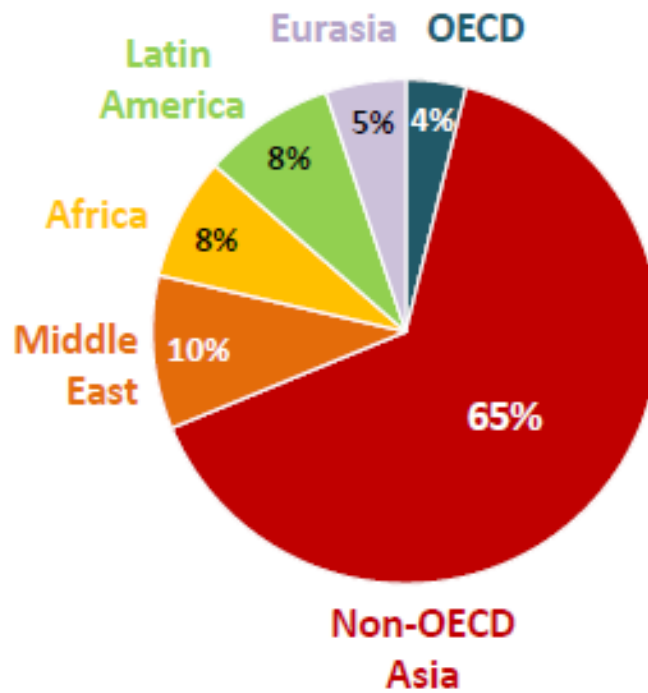


Figura 2.2- Quota de crescimento global de 2012 a 2035 (Fonte: [IEA13]).

Podemos destacar ainda que a procura cresce para todas as formas de energia, mas a percentagem de combustíveis fósseis no *mix* de energia mundial cai de 82% para 76% em 2035, sendo que quase metade do aumento líquido na geração de eletricidade vem de fontes renováveis, isto é, energias de baixo carbono.

O mercado de gás natural torna-se gradualmente mais global, com implicações potenciais para os preços e a procura que sobe quase 50% até 2035. No entanto, novas fontes de gás, convencionais e não convencionais, podem trazer uma maior diversidade de oferta global, prevendo-se que os preços possam baixar por essa via.

O carvão continua a ser a principal fonte geradora de eletricidade, embora a sua contribuição caia de 41% para 33% em 2035, fruto da significativa diminuição da procura nos países da OCDE, se bem que a procura aumente em um terço nos países fora da OCDE - principalmente na Índia e na China - devido ao seu crescimento económico.

Num outro estudo, divulgado em janeiro de 2014 pela BP, designado de “*BP Energy Outlook 2035*” [BP14], prevê-se que o consumo mundial de energia vai aumentar em 41% entre 2012 e 2035, o que representa uma desaceleração em comparação com os 52% verificados nas duas últimas décadas. Prevê ainda este estudo que 95% desse crescimento da procura virá de países com economias emergentes, lideradas pela China e pela Índia, enquanto o consumo de energia nos países desenvolvidos da América do Norte, Europa e Ásia deverá aumentar muito lentamente, podendo mesmo decrescer nos últimos anos deste período.

Os combustíveis fósseis mantêm um peso considerável, com 81%; o relatório refere ainda que as contribuições dos principais combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) vão convergindo e espera-se que cada um represente 27% do *mix* energético em 2035, com um crescimento acentuado do gás.

A U.S. Energy Information Administration (EIA) publicou e divulgou em julho de 2013 o relatório “*International Energy Outlook 2013*” [EIA13], com uma análise mais abrangente no tempo; esta publicação prevê que o consumo mundial de energia vai crescer 56% até 2040, podendo o consumo global de petróleo subir 32%. Refere ainda que a maior parte desse aumento virá de países de fora da OCDE, onde o crescimento energético é estimulado pelo grande crescimento económico de países como a China, Índia, Brasil e África do Sul. Apesar do aumento das fontes renováveis, prevê ainda o estudo que os combustíveis fósseis continuarão a garantir quase 80% da procura global mundial de energia, como é apresentado na figura 2.3.

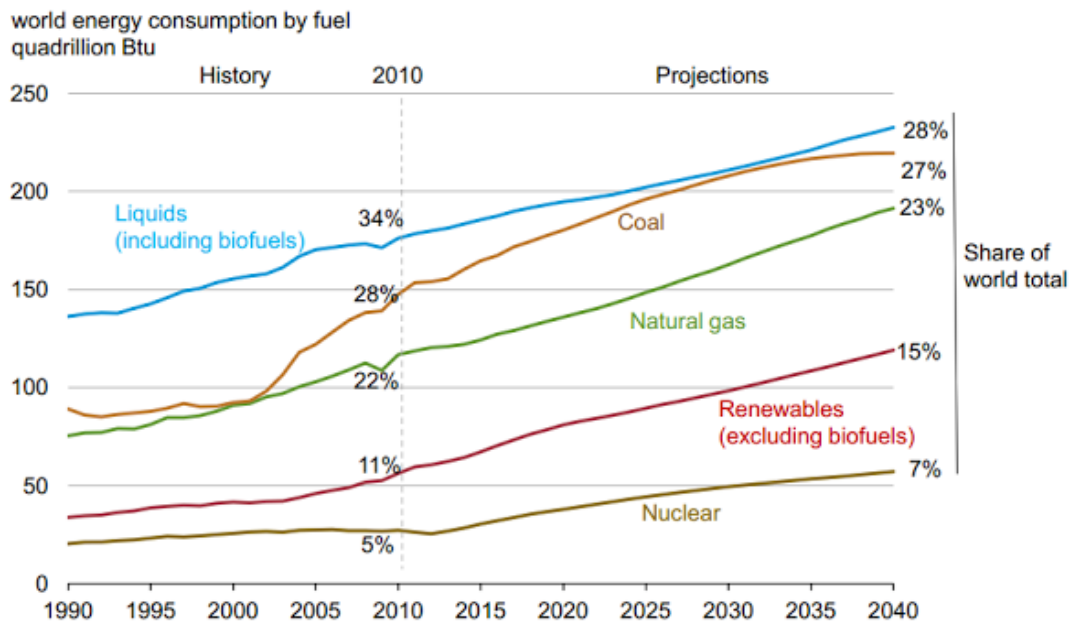


Figura 2.3- Previsão da evolução do consumo mundial de energia pelas diferentes fontes (Fonte: [EIA13]).

Verifica-se, assim, que todos os estudos e previsões apontam para os mesmos resultados e, em especial, que o consumo de energia irá crescer.

Do mesmo modo é analisado o lado da oferta, isto é, de que maneira é que a produção de energia responde a esta evolução dos consumos e quais os desafios a enfrentar de forma a manter os fornecimentos energeticamente sustentáveis.

O relatório “*World Energy Outlook 2013*” da IEA refere que 790.000 milhões de barris de petróleo necessitam de ser produzidos, no total, para fornecer a procura prevista. O crescimento da oferta é acompanhado por um forte crescimento de produção do petróleo no Iraque, seguido pelo Brasil, Canadá e Cazaquistão, e da exploração do petróleo e gás não convencional “*tight oil*” e “*shale gas*” nos EUA e Brasil, por exemplo, ligada ao aumento da produção global de gás. Estima-se que os Estados Unidos serão o maior produtor de petróleo do mundo durante grande parte do período de 2035.

No relatório “*BP Energy Outlook 2035*” prevê-se que o crescimento da oferta de petróleo para 2035 deve vir principalmente das Américas e do Médio Oriente, com o aumento da produção de petróleo de fontes não convencionais dos EUA, areias betuminosas do Canadá, e exploração em águas profundas do Brasil. No fornecimento de gás é esperado um crescimento de 46% em novas explorações não convencionais contidas em roxas xistosas.

Todos os dados apontam no mesmo sentido: o consumo de energia vai aumentar, nomeadamente devido ao aumento de consumo por parte de economias de países emergentes, e a oferta vai sofrer algumas alterações importantes, devido à evolução tecnológica que permite novas fontes até agora consideradas não convencionais e ao aumento da produção de energia a partir de FER (Fontes de Energia Renovável), como se pode verificar na figura. 2.4 a) e b).

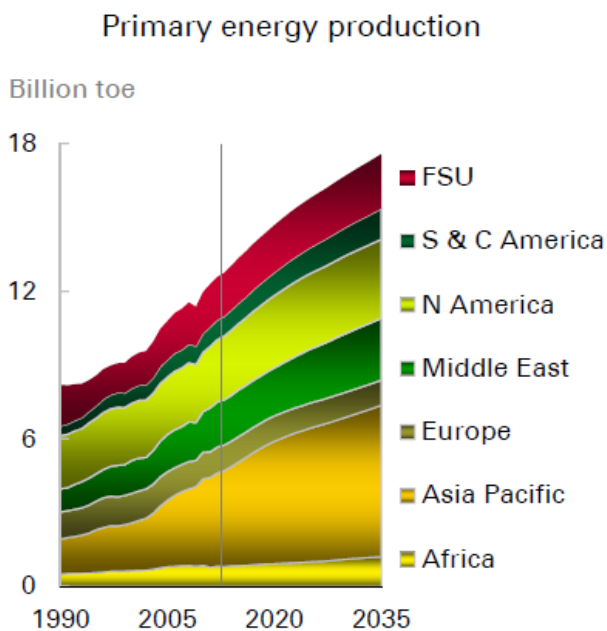


Figura 2.4- a) Produção mundial de energia primária (Fonte: [BP14]).

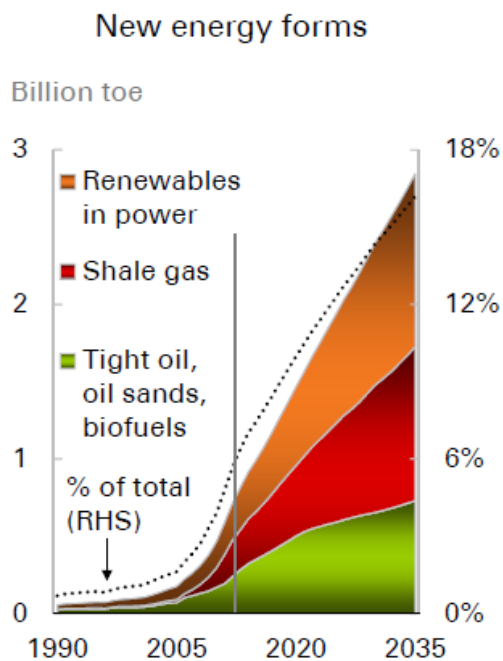


Figura 2.4- b) Produção mundial de energia primária por novas formas de energia (Fonte: [BP14]).

Fazendo uma análise dos estudos recentes evidenciam-se dados bastante otimistas em termos de abastecimento energético mundial para o futuro; no entanto, os altos preços da energia, em termos de economia mundial, das economias nacionais e dos consumidores finais, associados às preocupações ambientais são, igualmente, um problema a ter em consideração. As emissões de CO<sub>2</sub>, a partir do crescimento do setor de energia elétrica, pode aumentar de 13 giga toneladas (Gt) em 2011, para 15,2 Gt em 2035.

O aumento das tecnologias de baixo carbono e das melhorias na eficiência, em indústrias consumidoras intensivas de energia usando combustíveis fósseis, pode ajudar a desacelerar o crescimento das emissões de CO<sub>2</sub>.

A melhoria da eficiência energética ao longo de todos os sistemas produtivos tem ainda um grande potencial de exploração, podendo reduzir os consumos e os custos de energia, em geral, diminuir a intensidade energética e, ao mesmo tempo, melhorar as preocupações ambientais. Estes aspetos são apresentados na figura 2.5 a), b) e c).

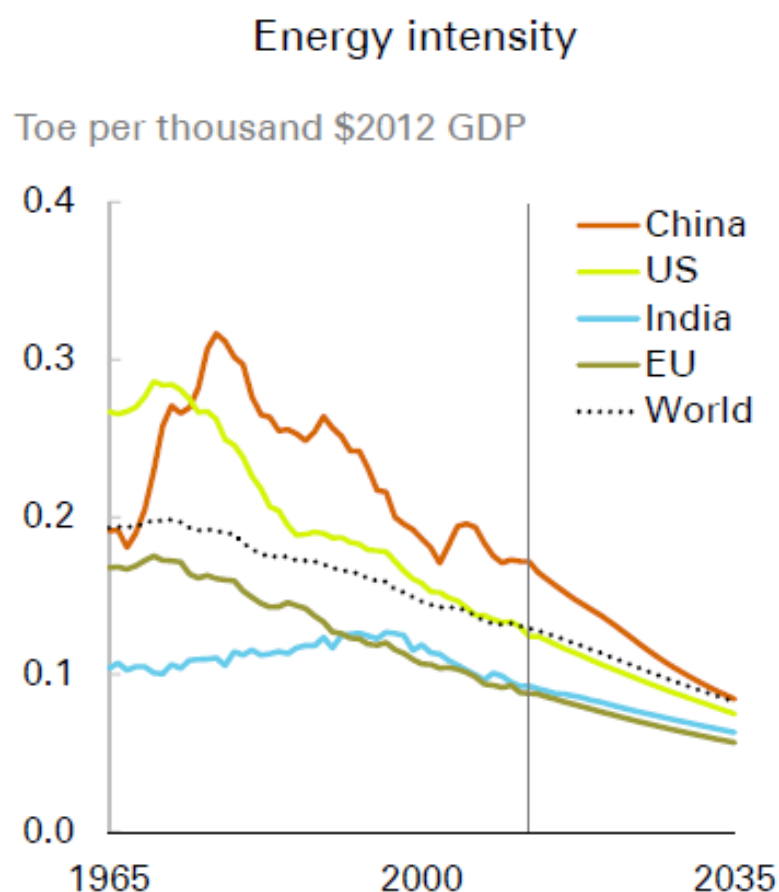


Figura 2.5- a) Intensidade energética (Fonte: [BP14]).

## Carbon intensity

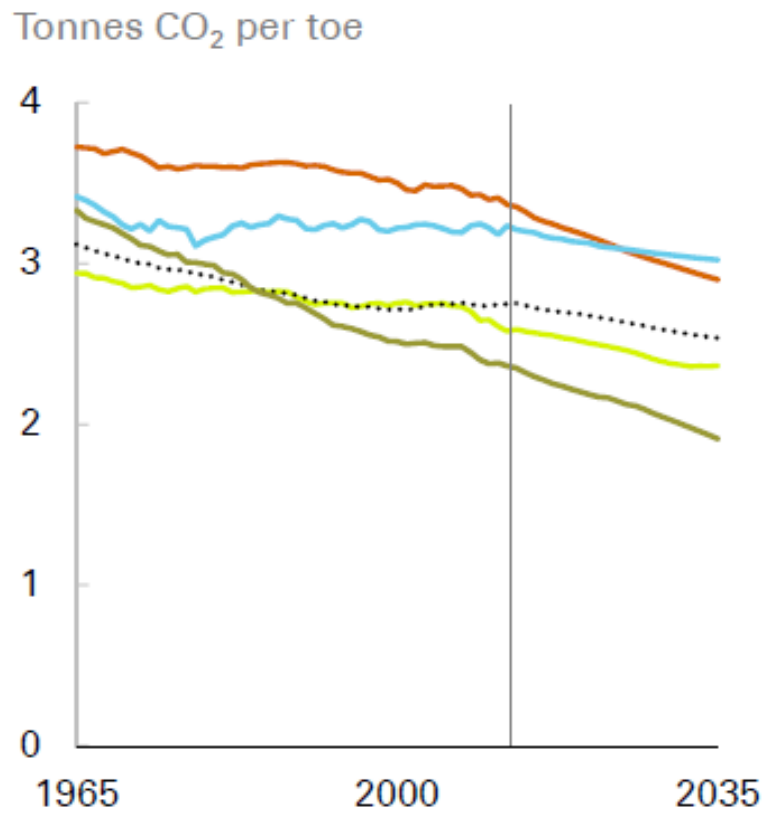


Figura 2.5- b) Intensidade carbónica (Fonte: [BP14]).

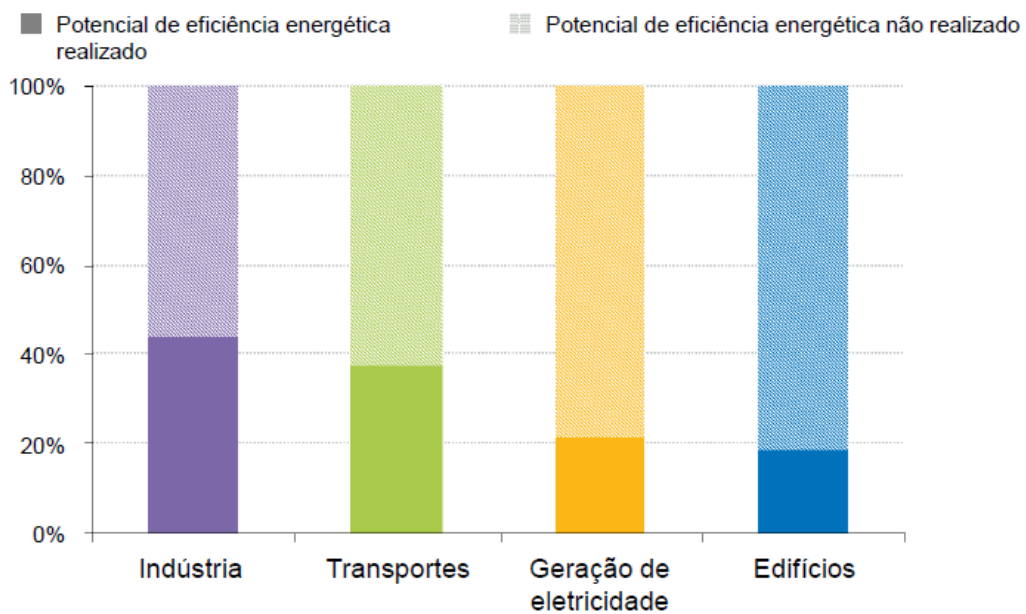


Figura 2.5- c) Potencial por explorar de eficiência energética no mundo (Fonte: [IEA13]).

## 2.2. Situação energética Europeia

A situação energética europeia está englobada na análise feita em termos mundiais. Nesta secção irão ser analisados alguns dados específicos, bem como ações e políticas implementadas ou a implementar no espaço europeu, com o objetivo de melhorar a situação energética e ambiental de acordo com os compromissos assumidos internacionalmente.

O perfil de consumo energético da Europa é caracterizado por uma forte dependência relativamente ao petróleo, combustíveis sólidos e gás, representando 76% do global. Esta situação está em tendência de mudança, perspetivando-se que em 2030 este peso desça para 67%, aumentando 8% a parcela correspondente às energias renováveis, como se pode observar na figura 2.6 a) e 2.6 b).

Se associarmos o peso significativo das combustíveis fósseis com a dependência considerável das importações do exterior, Figura 2.7, verifica-se que o problema energético europeu necessita de intervenções de fundo que permitam reverter esta situação, de modo a que se torne mais competitiva a nível internacional.

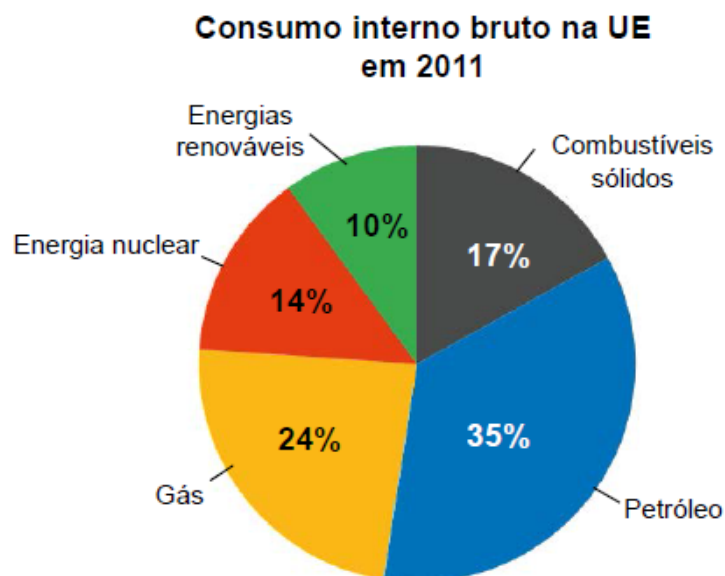


Figura 2.6- a) Perfil energético da Europa em 2011 (Fonte: [CE13]).

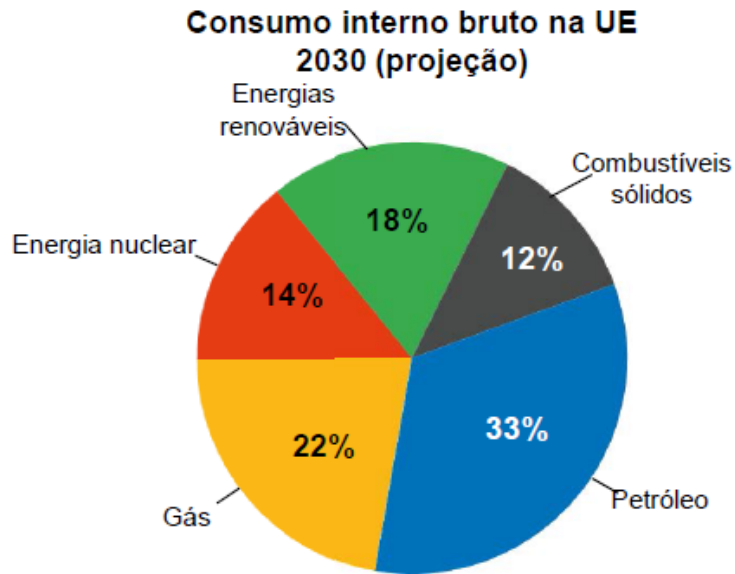


Figura 2.6- b) Perfil energético da europa previsto em 2030 (Fonte: [CE13]).

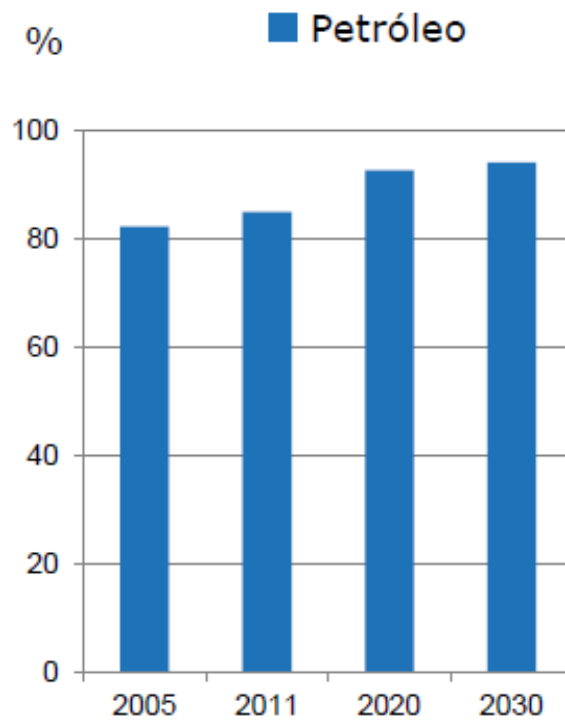


Figura 2.7-a) Percentagem do combustível importado no consumo total da UE, petróleo, (Fonte: [CE13]).

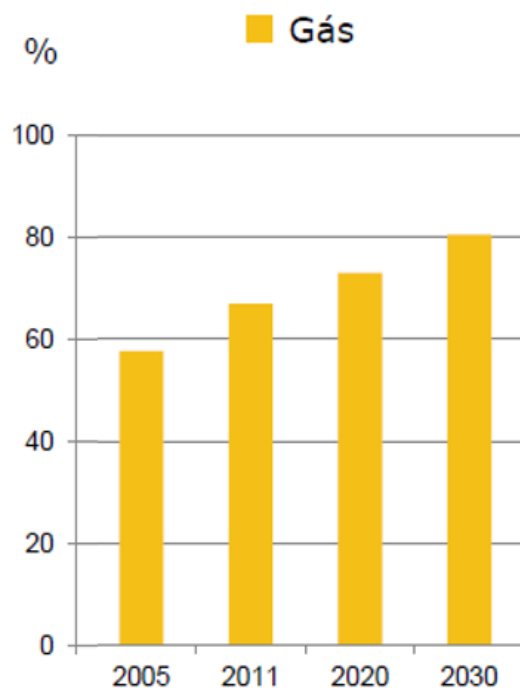


Figura 2.7- b) Percentagem do combustível importado no consumo total da UE, Gás, (Fonte: [CE13]).

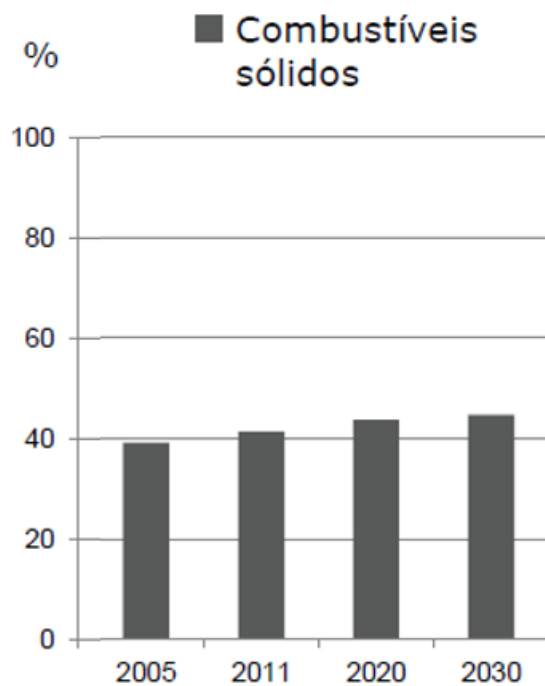


Figura 2.7- c) Percentagem do combustível importado no consumo total da UE, Combustíveis sólidos, (Fonte: [CE13]).

A dependência do exterior e de combustíveis fósseis com preços elevados fazem com que a evolução dos preços da energia elétrica, muito dependente destes combustíveis, sejam menos competitivos para as empresas europeias em relação aos seus concorrentes nos mercados internacionais, figura 2.8, agravados pela elevada intensidade energética da europa [Eurostat13], tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1- Intensidade energética na UE (kgep/1000€).

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
EU-28	171	168	169	167	164	159	152	151	150	151	144

Fonte: Eurostat- *Energy, transport and environment indicators 2013*

Tabela 2.2- Percentagem da Intensidade energética na UE (2001=100%).

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
EU-28	100.0	98.4	99.2	97.9	96.0	93.0	89.2	88.5	87.6	88.7	84.2

Fonte: Eurostat- *Energy, transport and environment indicators 2013*

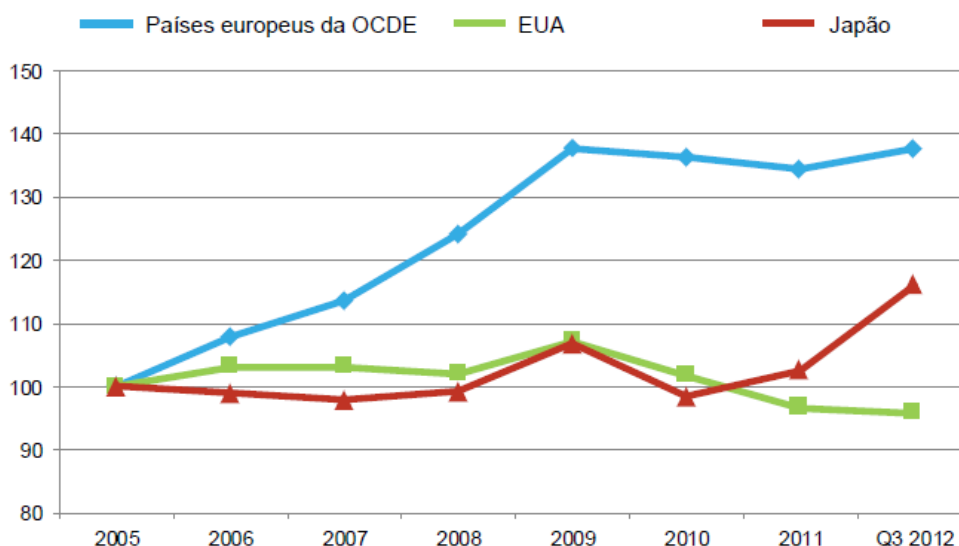


Figura 2.8- Evolução dos preços ao nível do utilizador final da eletricidade para a indústria, excluindo impostos (2005 = índice 100), (Fonte: [CE13]).

A intensidade energética na União Europeia tem vindo a diminuir, tendo-se verificado uma diminuição de 16% na última década. Os resultados obtidos pelos países membros são bastante díspares; embora quase todos tenham diminuído a sua intensidade energética, os valores oscilaram em 2011 entre os 712kgep/1000€ na Bulgária e os 82kgep/1000€ na Irlanda, sendo que a diminuição tem variado entre os 44% da Lituânia e o aumento de 11.6% de Malta, único a aumentar a intensidade energética [Eurostat13].

Apesar das diferenças, está em vigor um quadro legislativo comum. A legislação europeia foi criada para promover a utilização de fontes de energia renováveis, intensificar os esforços em matéria de eficiência energética e garantir a segurança da exploração de petróleo e de gás. Os Estados-membros têm objetivos políticos comuns: reduzir a fatura energética para os agregados familiares e as empresas («*competitividade*»), garantir um aprovisionamento fiável e ininterrupto de energia («*segurança do aprovisionamento*») e limitar o impacto ambiental da produção, transporte e utilização da energia («*sustentabilidade*»).

Assim, foi acordado entre os estados membros atingir, até 2020, três grandes objetivos (vulgarmente designados «20-20-20 até 2020»): reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em 20% em relação aos níveis de 1990, aumentar a quota de fontes de energia renováveis como parte da combinação energética da UE para 20%, e aumentar em 20% a eficiência energética.

No ponto seguinte será analisada a situação energética Portuguesa.

### **2.3. Situação energética Portuguesa**

A situação energética e legislativa Portuguesa está englobada na análise feita em termos Europeus. Nesta secção iremos analisar alguns dados específicos, bem como ações e políticas implementadas ou a implementar em Portugal com o objetivo de melhorar a situação energética e ambiental de acordo com os compromissos assumidos perante as instituições europeias e acordos internacionais subscritos.

O perfil de consumo energético de Portugal é caracterizado por uma forte dependência relativamente ao exterior e um grande peso do petróleo, carvão e gás, representando 76% do global (2011). Esta situação está em tendência de mudança, tendo vindo a dependência do exterior a diminuir nos últimos anos e a aumentar, significativamente, a parcela correspondente às energias renováveis (8,1% na última década) como se pode verificar pelas figuras 2.9, 2.10 e 2.11.

A intensidade energética em Portugal tem vindo a diminuir gradualmente, diminuindo 8.5% na última década, passando de 167 kgep/1000€ em 2001 para 153 kgep/1000€ em 2011 [Eurostat13].

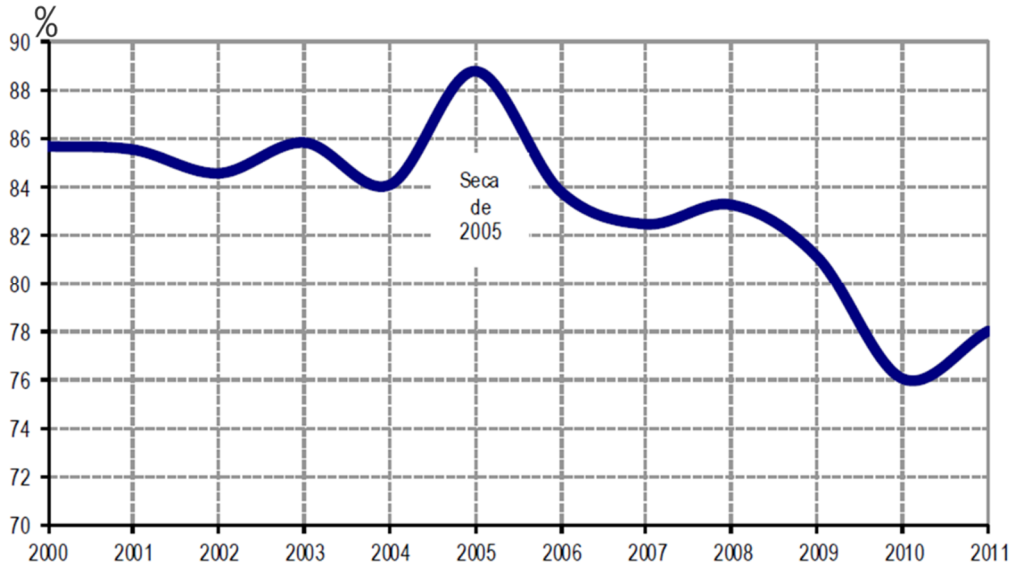


Figura 2.9- Dependência energética do exterior em %, (Fonte: [DGEG14]).

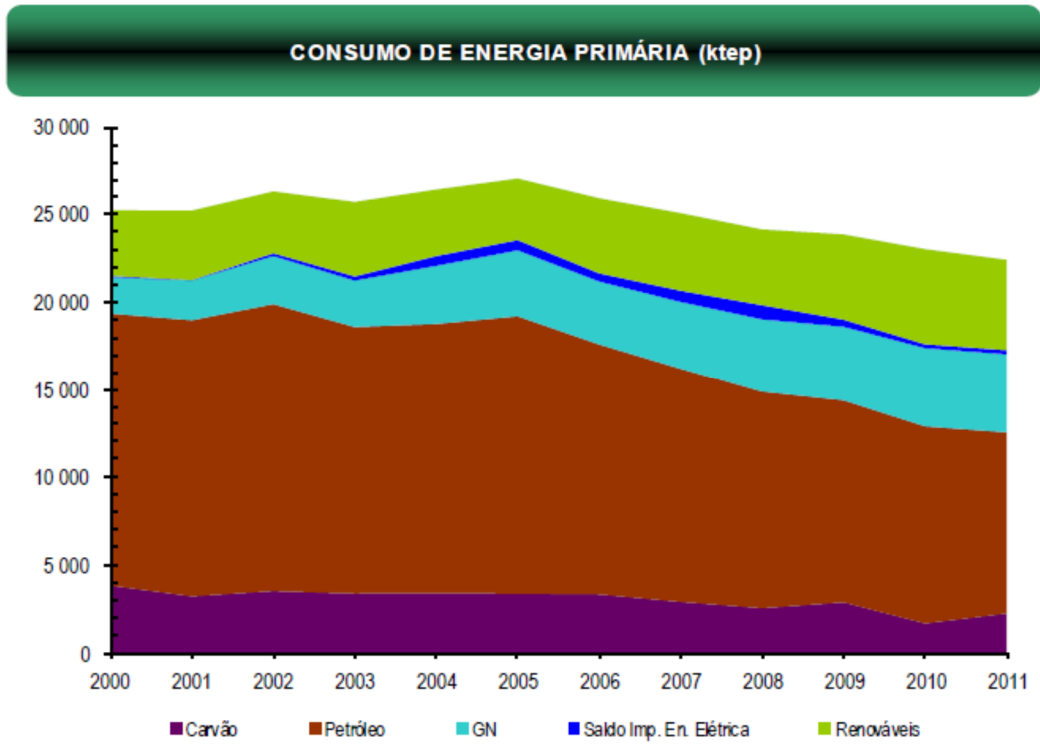


Figura 2.10- a) Consumo de energia primária (ktep) (Fonte: [DGEG14]).

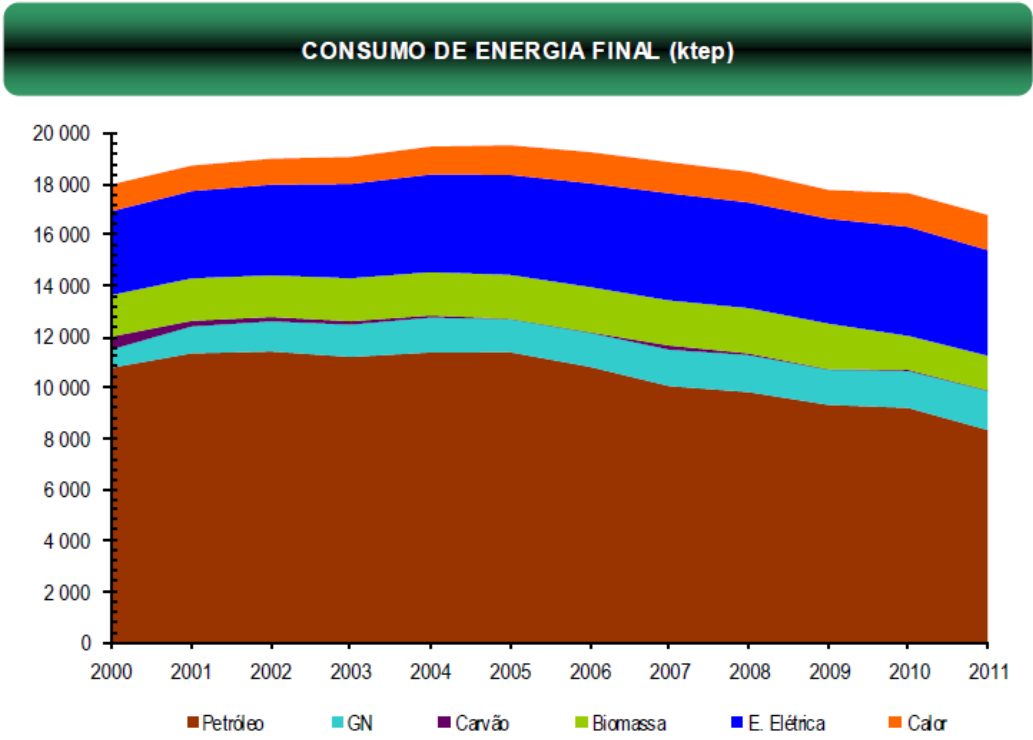


Figura 2.10- b) Consumo de energia final (ktep) (Fonte: [DGEG14]).

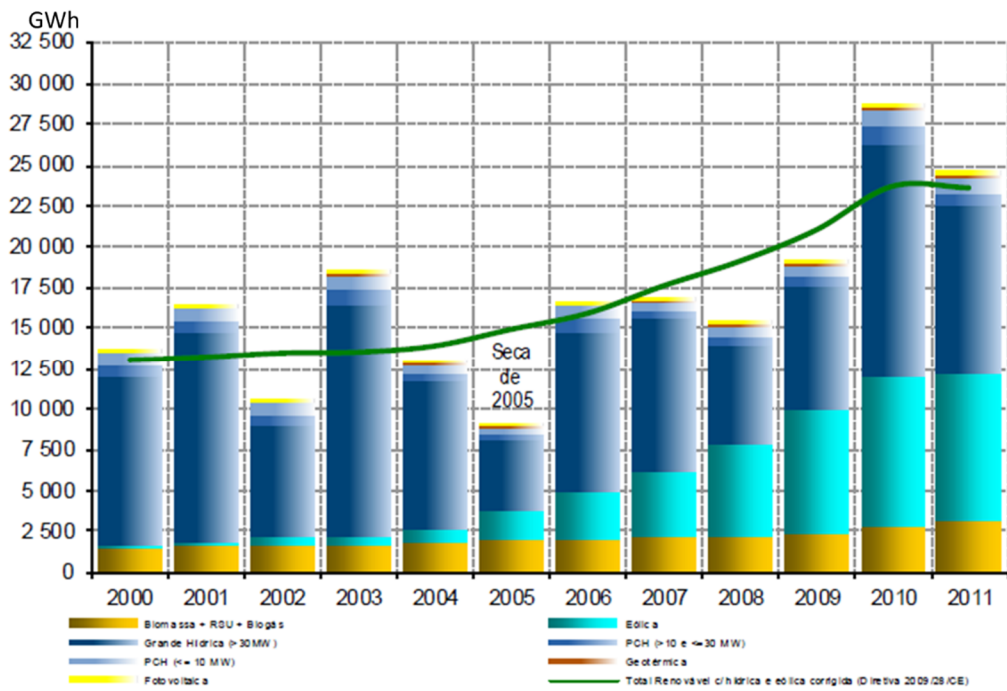


Figura 2.11- Produção de eletricidade por energias renováveis (GWh), (Fonte: [DGEG14]).

Se analisarmos o valor da intensidade energética em função da situação dos países membros da união europeia, figura 2.12, verificamos que Portugal não está entre os países com pior índice. No entanto, e devido à dependência externa e elevado custo da energia, todas as ações e legislação que permita uma efetiva melhoria e redução da fatura energética é bem-vinda. Tendo em consideração o tema desta tese, irão ser destacados os resultados dos objetivos e legislação na atividade industrial englobada nas políticas energéticas e ambientais a levar a cabo em Portugal.

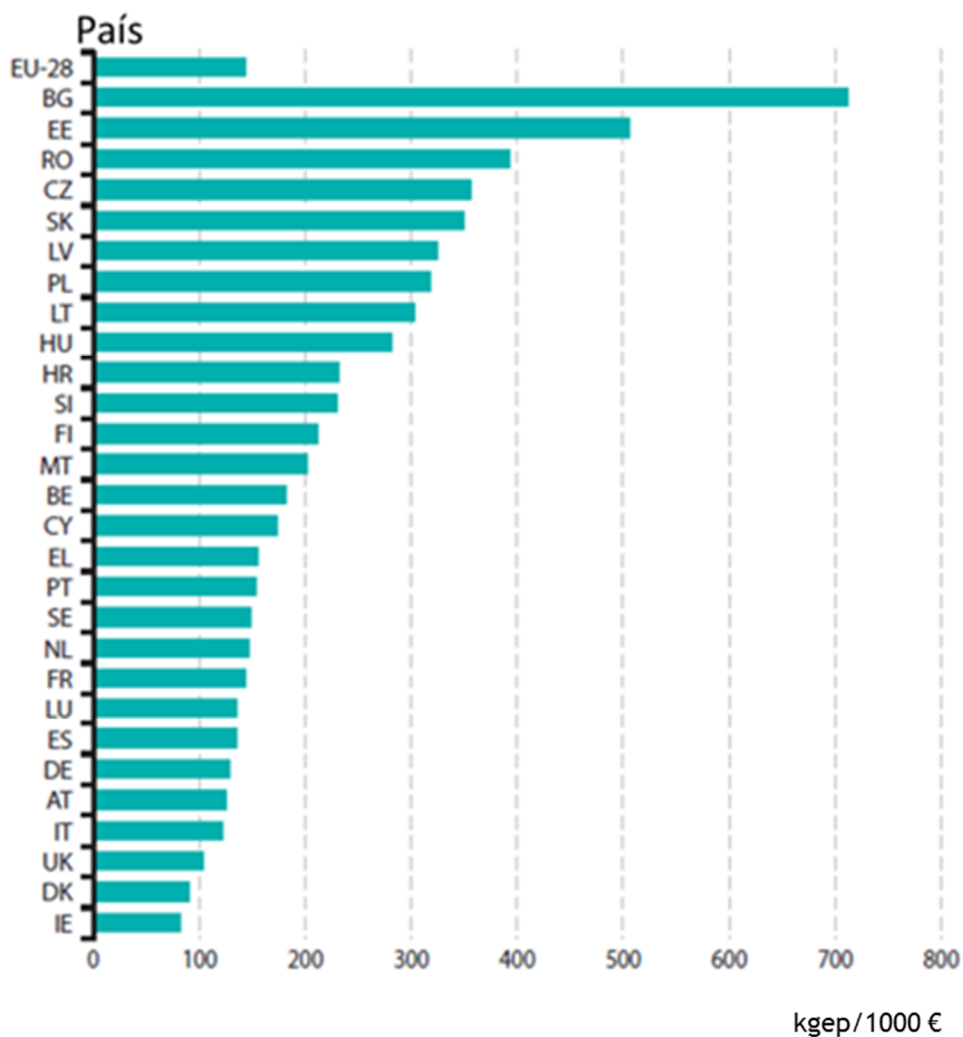


Figura 2.12- Intensidade energética (2011), (Fonte: [Eurostat13]).

A melhoria constante deve ser um dos objetivos de todos os agentes políticos. Em Portugal, os resultados têm vindo a melhorar como mostra a análise efetuada, isto é, do sucesso resultante da implementação dos vários programas e legislação que têm sido desenvolvidos pelos vários governos, ao nível da política energética nacional, podem destacar-se os resultados obtidos na indústria pela aplicação do Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia (SGCIE).

Com a introdução do SGCIE como substituto do RGCE (Regulamento de Gestão de Consumo de Energia), onde foram introduzidas novas regras, objetivos e incentivos, os resultados são promissores. Deste modo, verificou-se um aumento de novos registos relativamente à situação anterior, como pode ser observado na figura 2.13.

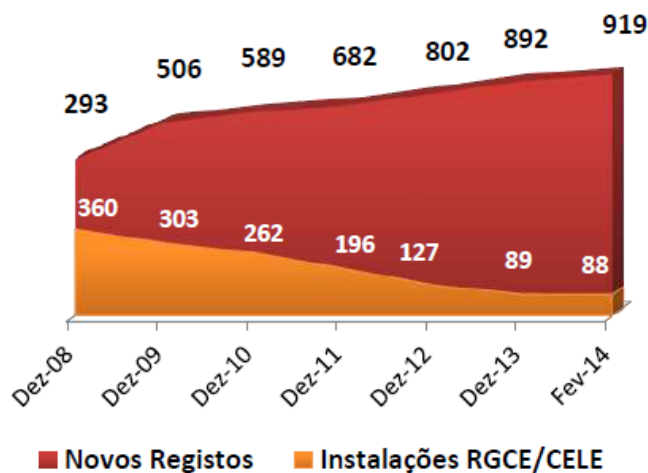


Figura 2.13- Instalações registadas no SGCIE, (Fonte: [ADENE14]).

Destes registos sobressaem instalações sediadas nos distritos de Aveiro com 159, Lisboa com 144, Porto com 131 e Braga com 124, e os setores de atividade das indústrias alimentares com 135, as indústrias têxteis com 109 e o fabrico de produtos minerais não metálicos com 83 instalações registadas. O conjunto das instalações registadas no SGCIE representam 29% do consumo final total de energia [ADENE14], com especial destaque para a energia elétrica com 493714 tep e o gás natural com 420529 tep, figura 2.14.

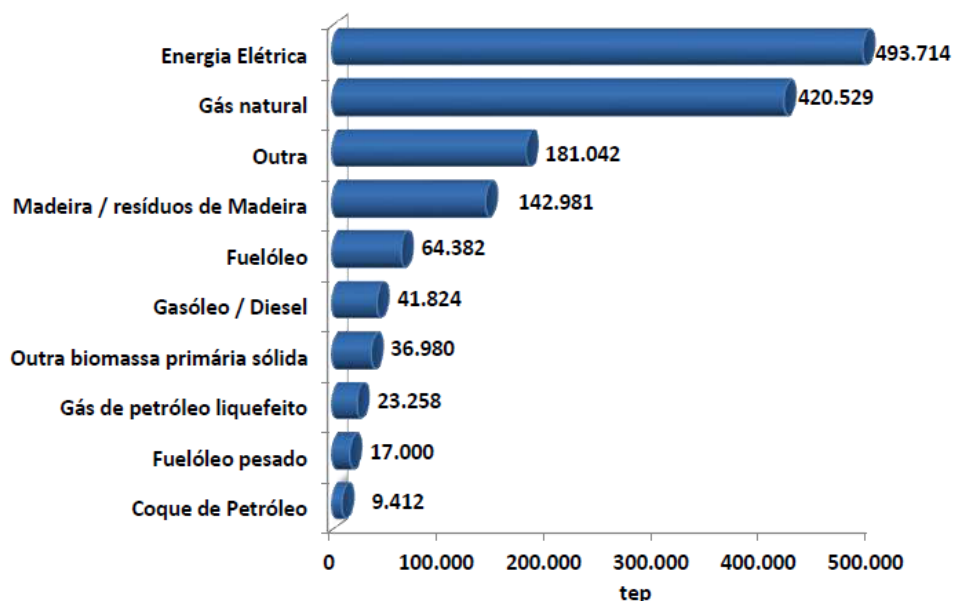


Figura 2.14- Consumo anual de Energia Final e principais formas de energia, (Fonte: [ADENE14]).

Foram registados 821 Planos de Racionalização do Consumo de Energia (PREn), dos quais 785 já aprovados, prevendo-se chegar aos 943 até Dezembro 2014, tendo sido obtida uma taxa de execução global de 87%. Das medidas de redução do consumo de energia constantes dos 785 planos de racionalização aprovados, consta uma redução global do consumo de energia de 93160 tep e uma redução global de 341550 t<sub>eq.</sub> CO<sub>2</sub> de emissões de GEE, como apresentado na figura 2.15.

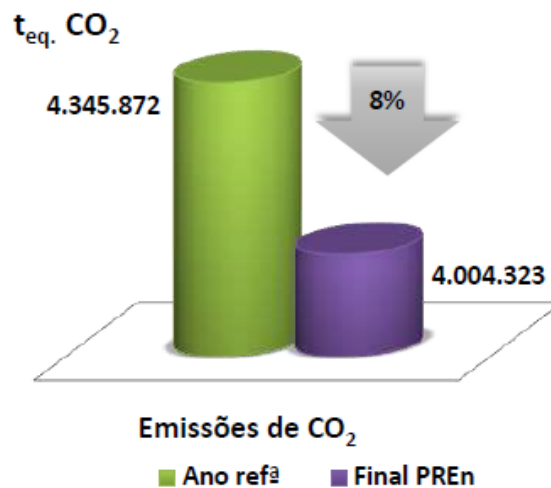


Figura 2.15- a) Redução das emissões CO<sub>2</sub> dos PREn, (Fonte: [ADENE14]).

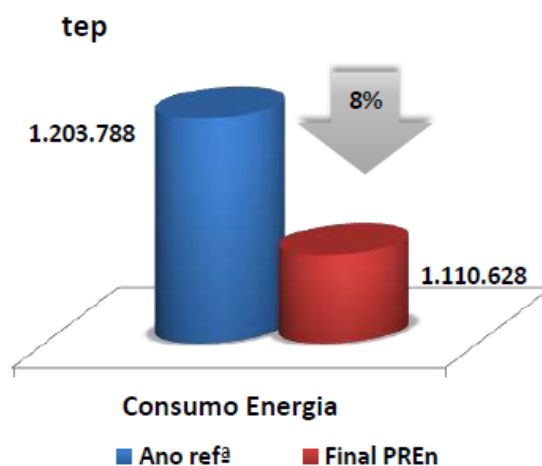


Figura 2.15- b) Redução do consumo de energia dos PREn, (Fonte: [ADENE14]).

O potencial de redução de energia por tipologia de medida identificada nos PREn é liderada pelas medidas de recuperação de calor.

Com grande potencial surge também a iluminação eficiente e a otimização de motores, figuras 2.16 e 2.17.

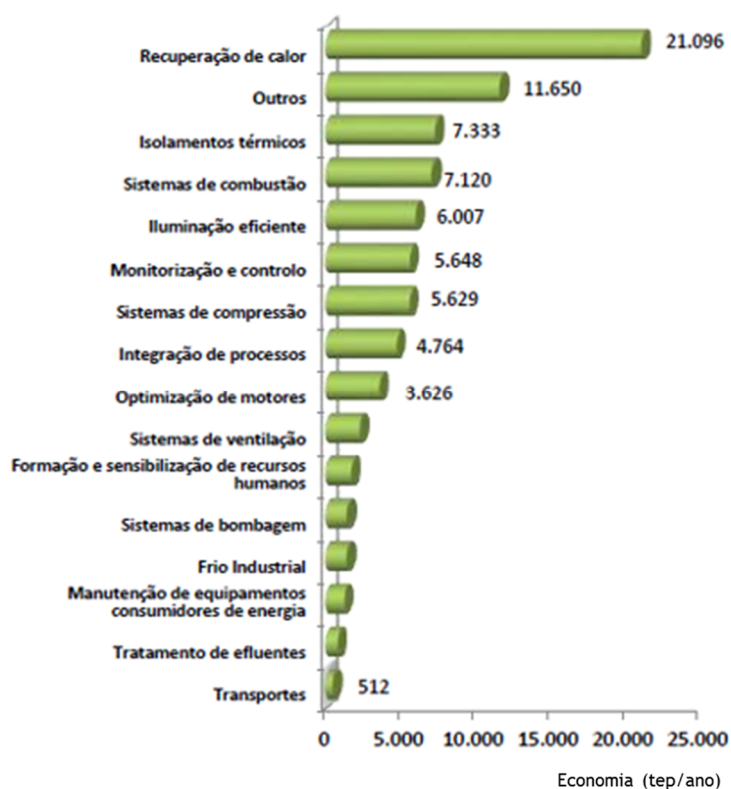


Figura 2.16- Potencial de economia de energia por tipologia de medida (tep/ano), (Fonte: [ADENE14]).



Figura 2.17- Potencial de economia de energia por tipologia de medida (Custo/tep), (Fonte: [ADENE14]).

## 2.4. Conclusão

A otimização da exploração de recursos energéticos assume importância relevante no contexto atual de crise económica. Assume especial relevância o esforço de todos, em termos mundial, regional ou local. Os tratados internacionais complementados com a legislação de cada país, individualmente com as suas especificidades, é um meio de atingir os objetivos globais, aumentando a eficiência energética e reduzindo a fatura, facto importante para consumidores industriais ou domésticos. Toda a investigação que permita atingir os objetivos propostos será pertinente.

## **Capítulo 3**

### **Instalações elétricas domésticas, industriais e de iluminação pública**

# Introdução

O processo de dimensionamento, execução e exploração de instalações elétricas, de modo a funcionarem de forma eficiente, garantirem qualidade, segurança e continuidade no uso da energia, exige conhecimento das Regras Técnicas das Instalações Elétricas de Baixa Tensão por parte do projetista e dos instaladores. Neste capítulo, irão ser abordados os aspetos ligados às estruturas das instalações elétricas, de utilização e iluminação, em especial nos aspetos respeitantes aos conceitos, simplificações e valores regulamentares relativamente às quedas de tensão, resistência elétrica dos condutores e cabos, bem como às perdas por efeito de joule.

## 3.1 Configurações das instalações elétricas

O fornecimento, aos consumidores finais, de energia com qualidade, segurança e fiabilidade das instalações, em termos de exploração e de manutenção é um imperativo nas sociedades modernas, cada vez mais dependentes das novas tecnologias, onde a falha é cada vez menos tolerada. De modo a diminuir falhas de alimentação aos consumidores finais, as instalações elétricas têm configurações próprias de acordo com três níveis: transporte, distribuição e utilização.

- No transporte de energia em alta e muito alta tensão são usadas redes de distribuição malhadas e em anel, de modo a permitir interligar as várias fontes de produção, convencionais e não convencionais, aos centros de distribuição, normalmente a partir de subestações elétricas, como se pode observar na figura 3.1 (que apresenta a rede malhada).

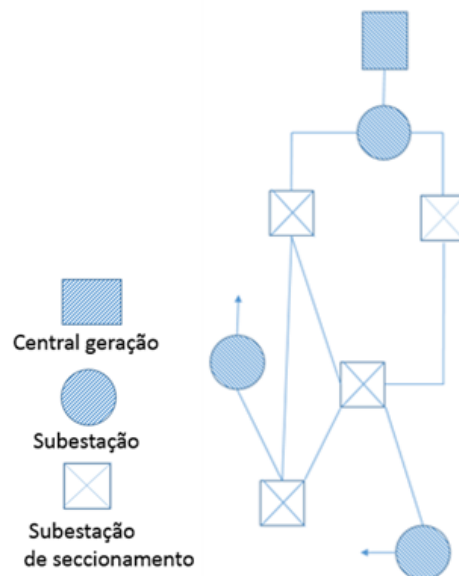


Figura 3.1-a) Rede malhada; representação esquemática.



Figura 3.1-b) Rede malhada; exemplo da rede de transporte portuguesa, (Fonte: [REN14]).

-Nas redes de distribuição, normalmente em média tensão ou baixa tensão nos aglomerados populacionais, devido à segurança de pessoas e bens, as configurações usadas são em anel ou radial (figuras 3.2 a) e b), respetivamente), em função das exigências e características das zonas onde estão implantadas.

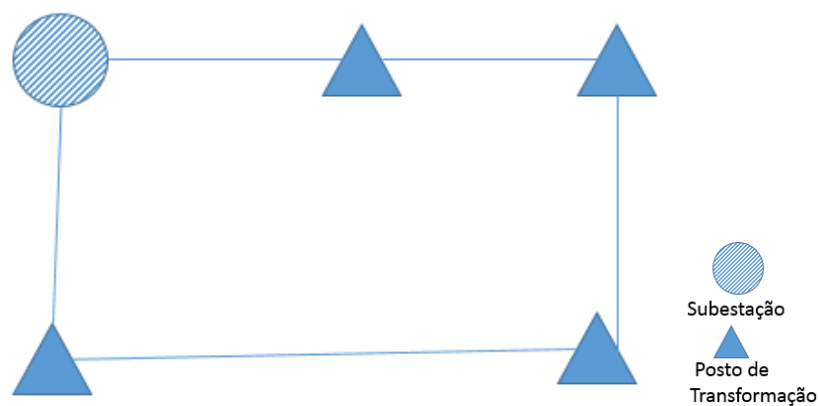


Figura 3.2- a) Rede de distribuição em anel.

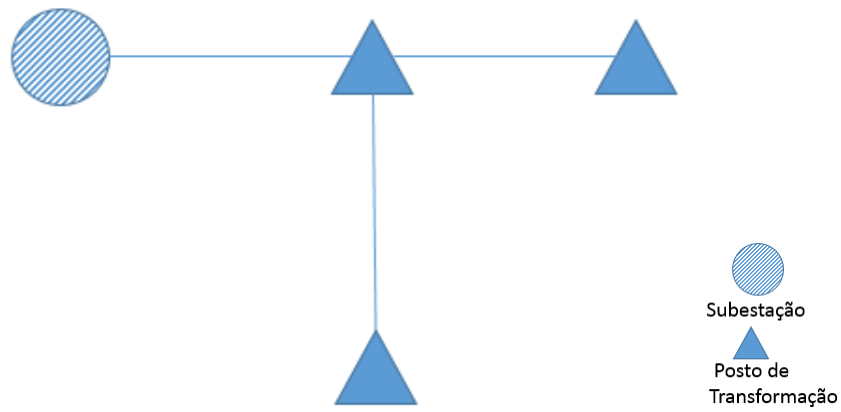


Figura 3.2- b) Rede de distribuição radial.

- Nas Instalações de utilização em baixa tensão, industriais ou domésticas, é usada a configuração radial, podendo ser alimentada a partir de um posto de transformação, como é apresentado na figura 3.3, ou por uma rede de distribuição de baixa tensão, como é apresentado na figura 3.4.

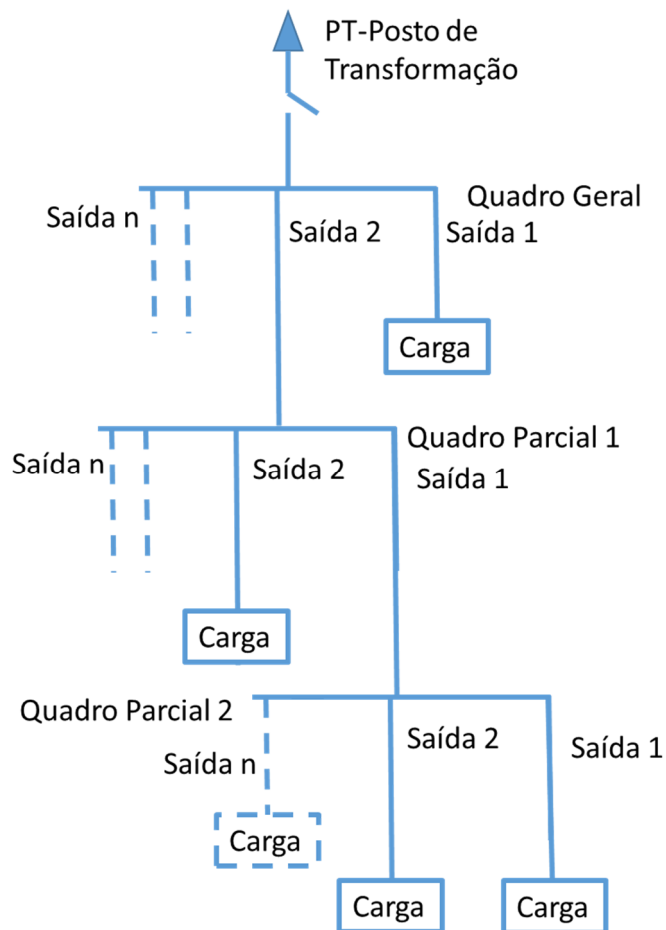


Figura 3.3- Esquema de instalação elétrica alimentada por PT.

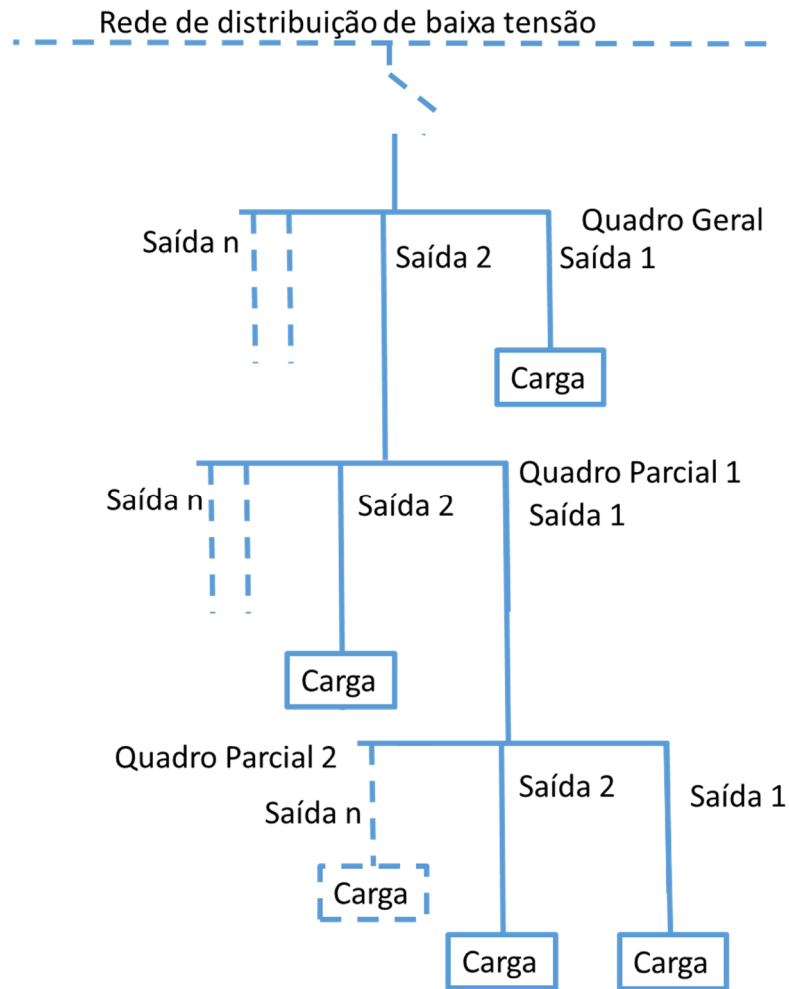


Figura 3.4- Esquema de instalação elétrica alimentada por rede de distribuição em baixa tensão.

Como o estudo apresentado nesta tese incide sobre instalações de utilização de tipo radial, apenas estas instalações serão objeto de estudo pormenorizado nos pontos seguintes, relativamente a parâmetros e legislação portuguesa a observar, de modo a garantir o seu funcionamento eficiente e em segurança.

### 3.2 Quedas de tensão nas instalações elétricas

O cálculo das quedas de tensão é fundamental na fase de projeto de instalações elétricas, por um lado, de modo a garantir que as infraestruturas definidas cumpram os requisitos regulamentares e, por outro lado, o bom funcionamento e a longevidade dos equipamentos e instalações. Todos os equipamentos elétricos têm uma tensão estipulada de funcionamento; a aplicação de tensões superiores ou inferiores pode levar a que a vida útil seja reduzida, ou o equipamento simplesmente deixe de funcionar. Assim, a tensão deve manter-se dentro de determinados limites permitidos.

A legislação principal aplicável em Portugal está patente nas “Regras Técnicas das Instalações Elétricas de Baixa Tensão” (RTIEBT), aprovadas pela portaria n.º 949-A/2006; estas definem um conjunto de normas de instalação e de segurança a observar nas instalações elétricas de utilização em baixa tensão [Henrique10], no que se refere à queda de tensão estipulada que é a queda de tensão máxima entre a origem da instalação e qualquer ponto de utilização, expressa em função da tensão nominal da instalação, não devendo ser superior aos valores indicados na tabela 3.1.

Tabela 3.1-Queda de tensão máxima entre a origem da instalação e qualquer ponto de utilização [RTIEBT06].

Quedas de tensão permitidas nas instalações elétricas					
Nas instalações coletivas		Alimentada por rede pública		Alimentada por P T	
Coluna	Entrada	Iluminação	Outros Usos	Iluminação	Outros Usos
1%	0,5%	3%	5%	6%	8%

Para o cálculo da queda de tensão, podemos recorrer à aplicação das leis gerais da eletrotecnia. Logo, se considerarmos uma carga alimentada por um troço de uma instalação monofásica, com um condutor de fase e um condutor neutro de retorno, como representado na figura 3.5, a queda de tensão pode ser calculada pela equação (3.2); sendo uma instalação de corrente alternada, a análise deve ser efetuada vectorialmente, como representado na figura 3.6 para a tensão  $\vec{V}_0$ .

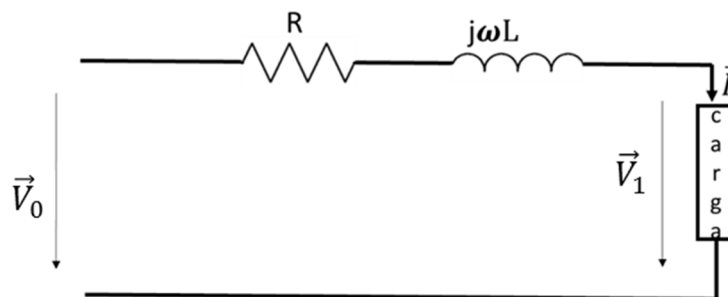


Figura 3.5- Circuito monofásico RL.

Apenas se leva em consideração a impedância longitudinal com a respetiva resistência e indutância [Henrique10].

$$\vec{Z} = R + j\omega L \quad (3.1)$$

$$\Delta V = |\vec{V}_0| - |\vec{V}_1| \quad (3.2)$$

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_1 + \vec{Z} \cdot \vec{I} = \vec{V}_1 + (R + jX) \cdot \vec{I} \quad (3.3)$$

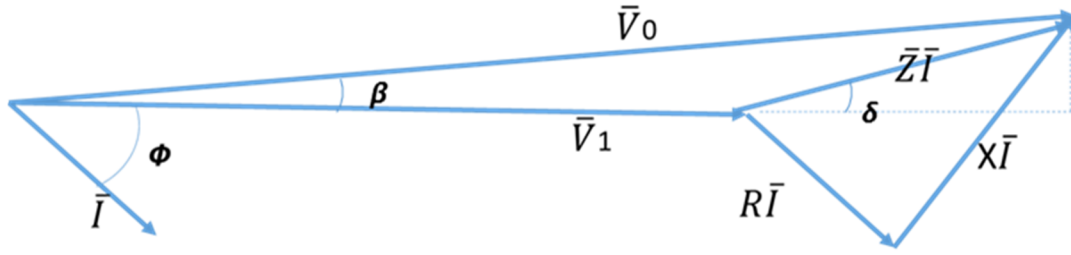


Figura 3.6- Diagrama vetorial.

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_1 + \vec{Z} \cdot \vec{I} = \vec{V}_1 + (R + jX) \cdot I (\cos\phi + j\text{sen}\phi) \quad (3.4)$$

$$V_1 = V_0 \cos\beta - ZI \cos\delta \quad (3.5)$$

Como

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{ZI}{V_0} \text{sen}\delta\right)^2} \quad (3.6)$$

Substituindo a equação (3.6) na equação (3.5) e aplicando o teorema de Taylor ao desenvolvimento da raiz, obtemos:

$$V_0 - V_1 = RI \cos\phi + XI \text{sen}\phi + \frac{(XI \cos\phi - RI \text{sen}\phi)^2}{2V_0} + \frac{(XI \cos\phi - RI \text{sen}\phi)^4}{8V_0^3} + \frac{(XI \cos\phi - RI \text{sen}\phi)^6}{16V_0^5} + \dots \quad (3.7)$$

A componente  $V_0 - V_1 = RI \cos\phi + XI \text{sen}\phi$  representa a principal componente que provoca a queda de tensão, pelo que esta aproximação é usada frequentemente em circuitos monofásicos.

Para permitir a sua utilização em circuitos trifásicos e monofásicos, podemos reescrever e obter a equação indicada nas RTIEBT, em função das características dos condutores e da corrente da instalação, obtendo a equação (3.8) [RTIEBT06].

$$\Delta V = V_0 - V_1 = b \left( \rho \frac{L}{S} \cos\phi + \lambda L \text{sen}\phi \right) I_B \quad (3.8)$$

onde:

$\Delta V$  - Queda de tensão em Volt;

b - Coeficiente igual a 1 para circuitos trifásicos e 2 para circuitos monofásicos ou de corrente contínua;

$\rho$  - Resistividade elétrica dos condutores em serviço normal, 1,25 vezes acima do valor a 20 °C, em  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ;

L - Comprimento simples da canalização, em m;

S - Secção reta dos condutores, em  $\text{mm}^2$ ;

$\phi$  - Ângulo de defasamento entre a tensão simples respetiva e a corrente;

$\lambda$  - Reactância linear dos condutores em  $\Omega/\text{m}$ ;

$I_B$  - Corrente de serviço, em A.

As RTIEBT permitem ainda a equação (3.9) simplificada para a verificação das quedas de tensão em instalações elétricas [RTIEBT06].

$$\Delta V = b \left( \rho \frac{L}{S} \right) I_B \quad (3.9)$$

A queda de tensão expressa em percentagem é:

$$\Delta V\% = \frac{\Delta V}{V_0} 100 \quad (3.10)$$

em que:

$\Delta V$  - Queda de tensão, expressa em Volt;

$\Delta V\%$  - Queda de tensão relativa, expressa em percentagem;

$V_0$  - Tensão entre fase e neutro, expressa em Volt;

De salientar que se o circuito que alimenta uma carga não for alimentado diretamente do quadro geral da instalação, mas através de quadros parciais como pode acontecer no esquema apresentado na figura 3.4, o cálculo da queda de tensão deve ser efetuado individualmente em todos os circuitos, desde a entrada da instalação até à carga final, sendo realizada a verificação do cumprimento das normas, através do acumulado das quedas de tensão dos vários circuitos.

### 3.3 Perdas por efeito de joule

Uma instalação elétrica de utilização, seja grande ou pequena, quando em funcionamento produz calor nos condutores o qual, não sendo aproveitado, é considerado como perda de energia. Estas perdas, designadas por perdas por efeito de joule, são proporcionais à resistência dos condutores e ao quadrado da corrente elétrica que neles circula.

A corrente elétrica depende da potência, do funcionamento das cargas da instalação, da resistência das características físicas dos condutores e das características da tensão, como por exemplo a frequência. As perdas por efeito de Joule têm assim que ser analisadas em função de toda a instalação e componentes, em simultâneo, de acordo com as suas características de funcionamento.

As instalações elétricas domésticas ou industriais funcionam normalmente em corrente alternada sinusoidal com frequências de 50 ou 60 Hz, dependendo do sistema adotado pelo país, sendo em Portugal usada a frequência de 50 Hz.

A corrente alternada, pelas suas características, provoca alterações à sua volta, como seja a criação de campos magnéticos. Estes campos magnéticos interagem com as cargas elétricas. Sendo a corrente elétrica, numa instalação, correspondente ao movimento de eletrões com carga negativa, orientados num condutor, e o circuito elétrico constituído por vários condutores agrupados em cabos ou condutas, tem como resultado a influência dos campos magnéticos do condutor e dos condutores próximos em todos os outros condutores, alterando o movimento e disposição espacial dos eletrões nos próprios condutores. Estas influências são designadas por efeito de *skin* e de proximidade dos condutores, tendo como consequência a alteração da resistência em condutores elétricos quando usados em corrente alternada.

Em termos gerais, o efeito de *skin* é a tendência que a corrente alternada tem para se distribuir dentro de um condutor, aumentando a densidade de corrente na superfície do condutor. Assim, a densidade de corrente é elevada perto da superfície do condutor, e mais reduzida em maiores profundidades, sendo praticamente nula no centro para condutores de grandes secções e altas frequências.

Na figura 3.7 podemos verificar o efeito de *skin*, na figura 3.8 o efeito de proximidade, e na figura 3.9 a influência simultânea dos dois efeitos.

A corrente elétrica flui principalmente na superfície do condutor, entre a superfície exterior e um nível interior, chamando a profundidade de *skin*.

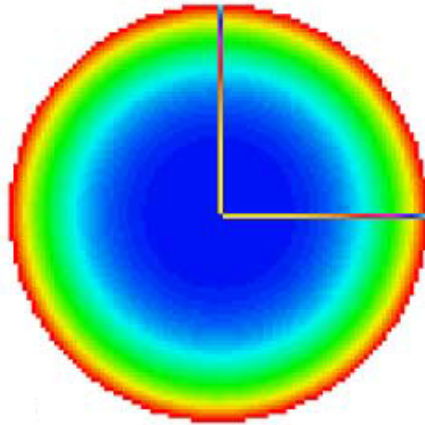


Figura 3.7- Distribuição da corrente como resultado de efeito de *skin*, (Fonte: [Zhang11]).

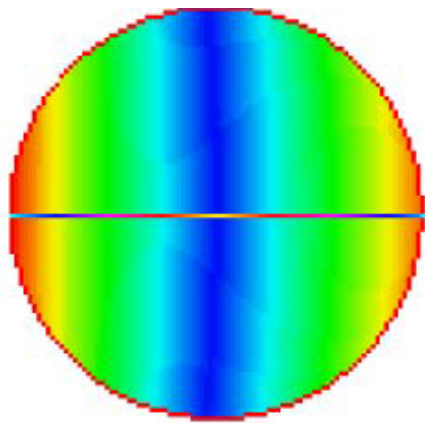


Figura 3.8- Distribuição da corrente devido a efeito de proximidade, (Fonte: [Zhang11]).

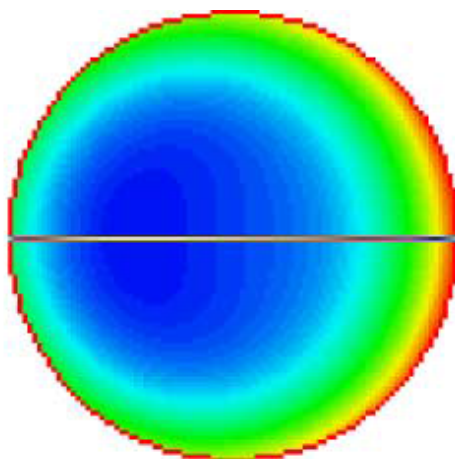


Figura 3.9- Distribuição da corrente como resultado da combinação dos efeitos de *skin* e de proximidade, (Fonte: [Zhang11]).

O efeito de *skin* faz com que a resistência efetiva do condutor possa aumentar, devido à menor secção efetiva usada para a condução da corrente, em especial para frequências mais altas onde a profundidade de *skin* é menor. A 60 Hz, num condutor de cobre, a profundidade de *skin* é aproximadamente de 8.5 mm. A profundidade de *skin* é devida às correntes induzidas que circulam resultantes de um campo magnético, diminuindo o fluxo de corrente no centro do condutor e reforçando-o à sua superfície “*skin*”.

Por outro lado, se um condutor por onde circula corrente estiver próximo de um ou mais condutores por onde também circulem correntes, fica sujeito à influência dos campos magnéticos provocados por eles. Esta influência faz com que a distribuição de corrente dentro do primeiro condutor seja restrita a regiões mais pequenas, pois tende a concentrar a densidade de corrente na secção mais próxima dos condutores que o estão a influenciar e diminuir na mais afastada, ou em sentido contrário, dependendo do sentido da corrente. Este efeito resultante de aglomeração de corrente, num ou no outro lado da secção do condutor, é denominado de efeito de proximidade. O efeito de proximidade pode aumentar significativamente a resistência AC de condutores adjacentes, quando comparada com a sua resistência em corrente contínua.

As perdas nos condutores de uma instalação elétrica poderão, assim, ter que considerar o efeito de *skin* e de proximidade de outros condutores. Dada a não linearidade e a diversidade de configurações de caminhos de cabos, o problema pode tornar-se muito complexo em termos de análise.

Vários estudos foram feitos, desde a utilização de programas de análise de elementos finitos à simplificação e verificação de fórmulas semi-empíricas que permitam resultados válidos e facilitem uma análise analítica e computacional.

Se numa instalação assumirmos que os vários condutores de fase podem ser tratados como condutores paralelos infinitamente longos, como analisado por [Zhang11], de modo que os campos magnéticos envolventes resultantes em torno dos condutores sejam, no plano, perpendicular ao eixo do condutor e as correntes de Foucault que resultam circulem paralelamente no sentido ou sentido contrário do condutor; considerando o vetor de densidade de corrente da fonte  $\vec{J}_s$  e os vetores de densidade de corrente de Foucault  $\vec{J}_{ei}$  induzidas a partir dos vários condutores de fase, podem ser adicionados em cada área infinitesimal da secção transversal do condutor em análise, e a equação (3.11) [Zhang11] pode ser aplicada sobre a área da secção transversal do condutor para determinar a perda total por unidade de comprimento.

$$P_{\text{total}} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2\sigma} \int_{\text{Volume}} \left[ \vec{J}_s + \sum_{i=1}^N \vec{J}_{ei} \right]^2 dV dt \quad (3.11)$$

onde:

$V$  é a variável volume;

$t$  é a variável tempo;

$\sigma$  é a condutividade elétrica do condutor;

$T$  é o período de corrente .

As perdas totais são a soma das duas componentes, do efeito de *skin* e do efeito de proximidade, podendo expressar-se pela equação (3.12) [Zhang11].

$$P_{total} = P_{skin} + P_{prox} \quad (3.12)$$

As perdas totais podem ser analisadas em separado, efetuando a sobreposição no final, permitindo assim uma simplificação e diminuição de cálculos em termos de análise computacional.

### 3.3.1 Contribuição das perdas por efeito de proximidade

As perdas associadas com o efeito de proximidade que, como já foi referido, resulta da interação dos condutores próximos do condutor a analisar, é uma função do espaçamento entre os condutores, da amplitude da corrente, do ângulo de fase, da frequência e da distribuição da corrente induzida.

Por exemplo, em dois condutores adjacentes percorridos por corrente alternada em sentidos opostos, tal como as situações encontradas nos cabos de alimentação de cargas monofásicas e os barramentos dos quadros elétricos, a corrente, em cada um dos condutores, é concentrada em uma secção sobre o lado voltado para o outro condutor. Como a corrente é concentrada numa área mais pequena do condutor, a resistência elétrica aumenta devido a essa influência, pois é inversamente proporcional à secção. A resistência adicional aumenta as perdas de energia, gerando aquecimento adicional indesejável.

Para determinar as perdas de efeito de proximidade de vários cabos condutores trifásicos, várias soluções têm sido apresentadas como sugerido em [Zhang11]; propõe-se que, quando o raio do condutor é maior que a profundidade de *skin*, a dissipação de energia devido ao efeito de proximidade é proporcional ao raio do condutor, podendo expressar-se pela equação (3.13).

Nas situações em que o raio do condutor se torna menor que o valor da profundidade de *skin*, as perdas podem ser expressas pela equação (3.14) [Zhang11].

$$P_{\text{prox}} = (cR + d) \left( \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r} \right)^2, R \geq \delta \quad (3.13)$$

$$P_{\text{prox}} = aR^b \left( \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r} \right)^2, R < \delta \quad (3.14)$$

onde:

$a = 2.605E^6$ ,  $b = 3,968$ ,  $c = 10,192$  e  $d = -0,074$  para o cobre;

$a = 1.485E^6$ ,  $b = 3,951$ ,  $c = 13.222$  e  $d = -0.125$  para o alumínio;

$R$  é o raio do condutor;

$\delta$  é a profundidade de *skin*, dada por (3.15):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \omega \mu_0 \mu_r}} \quad (3.15)$$

### 3.3.2 Contribuição das perdas por efeito de *skin*

A contribuição das perdas por efeito de *skin* podem ser calculadas recorrendo a elementos finitos ou métodos analíticos e semi-empíricos para configurações aleatórias de condutores. Uma abordagem para sistemas de cabos é apresentada em [Zhang11].

O efeito de *skin* aumenta a resistência do condutor, essencialmente devido à frequência da corrente alternada usada nos sistemas de fornecimento de energia. A corrente circula na periferia dos condutores, tendo como resultado o aumento da resistência elétrica devido à diminuição da secção transversal útil, inversamente proporcional à resistência.

A resistência de corrente alternada,  $R_{ac}$ , para um condutor com um diâmetro muito maior do que a profundidade de *skin*, pode ser calculada a partir da equação (3.16) [Zhang11], onde  $D$  é o diâmetro do condutor.

$$R_{ac} = \frac{1}{\pi\sigma\delta(D-\delta)} \quad (3.16)$$

A contribuição das perdas da componente de efeito de *skin* pode ser calculada pela equação (3.17).

$$P_{skin} = I_{rms}^2 R_{ac} \quad (3.17)$$

Nos casos em que o diâmetro do condutor é comparável ou inferior à profundidade de *skin*, a contribuição das perdas por efeito de *skin* deve ser calculada aplicando a equação (3.18) [Zhang11], onde  $R_{dc}$  é a resistência do condutor em corrente contínua,  $I_0$  e  $I_1$  são as funções de Bessel modificadas [Spang08] de primeiro tipo de ordem zero e um, respetivamente.

$$P_{skin} = \frac{I_{rms}^2 R_{dc}}{2} R_e \left[ \gamma \frac{I_0(\gamma)}{I_1(\gamma)} \right] \quad (3.18)$$

com :

$$\gamma = \frac{(1+j)D}{2\delta} \quad (3.19)$$

### 3.3.3 Influência da temperatura na resistência dos condutores

Os condutores elétricos usados em instalações elétricas de utilização podem ser constituídos por almas condutoras de diferentes materiais, essencialmente de cobre e de alumínio, em instalações elétricas de baixa tensão. O isolamento usado depende muito das aplicações e dos locais e modo de colocação das instalações, desde locais interiores sem necessidade de características especiais, até a instalações submersas permanentemente em água, como numa bomba submersível. As características dos condutores e das instalações determinam a corrente máxima admissível, essencialmente em função das temperaturas suportadas quando em operação, pois a temperatura varia pelo efeito de Joule em função da corrente das cargas da instalação.

Na tabela 3.2 são apresentados os valores dos isolantes mais usados nos isolamentos dos condutores e cabos comuns, na execução de instalações elétricas de utilização.

Tabela 3.2- Temperatura máxima de funcionamento dos condutores em função do tipo de isolamento.

Tipo de isolamento	Temperatura máxima de funcionamento ( °C) Segundo as Normas NP 2356, NP 2357 e NP 2365.
Policloreto de vinilo (PVC)	70
Polietileno reticulado (XLPE) ou Etileno-propileno (EPR)	90
Mineral (com bainha em PVC ou nu e acessível)	70
Mineral (nu, inacessível e sem estar em contacto com materiais combustíveis)	105  (Para este tipo de condutores podem ser admitidas temperaturas superiores em serviço contínuo, de acordo com a temperatura do cabo e das terminações e com as condições ambientais e outras influências externas)

Os valores tabelados referentes à resistência e resistividade do cobre e do alumínio, normalmente são referidos à temperatura de 20 °C pelo que, quando em funcionamento, com temperaturas diferentes podemos fazer a respetiva correção podendo, para isso, recorrer à equação (3.20) [Henrique10].

$$R_{\theta} = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] \quad (3.20)$$

onde:

$R_{\theta}$  - Resistência elétrica à temperatura  $\theta$  °C;

$R_{20}$  - Resistência elétrica à temperatura 20 °C;

$\alpha_{20}$  - Coeficiente de temperatura a 20 °C;

$\Theta$  - Temperatura final em °C;

O  $\alpha_{20} = 3.93 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para o cobre e  $\alpha_{20} = 4.03 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para o alumínio.

Várias aproximações e simplificações são usadas e permitidas; em Portugal, as Regras Técnicas de Instalações Elétricas de Baixa Tensão (RTIEBT) recomendam a utilização de um fator 1,25 para correção geral do valor da resistividade para a temperatura de serviço, independente do tipo de isolamento dos condutores e cabos, sendo uma aproximação ao cálculo anteriormente apresentado.

Assim, os valores da resistividade usados para determinar a resistência nos condutores elétricos utilizados nas instalações elétricas em Portugal e adotados nesta tese são de:

$\rho_{Cu} = 0.0225 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  para o cobre;

$\rho_{Al} = 0.036 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  para o alumínio.

### 3.4 Eficiência em instalações de iluminação exterior

Nas Instalações de iluminação exterior, sejam particulares ou públicas, é usada a configuração radial, podendo ser alimentada a partir do quadro geral de um posto de transformação, como apresentado esquematicamente na figura 3.10; do quadro geral podem sair vários circuitos independentes. Cada circuito vai alimentando as luminárias das ruas respectivas, podendo subdividir-se e alimentar várias ruas a partir de nós de derivação.

Para uma boa qualidade do projeto de iluminação, contribui uma boa eficiência do ponto de vista energético e lumíneo.

Em termos luminotécnicos é de especial atenção a classificação das vias a iluminar e níveis mínimos de referência regulamentares. Por exemplo, se considerarmos zonas fora do perímetro urbano, incluindo vias de circulação periféricas ao tecido urbano com traçado simples (retas e curvas largas) onde seja possível medir luminâncias, pela EN13201 devemos classificar as vias segundo os dados (classe ME) apresentados na tabela 3.3 [DGEG11] e respetivos níveis mínimos de referência.

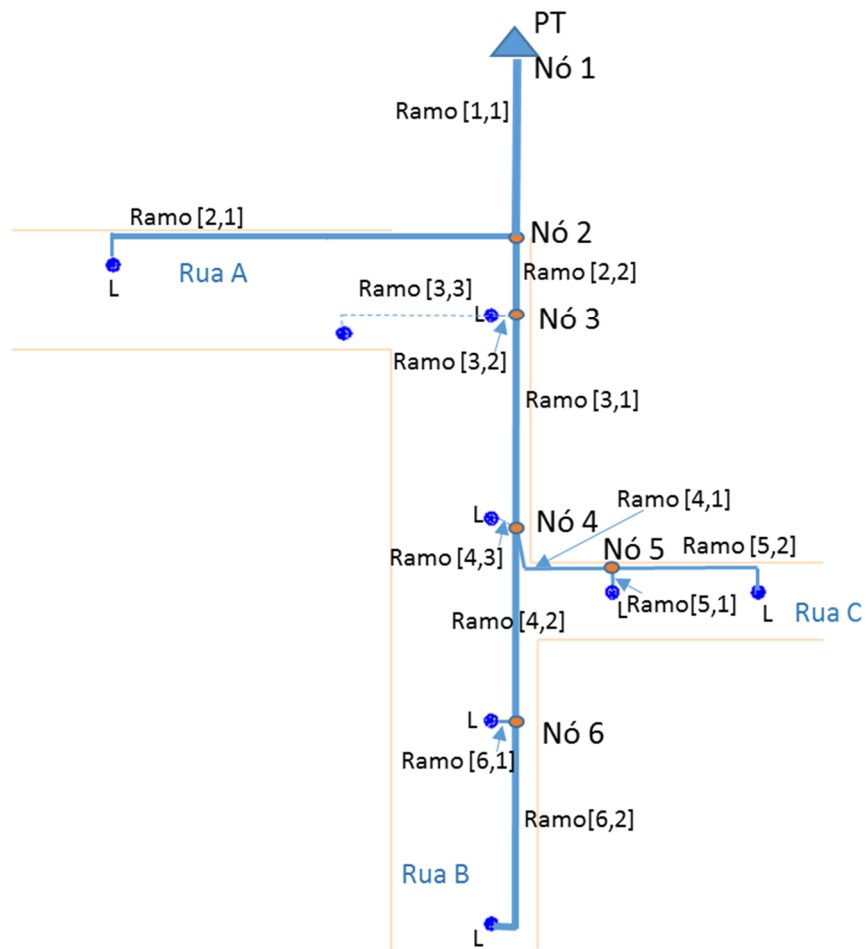


Figura 3.10- Esquema de instalação elétrica de iluminação exterior.

Para a iluminação pública funcional, os níveis médios calculados não deverão ultrapassar 120% nem serem inferiores a 95% dos níveis de referência da tabela 3.3.

Tabela 3.3- Classificação das vias e respectivos valores de referência.

Classe da via	Luminância da superfície da via em condições secas			Deslumbramento Perturbador	Iluminação Envolvente
	Luminância média Lm (cd/m <sup>2</sup> )	Uniformidade Global U <sub>0</sub>	Uniformidade longitudinal U <sub>1</sub>	Aumento limiar TI (%)	Relação Entorno SR
ME1	2,00	0,40	0,70	10	0,50
ME2	1,50	0,40	0,70	10	0,50
ME3	a	1,00	0,70	15	0,50
	b		0,60		
ME4	a	0,75	0,60	15	0,50
	b		0,50		

Fonte: [DGEG11]

a - É permitido um aumento de 5% no valor do TI quando forem usadas fontes de iluminação com baixa luminância (lâmpadas de vapor de sódio de baixa pressão e fluorescentes tubulares, ou então fontes de luz com luminância idêntica ou inferior).

b - Significa que este critério apenas poderá ser aplicado em locais onde não existam zonas de tráfego com os seus próprios requisitos adjacentes às faixas de rodagem. É um valor não ótimo (com uma uniformidade longitudinal mais baixa) normalizado.

Em situações onde não seja aconselhável a medição da luminância, será utilizada a conversão de candelas para lux (Iluminância) na relação de 1 para 15.

Em zonas pedonais e áreas com baixa velocidade de tráfego devemos classificar as vias segundo os dados (classe P) apresentados na tabela 3.4 [DGEG11] e respetivos níveis mínimos de referência.

Em zonas onde os padrões de variação de tráfego são bem conhecidos, para uma mesma via, a classe de iluminação nem sempre é idêntica para todas as horas da noite; por este motivo caberá aos projetistas e designers, em conjunto com as entidades responsáveis pela iluminação pública (ex. Autarquias e Concessionária das Redes), determinar as classes selecionadas em todo o período noturno.

Tabela 3.4- Classificação das vias pedonais e respetivos valores de referência.

Classes de Via	Eh,avg (lux)	Eh,min (lux)	Requerimentos adicionais no caso de ser necessário reconhecimento facial		Encandeamento perturbador
			Ev,min (lux)	Esc,min (lux)	
P1	15	3,0	5,0	3,0	20
P2	10	2,0	3,0	2,0	25
P3	7,5	1,5	2,5	1,5	25
P4	5,0	1,0	1,5	1,0	30
P5	3,0	0,6	1,0	0,6	30
P6	2,0	0,4	0,6	0,4	35

Fonte: [DGEG11]

Três grandezas revelam especial destaque: a luminância, a Iluminância e o encandeamento perturbador (TI), analisadas em termos mínimos, médios e de uniformidade global no sentido longitudinal da via a iluminar.

Iluminância é o quociente entre a quantidade de luz emitida em todas as direções por uma fonte de luz ( $\partial\phi$ ) incidente num elemento da superfície e a área ( $\partial A$ ) desse elemento. A unidade é o lux (lx).

O cálculo da iluminância num ponto P (EP) da superfície da estrada pode ser calculada pelas equações (3.21) a (3.24) [DGEG11], usando como referência a representação da figura 3.11. A intensidade luminosa I (cd) é fornecida, normalmente, em gráfico pelo fabricante da luminária utilizada.

$$E_P = \left(\frac{I_\gamma}{d^2}\right) \cos\gamma \quad (3.21)$$

$$d^2 = h^2 + a^2 = h^2 + x_1^2 + y_1^2 \quad (3.22)$$

$$\cos\gamma = \frac{h}{d} = \frac{h}{\sqrt{h^2+x_1^2+y_1^2}} \quad (3.23)$$

$$E_P = \frac{I_\gamma \times h}{(h^2+x_1^2+y_1^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.24)$$

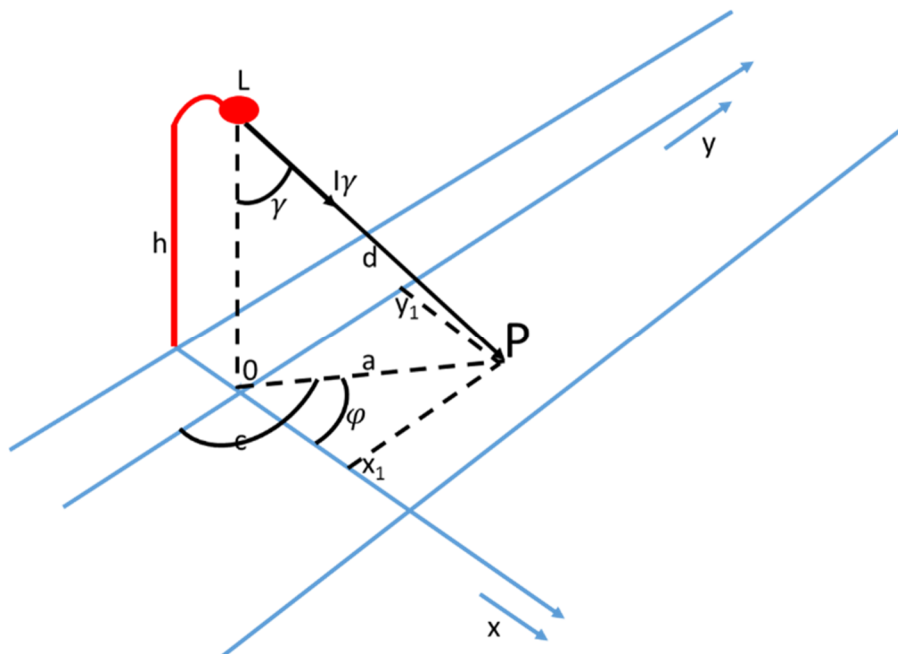


Figura 3.11- Iluminância num ponto P da superfície de estrada.

Assim, a iluminância num ponto P devida a “n” armaduras que influenciam o ponto é dada por:

$$E_P = \sum_{i=1}^n \frac{I(C_i, \gamma_i)}{h^2} \cos^3 \gamma_i \quad (3.25)$$

A iluminância média será calculada por [DGEG11]:

$$E_{av} = \frac{\sum_{j=1}^n (E_P)_j}{n} \quad (3.26)$$

Os valores de EP dos j pontos devem cobrir um espaçamento longitudinal entre duas armaduras consecutivas e a largura da via.

A luminância (L) é uma medida da densidade da intensidade da luz refletida numa dada direção, que descreve a quantidade de luz que a atravessa ou é emitida de uma superfície, segundo um ângulo sólido ( $\partial\Omega$ ). A unidade no SI é a candela por metro quadrado ( $cd/m^2$ ). Pode ser entendida como o quociente entre a intensidade luminosa (I) e a área (A) que a reflete segundo uma determinada direção ( $\theta$ ), podendo ser calculada pela equação (3.27) [DGEG11]:

$$L = \frac{I}{A \times \cos \theta} \quad (cd/m^2) \quad (3.27)$$

Luminância média (Lmed) é a média aritmética de todos os pontos de luminância calculados sobre a superfície da via.

O encandeamento perturbador, também chamado incremento limite (TI) é uma medida que permite quantificar a perda de visibilidade causada pelo encandeamento das luminárias de iluminação pública.

Caso se pretenda que o objeto seja visível nestas condições, há que aumentar o nível de contraste. Este incremento corresponde ao TI e é calculado pela equação (3.28) [DGEG11]:

$$TI = \frac{65}{(\bar{L})^{0,8}} L_v \% \quad (3.28)$$

e

$$L_v = 10 \sum_{k=1}^n \frac{E_k}{\theta_k^2} = \frac{E_1}{\theta_1^2} + \frac{E_2}{\theta_2^2} + \dots + \frac{E_k}{\theta_k^2} + \dots + \frac{E_n}{\theta_n^2} \quad (3.29)$$

com:

$\bar{L}$ - Luminância média da estrada ( $cd/m^2$ );  $L_v$  - Luminância encandeante equivalente ( $cd/m^2$ );  $E_k$ - Iluminância (em lux, baseada no fluxo inicial da lâmpada em lumens) produzida pela luminária k, num plano normal à linha de visão e à altura do olho do observador;  $\theta$  - Ângulo, em graus, do arco entre a linha de visão e a linha desde o observador ao centro da luminária k.

Em termos energéticos, podemos referir a eficiência luminosa ( $\eta$ ) de uma luminária e respetiva fonte de luz, como a relação entre o fluxo luminoso total emitido pela fonte ( $\theta$ ) e a potência por ela absorvida (P), equação (3.30) [DGEG11]. A unidade SI é o lm/W (lúmen por Watt).

$$\eta = \frac{\theta}{P} \text{ (lm/W)} \quad (3.30)$$

Este rácio é, também, muitas vezes referido como o Índice de Eficiência Energética. Se considerarmos não uma luminária individualmente e seus componentes, mas a instalação total de um sistema de iluminação de rua, podemos definir e classificar a eficiência energética de uma instalação como a relação entre o produto da superfície iluminada pela iluminação média em serviço da instalação e a potência total instalada [DGEG11], determinada pela equação (3.31).

$$\varepsilon = S(\text{m}^2) \times E \text{ (lux)} / P \text{ (watt)} \quad (3.31)$$

$\varepsilon$  - Eficiência energética da instalação; S - Área total resultante do produto do valor da interdistância entre pontos de luz e largura total da via e passeios, no caso do perímetro urbano, de fachada a fachada; E - Nível médio de serviço da iluminância calculado; P - Potência total das luminárias mais auxiliares intervenientes na área calculada.

A esta eficiência energética pode corresponder uma letra tal como acontece já nos eletrodomésticos; esta correspondência em Portugal é a sugerida na figura 3.12 [DGEG11].








	Funcional	Eficiência Energética
	A	$\varepsilon > 40$
	B	$40 \geq \varepsilon > 35$
	C	$35 \geq \varepsilon > 30$
	D	$30 \geq \varepsilon > 25$
	E	$25 \geq \varepsilon > 20$
	F	$20 \geq \varepsilon > 15$
	G	$\varepsilon \leq 15$

Figura 3.12- Eficiência de energia da instalação de iluminação.

Com o objetivo de melhorar a eficiência energética de uma instalação, vários estudos e desenvolvimentos têm sido feitos, tanto a nível da evolução tecnológica como a nível de controlo dos sistemas [Miomir09]; verificamos, no entanto, que as perdas nos cabos das instalações não são consideradas.

Neste trabalho analisamos as perdas provocadas pela utilização de luminárias mais eficientes ou controlo da luminosidade ao longo da noite, nos cabos da instalação em função da utilização e do percurso da corrente provocada, de modo a escolher as lâmpadas e, ou sistema mais eficiente, melhorando ainda a classificação energética da instalação. É uma contribuição nova a ter em consideração no futuro, para elaboração de regulamentação relativa à eficiência de sistemas de iluminação pois as perdas nos cabos, embora pequenas, são reais e podem fazer a diferença entre níveis de classificação mais eficientes a atingir por uma instalação. A inclusão na classificação de todo o sistema e respetivo ciclo de vida será uma imagem mais fiel da realidade do sistema.

### **3.5 Conclusão**

As influências e variáveis que contribuem para o valor da resistência elétrica nos condutores de instalações elétricas são diversas. No entanto, e devido a vários estudos e verificações, várias simplificações vertidas em legislação nos vários países são permitidas no cálculo da resistência; neste texto é utilizada a legislação Portuguesa. As perdas por efeito de Joule nos condutores são bem reais e não podem ser eliminadas. Nesta tese, as perdas são integradas na proporção da sua diminuição na análise de investimentos, na escolha e substituição de equipamentos elétricos por outros mais eficientes e energeticamente sustentáveis.

## **Capítulo 4**

### **Análise de investimentos em sistemas energéticos sustentáveis**

# Introdução

A atual crise provocada pela crise de dívida pública afeta a economia e o mercado financeiro, à escala mundial. Os agentes financeiros que concedem crédito procuram minimizar o risco dos empréstimos concedidos. Agora, mais do que nunca, os projetos de investimento, nomeadamente os energeticamente sustentáveis, têm que ser bem fundamentados de modo a ter sucesso no que respeita à concessão de crédito. Deste modo, a análise económica e a escolha, de entre várias opções, da aquisição de equipamentos eficientes deve ser conduzida de acordo com todos os componentes e ciclo de vida que constituem a instalação e a orientação durante a seleção racional da solução a ser tomada. É de salientar que uma decisão de investimento deve ser baseada em critérios objetivos. Neste capítulo são apresentados os critérios usados para analisar e escolher o investimento mais atrativo, quer por parte de quem concede um financiamento, quer como justificativo por parte de quem pede financiamento.

As análises económicas são conduzidas de acordo com critérios objetivos; a orientação durante a seleção racional de uma solução a ser tomada, durante uma decisão do investimento, deve ser norteada pela comparação e análise de várias soluções possíveis. Os métodos usados podem ser vários, dependendo da profundidade da análise, do tipo de investimento e do montante a investir, por exemplo. Na análise pode, assim, ser utilizado um único indicador ou a conjugação de vários, de modo a que a decisão seja a mais fundamentada possível pois os indicadores podem, individualmente, designar escolhas diferentes e sendo, por vezes, incorretas para a mesma situação. Podemos dividir os métodos de análise em estáticos e dinâmicos.

## 4.1. Métodos estáticos

Os métodos estáticos são aplicados para a avaliação dos investimentos simples, onde não é exigida uma taxa de juro, ou durante a fase inicial de estudo quando a justificação económica de um investimento é examinada.

Um dos métodos mais populares envolve o período de recuperação simples do investimento ou *payback*. O período de *payback* ou de retorno pode ser definido como sendo o número de meses ou anos necessários para que o reembolso do investimento inicial seja recuperado; pode ser calculado usando a equação (4.1) [H. Barros08].

$$\text{Payback} = \frac{I_i}{\text{Rec}} \quad (4.1)$$

onde:

$I_i$  é o investimento inicial efetuado;

$Rec$  é a receita monetária líquida gerada no período considerado, normalmente anual.

O *payback* é um método muito utilizado nos diagnósticos energéticos, isto porque trata-se do método mais simples de avaliação, apresentando poucos cálculos e um conceito fácil de ser assimilado; é o método indicado pelo Sistema de Consumos Intensivos de Energia para a elaboração dos planos de racionalização de consumo de energia.

No entanto, o *payback* como não tem em consideração o tempo de vida útil dos equipamentos em eficiência energética ou a taxa de juro, apresenta alguns problemas quando se usa por exemplo para comparar e escolher entre duas soluções alternativas, como por exemplo entre a opção A e B apresentadas a seguir.

Opção A: Investimento de 1000€ num equipamento energeticamente eficiente que proporciona uma receita anual de 250€, com vida útil de 10 anos, figura 4.1.

Opção B: Investimento de 750€ num equipamento energeticamente eficiente que proporciona uma receita anual de 250€, com vida útil de 4 anos, figura 4.2.

Admite-se que as saídas de dinheiro, investimento, ocorrem no instante inicial e que as receitas se obtêm, de modo regular, todos os anos até ao fim do ciclo de vida do equipamento.

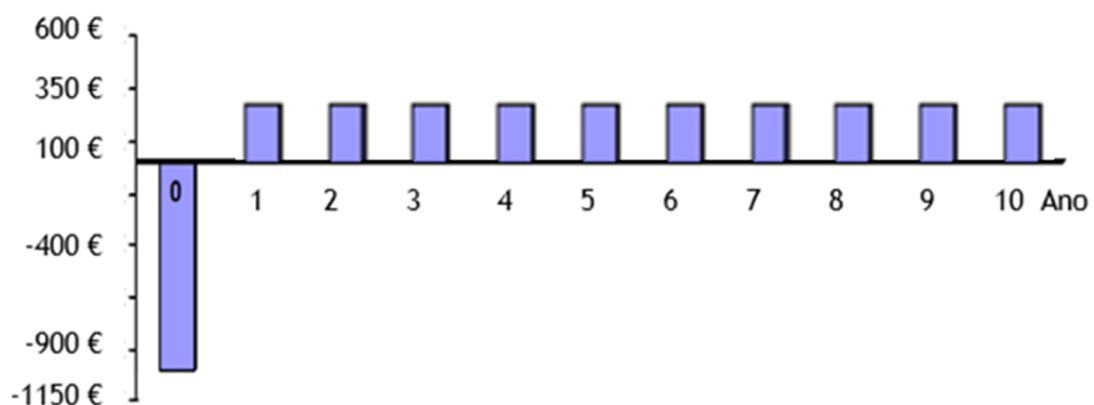


Figura 4.1- Fluxo de caixa da opção A.

Determinando os respetivos *payback* verifica-se que na opção A o período de recuperação é de 4 anos, enquanto a opção B apresenta uma recuperação de 3 anos. Se considerarmos a análise em termos individuais podemos definir se o período de retorno é interessante ou não, e então decidir se devemos ou não investir. No entanto, se o objetivo é escolher entre as duas opções, a análise levaria a escolher a opção B devido a ter um período de recuperação menor.

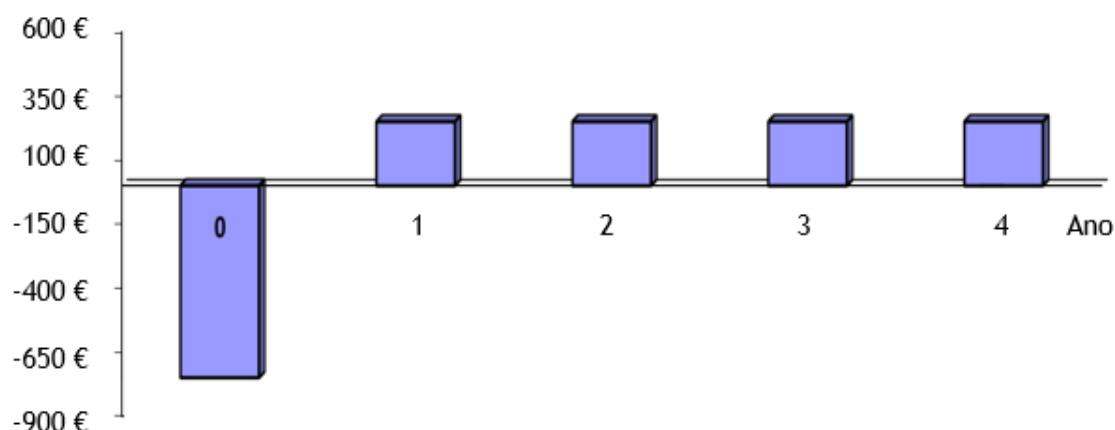


Figura 4.2- Fluxo de caixa da opção B.

Fazendo uma análise mais pormenorizada e tendo em consideração o ciclo de vida das duas opções poder-se-ia indicar, como melhor, a opção A pois, devido ao maior período de vida útil, teria uma maior taxa de rentabilidade do investimento. A taxa de rentabilidade pode ser determinada pela equação (4.2) [H. Barros08].

$$\text{Tax}_{\text{rent}} \% = \frac{\text{Rec. VidaUtil} - I_i}{I_i \cdot \text{VidaUtil}} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Portanto, a taxa de Rentabilidade da opção A será de 15% enquanto a da opção B será de 8,3%, o que corresponde a uma indicação contrária à anterior em termos de escolha de equipamentos eficientes.

## 4.2- Métodos dinâmicos

Os métodos dinâmicos são aplicados para a avaliação dos investimentos onde é exigida uma taxa de juro associada ao valor do investimento efetuado. Os métodos vulgarmente utilizados em análise de investimentos, na área da eficiência energética, são os *payback* (neste caso, associado a uma taxa de juro), o Valor Atual Líquido “VAL” ou a Taxa Interna de Rentabilidade “TIR”. Para concorrer a candidaturas e apoios a fundos comunitários, por exemplo, são exigidos o VAL e a TIR, não sendo suficiente a análise pelo *payback* simples, como o recomendado para a utilização nos planos de redução de consumos de energia, em empresas sujeitas às regras do sistema de gestão de consumos intensivos de energia em Portugal.

### 4.2.1-Payback atualizado

A expressão do *payback* simples pode ser generalizada tendo em consideração uma taxa de juro associada ao investimento; neste caso designado por *PaybackAt*, pode ser determinado pela equação (4.3) [H. Barros08].

$$PaybackAt = \frac{I_i}{\sum_{j=1}^n \frac{Rec_j}{(1+a)^j}} \quad (4.3)$$

onde  $a$  é a taxa de juro considerada.

Podemos ainda simplificar e aproximar a equação anterior, obtendo a equação (4.4) [Miomir09] mais fácil de utilizar para este cálculo.

$$PaybackAt = \ln \frac{100 \text{ Rec}}{100 \text{ Rec} - a I_i} / \ln \frac{100+a}{100} \quad (4.4)$$

Ao considerar uma taxa de juro, o resultado obtido é idêntico ao do caso do *payback* simples, aumentando apenas o tempo de recuperação do investimento. Assim, tal como demonstrado no caso do *payback* simples no ponto anterior, é imprudente considerar este método como única decisão de investimento. Este método pode levar à escolha de um projeto que tenha um prazo de retorno muito baixo, desprezando outro com período mais longo mas que possa gerar maior riqueza para o proprietário.

#### 4.2.2-Valor atual líquido “VAL”

O valor atual líquido (VAL) também conhecido como Valor Presente Líquido (VPL) é a diferença entre as entradas e as saídas de dinheiro, os chamados fluxos monetários ou Cash-flow, devidamente atualizados durante a vida útil do empreendimento ou equipamento energético eficiente. O VAL pode assim ser obtido pela equação (4.6), onde  $n$  é a vida útil do equipamento e a receita líquida  $Rec$  se obtém para o ano  $j$ ,  $Rec_j$ , através da equação (4.5) [H. Barros08], isto é, pela diferença entre a receita bruta anual e os encargos ou despesas nesse mesmo ano.

$$Rec_j = ReceitaBruta_j - Despesa_j \quad (4.5)$$

$$VAL = \sum_{j=1}^n \frac{Rec_j}{(1+a)^j} - \sum_{j=0}^{n-1} \frac{I_j}{(1+a)^j} \quad (4.6)$$

No caso de se pretender incluir o valor residual ( $V_r$ ) do equipamento ou instalação no fim da sua vida útil, a equação (4.6) transforma-se na equação (4.7) [H. Barros08].

$$VAL = \sum_{j=1}^n \frac{Rec_j}{(1+a)^j} - \sum_{j=0}^{n-1} \frac{I_j}{(1+a)^j} + \frac{V_r}{(1+a)^n} \quad (4.7)$$

As folhas de cálculo facilitam de sobremaneira o cálculo dos indicadores de avaliação de investimentos. No Excel®, a função VAL está implementada.

Para utilizar o VAL na análise de investimentos e no apoio à decisão, na aplicação de várias alternativas de equipamentos eficientes podemos deparar-nos com várias situações. Assim, se:

-tivermos várias alternativas, por exemplo a alternativa A e B, e nas mesmas exigências, em especial na taxa de juro requerida, devemos escolher da seguinte forma:

Se  $VALA > VALB$ , A é preferível em relação a B.

Se  $VALA < VALB$ , B é preferível em relação a A.

Se  $VALA = VALB$ , as alternativas são equivalentes.

-pelo contrário, se estivermos a analisar uma só alternativa de investimento C, com uma taxa de juro  $a$ , definida pela própria empresa ou aceite como normal, no setor da sua atividade devemos optar da seguinte forma:

Se  $VALC > 0$ , a alternativa é viável, economicamente.

Se  $VALC < 0$ , a alternativa é inviável, economicamente.

Se  $VALC = 0$  é indiferente investir-se ou não nesta alternativa, embora ainda se possa considerar viável economicamente.

No caso de investimentos alternativos, nomeadamente em projetos e equipamentos energeticamente sustentáveis com períodos de vida útil diferentes, para uma análise eficiente, devemos replicá-los até encontrar o menor múltiplo comum entre os períodos de vida útil dos equipamentos ou projetos a analisar e aplicar o VAL a todo o período, desde o momento inicial até ao ano correspondente ao menor múltiplo comum, como demonstrado relativamente ao exemplo seguinte, com a comparação de uma opção A com o tempo de vida útil de 4 anos e uma opção B com o tempo de vida útil de 3 anos.

Opção A: Investimento de 1000€, com um tempo de vida útil de 4 anos e uma receita líquida prevista constante de 300 € anuais, apresentado na figura 4.3.

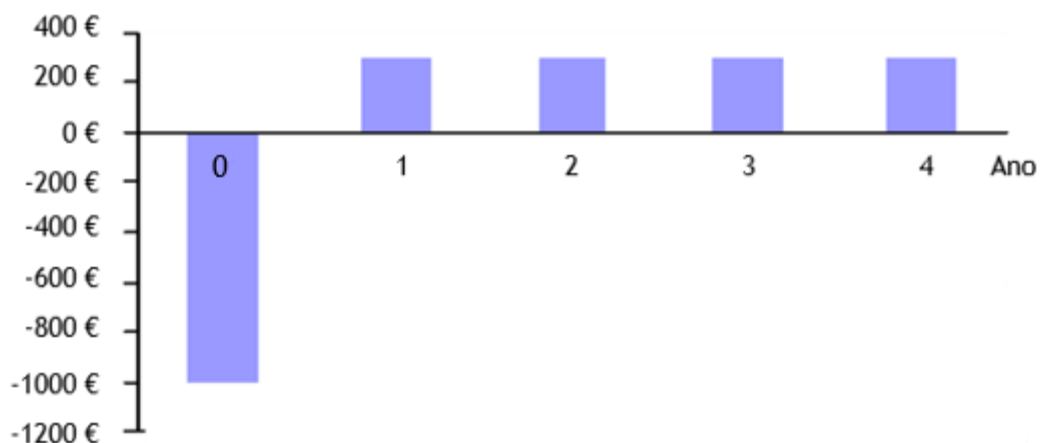


Figura 4.3- Fluxo de caixa da opção A (Exemplo).

Opção B: Investimento de 600€, com um tempo de vida útil de 3 anos e uma receita líquida prevista constante de 260 € anuais, representado na figura 4.4.

Verificando-se que o menor múltiplo comum é 12, devemos replicar até ao menor múltiplo comum, como apresentado nas figuras 4.5 e 4.6.

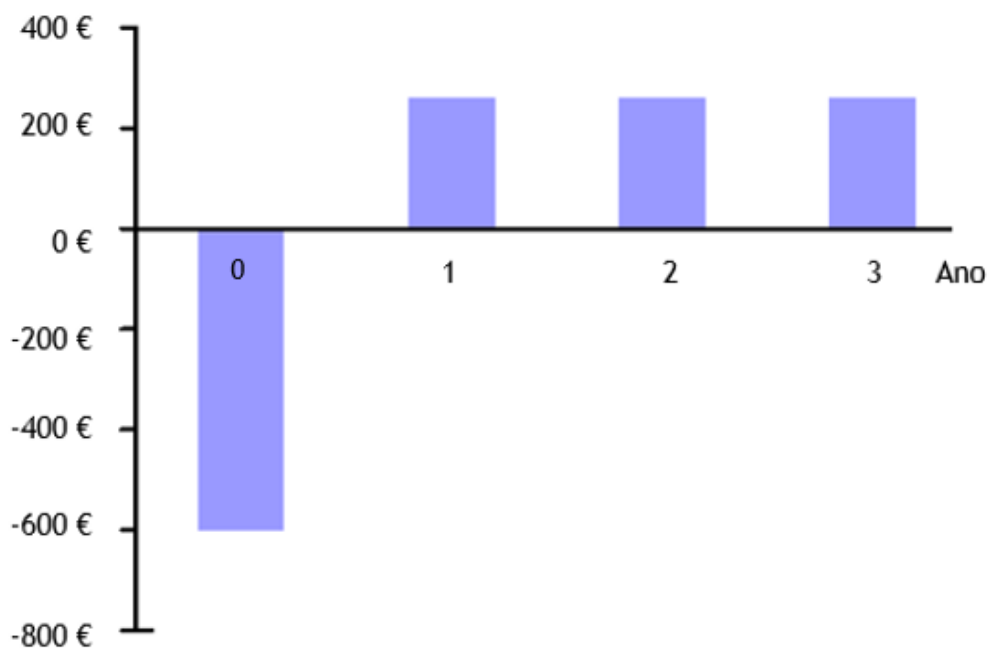


Figura 4.4- Fluxo de caixa da opção B (Exemplo).

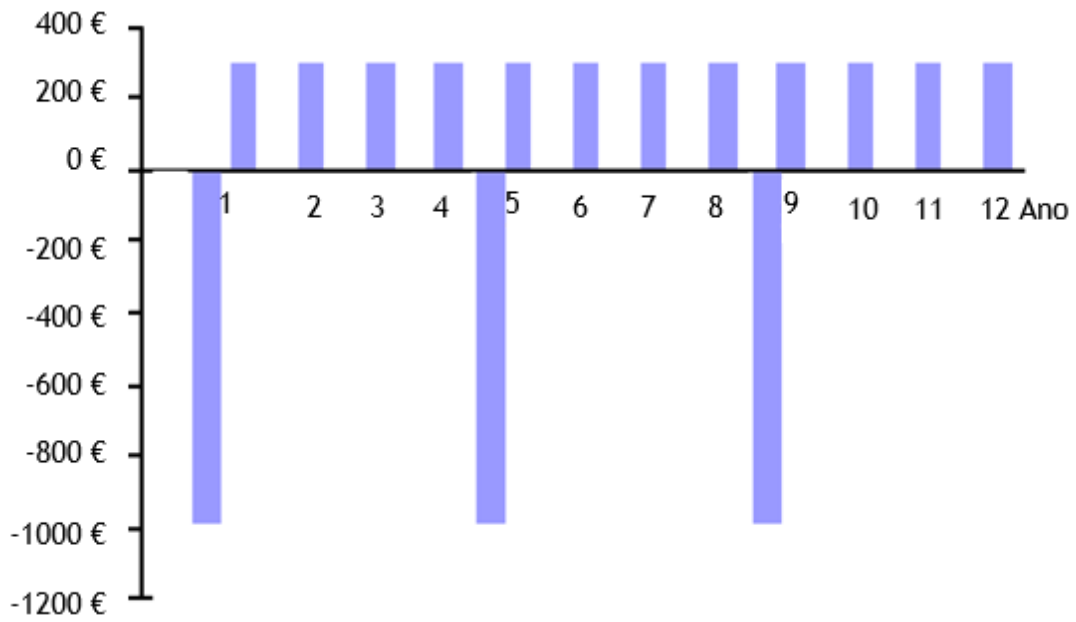


Figura 4.5- Fluxo de caixa da opção A replicado.

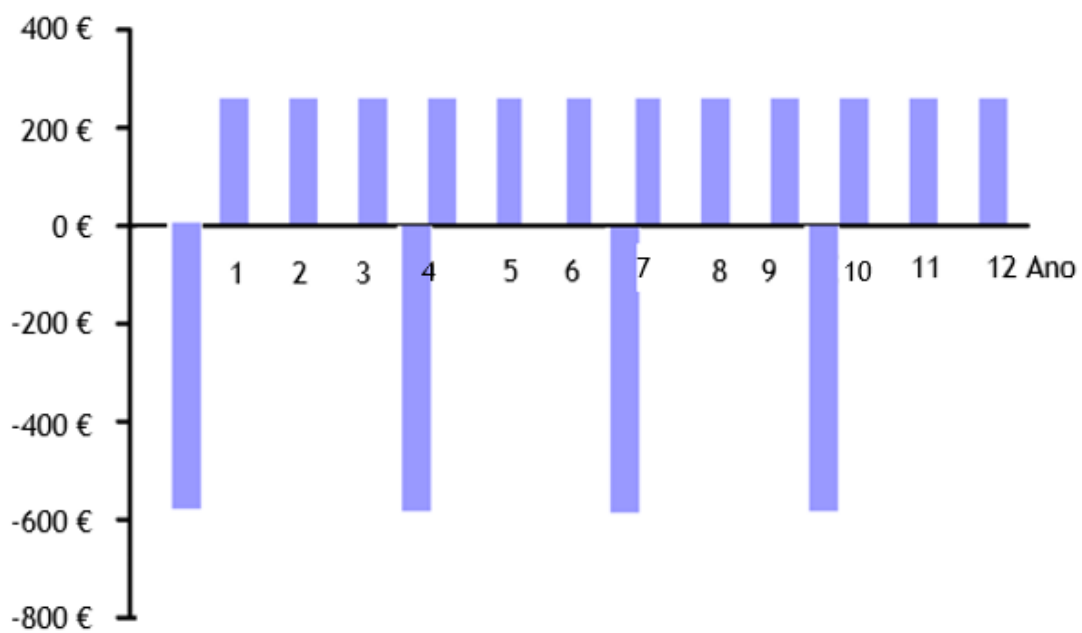


Figura 4.6- Fluxo de caixa da opção B replicado.

O Cálculo do VAL terá em conta todo o período até ao ano, correspondente ao menor múltiplo comum (mm).

$$VAL = \sum_{j=1}^{mm} \frac{Rec_j}{(1+a)^j} - \sum_{j=0}^{mm-1} \frac{I_j}{(1+a)^j} + \frac{V_r}{(1+a)^{mm}} \quad (4.8)$$

O VAL é um indicador de desempenho de investimento conciso. É a soma atual de todos os fluxos líquidos gerados pelo investimento, expresso sob a forma de um valor único com a mesma unidade de medida que é utilizada nos quadros contabilísticos. Quanto maior o valor do VAL, mais atrativo será o investimento e, na escolha entre duas opções, será mais atrativo aquele que tiver maior VAL. Podemos ainda referir que para um investimento quanto maior a taxa “a” utilizada, menor será o valor do VAL obtido.

#### 4.2.3-Taxa interna de rentabilidade “TIR”

A Taxa interna de rentabilidade normalmente designada por TIR é a taxa de atualização que anula o VAL. Partindo da equação (4.7) que representa o VAL, podemos definir a equação da taxa interna de rentabilidade (4.9) [H. Barros08].

$$\sum_{j=1}^n \frac{Rec_j}{(1+TIR)^j} - \sum_{j=0}^{n-1} \frac{I_j}{(1+TIR)^j} + \frac{V_r}{(1+TIR)^n} = 0 \quad (4.9)$$

Ao calcular a TIR, o seu valor indica imediatamente o interesse ou não da implementação do projeto na escala de avaliação usada nos mercados financeiros, a taxa de rentabilidade, o que não acontece com os outros indicadores analisados.

Ao analisarmos a equação da taxa interna de rentabilidade, de modo a encontrar o zero, verificamos que a sua solução poderá ser encontrada recorrendo a métodos iterativos, partindo de uma taxa inicial.

O método de resolução pode ser obtido segundo os passos seguintes:

a - Calcular VAL ( $a_0$ ) com uma taxa inicial  $a_0$  arbitrada (iteração inicial  $0$ );

b - Se VAL ( $a_0$ ) > 0,

então:

Calcular novamente VAL ( $a_1$ ), com  $a_1 > a_0$ .

c - Se VAL ( $a_1$ ) < 0, então:

Calcular novamente VAL ( $a_2$ ), com  $a_2 < a_1$ .

d - Fazer iterações sucessivas até chegar a VAL ( $a_3$ )  $\approx$  0.

Na iteração em que se obtém o valor zero com a precisão definida, obtemos a TIR que corresponde à taxa utilizada nessa iteração;  $a_3$  será a TIR, Taxa Interna de Rentabilidade.

Podemos ainda estimar a taxa inicial  $a_0$  a utilizar no primeiro cálculo, fazendo uma soma algébrica dos fluxos de caixa esperados em todos os anos do ciclo de vida útil (receitas - despesas); dividindo esse valor pelo investimento obtemos a percentagem total nos anos de vida do investimento. Dividindo o valor obtido antes pelo número de anos, obtemos a taxa anual passível de ser utilizada como primeira aproximação  $a_0$ .

Na generalidade, os programas de gestão de dados usualmente utilizados automatizam o cálculo do valor da TIR facilitando os cálculos; a função TIR e MTIR do Excel® são um exemplo e revelam-se uma ajuda preciosa.

Como resulta claramente da definição da TIR e da sua fórmula, não é necessária qualquer taxa de atualização para o cálculo deste indicador. A TIR pode ser um critério de avaliação de um projeto de eficiência energética tendo em conta que, abaixo de um determinado valor de TIR considera-se o projeto inadequado, sendo adequado e indicado como viável a partir daí.

Tal como o VAL, a TIR pode ser igualmente utilizada como critério de avaliação na classificação e escolha de projetos. A TIR deve ser comparada com uma taxa mínima considerada atrativa ou a taxa de um depósito bancário, por exemplo:

- Se a TIR > Taxa mínima atrativa, o projeto é economicamente viável;
- Se a TIR < Taxa mínima atrativa, o projeto é economicamente inviável;
- Se TIR = Taxa mínima atrativa, é indiferente investir os recursos no projeto ou deixá-los no depósito bancário.

A TIR não deve ser usada isoladamente como critério de seleção, salvo se os investimentos nos diferentes projetos forem os mesmos; mesmo assim, é sempre conveniente considerar as grandezas VAL e TIR em simultâneo, dado que podem surgir situações contraditórias, com necessidade de ponderação dos vários indicadores, como se pode verificar na figura 4.7 para dois investimentos, em que  $VAL1 > VAL2$  e  $TIR1 < TIR2$ .

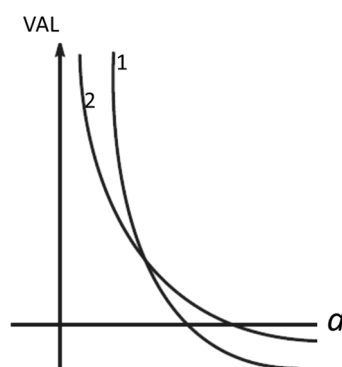


Figura 4.7- Situações de análise com zonas indefinidas, (Fonte: [Cee03]).

### 4.3- Outros Métodos

Outras técnicas e métodos com utilização menos frequente podem ser utilizados na análise de investimentos e projetos de eficiência energética. Destaca-se, pela simplicidade e pela facilidade de interpretação do resultado, o método de análise do custo benefício.

A análise através do custo benefício de um projeto não é mais do que interpretar, de forma eficiente e simples, as duas variáveis mais importantes do projeto. A relação do custo benefício trata-se de um indicador simples; relacionando o valor atual dos benefícios (B), com o valor atual dos custos (C) do projeto em análise, pode definir-se como na equação (4.10).

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Valoratual (B)}}{\text{Valoratual(C)}} \quad (4.10)$$

Trata-se de um simples dado quantificado: se  $C/B > 1$ , o projeto energético é considerado positivo e aconselhável porque os benefícios por ele gerados, medidos pelo valor atual de todos os benefícios, são mais elevados do que os custos por ele suportados, também medidos pelo valor atual de todos os custos.

Dada a sua simplicidade, é usado na análise de algumas situações, onde é apenas importante saber se o projeto não acarreta prejuízos para o investidor, sem preocupações de maximizar os lucros, por exemplo.

### 4.4 Conclusão

No processo de análise de investimentos deparamo-nos com muitas diferenças; há diferenças entre os investimentos em infraestruturas, os investimentos em sistemas produtivos e os projetos de eficiência energética. Contudo, a maior parte apresenta determinados aspetos comuns e é conveniente utilizar os mesmos indicadores, de modo a que os projetos que criem valor para o acionista ou proprietário possam ser escolhidos, sendo rejeitados os projetos que destruam valor ou que criem menor valor em comparação com outro. Os métodos de decisão quantitativos devem ter em consideração:

- O ciclo de vida do investimento, geralmente expresso em intervalos de período anuais.
- A estimativa dos investimentos, ao longo de todo o ciclo de vida.
- A estimativa dos benefícios esperados do novo investimento, incluindo o valor residual final.
- Aplicação dos métodos de avaliação quantitativos *payback*, VAL, TIR.

- Elaboração do parecer em função dos indicadores.

No entanto, os métodos quantitativos baseados no *payback*, VAL e TIR têm deficiências, como foi analisado neste capítulo, mas ainda assim são muito úteis na tomada de decisão, nomeadamente se utilizados em conjunto com aspetos qualitativos definidos pelo investidor para que a avaliação seja a mais completa possível e a decisão mais confiável.

Antes de tomar a decisão final de investir num projeto de eficiência energética, é fundamental que o acionista, o proprietário ou o gestor do projeto tenha toda a informação técnico-económica do projeto e com o detalhe que lhe permita decidir sobre a oportunidade do projeto.

## **Capítulo 5**

### **Resultados de simulação computacional e resultados experimentais**

# Introdução

A utilização eficiente em termos energéticos dos equipamentos e instalações na indústria, nos edifícios de serviços, nos edifícios de habitação ou na iluminação de uma rua, é essencial para a competitividade económica.

Portugal é um país caracterizado por uma forte dependência energética do exterior, uma intensidade energética e carbónica elevada, como foi analisado e caracterizado no segundo capítulo. Tendo em consideração a evolução dos preços do petróleo a nível internacional, verifica-se uma diminuição da competitividade das empresas e da economia do país. Com base nos dados energéticos, económicos e ambientais apresentados existe a necessidade de poupar energia nos vários setores de atividade em Portugal, de modo a garantir a segurança do fornecimento energético, aumentar a competitividade e reduzir as emissões de GEE.

Para que os esforços de redução de consumo de energia tenham resultados frutíferos, para além das medidas e políticas públicas que regulamentem os consumos energéticos e as emissões de GEE, são necessários desenvolvimentos tecnológicos e aplicações suscetíveis de serem aplicadas em situações reais. Neste capítulo é apresentado o estudo da contribuição das perdas nos cabos em instalações elétricas na escolha de equipamentos elétricos eficientes, incluindo o desenvolvimento de uma nova aplicação computacional de apoio à decisão e a validação experimental de situações reais, em laboratório.

Pretende-se, assim, contribuir com novos conhecimentos e aplicações para a sustentabilidade da economia nacional e mundial.

Concretamente, são apresentados os passos principais de desenvolvimento da nova aplicação computacional de apoio à decisão, as suas potencialidades e, em especial, o aspeto global da apresentação dos resultados. São ainda apresentados exemplos concretos de aplicação em exemplos reais de configurações selecionadas e respetiva demonstração laboratorial: substituição de equipamentos por outros mais eficientes em instalações industriais e domésticas; substituição de lâmpadas por outras mais eficientes em instalações de iluminação pública.

Considerando o ciclo de estudos em que se integra a presente tese, 3º ciclo de estudos em Engenharia e Gestão Industrial, foi objetivo desta Tese integrar estas duas vertentes, Engenharia e Gestão, incorporando contribuições originais para o progresso no conhecimento e resolvendo um problema de engenharia concreto como são as perdas por efeito de joule nos condutores de instalações elétricas de uma instalação de utilização, convertendo a sua redução, quando escolhemos equipamentos elétricos mais eficientes, em receitas a incluir na análise do investimento e contribuir para um desenvolvimento sustentável em termos energéticos e ambientais. Os resultados obtidos, em casos de estudo realísticos, permitem concluir sobre o desempenho da nova aplicação computacional proposta.

Nesta tese, o objetivo é a implementação dos conceitos e a verificação e validação dos resultados. Não foram, assim, aprimorados os aspetos da interface entre o utilizador e a máquina, nem os resultados gráficos, aspetos referidos como direções de trabalho e de investigação futura.

## **5.1-Nova aplicação computacional de apoio à decisão**

Tendo em consideração os objetivos do trabalho, a nova aplicação computacional de apoio à decisão, designada por *“Contribuição das perdas nos cabos na análise de investimentos em equipamentos elétricos eficientes, referida neste texto como NOVA APLICAÇÃO ”* está estruturada utilizando matrizes e vetores que permitem a caracterização das instalações elétricas de utilização, sejam industriais, domésticas ou de iluminação pública, operadas pelos proprietários, pelos fornecedores de energia ou pelos municípios. As cargas são também caracterizadas e estruturadas em vetores e matrizes, de modo a poderem ser analisadas em função do seu diagrama de carga diário.

Os parâmetros que caracterizam a instalação e os diagramas de carga são inseridos através do teclado podendo, no futuro, ser realizado por sistemas de aquisição automática de dados.

Após a instalação ser caracterizada com os parâmetros físicos, os parâmetros da carga e os parâmetros operacionais (desenvolvidos em pormenor nos pontos seguintes), são atualizados os dados em todos os quadros parciais ou nós de derivação, em instalações de iluminação pública, começando nos quadros parciais de distribuição que não alimentam outros quadros de distribuição. O diagrama de carga do condutor que alimenta esse quadro é a sobreposição do diagrama de carga do conjunto de saídas que alimenta, como será exemplificado com um exemplo concreto. A figura 5.1 apresenta a estrutura geral do fluxograma seguido pela aplicação desenvolvida; engloba uma apresentação geral, permitindo a escolha do tipo de instalação a analisar; de seguida, subdivide-se em função da escolha inicial, analisa os dados, efetua os cálculos e as decisões a tomar ao longo de todo o processo da aplicação, desenvolvida no âmbito desta tese.

Os aspetos considerados essenciais para compreensão e verificação das potencialidades da aplicação desenvolvida são analisados em pormenor nos passos seguintes.

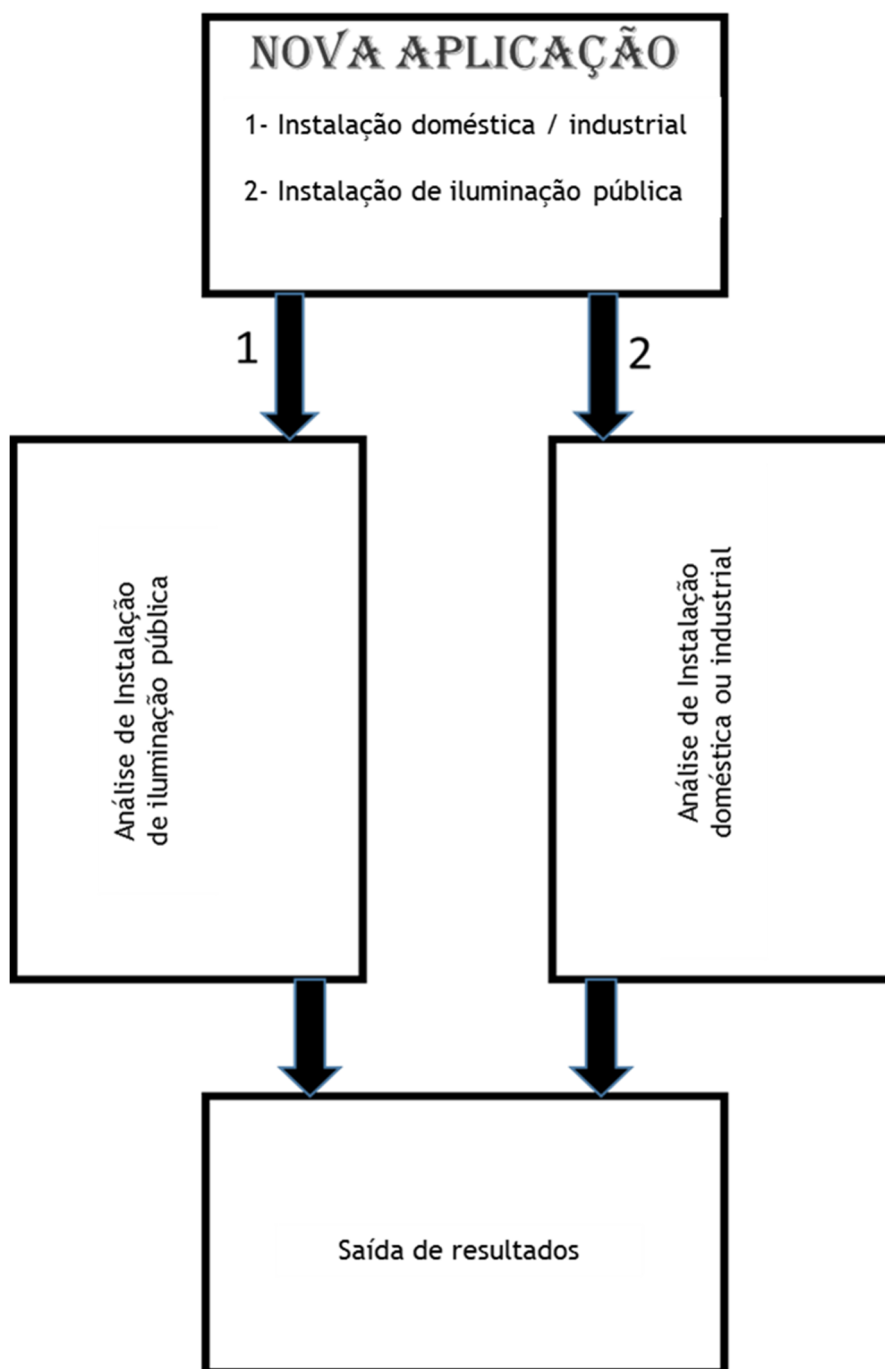


Figura 5.1- Fluxograma da aplicação computacional de apoio à decisão.

Analisando o fluxograma de suporte da aplicação desenvolvida, a estrutura subdivide-se, após escolha do utilizador, em duas áreas de atuação identificadas como potenciais para atuação, devido à existência de pouca investigação e trabalhos desenvolvidos no sentido da análise efetuada nesta tese.

Assim, as duas áreas (instalações industriais e domésticas, e iluminação pública) serão apresentadas em separado nos pontos específicos em que a análise o justifique.

### **5.1.1- Aplicação em instalações domésticas e industriais**

Após a escolha da área em que se pretende analisar o investimento, em projetos de aquisição ou substituição de equipamentos elétricos por outros, em princípio mais eficientes, no caso de instalações elétricas de utilização é fundamental caracterizar todos os parâmetros necessários à análise, desde a instalação física às cargas (equipamentos usados na instalação) e o modo de funcionamento destas.

#### **5.1.1.1- Parâmetros da instalação**

Estes parâmetros são aqui agrupados em três tipos:

- 1- Parâmetros físicos;
- 2- Parâmetros de carga;
- 3- Parâmetros operacionais.

É considerado como exemplo a instalação apresentada na figura 5.2.

##### *1- Parâmetros físicos*

Quadros de Distribuição (conjunto de aparelhagem Q);

Ligações dos quadros de Distribuição;

Comprimentos dos condutores da instalação;

Secção dos condutores da instalação.

De modo a caracterizar a instalação em termos físicos, os quadros de distribuição são numerados, sendo atribuído o número 1 ao quadro geral da instalação, tendo todos os outros numeração arbitrária. São numeradas também as saídas respeitantes a cada quadro de forma aleatória. Ao introduzir os dados é preenchida uma matriz, a matriz de ligação, que permite identificar os percursos de corrente que alimentam os diversos quadros da instalação.

A estrutura desta matriz é apresentada na figura 5.3. Simultaneamente, é guardado num vetor o número de quadros parciais que cada quadro alimenta.

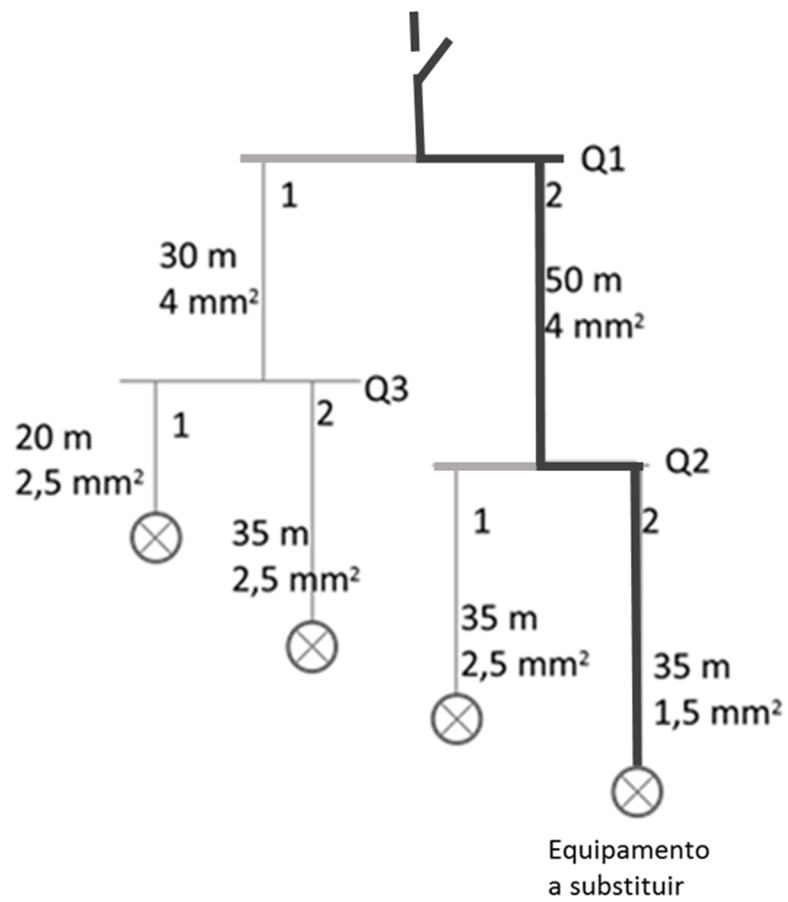


Figura 5.2- Esquema de uma instalação de utilização.

$i \backslash k$	1	2	3	...	n
1	--				
2	2				
3	1				
...					
n					

Figura 5.3- Matriz de ligação.

Esta matriz é de extrema importância em termos de simulação, pois é ela que permite identificar e analisar o trânsito de energia ao longo de todos os percursos da instalação elétrica, permitindo assim reconhecer e calcular as perdas nos condutores pretendidos, na análise de investimentos em novos equipamentos colocados ao serviço na instalação. Por exemplo, na matriz de ligação representada, onde  $k$  representa os quadros de distribuição que fornecem energia e  $i$  representa os quadros de distribuição que recebem energia, o número contido na matriz de ligação  $[k, i]$  indica o número da respetiva saída. Na matriz apresentada, Matriz de ligação  $[1,2]=2$ , significa que o quadro número 2 é alimentado pelo quadro 1 na sua saída 2, como se verifica no esquema apresentado na figura 5.2.

Em função das características físicas e comprimentos dos condutores é preenchida uma matriz designada de matriz de resistência, que caracteriza os troços da instalação, identificadas pelas saídas dos respetivos quadros.

$ii \backslash k$	1	2	3	...	n
1	0,168	0,281			
2	0,315	0,525			
3					
...					
n					

Figura 5.4- Matriz de resistências

Por exemplo, na matriz de resistências apresentada na figura 5.4, onde  $k$  representa os quadros de distribuição e  $ii$  representa o número da saída nesse quadro, o número contido na matriz  $[k, ii]$  indica a resistência do condutor correspondente. Nesta matriz, Matriz de resistência  $[1,2]=0,315$ , significa que a resistência do condutor usado na saída 2 do quadro 1 é de  $0,315\Omega$ .

## 2- Parâmetros de carga

Potência e características das cargas ligadas à instalação elétrica;

Eficiência e fator de potência das cargas;

Diagrama de carga diário. Analisado nas 24h, em intervalos que permitam observar as variações de potência ao longo do dia, representado genericamente na figura 5.5;

Diagramas de carga previstos dos equipamentos energeticamente eficientes a incluir para análise do investimento.



Figura 5.5- Diagrama de carga diário

## 2- Parâmetros operacionais

Tempo de funcionamento da instalação elétrica;

Dias de funcionamento mensal, designado por  $d$ ;

Meses de funcionamento anual, designado por  $m$ ;

Custo da energia elétrica  $\epsilon_e$ ; O preço da energia elétrica é variável, dependendo do tarifário e do fornecedor escolhido. A aplicação computacional permite ao utilizador escolher a tarifa, pré carregada;

Preço das emissões  $\text{CO}_2/\text{kWh}$ , designado por  $\epsilon_c$ ;

Fator de conversão do kWh pra  $\text{CO}_2$  equivalente, designado por  $\beta$ .

### 5.1.1.2- Caracterização dos principais cálculos

Após a introdução de parâmetros característicos da instalação e de diagramas de carga, são tratados os dados e efetuados os cálculos que permitem a inclusão da diminuição das perdas nos cabos, em todos os condutores afetados na análise do investimento correspondente.

Neste ponto são destacados os principais passos usados nesta tese.

A aplicação começa por fazer a atualização dos diagramas de carga, pois os diagramas de carga das saídas de um quadro que alimenta outro quadro não estão definidas. Assim, o diagrama de carga de uma saída de um quadro que alimenta outro quadro é a sobreposição dos diagramas de todas as saídas do quadro que essa saída alimenta.

Tomando como exemplo o esquema da instalação apresentado na figura 5.2, o diagrama de carga do condutor da saída 2 do quadro 1 é a sobreposição (soma intervalo a intervalo) de todas as saídas do quadro 2. Este método de análise é efetuado em termos de energia ativa e reativa, de modo a permitir que em qualquer altura do processo se possa utilizar análise vetorial de tensões, correntes e potências, pois estamos a trabalhar em corrente alternada.

O resultado deste método de análise é apresentado nas figuras 5.6, 5.7 e 5.8 para o diagrama referente à potência ativa.

Se considerarmos como exemplo o diagrama de carga alimentada pelo quadro 2 na sua saída 1, apresentado na figura 5.6, e o diagrama de carga alimentada pelo mesmo quadro na sua saída 2, apresentado na figura 5.7, o diagrama de carga da saída 2 do quadro obtido pela sobreposição dos anteriores será o apresentado na figura 5.8.

De salientar que este processo de análise se repete para os diagramas correspondentes à energia reativa, como já foi referido, e que a análise é efetuada em toda a instalação, tendo em consideração as suas características. Esta análise é permitida pela utilização da matriz de ligação, começando pelos quadros que não alimentam outros quadros, de modo a que se percorra toda a instalação; impõe-se, neste percurso, a atualização de todos os quadros e respetivas saídas até chegar ao quadro geral da instalação, onde será obtido o diagrama total da dita instalação.

A caracterização e atualização de dados é feita para a situação inicial e para todas as opções com equipamentos energeticamente eficientes para os quais se pretende fazer a análise, sendo guardadas de modo a ser possível a sua utilização, quando necessário.

Após a atualização de todos os diagramas de carga podemos facilmente determinar e guardar, para poder utilizar quando solicitado, todas as correntes em todos os condutores e todos os intervalos que representam os diagramas de carga, quer na situação inicial da instalação, designando esta situação inicial por  $I_1$  se nos estivermos a referir ao módulo da corrente ou  $\vec{I}_1$  se for referido o vetor, quer na situação de análise de opção de equipamentos energeticamente mais eficientes, designando esta situação por  $I_2$  se nos estivermos a referir ao módulo da corrente ou  $\vec{I}_2$  se for referido o vetor da opção mais eficiente.



Figura 5.6- Exemplo de diagrama de carga da saída 1 do quadro 2.

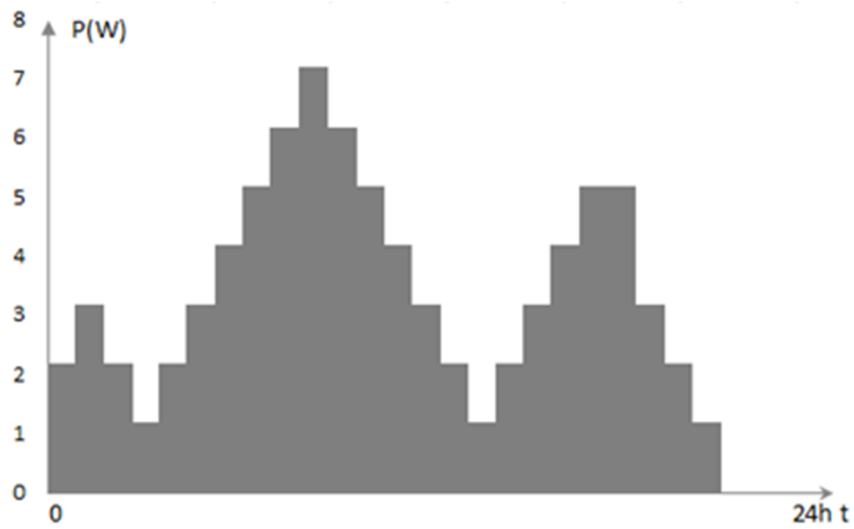


Figura 5.7- Exemplo de diagrama de carga da saída 2 do quadro 2.



Figura 5.8- Exemplo de diagrama de carga da saída 2 do quadro 1.

O objetivo é incluir a diminuição das perdas nos cabos da instalação elétrica, provocadas pela diminuição da corrente elétrica, quando se pretende optar por equipamentos eficientes como benefício na análise do investimento. Assim, podemos determinar a redução das perdas por efeito de Joule  $\Delta P[k, ii]$  em cada trecho afetado pela substituição, representado a negrito na figura 5.2, pela equação (5.1).

$$\Delta P[k, ii] = \int_0^{24} R[k, ii] (I[k, ii]_1)^2 dt - \int_0^{24} R[k, ii] (I[k, ii]_2)^2 dt \quad (5.1)$$

Aplicando a soma de Riemann ao intervalo do diagrama de carga das 0 às 24h, permite analisar a variação das perdas ao longo do tempo, e usando uma partição com um conjunto de n intervalos com a duração de tempo  $t_j$ , admitindo a aplicação dos vários tarifários de energia elétrica, é possível determinar o conjunto de rendimentos obtidos por todos os trechos  $[k, ii]$ .

As receitas ou benefícios devidos à variação das perdas nos cabos podem ser determinadas pela equação (5.2) designada por G1.

$$G1 = \sum_{j=1}^n \{ [R[k, ii] (I[k, ii]_1)^2 - R[k, ii] (I[k, ii]_2)^2] t_j \epsilon e_j \}_j \quad dm \quad (5.2)$$

As receitas ou benefícios devidos à variação do consumo de energia por diminuição da potência do equipamento energeticamente eficiente podem ser determinadas pela equação (5.3), designada por G2.

$$G2 = \sum_{j=1}^n \{ [(P_1[k, ii] - P_2[k, ii])] t_j \epsilon e_j \}_j \quad dm \quad (5.3)$$

A redução de emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera devido à variação de perdas nos cabos (ECO<sub>2</sub>1), pode ser determinada pela equação (5.4).

$$ECO_21 = \sum_{j=1}^n \{ [R[k, ii] (I[k, ii]_1)^2 - R[k, ii] (I[k, ii]_2)^2] t_j \}_j \quad dm\beta \quad (5.4)$$

A redução de emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera devido à variação da potência do equipamento (ECO<sub>2</sub>2) pode ser determinada pela equação (5.5).

$$ECO_22 = \sum_{j=1}^n \{ [(P_1[k, ii] - P_2[k, ii])] t_j \}_j \quad dm\beta \quad (5.5)$$

A redução total das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera pode ser determinada pela equação (5.6).

$$ECO_2T = \sum_{j=1}^n \{ [R[k, ii] (I[k, ii]_1)^2 - R[k, ii] (I[k, ii]_2)^2] t_j \}_j \quad dm\beta + \sum_{j=1}^n \{ [(P_1[k, ii] - P_2[k, ii])] t_j \}_j \quad dm\beta \quad (5.6)$$

Se, na análise do investimento, pretendermos incluir o custo proveniente das emissões de GEE para a atmosfera, podemos determinar os lucros da variação das emissões de CO<sub>2</sub> devido à redução das perdas nos cabos por (G1CO<sub>2</sub>), pela equação (5.7).

$$G1CO_2 = \sum_{j=1}^n \{ [R[k, ii](I[k, ii]_1)^2 - R[k, ii](I[k, ii]_2)^2] t_j \}_j \quad dm\beta\epsilon c \quad (5.7)$$

Os lucros da variação das emissões de CO<sub>2</sub>, devido à redução da potência dos equipamentos (G2CO<sub>2</sub>), podem ser determinados pela equação (5.8).

$$G2CO_2 = \sum_{j=1}^n \{ [(P_1[k, ii] - P_2[k, ii])] t_j \}_j \quad dm\beta\epsilon c \quad (5.8)$$

Os lucros ou benefícios totais, T<sub>p</sub>, a incluir como receitas na análise do investimento em equipamentos elétricos eficientes podem ser determinados pela equação (5.9).

$$\begin{aligned} T_p = & \sum_{j=1}^n \{ [R[k, ii](I[k, ii]_1)^2 - R[k, ii](I[k, ii]_2)^2] t_j \epsilon e_j \}_j \quad dm + \sum_{j=1}^n \{ [(P_1[k, ii] - \\ & P_2[k, ii])] t_j \epsilon e_j \}_j \quad dm + \sum_{j=1}^n \{ [R[k, ii](I[k, ii]_1)^2 - R[k, ii](I[k, ii]_2)^2] t_j \}_j \quad dm\beta\epsilon c + \\ & \sum_{j=1}^n \{ [(P_1[k, ii] - P_2[k, ii])] t_j \}_j \quad dm\beta\epsilon c \end{aligned} \quad (5.9)$$

Na posse dos elementos necessários para a avaliação do investimento, como sejam os benefícios provenientes da diminuição das perdas nos condutores da instalação, calculados de acordo com o método anterior, do investimento introduzido aquando da classificação e introdução dos dados relativos à opção em análise são elaborados os cálculos relativos aos indicadores de análise do investimento, podendo apresentar o *payback* atualizado, equação (5.10), ou o valor atual líquido, equação (5.11), ou os dois, se desejado. Sendo sugerido a opção a escolher de acordo com os resultados obtidos.

$$PaybackAt = \ln \frac{100 \text{ Rec}}{100 \text{ Rec} - a I_i} / \ln \frac{100+a}{100} \quad (5.10)$$

$$VAL = \sum_{j=1}^{mm} \frac{Rec_j}{(1+a)^j} - \sum_{j=0}^{mm-1} \frac{I_{ij}}{(1+a)^j} + \frac{V_r}{(1+a)^{mm}} \quad (5.11)$$

### 5.1.1.3- Saída de dados gerados pela aplicação

A Figura 5.9 apresenta o aspeto dos resultados da nova aplicação computacional.

Os resultados comparam uma situação inicial de um motor de indução *standard*, com dois motores de indução mais eficientes. As características e a análise de resultados serão apresentadas nos itens dedicados à simulação e análise de exemplos reais.

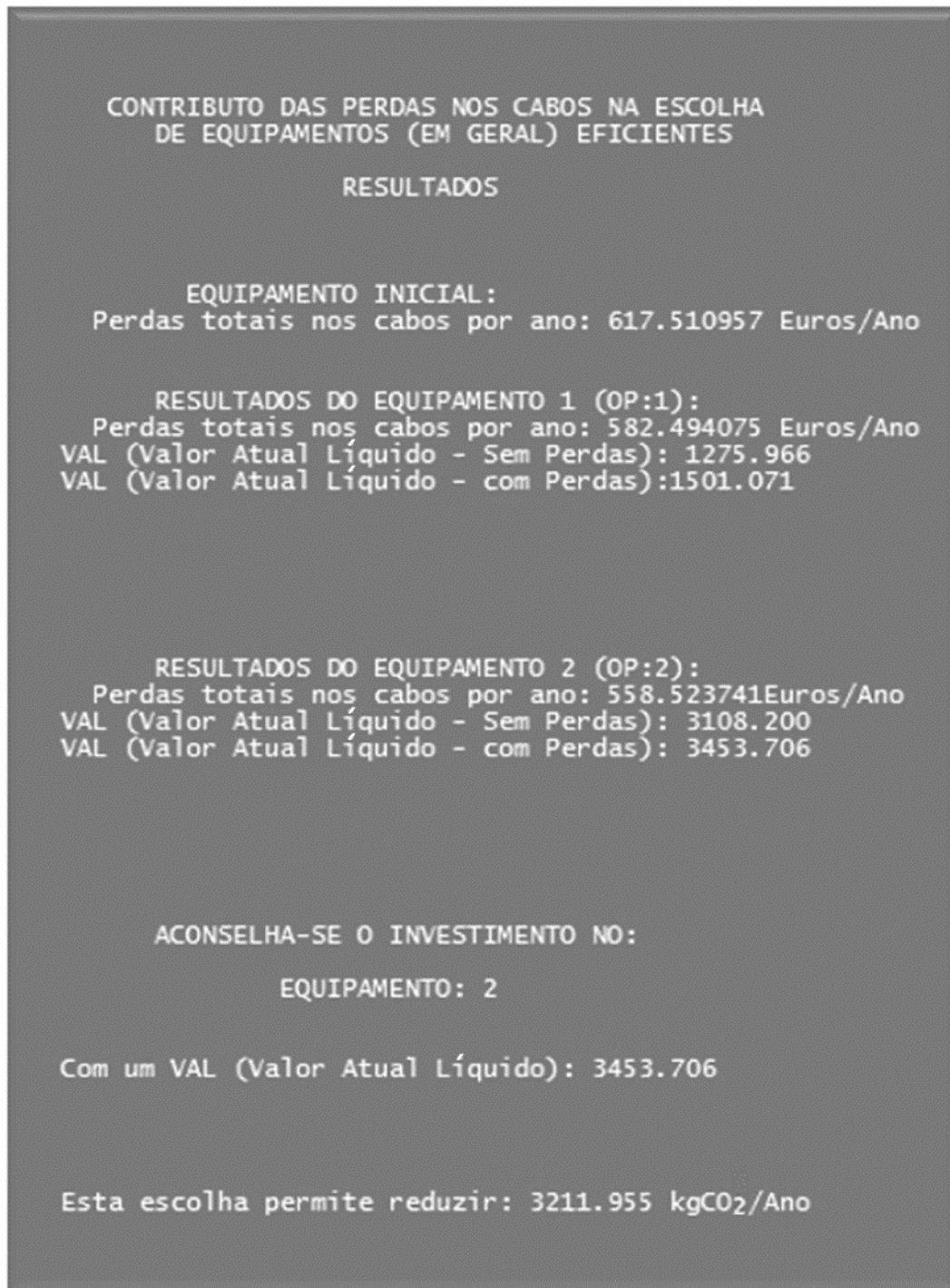


Figura 5.9- Aspeto geral da saída

A figura 5.10 apresenta em pormenor o fluxograma seguido pelo código da nova aplicação desenvolvida, tendo como base a explicação anterior: desenvolve os ciclos de entrada e análise dos dados, os cálculos efetuados e as decisões a tomar ao longo de todo o processo da aplicação desenvolvida, para o estudo de instalações domésticas e/ou industriais.

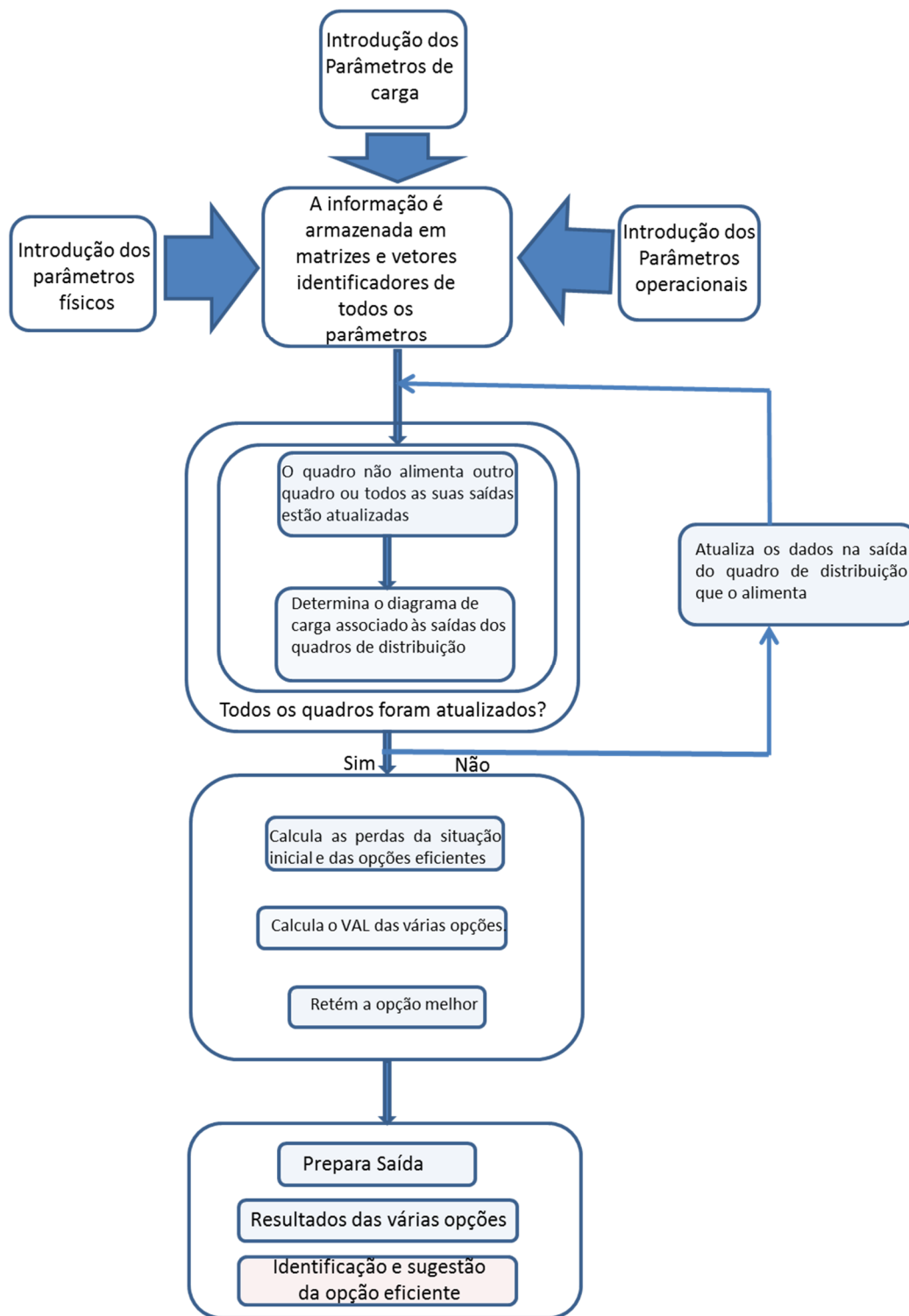


Figura 5.10- Fluxograma seguido pelo código da aplicação desenvolvida, para instalações industriais.

## 5.1.2- Aplicação em instalações de iluminação pública

A investigação em sistemas de iluminação pública tem como base um procedimento similar ao aplicado em instalações elétricas de utilização doméstica ou industrial, com as respetivas adaptações. Neste caso, não temos quadros de distribuição, ou seja, cada condutor alimenta várias lâmpadas ao longo do seu percurso podendo derivar deste outros condutores para outras ruas. A estes pontos de derivação designamos por “Nós de derivação” e aos condutores daí derivados designamos por “ramos”. É caracterizada a instalação com todos os parâmetros necessários iniciais, desde a instalação física às cargas (lâmpadas) e o modo de funcionamento destas. É determinada a escolha da situação que se pretende analisar; neste caso, permite analisar um equipamento específico, por exemplo, um foco de destaque da fachada de um edifício ou uma substituição do equipamento completo de uma rua em particular, ou até mesmo a substituição do equipamento ou sistema de controlo de toda a instalação. Após a caracterização física e operacional da carga da instalação são efetuadas as análises e cálculos correspondentes, sendo então sugerida a opção eficiente em função dos dados.

### 5.1.2.1- Parâmetros da instalação de iluminação pública

Estes parâmetros são aqui agrupados também em três tipos:

- 1- Parâmetros físicos;
- 2- Parâmetros de carga;
- 3- Parâmetros operacionais.

Consideremos como exemplo a instalação de iluminação pública apresentada na figura 5.11.

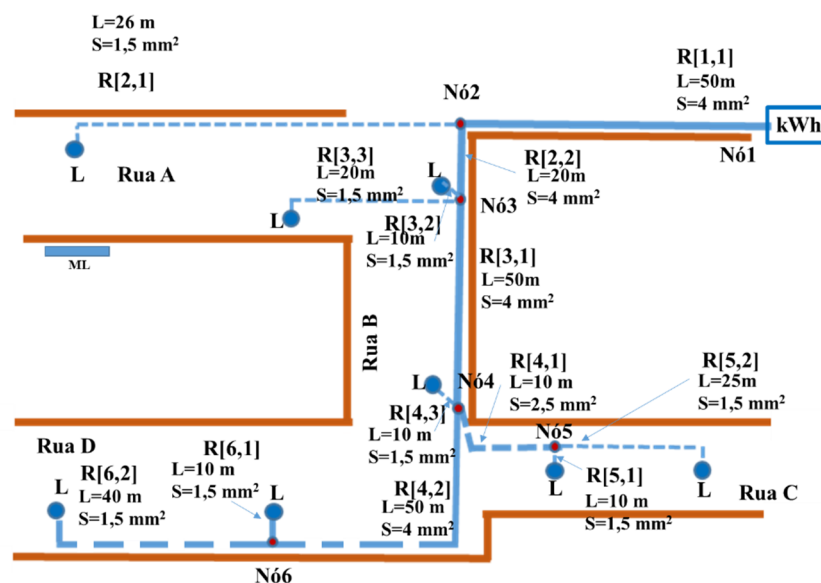


Figura 5.11- Esquema de uma instalação de iluminação pública.

### 1- Parâmetros físicos

Nós de derivação (Nó);

Interligações dos Nós de derivação;

Comprimentos dos Ramos (R) (comprimento do condutor entre nós ou entre nó e lâmpada);

Secção dos condutores dos ramos.

De modo a caracterizar a instalação em termos físicos, os nós de derivação são numerados, sendo atribuído o número 1 ao nó de saída do PT, tendo todos os outros numeração arbitrária. São numerados, também, os ramos de saída de cada nó. Ao introduzir os dados é preenchida uma matriz designada matriz de ligação, idêntica à dos quadros parciais em instalações de utilização, que permite identificar os percursos de corrente que alimentam os diversos nós; a matriz tem a estrutura apresentada na figura 5.12. Simultaneamente, num vetor, é guardado o número de nós que cada nó alimenta.

kk \ iii	1	2	3	...	n
1	--				
2	1				
3		2			
...					
n					

Figura 5.12- Matriz de ligação dos nós de derivação.

Tal como a matriz de ligação dos quadros parciais utilizada em instalações industriais ou domésticas, também esta matriz é de extrema importância em termos de simulação computacional, pois é ela que permite identificar e analisar o trânsito de energia ao longo de todos os ramos e nós da instalação de iluminação, permitindo identificar e calcular as perdas nos condutores pretendidos na análise de investimentos em novas lâmpadas ou sistemas de controlo colocados ao serviço na instalação. Por exemplo, na matriz de ligação apresentada na figura 5.12, onde  $kk$  representa os nós que fornecem energia e  $iii$  representa os nós de derivação que recebem energia, o número contido na matriz  $[kk, iii]$  indica o número do respetivo ramo.

Na matriz apresentada, Matriz de ligação  $[2,3]=2$ , significa que o nó número 3 é alimentado pelo nó 2 no seu ramo 2, como se verifica no esquema apresentado na figura 5.11.

Em função das características físicas e comprimento dos condutores é preenchida uma matriz designada de matriz de resistência (figura 5.13), que caracteriza o tipo de material e dimensões dos ramos em todos os traços da instalação, identificada pelos ramos dos respetivos nós.

$iB \backslash kk$	1	2	3	...	n
1	0,28125	0,39			
2		0,1125			
3					
...					
n					

Figura 5.13- Matriz de resistências dos ramos.

Por exemplo, na matriz de resistências onde  $kk$  representa os nós de derivação, e  $iB$  representa o número do ramo nesse nó, o número contido na matriz  $[kk, iB]$  indica a resistência do condutor correspondente a esse ramo. Na matriz apresentada na figura 5.13, a matriz de resistência dos ramos  $[2,1]=0,39$  significa que a resistência do condutor usado no ramo 1 do nó 2 é de  $0,39\Omega$ .

## 2- Parâmetros de carga (tratamento idêntico ao das cargas industriais)

Potência e características das cargas ligadas à instalação elétrica;

Eficiência das cargas;

Fator de potência das cargas;

Diagrama de carga diário. Analisado nas 24h, em intervalos que permitam analisar as variações da potência ao longo do dia, representado genericamente na figura 5.5;

Diagramas de carga previstos dos equipamentos energeticamente eficientes a incluir para análise do investimento.

### 3- Parâmetros operacionais (tratamento idêntico ao das cargas industriais)

Tempo de funcionamento da instalação elétrica;

Dias de funcionamento mensal, designado por  $d$ ;

Meses de funcionamento anual, designado por  $m$ ;

Custo da energia elétrica  $\epsilon_e$  ; O preço da energia elétrica é variável dependendo do tarifário e do fornecedor escolhido. A aplicação computacional permite ao utilizador escolher a tarifa pré carregada;

Preço das emissões CO<sub>2</sub>/kWh, designado por  $\epsilon_c$ ;

Fator de conversão do kWh para CO<sub>2</sub> equivalente, designado por  $\beta$ .

#### 5.1.2.2- Caracterização dos principais cálculos

A análise em instalações de iluminação é idêntica à usada em instalações industriais, com as respetivas adaptações. Assim, após a introdução dos parâmetros característicos da instalação e diagramas de carga, são tratados os dados e efetuados os cálculos que permitem a inclusão da diminuição das perdas nos cabos em todos os condutores afetados na análise do investimento correspondente. Neste ponto são destacados os principais passos usados nesta tese para instalações de iluminação pública.

A aplicação começa por fazer a atualização dos diagramas de carga, pois os diagramas de carga dos ramos de um nó que alimenta outro nó não estão definidos. Assim, o diagrama de carga de um ramo de um nó que alimenta outro nó é a sobreposição dos diagramas de todos os ramos do nó que esse ramo alimenta. Tomando como exemplo o esquema da instalação apresentado na figura 5.11, o diagrama de carga no condutor do ramo 2 do nó 4 é a sobreposição (soma intervalo a intervalo) de todos os ramos do nó 6. Sendo este método de análise efetuado em termos de energia ativa e reativa de modo a permitir que, em qualquer altura do processo, se possa utilizar análise vetorial de tensões, correntes e potências, pois estamos a trabalhar em corrente alternada. O resultado deste método de análise é apresentado nas figuras 5.14, 5.15 e 5.16 para o diagrama referente à potência ativa.

Se considerarmos como exemplo o diagrama de carga da lâmpada alimentada pelo nó 6 no seu ramo 1, apresentado na figura 5.14, e o diagrama de carga alimentada pelo mesmo nó no seu ramo 2, apresentado na figura 5.15, o diagrama de carga do ramo 2 do nó 4, obtido pela sobreposição dos anteriores, é o apresentado na figura 5.16.

De referir que este processo de análise se repete para os diagramas correspondentes à energia reativa, como já referido, e que a análise é efetuada em toda a instalação, tendo em consideração as suas

características. Esta análise é permitida pela utilização da matriz de ligação, começando pelos nós que não alimentam outros nós, de modo que se percorra toda a instalação indo atualizando todos os nós e respetivos ramos até chegar ao nó inicial da instalação, normalmente a saída do PT, sendo aí obtido o diagrama total da dita instalação.

A caracterização e atualização de dados é feita para a situação inicial e para todas as opções com lâmpadas ou controladores de fluxo energeticamente eficientes, para os quais se pretende fazer a análise.

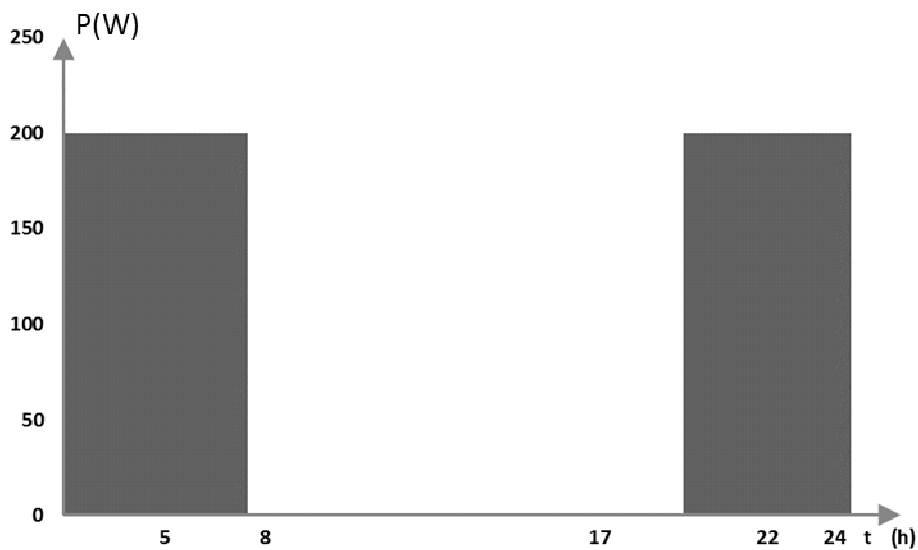


Figura 5.14- Exemplo de diagrama de carga do ramo 1 do nó 6.

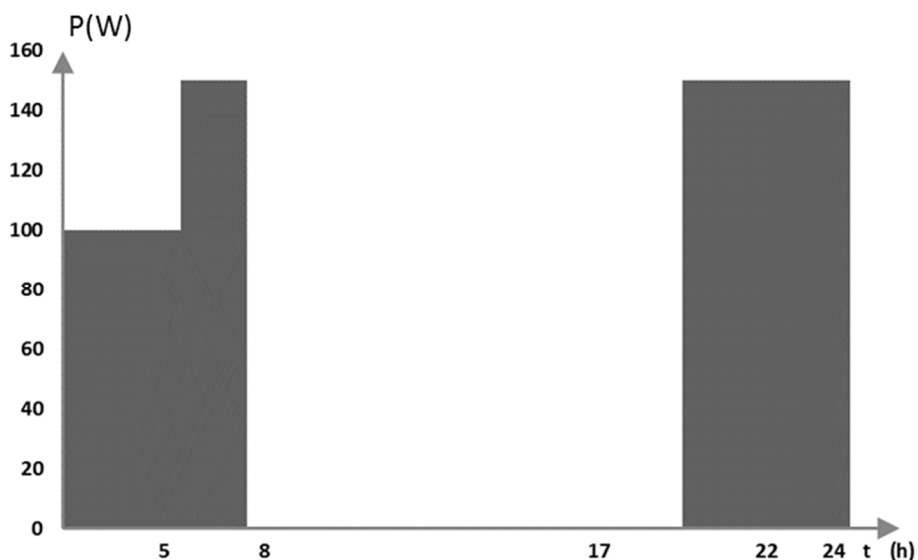


Figura 5.15- Exemplo de diagrama de carga do ramo 2 do nó 6.

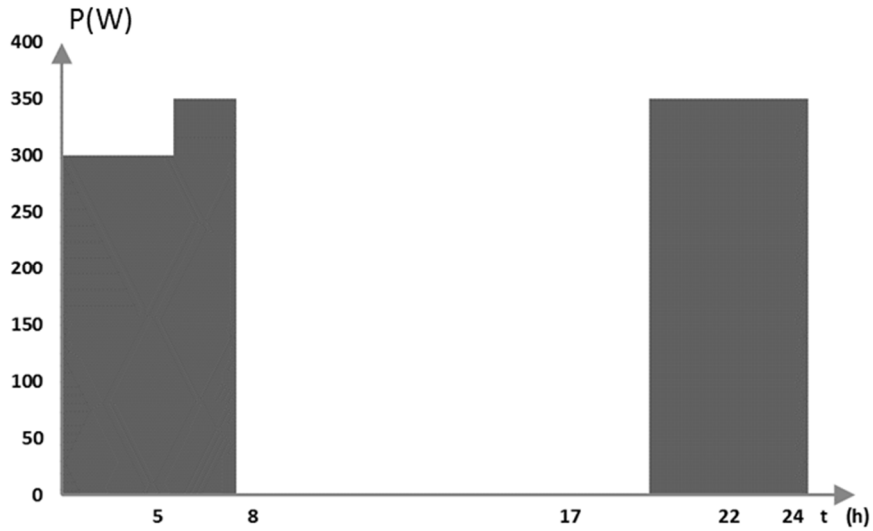


Figura 5.16- Exemplo de diagrama de carga do ramo 2 do nó 4, obtido por sobreposição.

Após a atualização de todos os diagramas de carga podemos determinar e guardar, para poder utilizar quando solicitado, todas as correntes em todos os condutores dos ramos e todos os intervalos que representam os diagramas de carga, quer na situação inicial da instalação, designando esta situação inicial por  $I_1$  se nos estivermos a referir ao módulo da corrente ou  $\vec{i}_1$  se for referido o vetor, quer na situação de análise de opção de lâmpadas ou controladores de fluxo energeticamente mais eficientes, designando esta situação por  $I_2$  se nos estivermos a referir ao módulo da corrente ou  $\vec{i}_2$  se for referido o vetor da opção mais eficiente.

O objetivo é, novamente, incluir a diminuição das perdas nos cabos da instalação elétrica provocados pela diminuição da corrente elétrica quando se pretende optar por equipamentos ou lâmpadas eficientes, como benefício na análise do investimento. Assim, podemos determinar a redução das perdas por efeito de Joule  $\Delta P[kk, iB]$  em cada ramo afetado pela substituição, pela equação (5.12).

$$\Delta P[kk, iB] = \int_0^{24} R[kk, iB] (I[kk, iB]_1)^2 dt - \int_0^{24} R[kk, iB] (I[kk, iB]_2)^2 dt \quad (5.12)$$

Aplicando a soma de Riemann ao intervalo do diagrama de carga das 0 às 24h, permitindo analisar a variação das perdas ao longo do tempo e usando uma partição com um conjunto de  $n$  intervalos com a duração de tempo  $t_j$ , e admitindo a aplicação dos vários tarifários de energia elétrica, podemos determinar o conjunto de rendimentos obtidos para todos os troços  $kk$  e  $iB$ .

Os benefícios devidos à variação das perdas nos cabos podem ser determinados pela equação (5.13) designada por  $G11$ .

$$G11 = \sum_{j=1}^n \{ [R[kk, iB] (I[kk, iB]_1)^2 - R[kk, iB] (I[kk, iB]_2)^2] t_j \epsilon_j \}_j \quad (5.13)$$

Os benefícios devidos à variação do consumo de energia por diminuição da potência das lâmpadas e equipamentos energeticamente eficientes podem ser determinados pela equação (5.14) designada por G22.

$$G22 = \sum_{j=1}^n \{[(P_1[kk, iB] - P_2[kk, iB])]t_j \epsilon e_j\}_j \text{ dm} \quad (5.14)$$

A redução de emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera devido à variação de perdas nos cabos (ECO<sub>2</sub>11) pode ser determinada pela equação (5.15).

$$ECO_{211} = \sum_{j=1}^n \{[R[kk, iB](I[kk, iB]_1)^2 - R[kk, iB](I[kk, iB]_2)^2]t_j\}_j \text{ dm}\beta \quad (5.15)$$

A redução de emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera devido à variação da potência do equipamento (ECO<sub>2</sub>22) pode ser determinada pela equação (5.16).

$$ECO_{222} = \sum_{j=1}^n \{[(P_1[kk, iB] - P_2[kk, iB])]t_j\}_j \text{ dm}\beta \quad (5.16)$$

A redução total das emissões de CO<sub>2</sub> pode ser determinada pela equação (5.17).

$$ECO_{2T} = \sum_{j=1}^n \{[R[kk, iB](I[kk, iB]_1)^2 - R[kk, iB](I[kk, iB]_2)^2]t_j\}_j \text{ dm}\beta + \sum_{j=1}^n \{[(P_1[kk, iB] - P_2[kk, iB])]t_j\}_j \text{ dm}\beta \quad (5.17)$$

Se na análise do investimento pretendermos incluir o custo proveniente das emissões de GEE para a atmosfera, podemos determinar os lucros da variação das emissões de CO<sub>2</sub> devido à redução das perdas nos cabos por (G11CO<sub>2</sub>), pela equação (5.18).

$$G11CO_2 = \sum_{j=1}^n \{[R[kk, iB](I[kk, iB]_1)^2 - R[kk, iB](I[kk, iB]_2)^2]t_j\}_j \text{ dm}\beta \epsilon c \quad (5.18)$$

Os lucros da variação das emissões de CO<sub>2</sub> devido à redução da potência dos equipamentos (G22CO<sub>2</sub>) podem ser determinados pela equação (5.19).

$$G22CO_2 = \sum_{j=1}^n \{[(P_1[kk, iB] - P_2[kk, iB])]t_j\}_j \text{ dm}\beta \epsilon c \quad (5.19)$$

Os lucros ou benefícios totais T<sub>p</sub> a incluir como receitas na análise do investimento em equipamento elétrico eficiente podem ser determinados pela equação (5.20).

$$T_p = \sum_{j=1}^n \{ [R[kk, iB](I[kk, iB]_1)^2 - R[kk, iB](I[kk, iB]_2)^2] t_j \epsilon e_j \}_j \, dm + \sum_{j=1}^n \{ [(P_1[kk, iB] - P_2[kk, iB])] t_j \epsilon e_j \}_j \, dm + \sum_{j=1}^n \{ [R[kk, iB](I[kk, iB]_1)^2 - R[kk, iB](I[kk, iB]_2)^2] t_j \}_j \, dm \beta \epsilon c + \sum_{j=1}^n \{ [(P_1[kk, iB] - P_2[kk, iB])] t_j \}_j \, dm \beta \epsilon c \quad (5.20)$$

Na posse dos elementos necessários para a avaliação do investimento, como sejam os benefícios provenientes da diminuição das perdas nos condutores da instalação, calculados de acordo com o método anterior, do investimento introduzido aquando da classificação e introdução dos dados relativos à opção em análise, são elaborados os cálculos relativos aos indicadores de análise do investimento, podendo apresentar o *payback* atualizado, equação (5.10), o valor atual líquido, equação (5.11), ou os dois se desejado, sendo sugerida então a opção a escolher de acordo com os resultados obtidos.

### 5.1.2.3- Saída de dados gerados pela aplicação

A Figura 5.17 apresenta o aspeto dos resultados da nova aplicação computacional, neste caso, com indicação do VAL e *payback* atualizados.

```

CONTRIBUTO DAS PERDAS NOS CABOS NA ESCOLHA
DE TECNOLOGIA/EQUIPAMENTOS EM LUMINOTECNIA

RESULTADOS

TECNOLOGIA INICIAL:
Perdas totais nos cabos por ano: 12.956373 Euros/Ano

RESULTADOS DA TECNOLOGIA I (Lamp:1):
Perdas totais nos cabos por ano: 10.893794 Euros/Ano
VAL (Valor Atual Líquido - Sem Perdas): 37.975
VAL (Valor Atual Líquido - com Perdas): 50.056

PAYBACK DO INVESTIMENTO - Sem Perdas): 4.842357 Anos
PAYBACK DO INVESTIMENTO - com Perdas): 4.305849 Anos

RESULTADOS DA TECNOLOGIA II (Lamp:2):
Perdas totais nos cabos por ano: 11.116205 Euros/Ano
VAL (Valor Atual Líquido - Sem Perdas): 26.688
VAL (Valor Atual Líquido - com Perdas): 37.467

PAYBACK DO INVESTIMENTO - Sem Perdas): 5.012168 Anos
PAYBACK DO INVESTIMENTO - com Perdas): 4.359749 Anos

ACONSELHA-SE O INVESTIMENTO:

Lamp:1

Com um VAL (Valor Atual Líquido): 50.056

Esta escolha permite reduzir: 102.754 kgCO2/Ano

```

Figura 5.17- Aspeto geral da saída para iluminação eficiente.

Os resultados da figura 5.17 comparam uma situação inicial de uso de um projetor de halogéneo, com dois projetores LED mais eficientes. As características, análise de resultados e de potencialidades serão apresentados nos pontos dedicados à simulação e análise de exemplos reais.

A figura 5.18 apresenta, em pormenor, o fluxograma seguido pelo código da nova aplicação desenvolvida, que visa desenvolver os ciclos de entrada e análise dos dados, os cálculos efetuados e as decisões a tomar ao longo de todo o processo da aplicação desenvolvida, para a análise de instalações de iluminação pública no âmbito desta tese.

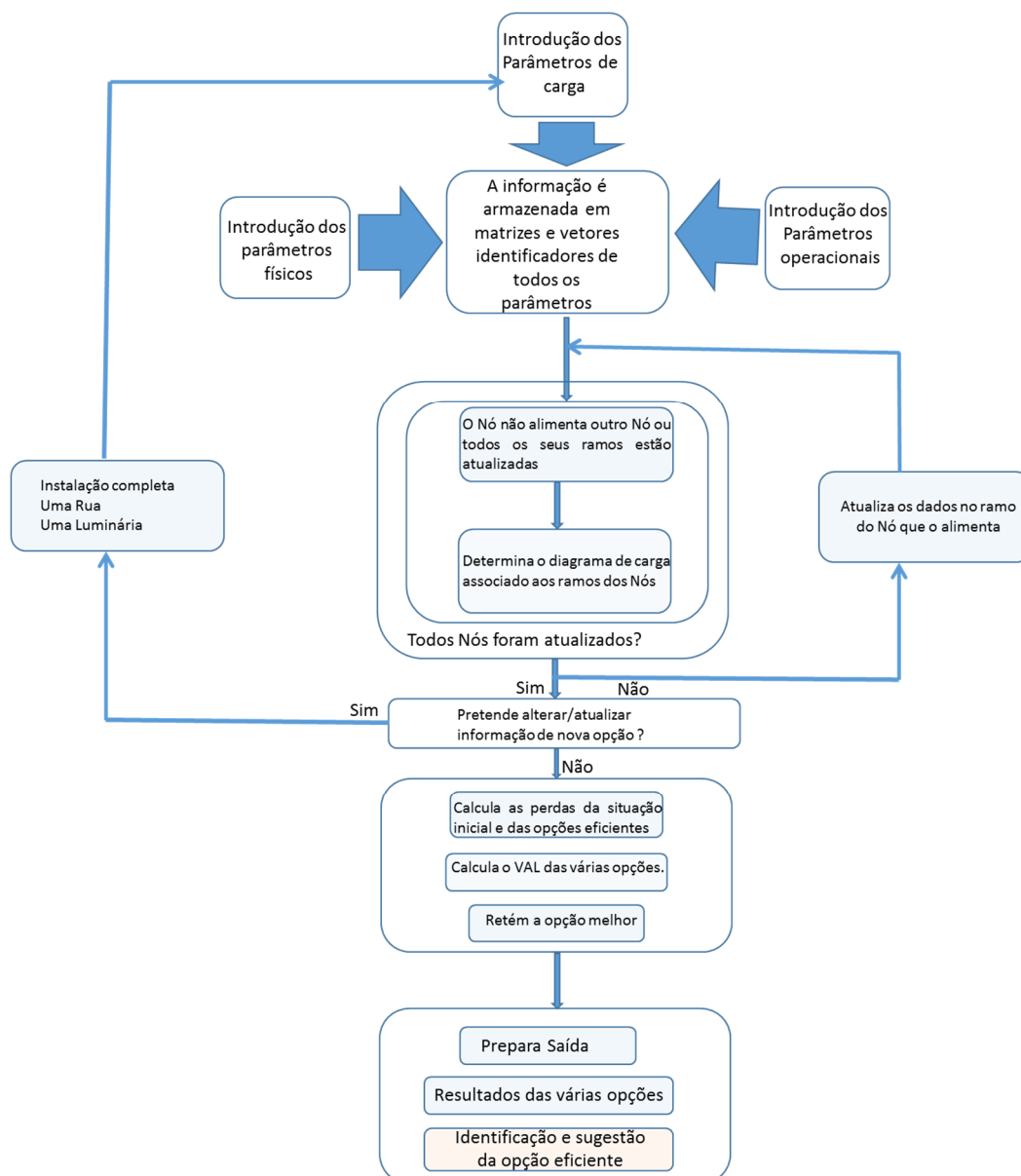


Figura 5.18- Fluxograma seguido pelo código da aplicação desenvolvida, para instalações de iluminação pública.

A figura 5.19 apresenta o fluxograma total seguido pelo código da nova aplicação desenvolvida, tendo como base as explicações anteriores. Inclui uma entrada comum, desenvolve os ciclos de entrada e análise dos dados, os cálculos efetuados e as decisões a tomar ao longo de todo o processo da aplicação desenvolvida, para a análise de todas as instalações estudadas.

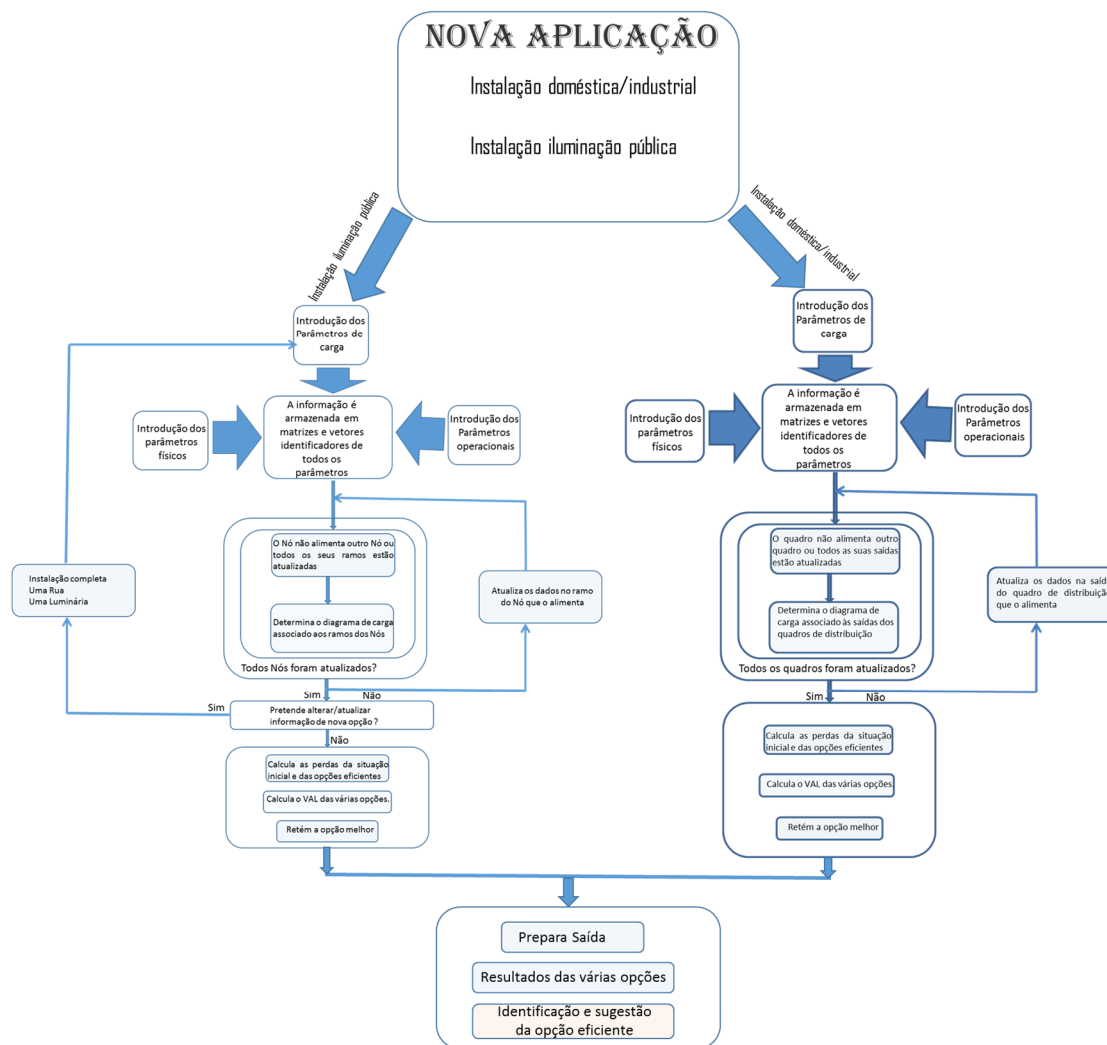


Figura 5.19- Fluxograma total seguido pelo código da aplicação desenvolvida.

## 5.2- Resultados de simulação computacional

A pesquisa e a contribuição de novos conceitos e aplicações que contribuam para o desenvolvimento do conhecimento são, por si só, de extrema relevância; no entanto, a sua aplicação prática deve ser testada e reconhecida no conceito e na sua validação experimental.

No ponto seguinte são apresentados exemplos desenvolvidos ao longo do tempo de elaboração desta tese, os quais foram expostos em conferências de reconhecimento nacional e internacional, bem como publicados em artigos científicos em revistas da especialidade de reconhecido mérito.

### 5.2.1- Simulação computacional em instalação industrial

Na figura 5.20 é apresentado o esquema genérico de uma instalação elétrica, que pode ser utilizada numa instalação de bombagem de água de uma instalação industrial. O objetivo é verificar e analisar a viabilidade de efetuar um investimento na substituição do motor de uma das bombas utilizadas, neste caso, a bomba alimentada pelo quadro parcial 2 na sua saída 2. Partindo do princípio que o motor existente tem um rendimento baixo, 80%, pretendemos substituí-lo por outro mais eficiente. São analisadas duas possibilidades, uma com um rendimento de 85% e outra com um rendimento de 90%. Por simplificação e facilidade de compreensão e verificação dos dados é considerado que os diagramas de carga são coincidentes em termos temporais; no entanto, o sistema funciona com qualquer tipo de cargas e diagrama de carga.

Os parâmetros físicos são os constantes na figura 5.20.

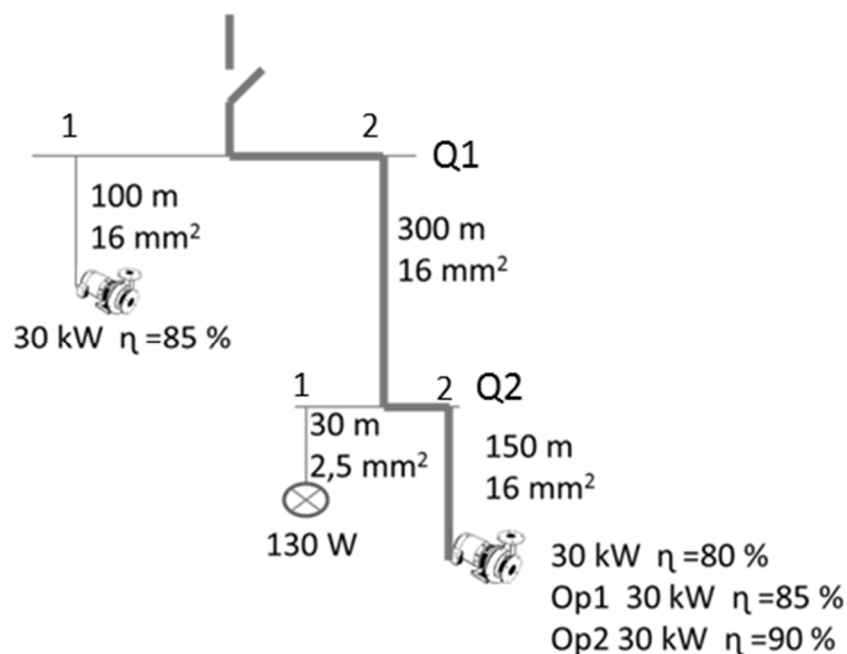


Figura 5.20- Exemplo de uma instalação usada para simulação.

Os parâmetros de carga são caracterizados pelos diagramas de carga de todos os equipamentos ligados à instalação elétrica apresentados nas figuras 5.21 a 5.25.

O fator de potência da carga de 130 W é unitário, tendo sido considerado um fator de potência de 0.94 para os motores.

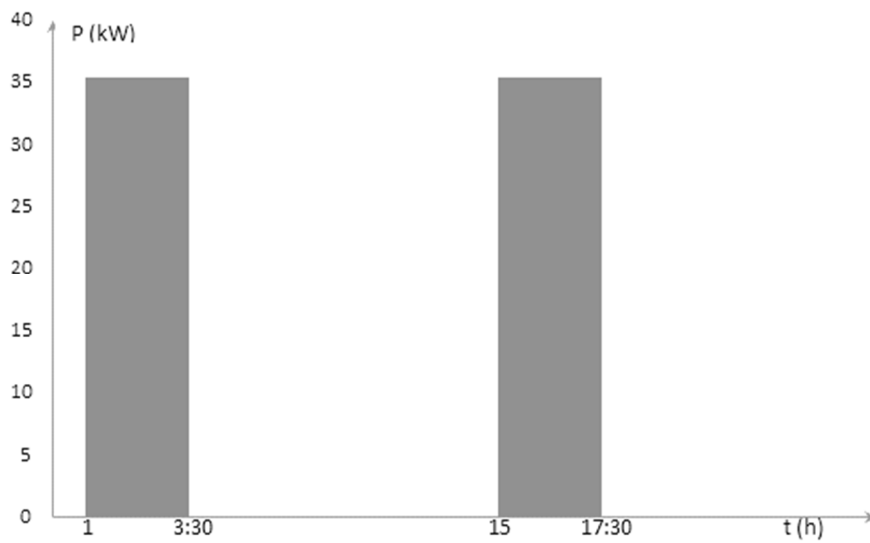


Figura 5.21- Diagrama de carga da carga [1,1].

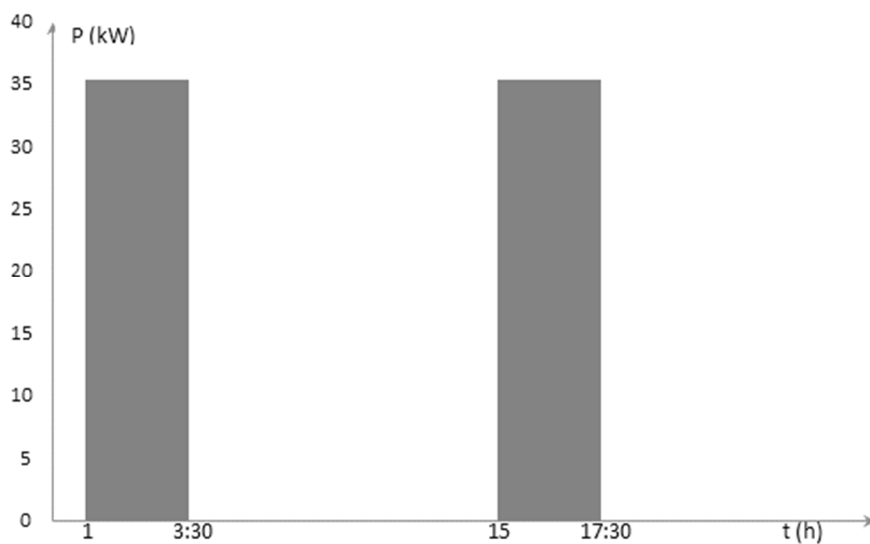


Figura 5.22- Diagrama de carga da carga [2,1].

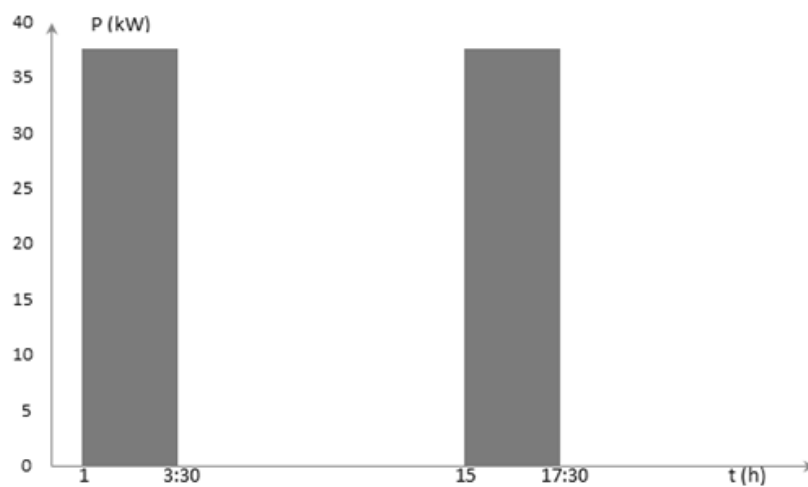


Figura 5.23- Diagrama de carga da carga [2,2].

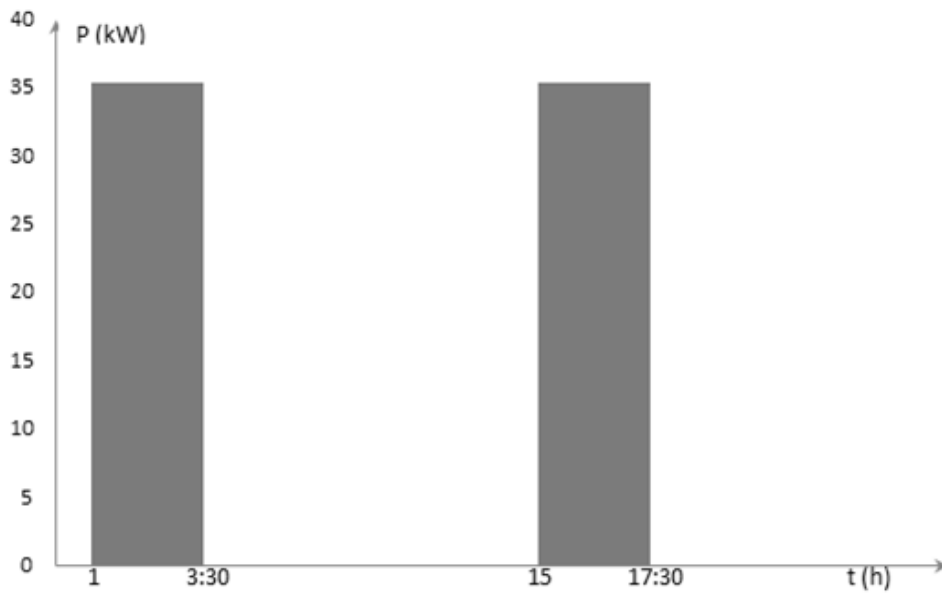


Figura 5.24- Diagrama de carga da carga [2,2], opção 1.

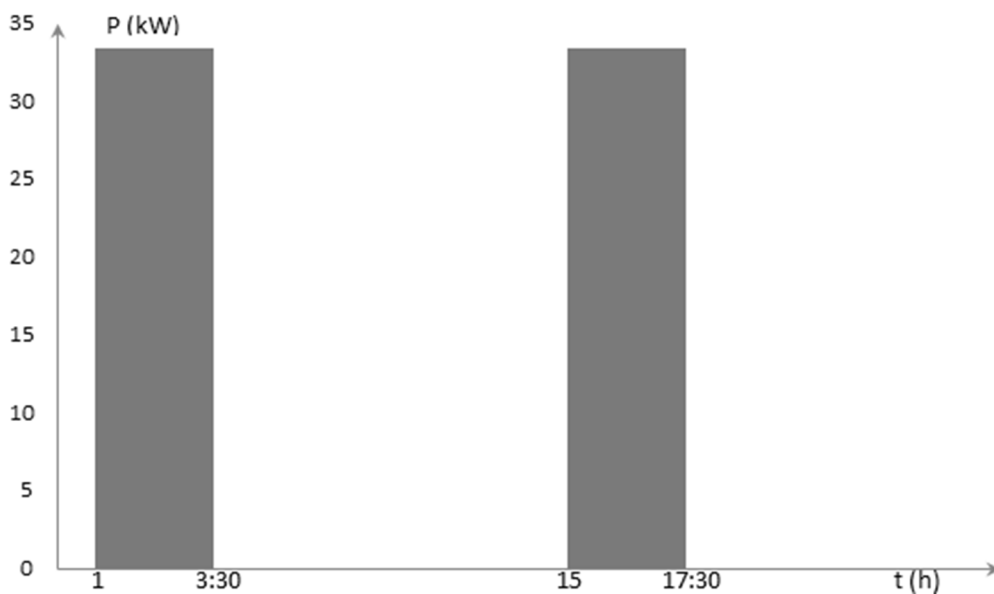


Figura 5.25- Diagrama de carga da carga [2,2], opção 2.

Os parâmetros operacionais usados neste exemplo têm em consideração a necessidade de funcionamento das bombas em dois períodos diários, perfazendo 5 horas diárias durante todos os dias do mês e doze meses anuais, totalizando os 365 dias anuais. O preço da energia elétrica utilizado foi de 0.15 € por kWh com uma taxa de juro de 10%.

Os resultados obtidos em simulação computacional são apresentados na figura 5.26.

CONTRIBUTO DAS PERDAS NOS CABOS NA ESCOLHA  
DE EQUIPAMENTOS (EM GERAL) EFICIENTES

RESULTADOS

EQUIPAMENTO INICIAL:

Perdas totais nos cabos por ano: 1149.489967 Euros/Ano

RESULTADOS DO EQUIPAMENTO 1 (OP:1):

Perdas totais nos cabos por ano: 1040.273465 Euros/Ano

VAL (Valor Atual Líquido - Sem Perdas): -634.484

VAL (Valor Atual Líquido - com Perdas): 165.579

RESULTADOS DO EQUIPAMENTO 2 (OP:2):

Perdas totais nos cabos por ano: 946.700268 Euros/Ano

VAL (Valor Atual Líquido - Sem Perdas): 1029.621

VAL (Valor Atual Líquido - com Perdas): 2515.153

ACONSELHA-SE O INVESTIMENTO NO:

EQUIPAMENTO: 2

Com um VAL (Valor Atual Líquido): 2515.153

Esta escolha permite reduzir: 733.163 kgCO<sub>2</sub>/Ano

Figura 5.26- Resultados obtidos para o exemplo apresentado na figura 5.20.

Neste exemplo de simulação, o objetivo não foi a simulação de uma instalação de funcionamento real. O objetivo principal foi, sim, o de verificar e demonstrar que as perdas nos cabos podem influenciar a análise de investimentos em equipamentos energeticamente eficientes e sustentáveis. Neste caso, a opção eficiente sugerida é a opção 2, por verificar um VAL superior à opção estudada 1. No entanto, podemos verificar que naquela opção, opção 1, o VAL passa de negativo, ou seja, um investimento não aconselhável quando não são consideradas as perdas nos cabos, a positivo, quando essas perdas são consideradas. Confirma-se, assim, que as perdas nos cabos podem efetivamente influenciar a escolha de investimentos em equipamentos energéticos eficientes.

## 5.2.2- Simulação computacional em instalação de iluminação

Na figura 5.27, é apresentado o esquema genérico de uma instalação de iluminação pública, que pode ser utilizada num bairro residencial. O objetivo é verificar e analisar a viabilidade de efetuar um investimento na substituição de lâmpadas, com balastro convencional, por outras com balastro bi nível, permitindo assim diminuir a potência da instalação em grande parte da noite, diminuindo também o fluxo luminoso da instalação nas horas de menor movimento.

Os parâmetros físicos são os constantes na figura 5.27.

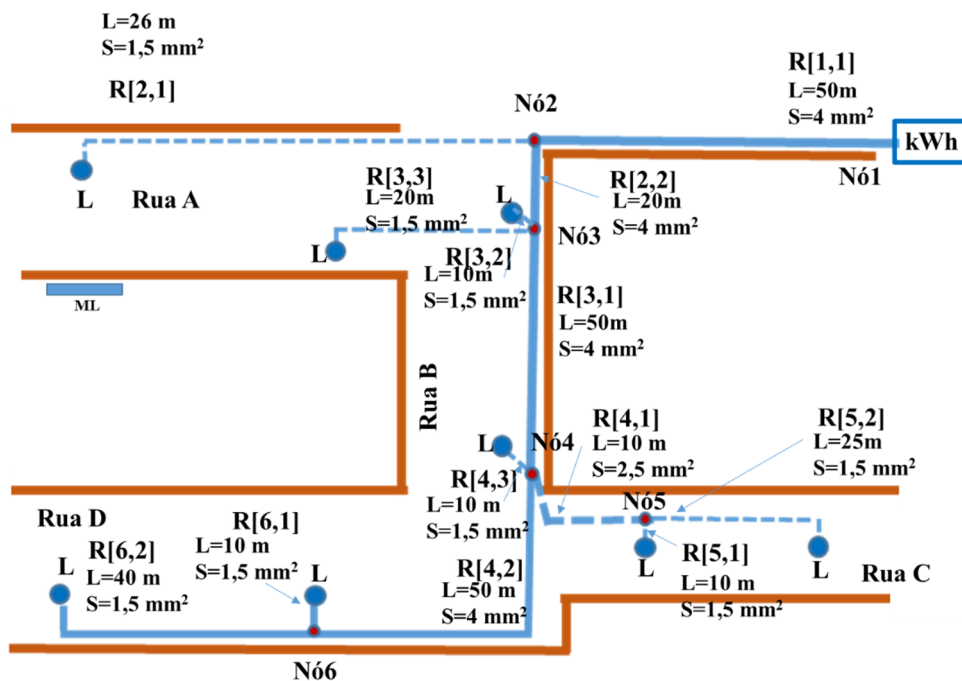


Figura 5.27- Exemplo de uma instalação usada para simulação.

Os parâmetros de carga são caracterizados pelos diagramas de carga de todas as luminárias ligadas à instalação elétrica de iluminação pública, apresentados nas figuras 5.28 a 5.30. A potência das luminárias iniciais é de 166 W em toda a instalação. Considerando que na rua D a movimentação e uso da instalação permite a diminuição do fluxo em parte da noite, é estudada a viabilidade de substituição das luminárias iniciais por outras com balastro bi nível que permite a redução do fluxo e respetiva potência. Serão analisadas duas opções, uma que permite reduzir a potência para 116,5 W com um custo unitário de 39 €, e outra que permite reduzir a potência para 129 W com um custo unitário de 30 €.

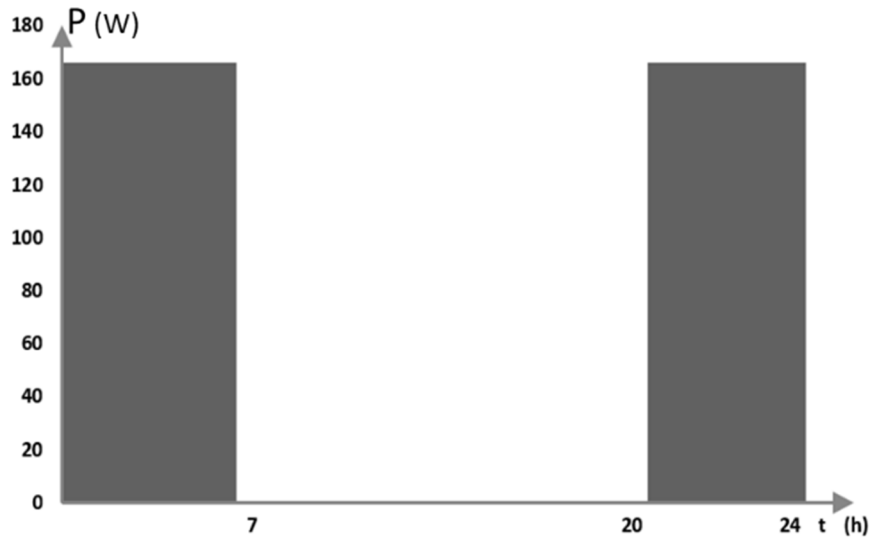


Figura 5.28- Diagrama de carga das luminárias iniciais (em toda a instalação).

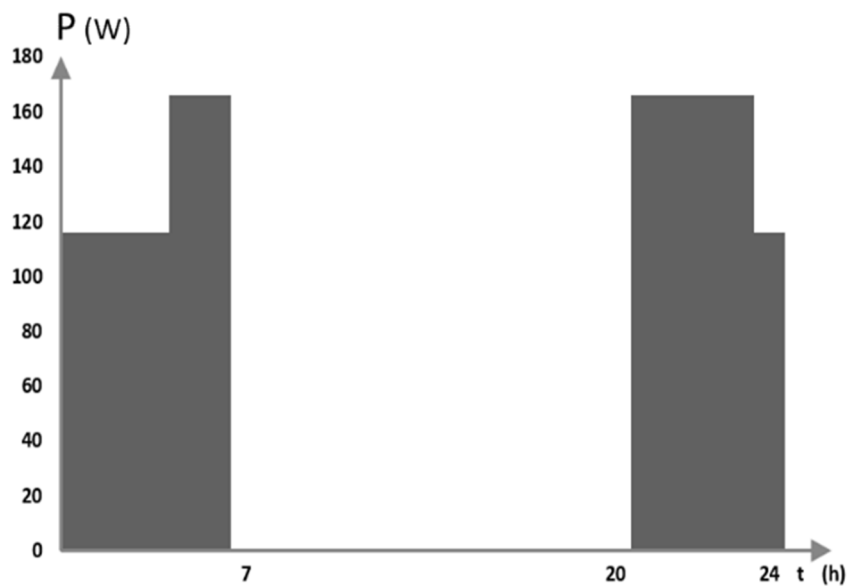


Figura 5.29- Diagrama de carga das luminárias com balastro bi potência a utilizar na rua D (Opção 1).

Os parâmetros operacionais usados neste exemplo têm em consideração a necessidade de redução de consumos, em especial nos municípios; neste caso, por redução do fluxo luminoso quando isto é possível em função da classificação das ruas e em função da sua utilização. A iluminação é usada diariamente durante o ano, totalizando os 365 dias anuais. O preço da energia elétrica utilizado foi de 0.10 € por kWh, e a taxa de juro na análise do investimento de 7.5%.

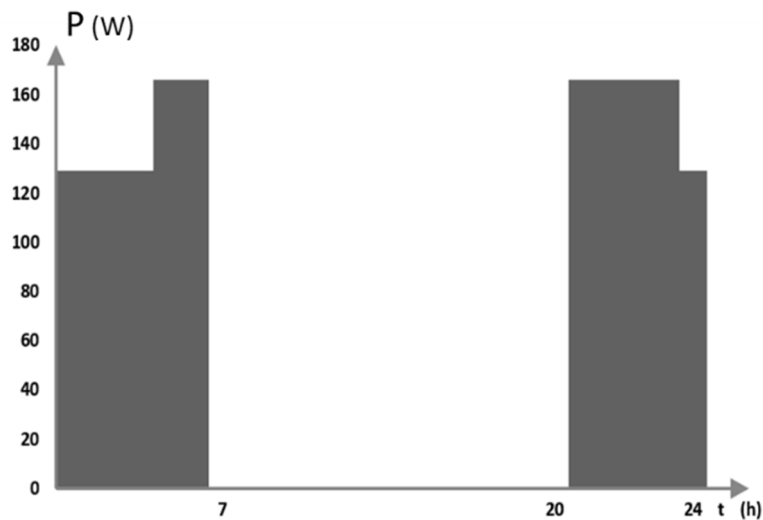


Figura 5.30- Diagrama de carga das luminárias com balastro bi nível a utilizar na rua D (Opção 2).

Os resultados obtidos em simulação computacional são apresentados na figura 5.31.

```

CONTRIBUTO DAS PERDAS NOS CABOS NA ESCOLHA
DE TECNOLOGIA/EQUIPAMENTOS EM LUMINOTECNIA

RESULTADOS

TECNOLOGIA INICIAL:
Perdas totais nos cabos por ano: 12.956373 Euros/Ano

RESULTADOS DA TECNOLOGIA I (Lamp:1):
Perdas totais nos cabos por ano: 10.893794 Euros/Ano
VAL (Valor Atual Líquido - Sem Perdas): 37.975
VAL (Valor Atual Líquido - com Perdas): 50.056

PAYBACK DO INVESTIMENTO - Sem Perdas): 4.842357 Anos
PAYBACK DO INVESTIMENTO - com Perdas): 4.305849 Anos

RESULTADOS DA TECNOLOGIA II (Lamp:2):
Perdas totais nos cabos por ano: 11.116205 Euros/Ano
VAL (Valor Atual Líquido - Sem Perdas): 26.688
VAL (Valor Atual Líquido - com Perdas): 37.467

PAYBACK DO INVESTIMENTO - Sem Perdas): 5.012168 Anos
PAYBACK DO INVESTIMENTO - com Perdas): 4.359749 Anos

ACONSELHA-SE O INVESTIMENTO:

Lamp:1

Com um VAL (Valor Atual Líquido): 50.056

Esta escolha permite reduzir: 102.754 kgCO2/Ano

```

Figura 5.31- Resultados obtidos para o exemplo apresentado na figura 5.27.

Este exemplo de simulação computacional teve como objetivo validar os resultados obtidos, comparando-os com outros já publicados em estudos anteriores. Foram utilizados dados similares aos utilizados em [Miomir09] e foram verificados valores de período de recuperação idênticos aos apresentados, o que valida a aplicação e métodos usados no desenvolvimento desta tese. Permite, ainda, confirmar o objetivo principal da tese, o de verificar e demonstrar que as perdas nos cabos podem influenciar na análise de investimentos em equipamentos energeticamente eficientes e sustentáveis. Os resultados obtidos confirmam o aumento do VAL e a diminuição do período de recuperação do investimento, ao contabilizarmos como benefícios a redução nos cabos da instalação provenientes da diminuição da corrente quando se substitui uma luminária por outra mais eficiente e considerando todo o seu ciclo de vida. Confirma-se, assim, que as perdas nos cabos podem influenciar a escolha de investimentos em equipamentos energéticos eficientes.

### **5.3-Resultados experimentais em laboratório**

Com o objetivo de validar a nova aplicação computacional apresentada foram elaboradas em laboratório algumas configurações, situações com características próprias de modo a permitir a validação de resultados.

#### **5.3.1- Validação de resultados para instalações industriais**

Na figura 5.32 é apresentado o aspeto geral da montagem efetuada em laboratório com as características de uma instalação elétrica real. O objetivo é verificar e analisar a viabilidade de efetuar um investimento na substituição de um lustre com lâmpadas convencionais, por outro com uma eficiência superior. Neste caso, a carga é alimentada pelo quadro parcial 2 na sua saída 2. Partindo do princípio que o lustre existente utiliza lâmpadas incandescentes, pretendemos substituí-lo por outro mais eficiente com lâmpadas de halogénio ou lâmpadas fluorescentes compactas.

Também aqui, por simplificação e facilidade de compreensão e verificação dos dados, é considerado que os diagramas de carga são coincidentes em termos temporais, no entanto, o sistema funciona com qualquer tipo de cargas e diagrama de carga.

Os parâmetros físicos da instalação são os constantes na figura 5.33.

Os parâmetros das cargas são caracterizados pelos diagramas de carga de todos os equipamentos ligados à instalação elétrica a partir de todos os quadros parciais e geral, da instalação, representados pelas figuras 5.34 a 5.38.

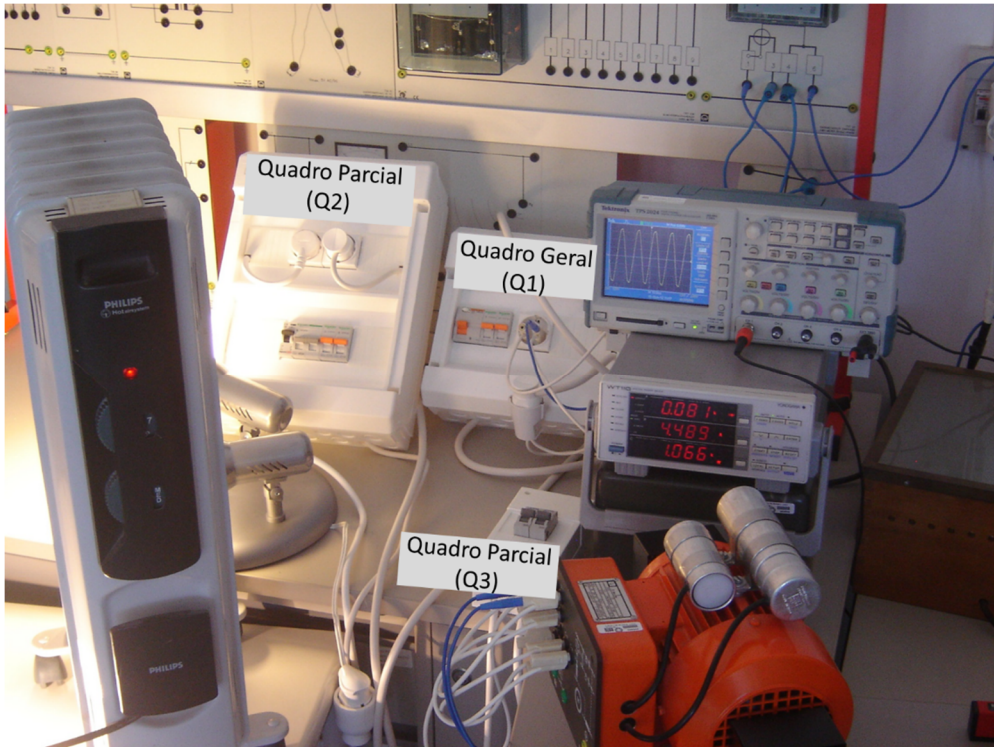


Figura 5.32- Aspeto geral da montagem de laboratório de uma instalação industrial.

## Rede de distribuição de Baixa tensão

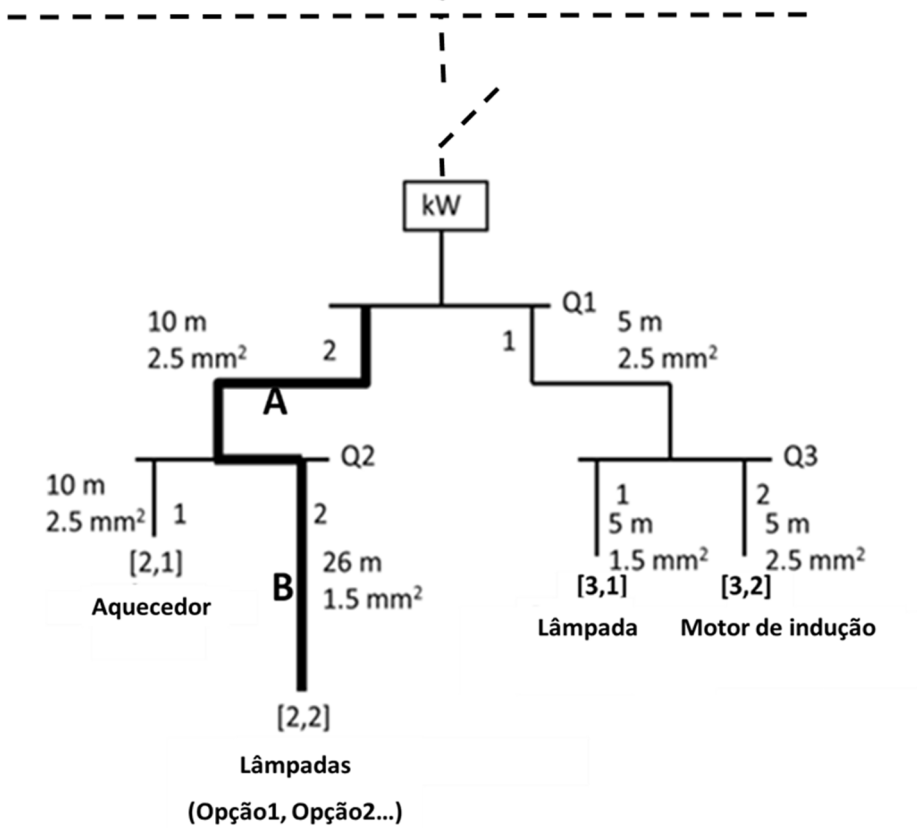


Figura 5.33- Parâmetros físicos da instalação de utilização montada em laboratório.

A instalação é constituída por motores de indução, aquecedores (radiador a óleo) e lâmpadas distribuídas por toda a instalação, de modo a incluir equipamentos reais utilizados na generalidade das instalações de utilização.

O objetivo é analisar e confirmar os resultados da análise do investimento em lâmpadas eficientes, num lustre alimentado pela saída 2 do quadro parcial 2.

Esta análise tem em consideração a influência de todas as cargas ligadas à instalação e a diminuição das perdas nos condutores afetados pela substituição das lâmpadas iniciais, por outras mais eficientes.

A figura 5.39 apresenta os resultados da nova aplicação computacional para a instalação real apresentada na figura 5.32.

Os resultados compararam uma situação inicial de 3 lâmpadas de 100 W incandescente normal, com 3 lâmpadas de halogéneo de 72 W com investimento de 5€ e outras 3 fluorescentes compactas de 20 W com um investimento de 9 €.

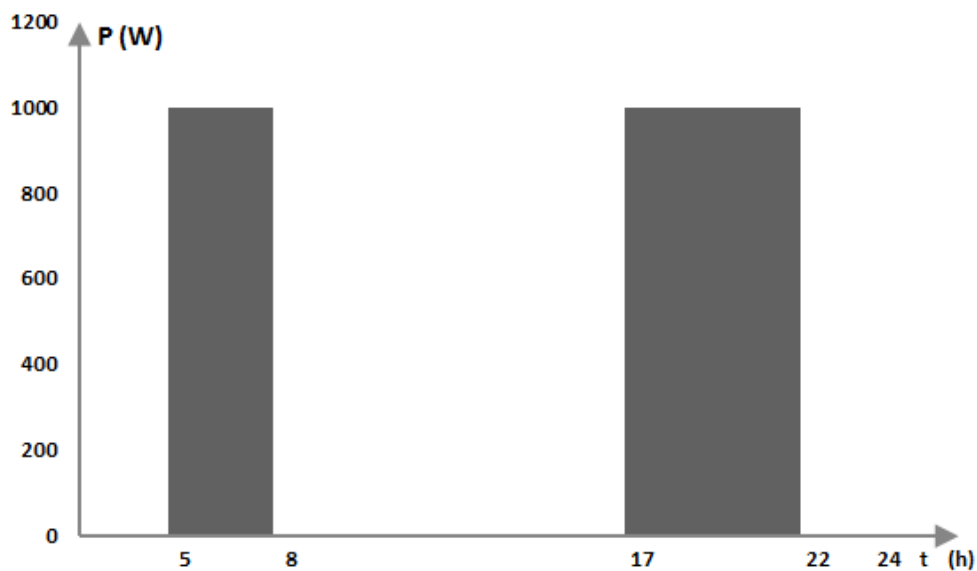


Figura 5.34- Diagrama de carga do aquecedor alimentado pelo quadro 2 na saída 1.

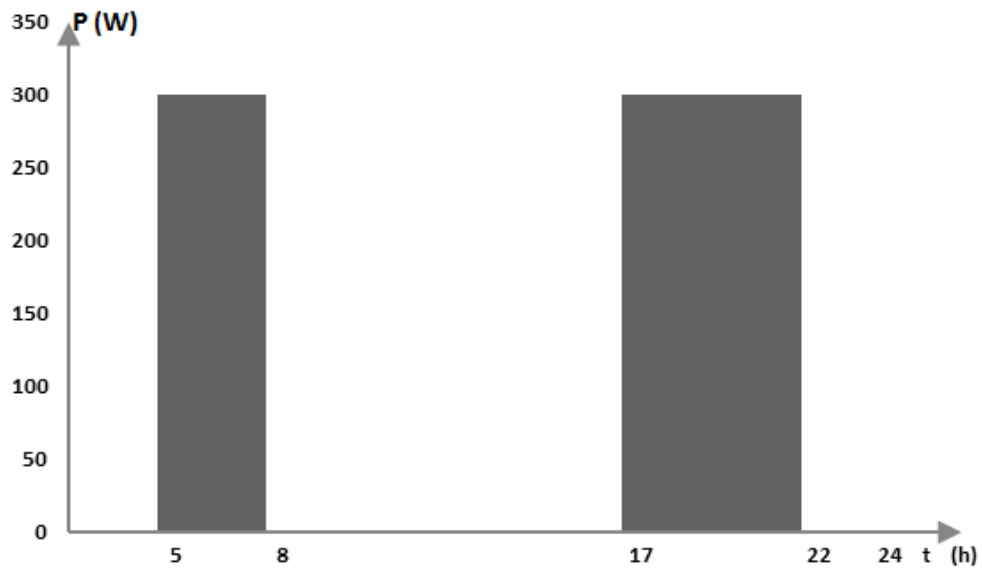


Figura 5.35- Diagrama de carga das lâmpadas alimentadas pelo quadro 2 na saída 2, situação de análise inicial.

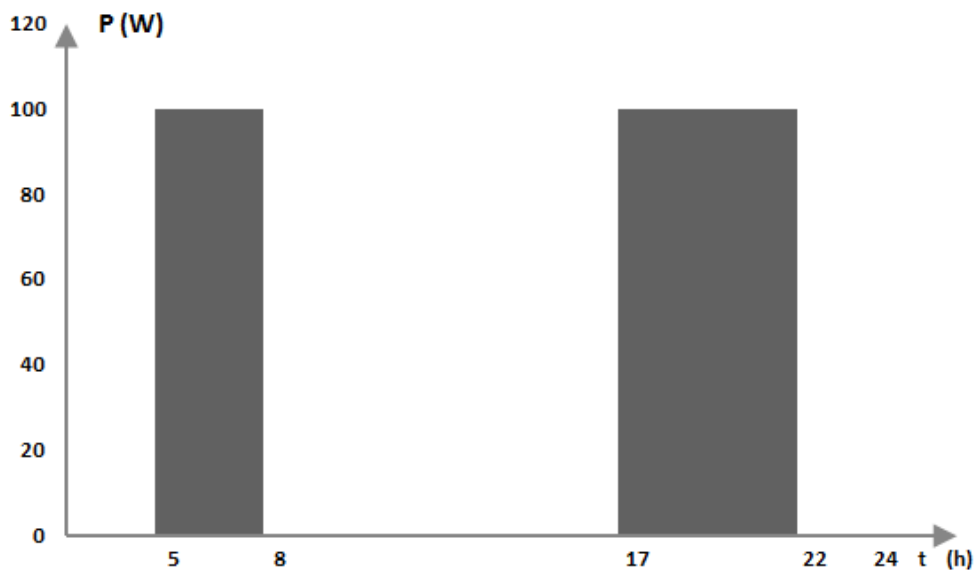


Figura 5.36- Diagrama de carga da lâmpada alimentada pelo quadro 3 na saída 1.

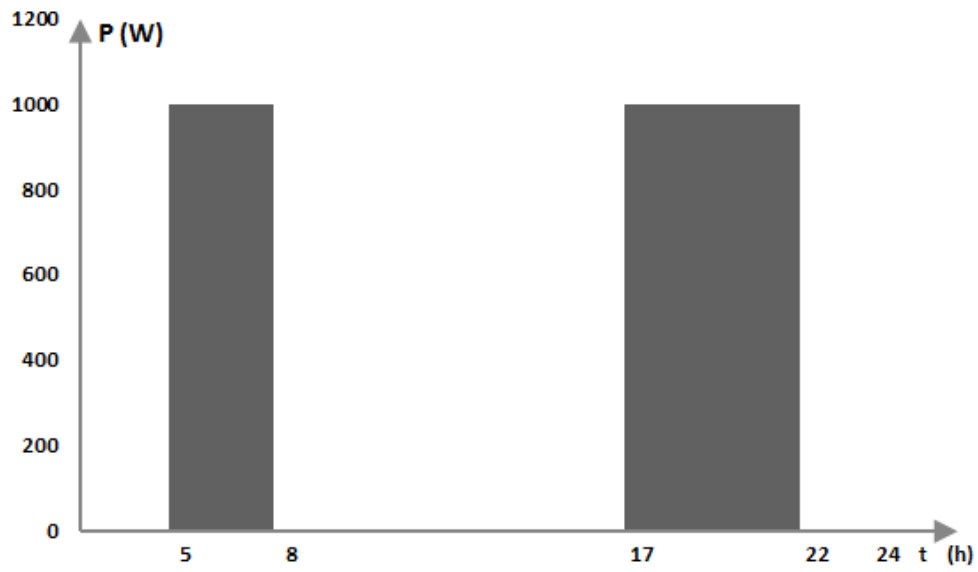


Figura 5.37- Diagrama de carga do motor de indução alimentado pelo quadro 3 na saída 2.

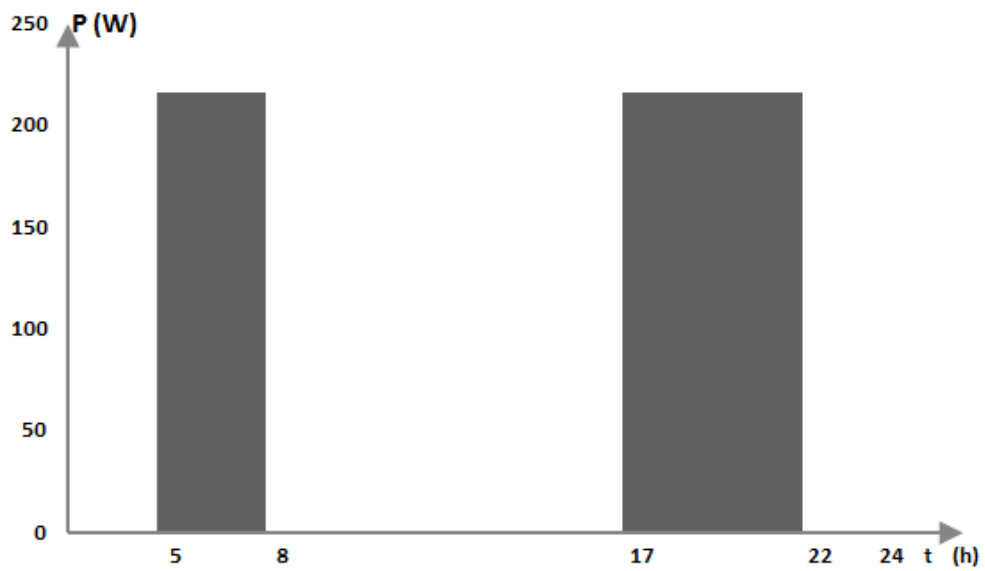


Figura 5.38 a)- Diagrama de carga das lâmpadas de halogénio alimentadas pelo quadro 2 na saída 2, situação de análise no caso da opção 1.

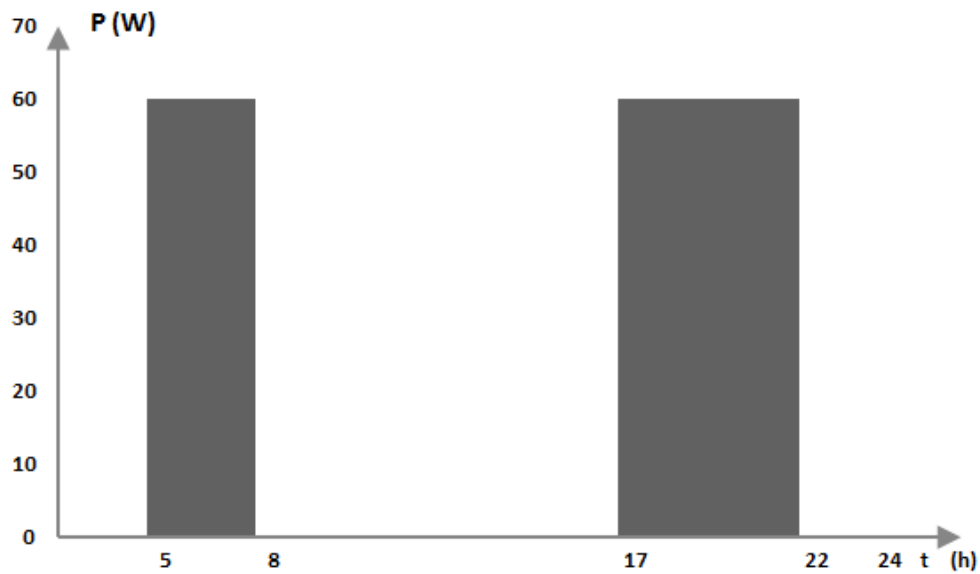


Figura 5.38 b)- Diagrama de carga das lâmpadas de halogénio alimentadas pelo quadro 2 na saída 2, situação de análise no caso da opção 2.

```

CONTRIBUTO DAS PERDAS NOS CABOS NA ESCOLHA
DE EQUIPAMENTOS (EM GERAL) EFICIENTES

RESULTADOS

EQUIPAMENTO INICIAL:
Perdas totais nos cabos por ano: 5.416297 Euros/Ano

RESULTADOS DO EQUIPAMENTO 1 (OP:1):
Perdas totais nos cabos por ano: 4.900713 Euros/Ano
VAL (Valor Atual Líquido - Sem Perdas): 229.223
VAL (Valor Atual Líquido - com Perdas):233.000

RESULTADOS DO EQUIPAMENTO 2 (OP:2):
Perdas totais nos cabos por ano: 4.201117 Euros/Ano
VAL (Valor Atual Líquido - Sem Perdas): 660.209
VAL (Valor Atual Líquido - com Perdas): 669.111

ACONSELHA-SE O INVESTIMENTO NO:
EQUIPAMENTO: 2

Com um VAL (Valor Atual Líquido): 669.111

```

Figura 5.39- Resultados obtidos para o exemplo apresentado na figura 5.32.

Os parâmetros operacionais usados neste exemplo, de modo a permitir a análise da montagem em laboratório, consideram que a instalação e todos os equipamentos são usados diariamente durante todos os meses do ano, totalizando os 365 dias anuais.

O preço da energia elétrica utilizado foi de 0.13 € por kWh, com uma taxa de juro na análise do investimento de 7.5%.

Em laboratório foram realizados ensaios no início e no final dos cabos identificados na figura 5.33 como A e B, para as várias montagens das várias opções em análise.

As figuras 5.40 e 5.41 apresentam as medições feitas no início e no final do cabo B, respetivamente, considerando-se as lâmpadas menos eficientes, situação inicial.

As figuras 5.42 e 5.43 apresentam as medições feitas no início e no fim do cabo B, respetivamente, considerando-se as lâmpadas mais eficientes (opção 2).

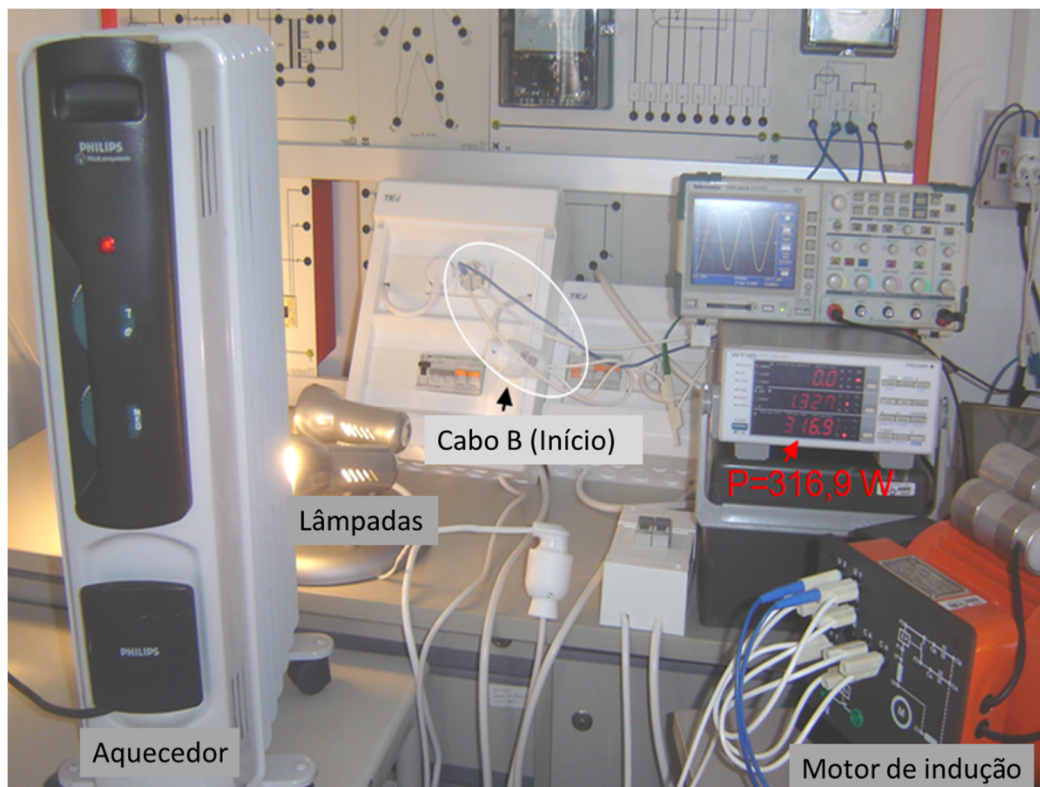


Figura 5.40- Resultados obtidos da medição feita no início do cabo B (situação inicial).

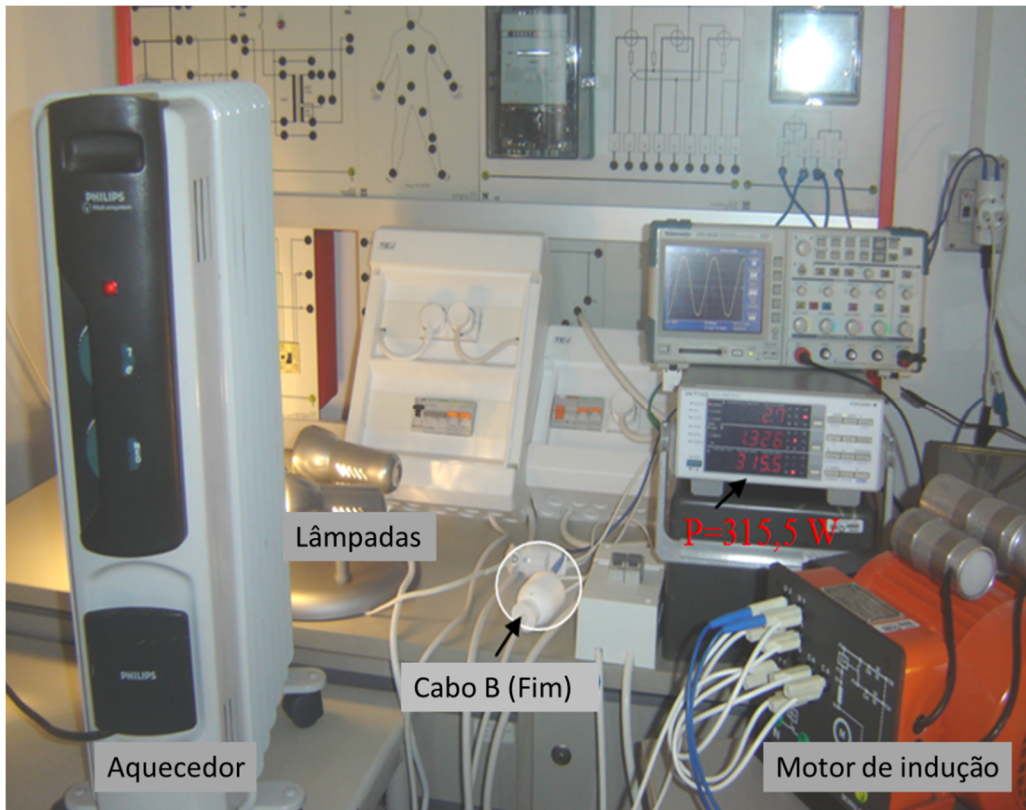


Figura 5.41- Resultados obtidos da medição feita no final do cabo B (situação inicial).

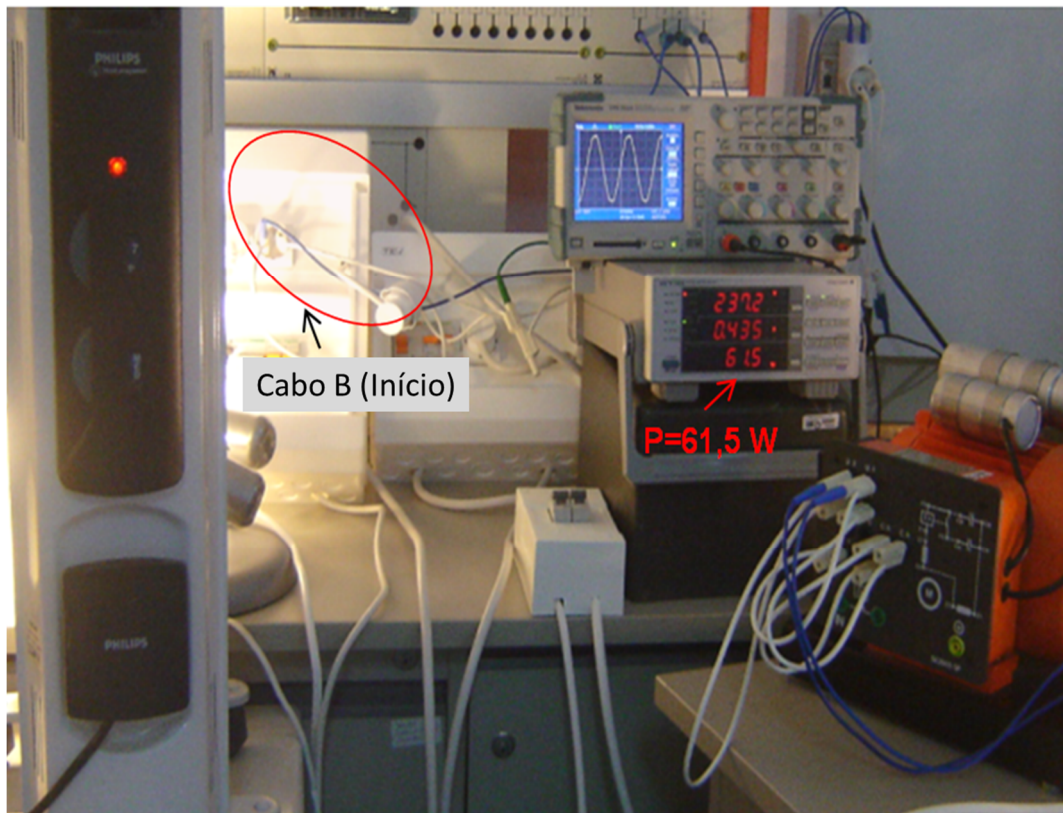


Figura 5.42- Resultados obtidos da medição feita no início do cabo B (opção 2).

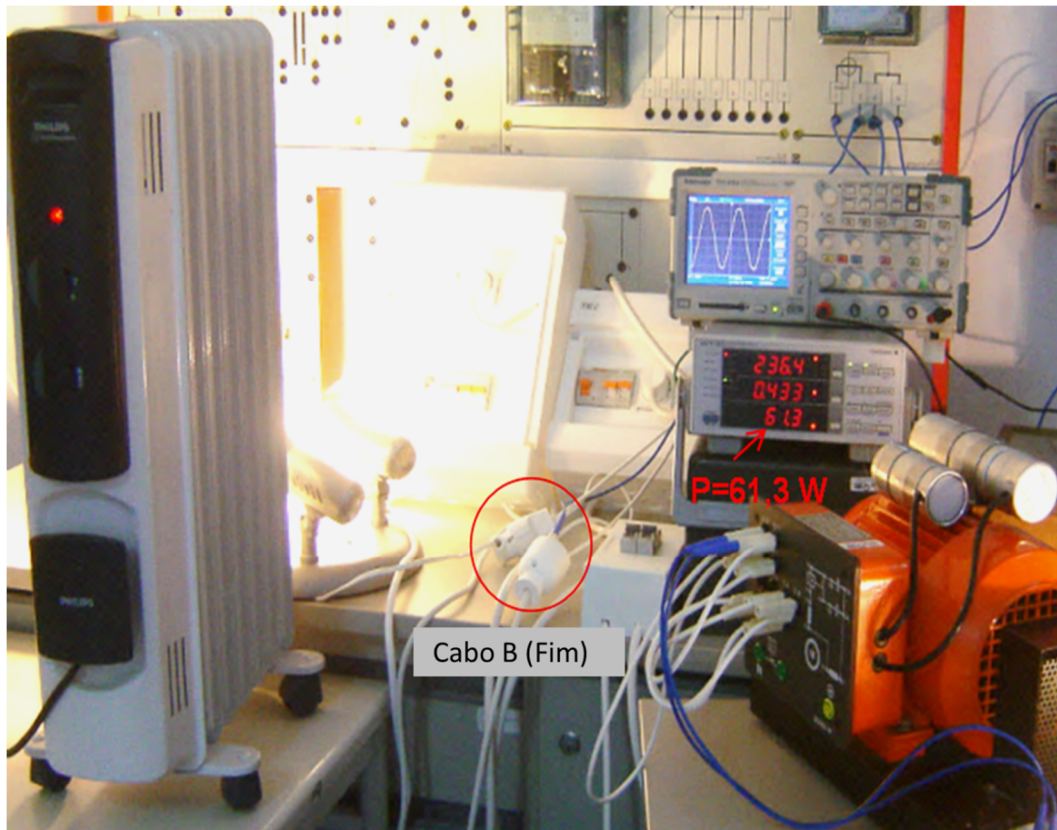


Figura 5.43- Resultados obtidos da medição feita no final do cabo B (opção 2).

As figuras 5.44 e 5.45 apresentam as medições feitas no início e no final do cabo A, respectivamente, considerando-se as lâmpadas menos eficientes, situação inicial.

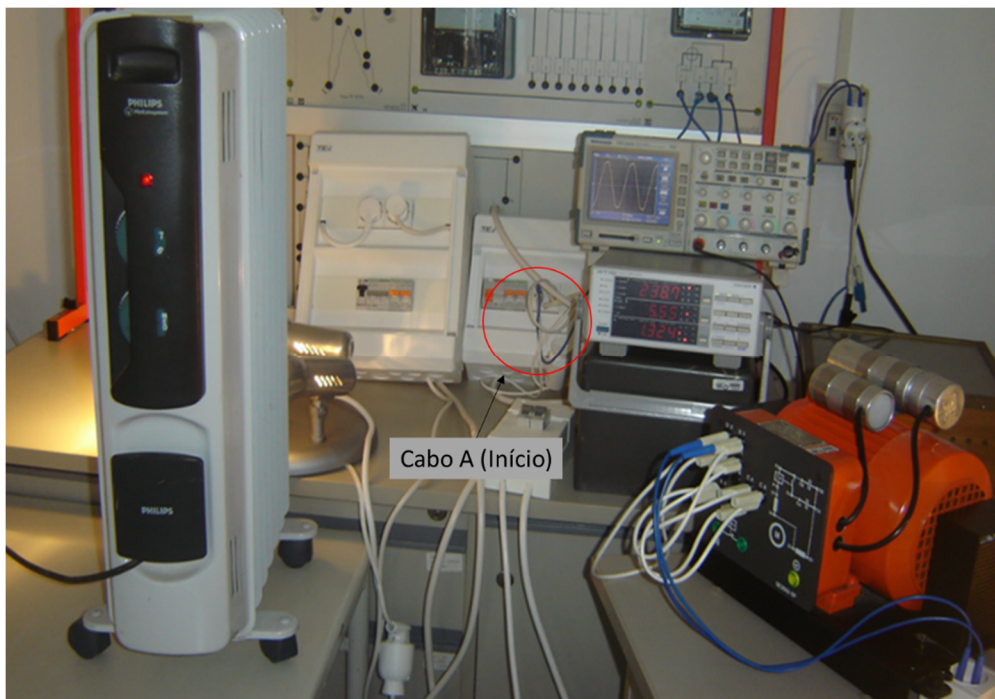


Figura 5.44- Resultados obtidos da medição feita no início do cabo A (situação inicial).

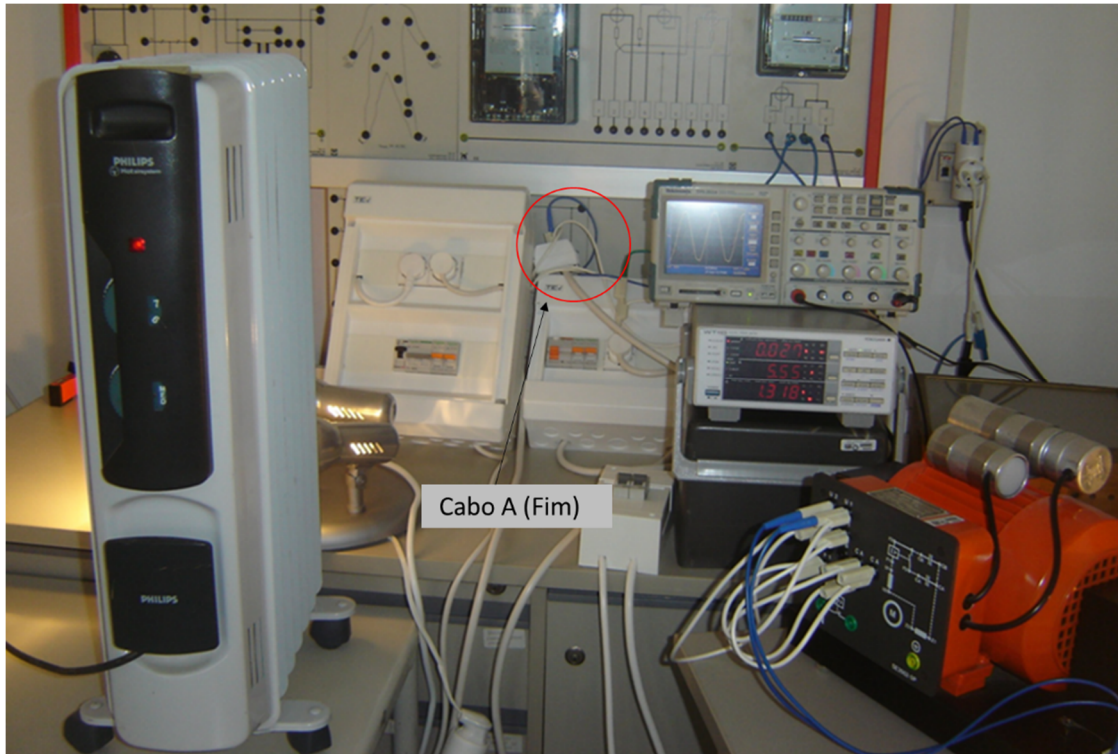


Figura 5.45- Resultados obtidos da medição feita no final do cabo A (situação inicial).

As figuras 5.46 e 5.47 apresentam as medições feitas no início e no fim do cabo A, respetivamente, considerando-se as lâmpadas mais eficientes (opção 2).

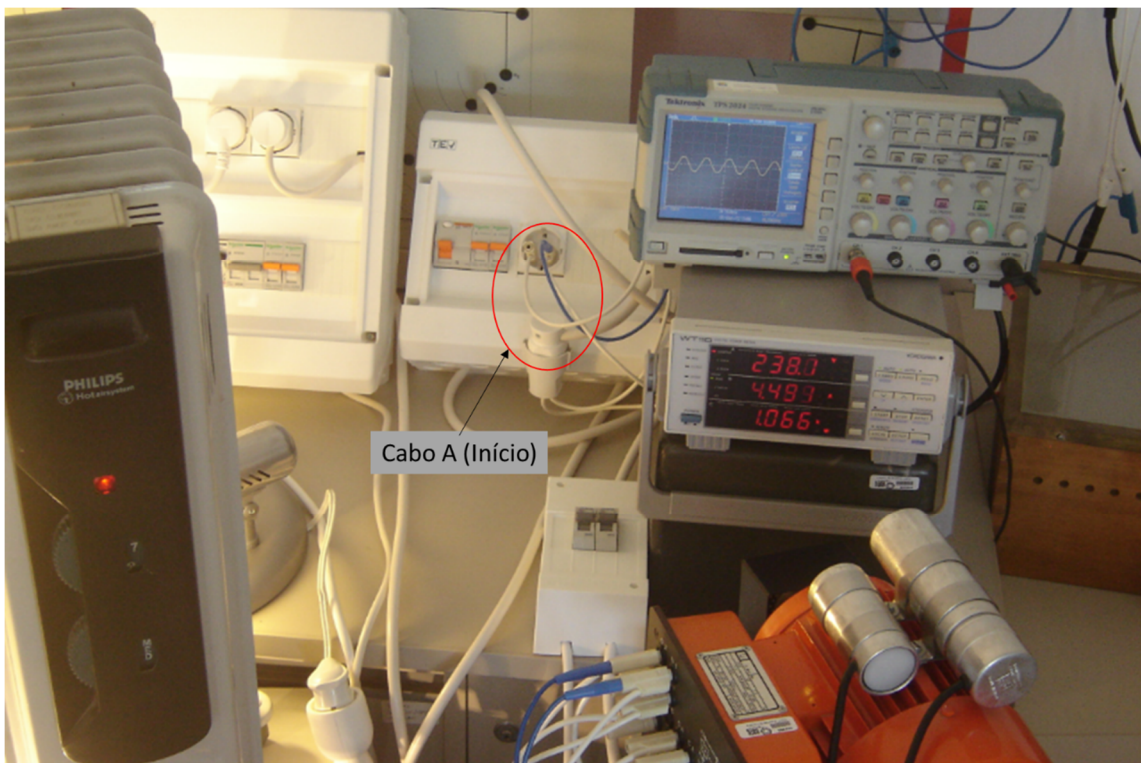


Figura 5.46- Resultados obtidos da medição feita no início do cabo A (opção 2).

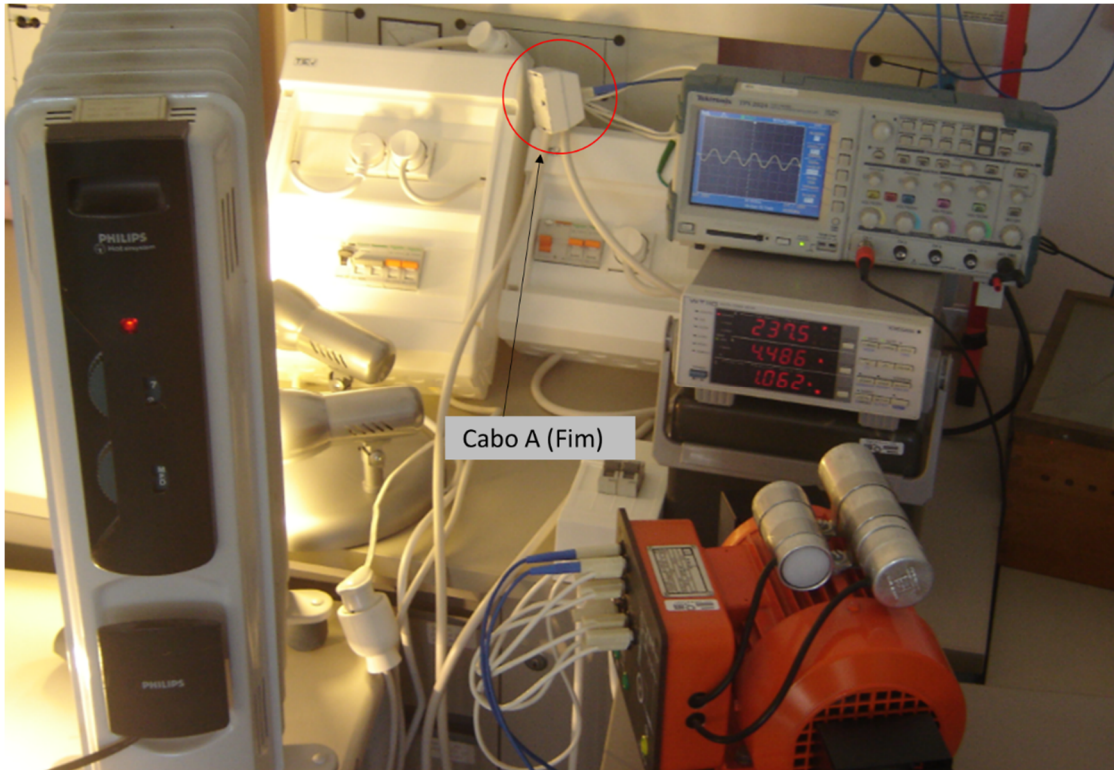


Figura 5.47- Resultados obtidos da medição feita no final do cabo A (opção 2).

Na tabela 5.1 resumem-se os resultados das medidas efetuadas em laboratório.

Tabela 5.1- Resumo dos resultados das medidas efetuadas em laboratório I.

Medida Cabo	Situação Inicial Carga 3x100 W	Opção 2 Carga 3x20 W	Diferença de perdas nos cabos
Perdas no Cabo A	6 W	4 W	2 W
Perdas no Cabo B	1,4 W	0,2 W	1,2 W
Perdas Cabo A + Cabo B	7,4 W	4,2 W	3,2 W

Analisando os resultados, verifica-se pelos valores apresentados na nova aplicação computacional desenvolvida, que é obtido um ganho de 1.2150 € relativamente à diminuição das perdas nos cabos afetados pela substituição da carga de 3x100 W por outra mais eficiente de 3x20 W.

Em termos de resultados experimentais, utilizando as mesmas condições de funcionamento, obtém-se um ganho de 1.2147 € relativamente à diminuição das perdas nos cabos afetados pela substituição da mesma carga de 3x100 W por outra mais eficiente de 3x20 W montada no laboratório, verificando os resultados obtidos pela aplicação computacional.

Este exemplo teve como objetivo validar os resultados obtidos para instalações de utilização domésticas e industriais, comparando os resultados de simulação computacional com os obtidos em laboratório, nas mesmas condições de funcionamento.

Permite ainda confirmar o objetivo principal da tese, o de verificar e demonstrar que as perdas nos cabos podem influenciar na análise de investimentos em equipamentos energeticamente eficientes e sustentáveis, tendo em conta os resultados obtidos e contabilizando, como benefícios, a redução nos cabos da instalação provenientes da diminuição da corrente quando se substitui uma situação inicial, por outra mais eficiente, considerando todo o seu ciclo de vida.

Confirma-se, assim, que as perdas nos cabos podem influenciar a escolha de investimentos em equipamentos energéticos eficientes.

### **5.3.2 - Validação de resultados para instalações de iluminação pública**

Outra área de interesse é, também, a iluminação de espaços exteriores. No projeto de novas instalações de iluminação pública são aconselhadas regras e técnicas norteadas por diretrizes de eficiência energética. No entanto, quer em novas instalações, quer em situação de reconstruções, os projetos desprezam, habitualmente, as perdas nos cabos das instalações. Com este exemplo pretende-se evidenciar os resultados da nova aplicação computacional desenvolvida numa instalação de iluminação da fachada de um edifício. Para isso é utilizada uma possível instalação para uma pequena urbanização como a apresentada na figura 5.48.

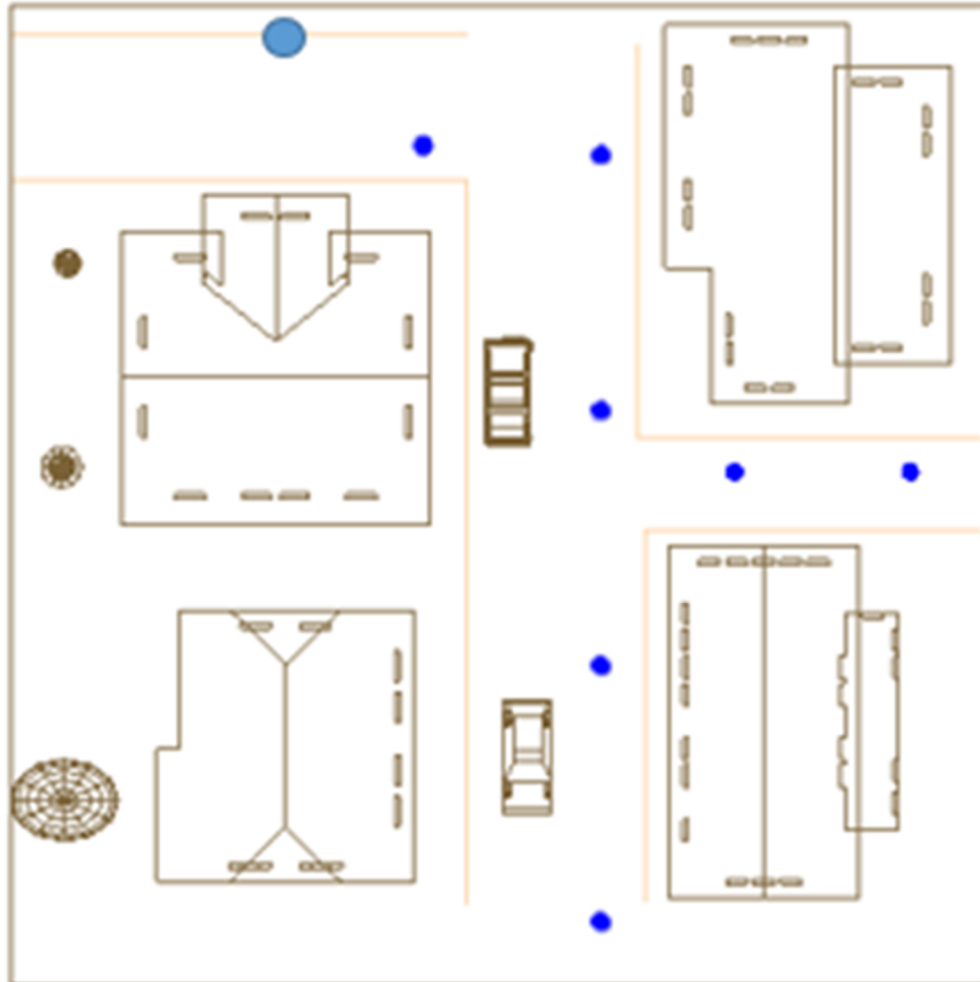


Figura 5.48- Aspeto geral de um bairro usado para iluminação pública e destaque da fachada de um edifício.

Na figura 5.49 é apresentado o esquema geral da possível instalação elétrica a usar nesta situação e na figura 5.50 é apresentado o aspecto geral da montagem efetuada em laboratório com as características da instalação elétrica com equipamento real. O objetivo é verificar e analisar a viabilidade de efetuar um investimento na substituição de um projetor existente no destaque da fachada do edifício, localizado na rua A; o projetor inicial utiliza lâmpadas convencionais de halogéneo e é analisada a possibilidade de troca por outro LED, com uma eficiência superior.

Os parâmetros físicos da instalação são os constantes na figura 5.49.

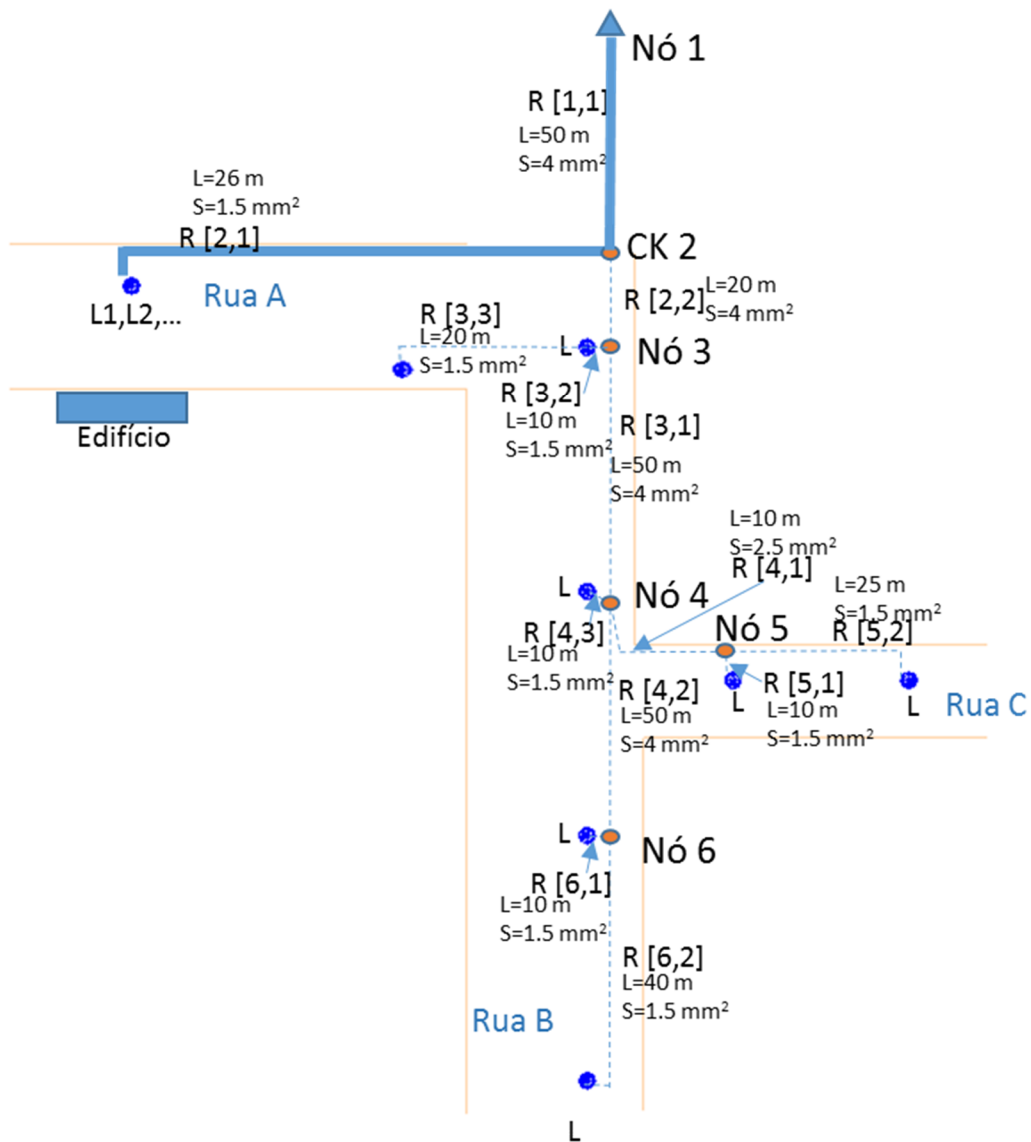


Figura 5.49- Parâmetros físicos da instalação.

Os parâmetros das luminárias são caracterizados pelos diagramas de carga de todas as luminárias ligadas à instalação em todas as ruas, a partir de todos os nós de ligação da instalação, representados pelas figuras 5.51 a 5.53.

A instalação é constituída por condutores principais com respetivos nós de ligação, luminárias iguais em toda a instalação de iluminação e projetor de destaque do edifício da rua A, a ser analisado em termos de perdas provocadas ao longo da instalação; o percurso afetado pela substituição é identificado com traço de maior espessura na figura 5.49.

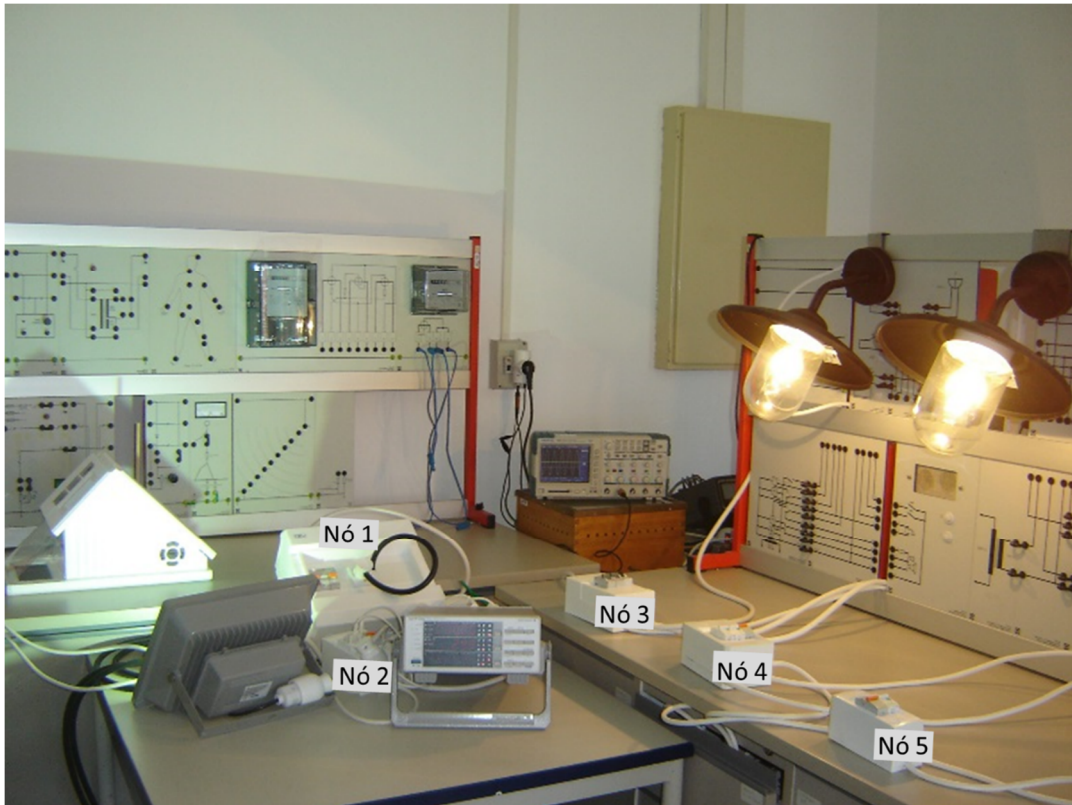


Figura 5.50- Aspeto geral da montagem de laboratório da instalação de iluminação pública.

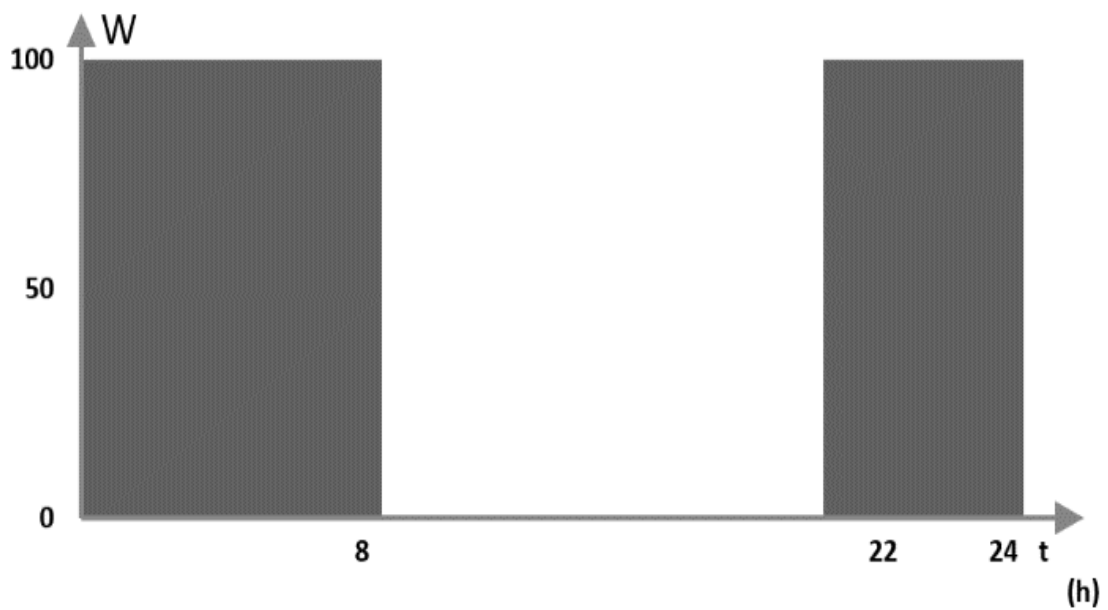


Figura 5.51- Diagrama de carga das luminárias em geral (R[3,2], R[2,3], R[4,3], R[5,1], R[5,2], R[6,1], R[6,2]).

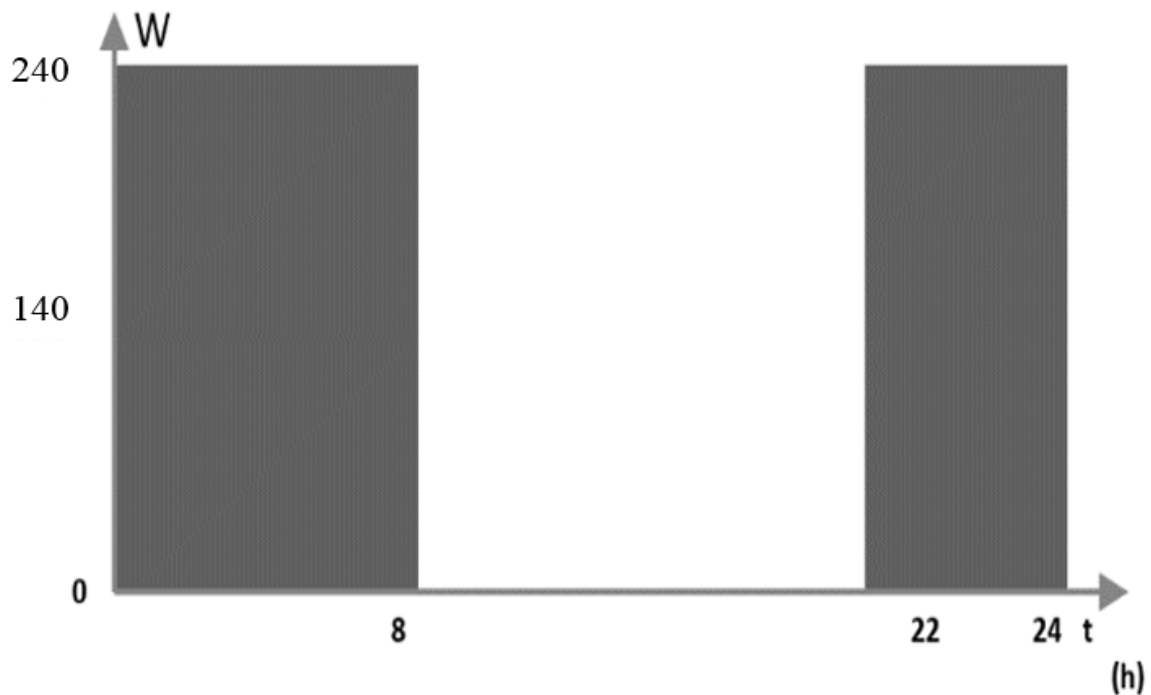


Figura 5.52- Diagrama de carga do projetor inicial (R[2,1]).

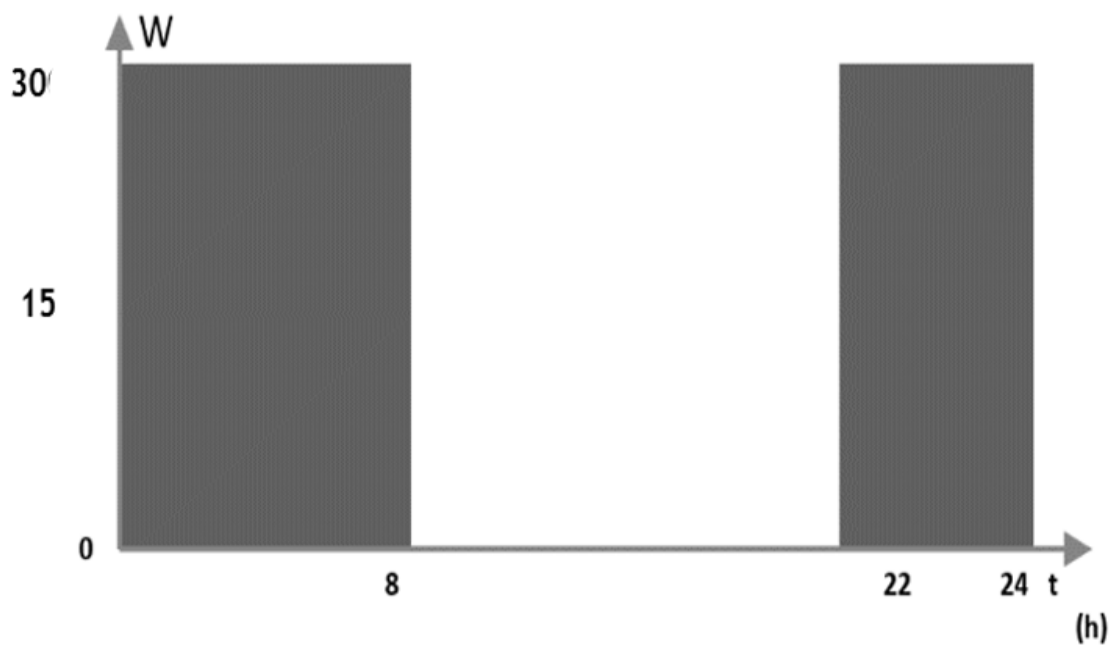


Figura 5.53- Diagrama de carga do projetor LED (R[2,1]).

A figura 5.54 apresenta os resultados da nova aplicação computacional para o sistema da figura 5.49. Os resultados comparam uma situação inicial, com um projetor com lâmpada de halógeno de 240 W no ramo R [2,1] a iluminar o edifício da rua A, com um projetor LED de 30W associado a um investimento 90 €, e ainda outro projetor com lâmpadas compactas fluorescentes de 96 W correspondente a um investimento de 10 €, equivalentes em termos luminotécnicos.

CONTRIBUTO DAS PERDAS NOS CABOS NA ESCOLHA  
DE TECNOLOGIA/EQUIPAMENTOS EM LUMINOTECNIA

RESULTADOS

TECNOLOGIA INICIAL:

Perdas totais nos cabos por ano: 5.915070 Euros/Ano

RESULTADOS DA TECNOLOGIA I (Lamp:1):

Perdas totais nos cabos por ano: 4.240115 Euros/Ano

VAL (Valor Atual Líquido - Sem Perdas): 402.013

VAL (Valor Atual Líquido - com Perdas): 411.824

PAYBACK DO INVESTIMENTO - Sem Perdas): 1.158312 Anos

PAYBACK DO INVESTIMENTO - com Perdas): 1.134711 Anos

RESULTADOS DA TECNOLOGIA II (Lamp:2):

Perdas totais nos cabos por ano: 4.658358 Euros/Ano

VAL (Valor Atual Líquido - Sem Perdas): 292.067

VAL (Valor Atual Líquido - com Perdas): 299.427

PAYBACK DO INVESTIMENTO - Sem Perdas): 0.917672 Anos

PAYBACK DO INVESTIMENTO - com Perdas): 0.897699 Anos

ACONSELHA-SE O INVESTIMENTO:

Lamp:1

Com um VAL (Valor Atual Líquido): 411.824

Figura 5.54- Resultados obtidos para o exemplo apresentado na figura 5.49.

Os parâmetros operacionais usados neste exemplo, de modo a permitir a análise da montagem em laboratório, consideram que a instalação e todos os equipamentos são usados diariamente durante todos os meses do ano, totalizando os 365 dias anuais.

O preço da energia elétrica utilizado foi de 0.10 € por kWh, com uma taxa de juro na análise do investimento de 7.5%.

Em laboratório foram realizados ensaios no início e no final dos cabos identificados na figura 5.49 como R [1,1] e R [2,1], para as várias montagens das várias opções em análise.

Como exemplo, as figuras 5.55 e 5.56 apresentam as medições feitas no início e no final do cabo R [1,1], respectivamente, na situação inicial quando é utilizado o projetor de 240 W, e as figuras 5.57 e 5.58 apresentam as medições feitas no início e no fim do cabo R [1,1], respectivamente, considerando a opção 1 com o projetor LED de 30 W.

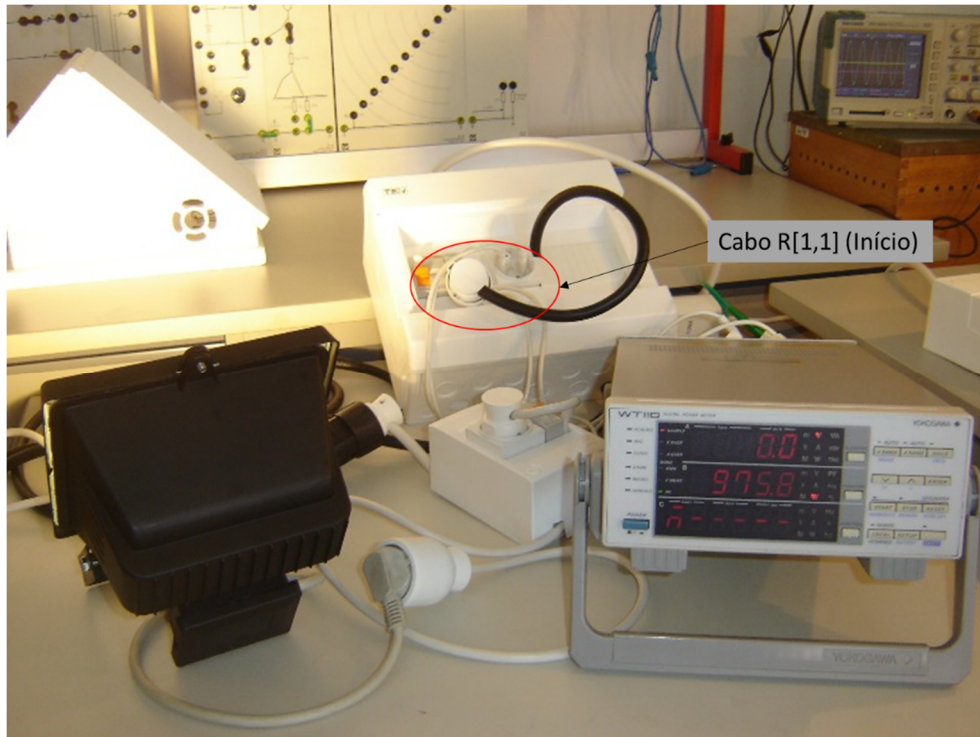


Figura 5.55- Resultados obtidos da medição feita no início do cabo R [1,1] (situação inicial).

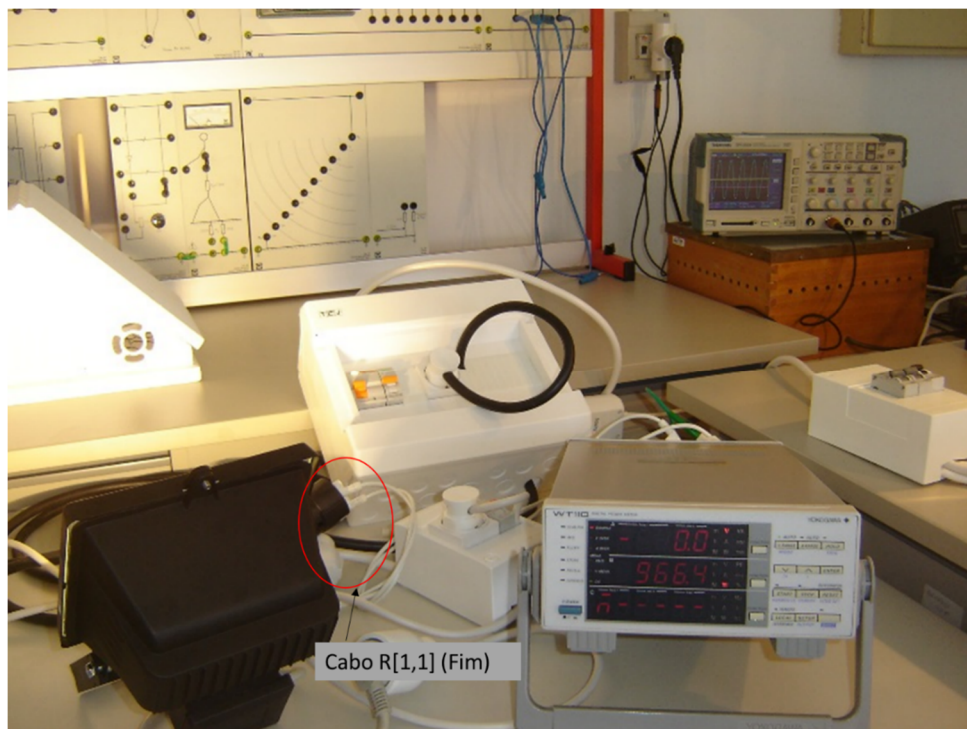


Figura 5.56- Resultados obtidos da medição feita no fim do cabo R [1,1] (situação inicial).

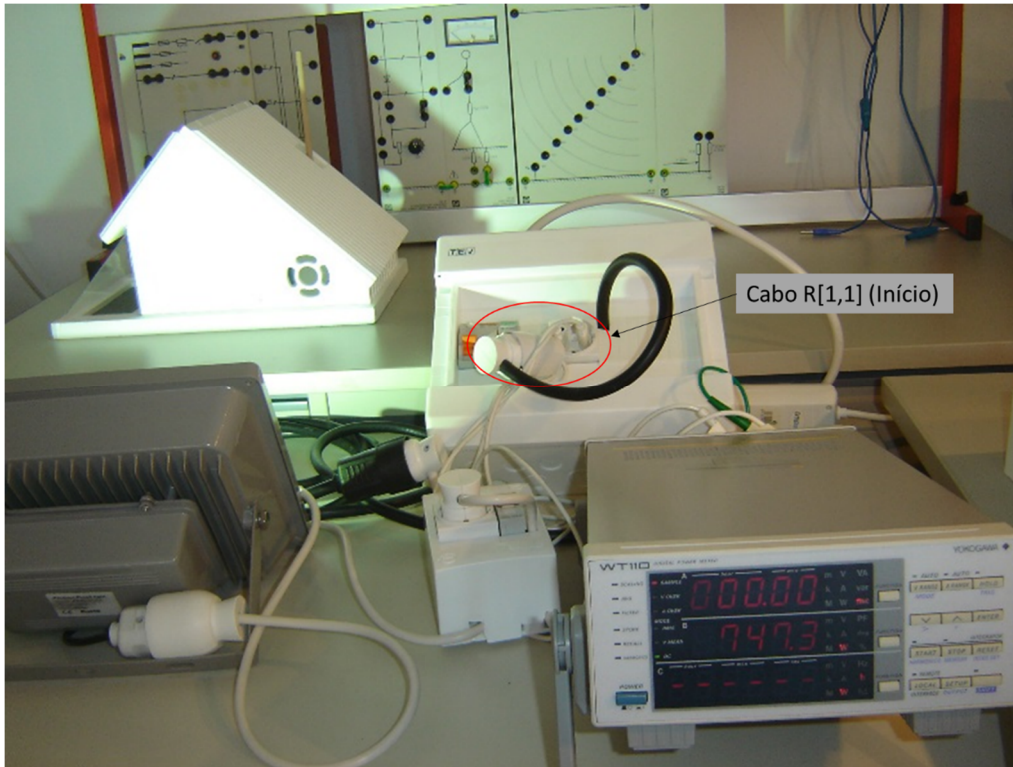


Figura 5.57- Resultados obtidos da medição feita no início do cabo R [1,1] (opção1).

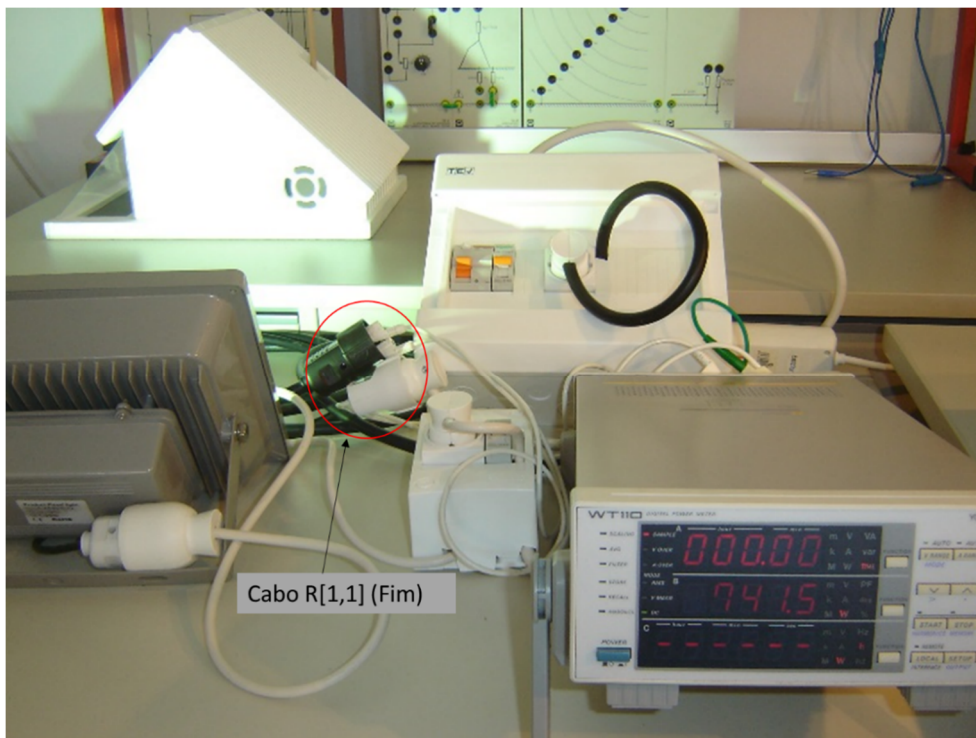


Figura 5.58- Resultados obtidos da medição feita no fim do cabo R [1,1] (opção1).

Na tabela 5.2 resumem-se os resultados das medidas efetuadas em laboratório nos cabos R [1,1] e R [2,1], na situação inicial com um projetor de 240 W e a opção 1 com um projetor de 30 W com um investimento de 90 €.

Tabela 5.2- Resumo dos resultados das medidas efetuadas em laboratório II.

Cabo	Situação Inicial Projetor 240 W	Opção 1 Projetor LED 30 W	Diferença de perdas nos cabos
Perdas no Cabo R [1,1]	9,4 W	5,8 W	3,6 W
Perdas no Cabo R [2,1]	0,6 W	0,03 W	0,57 W
Perdas Cabo R [1,1] + Cabo R [2,1]	10 W	5,83 W	4,17 W

Analisando os resultados, verifica-se pelos valores apresentados na nova aplicação desenvolvida e apresentados na figura 5.54 que é obtido um ganho de 1,6749 € relativamente à diminuição das perdas nos cabos afetados pela substituição do projetor de 240W, usado no destaque da fachada do edifício da rua A, pelo outro LED mais eficiente embora com um fator de potência inferior a um.

Em termos de resultados experimentais, utilizando as mesmas condições de funcionamento, obtém-se um ganho de 1,6742 € relativamente à diminuição das perdas nos cabos afetados pela substituição do mesmo projetor de 240 W pelo LED mais eficiente de 30 W montado e verificado no laboratório, confirmando a análise proposta.

Este exemplo teve como objetivo validar os resultados obtidos para instalações de iluminação exterior, comparando os resultados de simulação computacional com os obtidos em laboratório, nas mesmas condições de funcionamento. Permite, ainda, confirmar o objetivo principal da tese, de verificar e demonstrar que as perdas nos cabos podem influenciar na análise de investimentos em equipamentos energeticamente eficientes e sustentáveis, tendo em consideração os resultados obtidos, contabilizando como benefícios a redução nos cabos da instalação provenientes da diminuição da corrente quando se substitui uma situação inicial por outra mais eficiente, considerando todo o seu ciclo de vida. Confirma-se, assim, que as perdas nos cabos podem influenciar a escolha de investimentos em equipamentos energéticos eficientes.

## 5.4-Conclusão

Neste capítulo foi demonstrada a validade quer em termos de simulação computacional, quer em termos de verificação experimental, da nova aplicação computacional no tratamento das perdas nos condutores de uma instalação de utilização. Verifica-se que a redução das perdas nos cabos da instalação elétrica provocadas pelo equipamento elétrico nos condutores pode influenciar a sua escolha. Estas perdas em instalações elétricas, embora pequenas, não são nulas e podem fazer uma diferença considerável na avaliação económica que apoia a decisão de investimento. Os resultados apresentados confirmam que o VAL é superior quando as perdas são incluídas, podendo passar de negativo a positivo, validando o estudo. A soma de todas as pequenas contribuições serão uma grande ajuda para a redução do consumo global de energia e para a diminuição das emissões de GEE.

## **Capítulo 6**

## **Conclusão**

## 6.1 Contribuições

Neste capítulo são apresentadas as contribuições desta tese, e são indicadas as publicações científicas resultantes: um capítulo de livro, três publicações científicas em revistas e seis comunicações científicas em atas de conferências. Estas publicações científicas foram realizadas no contexto de divulgação e validação do trabalho de investigação realizado. Finalmente, são indicadas direções para futuros desenvolvimentos.

O interesse dos consumidores pelo desenvolvimento de novas aplicações computacionais de apoio à decisão que permitam a escolha eficiente de equipamentos elétricos tem vindo a aumentar, em particular numa altura de crise económica como é a atual. Este interesse surge, por um lado, pelo crescente preço da energia em termos nacionais e internacionais, dada a complexidade dos sistemas e, por outro lado, pelos benefícios económicos resultantes da escolha de equipamentos eficientes, visando a competitividade das empresas e redução da fatura do consumidor em geral.

O trabalho de investigação realizado sobre o tema da contribuição das perdas nos cabos na análise de investimentos em equipamentos elétricos eficientes, conducente à elaboração desta tese, foi norteado pelas seguintes tarefas:

T1- Redução da fatura da energia elétrica para a indústria, municípios e particulares.

T2- Inclusão da redução das perdas de energia nos cabos de uma instalação elétrica, bem como a redução de GEE associados a essa redução, na análise do investimento em equipamentos elétricos eficientes.

T3- Inclusão do efeito do ciclo de vida útil de todos os equipamentos e componentes na escolha de equipamentos eficientes.

As contribuições desta tese são as seguintes:

C1- Desenvolvimento de uma nova aplicação computacional de apoio à decisão para avaliar a contribuição das perdas nos cabos na análise de investimentos em equipamentos elétricos eficientes, capaz de efetuar a análise do investimento e propor a solução mais eficiente.

C2- Método de cálculo da redução das perdas nos troços da instalação elétrica afetada por uma substituição de equipamento elétrico por outro mais eficiente.

C3- Inclusão da redução das perdas de energia nos cabos de uma instalação elétrica de utilização, bem como a redução de GEE associados a essa redução, como mais-valia na análise de investimentos de equipamentos elétricos eficientes.

Nesta tese apresentou-se um dos primeiros estudos realizados, com resultados publicados em revistas internacionais da especialidade, com vista à inclusão da redução das perdas nos condutores de uma instalação de utilização na análise de investimentos em equipamentos elétricos eficientes.

Para o estudo da redução das perdas foi desenvolvido um modelo de caracterização da instalação, cargas associadas e respetivos percursos de cabos de modo a incluir todo o ciclo de vida da instalação.

Finalmente, foi desenvolvida uma aplicação computacional de apoio à decisão, o “NOVA APLICAÇÃO”, avaliando a contribuição das perdas nos cabos na análise de investimentos em equipamentos elétricos eficientes, que permite interagir com o proprietário, investidor ou consumidor, de modo a permitir uma escolha energética e ambientalmente eficiente.

## 6.2 Publicações

Quando se adota um determinado tema de investigação original e cujos trabalhos têm como objetivos principais não só contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico da área escolhida, mas também a obtenção de um determinado grau académico pós-graduado, como é o caso desta tese, é fundamental que à medida que as diferentes tarefas previamente planeadas vão sendo cumpridas, que os respetivos resultados sejam publicados periodicamente com a finalidade de os submeter à apreciação da comunidade científica, bem como de incentivar a discussão e a troca de ideias despontando, usualmente, no aperfeiçoamento daqueles resultados. Em consequência, e de acordo com esta postura, é feita a apresentação da lista de trabalhos publicados, aos quais as contribuições desta tese deram origem.

### 6.2.1. Capítulo de livro

- [1] J.A. Lobão, T. Devezas, J.P.S. Catalão, "Decision support in the investment analysis on efficient and sustainable street lighting", in: *Technological Innovation for Collective Awareness Systems*, L.M. Camarinha-Matos, N.S. Barrento, R. Mendonça (Editors), DoCEIS 2014, IFIP AICT 423, **SPRINGER**, Heidelberg, Germany, pp. 345-352, April 2014.

### 6.2.2. Publicações científicas em revistas

- [1] J.A. Lobão, T. Devezas, J.P.S. Catalão, "A redução das perdas em equipamentos e instalações elétricas como medida de redução da fatura de energia", *Revista Egitania Scientia*, pp. 175-186, Vol. 13, Junho/Novembro de 2013.
- [2] J.A. Lobão, T. Devezas, J.P.S. Catalão, "Influence of cable losses on the economic analysis of efficient and sustainable electrical equipment", *Energy (ELSEVIER)*, Vol. 65, pp. 145-151, February 2014 – *Indexado às bases de dados ISI Web of Science e SCOPUS*. Nota: Revista tipo 'A' do IST, IF: 4.159 (Q1), 5-Y\_IF: 4.465, SJR: 1.847 (Q1), SNIP: 2.197.
- [3] J.A. Lobão, T. Devezas, J.P.S. Catalão, "Reduction of greenhouse gas emissions resulting from decreased losses in the conductors of an electrical installation", *Energy Conversion and Management (ELSEVIER)*, Vol. 87, pp. 787-795, November 2014 – *A indexar às bases de dados ISI Web of Science e SCOPUS*. Nota: Revista tipo 'A' do IST, IF: 3.590 (Q1), 5-Y\_IF: 3.604, SJR: 1.631 (Q1), SNIP: 2.199.

### 6.2.3. Comunicações científicas em atas de conferências

- [1] J.A. Lobão, T. Devezas, J.P.S. Catalão, "Decision support in the investment analysis on efficient and sustainable electrical equipment", in: *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality – ICREPQ'12*, Santiago de Compostela, Spain, CD-R, 28-30 March, 2012.

- [2] J.A. Lobão, T. Devezas, J.P.S. Catalão, "Reduction of losses in the conductors of a pump installation as a technique for managing energy consumption", in: *Proceedings of the 1st International Congress on Water, Waste and Energy Management – EWWM 2012*, Salamanca, Spain, pp. 128 and CD-R, 23-25 May, 2012.
- [3] J.A. Lobão, T. Devezas, J.P.S. Catalão, "Influence of conductors losses in consumer's installations on the selection of efficient electrical equipment", in: *Proceedings of the 13th Spanish Portuguese Conference on Electrical Engineering – 13CHLIE*, Valencia, Spain, CD-R, 3-5 July, 2013.
- [4] J.A. Lobão, T. Devezas, J.P.S. Catalão, "Experimental validation of the influence of cable losses in the economic analysis of electrical equipment", in: *Proceedings of the 48th International Universities' Power Engineering Conference – UPEC 2013* (technically co-sponsored by IEEE), Dublin, Ireland, USB flash drive, 2-5 September, 2013 – *Indexado às bases de dados ISI Web of Science e SCOPUS*.
- [5] J.A. Lobão, T. Devezas, J.P.S. Catalão, "Influence of conductors losses in the economic analysis of efficient interior lighting", in: *Proceedings of the International Conference on Engineering UBI 2013 – ICEUBI 2013*, Covilhã, Portugal, CD-R, November 27-29, 2013.
- [6] J.A. Lobão, T. Devezas, J.P.S. Catalão, "Reduction of losses in the conductors of a sustainable street lighting as a technique for managing energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions", in: *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality – ICREPQ'14*, Cordoba, Spain, CD-R, 8-10 April, 2014.

## 6.3 Direções de investigação

É possível estabelecer um conjunto de direções de investigação, quer no âmbito desta tese visto que a mesma não esgota os assuntos nela abordados, quer no que concerne a novas perspetivas que a própria tese deixa antever para futura investigação.

Assim, salientam-se as seguintes direções de investigação:

D1- Tendo em consideração que o objetivo foi o desenvolvimento de uma nova aplicação computacional de análise das perdas, um interface gráfico mais *user-friendly* pode ser acrescentado numa fase posterior.

D2- A interligação com uma base de dados de características de equipamento de vários fornecedores com o objetivo de efetuar pesquisa automática e recolha de diagramas de carga nos pontos da instalação a analisar, permitiria um leque mais alargado de soluções eficientes.

D3- Estudar estratégias integradas entre produtores e consumidores de modo a possibilitar a determinação e a classificação da eficiência energética de uma instalação de utilização, permitindo assim o aumento da eficiência global na utilização de energia.

**Referências  
Bibliográficas**

- [Abu-Mouti11] Abu-Mouti FS, El-Hawary ME. Heuristic curve-fitted technique for distributed generation optimization in radial distribution feeder systems. *IET Generation, Transmission and Distribution* 2011;5:172-180.
- [ADENE14] ADENE- SGCIE - Relatório Síntese fevereiro 2014.
- [Almeida11] Almeida AT, Ferreira FJTE, Fong JAC. Standards for efficiency of electric motors. *IEEE Industry Applications Magazine* 2011; 17:12-19.
- [Aman13] Aman MM, Jasmon GB, Mokhlis H, Bakar AHA. Analysis of the performance of domestic lighting lamps. *Energy Policy* 2013; 52:482-500.
- [Atwa10] Atwa YM, El-Saadany EF, Salama MMA, Seethapathy R. Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization. *IEEE Transactions on Power Systems* 2010;25:360-370.
- [Barbosa13a] Barbosa, F.P.M., Estabilidade de Sistemas Elétricos de Energia, Textos Didáticos de Apoio, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2013.
- [Barbosa13b] Barbosa, F.P.M., Análise da Fiabilidade da Rede de Transporte e Distribuição, Textos Didáticos de Apoio, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2013.
- [Bayat Akbar13] Bayat Akbar. Uniform voltage distribution based constructive algorithm for optimal reconfiguration of electric distribution networks. *Electric Power Systems Research* 2013;104:146-155.
- [BP14] *BP. Energy Outlook 2035; 2014*

- [Burgos-Payan12] Burgos-Payan, M. ; Correa-Moreno, F. ; Riquelme-Santos, J. Improving the energy efficiency of street lighting. A case in the South of Spain. European Energy Market (EEM), 2012 9th International Conference on the.
- [CE13] Comissão Europeia. Desafios e políticas no domínio da energia - Contribuição da Comissão para o Conselho Europeu de 22 de maio de 2013.
- [Cee03] Manual de análise de custos e benefícios dos projetos de investimento. Indicadores de desempenho dos projetos Unidade responsável pela avaliação DG Política Regional Comissão Europeia, Studio Gatelli.
- [CEN03] CEN Publication EN 13201. Road lighting. 2003.
- [Chun13] Chun Chun Ni. Potential energy savings and reduction of CO<sub>2</sub> emissions through higher efficiency standards for polyphase electric motors in Japan. Energy Policy 2013, 52,,: 737-747
- [CIEn°115] CIE Publication No. 115. Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic.
- [Cook61] Cook RF. Optimizing the application of shunt capacitors for loads in certain areas reactive-volt-ampere control and loss reduction. AIEE Transactions 1961; PAS-80:430-44.
- [D. Devaraj11] M. Thirugnanasambandam, M. Hasanuzzaman, R. Saidur , M.B. Ali, S. Rajakarunakaran, D. Devaraj, N.A. Rahim. Analysis of electrical motors load factors and energy savings in an Indian cement industry. Energy Volume 2011, 36:4307-4314
- [DGEG11] DGEG. Eficiência Energética na Iluminação Pública Documento de Referência 2011.
- [DGEG14] [www.dgeg.pt](http://www.dgeg.pt), consultado em Maio 2014

- [Dones04] Dones R, Heck T, Hirschberg S. Greenhouse gas emissions from energy systems, comparison and overview. *Energy*, 2004; 3: 77-95.
- [Duran68] Duran H. Optimum number, location, and size of shunt capacitors in radial distribution feeders—a dynamic programming approach. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1968; 87 :1769-74.
- [Dusko08] Dusko Radulovic, Srdjan Skok, Vedran Kirincic. Energy efficiency public lighting management in the cities. *Energy*, 36 (2011) 1908-1915.
- [EIA13] EIA. *International Energy Outlook 2013*; 2013
- [Eurostat13] Eurostat- *Energy, transport and environment indicators 2013*
- [Farahani13] Farahani Vahid, Sadeghi Seyed Hossein Hesamedin, Abyaneh Hossein Askarian, Agah Seyed Mohammad Mousavi. Energy loss reduction by conductor replacement and capacitor placement in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems* 2013;28:2077-2085.
- [Franco13] Franco JF, Rider MJ, Lavorato M, Romero R. A mixed-integer LP model for the optimal allocation of voltage regulators and capacitors in radial distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2013; 48:123-130.
- [Fritz12] Fritz, W.L.O.: *Smart grid - the next frontier*, ICUE 2012, South Africa (2012).
- [Grainger81] Grainger JJ, Lee SH. Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses on distribution feeders. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems* 1981;100:1105-1118.

- [Grainger82] Grainger JJ, Civanlar S, Lee SH. Optimal design and control scheme for continuous capacitive compensation of distribution feeders. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1983; 102:3271-3278.
- [Graus11] Graus W, Worrel E. Methods for calculating CO<sub>2</sub> intensity of power generation and consumption: a global perspective. Energy Policy 2011;39:613-627.
- [H. Barros08] H. Barros. Análise de projetos de investimentos. Edição Silabo, Lisboa, 2008.
- [Hamouda10] Hamouda A, Lakehal N, Zehar K. Heuristic method for reactive energy management in distribution feeders. Energy Conversion and Management 2010; 51:518-523.
- [Han10] Han HJ, Jeon YI, Lim SH, Kim WW, Chen K. New developments in illumination, heating and cooling technologies for energy-efficient buildings. Energy 2010; 35:2647-2653.
- [Hedayati08] Hedayati H, Nabaviniak SA, Akbarimajd A. A method for placement of DG units in distribution networks. IEEE Transactions on Power Delivery 2008;23:2673-2681.
- [Henrique10] Henrique Jorge de Jesus Ribeiro da Silva, António Augusto Araújo Gomes. Quedas de Tensão em Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Neutro à terra 2010;6;5-16. ISSN: 1647-5496
- [Hondo05] Hondo H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. Energy 2005;30:2042-2056.
- [Hung13] Hung DQ, Mithulananthan N, Bansal RC. Multiple distributed generators placement in primary distribution networks for loss reduction. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2013;60:1700-1708.
- [IEA13] IEA. WORLD ENERGY OUTLOOK 2013; 2013

- [Jiang96] Jiang Dan, Baldick R. Optimal electric distribution system switch reconfiguration and capacitor control. *IEEE Transactions on Power Systems* 1996;11 :890-897.
- [Jones08] Jones H. Superconductors in the transmission of electricity and networks. *Energy Policy* 2008; 36:4342-4345.
- [Karnouskos07] Karnouskos, S., Terzidis, O.: Towards an information infrastructure for the future Internet of energy, ITG-GI Conference, Germany (2007).
- [Keane05] Keane A, Malley MO. Optimal allocation of embedded generation on distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems* 2005;20:1640-1646.
- [Kopytko11] N. Kopytko, J. Perkins. Climate change, nuclear power, and the adaptation-mitigation dilemma. *Energy Policy*, 2011; 39: 318-333.
- [Kumar10] Kumar A, Gao W. Optimal distributed generation location using mixed integer non-linear programming in hybrid electricity markets. *IET Generation, Transmission and Distribution* 2010;4:281-298.
- [Lehner05] A.B. Lehner, G. Czisch, S. Vassolo. The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis. *Energy Policy*, 2005; 33: 839-855.
- [Lobão14a] J.A. Lobão, T. Devezas, J.P.S. Catalão. Influence of cable losses on the economic analysis of efficient and sustainable electrical equipment. *Energy (ELSEVIER)*, Vol. 65, pp. 145-151, February 2014.
- [Lobão14b] J.A. Lobão, T. Devezas, J.P.S. Catalão, "Reduction of greenhouse gas emissions resulting from decreased losses in the conductors of an electrical installation" *Energy Conversion & Management*, aceite, 2014.
- [Lucena09] A.F.P. Lucena, A.S. Szklo, R. Schaeffer. Renewable energy in an unpredictable and changing climate. *Modern Energy Review*, 2009; 1: 22-25

- [M.Hasanuzzaman11] M. Hasanuzzaman, N.A. Rahim, R. Saidur, S.N. Kazi. Energy savings and emissions reductions for rewinding and replacement of industrial motor. *Energy* 2011,36:233-240
- [Mahlia11] T.M.I. Mahlia, H. Abdul Razak, M.A. Nursahida. Life cycle cost analysis and payback period of lighting retrofit at the University of Malaya. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 15 (2011) 1125-1132.
- [Malekpour11] Malekpour AR, Niknam T. A probabilistic multi-objective daily Volt/Var control at distribution networks including renewable energy sources. *Energy* 2011; 36:3477-3488.
- [Manuel13] Manuel Jesús Hermoso Orzáez, José Ramón de Andrés Díaz. Comparative study of energy-efficiency and conservation systems for ceramic metal-halide discharge lamps. *Energy*; 52 (2013) 258-264.
- [Medjoudj13] Medjoudj R, Aissani D, Haim KD. Power customer satisfaction and profitability analysis using multi-criteria decision making methods. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2013; 45:331-339.
- [Méndez02] Méndez VH, Rivier J, de la Fuente JI, Gómez T, Arceluz J, Marín J. Impact of distributed generation on distribution losses. In: *Proceedings of med power: Athens, Greece; 2002.*
- [Merlin75] Merlin A, Bach A. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in na urban power distribution system. In: *Proceedings of power system computation conference (PSCC); 1975.*
- [Miomir09] Miomir Kostic, Lidija Djokic, Dejan Pojatar, Natasa Strbac-Hadzibegovic. Technical and economic analysis of road lighting solutions based on mesopic vision. *Building and Environment*; 44 (2009) 66-75.
- [Mockey13] I.O. Mockey Coureaux, E. Manzano. The energy impact of luminaire depreciation on urban lighting. *Energy for Sustainable Development*; 17 (2013) 357-362.

- [Moreira11] J. C. Moreira, E. Míguez, C. Vilachá, and Antonio F. Otero. Large-Scale Network Layout Optimization for Radial Distribution Networks by Parallel Computing. *IEEE transactions on power delivery*; 26 (2011) 1946-1951.
- [Niknam12] Niknam Taher, Azadfersani Ehsan, Jabbari Masoud. A new hybrid evolutionary algorithm based on new fuzzy adaptive PSO and NM algorithms for Distribution Feeder Reconfiguration. *Energy Conversion and Management* 2012;54:7-16.
- [Ozyon12] Ozyon S, Temurtaş H, Durmuş B, Kuvat G. Charged system search algorithm for emission constrained economic power dispatch problem. *Energy* 2012; 46:420-430.
- [Parise97] Parise, G. ; Martirano, L. ; Cecchini, G. Design and Energetic Analysis of an Advanced Control Upgrading Existing Lighting Systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on*; 99 (1997) Digital Object Identifier: 10.1109/TIA.2013.2272752.
- [Pehnt06] Pehnt M. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy* 2006;32:55-71.
- [Philippe Menanteau00] Philippe Menanteau, Hervé Lefebvre. Competing technologies and the diffusion of innovations: the emergence of energy-efficient lamps in the residential sector. *Research Policy* 2000, 29:375-389
- [Pirouti13] Pirouti M, Bagdanavicius A, Ekanayake J, Wu J, Jenkins N. Energy consumption and economic analyses of a district heating network. *Energy* 2013; in press.
- [Ponnaivaikko83] Ponnaivaikko M, Prakasa Rao KR. Optimal choice of fixed and switched shunt capacitors on radial distributors by the method of local variations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1983;102:1607-1615.
- [Pryor10] S.C. Pryor, R.J. Barthelmie. Climate change impacts on wind energy: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010; 14: 430-437.

- [Queiroz09] Queiroz LMO, Lyra C. Adaptive hybrid genetic algorithm for technical loss reduction in distribution networks under variable demands. IEEE Transactions on Power Systems 2009;24:445-453.
- [R. Saidur10a] R. Saidur, T.M.I. Mahlia. Energy, economic and environmental benefits of using high-efficiency motors to replace standard motors for the Malaysian industries. Energy Policy, 2010, Volume 38: 4617-4625
- [R. Saidur10b] R. Saidur. A review on electrical motors energy use and energy savings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, Volume 14:877-898
- [Rao RS11] Rao RS, Narasimham SVL, Raju MR, Rao AS Optimal network reconfiguration of large-scale distribution system using harmony search algorithm. IEEE Transactions on Power Systems 2011;26:1080-1088.
- [Rau94] Rau NS,Wan YH. Optimum location of resources in distributed planning. IEEE Transactions on Power Systems 1994;9:2014-2020.
- [REN14] [www.ren.pt](http://www.ren.pt), consultado em Maio 2014.
- [Roberto12] Roberto Schaeffer, Alexandre Salem Szklo, André Frossard Pereira de Lucena, Bruno Soares Moreira Cesar Borba, Larissa Pinheiro Pupo Nogueira, Fernanda Pereira Fleming, Alberto Troccoli, Mike Harrison, Mohammed Sadeck Boulahya. Energy sector vulnerability to climate change: A review. Energy 2012;38:1-12.
- [Sadhan09] Sadhan Mahapatra, H.N. Chanakya, S. Dasappa. Evaluation of various energy devices for domestic lighting in India: Technology, economics and CO<sub>2</sub> emissions. Energy for Sustainable Development; 13 (2009) 271-279.

- [Sampo12] Sampo Soimakallio , Laura Saikku . CO<sub>2</sub> emissions attributed to annual average electricity consumption in OECD (the Organisation for Economic Co-operation and Development) countries. Energy 2012; 38;13-20.
- [Shilpa14] Shilpa Kalambe n, GangaAgnihotri. Loss minimization techniques used in distribution network: bibliographical survey. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014;29:184-200.
- [Shirmohammadi89] Shirmohammadi D, Hong HW. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive losses reduction. IEEE Transactions on Power Delivery 1989;4:1392-1488.
- [Siddiqui12] Siddiqui, A.A. ; Ahmad, A.W. ; Hee Kwon Yang ; Chankil Lee. ZigBee based energy efficient outdoor lighting control system. Advanced Communication Technology (ICACT), 2012 14th International Conference on Publication Year: 2012 , Page(s): 916 - 919
- [Silva13] Silva MAC, Klein CE, Mariani VC, Coelho LS. Multiobjective scatter search approach with new combination scheme applied to solve environmental/economic dispatch problem. Energy 2013; in press.
- [Sola11] Sola AVH, Mota CMM, Kovaleski JL. A model for improving energy efficiency in industrial motor system using multicriteria analysis. Energy Policy 2011; 39:3645-3654.
- [Souza04] Souza BA, Alves HdN, Ferreira HA Microgenetic algorithms and fuzzy logic applied to the optimal placement of capacitor banks in distribution networks. IEEE Transactions on Power Systems 2004;19 :942-947.
- [Spang08] Spang M, Albach M. Optimized winding layout for minimized proximity losses in coils with rod cores. IEEE Transactions on Magnetics 2008; 44:1815-1821.

- [Spang08] Spang M, Albach M. Optimized winding layout for minimized proximity losses in coils with rod cores. *IEEE Transactions on Magnetics* 2008; 44:1815-1821.
- [Sperber12] Allison N. Sperber, Andrew Curtis Elmore, Mariesa L. Crow, Jeffrey D. Performance evaluation of energy efficient lighting associated with renewable energy applications. *Renewable Energy*; 44 (2012) 423-430.
- [T.M.I. Mahlia11] T.M.I. Mahlia, H. Abdul Razak, M.A. Nursahida. Life cycle cost analysis and payback period of lighting retrofit at the University of Malaya. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011,15: 1125-1132
- [T.M.I.Mahlia05] T.M.I. Mahlia, M.F.M. Said, H.H. Masjuki, M.R. Tamjis. Cost-benefit analysis and emission reduction of lighting retrofits in residential sector. *Energy and Buildings* 2005, 37: 573-578
- [Ulinuha08] Ulinuha A, Surakarta Muhammadiyah, Masoum Surakarta. Optimal scheduling of LTC and shunt capacitors in large distorted distribution systems using evolutionary-based algorithms. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2008;23:434-441.
- [Ulinuha11] Ulinuha A, Masoum Muhammadiyah Surakarta. Hybrid genetic-fuzzy algorithm for volt/var/total harmonic distortion control of distribution systems with high penetration of non-linear loads. *IET Generation, Transmission and Distribution* 2011;5:425-439.
- [Viral12] Viral R, Khatod DK. Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16:5146-5165.
- [Vysotsky11] Vysotsky VS, Nosov AA, Fetisov SS, Shutov KA. AC loss and other researches with 5 m HTS model cables. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2011; 21:1001-1004.

- [Wang10] Wang X, Zhong H, Yang Y, Mu X. Study of a novel energy efficient single-phase induction motor with three series-connected windings and two capacitors. IEEE Transactions on Energy Conversion 2010; 25:433-440.
- [Wei Yan09] Wei Yan ; Hui, S.Y.R. ; Chung, H.S.-H. Energy Saving of Large-Scale High-Intensity-Discharge Lamp Lighting Networks Using a Central Reactive Power Control System. Industrial Electronics, IEEE Transactions on; 56 (2009) 3069 - 3078.
- [Weisser07] Weisser D. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. Energy 2007;32:1543-1559.
- [Wu Yuan-Kang10] Wu Yuan-Kang, Lee Ching-Yin, Liu Le-Chang, Tsai Shao-Hong. Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators. IEEE Transactions on Power Delivery 2010;25:1678-1685.
- [Xiao10] Hui Xiao, Qi Kang, Jie Zhao, Yun-shi Xiao. A dynamic sky recognition method for use in energy efficient lighting design based on CIE standard general skies. Building and Environment, 45 (2010) 1319-1328.
- [Zhang11] Zhang L, Tian X, Boggs SA, Bartolucci EJ. Determination of total resistive loss in a multiple circuit, three-phase cable system. IEEE Transactions on Power Delivery 2011; 26:1939-1945.
- [Zou Kai12] Zou Kai, Agalgaonkar AP, Muttaqi KM, Perera S. Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties. IEEE Transactions on Sustainable Energy 2012;3:112-123.