



Projeto

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

***Eficiência energética na indústria: auditoria
energética e análise de propostas de melhoria***

Diana Nunes Cravo

Leiria, *Setembro* de 2015



Projeto

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

***Eficiência energética na indústria: auditoria
energética e análise de propostas de melhoria***

Diana Nunes Cravo

Projeto de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Hélder Manuel Ferreira Santos, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *Setembro* de 2015

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Para a minha família...

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

De forma geral quero demonstrar o meu agradecimento e reconhecimento a todos os que contribuíram para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar quero dar um agradecimento bem especial aos meus pais Manuel e Lucília que sempre me apoiaram e me deram força em todas as etapas da minha vida e que tornarem real esta oportunidade.

Em seguida quero agradecer profundamente ao meu orientador, Professor Doutor Hélder Santos por toda a disponibilidade demonstrada, pelo vasto conhecimento e partilha demonstrados, por todo o apoio prestado durante toda a realização deste projeto.

Agradeço também à professora Maria Lizete Lopes Heleno e ao professor Doutor João António Esteves Ramos pela simpatia, disponibilidade e rapidez na ajuda prestada relativamente aos diplomas legais sobre o presente projeto.

Por fim, mas não menos importante quero agradecer aos meus amigos por me acompanharem e proporcionaram momentos inesquecíveis durante o percurso académico, por me ajudarem nos momentos mais difíceis, por estarem sempre ao meu lado, e também pela ajuda na solução de alguns problemas que surgiram durante a realização deste projeto.

“Intelligence without ambition is a bird without wings”. Salvador Dali

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

As empresas consumidoras intensivas de energia são uma realidade cada vez mais presente. O consumo elevado de energia leva as empresas a procurar soluções que permitam aumentar a eficiência energética dos seus processos produtivos, de modo a promover a economia de energia e a redução de custos. Esta problemática é a motivação base para a realização do presente estudo.

A realização de auditorias energéticas permite verificar a forma como a energia está a ser utilizada nos diferentes equipamentos e processos, e assim identificar oportunidades de melhoria. No presente trabalho são utilizados dados provenientes de auditorias energéticas, sendo apresentadas propostas de melhoria que permitem implementar soluções que garantam poupança de energia.

O presente trabalho mostra que nas indústrias consumidoras intensivas de energia, existe grande potencial para a implementação de sistemas de recuperação de calor através da utilização de permutadores.

Os casos de estudo apresentados demonstram que a aplicação destes sistemas é técnico-economicamente viável, sendo os tempos de retorno do investimento inferiores a 2 anos.

Palavras-chave: Eficiência energética; Consumidores intensivos de energia; Auditoria energética; Permutador de calor; Tempo de retorno do investimento.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

At the present the intensive energy consumption companies are increasing. The high energy consumption takes the companies to find solutions that allows to increase energy efficiency in their productive process, to promote the energy savings and to decrease the costs. That problematic motivates the development of the present study.

The accomplishment of energy audits allows to verify how the energy is used in the different equipments and process, which allows to identify opportunities to improve. In this study it was used data gathered from energy audits, the work presents proposals to improve the energetic outcome.

The present study shows that in the intensive energy consumption companies, exists a large potential to implement heat recovery systems through the use of heat exchangers.

The cases studies presented demonstrates that the implementation of such systems are technic-economically viable, and the payback times are lower than 2 years.

Keywords: Energy efficiency, Intensive energy consumers, Energy audits, Heat exchanger, Payback time.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1.1 - Origem da energia na União Europeia em 2011 {adaptado de: Comissão Europeia (2013)}.....	4
Figura 1.2 - Origem da energia em Portugal em Março de 2015 {adaptado de: EDP (2015)}.....	5
Figura 1.3 - Registos SGCIE efetuados em Janeiro de 2015 nos principais Distritos {adaptado de: SGCIE EDP (2015).}	5
Figura 1.4 - Diferentes tipos de instalações registadas no SGCEI em Janeiro de 2015 {adaptado de: SGCIE EDP (2015)}.	6
Figura 1.5 - Energia final consumida no ano 2014 {adaptado de: SGCIE EDP (2015)}.....	6
Figura 2.1 - Formas e transformação de energia {adaptado de Águas (2008)}.....	10
Figura 2.2 - Variação da dependência energética do exterior no período 2000 a 2011 em Portugal e na União Europeia {adaptado de: Chorincas (2013)}.....	12
Figura 2.3 - Representação das etapas de um SGCIE resumidamente, {adaptado de EDP PME (2015)}.....	19
Figura 2.4 - Proposta de metodologia para a realização de uma auditoria, {adaptado de IXUS Energia (2013)}.....	26
Figura 2.5 - Procedimento para a realização de uma auditoria energética na indústria {adaptado de Magueijo et al., (2010)}.	27
Figura 3.1 - Consumo de energia da ITV e a sua percentagem no consumo de energia da Indústria Transformadora Portuguesa {adaptado de Gomes (2013)}.....	40
Figura 3.2 - Transformação de energia elétrica em energia mecânica por um motor elétrico {adaptado de Magueijo et al., (2010)}.	43
Figura 3.3 - Apresentação da configuração de um VEV (Magueijo et al., 2010).....	45
Figura 3.4 - Principais diferenças entre um sistema de bombagem convencional e um sistema de bombagem de alta eficiência que contém um VEV, {adaptado de Magueijo et al., (2010)}.....	47
Figura 3.5 - Rendimento de uma central termoelétrica convencional.	50
Figura 3.6 - Balanço energético de uma instalação de combustão convencional {adaptado de APICER (2012)}.	52

Figura 3.7 - Potencial de economia de energia no setor cerâmico, {adaptado de APICER (2012)}.....	61
Figura 4.1 - Permutador Ar-Ar de fluxo cruzado não misturado com configuração alinhada com variáveis de entrada e saída.	64
Figura 4.2 - Configurações do permutador: a) alinhado (P_{1A}); b) e do permutador (P_{1D}).....	65
Figura 4.3 - Poupança de energia (€/dia) para o permutador P_1 em função do tempo (dia) que engloba: i) a implementação de um sistema de recuperação de energia (permutador de calor base (linha verde)); ii) o sistema original sem recuperação de energia utilizando, energia elétrica ou gás natural (linha vermelha e azul, respetivamente).....	73
Figura 4.4 - Poupança de energia (gás natural e eletricidade) durante um ano para cada um dos permutadores dimensionados.	75
Figura 4.5 - Potências: térmica recuperada, dos ventiladores e útil recuperada, para os diferentes permutadores estudados.....	77
Figura 4.6 - Tipo de permutador de calor a instalar na indústria cerâmica em estudo.	79
Figura A.1 - Relação entre o Investimento e tempo de retorno do investimento do estudo efetuado.....	94
Figura A.2 - Relação entre o Investimento e tempo de retorno do investimento do estudo efetuado.....	95
Figura A.3 - Relação entre o Investimento e tempo de retorno do investimento do estudo efetuado.....	96
Figura A.4 - Instalação de um sistema de cogeração com produção de vapor e água quente para um processo fabril.....	97
Figura A.5 - Relação entre o Investimento e tempo de retorno do investimento do estudo efetuado.....	98

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Resumo dos limites de consumo intensivo de energia (CIE), {adaptado de ADENE - SGCIE (2014)}.	20
Tabela 2.2 - Principais diferenças entre auditorias internas e externas.....	29
Tabela 2.3 - Caso de estudo n.º 1.	31
Tabela 2.4 - Caso de estudo n.º 2.	32
Tabela 2.5 - Caso de estudo n.º 3.	33
Tabela 3.1 - Indústria cerâmica e os seus subsectores.	36
Tabela 3.2 - Medidas de eficiência energética.	42
Tabela 3.3 - Perdas ocorridas em motores elétricos e medidas de eficiência energética a adotar.	43
Tabela 3.4 - Perdas ocorridas em otimização de motores e suas medidas de eficiência energética.....	44
Tabela 3.5 - Perdas ocorridas em sistemas de bombagem e suas medidas de eficiência energética.	46
Tabela 3.6 - Perdas ocorridas no controlo de sistemas de bombagem e suas medidas de eficiência energética.	46
Tabela 3.7 - Perdas ocorridas em sistemas de compressão de ar e suas medidas de eficiência energética.	49
Tabela 3.8 - Medidas de eficiência energética para caldeiras.....	53
Tabela 3.9 - Medidas de eficiência energética para fornos.....	53
Tabela 3.10 - Medidas de eficiência energética para secadores.....	53
Tabela 3.11 - Medidas de eficiência energética para sistemas de geração e distribuição de vapor.	54
Tabela 3.12 - Formas de aproveitamento de calor em condensados.....	55
Tabela 3.13 - Desempenho energético dos diferentes tipos de lâmpadas.....	58
Tabela 4.1 - Caracterização do caso de estudo.	64
Tabela 4.2- Características principais dos permutadores em estudo.	65
Tabela 4.3 - Áreas de permuta e de passagem.	66
Tabela 4.4 - Equações utilizadas no modelo termo-hidráulico para o dimensionamento do permutador.	67

Tabela 4.5 - Valores de referência para os diferentes tipos de configurações de permutadores de calor.	68
Tabela 4.6 - Tabela comparativa das características principais para a avaliação do desempenho de um permutador de calor.	69
Tabela 4.7 - Principais resultados dos dimensionamentos efetuados.	70
Tabela 4.8 - Equações para determinar o custo final dos permutadores.	71
Tabela 4.9 - Apresentação do custo de cada permutador.	72
Tabela 4.10 - Avaliação económica dos permutadores dimensionados.	74
Tabela 4.11 - Payback a curto e longo prazo, dos permutadores dimensionados.	74
Tabela 4.12 - Dimensionamento do ventilador exterior.	76
Tabela 4.13 - Dimensionamento do ventilador interior.	76
Tabela 4.14 - Valores das potências: térmica recuperada, dos ventiladores e útil recuperada.	78
Tabela 4.15 – Caracterização do caso de estudo.	79
Tabela 4.16 - Características principais do permutador em estudo.	80
Tabela 4.17 - Áreas principais do permutador a dimensionar.	80
Tabela 4.18 - Características principais dos permutadores dimensionados.	81
Tabela 4.19 - Resultados obtidos através do dimensionamento dos permutadores. ...	81
Tabela 4.20 - Avaliação económica dos permutadores dimensionados e o respetivo peso.	83
Tabela 4.21 - Avaliação económica dos permutadores e respetivo tempo de retorno do investimento a curto prazo.	84
Tabela A.1 – Economias antes da aplicação da medida do exemplo 1.	93
Tabela A.2 - Economias depois da aplicação da medida do exemplo 1.	93
Tabela A.3 - Economias obtidas com a aplicação da medida do exemplo 2.	94
Tabela A.4 - Economia antes da aplicação da medida do exemplo 3.	95
Tabela A.5 - Economia depois da aplicação da medida do exemplo 3.	96
Tabela A.6 - Tabela de receitas da fábrica do exemplo 4.	97
Tabela A.7 - Tabela de encargos da fábrica do exemplo 4.	97

Lista de siglas

Lista de Símbolos Romanos

A_e	Área de permuta exterior [m ²]
$A_{Ext\ Perm}$	Área externa do permutador [m ²]
A_i	Área de permuta interior [m ²]
A_{p_i}	Área frontal de passagem [m ²]
C	Comprimento dos tubos [m]
$C_{permutador}$	Custo total do permutador [€]
C_{Tubos}	Comprimento total dos tubos [m]
C_I	Valor de referência, tabelado, para o caso de estudo [-]
$C_{€\ electricidade}$	Custo em € da eletricidade [€]
$C_{€\ G.N}$	Custo em € de gás natural [€]
d_e	Diâmetro externo dos tubos [m]
d_i	Diâmetro interno dos tubos [m]
$D_{T\ altura}$	Distância entre tubos (altura) [m]
$D_{T\ largura}$	Distância entre tubos (largura) [m]
f	Fator de atrito [-]
H	Altura do permutador [m]
h_e	Coefficiente de transferência de calor por convecção exterior [W/m ² .K]
h_i	Coefficiente de transferência de calor por convecção interior [W/m ² .K]
L	Largura do permutador [m]
m	Valor de referência, tabelado, para o caso de estudo [-]
\dot{m}_i	Caudal mássico de ar interior [kg/s]
\dot{m}_e	Caudal mássico de ar exterior [kg/s]
N_h	Número de fileiras horizontais [-]

N_t	Número de tubos [-]
$\overline{Nu}_{D,i}$	Número de <i>Nusselt</i> [-]
NUT	Número de unidades de transferência unitárias [-]
N_v	Número de fileiras verticais [-]
P_{caixa}	Peso da caixa [kg]
P_I	Peso do isolamento [kg]
P_o	Peso de outros componentes [kg]
P_{perm}	Peso do permutador [kg]
$P_{recuperada}$	Potência recuperada [kW]
P_{tubos}	Peso dos tubos [kg]
$P_{ventilador}$	Potência do ventilador [kW]
\dot{Q}_1	Potência transferida [kW]
S_T e S_L	<i>Tube pitch</i> [m]
T_{altura}	Altura total do permutador [m]
T_{comp}	Comprimento total do permutador [m]
$T_{e,1}$	Temperatura de entrada do ar exterior [°C]
$T_{e,2}$	Temperatura de saída do ar exterior [°C]
$T_{i,1}$	Temperatura de entrada do ar interior [°C]
$T_{i,2}$	Temperatura de saída do ar interior [°C]
$T_{largura}$	Largura total do permutador [m]
$T_{R\ eletricidade}$	Tempo de retorno do investimento em eletricidade [anos]
$T_{R\ G.N}$	Tempo de retorno do investimento em gás natural [anos]
U	Coefficiente global de transferência de calor [W/m ² .K]
$V_{C\ est}$	Custo da construção da estrutura [€]
$V_{C\ iso}$	Custo da construção do isolamento [€]

$V_{C\ outros}$	Custo de construção de outros elementos do permutador [€]
$V_{C\ tubos}$	Custo da construção dos tubos [€]

Lista de Símbolos Gregos

$\emptyset\ conduta$	Diâmetro da conduta [m]
Δ_p	Diferença de pressão [Pa]
ε	Efetividade [-]

Lista de Abreviaturas

ADENE	Agência para a Energia
AQS	Águas Quentes Sanitárias
ARCE	Acordo de Racionalização dos Consumos de Energia
AVAC	Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado
BAT	<i>Best Available Technologies</i>
CAE	Classificação das Atividades Económicas
CEE	Consumo Específico de Energia
CIE	Instalações Consumidoras Intensivas de Energia
CO ₂	Dióxido de Carbono
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
ECO.AP	Programa de Eficiência Energética para a Administração Pública
ENE	Estratégia Nacional para a Energia
FEE	Fundo de Eficiência Energética
GEE	Gases com Efeito de Estufa;
IC	Intensidade Carbónica
IE	Intensidade Energética
IF	Isolamento e forra
ITV	Indústria Têxtil e Vestuário
kg _{ep}	Quilograma equivalente de petróleo
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAER	Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
PREn	Plano de Racionalização do Consumo de Energia
P _{1A}	Permutador original de tubos alinhados

P _{1D}	Permutador de tubos desalinhados
P ₂	Permutador 2 alinhado
P ₃	Permutador 3 alinhado
P ₄	Permutador 4 alinhado
P ₅	Permutador 5 alinhado
RCCTE	Regulamento das Caraterísticas de Comportamento Térmico dos Edifícios
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
REP	Relatório de Execução e Progresso
RGCE	Regulamento de Gestão do Consumo de Energia
RMV	Recompressão Mecânica de Vapor
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
SCNT	Sistema Científico e Tecnológico Nacional
SGCIE	Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia
SIURE	Sistema de Incentivos à Utilização Racional de Energia de Base Regional
SRAP	Sistema de Regulação de Acesso a Profissões
tep	Tonelada equivalente de petróleo
VAB	Valor Acrescentado Bruto
VEVs	Variadores de velocidade

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIGLAS	XV
ÍNDICE	XXI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contexto e motivação	1
1.2. Objetivos	7
1.3. Organização do Projeto	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1. Introdução	9
2.2. Transformação de energia	9
2.3. A energia e a indústria	11
2.4. Gestão de Energia – Enquadramento legal	12
2.5. Auditoria energética	16
2.5.1. Enquadramento legal relativo a auditorias energéticas	20
2.5.2. Metodologia da auditoria	25
2.5.3. Tipos de auditoria	27
2.5.4. Formato do Relatório da auditoria	29
2.6. Estudos antecedentes	30
2.6.1. Caso de estudo n.º 1	30
2.6.2. Caso de estudo n.º 2	31
2.6.3. Caso de estudo n.º 3	33
3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA	35
3.1. Introdução	35
3.2. Caracterização dos setores	35
3.2.1. Indústria cerâmica em Portugal	36
3.2.2. Indústria têxtil e de vestuário em Portugal	39
3.3. Medidas transversais à indústria	41
3.3.1. Sistemas acionados por motores elétricos	42
3.3.2. Produção de calor e frio	50
3.3.3. Iluminação	56

3.3.4.	Eficiência do processo industrial/outros	59
3.4.	Oportunidades de melhoria de eficiência energética na indústria	61
4.	SISTEMAS DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA	63
4.1.	Introdução	63
4.2.	Sistema de recuperação de energia – Aplicação à indústria têxtil	63
4.2.1.	Descrição do caso de estudo	63
4.2.2.	Modelo termo-hidráulico para dimensionamento do permutador	66
4.3.	Sistema de recuperação de energia – aplicação à indústria cerâmica	78
4.3.1.	Descrição do caso de estudo	78
4.3.2.	Análise e discussão de resultados	81
4.3.3.	Análise económica e comparativa de permutadores	83
5.	FECHO	85
5.1.	Conclusões	85
5.2.	Sugestões de trabalhos futuros	86
6.	BIBLIOGRAFIA	87
A.	ANEXOS	93
Anexo I		93
	Exemplo 1: Iluminação	93
	Exemplo 2: Recuperação de calor	94
	Exemplo 3: Ar comprimido	95
	Exemplo 4: Cogeração	96
Anexo II		99
Anexo III		103
Anexo IV		105
Anexo V		107
Anexo VI		109
Anexo VII		113
Anexo VIII		115

1. Introdução

O presente trabalho é dedicado ao estudo da eficiência energética no setor industrial. Tal como em outros setores, também na indústria, a realização de auditorias energéticas permite a caracterização energética dos equipamentos e sistemas da instalação, e a identificação de medidas de racionalização do consumo de energia, de modo a reduzir a fatura energética. Para a implementação de medidas de racionalização do consumo de energia, em alguns casos é necessário a mudança de equipamentos ou mesmo a adaptação de novos equipamentos a sistemas já existentes, de forma a aumentar a eficiência energética dos processos industriais.

O presente capítulo está organizado em três secções: a secção 1.1 apresenta o contexto e motivação da presente tese, a secção 1.2 introduz os objetivos principais do trabalho; e, por fim a secção 1.3 descreve a forma como o trabalho foi organizado.

1.1. Contexto e motivação

Portugal é considerado um país com escassos recursos energéticos e como tal torna-se fortemente dependente de energia proveniente do exterior. Neste contexto, atualmente Portugal sente necessidade de gerir os seus recursos energéticos, essencialmente através da implementação de medidas que promovem a eficiência energética. Deste modo, é crucial diminuir a intensidade energética e carbónica no setor industrial Português.

Atualmente a eficiência energética está a redirecionar-se para o aumento do interesse de credores e investidores, de forma a atingir objetivos climáticos e apoiar o crescimento económico do país. A nível ambiental a eficiência energética desempenha um papel importantíssimo na diminuição da produção de dióxido de carbono (CO₂). Para alcançar os objetivos climáticos a nível mundial é essencial limitar o aumento da temperatura em 2°C e reduzir as emissões de CO₂ em 40%, IEA (2014).

Desta forma a necessidade de reduzir a fatura energética é imperativa, não só no setor residencial, de serviços e de transportes, mas também nos diferentes setores industriais. Para tal, os diferentes países tiveram a necessidade de desenvolver políticas energéticas com o intuito de diminuir os consumos energéticos, fazendo cumprir metas de consumos de energia e emissões de poluentes.

A união europeia adotou o plano “Europa 2020”, de dezembro de 2008, que estabelece as seguintes metas até ao final de 2010 em relação ao ano 1990: diminuição dos gases com efeito de estufa (GEE) em cerca de 20% (ou 30% se as condições forem adequadas), 20% da energia derivar de fontes renováveis e aumentar em 20% a eficiência energética, European Commission (2014).

No seguimento do plano “Europa 2020” aprovado em 2010, Portugal decide adotar o plano europeu relativamente á eficiência energética, criando um fundo de eficiência energética e a revisão e atualização do Plano Nacional de Ação para a eficiência Energética (PNAEE), aprovado na Resolução de Conselho de Ministros n.º80/2008 que transpõe a Diretiva n.º 2006/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de Abril. O PNAEE prevê uma poupança de energia final de 8,2% referente à meta de eficiência energética definida pela União Europeia (9%) até 2016 nos setores: dos transportes, residencial e serviços, industrial, Estado, comportamentos e agricultura, Resolução do Conselho de Ministros 29 (2007) e ADENE (2014).

Para além da adoção do PNAEE, e de forma a criar um modelo energético racional e sustentável, sem comprometer a competitividade das empresas nem a qualidade de vida dos cidadãos, foram desenvolvidas mais estratégias tais como: o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) e o Programa de Eficiência Energética para a Administração Pública (ECO.AP). O PNAER é um plano alusivo às energias renováveis e prevê, até 2020, uma redução de 18% da capacidade elétrica instalada nas tecnologias baseadas em fontes renováveis e alcançar a meta global de 35% (face à meta de 31% relativamente ao ano 2010). O PNAER é válido para os grandes setores de aquecimento e arrefecimento, eletricidade e transportes. Relativamente ao programa ECO.AP, lançado através da Resolução do Conselho de Ministros n.º2/2011, possui o objetivo de 30% de eficiência energética nos organismos e serviços da Administração Pública, sem aumentar a despesa pública, até 2020, ADENE (2014).

A principal medida do PNAEE, criada pelo governo português para o setor industrial, foi o Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) que revoga o antigo Regulamento de Gestão do Consumo de Energia (RGCE). O SGCIE tem como objetivo promover a eficiência energética das instalações de Consumos Intensivos de Energia (CIE), contribuindo para a diminuição das emissões de GEE, bem como alargar a sua aplicação às instalações CIE com consumos intensivos anuais superiores a 500 tep/ano. No SGCIE também consta a realização de auditorias energéticas obrigatórias e periódicas,

com a finalidade de obter a caracterização energética dos equipamentos e sistemas da instalação CIE, e a identificação de medidas para a elaboração de um Plano de Racionalização do Consumo de Energia (PREn). Occcob PREn é validado pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), através de um Acordo de Racionalização dos Consumos de Energia (ARCE). Este acordo integra medidas relativas a modificações ou substituições em equipamentos ou na instalação de forma a garantir o cumprimento das metas indicadas no SGCIE. Em caso de incumprimento do ARCE podem ser aplicadas penalidades no valor de 50€/tep de atividade não evitada, Antunes, J. (2012) e Soares, N. (2010).

Portugal, como membro da União Europeia, assumiu também um compromisso no âmbito do Protocolo de Quioto, de forma a adotar medidas que permitam obter maior eficiência energética nos diferentes setores. Assim, a política energética nacional centra-se em dois pilares principais: i) a sustentabilidade; e a ii) a racionalização energética.

Em Portugal, o setor de serviços (que inclui a habitação) é o maior consumidor de energia, seguido pela indústria (consumo global de energia das indústrias combinadas de cerca de 33%) e por fim o setor dos transportes, ABB, S.A (2012). Desta forma, aplicando medidas de eficiência energética, poderá conseguir-se uma poupança de cerca de 30% de energia para o setor de serviços, 25% no setor industrial e cerca de 26% no setor dos transportes, ADENE (2014) e ABB, S.A (2012).

A política energética e ambiental nacional assenta em quatro objetivos principais, ADENE (2014):

- i) Reduzir de forma significativa e sustentável as emissões de poluentes atmosféricos;
- ii) Diversificar as fontes de energia primária, contribuindo desta forma para o aumento da segurança de abastecimento do país;
- iii) Utilizar eficientemente os recursos, aumentando a eficiência energética;
- iv) Aumentar a competitividade económica, reduzindo os consumos e custos associados ao funcionamento e gestão da economia das empresas.

O setor industrial português tem vindo a apresentar dificuldades consecutivas que em parte se devem à baixa eficiência energética, sendo a gestão de energia essencial para o aumento da competitividade das empresas. Dados referentes ao ano 2011, mostram que a maior parte da energia consumida na União Europeia provém de fontes fósseis. A figura

1.1 apresenta um diagrama com a origem da energia na União Europeia em 2011, Comissão Europeia (2013).

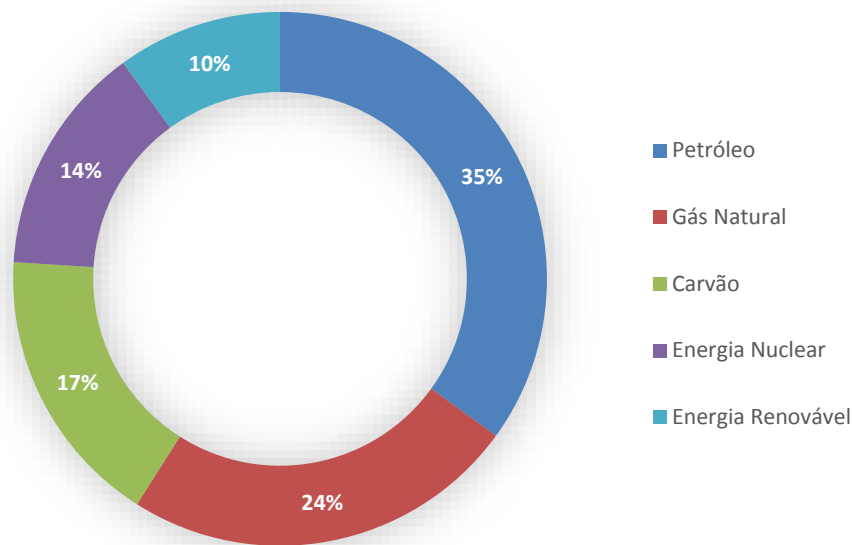


Figura 1.1 - Origem da energia na União Europeia em 2011 {adaptado de: Comissão Europeia (2013)}.

Verifica-se através da figura 1.1 que na União Europeia apenas 10% da energia provém de fontes renováveis, sendo os restantes 90% provenientes de fontes de energia não renováveis, que inclui: petróleo (35%), gás natural (24%), carvão (17%) e energia nuclear (14%). Para diminuir a utilização excessiva de combustíveis fósseis é necessária a aplicação de medidas de eficiência energética, de forma a conseguir poupanças de energia significativas nos diferentes setores.

A figura 1.2 apresenta a origem da energia em Portugal, em Março de 2015, EDP (2015). Apesar de Portugal apresentar escassos recursos energéticos, em Março de 2015, Portugal encontrava-se bem posicionado na União Europeia em termos de produção de energia através de fontes renováveis (energia eólica 55%, energia hídrica 11%, cogeração renovável 4% e outras renováveis 7%), tal como é possível observar na figura 1.2, EDP (2015).

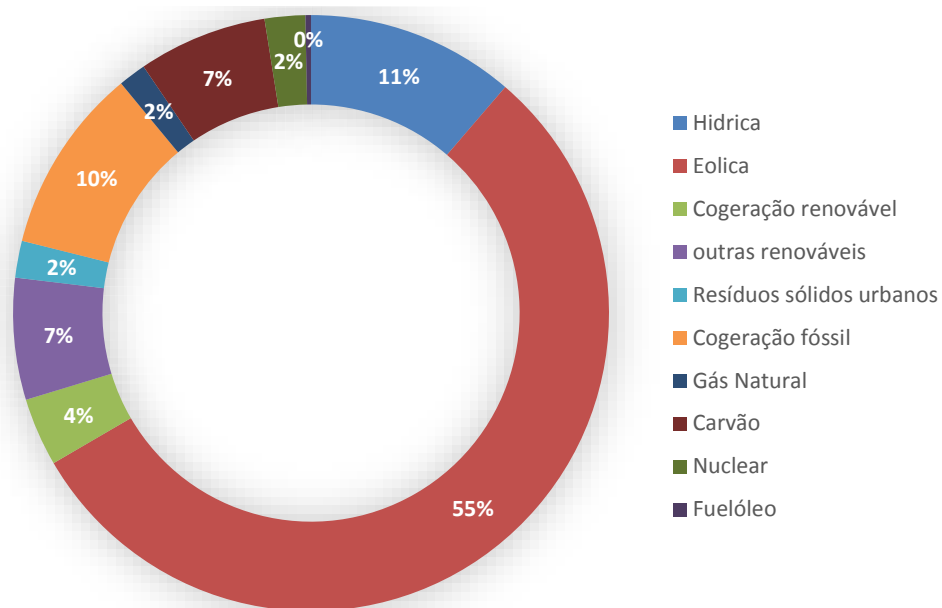


Figura 1.2 - Origem da energia em Portugal em Março de 2015 {adaptado de: EDP (2015)}.

Portugal não deixou de se desenvolver apesar dos escassos recursos energéticos e dependência energética do exterior. O relatório síntese SGCIE de Janeiro de 2015 elaborado pela ADENE refere que até à data indicada foram registadas cerca de 826 instalações nos principais distritos, como mostra a figura 1.3, SGCIE EDP (2015).

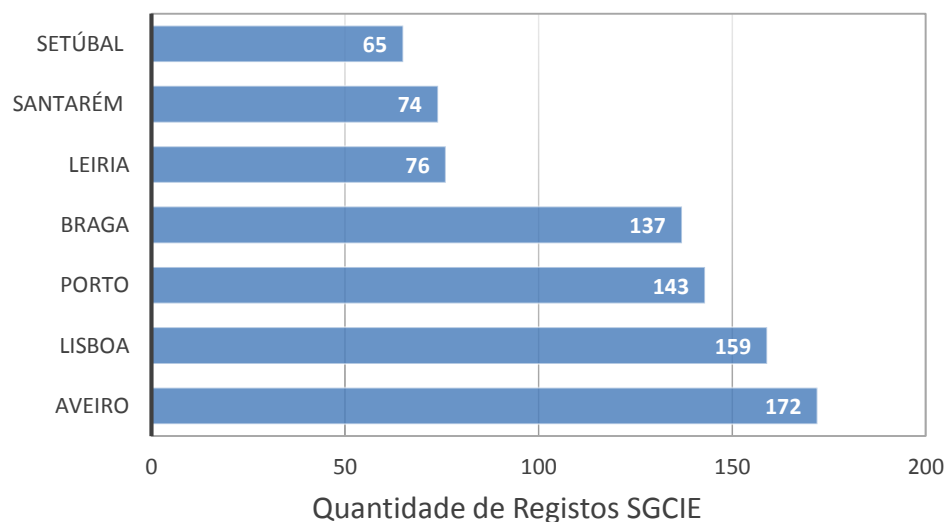


Figura 1.3 - Registos SGCIE efetuados em Janeiro de 2015 nos principais Distritos {adaptado de: SGCIE EDP (2015).}

As instalações mais registadas no SGCIE foram as alimentares, têxtil e fabrico de produtos minerais não metálicos, como mostra a figura 1.4, SGCIE EDP (2015).

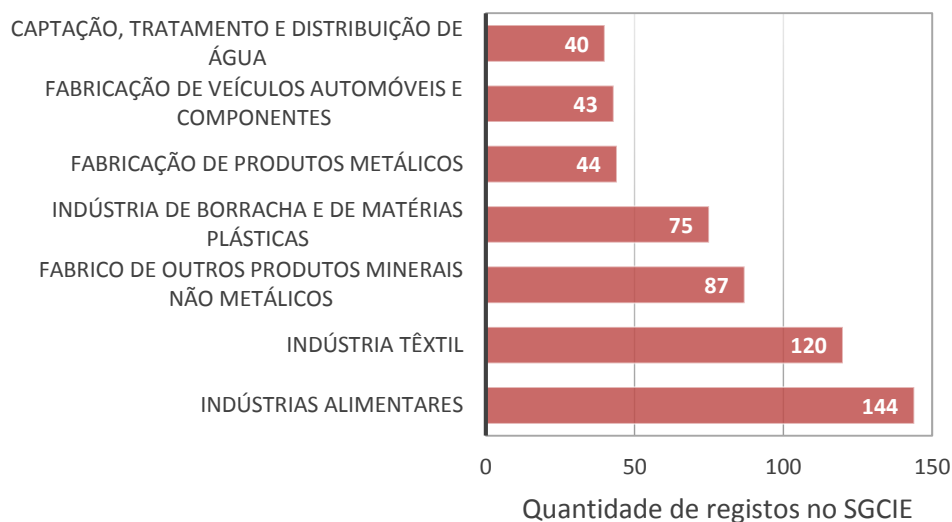


Figura 1.4 - Diferentes tipos de instalações registadas no SGCEI em Janeiro de 2015 {adaptado de: SGCIE EDP (2015)}.

O relatório síntese SGCIE refere ainda que a energia final mais consumida no ano 2014 foi a energia elétrica, seguida do gás natural; e a menos consumida foi o coque de petróleo, tal como é possível observar na figura 1.5. Desta forma torna-se importante tomar medidas de forma a reduzir o consumo energético, não só por causa dos efeitos nefastos para o ambiente mas também pela economia de energia que é possível obter.

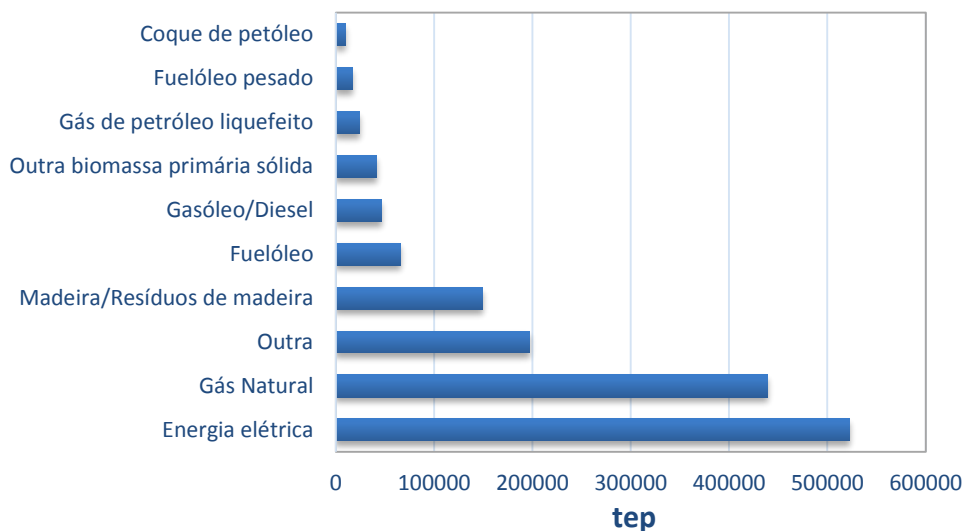


Figura 1.5 - Energia final consumida no ano 2014 {adaptado de: SGCIE EDP (2015)}.

Em Portugal o setor industrial divide-se pela região Norte e Centro litoral, região Centro e Sul litoral e região Sul interior e Ilhas, Mateus e CIP (2010).

Na região Norte e centro litoral (que englobam as regiões: Minho-Lima, Cávado, Ave, Grande Porto, Tâmega, Entre Douro e Vouga, Baixo Vouga, Dão Lafões e Baixo Mondego) são predominantes as indústrias: transformadora dos minerais não metálicos (com destaque para a cerâmica de revestimentos e pavimentos, louça sanitária), de artigos/produtos metálicos (ferragens, torneiras, utensílios de cozinha, mobiliário metálico), de produção de pasta de pasta, papel e embalagem e química.

Na região Centro e sul litoral (que englobam as regiões: Pinhal Litoral, Grande Lisboa, Península de Setúbal, Médio Tejo e Oeste, Lezíria do Tejo e Alentejo Litoral) são predominantes as indústrias: farmacêutica, química/água; florestais (fileira pasta, papel e embalagem); do material eletrónico e extrativa.

Na região Sul Interior e Ilhas (que englobam as regiões: Alto Alentejo, Alentejo Central, Baixo Alentejo, Algarve, Açores e Madeira) são predominantes as indústrias: extrativa, agroalimentar; água e resíduos.

Cerca de 70% dos processos produtivos na indústria portuguesa utiliza essencialmente energia elétrica como fonte de energia. Esta é obtida maioritariamente através de centrais termoelétricas que utilizam processos de combustão de combustíveis fósseis, utilizando portanto fontes de energia não renováveis. É importante referir que a energia elétrica produzida por via térmica é a que mais contribui para uma maior emissão de gases nocivos para a atmosfera.

O número de indústrias em Portugal remete para uma indispensável análise energética de forma a estabilizar a economia de cada indústria, bem como estimular a redução de emissões de poluentes para a atmosfera. O presente trabalho permite avaliar alguns componentes de indústrias CIE de forma a demonstrar que é possível obter uma grande economia nas instalações, através da alteração de sistemas ou adaptação de equipamentos.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem os seguintes objetivos principais:

- i) Identificar desperdícios energéticos na indústria e apresentar propostas de melhoria de forma a implementar soluções que garantam poupança de energia;

- ii) Encontrar soluções técnicas e economicamente viáveis de modo a promover a eficiência energética na indústria e conseqüentemente a diminuição da emissão de GEE.

Neste estudo são utilizados dados provenientes da realização de auditorias energéticas para a indústria cerâmica e têxtil e vestuário, de forma a estudar soluções de recuperação de energia térmica viáveis do ponto de vista técnico-econômico, que conduzam ao aumento da eficiência energética e à redução da fatura energética.

1.3. Organização do Projeto

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. No Capítulo 1 encontra-se o contexto e motivação de todo o trabalho, os objetivos propostos para a realização deste trabalho e a organização do mesmo. O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica que engloba os processos de transformação de energia, a energia no setor industrial, gestão de energia e respetivo enquadramento legal. O capítulo 2 define ainda as etapas de uma auditoria energética e identifica estudos antecedentes, aplicados à mesma área. O capítulo 3 remete para a eficiência energética na indústria. Neste capítulo é dado maior ênfase à caracterização da indústria cerâmica e têxtil e de vestuário, bem como as medidas transversais que promovem maior eficiência energética na indústria em geral. No Capítulo 4 são apresentados dois casos de estudo que correspondem à implementação de sistemas de recuperação de energia na indústria têxtil e de vestuário e cerâmica. Estes consistem no dimensionamento de sistemas de recuperação de energia térmica, recuperadores de calor (permutadores). O capítulo 5 fecha o presente trabalho apresentando as principais conclusões e as sugestões de trabalho futuro.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Introdução

O presente capítulo é dedicado à revisão bibliográfica. Este capítulo engloba os processos de transformação de energia, a forma como a energia é essencial para a indústria, o enquadramento legal para uma gestão de energia adequada, os processos de realização de uma auditoria energética bem como o porquê da realização das mesmas e quem as deve realizar. O capítulo termina com a análise de três casos de estudo de forma a elucidar como decorrem os processos de auditoria e as medidas de eficiência energética aplicadas à indústria em questão.

Os subcapítulos que se seguem permitem identificar formas de eficiência energética, cumprindo os enquadramentos legais e adotando medidas de acordo com as instalações em que se inserem os consumidores intensivos de energia.

2.2. Transformação de energia

A energia é um recurso necessário para que a vida no planeta, tal como a conhecemos, possa existir. Ela é a base para que possamos comunicar, para que nos possamos mover, para assegurar a iluminação e conforto térmico nos edifícios e moradias, entre outras utilizações. Como tal existem diversas formas de energia, tais como: energia muscular (utilizadas pelos animais/seres humanos), energia calorífica (proveniente da madeira, carvão, álcool, petróleo, etc), energia solar (fornecida pelo sol), energia mecânica (obtida através do movimento de componentes mecânicos), energia química (produzida por baterias e pilhas), energia elétrica (produzida por exemplo em centrais elétricas e termelétricas) e energia nuclear ou atômica (produzida por centrais nucleares ou termonucleares).

A transformação de energia é um processo importante, uma vez que integra a origem da energia até à sua utilização final. Antes de chegar à fase de utilização final de energia, esta passa por diversas etapas, de forma que possa ser utilizada nos diferentes processos em que vai ser consumida. A sua forma de consumo depende do tipo de utilização que tiver. Dependendo da quantidade de energia que se consome pelos diferentes setores, é necessário realizar auditorias periódicas, de forma a baixar os consumos de energia. As

auditorias energéticas podem ser de diferentes tipos, consoante o setor em que são realizadas. No entanto de todas elas resulta um relatório final de auditoria que mostra propostas de diminuição de consumos energéticos, bem como adoção de novas medidas de redução de consumos. Estas auditorias decorrem segundo legislação imposta pelo Governo Português, que fixa metas e propostas para a diminuição de consumos energéticos. A figura 2.1 mostra as diferentes formas e processos de transformação de energia através de um diagrama de *Sankey*, Águas (2008).

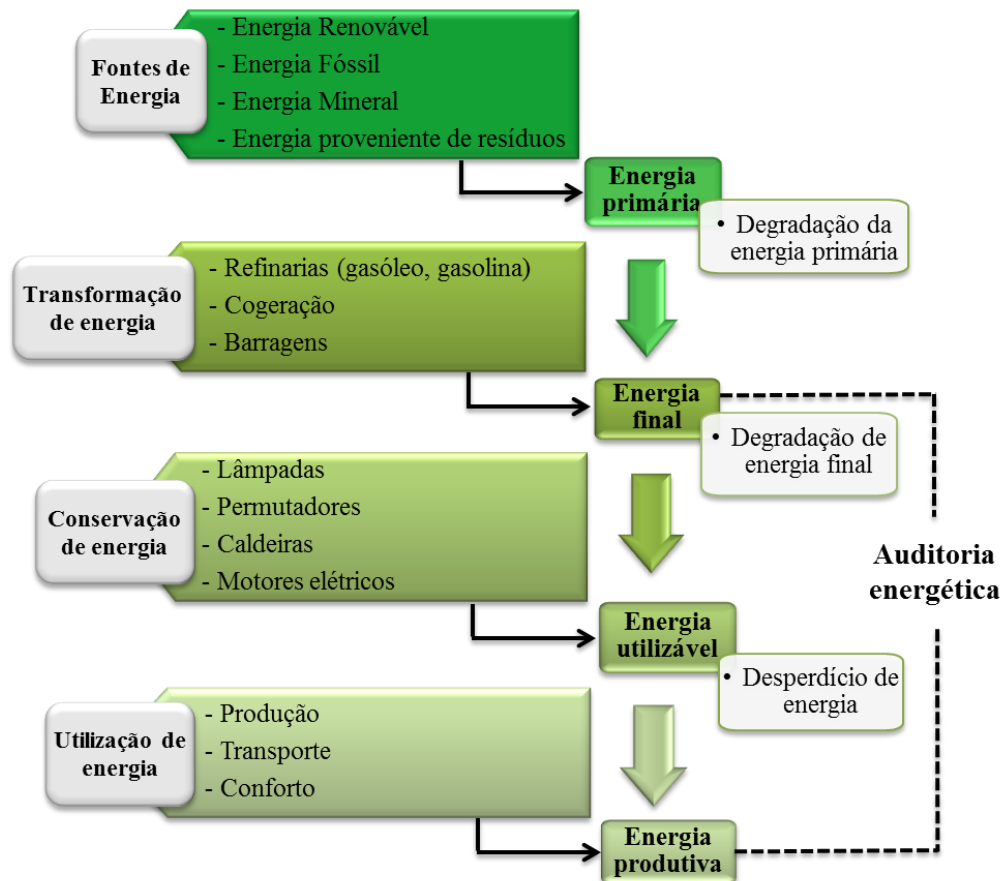


Figura 2.1 - Formas e transformação de energia {adaptado de Águas (2008)}.

A energia sofre diversos processos e transformações desde a sua origem até à sua utilização final. Desta forma a energia é produzida num determinado local, esse local é denominado de fonte de energia primária. A origem da energia é variável, esta pode ser de origem renovável, fóssil, mineral ou resultante da reciclagem de resíduos. A energia final corresponde à energia na sua forma comercial (energia elétrica, combustíveis). Até atingir a sua forma final, a energia sofre um conjunto de processos e transformações de forma a ser utilizada em equipamentos específicos. A energia utilizável é aquela que se relaciona diretamente com a eficiência dos equipamentos consumidores de energia final, como por

exemplo uma lâmpada, cuja conversão de eletricidade em radiação visível (luz) apresenta um determinado rendimento, sendo a energia utilizável significativamente inferior à energia final. Por último a energia produtiva remete para a eficiência da utilização de energia. Esta difere da energia utilizável ao nível da eficiência e produtividade dos equipamentos utilizados, uma vez que à mesma quantidade de energia podem estar associados valores de aproveitamento energético muito diferentes, Águas (2003).

2.3. A energia e a indústria

Portugal depende de recursos energéticos, principalmente dos que asseguram geralmente as necessidades energéticas de grande parte dos países desenvolvidos (carvão, gás natural e petróleo). No entanto a escassez de recursos energéticos fósseis tem vindo a aumentar. Este facto torna indispensável o aumento da eficiência energética e o recurso a fontes de energia renováveis em diversos setores, diminuindo a sua dependência energética do exterior. A figura 2.2 mostra a variação da dependência energética do exterior no período 2000 a 2011 em Portugal e na União Europeia. Portugal está tendencialmente a baixar a sua dependência e em 2011, atingiu um mínimo de 75%. Este facto indica que Portugal está cada vez mais a investir em energias renováveis, e que estas estão a contribuir para que a dependência de combustíveis fósseis diminua consideravelmente. A figura 2.2 indica que na União Europeia a 27 países, a dependência energética face ao exterior tem vindo a aumentar. Apesar da tendência de evolução positiva, Portugal apresenta uma dependência energética do exterior muito superior à União Europeia a 27 países.

De modo a reduzir a dependência energética e para que a economia evolua para uma economia verde e descarbonizada, principalmente na última década, Portugal tem-se centrado no desenvolvimento das seguintes áreas:

- i) Crescente liberalização dos mercados energéticos;
- ii) Melhoria da eficiência energética;
- iii) Diversificação das fontes primárias de energia, promovendo o consumo de energias provenientes de fontes renováveis.

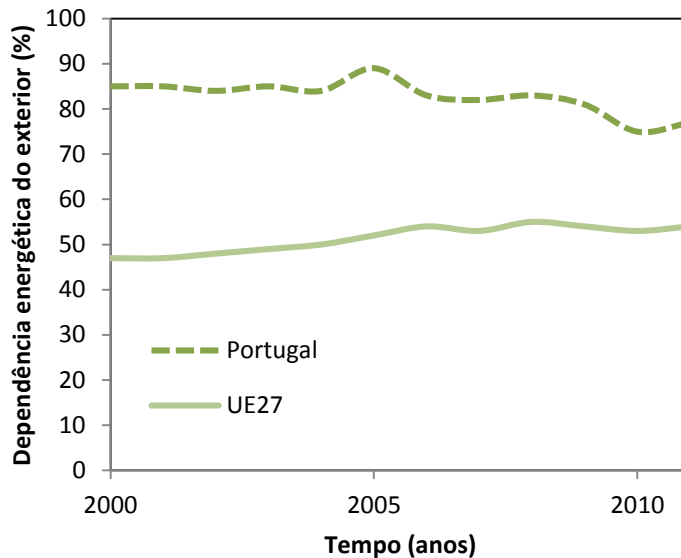


Figura 2.2 - Variação da dependência energética do exterior no período 2000 a 2011 em Portugal e na União Europeia {adaptado de: Chorincas (2013)}.

A utilização de energia na indústria é essencial para o funcionamento de diferentes equipamentos necessários à produção, tais como: operação de equipamentos de produção, sistemas de aquecimento e arrefecimento, iluminação e transportes. A importância de cada uma destas utilizações difere consoante cada organização. Para tal é necessária a identificação das atividades mais relevantes para a análise do consumo energético, Vasconcelos (2012).

Devido ao elevado consumo energético que tem vindo a ocorrer nos últimos anos, levado a cabo pelo setor industrial, foi necessária a adoção de medidas a implementar nas indústrias que mais energia consomem, medidas de eficiência energética, que levam a uma menor dependência/consumo de energia.

2.4. Gestão de Energia – Enquadramento legal

De forma a promover o desenvolvimento do país é necessário definir e implementar políticas que permitam o aumento das capacidades do Sistema Científico e Tecnológico Nacional (SCNT) e da indústria portuguesa, em particular na área da energia. Interessa desenvolver sistemas para aproveitamento de energia eólica e solar fotovoltaica que permitam gerir e controlar redes elétricas de origem renovável, dando uma resposta ativa à procura. É também importante desenvolver políticas internas que se adaptem à situação atual do país, de forma a desenvolver soluções que alimentem o mercado interno e

permitam atingir as metas Europeias que estão definidas para o setor energético, Indústria e Ambiente (2014).

Existem diversas normas/estratégias legais que permitem definir objetivos e metas para que todos os objetivos de eficiência energética sejam conseguidos. Assim, por ordem cronológica as normas mais importantes são:

- **O Decreto-Lei n.º 188/88, de 27 de maio**, que cria o Sistema de Incentivos à Utilização Racional de Energia de Base Regional (SIURE). Este sistema tem como objetivos os seguintes itens:

- i) Incentivar a economia de energia e orientar os consumos, de forma a reduzir os gastos supérfluos e promover a melhoria do rendimento energético dos processos que utilizam energia;
- ii) Incentivar e dinamizar a produção de energia a partir de recursos renováveis ou por outros processos de que resulte economia de energia;
- iii) Incentivar a substituição do petróleo bruto e derivados por outros combustíveis, de forma a garantir a diversificação de fontes energéticas de que resulte uma maior segurança de abastecimento para o País;
- iv) Contribuir para o desenvolvimento integrado das regiões através do aproveitamento dos recursos energéticos próprios, com as consequentes criação de emprego e melhoria do nível tecnológico local.

- **A Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005, de 24 de outubro**, que estabelece uma estratégia nacional para a energia e estipula os seguintes objetivos:

- i) Garantir a segurança do abastecimento de energia através da diversificação dos recursos primários e dos serviços energéticos e da promoção da eficiência na cadeia da oferta e na procura de energia;
- ii) Estimular e favorecer a concorrência, por forma a promover a defesa dos consumidores, bem como a competitividade e a eficiência das empresas, quer as do setor da energia quer as demais do tecido produtivo nacional;
- iii) Garantir a adequação ambiental de todo o processo energético reduzindo os impactes ambientais às escalas local, regional e global, nomeadamente no que respeita à intensidade carbónica do PIB.

De igual forma o Governo pretende: reduzir a dependência energética do exterior aumentando a capacidade de produção endógena, aumentar a eficiência energética, reduzir as emissões de CO₂, reduzir o custo da energia e aumentar a qualidade do serviço.

- **A Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010 de 15 de Abril**, que estabelece uma Estratégia Nacional para a Energia até 2020 (ENE 2020), e atualiza a Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005, de 24 de outubro. Os objetivos que constam na ENE 2020 são:

- i) Reduzir a dependência energética do País face ao exterior para 74% em 2020, produzindo nesta data, a partir de recursos endógenos, o equivalente a 60 milhões de barris anuais de petróleo, com vista à progressiva independência do País face aos combustíveis fósseis;
- ii) Garantir o cumprimento dos compromissos assumidos por Portugal no contexto das políticas europeias de combate às alterações climáticas, permitindo que em 2020 60% da eletricidade produzida e 31% do consumo de energia final tenham origem em fontes renováveis e uma redução de 20% do consumo de energia final nos termos do Pacote Energia – Clima 20-20-20;
- iii) Reduzir em 25% o saldo importador energético com a energia produzida a partir de fontes endógenas gerando uma redução de importações de 2000 milhões de euros;
- iv) Criar riqueza e consolidar um *cluster* energético no setor das energias renováveis em Portugal, assegurando em 2020 um valor acrescentado bruto de 3800 milhões de euros e criando mais 100000 postos de trabalho a acrescentar aos 35000 já existentes no setor e que serão consolidados. Dos 135000 postos de trabalho do setor, 45000 serão diretos e 90000 indiretos. O impacto no PIB passará de 0,8% para 1,7% até 2020;
- v) Desenvolver um *cluster* industrial associado à promoção da eficiência energética assegurando a criação de 21000 postos de trabalho anuais, gerando um investimento previsível de 13000 milhões de euros até 2020 e proporcionando exportações equivalentes a 400 milhões de euros;
- vi) Promover o desenvolvimento sustentável criando condições para o cumprimento de metas de redução de emissões assumidas por Portugal no quadro europeu.

Esta estratégia atualiza a estratégia definida pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005, de 24 de outubro, elucidando uma agenda para a competitividade, o crescimento e a independência energética e financeira do país através da aposta nas energias renováveis e da promoção integrada da eficiência energética, garantindo a

segurança de abastecimento e a sustentabilidade económica e ambiental do modelo energético preconizado, contribuindo para a redução das emissões de CO₂, produzindo benefícios para a sociedade.

- **A Portaria n.º 1316/2010, de 28 de Dezembro**, que aprova o Regulamento da Estrutura de Gestão do plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética. Este regulamento define a estrutura de gestão do PNAEE “Portugal Eficiência 2015”, identificando os seus órgãos e respetivas competências, as entidades envolvidas, a atribuição de responsabilidades na gestão e na execução das medidas, os processos de monitorização e controlo dos resultados, e os procedimentos para a introdução de novos programas e medidas. O PNAEE organiza-se em quatro áreas específicas predominantemente tecnológicas (transportes, residencial e serviços, indústria e Estado), e em três áreas transversais (comportamentos, fiscalidade, incentivos e financiamento), que por sua vez se dividem em programas e estes em medidas, que estão descritas na Resolução do Conselho de Ministros n.º 80/2008, de 20 de Maio.

- **A Portaria n.º 26/2011, de 10 de janeiro**, que aprova o Regulamento de Gestão do Fundo de Eficiência Energética (FEE) e estabelece o regime de apoio financeiro às medidas e programas elegíveis pelo FEE, a realizar no âmbito do PNAEE, que devidamente comprovado contribua para a eficiência energética. O regulamento do FEE destina-se a coordenar os processos de financiamento e apoio a projetos enquadrados nos critérios do artigo 4.º que visem a implementação de programas e medidas, que conduzam à redução da procura de energia final de uma forma energeticamente eficiente e otimizada, contribuindo para o cumprimento dos objetivos nacionais relativamente a metas de eficiência energética.

- **A Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, de 10 de abril**, que aprova o PNAEE para o período entre 2013 e 2016 e o PNAER para o período entre 2013 e 2020.

Com esta resolução pretende alcançar-se os seguintes objetivos:

- i) Assegurar a continuidade das medidas para garantir o desenvolvimento de um modelo energético com racionalidade económica, que assegure custos de energia sustentáveis, que não comprometam a competitividade das empresas nem a qualidade de vida dos cidadãos;
- ii) Assegurar a melhoria substancial na eficiência energética do País, através da execução do PNAEE e do PNAER, após a conclusão da respetiva revisão, do reforço da coordenação dos atuais programas de apoio À eficiência

energética (Fundo de Eficiência Energética, Plano de Promoção de Eficiência no Consumo de Energia Elétrica, Fundo de Apoio à Inovação, fundos do Quadro de Referência Estratégica Nacional), reforçando-se a sua dotação, e da conclusão da execução do Programa de Eficiência Energética na Administração Pública – ECO.AP;

- iii) Manter o reforço da diversificação das fontes primárias de energia, sendo os investimentos em renováveis avaliados e apresentado um novo modelo de remuneração para que as tecnologias mais eficientes mantenham um papel relevante.

2.5. Auditoria energética

Atualmente é atribuído à energia um papel fundamental à competitividade industrial. Esta deve ser considerada um fator de produção tão importante como as matérias-primas, o trabalho e o capital. Desta forma é importante gerir a energia de acordo com os recursos humanos e financeiros que as entidades possuem. No entanto a utilização racional e eficiente de energia não significa redução da sua produção ou eliminação de serviços existentes, significa que a produção se mantém, baixando o consumo energético, IXUS Energia (2013).

Com o aumento de instalações CIE, foi necessário a adoção de SGCIE. Do SGCIE resulta a realização de auditorias energéticas e a elaboração de planos de racionalização dos consumos de energia (PREn). Uma auditoria energética consiste num estudo detalhado e exaustivo de todos os processos produtivos relacionados com o uso da energia, que recolhe elementos necessários à identificação dos principais equipamentos consumidores de energia. A realização de auditorias energéticas contribui para a redução da intensidade energética (IE) de uma forma eficiente e racional. Deste modo é possível determinar com algum detalhe os investimentos necessários para a execução de medidas, bem como a rentabilidade e a viabilidade das mesmas. Da realização da auditoria energética, resulta um documento de consultoria, presente no RGCE (Regulamento de Gestão do Consumo de energia), que obriga o responsável da instituição a ser reconhecido pela DGE (Direção Geral de Energia) e pelo CAE (Classificação das Atividades Económicas) a que a instalação se insere, Águas (2003), IXUS Energia (2013) e Magueijo *et al.*, (2010).

Uma auditoria energética é elaborada com o intuito de alcançar os seguintes pontos, Despacho 17449 (2008):

- 1) Quantificar os consumos energéticos e a sua importância no custo final dos produtos;
- 2) Efetuar uma inspeção visual dos equipamentos e ou sistemas consumidores de energia, efetuando as medições necessárias;
- 3) Esclarecer como é transformada a energia e quais os seus custos;
- 4) Efetuar um levantamento e caracterização detalhados dos principais equipamentos consumidores de energia, sobretudo dos equipamentos com maior potência instalada, quer elétrica, quer térmica;
- 5) Obter diagramas de carga elétricos dos sistemas considerados grandes consumidores de eletricidade;
- 6) Determinar a eficiência energética de geradores de energia térmica;
- 7) Verificar o estado das instalações de transporte e distribuição de energia;
- 8) Verificar o bom funcionamento dos aparelhos de controlo e regulação do equipamento de conversão e utilização de energia;
- 9) Realizar balanços energéticos e de massa aos principais equipamentos consumidores de energia;
- 10) Determinar os consumos específicos de energia durante o período de realização da auditoria, para posterior comparação com os valores mensais e anuais e deteção de eventuais variações sazonais;
- 11) Determinar o quociente entre o consumo energético total (medido em quilogramas equivalentes de petróleo – kgep) e o Valor Acrescentado Bruto (VAB) da atividade empresarial diretamente ligada à instalação consumidora de energia, bem como o consumo específico de energia (kgep/unidade de produção);
- 12) Identificar e quantificar as possíveis áreas onde as economias de energia são viáveis, como resultado das anomalias detetadas e medições efetuadas;
- 13) Definir intervenções com viabilidade técnico-económica, que conduzam ao aumento da eficiência energética e ou à redução da fatura energética;
- 14) Definir as linhas orientadoras para a implementação ou melhoria de um esquema operacional de Gestão de Energia.

De forma a verificar a conformidade energética de uma entidade é importante realizar auditorias energéticas periodicamente. A realização periódica de auditorias apresenta benefícios tais como:

- i) Aumento da eficiência do sistema energético auditado;
- ii) Redução da fatura energética da instalação;
- iii) Contribui para o aumento do tempo de vida útil dos equipamentos;
- iv) Melhor imagem corporativa, diminuindo os efeitos nefastos no ambiente;
- v) Aumento da produtividade da instalação, independentemente do setor de atividade;
- vi) Maior competitividade no mercado (interno e externo).

No SGCIE também deve constar um PREn. Este por si deve conter:

- i) Metas relativas à intensidade energética e carbónica e ao consumo específico de energia, que devem incluir obrigatoriamente medidas que visem a racionalização do consumo de energia. O ano de referência deverá ser o ano civil anterior à data da realização da auditoria energética;
- ii) Na determinação de metas deverá ser utilizado o valor do VAB, a preços constantes, relativos ao ano de referência e os valores de produção expectáveis;
- iii) Indicações de modificações ou substituições a introduzir nos equipamentos ou na instalação existentes, quantificando as reduções de consumo consequentes, o respetivo programa de implementação e o impacto na redução dos indicadores de eficiência energética da instalação;
- iv) Hipóteses de produção combinada de energia elétrica e térmica, de valorização dos resíduos energéticos e da substituição dos produtos derivados do petróleo;
- v) O PREn deverá ser elaborado de forma que permita, em qualquer momento da sua aplicação, uma fácil verificação dos desvios.

Os Relatórios de Execução e Progresso (REP) também fazem parte dos documentos que surgem do SGCIE. Neste caso o operador da instalação CIE deve:

- i) Manter um registo atualizado pelo qual se possam verificar, periodicamente os desvios em relação às metas estabelecidas;
- ii) Apresentar um REP, a cada 2 anos de vigência do Acordo de Racionalização dos Consumos de Energia (ARCE), sobre o seu estado de implementação, no período a que respeita o relatório. Em cada um deles devem constar as metas e objetivos

alcançados, desvios verificados e respetiva justificação, bem como, as medidas tomadas ou a tomar para a sua correção;

- iii) Para a avaliação do estado de implementação do ARCE, o REP deverá apresentar informações sobre a eficiência energética da instalação com o recurso aos indicadores definidos no PREn. Estes indicadores deverão ser calculados utilizando o valor do VAB a preços constantes relativos ao ano de referência e os valores de produção obtidos;
- iv) Apresentar à Direção Geral de Energia e Geologia, quando lhe forem solicitados, os registos mencionados na alínea a);
- v) O relatório relativo ao último período de vigência do ARCE deve incluir o balanço final da execução da totalidade do mesmo, considerando-se como REP final.

De forma resumida o SGCIE contem as que constam na figura 2.3.

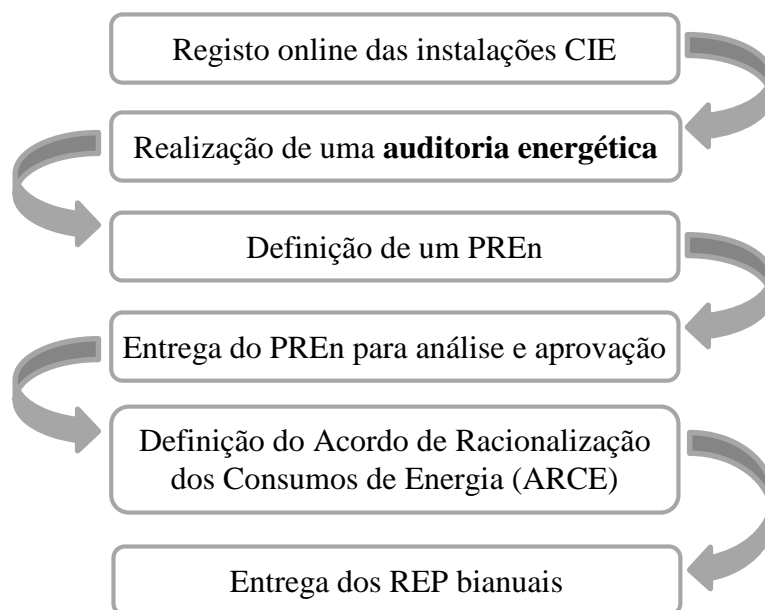


Figura 2.3 - Representação das etapas de um SGCIE resumidamente, {adaptado de EDP PME (2015)}.

Uma instalação é considerada consumidora intensiva de energia (CIE), apenas se os seus consumos de energia forem superiores ou iguais aos valores presentes na tabela 2.1, ADENE - SGCIE (2014).

Tabela 2.1 - Resumo dos limites de consumo intensivo de energia (CIE), {adaptado de ADENE - SGCIE (2014)}.

Tipos de energia	Tep/ano	Equivalência energética
Energia elétrica	1000	4651163 [kWh]
	500	2325581 [kWh]
Fuelóleo	1000	1016 [t]
	500	508 [t]
Gás Natural	1000	928,5 [t] ou 1104837 [Nm ³]
	500	464,25 [t] ou 552419 [Nm ³]
Gás Petrolífero Liquefeito	1000	885 [t]
	500	442,5 [t]

2.5.1. Enquadramento legal relativo a auditorias energéticas

Devido ao aumento do consumo de energia que se fez sentir nos últimos anos nos diversos setores, foi necessário introduzir medidas de forma a diminuir o consumo de energia, bem como incentivar à produção de energia proveniente de fontes renováveis. Neste contexto, a realização de auditorias energéticas, permite verificar o consumo de energia e apresentar propostas de poupança de energia. A realização de auditorias energéticas acarreta a aplicação e cumprimento de legislação. Esta legislação é aplicada a diferentes setores. Por ordem cronológica, a legislação nacional que remete para a realização de auditorias é a seguinte:

- O Decreto-Lei n.º 538/99, de 13 de Dezembro, com algumas alterações impostas pelo Decreto-Lei n.º 313/2001, de 10 de dezembro (determina a execução de auditorias às instalações autorizadas ao abrigo de legislação em vigor, e a sua presença na DGE), estabelece no artigo 23º a obrigatoriedade das instalações de cogeração (processo de produção combinada de energia elétrica e de energia térmica, destinando-se ambas a consumo próprio ou de terceiros) serem sujeitas a auditorias, para verificação das suas condições de funcionamento e do cumprimento dos requisitos estabelecidos naquele conjunto de diplomas.

- **O Despacho n.º 19151/2002, de 28 de agosto**, aprova o Guia para a Realização de Auditorias Energéticas às Instalações de Co-Geração e Guia para a Aceitação e Reconhecimento de Auditorias para a Realização de Auditorias Energéticas às Instalações de Co-Geração.

- **A Portaria n.º 461/2007, de 5 de junho**, que tem como objetivo cumprir o Decreto-Lei 78/2006, de 4 de abril (aprova o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios) definindo uma calendarização da aplicação do Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior (SCE) aos edifícios segundo a sua tipologia, finalidade e área útil. Esta calendarização é feita em três fases. Estão abrangidos pelo SCE os novos edifícios destinados à habitação com área útil superior a 1000 m² e os edifícios de serviços, novos ou que sejam objeto de grandes obras de remodelação, cuja área útil seja superior aos limites mínimos estabelecidos nos n.ºs 1 ou 2 do artigo 27º do RSECE, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de abril, de 1000 m² ou de 500 m², consoante a respetiva tipologia. Estão abrangidos pelo SCE também, todos os edifícios novos, independentemente da sua área ou fim, cujos pedidos de licenciamento ou autorização de edificação sejam apresentados à entidade competente a partir de Julho de 2008.

- **O Despacho n.º 17449/2008, de 27 de junho**, considera todos os processos a realizar no SGCIE. Nos termos da alínea b) do n.º 2 do artigo 19.º do Decreto-Lei n.º 71/2008, de 15 de abril os elementos a considerar no SGCIE são: realização de auditorias energéticas, elaboração de planos de racionalização do consumo de energia (PREn) e relatórios de execução de progresso (REP).

- **A Lei n.º 7/2013 de 22 de janeiro**, que aprova o regime de acesso e exercício das atividades de realização de auditorias energéticas, elaboração de planos de racionalização dos consumos de energia (PREn) e de controlo da sua execução e progresso, mediante a emissão de relatórios de execução e progresso, no âmbito do SGCIE e no âmbito de aplicação do regulamento da gestão do consumo de energia para o setor dos transportes, aprovado pela Portaria 228/90, de 27 de março, alterando o Decreto-Lei n.º 71/2008, de 15 de abril. O Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de Abril regula o SGCIE, com o objetivo de promover a eficiência energética e monitorizar os consumos energéticos de instalações consumidoras intensivas de energia. A Lei n.º 7/2013 de 22 de janeiro tem como âmbito de aplicação os seguintes itens:

- 1) As instalações CIE que no ano civil anterior tenham tido um consumo energético superior a 500 tep, com exceção de instalações de cogeração autónomas dos respetivos consumidores de energia;
- 2) Relativamente às empresas de transportes e de frotas próprias, consumidoras intensivas de energia a aplicação do Decreto-Lei n.º 71/2008 deve ser adaptada de forma a estabelecer legislação específica para o efeito;
- 3) Não se aplica a edifícios que se encontrem sujeitos aos regimes previstos nos Decretos-Lei n.ºs 78/2006, 79/2006 e 80/2006, de 4 de Abril (alterados pelo Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto), com exceção de casos em que os edifícios se encontrem integrados em áreas de instalações consumidoras intensivas de energia;
- 4) Pode aplicar-se ainda a empresas que tem um consumo inferior ao referido no primeiro ponto ou que se encontrem na situação referida no terceiro ponto, que de forma voluntária pretendam celebrar acordos de racionalização de consumo de energia.

O artigo 6.º do Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de abril, refere que:

- 1) A realização de auditorias energéticas é obrigatória em: instalações com consumo de energia igual ou superior a 1000 tep/ano, com uma periodicidade de seis anos, sendo que a primeira destas auditorias deve ser realizada no prazo de quatro meses após o registo; e em instalações com consumo de energia igual ou superior a 500 tep/ano mas inferior a 1000 tep/ano, com uma periodicidade de oito anos, sendo que a primeira destas auditorias deve ser realizada no ano seguinte ao registo.
- 2) As auditorias incidem sobre as condições de utilização da energia, bem como a conceção e o estado da instalação, devendo ainda ser colhidos os elementos necessários à elaboração do PREn e à verificação do seu subsequente cumprimento.
- 3) O operador pode realizar as auditorias que considerar necessárias à promoção de eficiência energética da instalação consumidora intensiva.

O artigo 7.º do Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de abril, faz referência ao PREn:

- 1) O PREn é elaborado com base nos relatórios das auditorias energéticas obrigatórias. Estes devem prever a implementação nos primeiros três anos, de todas as medidas identificadas com período de retorno do investimento

inferior ou igual a cinco anos, no caso das instalações com consumo igual ou superior a 1000 tep/ano, ou com um período de retorno do investimento inferior ou igual a três anos no caso das restantes instalações.

- 2) O PReN deve estabelecer metas relativas à intensidade energética (IE), intensidade carbónica (IC) e consumo específico de energia (CEE), com base nas medidas previstas no número anterior, tendo em conta os seguintes indicadores:

$$\text{Intensidade Energética (IE)} = \frac{\text{Consumo Total de Energia [tep]}}{\text{Valor Acrescentado Bruto [€]}}$$

$$\text{Intensidade Carbónica (IC)} = \frac{\text{Emissões de GEE [kg CO}_2\text{e]}}{\text{Consumo Total de Energia [tep]}}$$

$$\text{Consumo Específico de Energia (CEE)} = \frac{\text{Consumo Total de Energia [tep]}}{\text{Produção [unidade de produção]}}$$

- a) *IE* - indicador medido através do quociente entre o consumo total de energia (com apenas 50% da energia resultante de resíduos endógenos, da entidade, e de outros combustíveis renováveis) e o Valor Acrescentado Bruto (VAB) das atividades empresariais ligadas diretamente a essas instalações industriais;
- b) *IC* – indicador medido pelo quociente entre o valor das emissões de gases de efeito de estufa resultantes da utilização das diversas formas de energia no processo de produção e respetivo consumo total de energia;
- c) *CEE* – indicador medido pelo quociente entre o consumo total de energia (com apenas 50% da energia resultante de resíduos endógenos e de outros combustíveis renováveis) e o volume de produção.

A Lei n.º 7/2013 de 22 de janeiro introduz algumas alterações relativamente ao Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de Abril. Esta nova lei estabelece ainda:

- 1) Alterações ao sistema de gestão dos consumos de energia por empresas e instalações consumidoras intensivas;
- 2) A presente lei estabelece ainda:
 - a) Um regime de acesso e exercício de atividades de realização de auditorias energéticas, de elaboração de planos de racionalização dos

consumos de energia e de controlo da sua execução e progresso no âmbito do SGCIE;

- b) Um regime de acesso e exercício das atividades de realização de auditorias energéticas, de elaboração de planos de racionalização dos consumos de energia e de controlo da sua execução e progresso, no âmbito da execução do Regulamento da Gestão do Consumo de Energia para o setor dos Transportes, aprovado pela Portaria n.º 228/90, de 27 de março;
- 3) Os regimes referidos no número anterior incorporam a disciplina do Decreto-Lei 92/2010, de 26 de julho, que transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2006/123/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 12 de dezembro de 2006, relativa aos serviços no mercado interno, e da Lei 9/2009, de 4 de março, que transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2005/36/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 7 de setembro de 2005, relativa ao reconhecimento das qualificações profissionais e do Decreto-Lei n.º 92/2011, de 27 de julho, que criou o Sistema de Regulação de Acesso a Profissões (SRAP).

As alterações ao Decreto-Lei n.º 71/2008, de 15 de abril, estão presentes nos artigos 3.º, 4.º, 8.º, 9.º, 10.º, 11.º, 18.º, 19.º e 21.º.

- **O Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto**, que altera os Decretos-Lei n.º 78/2006 (aprova o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios), n.º 79/2006 (aprova o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios - RSECE) e o n.º 80/2006 (aprova o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios - RCCTE). O presente diploma pretende assegurar a melhoria do desempenho energético dos edifícios através do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), que integra o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Este diploma transpõe para a ordem jurídica nacional a Diretiva n.º 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios.

2.5.2. Metodologia da auditoria

A realização de uma auditoria energética requer uma metodologia bem definida, de forma a fazer cumprir todos os objetivos que dela advém.

A metodologia de uma auditoria energética inclui:

- i) Uma análise progressiva que demonstre onde e como é utilizada a energia nas instalações;
- ii) Uma avaliação técnica e económica onde se possam identificar e quantificar as oportunidades de eficiência energética com relações custo-benefício favoráveis, de forma a não afetar a produção e a qualidade do produto.

O procedimento para desenvolver uma auditoria energética envolve duas fases distintas, Saraiva (2010):

- 1) Na primeira fase é realizado o trabalho de campo, levantamento dos dados referentes ao setor em estudo;
- 2) Na segunda fase é efetuada a análise e tratamento dos dados recolhidos.

A **primeira fase** consiste na recolha de dados, que englobam:

- i) Descrição dos processos de fabrico, regimes de funcionamento e descrição das instalações incluindo a sua planta;
- ii) Produções efetuadas na instalação: capacidades instaladas, níveis de produção verificados no período da realização da auditoria, previsões de produção para anos futuros e Valor Acrescentado Bruto (VAB);
- iii) Consumos e fatura energética, e outras formas de energia utilizadas, consumo de cada instalação, diagramas de consumos, consumos específicos e faturas;
- iv) Descrição dos setores principais, indicando o tipo de energia utilizado bem como os principais equipamentos existentes no setor;
- v) Principais infraestruturas energéticas que existem na instituição.

A **segunda fase** consiste no tratamento e análise de todos os dados recolhidos. Esta fase permite:

- i) Analisar as condições de funcionamento dos equipamentos de conversão e de utilização de energia, bem como a análise de redes de transportes de energia;

- ii) Realizar balanços energéticos e de massa nos principais equipamentos;
- iii) Determinar consumos específicos de energia por tipo ou famílias de produto acabado, e também os indicadores de intensidade energética (IE) e intensidade carbónica (IC);
- iv) Identificar possíveis medidas de racionalização e de economia de energia, viáveis do ponto de vista técnico e económico;
- v) Estimar o potencial de economia de energia que corresponde às medidas e aos investimentos identificados;
- vi) Descrever as medidas e os investimentos necessários para obter potenciais economias, identificando custos estimados e a avaliação da viabilidade económica dos mesmos. Para tal poderá recorrer-se a estudos de mercado, baseados nas especificações dos sistemas e equipamentos;
- vii) Elaborar um relatório da auditoria que contenha toda a informação e documentação produzida nesta fase.

O presente trabalho utiliza dados recolhidos através da realização de auditorias energéticas, identificando sistemas de aproveitamento de energia viáveis do ponto de vista técnico e económico. No capítulo 4 serão apresentados os casos de estudo. Para cada caso de estudo é avaliado o potencial de economia de energia, o investimento necessário e verificada a viabilidade económica dos mesmos.

As duas fases de elaboração de uma auditoria energética acima descritas podem dividir-se em 4 etapas, tal como apresentado na figura 2.4.

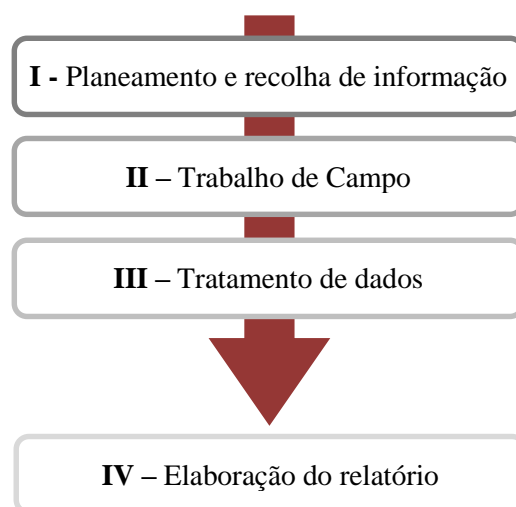


Figura 2.4 - Proposta de metodologia para a realização de uma auditoria, {adaptado de IXUS Energia (2013)}.

No que respeita ao setor industrial uma auditoria pode ser elaborada da forma que o auditor assim o entender. A figura 2.5 ilustra uma proposta possível de um procedimento para a realização de uma auditoria energética no setor industrial, no entanto dependendo do tipo de indústria algumas etapas podem mudar.

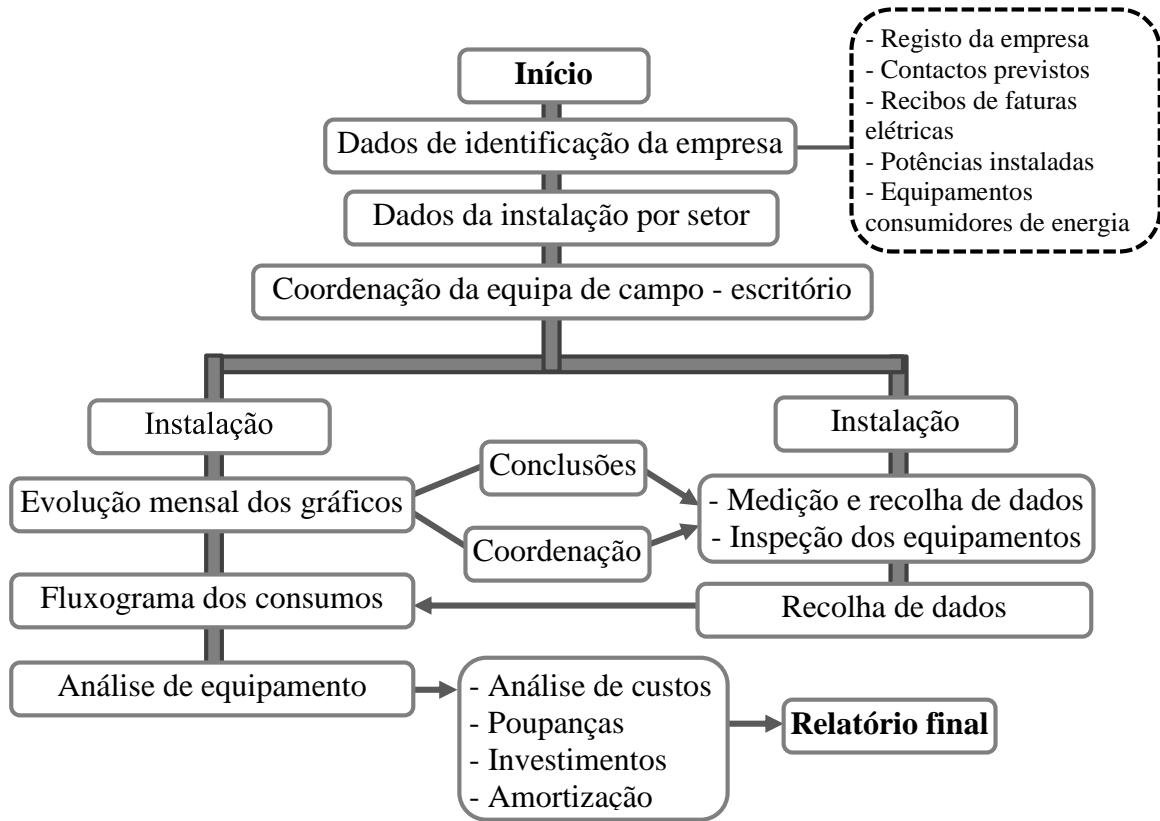


Figura 2.5 - Procedimento para a realização de uma auditoria energética na indústria {adaptado de Magueijo et al., (2010)}.

2.5.3. Tipos de auditoria

O conceito auditoria pode aplicar-se a diferentes circunstâncias e setores. Dependendo do tipo de avaliações que se pretende realizar e do tipo de resultados que se pretendem obter, as auditorias energéticas podem ser classificadas quanto ao processo ou relativamente à forma de intervenção, Brandão (2011).

Relativamente ao processo as auditorias energéticas podem ser:

- **Auditorias gerais ou sintéticas:** consistem em sínteses de consumos por vetores energéticos e encargos. Geralmente é feita com recurso à faturação das diferentes fontes de energia, permitindo uma caracterização global dos consumos de energia e respetivos custos financeiros.

- **Auditorias genéricas/deambulatórias:** consistem em vistorias às condições de funcionamento das instalações principais (consistindo numa lista, “*check-list*”).
- **Auditorias detalhadas ou analíticas:** são auditorias que analisam os consumos por tipo de equipamento, exigindo algumas monitorizações e determinação de padrões de funcionamento.
- **Auditorias tecnológicas:** consistem em alterações de processos. Os resultados deste tipo de auditorias permitem apresentar e avaliar soluções alternativas em termos de processo e tomar decisões sobre possíveis alterações.

Quanto à forma de intervenção as auditorias energéticas podem ser classificadas em, Gonçalves (2008):

- **Auditorias internas:** são atividades independentes, de garantia e consultoria, cujo objetivo é acrescentar valor e melhorar as operações das organizações. Este tipo de auditorias é efetuado por profissionais da empresa. Estas possuem algumas responsabilidades tais como: informar a administração, coordenar as atividades com outras de forma a atingir mais facilmente os objetivos da auditoria e redução de custos;
- **Auditorias externas:** são um conjunto de procedimentos técnicos com o objetivo de emitir um parecer sobre a adequação com que é apresentado o património e financeiro da empresa, o resultado das operações, as alterações de património líquido e as origens e aplicações de recursos da entidade auditada. São auditorias executadas por um profissional independente, sem qualquer ligação com a empresa.

As auditorias internas e externas são diferentes no ponto de vista de avaliação. Desta forma é possível verificar as diferenças entre elas, como mostra a tabela 2.2, Galo e Barbosa (2008).

Tabela 2.2 - Principais diferenças entre auditorias internas e externas.

Tipo de auditoria	Auditoria interna	Auditoria externa
Quem realiza a auditoria	Um funcionário da empresa	Um profissional independente
Objetivo	Atender as necessidades da administração	Atender as necessidades de terceiros no que respeita a fidedignidade de informações
Revisão das operações e controlo interno	Realizado para melhor desenvolver e induzir ao cumprimento de políticas e normas referentes a assuntos financeiros	Realizado para determinar a extensão do exame e a fidedignidade das demonstrações financeiras
Subdivisão do trabalho	Subdividido em relação às linhas de responsabilidade administrativa	Subdividido em relação às principais contas de balanço patrimonial e das demonstrações de resultado
Auditor	Preocupa-se diretamente com a interceção e prevenção de fraude	O auditor não se preocupa diretamente com a interseção e prevenção de fraude, a não ser que haja indícios de fraude
Tipo de auditor	Auditor independente em relação às pessoas, no entanto é subordinado às necessidades e desejos da administração da empresa	O auditor deve ser independente em relação à administração da empresa
Periodicidade	A revisão das atividades é contínua	A revisão das atividades é periódica (geralmente anual)

2.5.4. Formato do Relatório da auditoria

A fase final de uma auditoria energética consiste na elaboração de um relatório. Devem constar nesse relatório todos os dados do levantamento a caracterização do edifício, informações relevantes de funcionamento, e as análises efetuadas. Todos estes aspetos devem estar presentes num documento que tem uma estrutura semelhante à seguinte:

- 1) Introdução
- 2) Enquadramento legislativo
- 3) Metodologia
- 4) Informação sobre o edifício e a atividade desenvolvida no mesmo
- 5) Caracterização energética do edifício
 - a) Vetores Energéticos utilizados

- b) Consumo de energia elétrica
 - c) Consumo de energia térmica
 - d) Desagregação dos consumos de energia
- 6) Caracterização dos sistemas energéticos
- a) Aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC)
 - b) Iluminação
 - c) Equipamentos
 - d) Água quente para consumo
- 7) Medidas de racionalização energética
- 8) Conclusão

No entanto cada entidade possui uma forma de apresentar todos os seus resultados, podendo assim o formato anteriormente mencionado ser diferente para cada entidade, Saraiva (2010).

2.6. Estudos antecedentes

De modo a identificar possíveis medidas de economia de energia, viáveis do ponto de vista técnico e económico foram analisados um conjunto de auditorias energéticas em diferentes setores. Estes estudos permitem identificar o que foi avaliado em cada setor, a metodologia que foi utilizada e as propostas de melhoria que cada autor considerou indicadas.

2.6.1. Caso de estudo n.º 1

Caso de estudo n.º 1 intitulado: “Estudo de potencial de melhoria da eficiência energética nos edifícios da Universidade do Porto” da autoria de Paulo Roberto Moreira Saraiva. Este estudo é referente a um setor público (edifícios da Universidade do Porto), Saraiva (2010).

A tabela 2.3 apresenta um resumo do caso de estudo n.º 1, incluindo: fatores considerados na análise; metodologia utilizada; propostas de melhoria e propostas concretizadas.

Tabela 2.3 - Caso de estudo n.º 1.

Fatores considerados em análise
- Análise dos resultados de auditorias energéticas edifícios da Universidade do Porto - Análise da qualidade do ar interior dos edifícios - Análise dos planos de manutenção dos edifícios
Metodologia utilizada
1.º Trabalho de campo e levantamento de dados (Potência instalada, nível de produção, previsões futuras, energias utilizadas, consumos e equipamentos) 2.º Análise e tratamento de dados sobre as condições de funcionamento dos equipamentos 3.º Balanços de massa e energia aos equipamentos principais 4.º Determinar os consumos específicos de energia por tipo e as IE e IC 5.º Identificar medidas de racionalização e economia de energia 6.º Propor medidas e investimentos necessários para obter potenciais economias 7.º Elaborar um relatório de auditoria
Propostas de melhoria
- Melhorar o funcionamento dos equipamentos - Racionalizar o consumo de energia elétrica - Promover a diminuição do consumo de gás natural
Propostas concretizadas
- Das propostas apresentadas nenhuma foi concretizada

2.6.2. Caso de estudo n.º 2

O caso de estudo n.º 2 intitulado: “Auditoria e otimização energética de uma unidade fabril – Logoplaste Mealhada” insere-se no setor industrial (edifícios comerciais ou de serviços) é da autoria de Miguel Sérgio Martins Vieira.

A tabela 2.4 apresenta o resumo do caso de estudo n.º 2, no qual o autor pretende avaliar a redução da fatura energética da unidade fabril em questão e melhorar a sua eficiência energética reduzindo os consumos associados aos consumos energéticos, Vieira (2009).

Tabela 2.4 - Caso de estudo n.º 2.

Fatores considerados em análise
<ul style="list-style-type: none">- Redução da fatura energética da unidade fabril- Melhorar a eficiência energética da unidade fabril
Metodologia utilizada
<ol style="list-style-type: none">1. Identificar os principais consumidores de energia, verificar a existência de recuperação de calor nos sistemas utilizados a indústria, definir regimes de funcionamento dos vários setores da indústria e levantar dados de produções mensais2. Analisar registos dos consumos das diversas formas de energia utilizadas na unidade fabril3. Diminuir a fatura energética da unidade fabril, identificar as principais áreas de intervenção tendo em conta a racionalização dos consumos energéticos
Propostas de melhoria
<ul style="list-style-type: none">- Arrefecimento e desumidificação dos moldes através da instalação de uma central de bombagem ajustada à instalação- Arrefecimento do ar, feito com água proveniente das torres de arrefecimento existentes na fábrica- Arrefecimento do óleo das máquinas feito por duas torres de arrefecimento e 2 <i>Dry Coolers</i>
Propostas concretizadas
<ul style="list-style-type: none">- Arrefecimento do ar feito com água proveniente das torres de arrefecimento existentes na fábrica- Arrefecimento do óleo das máquinas feito por 2 torres de arrefecimento e 2 <i>Dry Coolers</i> (óleo das máquinas arrefecido apenas com 3 torres de arrefecimento)
Dimensionamentos propostos
<ul style="list-style-type: none">- Sistema auxiliar de cogeração com turbinas a gás natural
Propostas futuras
<ul style="list-style-type: none">- Instalação de uma válvula de equilíbrio dinâmico na máquina de 72 cavidades;- Instalação de uma nova central de bombagem ajustada à instalação atual- Substituição dos refrigeradores atuais por refrigeradores de absorção- Aplicar junto de cada máquina de injeção uma extração de ar para a remoção de calor produzido para o aquecimento dos secadores de PET- Colocar os secadores de PET em salas devidamente climatizadas- Pedir um ponto de ligação à rede energética nacional

2.6.3. Caso de estudo n.º 3

O caso de estudo n.º 3 intitulado de “Análise do Desempenho Energético de Cozinhas Industriais” no setor da restauração (complexo alimentar do Polo III da Universidade de Coimbra) da autoria de Alexandra Filipa Parente Sousa.

A tabela 2.5 apresenta o resumo do caso de estudo n.º 3, no qual a autora pretende racionalizar o uso de recursos energéticos nos edifícios, caraterizar e quantificar os recursos energéticos utilizados neste setor (gás natural, eletricidade e água) e propor medidas de redução de consumos de energia, fatura energética e diminuição de GEE, Sousa (2011).

Tabela 2.5 - Caso de estudo n.º 3.

Fatores considerados em análise
<ul style="list-style-type: none">- Racionalização dos consumos energéticos- Caraterização dos recursos energéticos utilizados (Gás Natural, eletricidade e água);- Propor medidas de redução de consumos de energia
Metodologia utilizada
<ul style="list-style-type: none">- Análise global do consumo de recursos energéticos- Simulações energéticas e dinâmica do edifício e do sistema solar térmico- Recolha e processamento dos dados e consumo de recursos- Apresentação e discussão dos resultados- Apresentação de medidas de otimização energética
Propostas de melhoria
<ul style="list-style-type: none">- Implementar um sistema de contagem de energia elétrica <i>on-line</i>- Promover ações de sensibilização sobre a utilização racional de energia- Adquirir baterias e condensadores- Implementar recursos renováveis (sistema de minigeração fotovoltaico)- Implementar contadores de água (águas quentes sanitárias (AQS) e água fria)- Reduzir consumos residuais nos equipamentos presentes na cozinha- Substituir alguns equipamentos elétricos para gás natural- Efetuar uma ligação de AQS para a máquina de lavar louça- Substituir os <i>GreenTubes Eco-Balastro</i> suporte T8-T5.- Substituir lâmpadas de halogéneo e incandescentes por LED (<i>Light Emitting Diode</i>)- Implementar relógios digitais para regular os horários do sistema de ventilação- Climatizar e instalar VEVs (variadores de velocidade)
Propostas concretizadas
<ul style="list-style-type: none">- Das propostas apresentadas nenhuma foi concretizada

Tal como é possível verificar através da análise dos casos de estudo apresentados, todos eles apresentam propostas de melhoria, todavia na maior parte dos casos estas propostas não são implementadas. Existem algumas propostas de melhoria apresentadas, todavia não é possível identificar um estudo técnico-económico sobre as mesmas.

Tal como seria de esperar as propostas de melhoria sugeridas dependem muito de caso para caso.

O capítulo seguinte (capítulo 3) é dedicado à caracterização da eficiência energética na indústria, sendo dada especial ênfase aos setores cerâmico e têxtil e vestuário por serem estes os setores que mais contribuem para o consumo de energia na indústria.

3. Eficiência energética na Indústria

3.1. Introdução

O presente capítulo é dedicado á caracterização dos diferentes setores da indústria nacional, incidindo maioritariamente no setor cerâmico e no setor têxtil e vestuário, pois são estes os setores que mais contribuem para o consumo de energia em Portugal.

Na indústria nacional é cada vez mais necessária uma atitude ativa perante a eficiência energética dos equipamentos e processos, de modo a verificar a adequabilidade técnico-económica e implementação de novas soluções tecnológicas.

As medidas que conduzem a uma maior eficiência energética nos diferentes setores da indústria transformadora que serão apresentados neste capítulo são baseadas principalmente nos documentos (*BAT – Best Available Technologies*) publicados pela União Europeia e por países como a Espanha, a Holanda, e os Estados Unidos da América através do *U.S Department of Energy*, Magueijo *et al.*, (2010).

As medidas de eficiência energética na indústria que serão apresentadas neste capítulo classificam-se em: i) medidas transversais, e ii) medidas específicas de cada setor da indústria transformadora.

No presente capítulo serão caracterizados os setores cerâmico e têxtil e vestuário, identificando quais os processos utilizados que consomem mais energia, apresentando medidas transversais à indústria que englobam sistemas acionados por motores elétricos, produção de calor e frio, iluminação e eficiência do processo industrial/outros. São ainda apresentadas propostas de melhoria de eficiência energética, de forma a identificar medidas técnico-económicas viáveis.

3.2. Caracterização dos setores

A melhoria da eficiência energética nos diferentes setores da indústria nacional requer uma atitude pró-ativa no sentido de desenvolver equipamentos, processos e novas tecnologias. As fontes de energia, e os equipamentos consumidores de energia são bastante variados, consoante o setor industrial. Neste contexto, com a presente secção pretende-se

efetuar uma caracterização dos principais setores consumidores intensivos de energia. Todavia ainda não existe uma caracterização sistemática para todos os setores.

Dos documentos referentes às *BAT* retirou-se a informação referente a dois conjuntos de medidas que se classificam como: medidas transversais e medidas específicas de cada setor na indústria transformadora. Os setores industriais em Portugal dividem-se em: alimentação, bebidas e tabaco; cerâmica; cimento; madeira e artigos de madeira; metalo-eletrônica; metalurgia e fundição; papel; químico, plástico e borracha; calçado e curtumes; siderurgia; têxtil e vestuário e vidro. Nestes setores são aplicadas as medidas específicas, pois cada setor pode necessitar de uma medida de eficiência energética diferente, visto que os processos utilizados nestes setores diferem consoante o setor em que se inserem, Magueijo *et al.*, (2010).

3.2.1. Indústria cerâmica em Portugal

A indústria cerâmica utiliza como matéria-prima a argila. Em Portugal localiza-se maioritariamente no litoral, norte e centro do país, sendo que esta localização está estruturada de acordo com a exploração de matérias-primas utilizadas. Os distritos com maior capacidade de energia instalada são Aveiro, Leiria e Lisboa, APICER (2012).

Este setor, em Portugal, engloba três subsetores: cerâmica de construção, cerâmica utilitária e decorativa e cerâmica técnica.

A tabela 3.1 mostra o produto final de cada subsetor cerâmico acima apresentado:

Tabela 3.1 - Indústria cerâmica e os seus subsetores.

Indústria cerâmica			
Cerâmica de construção		Cerâmica utilitária e decorativa	Cerâmica técnica
Estrutural	Acabamento		
- Telha	- Pavimento	- Porcelana	- Refratário
- Tijolo	- Revestimento	- Fiança	- Eletrotécnico
- Abobadilha	- Sanitário	- Grés	

A indústria cerâmica é classificada como CIE, principalmente nos processos de atomização, secagem e cozedura. Sendo a energia térmica a forma de energia mais consumida nos diferentes subsetores da indústria cerâmica.

No subcapítulo que se segue serão descritos os principais equipamentos consumidores intensivos de energia que estão integrados nos processos de atomização, secagem e cozedura.

3.2.1.1. Atomização e secagem

A secagem por atomização é um processo utilizado na produção de pó para o fabrico de pavimento, revestimento e louça. É constituído principalmente por um sistema de evaporação de água, na qual uma corrente de ar quente seca a barbotina quase instantaneamente. O pó que é atomizado é recolhido no fundo do atomizador e o pó mais fino é levado pelo ar de exaustão e recuperado num sistema de separação por ciclones. O ar utilizado na secagem, normalmente, é produzido por geradores de ar quente com queima direta ou através de ar quente recuperado de fornos.

A água contida na pasta para a produção de cerâmicos, deixa de ter utilidade, após a operação unitária de conformação, assim é necessário eliminá-la gradualmente e na maior quantidade possível para que se possa efetuar a cozedura dos produtos de forma eficiente. Os produtos, normalmente, entram no secador em contracorrente com o ar de secagem. O ar utilizado à entrada do secador é mais saturado, sendo a sua temperatura mais baixa, uma vez que as necessidades de calor não são tao grandes, no entanto a temperatura no final deve ser mais elevada para promover a transferência de calor e evaporar a água mais facilmente de forma a não danificar o material. A eficiência energética dos secadores pode variar entre as 1300 e as 2000 kcal/kg de produto seco, dependendo da massa do produto, velocidade, temperatura de secagem e quantidade de água a retirar do produto, APICER (2012).

Existe uma grande variedade de secadores na indústria cerâmica, que possuem tecnologias e configurações bastante diferentes, dependendo do tipo de produto a secar.

Na indústria cerâmica podem encontrar-se os seguintes secadores:

- 1) **Secador rápido (“Anjou”)**: utilizado na secagem de telhas, tijolos ou abobadilha. Podem conter uma ou mais passagens de material por câmaras com condições de secagem distintas. Caraterizam-se pela velocidade elevada de evaporação superficial e pela possibilidade de formação de elevados gradientes de humidade e de contração do produto.
- 2) **Secadores horizontais de rolos**: secador modular que permite ser dimensionado para a capacidade produtiva necessária. São utilizados para a secagem de pavimento e revestimento. São equipados com ventilador centrífugo de recirculação, queimador em módulos

automático, válvula reguladora de entrada de ar ambiente e válvula reguladora nas tubagens de recirculação.

3) Secadores rápidos verticais de prateleiras: utilizados na produção de azulejos. O material é introduzido num único sentido mediante a rotação simultânea dos rolos do plano de carga e descarga. Estes secadores são preparados para receber ar quente proveniente de outras fases do processo. Os secadores deste tipo estão divididos em três zonas de secagem:

- **Zona 1:** Passagem por um fluxo de ar quente, proveniente de um gerador de ar quente, que permite que o material seja rapidamente levado à temperatura de secagem;

- **Zona 2:** Passagem por um fluxo de ar quente proveniente do 2º queimador em função da temperatura existente no secador e da temperatura de secagem requerida pelo material;

- **Zona 3:** Passagem por ar a temperatura controlada, conseguida devido à mistura de ar quente e frio na zona interior do secador.

4) Secadores de túnel: constituídos por diversos módulos dispostos num túnel, no qual o material se vai deslocando de um extremo para o outro, submetendo-se a uma variação de temperatura e humidade, onde o ar quente circula em contracorrente com o material. Em determinados secadores deste tipo o ar volta a circular permitindo uma utilização mais eficiente da quantidade de ar aquecida para este processo. O ar é agitado por ventiladores colocados em cada um dos módulos que constituem o secador. O consumo dos secadores de túnel pode variar de acordo com o tipo de material a secar.

5) Secadores estáticos de câmaras: constituídos por um conjunto de câmaras de secagem independentes na sua regulação. Neste tipo de câmaras o material a secar não se desloca, desta forma o ar quente é distribuído pelo teto da câmara através de distribuidores e é insuflado no meio do material por ventiladores fixos. Cada câmara é independente das outras. Devido à flexibilidade de produção, estes secadores são utilizados para louça utilitária, decorativa e sanitária.

3.2.1.2. Cozedura

O processo de cozedura consiste em alterar química e fisicamente as propriedades do material, conferindo-lhe as propriedades requeridas para o produto final. O material que fica sujeito a este processo posteriormente já foi seco, vidrado ou decorado. Para obter o produto final desejado a indústria cerâmica dispõe de diversos tipos de fornos, APICER (2012).

- 1) **Fornos contínuos em túnel de queima direta ou chama livre:** nestes fornos o produto é exposto diretamente à chama. São utilizados principalmente na cozedura de louça sanitária e porcelana. Estão adaptados para temperaturas e produções elevadas.
- 2) **Fornos contínuos em túnel e de rolos:** normalmente equipados com queimadores de alta velocidade, em diversos módulos de controlo de temperatura. São fornos adaptados a temperaturas e produções elevadas.
- 3) **Fornos intermitentes:** são geralmente aquecidos por queima direta de gás natural ou propano e revestidos por tijolo refratário ou fibra cerâmica. O calor perdido neste tipo de fornos pode ser utilizado para pré aquecimento do ar de combustão através da utilização de um recuperador de calor. São fornos flexíveis relativamente ao tipo de produto a cozer e às temperaturas e ciclos de cozedura que podem efetuar (tipicamente os ciclos decorrem em períodos entre 12 e 23 horas).

3.2.2. Indústria têxtil e de vestuário em Portugal

Em Portugal, as indústrias têxtil e vestuário estão anatomicamente associadas, sendo estas designadas por ITV. Encontram-se localizadas principalmente no norte e leste de Portugal (Porto, Braga, Guimarães, Famalicão e Covilhã).

Este setor é um dos maiores e mais importantes setores empresariais nacionais. Em 2010, Portugal tinha cerca de 7000 empresas têxteis e um volume de negócios superior a 6120 M€ (8% da produção, 8% do volume de negócios e 19% do emprego da indústria transformadora), e representava cerca de 10% das exportações nacionais, IMATEC (2012).

Os principais países concorrentes da ITV portuguesa são a Itália, a Alemanha e a Espanha. Os principais mercados de exportação da ITV portuguesa são: a Espanha com

cerca de 1288 M€ em 2012, França com 554 M€ e a Alemanha com 373 M€. Estes três mercados correspondem a 54% do total das exportações deste setor.

A ITV é considerada uma das indústrias mais complexas, dada a variedade de processos, maquinaria, componentes, tipos de fibras e fios, métodos de produção e acabamento, preparação, tingimento, revestimento, entre outros.

Desta forma, este setor é de grande importância económica e social para Portugal, devido à quantidade de processos que tem de efetuar e do consumo de energia que necessita. Logo é considerada como indústria CIE, sendo que em 2011 consumiu 6,8% de energia do conjunto das indústrias transformadoras, como mostra a figura 3.1, Gomes (2013).

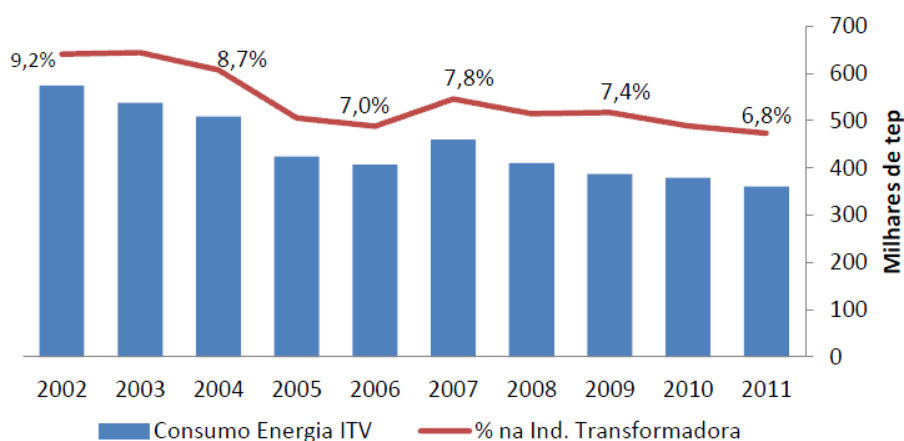


Figura 3.1 - Consumo de energia da ITV e a sua percentagem no consumo de energia da Indústria Transformadora Portuguesa {adaptado de Gomes (2013)}.

A figura 3.1 mostra tendência de diminuição do consumo de energia da ITV ao longo dos anos.

A ITV acarreta diversos processos no que respeita à produção de vestuário. Dentro dessas etapas encontram-se:

- ✓ **Fiação** – consiste na transformação das fibras têxtil em fio definido.
- ✓ **Tecelagem/tricotagem** – processo de cruzamento de dois fios, produzindo um tecido. É realizada em teares ou máquinas de tecer. Permite a produção de malhas.
- ✓ **Enobrecimento** – consiste num conjunto de etapas: tratamento prévio, tingimento, estamparia e acabamentos. Este processo pode ser feito no fio, no tecido ou na peça já confeccionada. Confere características estéticas e

funcionais ao produto de forma a cumprir todos os requisitos impostos pelo mercado.

- ✓ **Confeção** – transforma, prepara e efetua o corte do tecido. Transforma a peça de matérias têxteis em peças de vestuário, têxteis de lar, entre outros.

Relativamente ao consumo de energia, o processo de enobrecimento é aquele mais energia consome, relativamente aos restantes. Devido à componente térmica necessária para o decorrer dos processos, são necessários níveis de calor e humidade elevados, exigindo consumo de energia mais elevado e consequentemente aumenta os custos das empresas.

Os processos de fiação e tecelagem consomem energia elétrica quase na totalidade, nas máquinas, na produção de ar comprimido, iluminação e aspiração de resíduos produzidos no processo. O processo de confeção também utiliza energia elétrica, no entanto consome menos energia que os processos anteriormente mencionados, Gomes (2013).

3.3. Medidas transversais à indústria

As medidas transversais aplicam-se à generalidade das indústrias portuguesas. Estas são as que proporcionam maiores efeitos relativamente ao aumento da eficiência energética, proporcionando assim benefícios para a economia portuguesa. É importante que os responsáveis pelo setor industrial possuam conhecimento e dados sobre a importância deste tipo de medidas, para que os objetivos em termos energéticos sejam cumpridos. A tabela 3.2 apresenta as medidas transversais aplicáveis à generalidade das indústrias. Magueijo *et al.*, (2010).

Tabela 3.2 - Medidas de eficiência energética.

Medidas transversais à indústria	Medidas aplicadas
Sistemas acionados por motores elétricos (secção 3.3.1)	<ul style="list-style-type: none"> - Motores elétricos - Otimização de motores (transformação de energia elétrica em energia mecânica) - Sistema de bombagem - Sistemas de ventilação - Sistemas de compressão de ar
- Produção de calor e frio (secção 3.3.2)	<ul style="list-style-type: none"> - Cogeração - Sistemas de combustão - Recuperação de calor - Frio industrial
- Iluminação (secção 3.3.3)	<ul style="list-style-type: none"> - Produção de eletricidade por energia solar - Iluminação solar - Lâmpadas - Sistemas de controlo da iluminação - Integração da iluminação nos sistemas de climatização
- Eficiência do processo industrial/outros (secção 3.3.4)	<ul style="list-style-type: none"> - Monitorização e controlo - Tratamento de efluentes - Integração de processos - Manutenção de equipamentos - Isolamentos térmicos - Transportes - Formação e sensibilização de recursos humanos - Redução da energia reativa

3.3.1. Sistemas acionados por motores elétricos

3.3.1.1. Motores elétricos

Os motores elétricos são os mais utilizados na indústria portuguesa, uma vez que são de transporte e limpeza fácil e simplicidade de comando. Estes são responsáveis pelo consumo de cerca de 70% de eletricidade na indústria, e por cerca de 30% do consumo elétrico global do país. Um motor elétrico consegue converter 85% da energia elétrica em energia mecânica, perdendo cerca de 15% de energia no processo de conversão. A aquisição de um motor elétrico deve dar preferência a um motor de alta eficiência, apesar do investimento inicial ser mais elevado. No entanto o retorno do investimento é feito pela poupança de energia, APICER (2012) e Magueijo *et al.*, (2010).

A tabela 3.3 apresenta os motivos pelos quais ocorrem as perdas energéticas em motores elétricos e também apresenta algumas medidas de eficiência energética aplicáveis nos mesmos.

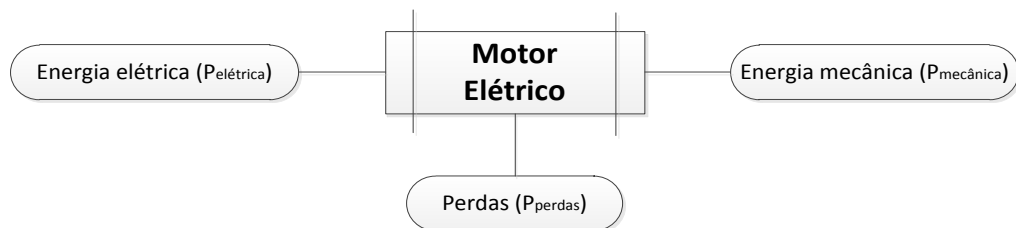
Tabela 3.3 - Perdas ocorridas em motores elétricos e medidas de eficiência energética a adotar.

Motores elétricos	
Ocorrência de perdas	Medidas de eficiência energética
- Dimensionamento incorreto (sobredimensionamento dos motores)	- Motores elétricos de alto rendimento;
- Perdas de potência no sistema	- VEVs (Variadores eletrônicos de velocidade);
	- Melhorar desempenho dos equipamentos utilizadores finais;
	- Otimização de sistemas de transmissão mecânica entre o motor e o equipamento utilizador final

Os motores elétricos são imprescindíveis, e como tal grandes quantidades de energia são consumidas. Se for efetuado um controlo destes motores elétricos é possível obter grandes poupanças de energia que irão representar cerca de dois terços da utilização de eletricidade na indústria, ABB, S.A (2012).

3.3.1.2. Otimização de motores elétricos

A figura 3.2 representa a transformação de energia elétrica em energia mecânica, através de um motor elétrico, APICER (2012) e Magueijo *et al.*, (2010).



*Figura 3.2 - Transformação de energia elétrica em energia mecânica por um motor elétrico {adaptado de Magueijo *et al.*, (2010)}.*

A potência mecânica que um motor elétrico necessita é calculada através das equações 3.1, 3.2 e 3.3. Em que:

$$P_{mec} = T \times \omega = T \times 2\pi n \quad (3.1)$$

$$P_{elétrica} = V \times I \quad (3.2)$$

$$P_{mecânica} = P_{elétrica} - P_{perdas} \quad (3.3)$$

A potência de perdas corresponde à parte da potência elétrica dissipada sob a forma de calor (potência térmica dissipada).

Em que:

P_{mec} – representa o valor da potência mecânica;

P_{el} – representa o valor da potência elétrica;

$Perdas$ – energia não convertida em trabalho útil, estas podem ser: perdas térmicas no cobre por efeito de Joule, perdas magnéticas no ferro, perdas mecânicas e perdas extraviadas;

A tabela 3.4 apresenta o tipo de perdas que podem ocorrer em motores quando ocorre a transformação de eletricidade em energia mecânica e algumas medidas a aplicar de forma a otimizar a eficiência energética dos motores elétricos.

Tabela 3.4 - Perdas ocorridas em otimização de motores e suas medidas de eficiência energética.

Otimização de motores	
Ocorrência de perdas	Medidas de eficiência energética
- Perdas térmicas nos colos de cobre por efeito de Joule	- Substituição de motores convencionais por motores mais eficientes
- Perdas magnéticas no ferro	- Avaliação do potencial de utilização de VEVs, de forma a ajustar a velocidade do motor de acordo com a carga
- Perdas mecânicas	- Evitar picos de corrente utilizando arrancadores suaves
- Perdas extraviadas	- Manutenção adequada dos motores

A substituição de motores convencionais por motores de alta eficiência requer uma avaliação económica de forma a verificar se o investimento que a implementação de motores de alta eficiência é viável. Para tal recorre-se à equação 3.4, equação 3.5 e equação 3.6.

$$\text{Tempo de recuperação do investimento (anos)} = \frac{\Delta \text{ Investimento (€)}}{\text{Economia anual (€/a)}} \quad (3.4)$$

$$\Delta \text{ Investimento (€)} = \text{Custo motor alta eficiência} - \text{Custo motor standard} \quad (3.5)$$

A economia anual é calculada através da equação 3.6:

$$Economia\ anual\ (\text{€/a}) = tC_{el} \left(\frac{P_{st}}{\eta_{st}} - \frac{P_{MAE}}{\eta_{MAE}} \right) \quad (3.6)$$

Em que:

t – é o numero de horas de funcionamento do motor durante um ano;

C_{el} – representa o custo/preço médio da eletricidade em €/kWh;

P_{st} – representa a potência útil mecânica do motor standard em kW;

η_{st} – é o rendimento do motor standard;

P_{MAE} – é a potência útil mecânica do motor de alta eficiência em kW;

η_{MAE} – é o rendimento do motor de alta eficiência.

Para que seja possível calcular a economia anual em Euros é necessário calcular a potência útil mecânica, e para tal é utilizada a equação 3.7:

$$Potência\ útil\ mecânica = Potência\ nominal \times Fator\ de\ carga \quad (3.7)$$

A aplicação de VEVs acoplada a sistemas motorizados é considerada como a medida com maior potencial de poupança direta d energia. A figura 3.3 representa um exemplo de uma configuração de um VEV, bem como a maneira como pode ser aplicado em sistemas motorizados.

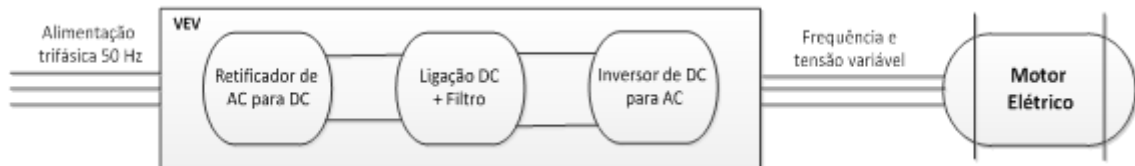


Figura 3.3 - Apresentação da configuração de um VEV (Magueijo et al., 2010).

Para calcular a economia anual que a utilização de VEVs em motores elétricos sem controlo de velocidade, é necessário considerar a existência de i regimes de carga. Assim a equação que permite calcular a economia anual da utilização de VEVs em motores elétricos é a equação 3.8.

$$Economia\ anual\ (\text{€/a}) = \sum_i \left[t_i C_{el,i} \left(\frac{P_{M,i}}{\eta_{M,i}} - \frac{P_{VEV-M,i}}{\eta_{VEV-M,i}} \right) \right] \quad (3.8)$$

3.3.1.3. Sistema de bombagem

Na indústria os sistemas de bombagem desempenham um papel muito importante, representando cerca de 16% do consumo energético na indústria portuguesa. Um sistema de bombagem é geralmente constituído por cinco componentes: bomba, equipamento de acionamento da bomba, válvulas, tubagem, equipamentos de uso final (tanques, permutadores de calor, etc.). A tabela 3.5 identifica os principais locais onde ocorrem perdas de energia associadas ao dimensionamento, escolha e manutenção de bombas, bem como medidas para solucionar esses problemas, APICER (2012) e Magueijo *et al.*, (2010).

Tabela 3.5 - Perdas ocorridas em sistemas de bombagem e suas medidas de eficiência energética.

Sistemas de bombagem	
Ocorrência de perdas	Medidas de eficiência energética
- Excesso de estrangulamento na descarga	- Substituir bombas sobredimensionadas
- Existência de cavitação (ruído nas válvulas de controlo) nas bombas	- Utilizar bombas auxiliares de aumento de pressão (<i>booster</i>)
- Modificação das condições de operação da instalação	- Limpar ou modificar o diâmetro dos impulsos
- Bombas com dimensionamento desadequado (sobredimensionamento)	- Reparar folgas internas
	- Aplicar revestimentos na bomba

As perdas no sistema de bombagem também podem ocorrer ao nível do controlo das mesmas. A tabela 3.6 faz referência a essas perdas bem como a medidas/soluções para a sua diminuição.

Tabela 3.6 - Perdas ocorridas no controlo de sistemas de bombagem e suas medidas de eficiência energética.

Sistemas de bombagem (controlo)	
Ocorrência de perdas	Medidas de eficiência energética
- Bombas com grandes variações de caudal ou pressões	- Desligar bombas desnecessárias
- Desvio do caudal por <i>by-pass</i>	- Utilizar VEVs nos motores elétricos das eletrobombas
- Perdas em sistemas com múltiplas bombas	- Se o uso de VEVs for desaconselhável, otimizar o estrangulamento do caudal na descarga
	- Utilizar várias bombas em paralelo de forma a funcionarem de acordo com as necessidades
	- Instalação de controlos volumétricos e elétricos para monitorizar o desempenho do sistema

Como se pode verificar pelas tabelas 3.5 e 3.6 (tabelas anteriores) a eficiência de um sistema de bombagem depende de vários componentes. A figura 3.4 representa as principais diferenças entre um sistema de bombagem convencional e um sistema de bombagem de alta eficiência. Através da aplicação de um VEV, a rotação de um motores elétricos e a substituição de bombas convencionais por bombas mais eficientes verifica-se uma eficiência de cerca de 72%, sendo que num sistema de bombagem convencional a eficiência total do sistema é apenas de 31%, APICER (2012) e Magueijo *et al.*, (2010).

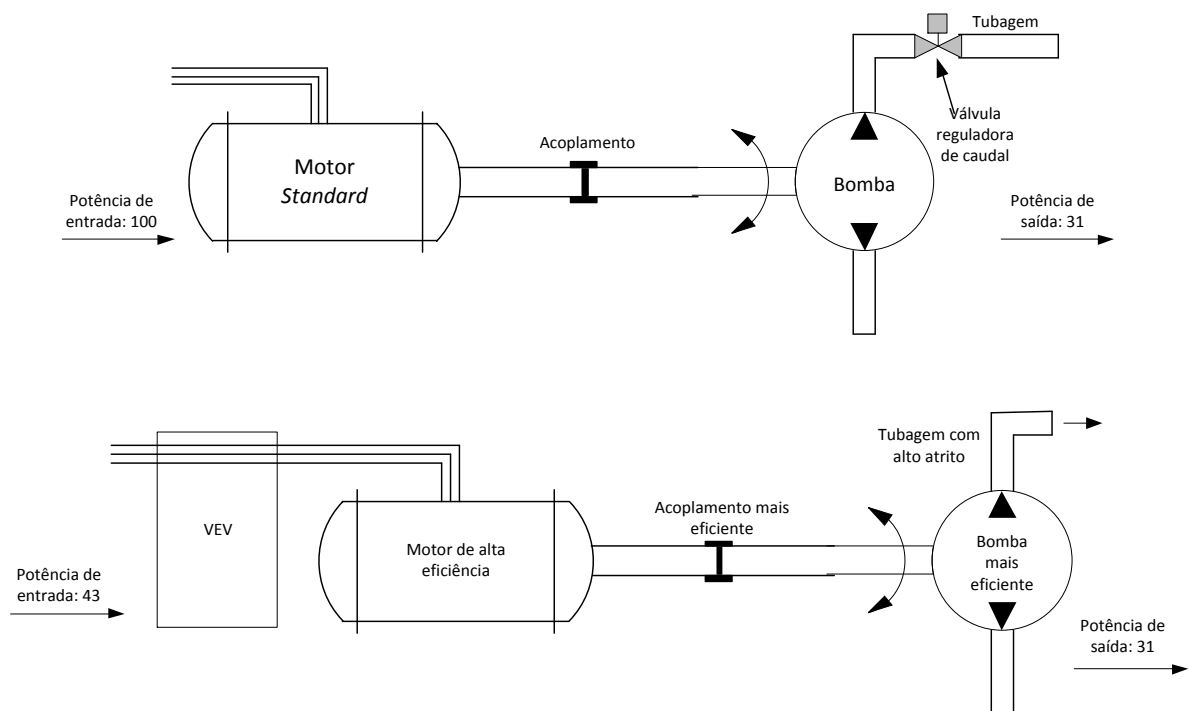


Figura 3.4 - Principais diferenças entre um sistema de bombagem convencional e um sistema de bombagem de alta eficiência que contém um VEV, {adaptado de Magueijo et al., (2010)}.

3.3.1.4. Sistemas de ventilação

Os sistemas de ventilação desempenham um papel importante na indústria uma vez que a sua função é movimentar grandes volumes de ar ou gases a pressões suficientes, de forma a oferecer a resistência necessária dos sistemas aos quais estão agregados, Magueijo *et al.*, (2010).

De forma a garantir que um sistema de ventilação seja eficiente relativamente ao seu consumo de energia e desempenho é necessário manter/controlar alguns fatores:

1. Escolher o motor adequado para o ventilador;
2. Determinar a velocidade do ar de forma a dimensionar corretamente o sistema de ventilação;
3. Minimizar as perdas de pressão através da tubagem de distribuição;
4. Selecionar o ventilador mais adequado para aplicação no projeto em questão;
5. Realizar uma instalação correta dos equipamentos;
6. Efetuar manutenção regular a todos os equipamentos.

3.3.1.5. Sistemas de compressão de ar

Grande parte das indústrias utiliza sistemas de compressão de ar, uma vez que a compressão de ar é uma forma polivalente de produção de transmissão de energia. Desta forma os sistemas de ar comprimido são a segunda forma de energia mais utilizada na indústria transformadora e a mais cara de todas. Da energia utilizada na indústria cerca de 10% é consumida por sistemas de ar comprimido. Cerca de 20% dessa energia é perdida devido a fugas de ar, devido a má utilização dos sistemas ou mesmo à negligência na sua utilização. A eficiência energética em sistemas de compressão de ar deverá englobar: a produção e tratamento do ar comprimido, as suas redes de distribuição, os dispositivos de utilização final e o projeto e operação do sistema em geral. A tabela 3.7 apresenta as medidas de eficiência energética que integram os primeiros três pontos acima referidos, APICER (2012) e Magueijo *et al.*, (2010).

Tabela 3.7 - Perdas ocorridas em sistemas de compressão de ar e suas medidas de eficiência energética.

Sistemas de compressão de ar	
Medidas de otimização energética	Principais medidas a considerar
Produção de ar comprimido	<ul style="list-style-type: none"> - Otimização da utilização do sistema - Otimização da pressão do ar comprimido do sistema de acordo com as necessidades finais de utilização - Redução da temperatura do ar de admissão - Melhorar o sistema de controlo do compressor - Otimização das mudanças de filtros - Filtração e secagem do ar até aos requisitos mínimos do sistema - Recuperação e utilização do calor perdido dos equipamentos de arrefecimento dos compressores - Aumento da capacidade do reservatório principal de ar comprimido - Utilização de VEVs - Utilização de um sistema de múltiplas pressões (<i>boosters</i>) para aumentar a pressão em locais específicos - Substituição de motores elétricos convencionais por motores de alto rendimento - Substituição de motores sobredimensionados por motores com menores consumos específicos de energia
Rede de distribuição de ar comprimido	<ul style="list-style-type: none"> - Implementação de um programa de verificação de fugas de ar comprimido - Utilização de adaptadores, uniões rápidas, entre outros, de forma a reduzir fugas - Divisão do sistema em zonas com reguladores de pressão apropriados ou válvulas de corte - Utilização de purgas de condensados - Dimensionamento adequado das capacidades de armazenamento - Instalação suplementar de reservatórios de ar comprimido - Diminuição da extensão da rede - Otimização o diâmetro da tubagem - Diminuir o número de cotovelos, de mudanças de direção e de mudanças de secção

Dispositivo de utilização final

- Eliminação de utilizações não apropriadas de ar comprimido
 - Reparação e substituição de equipamentos com fugas de ar comprimido
 - Desligar o comprimido quando o dispositivo não está a ser utilizado
 - Otimização da necessidade de dispositivos de regulação de pressão, filtros e secadores
 - Utilizar aspiradores elétricos para limpeza
-

No anexo I, exemplo 3, apresenta-se um exemplo de implementação de uma medida de melhoria de eficiência energética para um sistema de ar comprimido numa fábrica, bem como o investimento efetuado e o seu tempo de retorno.

3.3.2. Produção de calor e frio

3.3.2.1. Cogeração

Nas centrais termoelétricas a queima de combustíveis fósseis permite produzir vapor a temperatura e pressão elevadas, a expansão do vapor através de uma turbina permite produzir energia mecânica que é convertida em energia elétrica através de um gerador. Uma grande parte das centrais termoelétricas tem rendimentos inferiores a 40%. A figura 3.5 mostra que em centrais termoelétricas convencionais apenas 35% da energia é aproveitada na forma de energia elétrica. No entanto uma central termoelétrica de ciclo combinado de última geração consegue ter um aproveitamento energético de cerca de 60%, APICER (2012) e Magueijo *et al.*, (2010).

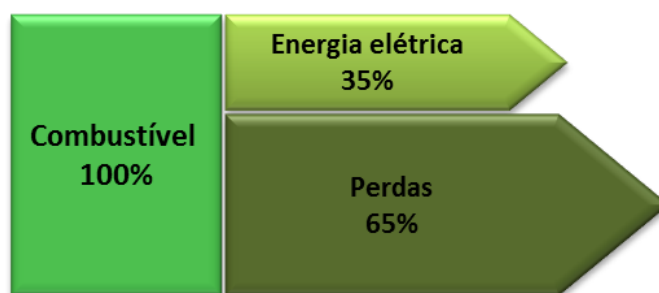


Figura 3.5 - Rendimento de uma central termoelétrica convencional.

A cogeração consiste na produção combinada de energia elétrica e térmica. As tecnologias mais utilizadas nos sistemas de cogeração são: turbinas a gás, turbinas a vapor e motores alternativos de ciclo de Otto e Diesel.

O processo de cogeração traz consigo alguns benefícios que advém da sua implementação, tais como:

- a) Garantia de abastecimento de energia térmica á instalação;
- b) Redução da fatura energética mensal;
- c) Conceder à indústria a possibilidade de ser autossuficiente;
- d) Se a unidade de cogeração produzir energia que exceda o seu consumo, é possível vender a energia excedente à rede energética nacional;
- e) Redução dos custos de produção;
- f) Melhor forma de distribuir e fornecer eletricidade aos processos industriais;
- g) Elevada eficiência de conversão da energia primária permitindo uma redução substancial dos encargos energéticos de produção;
- h) Contribui para a diminuição de perdas de energia no transporte e distribuição da energia elétrica pelo fato de ser produzida junto aos locais de consumo;
- i) Contribui para a redução das emissões de gases com efeito de estufa.

No entanto o processo de cogeração também pode apresentar algumas desvantagens aquando a sua aplicação, tais como:

- a) Não é possível implementar um sistema de cogeração se não existirem equipamentos consumidores de energia térmica em número suficiente que garantam a eficiência de operação da instalação;
- b) Devido há dificuldade no transporte da energia térmica, o calor só pode ser utilizado perto do sítio de produção;
- c) Embora apresente bons retornos de investimento, o investimento pode ser relativamente elevado;
- d) Para que o sistema se torne interessante do ponto de vista económico e seja possível a venda de energia produzida pelo mesmo, este tem de estar ligado á rede elétrica pública, o que nem sempre é possível, aumentando desta forma o tempo de retorno do investimento, tornando-o menos interessante.

No anexo I, exemplo 4 encontra-se um exemplo de uma implementação de um sistema de cogeração, bem como o tempo de retorno do seu investimento.

3.3.2.2. Sistemas de combustão

Os sistemas de combustão são os que mais produzem energia para a realização de processos industriais. São sistemas extremamente importantes no desenvolvimento industrial, no entanto têm um efeito nefasto para o ambiente. Dentro dos sistemas de combustão inserem-se as caldeiras, os fornos, os secadores e sistemas de geração e distribuição de vapor, APICER (2012).

Relativamente a caldeiras, fornos e secadores podem ocorrer as perdas térmicas que a figura 3.6 mostra.



Figura 3.6 - Balanço energético de uma instalação de combustão convencional {adaptado de APICER (2012)}.

A eficiência energética de um sistema de combustão pode ser calculada através das equações 3.9 e 3.10, que foram elaboradas de acordo com a figura 3.6.

$$\eta = \frac{\text{Calor transferido para o processo}}{\text{Calor do combustível}} \quad (3.9)$$

ou:

$$\eta = \frac{\text{Calor dos gases de combustão} - \text{Calor através das paredes}}{\text{Calor do combustível}} \quad (3.10)$$

É possível aumentar a eficiência energética de equipamentos que produzem calor através da queima de combustíveis, sendo esses equipamentos as caldeiras de produção de vapor e água quente, fornos de cozedura e calcinação e secadores. Para aumentar a eficiência energética destes três equipamentos de combustão são necessárias a aplicação de algumas medidas, estando elas representadas nas tabelas 3.8, 3.9 e 3.10, APICER (2012) e Magueijo *et al.*, (2010).

Tabela 3.8 - Medidas de eficiência energética para caldeiras.

Caldeiras
<ul style="list-style-type: none"> - Melhorar a distribuição, a reparação e o armazenamento do fuelóleo e de combustíveis sólidos - Proceder à inspeção e manutenção regular da caldeira e queimadores - Regular o excesso de ar na combustão e analisar os gases de combustão - Regular a produção da caldeira de acordo com as necessidades - Limpar os tubos dos fumos - Instalar isolamentos térmicos e fazer-lhes inspeções regulares - Evitar perdas de calor em <i>Stand-by</i> - Tratar as águas e fazer purgas adequadas - Investigar o potencial de recuperação de calor - Instalar sistemas de controlo automático - Avaliar a possibilidade de substituição da caldeira ou do combustível

Tabela 3.9 - Medidas de eficiência energética para fornos.

Fornos
<ul style="list-style-type: none"> - Controlar a qualidade e a dosagem das matérias-primas - Inspeccionar e fazer manutenção dos fornos e dos queimadores - Controlar a combustão através da análise dos gases de combustão - Realizar manutenção adequada dos isolamentos e reparar as fugas - Verificar os sistemas de controlo de combustão - Programar as cargas

Tabela 3.10 - Medidas de eficiência energética para secadores.

Secadores
<ul style="list-style-type: none"> - Controlo da humidade do produto a secar - Utilização de uma pré-secagem mecânica antes da secagem térmica - Não secar produtos mais do que o necessário - Controlo das condições de humidade do ar de secagem - Manutenção dos isolamentos em bom estado de forma, evitando fugas de ar quente e/ou entradas de ar parasita - Estudar a recuperação de calor residual - Otimizar os regimes de carga

Dos sistemas de combustão também fazem parte os sistemas de geração e distribuição de vapor. Nestes sistemas também ocorrem perdas de energia e como tal existem medidas que podem ser adotadas. As principais medidas utilizadas para aumentar a sua eficiência energética estão presentes na tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Medidas de eficiência energética para sistemas de geração e distribuição de vapor.

Sistemas de geração e distribuição de vapor	
Medidas para aumentar a eficiência na geração e distribuição de vapor	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicação de permutadores de calor para efetuar um pré aquecimento da água que alimenta a caldeira - Remover depósitos de calcário e fuligens das superfícies de transferência de calor - Minimizar as purgas da caldeira - Recuperar o calor das purgas - Recolha e reutilização dos condensados na caldeira - Reutilização do vapor produzido pela expansão de condensados - Instalação de um programa de controlo e manutenção dos purgadores - Isolamento das tubagens, válvulas e flanges - Eliminação de fugas de vapor e de condensados - Melhoramentos no <i>lay-out</i> da rede de distribuição
Medidas para aumentar a eficiência da combustão	<ul style="list-style-type: none"> - Ajuste das condições de combustão - Instalação de um pré-aquecedor de ar de combustão através dos gases de combustão - Instalação de um controlador do teor de oxigénio nos gases de combustão
Medidas de controlo e manutenção	<ul style="list-style-type: none"> - Manutenção da caldeira - Atualização do sistema de controlo de funcionamento da caldeira - Minimização das perdas em ciclos curtos de funcionamento - Instalar controladores automáticos do total de sólidos dissolvidos na água do interior da caldeira - Substituição de caldeiras em fim de vida

3.3.2.3. Recuperação de calor

A perda de calor por equipamentos, na indústria, é um grande problema da atualidade industrial. Desta forma torna-se importante encontrar métodos que permitam recuperar o calor perdido pelos equipamentos, de forma a aumentar a eficiência energética dos sistemas. A recuperação de energia pode ser efetuada em gases de combustão, efluentes quentes ou frios, ar de exaustão, produtos de restos de produção, água de arrefecimento em

óleo hidráulico, fontes termais naturais, painéis solares, calor de sobreaquecimento, calor de condensação rejeitado dos processos de refrigeração, entre outros, APICER (2012).

O calor resultante de condensados tem um grande potencial de recuperação de calor, sendo possível aplicar algumas medidas, de forma a otimizar a recuperação de energia. Algumas das medidas que podem ser utilizadas neste processo encontram-se na tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Formas de aproveitamento de calor em condensados.

Recuperação de calor em condensados
- Aproveitar de forma direta os condensados através de um sistema de injeção direta no circuito de alimentação
- Estudar a possibilidade de um aproveitamento indireto através de permutadores, caso o aproveitamento direto não funcione
- Avaliar a possibilidade de aproveitar o calor do circuito de refrigeração tendo em conta a sua temperatura e nível de contaminação
- Instalar secadores que permitem recuperar calor, utilizando-o para processos de secagem de produtos;
- Substituição de torres de refrigeração por circuitos fechados e aproveitar, através deles, a energia térmica dissipada;
- Evitar perdas de calor, assegurando o isolamento das tubagens do fluido

Geralmente as tecnologias mais utilizadas para a recuperação deste calor são:

- 1) Permutadores de calor:** possibilitam a recuperação direta de calor entre dois fluidos através de uma superfície sólida. Os permutadores de calor são construídos consoante as suas aplicações. Desta forma podem ter várias configurações e diferentes materiais de construção. A escolha do permutador de calor deve ter em conta a temperatura de operação e as propriedades físicas dos fluidos envolvidos no processo. Aplicam-se a quase todos os setores e normalmente tem um retorno do investimento relativamente curto;
- 2) Bombas de calor:** efetuam a transmissão de energia térmica de um meio de temperatura baixa para um meio de temperatura mais elevada. De acordo com as suas necessidades, a indústria pode optar por três tipos de bombas de calor: bombas de compressão, bombas de absorção e bombas abertas. Geralmente o seu período de retorno de investimento é de cerca de 2 anos;
- 3) Recompressão mecânica de vapor (RMV):** faz a compressão e condensação de vapor de baixa pressão, cedendo calor a uma temperatura mais elevada.

A utilização das tecnologias de recuperação de calor, anteriormente referidas, permitem reduzir os consumos energéticos e emissões de gases poluentes para a atmosfera.

No anexo I, exemplo 2, encontra-se a implementação de um sistema de recuperação de calor, bem como o investimento que a indústria fez e o tempo de retorno do investimento, APICER (2012) e Magueijo *et al.*, (2010).

3.3.2.4. Frio industrial

A refrigeração industrial é efetuada maioritariamente por sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor.

A melhoria da eficiência energética de um sistema de refrigeração pode ser feita através da implementação de estratégias de otimização e controlo dos sistemas já existentes, que podem levar a um aumento de 30% da sua eficiência.

Podem ser utilizados sistemas de refrigeração por absorção, novos fluidos friogénicos e acumulação térmica de frio, Magueijo *et al.*, (2010).

3.3.3. Iluminação

A iluminação nos diferentes setores tem um papel preponderante. Desta forma a energia elétrica que é consumida para a iluminação constitui cerca de 25% do consumo global de energia do país, e entre 5% e 7% do consumo de energia elétrica de uma instalação industrial, APICER (2012).

Atualmente procura-se diminuir o consumo energético fornecido para iluminação, instalando equipamentos que proporcionem a iluminação suficiente e recomendada ao desempenho das atividades. De forma a poder obter-se condições ótimas dos locais de trabalho a nível de iluminação deve ter-se em consideração os seguintes aspetos:

- Dar prioridade à iluminação natural;
- Criar condições ideais de iluminação para cada posto de trabalho;
- Escolher o tipo de iluminação mais adequado para cada local de trabalho;
- Optar por utilizar equipamentos de elevado rendimento (lâmpadas, luminárias e acessórios);
- Utilização de sistemas de controlo e comando automático em instalações de iluminação;

- Tentar utilizar, sempre que possível, luminárias que possam ser integradas com o ar condicionado;
- Efetuar limpezas e manutenções regulares das instalações, de acordo com o plano estabelecido;
- Definir um período de substituição das lâmpadas, optando sempre pela substituição em grupos.

No anexo I, exemplo 1 encontra-se um exemplo da mudança de lâmpadas, numa instalação industrial, para lâmpadas mais económicas, bem como o investimento e o tempo de retorno do mesmo. APICER (2012) e Magueijo *et al.*, (2010).

3.3.3.1. Produção de eletricidade por energia solar

A energia solar é uma fonte de energia gratuita. Se a ela forem acoplados equipamentos que permitam retirar vantagem do calor solar, é possível produzir energia elétrica. Um exemplo são os painéis solares fotovoltaicos, APICER (2012).

3.3.3.2. Iluminação solar

A criação de sistemas de iluminação recorrendo á luz natural que existe de forma gratuita, pode ser uma solução para a poupança de energia. Esta solução apresenta como vantagens a poupança energética, a redução de GEE, permitindo a sua instalação nos mais diversos tipos de serviços e indústrias e cria um ambiente de conforto e natural devido há existência de luz solar. No entanto este tipo de solução apresenta também desvantagens, tais como: existência de local para instalação de tubos solares, não substitui o sistema de iluminação existente, a eficiência do sistema depende do número de horas de sol, e por fim a localização dos espaços a iluminar pode ser um impedimento, APICER (2012).

3.3.3.3. Lâmpadas

No mercado atualmente existem diversos tipos de lâmpadas com eficiência luminosa diferentes. A quantificação da luz emitida relacionada com a quantidade de energia elétrica absorvida é denominada de lumens por watt. A troca direta de lâmpadas convencionais por lâmpadas de elevada eficiência energética leva a grandes reduções do consumo de energia.

A tabela 3.13 indica alguns tipos de lâmpadas existentes no mercado, bem como as suas características de desempenho energético, APICER (2012).

Tabela 3.13 - Desempenho energético dos diferentes tipos de lâmpadas.

Tipo de lâmpada		Potência [W]	Eficiência energética [lm/W]	Tempo de vida médio [h]
Incandescente	<i>Standard</i>	3 - 1500	6 - 24	750 - 2000
	Halógeno	10 - 1500	8 - 35	2000 - 4000
Fluorescente	Tubular	4 - 215	26 - 105	7500 - 24000
	Compacta	5 - 58	28 - 84	10000 - 20000
Descarga em alta pressão	Iodetos metálicos	32 - 2000	50 - 110	6000 - 20000
	Vapor de sódio a alta pressão	35 - 1000	50 - 120	16000 - 24000

As lâmpadas fluorescentes apresentam uma eficiência energética elevada, baixo consumo e uma vida útil longa. Estas têm a capacidade de durar cerca de 8 a 10 vezes mais que as lâmpadas incandescentes, economizando cerca de 85% de energia.

Relativamente à utilização da iluminação na indústria as lâmpadas mais recomendadas são as de descarga, mais especificamente as lâmpadas de vapor de sódio. Contudo para a iluminação exterior deverão ser utilizadas lâmpadas de iodetos metálicos ou vapor de sódio a alta pressão, uma vez que para a mesma potência nominal esta fornece um fluxo luminoso superior às lâmpadas de vapor de mercúrio.

Os sistemas de iluminação mais eficientes são aqueles que conjugam lâmpadas de elevada eficiência energética e luminárias equipadas com espelhos refletores, permitindo assim um rendimento elevado do sistema.

A disposição das luminárias e o seu seccionamento são fatores importantes. Desta forma as luminárias deverão estar dispostas de forma a evitar encandeamentos nos planos de trabalho e o seccionamento deve permitir, quando a iluminação natural é suficiente, desligar uma secção de luminárias. Assim é possível reduzir o consumo de energia, APICER (2012) e Magueijo *et al.*, (2010).

3.3.3.4. Sistemas de controlo da iluminação

Atualmente é importante que os sistemas de iluminação possuam um sistema de controlo automático, desta forma é possível diminuir o consumo energético. Nas indústrias é importante que o sistema de iluminação esteja dividido em vários setores de iluminação independentes para que seja possível desligar a iluminação que não seja necessária.

Os sistemas de controlo de iluminação, nomeadamente os reguladores de fluxo luminoso permitem que o local seja iluminado apenas com a quantidade necessária,

reduzindo assim o consumo de energia. No entanto nem todo o tipo de lâmpadas permite a utilização de sistemas de controlo, como é o caso das lâmpadas fluorescentes tubulares.

A instalação de sensores de presença também contribui para a diminuição do consumo energético relativamente à iluminação. No entanto a instalação de sensores de presença apenas funciona se for bem seleccionada e se as lâmpadas forem incandescentes ou fluorescentes com balastos eletrónicos. A este tipo de sensores pode ser adicionado um temporizador, o que normalmente é utilizado em iluminação exterior, nomeadamente em períodos de iluminação deficiente, APICER (2012) e Magueijo *et al.*, (2010).

3.3.3.5. Integração da iluminação nos sistemas de climatização

Do processo de iluminação em instalações resulta energia radiada luminosa (21%) e energia sob a forma de calor (79%). A energia sob a forma de calor pode ser aproveitada para aquecimento interior dos edifícios. Desta forma pode dimensionar-se sistemas de climatização considerando as condições de iluminação, Magueijo *et al.*, (2010).

3.3.4. Eficiência do processo industrial/outros

3.3.4.1. Monitorização e controlo

O processo de monitorização e controlo é extremamente importante uma vez que o custo de implementação destas medidas é relativamente baixo. Para tal a empresa necessita de adotar alguns procedimentos de forma a determinar as suas necessidades específicas. Este processo requer que os equipamentos da empresa sejam monitorizados e controlados constantemente de forma a detetar o funcionamento adequado ao processo que está a desenvolver e/ou os desperdícios de energia que neles existam, Magueijo *et al.*, (2010).

3.3.4.2. Tratamento de efluentes

O processo de tratamento de efluentes permite que as águas utilizadas nos processos das indústrias sejam encaminhadas para tratamento, de forma a diminuir a contaminação de águas. Existem tratamentos anaeróbios de águas que consistem em limpar as águas residuais através da conversão de compostos orgânicos, ou seja bactérias num ambiente sem oxigénio. Existem também processos de tratamento de águas com tecnologia de membranas como a microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa.

Ambos os processos vão fazer com que o consumo de eletricidade da empresa diminua, uma vez que são utilizadas alternativas ao gasto de eletricidade, para o tratamento de águas residuais, Magueijo *et al.*, (2010).

3.3.4.3. Integração de processos

Integrar num processo a utilização racional de energia vai permitir descobrir os valores ótimos de funcionamento dos equipamentos, reduzindo assim o consumo excessivo de energia, Magueijo *et al.*, (2010).

3.3.4.4. Manutenção dos equipamentos

É essencial que seja efetuada uma manutenção dos equipamentos, e se necessário recorrer à sua reparação, para que se mantenham eficientes. Os serviços de gestão de energia permitem que sejam detetadas situações de anomalias, através da medição de consumos (de eletricidade, água, gás ou outros tipos de combustíveis).

A manutenção dos equipamentos vai permitir uma otimização da eficiência energética da empresa, Magueijo *et al.*, (2010).

3.3.4.5. Isolamentos térmicos

Isolar adequadamente as superfícies de caldeiras, tubagens de distribuição de vapor, de condensados, de água quente ou refrigerada, ou de termofluidos é uma medida simples que acarreta custos reduzidos e que minimiza as perdas de calor, controla a condensação, fornece proteção para o frio, protege os equipamentos, controla as temperaturas dos processos, protege contra o fogo e serve de isolamento acústico, Magueijo *et al.*, (2010).

3.3.4.6. Transportes

Numa empresa existem diversos sistemas de transportes, desta forma é importante otimizar as cargas e os motores elétricos, de forma a diminuir o consumo de combustível nas frotas de transporte, Magueijo *et al.*, (2010).

3.3.4.7. Formação e sensibilização de recursos humanos

A formação e sensibilização dos recursos humanos é imprescindível para a boa implementação da maior parte das medidas de economia de energia. É importante que o responsável por um determinado equipamento esteja informado e que receba formação

para que possa manter esse equipamento em corretas condições de funcionamento. Logo o treino, a formação e motivação dos recursos humanos deve fazer parte de um sistema eficiente de gestão de energia, Magueijo *et al.*, (2010).

3.3.4.8. Redução da energia reativa

A energia reativa está presente em transformadores, motores elétricos, e outros equipamentos. Esta é responsável pela diminuição do fator potência destes equipamentos. Na indústria a maioria dos equipamentos são deste género, e a redução da potência reativa destes equipamentos vai permitir obter poupanças elétricas através do aumento do fator potência, Magueijo *et al.*, (2010).

3.4. Oportunidades de melhoria de eficiência energética na indústria

Tal como anteriormente verificado (secções 3.2.1 e 3.2.2) em Portugal, os setores com maior consumo de energia na indústria são o setor da cerâmica e o setor de têxtil e vestuário.

A análise de vários casos de estudo permitiu verificar que a medida que tem maior impacto na redução de consumos de energia na indústria é a recuperação de calor. A figura 3.7 demonstra o potencial de economia de energia no setor cerâmico, APICER (2012).

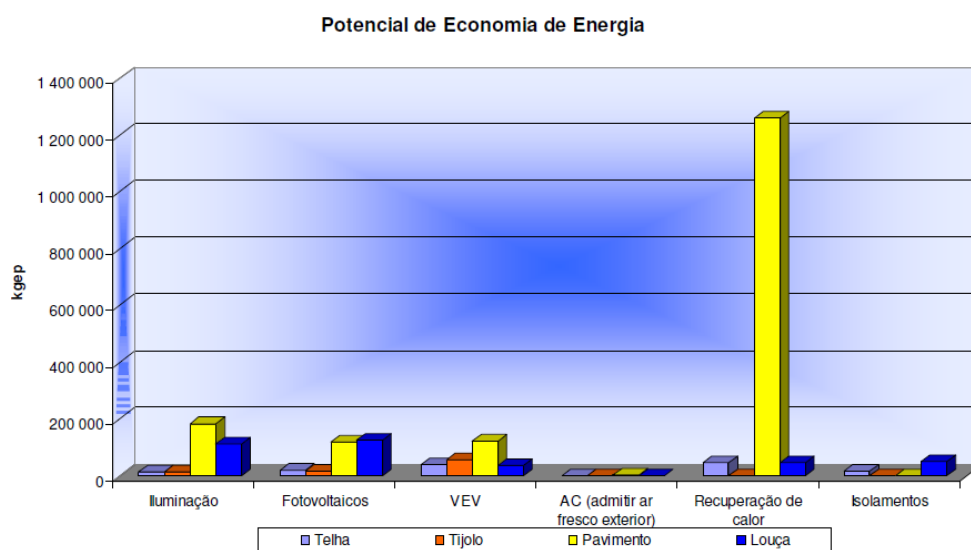


Figura 3.7 - Potencial de economia de energia no setor cerâmico, {adaptado de APICER (2012)}.

A figura 3.7 permite observar que o potencial de economia de energia através da recuperação de calor dos gases de exaustão dos fornos e o calor residual do ar, dos processos de secagem, é o mais relevante. Neste caso é possível obter uma grande economia de energia aproveitando a potência térmica contida nos gases de exaustão da indústria cerâmica.

4. Sistemas de recuperação de energia

4.1. Introdução

O presente capítulo é dedicado ao dimensionamento de sistemas de recuperação de energia térmica. Tal como ficou demonstrado no capítulo 3, seções 3.2.1 e 3.2.2, nos setores da indústria têxtil e vestuário e indústria cerâmica existe uma grande quantidade de energia libertada sob a forma de calor que pode ser aproveitado, implementando sistemas de integração energética. Neste contexto é de particular importância a implementação de sistemas de recuperação de energia térmica. Para tal foram selecionados dois casos de estudo, sendo que o primeiro consiste no desenvolvimento de um permutador de calor para recuperação de energia térmica num equipamento utilizado na indústria têxtil e o segundo consiste na implementação de um sistema de recuperação de calor aplicado a um forno utilizado na indústria cerâmica.

4.2. Sistema de recuperação de energia – Aplicação à indústria têxtil

4.2.1. Descrição do caso de estudo

De forma a diminuir o consumo energético na indústria têxtil foi dimensionado um equipamento que permite recuperar energia sob a forma de calor, um permutador de calor. Este permutador tem como intuito ser aplicado para recuperação de calor dos gases quentes provenientes de um sistema de tratamento de vestuário (râmola).

Uma râmola permite realizar uma vasta gama de acabamentos em vestuário para as mais variadas áreas da indústria têxtil. De forma a garantir os acabamentos pretendidos as râmolas requerem a utilização de ar a temperaturas num intervalo de 100°C a 200°C, utilizando gás natural ou eletricidade para aquecimento do ar. De modo a aumentar a eficiência energética deste tipo de equipamentos pode instalar-se um permutador de calor que irá recuperar energia no sistema de exaustão da râmola, permitindo o aumento de temperatura do ar novo que é admitido na râmola.

A tabela 4.1 apresenta os dados que caracterizam o caso de estudo. A fonte de energia térmica a recuperar (ar interior) consistia de um caudal de 5,13 kg/s a uma temperatura de 150°C. O ar frio (ar exterior) consistia de um caudal de 4,1 kg/s a 86 °C.

Tabela 4.1 - Caracterização do caso de estudo.

Variável	Valor	Unidade
Caudal mássico ar interior (\dot{m}_i)	5,13	[kg/s]
Temperatura de entrada ar interior ($T_{i,1}$)	150	[°C]
Caudal mássico ar exterior (\dot{m}_e)	4,1	[kg/s]
Temperatura de entrada ar exterior ($T_{e,1}$)	86	[°C]

O sistema de recuperação de energia adotado foi um permutador de calor ar/ar de fluxo cruzado não misturado, de configuração alinhada, como mostra a figura 4.1. Este utiliza a energia térmica para aquecimento do ar que será utilizado no processo, evitando assim o consumo de gás natural ou eletricidade.

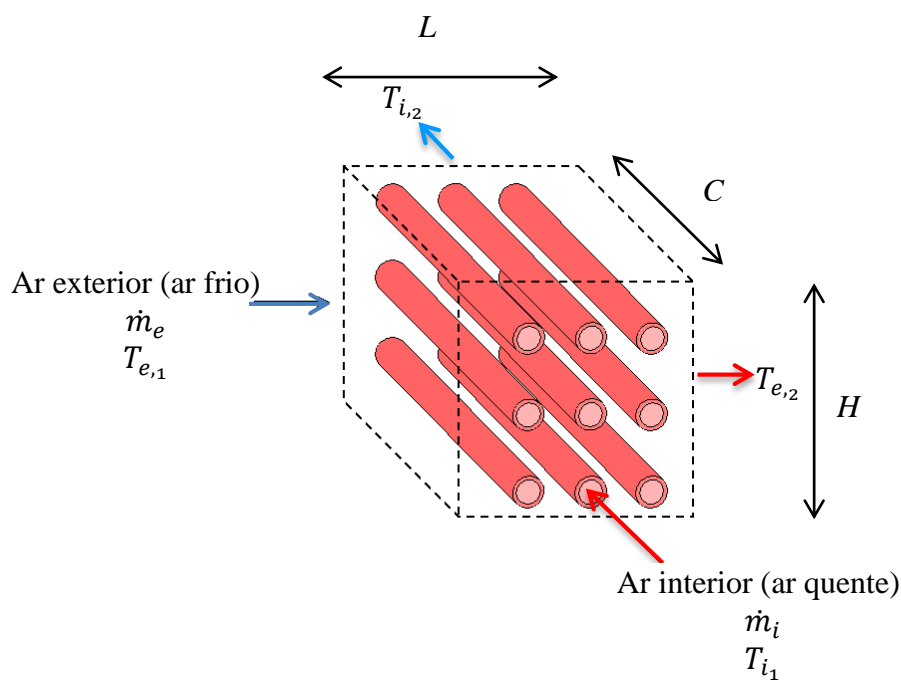


Figura 4.1 - Permutador Ar-Ar de fluxo cruzado não misturado com configuração alinhada com variáveis de entrada e saída.

O permutador de calor ar/ar permite a recuperação de energia térmica entre o ar que circula por fora dos tubos (ar frio) e o ar que circula por dentro dos tubos (ar quente). O ar entra nos tubos à temperatura $T_{i,1}$ vai perder calor, saindo do interior dos tubos a uma temperatura menor, $T_{i,2}$. Por sua vez o ar que circula por fora dos tubos entra à temperatura $T_{e,1}$, e sai a uma temperatura superior, $T_{e,2}$.

De modo a estudar a configuração do permutador de calor mais adequada ao caso de estudo, foi realizado um estudo paramétrico. A tabela 4.2 apresenta as características principais dos permutadores de calor estudados.

O sistema de recuperação de energia inicialmente concebido e que serviu de referência, consistia de 14 tubos na horizontal e 14 tubos na vertical, fazendo um total de 196 tubos. Os permutadores P_{1A} e P_{1D} apresentam as mesmas características, sendo que o P_{1A} apresenta tubos alinhados e o P_{1D} tubos desalinhados, tal como ilustrado na figura 4.2. O permutador P_2 surgiu do aumento da distância de cento a centro na direção transversal e longitudinal, S_T e S_L (“*tube pitch*”), respetivamente, ver figura 4. O permutador P_3 consiste do aumento do número de tubos horizontais e verticais para 16 tubos. O permutador P_4 consiste da diminuição do diâmetro dos tubos. E por fim o permutador P_5 surgiu do aumento do número de tubos vertical e horizontalmente para 20, da diminuição do diâmetro e diminuição de S_T e S_L .

Tabela 4.2- Características principais dos permutadores em estudo.

Variável	Uni.	P_{1A}	P_{1D}	P_2	P_3	P_4	P_5
C	[m]	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
H	[m]	1,095	1,05	1,29	1,241	1,095	1,095
L	[m]	1,095	1,05	1,29	1,241	1,095	1,095
Colunas	[-]	14	14	14	16	14	20
Linhas	[-]	14	14	14	16	14	20
N_t	[-]	196	196	196	256	196	400
d_i	[m]	0,055	0,055	0,055	0,055	0,025	0,025
d_e	[m]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,028	0,028
$Espessura_{tubo}$	[m]	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0015	0,0015
S_T e S_L (t_p)	[m]	0,073	0,07	0,086	0,073	0,073	0,052

Legenda: C – comprimento dos tubos; H – altura do permutador; L – largura do permutador; N_t – número de tubos; d_i – diâmetro interior; d_e – diâmetro exterior; S_T e S_L – “*tube pitch*”;

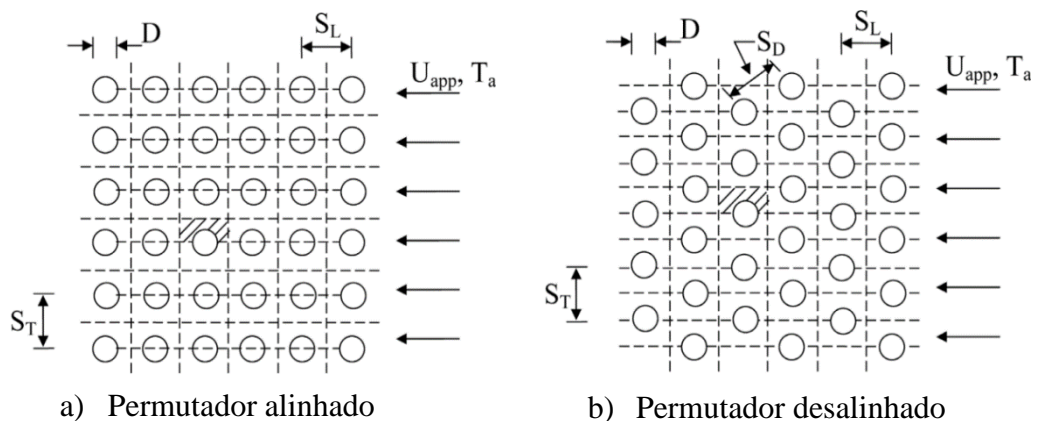


Figura 4.2 - Configurações do permutador: a) alinhado (P_{1A}); b) e do permutador (P_{1D}).

Dos dados das características principais dos permutadores presentes na tabela 4.2 resultam as áreas de permuta interior (A_i), exterior (A_e) e a área frontal de passagem (A_{pi}) para os diferentes permutadores (tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Áreas de permuta e de passagem.

Variável	Equação	Uni.	P _{1A}	P _{1D}	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
A_i	$A_i = N_t \times d_i \times \pi \times L$	[m ²]	60,96	60,96	60,96	79,62	27,71	56,54
A_e	$A_e = N_t \times d_e \times \pi \times L$	[m ²]	66,50	66,50	66,50	86,86	31,03	63,3
A_{pi}	$A_p = N_t \times \frac{\pi \times d_i^2}{4}$	[m ²]	0,47	0,47	0,47	0,61	0,10	0,2

4.2.2. Modelo termo-hidráulico para dimensionamento do permutador

A criação do modelo termo-hidráulico para o dimensionamento do permutador de calor passou por várias etapas. As fases mais relevantes foram a recolha de dados suficientes para o dimensionamento adequado do sistema, e o desenvolvimento do modelo de cálculo de forma a efetuar o dimensionamento e avaliação técnica e económica do sistema.

Para o dimensionamento dos permutadores foi utilizado o método da efetividade, ϵ -NUT (efetividade – número de unidades de transferência unitárias). A escolha deste método deve-se ao facto de apenas serem conhecidas as temperaturas de entrada de cada um dos fluidos. A metodologia de cálculo utilizada para o dimensionamento requer o cálculo de um conjunto de parâmetros. A tabela 4.4 mostra as equações utilizadas no modelo termo-hidraulico para o dimensionamento do permutador.

Tabela 4.4 - Equações utilizadas no modelo termo-hidráulico para o dimensionamento do permutador.

Variável	Unidade	Equação
C_h	[W/K]	$C_h = \dot{m}_i \times C_{p_i}$
C_c	[W/K]	$C_c = \dot{m}_e \times C_{p_e}$
C_{min}	[W/K]	$C_{min} = \{C_h, C_c\}$
C_r	[-]	$C_r = \frac{C_{min}}{C_{máx}}$
$\dot{Q}_{máx}$	[W]	$\dot{Q}_{máx} = C_{min} \times (T_{i_1} - T_{e_1})$
h_i	[W/m ² .K]	$h_i = \frac{k_i}{d_i} \times Nu_{D,i}$
$\overline{Nu}_{D,i}$	[-]	$\overline{Nu}_{D,i} = 0,0265 \times Re_{D,i}^{4/5} \times Pr^{0,3}$ (arrefecimento)
v_i	[m/s]	$v_i = \frac{\dot{m}_i}{\rho_i \times A_{p_i}}$
$Re_{D,i}$	[-]	$Re_{D,i} = \frac{\rho_i \times v_i \times d_i}{\mu_i}$
\overline{h}_e	[W/m ² .K]	$\overline{h}_e = \frac{k_e}{d_e} \times \overline{Nu}_{D,e}$
$\overline{Nu}_{D,e}$	[-]	$\left[\overline{Nu}_{D,e} = C_1 \times Re_{D,max}^m \times Pr^{0,36} \times \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{\frac{1}{4}} \right]_{(1)*}$
NUT	[-]	$\left[\begin{array}{l} N_L \geq 20 \\ 0,7 \leq Pr \leq 500 \\ 10 \leq Re_{D,max} \leq 2 \times 10^6 \end{array} \right]$
v_e	[m/s]	$NUT = \frac{U \times A}{C_{min}}$
v_{max}	[m/s]	$v_e = \frac{\dot{m}_e}{\rho_e \times A_e}$
$Re_{D,max}$	[-]	$v_{max} = \frac{S_T}{S_T - d_e} \times v_i$
R_{total}	[K/W]	$Re_{D,max} = \frac{\rho_e \times v_{max} \times d_e}{\mu_e}$
U	[W/m ² .K]	$R_{total} = \frac{1}{h_i \times A_{i_1}} + \frac{\ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right)}{2 \times \pi \times K \times L} + \frac{1}{h_e \times A_{e_2}}$
ε	[-]	$R_{total} = \frac{1}{U_i \times A_i} = \frac{1}{U_e \times A_e}$
\dot{Q}_i	[W]	$\varepsilon = 1 - \exp\left[\left(\frac{1}{C_r}\right) (NUT)^{0,22} \{ \exp[-C_r (NUT)^{0,78}] - 1 \}\right]$
ΔT_i	[°C]	$\dot{Q}_i = \varepsilon \times \dot{Q}_{max}$
T_{i_2}	[°C]	$\Delta T_i = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{m}_i \times C_{p_e}}$
		$T_{i_2} = T_{i_1} - \Delta T_i$

ΔT_e	[°C]	$\Delta T_e = \frac{\dot{Q}_i}{\dot{m}_e \times C_{p_e}}$
T_{e_2}	[°C]	$T_{e_2} = T_{e_1} - \Delta T_e$

⁽¹⁾ Constantes da equação para escoamento externo em fluxo cruzado.

O cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção exterior, dependendo do tipo de configuração de cada permutador de calor e do regime de escoamento, sendo necessário utilizar os valores de C_1 e m , tal como indicado na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores de referência para os diferentes tipos de configurações de permutadores de calor.

Configuração	$Re_{D,max}$	C_1	m
Alinhada	$10 - 10^2$	0,8	0,40
Desalinhada	$10 - 10^2$	0,9	0,40
Alinhada	$10^2 - 10^3$	Aproximadamente a um cilindro	
Desalinhada	$10^2 - 10^3$	Aproximadamente a um cilindro	
Alinhada ($S_T/S_L > 0,7$) ^a	$10^3 - 2 \times 10^5$	0,27	0,63
Desalinhada ($S_T/S_L < 2$)	$10^3 - 2 \times 10^5$	$0,35 (S_T/S_L)^{1/5}$	0,60
Desalinhada ($S_T/S_L > 2$)	$10^3 - 2 \times 10^5$	0,4	0,60
Alinhada	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0,021	0,84
Desalinhada	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0,022	0,84

^a Para $S_T/S_L < 0,7$, a transferência de calor é insuficiente e não devem ser utilizados tubos alinhados.

4.2.2.1. Análise e discussão de resultados

Este subcapítulo apresenta os resultados dos dimensionamentos efetuados, bem como a sua análise comparativa. De forma a avaliar o desempenho dos diferentes permutadores, isto é, as melhores características técnicas e económicas para implementação no caso de estudo em análise.

A primeira análise consistiu na comparação do permutador original alinhado (P_{1A}) com o permutador desalinhado (P_{1D}). Para dimensionar o permutador desalinhado apenas foi modificada a configuração dos tubos, de alinhados para desalinhados, tal como mostra a figura 4.2.

Após o dimensionamento do permutador desalinhado (P_{1D}), verificou-se que este não apresenta diferenças significativas face ao P_{1A}, desta forma o permutado P_{1D} não apresenta uma vantagem perante o P_{1A}, dado que no final do dimensionamento ambos permitem recuperar cerca de 72 kW de energia, tal como demonstra a tabela 4.6. Assim daqui em diante o estudo incide apenas em permutadores de configuração alinhada.

Tabela 4.6 - Tabela comparativa das características principais para a avaliação do desempenho de um permutador de calor.

Variável	P_{1A}	P_{1D}	Unidades
$\overline{Nu}_{D,t}$	80,44	80,44	[-]
h_i	49,73	49,73	[W/m ² .K]
C_I	0,27	0,35	[-]
m	0,63	0,6	[-]
h_e	83,75	93,02	[W/m ² .K]
U	31,92	33,07	[W/m ² .K]
NUT	0,47	0,49	[-]
ε	0,27	0,27	[-]
\dot{Q}_i	71613,86	72217,41	[W]

De forma a calcular os parâmetros apresentados na tabela 4.6 foi desenvolvida uma folha de cálculo em Microsoft Excel, tal como mostra o Anexo II. A folha de cálculo apresentada no anexo II apresenta dois tipos de células com valores. As células preenchidas a cheio, que apresentam valores/dados fornecidos para o sistema em estudo e células que estão preenchidas a branco, que apresentam o valor de um cálculo efetuado. O Anexo II apresenta as características gerais do permutador P_{1A}, as condições de funcionamento, as propriedades dos gases, o cálculo da geometria do permutador, do coeficiente de transferência de calor por convecção interior (h_i), do coeficiente de transferência de calor por convecção exterior (h_e), da efetividade (ε) e da potência térmica transferida (\dot{Q}_i).

A análise da tabela 4.6 permite concluir que a configuração desalinhada não apresenta vantagens significativas face à configuração alinhada. Deste modo os permutadores estudados consideram tubos alinhados. Após esta conclusão o permutador P_{1A} passará a denominar-se por permutador P₁.

A tabela 4.7 apresenta um resumo com os principais resultados dos dimensionamentos efetuados para os diferentes permutadores. A observação da tabela 4.7 permite verificar que o P₄ é o permutador que apresenta o maior coeficiente de transferência de calor por convecção interior (h_i) e maior coeficiente global de transferência de calor (U), o P_{1A} apresenta o maior coeficiente de transferência de calor por convecção exterior (h_e), por fim o permutador P₅ apresenta a maior potência transferida (\dot{Q}_i). O permutador P₅ apresenta também a maior quantidade de calor recuperada do fluido quente e tem uma efetividade (ε) de 29%.

Tabela 4.7 - Principais resultados dos dimensionamentos efetuados.

Permutador	h_i [W/m ² .K]	h_e [W/m ² .K]	U [W/m ² .K]	NUT [-]	ε [-]	\dot{Q}_i [kW]
P₁	49,73	83,75	31,92	0,47	0,27	72
P₂	49,73	54,12	26,79	0,39	0,26	69
P₃	40,16	77,40	27,02	0,52	0,28	73
P₄	205,57	50,78	44,23	0,30	0,25	67
P₅	116,18	60,81	42,64	0,58	0,29	76

O cálculo da efetividade (ε) do permutador P₅ permite constatar que este é o permutador que mais recupera calor do fluido quente. Desta forma, do ponto de vista térmico, conclui-se que o permutador que proporciona uma melhor escolha é o P₅ uma vez que é aquele que recupera uma potência térmica mais elevada (76 kW), relativamente aos outros permutadores analisados.

4.2.2.2. Análise económica e comparativa de permutadores

A análise económica e comparativa dos permutadores vai ter como base a análise do consumo de dois combustíveis, os mais utilizados na indústria, e o custo dos permutadores em estudo. Os dois tipos de combustível que vão constar neste estudo são o gás natural e a eletricidade.

Para a análise apresentada no presente estudo considerou-se que a eletricidade custaria 0,16 €/kWh, e o gás natural custaria 0,07 €/kWh. É importante referir que 1 m³ de gás natural nas condições normais de pressão e temperatura ($P = 101325$ Pa e $T = 0^\circ\text{C}$) corresponde a 10,5305 kWh.

O processo de cálculo desenvolvido para a análise económica dos permutadores é apresentado no anexo III. De forma a calcular o preço de cada permutador foi efetuada uma caracterização detalhada de modo a poder obter o custo final (em €). Para tal foram utilizadas as equações apresentadas na tabela 4.8, estas equações baseiam-se em toda a parte construtiva do permutador, comprimentos, larguras, pesos de tubos, mão-de-obra, entre outros. A tabela 4.8 inclui ainda uma legenda detalhada com a descrição de todas as variáveis utilizadas.

Tabela 4.8 - Equações para determinar o custo final dos permutadores.

Variável	Uni.	Equação
T_{comp}	[m]	$C + (2 \times \phi_{tubo} \times 1,2) + \text{comprimento do atravancamento}$
T_{altura}	[m]	$(N_v \times d_e) + (N_v + 1) \times D_{T_{altura}} + (2 \times IF)$
$T_{largura}$	[m]	$(N_h \times d_e) + (N_h + 1) \times D_{T_{largura}} + (2 \times IF)$
C_{Tubos}	[m]	$N_t \times C$
$A_{Ext Perm}$	[m ²]	$(2 \times T_{comp} \times T_{altura}) + (2 \times T_{comp} \times T_{largura}) + (2 \times T_{altura} \times T_{largura})$
P_{perm}	[kg]	$(C_{Tubos} \times P_{tubos}) + (A_{Ext perm} \times P_{caixa}) + (P_I \times A_{Ext perm}) + P_o$ $(C_{Tubos} \times P_{tubos} \times V_{C tubos}) + (A_{Ext perm} \times P_{caixa} \times V_{C est}) + (P_o$
$C_{permutador}$	[€]	$\times V_{C tubos}) + (A_{Ext perm} \times V_{C iso}) + V_{C outros}$ $+ 3000$

Legenda: ϕ_{tubo} – diâmetro do tubo; T_{comp} - comprimento total; T_{altura} - altura total; $T_{largura}$ - largura total; N_v – N.º fileiras verticais; N_h – N.º fileiras horizontais; $D_{T_{altura}}$ - Distância entre tubos (altura); $D_{T_{largura}}$ - Distância entre tubos (largura); IF – Isolamento e forra; C_{Tubos} – Comprimento total dos tubos; N_t – Número de tubos; C – Comprimento dos tubos; $A_{Ext Perm}$ – Área externa do permutador; P_{perm} – Peso do permutador; P_{tubos} – Peso dos tubos; P_{caixa} – Peso da caixa; P_I – Peso do isolamento; P_o – Peso de outros componentes; $V_{C tubos}$ – valor da construção dos tubos; $V_{C est}$ – valor da construção da estrutura; $V_{C iso}$ – valor da construção do isolamento; $V_{C outros}$ – valor da construção de outros elementos do permutador

A tabela 4.9 apresenta um resumo com o custo final de cada permutador. Esta mostra também o número de tubos (N_t) e o custo total dos tubos ($C_{total dos tubos}$) bem como o peso de cada permutador. A tabela 4.9 permite observar também que o permutador que apresenta o custo mais elevado é o P₅, devendo-se maioritariamente à elevada quantidade de tubos (400) utilizados no permutador. O custo total dos tubos foi obtido com base no peso dos tubos, valor da construção dos tubos e comprimento total dos tubos. O permutador P₄ é o permutador mais económico (16270 €), apresentando também o menor número de tubos (196) e consequentemente é o permutador que menos pesa. No entanto os permutadores P₁ e P₂ apresentam o mesmo número de tubos, e consequentemente o mesmo custo de tubos, contudo diferem no custo e no peso do permutador, isto deve-se ao facto da distância entre o centro de cada tubo (t_p) ser ligeiramente diferente nestes permutadores. Desta forma as dimensões do permutador P₂ são maiores, o que leva a um ligeiro incremento de custo e peso face ao permutador P₁.

Tabela 4.9 - Apresentação do custo de cada permutador.

<i>Permutador</i>	N_t [-]	$C_{total\ dos\ tubos}$ [€]	$C_{permutador}$ [€]	<i>Peso do permutador</i> [kg]
P ₁	196	7652	18643	1241
P ₂	196	7652	19438	1281
P ₃	256	9995	22288	1566
P ₄	196	7652	16270	1122
P ₅	400	15617	25087	2050

De modo a determinar o tempo de retorno do investimento (“*payback*”) para cada permutador, foi calculado o equivalente de poupança de energia que cada permutador permite obter. Assim através da adição da componente diária de poupança de combustível em €/dia, foi possível chegar ao retorno do investimento no permutador em questão.

A tabela 4.10 apresenta a avaliação económica dos permutadores, que inclui: o custo do permutador ($C_{permutador}$), a poupança de eletricidade e de gás natural (em €/dia) que cada permutador permite obter, e o respetivo tempo de retorno em dias, tendo em conta a poupança de energia e o respetivo custo (€) que cada permutador teria, dependendo do tipo de combustível que fosse utilizado. Como o P₅ é o permutador que permite transferir mais potência térmica, conseqüentemente é aquele que mais poupança diária garante, relativamente aos dois tipos de combustível.

Para melhor demonstrar o que anteriormente foi referido, foi construída a figura 4.3 que apresenta a poupança de energia (€/dia) para o permutador P₁ em função do tempo, contabilizado em dias. A linha horizontal corresponde ao custo fixo do permutador. Desta forma é possível visualizar o combustível que permite um tempo de retorno do investimento (T_R) mais rápido.

Apresenta-se apenas um gráfico para o permutador P₁ de modo a elucidar os dados apresentados na tabela 4.9, 4.10 e 4.11.

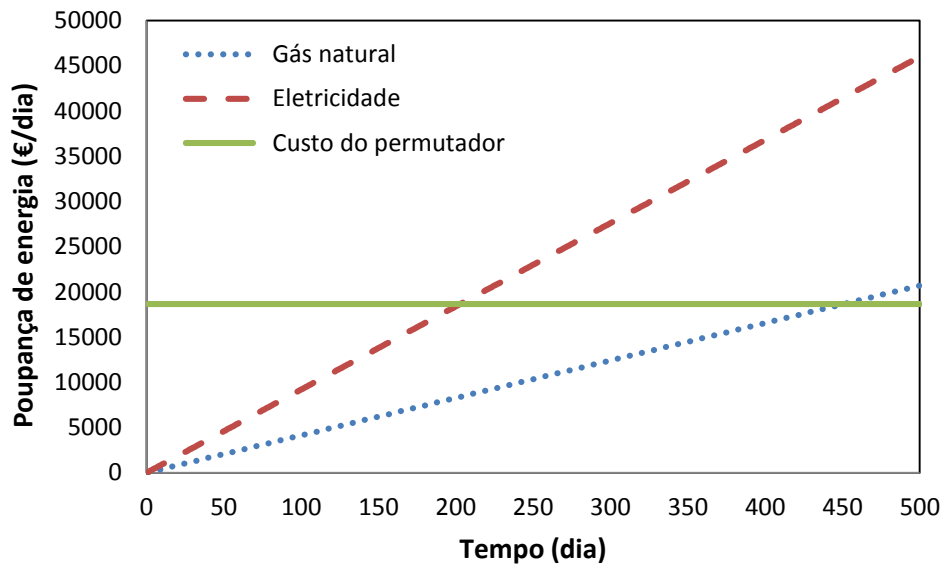


Figura 4.3 - Poupança de energia (€/dia) para o permutador P_1 em função do tempo (dia) que engloba: i) a implementação de um sistema de recuperação de energia (permutador de calor base (linha verde)); ii) o sistema original sem recuperação de energia utilizando, energia elétrica ou gás natural (linha vermelha e azul, respetivamente).

De forma a verificar quanto tempo demoraria a recuperar o valor investido no permutador (P_5) calculou-se o tempo de retorno do investimento (T_R) para o gás natural e para a eletricidade. Como o P_5 é o permutador mais caro, é aquele que mais tempo vai necessitar de forma a pagar o investimento efetuado (574 dias).

Diversos estudos publicados no Manual de Boas Práticas na Utilização Racional de Energia e Energias Renováveis da APICER (Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica) determinam que um investimento é muito atrativo se o tempo de retorno do investimento for menor ou igual a três anos, mediamente atrativo se for maior que três anos e menor ou igual a seis anos, e pouco atrativo se for superior a seis anos, APICER (2012). Em suma, pode concluir-se que um investimento é rentável se o seu T_R foi inferior a seis anos.

O permutador P_5 é o mais caro, mas também é o que mais calor consegue recuperar. Desta forma consegue obter um T_R inferior a dois anos para o gás natural, e inferior a um ano para a eletricidade, o que permite concluir que o investimento efetuado no permutador P_5 pode ser considerado economicamente atrativo.

Tabela 4.10 - Avaliação económica dos permutadores dimensionados.

<i>Permutador</i>	$C_{\text{permutador}}$ [€]	$C_{\text{€ eletricidade}}$ [€/dia]	$C_{\text{€ G.N}}$ [€/dia]	$T_{\text{R eletricidade}}$ [dias]	$T_{\text{R G.N}}$ [dias]
P ₁	18643,18	91,67	41,25	203	452
P ₂	19438,38	88,60	39,87	219	488
P ₃	22288,43	93,98	42,29	237	527
P ₄	16270,14	86,11	38,75	189	420
P ₅	25086,85	97,14	43,71	258	574

A tabela 4.11 apresenta os tempos de retorno do investimento a curto e longo prazo dos permutadores dimensionados. De forma a obter o tempo de retorno do investimento a curto prazo utilizou-se o gás natural como combustível de referência, por ser o combustível mais barato e desta forma fazer com que o tempo de retorno do investimento do permutador seja mais longo, situação mais desfavorável. O tempo de retorno do investimento a curto prazo determinou-se através do $T_{\text{R G.N}}$ de cada permutador, tal como mostra a tabela 4.10. Assim conclui-se que o permutador P₁ possui um $T_{\text{R G.N}}$ inferior aos permutadores P₂, P₃ e P₅. Contudo o permutador P₄ apresenta um $T_{\text{R G.N}}$ menor que todos os permutadores analisados, logo é o permutador com investimento mais atrativo, uma vez que apresenta um $T_{\text{R G.N}}$ de 1,15 anos (420 dias), como demonstra a tabela 4.10.

Tabela 4.11 - Payback a curto e longo prazo, dos permutadores dimensionados.

Comparação	Payback G. N (curto prazo)	Payback G.N (longo prazo)
P _{1A} e P ₂	P _{1A} - 452 dias	P ₂ - 576,26 dias (1,58 anos)
P _{1A} e P ₃	P _{1A} - 452 dias	P ₃ - 3505,05 dias (9,6 anos)
P _{1A} e P ₄	P ₄ - 420 dias	P _{1A} - 949,22 dias (2,60 anos)
P _{1A} e P ₅	P _{1A} - 452 dias	P ₅ - 2619,38 dias (7,18 anos)

O tempo de retorno do investimento de longo prazo utiliza a diferença entre o custo dos permutadores, bem como a diferença entre o custo por dia do combustível utilizado (gás natural). O cálculo do tempo de retorno do investimento de longo prazo baseia-se no quociente entre a diferença do custo dos permutadores e o custo do combustível por dia. Desta forma o permutador P₂ é o que possui um investimento mais atrativo relativamente aos restantes permutadores dimensionados, com um tempo de retorno do investimento de longo prazo de 1,58 anos (576,26 dias) como mostra a tabela 4.11.

De acordo com o Manual de Boas Práticas na Utilização Racional de Energia e Energias Renováveis da APICER o tempo de retorno do investimento a curto prazo de

todos os permutadores é considerado atrativo uma vez que são inferiores a três anos. Relativamente ao tempo de retorno do investimento de longo prazo, os permutadores P₁, P₂ e P₄ são considerados é bastante atrativos, pois têm um tempo de retorno do investimento menor que três anos. O tempo de retorno do investimento dos permutadores P₃ e P₅ são pouco atrativos, uma vez que são superiores a seis anos. O Anexo IV apresenta as etapas de cálculo utilizadas para a determinação dos tempos de retorno do investimento a longo prazo, presentes na tabela 4.11.

De forma a demonstrar o que cada permutador consegue poupar em energia por ano, foi construída a figura 4.4. Esta apresenta os dados referentes a um ano de poupança em gás natural e eletricidade por cada permutador de calor dimensionado. A observação da figura 4.4 permite afirmar que o P₃ é o equipamento que mais consegue poupar em gás natural. Relativamente à poupança anual em eletricidade o permutador P₅ é aquele que permite maior poupança.

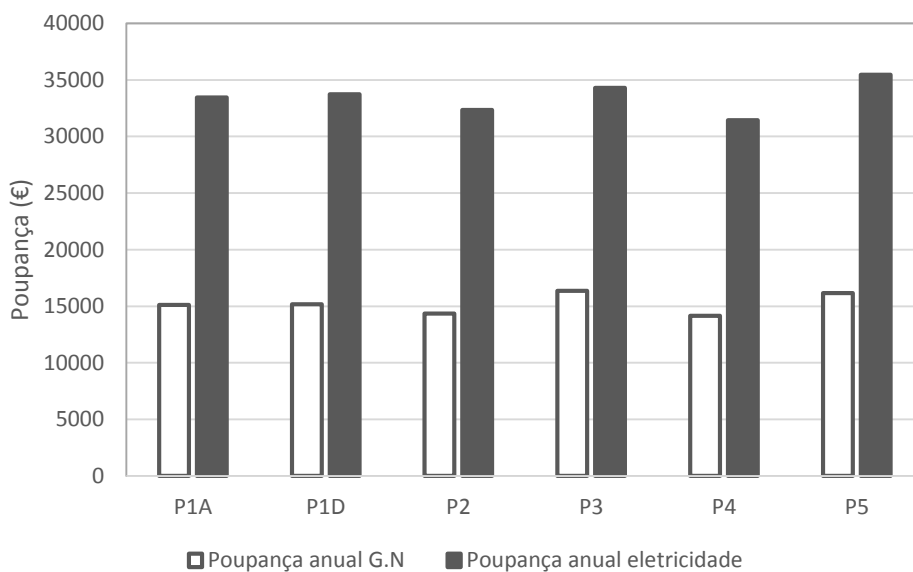


Figura 4.4 - Poupança de energia (gás natural e eletricidade) durante um ano para cada um dos permutadores dimensionados.

4.2.2.3. Cálculo da potência útil recuperada pelo sistema

Para que exista circulação de ar no sistema de recuperação de energia é necessário adicionar-lhe sistemas de insuflação/extração de ar (ventiladores), de modo a vencer as perdas de carga do escoamento interior e exterior através do permutador. Um dos objetivos do presente trabalho era determinar as potências: térmica recuperada ($P_{\text{térmica recuperada}}$), potência dos ventiladores ($P_{\text{ventiladores}}$) e potência útil recuperada ($P_{\text{útil recuperada}}$).

O dimensionamento dos ventiladores para o escoamento de ar exterior e interior foi efetuado com base nas equações apresentadas nas tabelas 4.12 e 4.13, respetivamente. O anexo V apresenta a folha de cálculo desenvolvida para cálculo das potências consumidas pelo ventilador interior e exterior.

Tabela 4.12 - Dimensionamento do ventilador exterior.

Variável	Unidades	Fórmula
\dot{V}_e	[m ³ /s]	$\dot{V}_e = v_e \times A_{pe}$
k_1	[-]	$k_1 = 1,009 \times \left(\frac{S_T - 1}{S_L - 1}\right)^{1,09/Re_{D,máx}^{0,0553}}$
f	[-]	$f = k_1 \times [0,233 + 45,78/(S_T - 1)^{1,1} \times Re_{D,máx}]$
ΔP_e	[Pa]	$\Delta P_e = N_{Linhas} \times f \times \left(\frac{1}{2} \times \rho_e \times v_{máx}^2\right)$
$P_{ventilador\ ext}$	[kW]	$P_{ventilador\ ext} = \Delta p_e \times \dot{V}_e$
$P_{recuperada}$	[kW]	$P_{recuperada} = \dot{Q}_i - (P_{ventilador\ ext.} + P_{ventilador\ int.})$

Na tabela 4.12, \dot{V}_e é o caudal volúmico de ar que circula no exterior dos tubos, ΔP_e é a perda de carga do ar exterior através dos tubos do permutador de calor, $P_{vent\ ext}$ é a potência consumida pelo ventilador exterior, que resulta da multiplicação da diferença de pressão com o caudal volúmico de ar que passa no exterior dos tubos, e a potência final recuperada pelo permutador de calor ($P_{recuperada}$), resulta da subtração da potência térmica transferida pela a soma das potências consumidas pelos ventiladores interno e externo.

Tabela 4.13 - Dimensionamento do ventilador interior.

Variável	Unidades	Fórmula
\dot{V}_i	[m ³ /s]	$\dot{V}_i = v_i \times A_{pi}$
R	[-]	$R = \frac{\varepsilon}{d_i}$
f	[-]	Valor retirado do diagrama de <i>Moody</i> , através da interseção do valor de R e do valor de $Re_{D,i}$
h_f	[m]	$h_f = f \times \left(\frac{L}{d_i}\right) \times \left(\frac{v_i^2}{2 \times 9,81}\right)$
ΔP_i	[Pa]	$\Delta P_i = \rho_i \times 9,81 \times h_f$
$P_{ventilador\ int}$	[kW]	$P_{ventilador\ int} = \Delta p_i \times \dot{V}_i$

Na tabela 4.13, \dot{V}_i é o caudal volúmico de ar que circula no interior dos tubos, f é o fator de atrito, h_f é a perda de carga (em metros de coluna de ar) e ΔP_i é a perda de carga em Pa.

A figura 4.5 mostra as potências: térmica recuperada, a potência dos ventiladores e potência útil recuperada, para os diferentes permutadores.

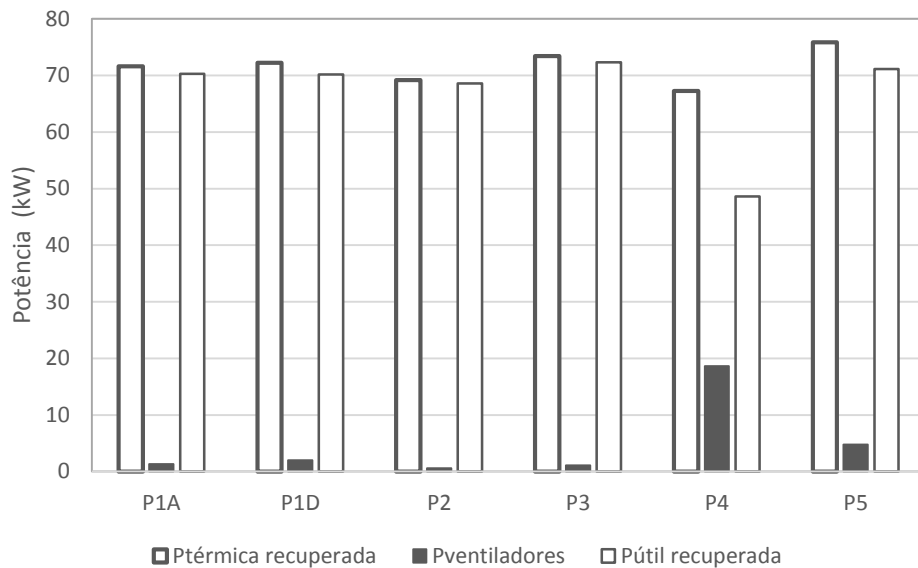


Figura 4.5 - Potências: térmica recuperada, dos ventiladores e útil recuperada, para os diferentes permutadores estudados.

A tabela 4.14 apresenta um sumário com as potências calculadas dos diferentes permutadores. Anteriormente já se tinha concluído que o permutador P₅ é aquele que mais potência térmica permite recuperar (75,89 kW). Todavia, considerando a potência consumida pelos ventiladores, verifica-se que o permutador P₃ é aquele que mais potência útil permite recuperar (72,32 kW). Relativamente à potência consumida pelos ventiladores, os ventiladores para o permutador P₄ são os que requerem maior potência de funcionamento (18,65 kW), fazendo com que este seja o permutador que menos potência útil permite recuperar (48,62 kW). Este facto deve-se ao diâmetro dos tubos do permutador P₄ ser reduzido ($d_i = 0,025$ m). Em comparação com o permutador P₁ o permutador P₄ possui menos de metade do diâmetro (0,055 m e 0,025m respetivamente).

O anexo V apresenta a folha de cálculo desenvolvida para cálculo da potência dos ventiladores.

Tabela 4.14 - Valores das potências: térmica recuperada, dos ventiladores e útil recuperada.

	<i>P</i> _{térmica recuperada} [kW]	<i>P</i> _{ventiladores} [kW]	<i>P</i> _{útil recuperada} [kW]
P₁	71,61	1,34	70,28
P_{1D}	72,22	2,01	70,21
P₂	69,21	0,61	68,60
P₃	73,42	1,10	72,32
P₄	67,27	18,65	48,62
P₅	75,89	4,76	71,13

A tabela 4.14 mostra que o permutador P₃ é aquele que mais potência útil recupera (72,32 kW), desta forma é considerado o permutador mais vantajoso. No entanto o permutador P₃ é o segundo permutador mais caro (22288,43 €), devendo-se este facto à quantidade de tubos que contém. Apesar de tudo o permutador P₃ possui um tempo de retorno de investimento relativamente baixo (inferior a dois anos), fazendo com que seja considerado um investimento muito atrativo.

4.3. Sistema de recuperação de energia – aplicação à indústria cerâmica

4.3.1. Descrição do caso de estudo

O caso de estudo que se segue consiste na instalação de um sistema de recuperação de energia (permutador de calor) numa fábrica de produção de telhas cerâmicas.

Para a produção de telhas, a fábrica, possui equipamentos de grandes dimensões, que consomem grandes quantidades de energia e que libertam muito calor para o meio envolvente. Com intuito de aproveitar parte do calor libertado pelos equipamentos decidiu fazer-se um estudo de forma a dimensionar um permutador de calor que se adequa às condições dos equipamentos de produção das telhas. O processo de transferência de calor é efetuado através de tubos, onde circulam os gases de escape, para o meio que envolve os tubos, onde circula o ar. Estes gases não se misturam em nenhum momento da transferência de calor, tal como mostra a figura 4.7.

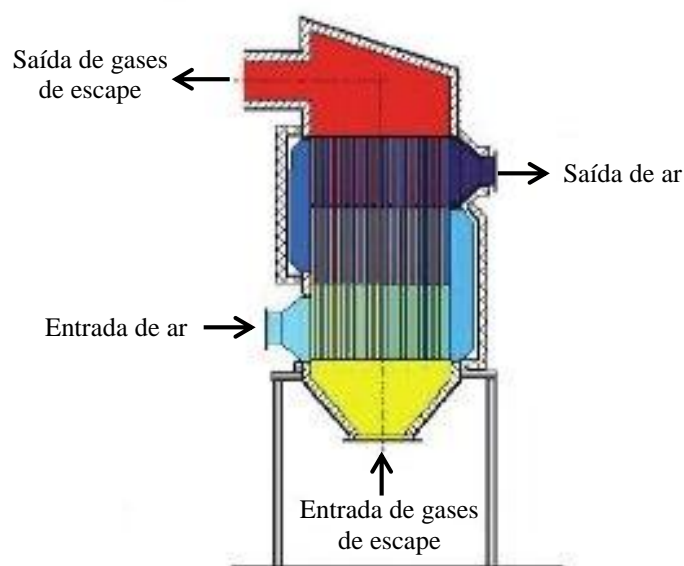


Figura 4.6 - Tipo de permutador de calor a instalar na indústria cerâmica em estudo.

Os objetivos deste estudo são: dimensionar um permutador de calor (P_1) que garanta um aumento de temperatura do ar ambiente de 20°C (entrada) para cerca de 140°C (na saída) e nestas condições determinar a potência térmica recuperada. Posteriormente, serão dimensionados outros permutadores (P_2 e P_3) de modo a recuperar a mesma potência térmica, mas com características diferentes do permutador P_1 , de forma a reduzir a potência consumida pelos ventiladores.

A tabela 4.15 apresenta os dados que caracterizam o caso de estudo. A fonte de energia térmica a recuperar (gás de exaustão) consistia de um caudal de $12,72\text{ kg/s}$ e uma temperatura de 270°C . O ar frio (ar ambiente) consistia de um caudal de $14,44\text{ kg/s}$ e uma temperatura de 20°C .

Tabela 4.15 – Caracterização do caso de estudo.

Variável	Valor	Uni.
Caudal mássico do gás de exaustão ($\dot{m}_{gás}$)	12,72	[kg/s]
Temperatura de entrada do gás de exaustão (T_{i1})	270	[$^\circ\text{C}$]
Caudal mássico do ar ambiente (\dot{m}_{ar})	14,44	[kg/s]
Temperatura de entrada do ar ambiente (T_{e1})	20	[$^\circ\text{C}$]

A folha de cálculo para o dimensionamento deste novo caso de estudo foi baseada na folha de cálculo do caso de estudo anterior relativo à indústria têxtil. No entanto após serem consideradas as características de entrada do presente caso de estudo verificou-se a necessidade de alterar alguns parâmetros de forma a garantir uma área interna de aproximadamente 500 m^2 para o permutador P_1 . Os parâmetros cuja dimensão foi alterada

foram o comprimento dos tubos do permutador (C) e o número de linhas e colunas de tubos, como mostra a tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Características principais do permutador em estudo.

Variável	Permutador	Uni.
C	5,2	[m]
H	1,095	[m]
L	1,095	[m]
Colunas	35	[-]
Linhas	35	[-]
N_t	1225	[-]
d_i	0,025	[m]
d_e	0,028	[m]
S_T e S_L (t_p)	0,030	[m]

As características principais do permutador em estudo (tabela 4.16) permitiram chegar ao objetivo da dimensão da área interior, como mostra a tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Áreas principais do permutador a dimensionar.

Variável	Equação	P_1	Uni.
A_i	$A_i = N_t \times d_i \times \pi \times L$	500,30	[m ²]
A_e	$A_e = N_t \times d_e \times \pi \times L$	560,33	[m ²]
$A_{i_1\ tubo}$	$A_{i_1\ tubo} = \frac{A_i}{N_t}$	0,408	[m ²]
$A_{e_1\ tubo}$	$A_{e_1\ tubo} = \frac{A_e}{N_t}$	0,457	[m ²]
A_{p_i}	$A_p = N_t \times \frac{\pi \times d_i^2}{4}$	0,601	[m ²]

O anexo VI mostra a folha de cálculo com o dimensionamento do permutador P_1 , que permitiu chegar a um valor de potência térmica recuperada de $\dot{Q}_i = 1754$ kW.

Os permutadores (P_2 e P_3) foram dimensionados de modo a garantir a mesma potência térmica recuperada ($\dot{Q}_i = 1754$ kW) que o permutador P_1 . Todavia, foram introduzidas alterações geométricas de modo a reduzir a potência consumida pelos ventiladores que garantem a circulação do ar interior e exterior.

Na análise e discussão de resultados serão apresentadas as características de cada permutador, de forma a verificar qual o que melhor se adequa ao presente caso de estudo.

4.3.2. Análise e discussão de resultados

A tabela 4.18 apresenta as características dos três permutadores utilizados para a realização do estudo paramétrico.

Tabela 4.18 - Características principais dos permutadores dimensionados.

Variável	P₁	P₂	P₃	Uni.
<i>C</i>	5,2	7,35	5,11	[m]
<i>H</i>	1,095	1,095	1,5	[m]
<i>L</i>	1,095	1,095	1,5	[m]
Colunas	35	32	44	[uni]
Linhas	35	32	44	[uni]
<i>N_t</i>	1225	1024	1936	[uni]
<i>d_i</i>	0,025	0,025	0,025	[m]
<i>d_e</i>	0,028	0,028	0,028	[m]
<i>S_T e S_L (t_p)</i>	0,030	0,033	0,033	[m]

Relativamente ao permutador P₁, o permutador P₂ considera um aumento do comprimento dos tubos e uma diminuição da quantidade de linhas e colunas de tubos, com conseqüente redução do número de tubos. O permutador P₃ considera uma diminuição no comprimento dos tubos, um aumento da largura e altura do permutador e um aumento do número de linhas e colunas, sendo este o que apresenta maior número de tubos (*N_t* = 1936).

A tabela 4.19 apresenta os resultados obtidos através do dimensionamento dos permutadores. O exemplo de cálculo das variáveis presentes na tabela 4.19 encontra-se no anexo VI.

Tabela 4.19 - Resultados obtidos através do dimensionamento dos permutadores.

Variável	P₁	P₂	P₃	Unidades
<i>V_p</i>	6,23	8,81	11,50	[m ³]
<i>A_i</i>	500,30	591,122	776,99	[m ²]
<i>h_i</i>	98,12	113,25	68,04	[W/m ² .K]
<i>h_e</i>	209,16	109,88	111,59	[W/m ² .K]
<i>U_t</i>	66,99	56,77	43,18	[W/m ² .K]
<i>Q̇_i</i>	1754	1754	1754	[kW]
<i>Q̇_i/V_p</i>	281,26	199,04	152,56	[kW/m ³]
<i>P_{ventilador ext}</i>	66,06	7,93	11,40	[kW]
<i>P_{ventilador int}</i>	21,34	43,17	8,40	[kW]
<i>P_{útil recuperada}</i>	1666,24	1703,01	1734,25	[kW]

Os dados presentes na tabela 4.19 incluem o volume do permutador (V_p), a área de permuta interior (A_i), o coeficiente de transferência de calor por convecção interior (h_i), o coeficiente de transferência de calor por convecção exterior (h_e), o coeficiente global de transferência de calor (U_t), a potência térmica recuperada (\dot{Q}_i), a potência térmica recuperada por m^3 (\dot{Q}_i/V_p), a potência do ventilador exterior ($P_{ventilador\ ext}$), a potência do ventilador interior ($P_{ventilador\ int}$) e a potência útil recuperada ($P_{\acute{u}til\ recuperada}$).

A tabela 4.19 permite observar que o permutador P_3 é aquele que maior volume possui ($V_p = 11,50\ m^3$). Como o número de tubos ($N_t = 1936$) é maior no permutador P_3 , este é o que possui a maior área de permuta ($A_i = 776,99\ m^2$). Nesta fase do estudo, o objetivo consiste em diminuir a potência consumida pelos ventiladores, mantendo a mesma potência térmica recuperada nos três permutadores ($\dot{Q}_i = 1754\ kW$).

O permutador P_1 é aquele que mais potência térmica recupera por metro cúbico de volume do permutador ($\dot{Q}_i/V_p = 281,26\ kW/m^3$). Analisando a potência consumida pelos ventiladores verifica-se que o permutador P_1 requer $66,06\ kW$ para circulação do ar exterior e $22,34\ kW$ para circulação de ar interior. Assim, a potência útil recuperada pelo permutador P_1 é $1666,24\ kW$. O permutador P_2 considera um aumento do espaçamento entre tubos ($t_p = 0,033\ m$) com conseqüente redução do número de tubos para $N_t = 1024$, o que se traduz numa redução considerável da potência consumida pelo ventilador exterior ($66,06\ kW$ para o P_1 e $7,93\ kW$ para o P_2). No entanto a potência consumida pelo ventilador interior aumenta de $21,34\ kW$ para o P_1 e $43,17\ kW$ para o P_2 . De modo a reduzir em simultâneo a potência consumida pelo ventilador interior e exterior considerou-se a utilização do permutador P_3 . Neste caso mantém-se o espaçamento do permutador P_2 ($t_p = 0,033\ m$) e aumentou-se a largura, altura e conseqüentemente o número de tubos. Assim a área de passagem exterior e interior aumentou, o que permite reduzir a potência consumida pelos ventiladores interior e exterior.

Em suma, a tabela 4.19 mostra que o permutador P_3 é aquele que garante maior potência útil recuperada ($1734,25\ kW$), contudo é também o permutador de maiores dimensões.

4.3.3. Análise económica e comparativa de permutadores

Na análise económica foram avaliados quatro parâmetros: o número de tubos de cada permutador (N_t), o custo total dos tubos ($C_{total\ dos\ tubos}$), o custo do permutador ($C_{permutador}$) e o peso de cada permutador. Estes parâmetros encontram-se calculados no anexo VIII do presente trabalho. A tabela 4.21 um resumo com a avaliação económica dos permutadores dimensionados e o respetivo peso.

O procedimento utilizado para calcular o tempo de retorno do investimento dos permutadores dimensionados encontra-se no anexo VIII.

Tabela 4.20 - Avaliação económica dos permutadores dimensionados e o respetivo peso.

<i>Permutador</i>	N_t [-]	$C_{total\ dos\ tubos}$ [€]	$C_{permutador}$ [€]	<i>Peso do permutador</i> [kg]
P ₁	1225	138165,30	159864,42	16277,60
P ₂	1024	163247,62	189970,76	19315,57
P ₃	1936	214578,30	242274,41	25067,59

Verifica-se que o permutador P₃ possui o maior número de tubos ($N_t = 1936$). O número de tubos vai influenciar o custo dos mesmos, bem como o custo do permutador, tornando assim o permutador P₃ o mais dispendioso para a presente aplicação.

De forma a verificar a viabilidade económica dos permutadores dimensionados foram determinados os tempos de retorno do investimento para cada permutador. O tempo de retorno do investimento baseia-se na poupança diária em gás natural e eletricidade, e no custo de cada permutador, que vai permitir obter o número de dias em que se pode recuperar o valor do investimento no equipamento. Desta forma, como o permutador P₃ é o mais caro, logo é aquele que possui maior tempo de retorno do investimento, ocorrendo o inverso para o permutador P₁, pois é o permutador mais barato, e conseqüentemente aquele que permite um tempo de retorno do investimento mais rápido. A tabela 4.22 apresenta a avaliação económica dos permutadores e o respetivo tempo de retorno do investimento a curto prazo.

Tabela 4.21 - Avaliação económica dos permutadores e respetivo tempo de retorno do investimento a curto prazo.

<i>Permutador</i>	$C_{\text{permutador}}$ [€]	$C_{\text{e}} \text{ eletricidade}$ [€/dia]	$C_{\text{e}} \text{ G.N}$ [€/dia]	$T_{\text{R}} \text{ eletricidade}$ [dias]	$T_{\text{R}} \text{ G.N}$ [dias]
P ₁	159864,42	2132,78	959,75	75	167
P ₂	189970,76	2179,85	980,93	87	194
P ₃	242274,41	2219,84	998,93	109	243

A tabela 4.22 mostra que todos os permutadores se encontram com um tempo de retorno de investimento inferior a um ano, sendo considerados como um investimento muito atrativo para a entidade que os implementar. No entanto o investimento mais atrativo é o do permutador P₁, pois é o que apresenta um tempo de retorno de investimento mais rápido que os restantes.

5. Fecho

5.1. Conclusões

Atualmente existe um enquadramento legal que estabelece regras e limites de consumo de energia, forçando as indústrias consumidoras intensivas de energia a implementar soluções que levem à melhoria da eficiência energética, de forma a cumprir as metas exigidas.

A implementação das medidas de eficiência energética transversais à indústria (medidas comuns a todas as indústrias), tal como no presente trabalho apresentado, contribuirá para a redução dos consumos e encargos com a energia consumida.

Constatou-se que nas indústrias consumidoras intensivas de energia existe grande potencial de economia de energia através da implementação de sistemas de recuperação de calor. Como a quantidade de energia térmica libertada e desperdiçada é elevada, é importante definir formas de recuperar esse calor, reduzindo o consumo de energia. A forma mais eficiente de o fazer é utilizando permutadores de calor, que podem ser acoplados a diferentes tipos de equipamentos que libertam calor, promovendo a integração energética, permitindo um aproveitamento eficiente desse calor para outros fins, reduzindo o consumo de energia da indústria onde se localiza.

O presente estudo demonstra que é possível implementar sistemas de recuperação de energia térmica, na indústria cerâmica e têxtil e vestuário, viáveis do ponto de vista técnico-económico, geralmente com tempos de retorno inferiores a 2 anos.

5.2. Sugestões de trabalhos futuros

No seguimento do presente trabalho seria importante efetuar a implementação prática dos sistemas de recuperação de energia propostos, bem como verificar a viabilidade técnico-económica através da monitorização de diferentes variáveis do processo (caudais, pressões, temperaturas, etc.), de modo a validar os dimensionamentos efetuados.

Seria também importante conjugar uma auditoria energética com uma auditoria ambiental, pois desta forma seria possível identificar propostas de melhoria e eficiência para a entidade em questão, tais como:

- 1) Implementação de equipamentos de proteção do meio ambiente e da saúde dos trabalhadores;
- 2) Diminuição do consumo de água;
- 3) Desperdício de energia elétrica;
- 4) Diminuição do ruído, entre outros.

6. Bibliografia

Documentos consultados

ABB, S.A (2012). *Os benefícios da eficiência Energética – Fazendo mais diminuindo os custos e as Emissões*. ABB, S.A Power and Productivity for a better world. Consultado em Novembro de 2013.

Águas (2008). *Transformação de Energia – aula n.º2*. Unidade Curricular de Gestão de Energia. Professor Miguel Águas do Instituto Superior Técnico, 2008/2009. Consultado em Janeiro de 2014.

Águas (2003). *Análise Energética de Sistemas*. Miguel Águas, Instituto Superior Técnico, 2003/2004. Consultado em Janeiro de 2014.

Antunes (2012). *Estudo da Influência de uma Unidade de Cogeração na Aplicação do SGCIE a uma Tinturaria*. Tese de Mestrado realizada no âmbito do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial. Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Braga. Consultado em Março de 2014.

APICER (2012). *Manual de Boas Práticas na Utilização Racional de Energia e Energias Renováveis*. Associação Portuguesa da Indústria Cerâmica – APICER, Programa Operacional de Fatores de Competitividade – COMPETE, Quadro de Referência Estratégica Nacional – QREN, União Europeia. Consultado em Março de 2014.

Brandão (2011). *Serviços de eficiência Energética em Edifícios Públicos*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tiago Miguel Pereira Soares Brandão. Porto. Consultado em Dezembro de 2013.

Chorincas (2013). *Contributo das intervenções do QREN em contexto urbano para o aumento da eficiência energética – um enquadramento da eficiência energética nas políticas públicas*. Joana Chorincas, Observatório do QREN, Núcleo de Estudos e Avaliação, 20 de Julho de 2013, Coimbra. Consultado em Maio de 2014.

CTCP (2009). *Energia – Guia do Empresário*. Centro Tecnológico do Calçado de Portugal, Dezembro de 2009. Acedido em Outubro de 2013.

Comissão Europeia (2013). *Desafios e políticas no domínio da energia: Contribuição da Comissão para o Conselho Europeu de 22 de maio de 2013*. Comissão Europeia. Consultado em Janeiro de 2014.

EDP PME (2015). *Soluções de Eficiência PME: SGCIE – Sistemas de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia*. Energia de Portugal. Consultado em Julho de 2015.

EDP - SGCIE (2015). *Soluções de Eficiência PME: Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia*. Consultado em Abril de 2015.

Galo e Barbosa (2008). *Auditoria Interna e Externa*. Univale - Universidade Vale do Rio. Gisele Cristiane Galo e Roseli Aparecida de Oliveira Barbosa. Brasil. Consultado em Janeiro de 2014.

Gomes (2013). *A Eficiência e o consumo de Energia na indústria Têxtil e Vestuário em Portugal - Uma Contribuição para a análise da evolução Recente*. Dissertação de Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente, Universidade do Porto. Francisca Marques Pires Gomes. Porto. Consultado em Janeiro de 2014.

Gonçalves (2008). *Auditoria de Gestão (Interna e Independente)*. Curso de Pós-Graduação Lato – Sensu, INPG – Faculdade São José dos Campos. José António Pereira Gonçalves. Brasil. Consultado em Janeiro de 2014.

IMATEC (2012). *Indústria Têxtil e do Vestuário – Roadmap para a Inovação 2012>>2020*. Intelligence em Tecnologias e Materiais Avançados. Consultado em Abril de 2014.

IXUS Energia (2013). *Serviços de Racionalização e Eficiência Energética*. IXUS Energia – Especialistas em racionalização e eficiência energética. Consultado em Outubro de 2013.

Magueijo *et al.*, (2010). *Medidas de Eficiência Energética Aplicáveis à Indústria Portuguesa: um enquadramento Tecnológico sucinto*. Magueijo, V., Fernandes, C., Matos, H., Nunes, C., Calau, J., Carneiro, J., Oliveira, F. Consultado em Abril de 2014.

Mateus e CIP (2010). *Indústria Portuguesa: Situação Atual e Evolução Recente*. Augusto Mateus & Associados e Confederação Empresarial de Portugal. Relatório final de Dezembro de 2010. Consultado em Fevereiro de 2015.

Soares (2010). *Plano de Medição e Verificação Aplicados em Instalações com Consumos Intensivos de Energia*. Dissertação de Mestrado realizada no âmbito de

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. Consultado em Setembro de 2014.

Saraiva (2010). *Estudo de potencial de melhoria de eficiência energética nos edifícios da Universidade do Porto*. Dissertação de Mestrado Integrado de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Paulo Roberto Moreira Saraiva. Porto. Consultado em Novembro de 2013.

Sousa (2011). *Análise do Desempenho Energético de Cozinhas Industriais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Alexandra Filipa Parente Sousa. Coimbra. Consultado em janeiro de 2014.

Vasconcelos (2012). *Melhoria da Eficiência Energética e Eliminação do Desperdício na Fábrica dos Plásticos Colep Portugal S.A.* Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Luís Lima Delgado Sena de Vasconcelos. Porto. Consultado em Novembro de 2013.

Vieira (2009). *Auditoria e Otimização de uma Unidade Fabril*. Trabalho final de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Miguel Sérgio Martins Vieira. Lisboa. Consultado em Janeiro de 2014,

Consulta de páginas WEB

ADENE (2014). Agência para a Energia, www.adene.pt. Consultado em Setembro de 2014.

ADENE - SGCIE (2014). *SGCIE – Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia*. www2.adene.pt. Consultado em Maio de 2014.

European Commission (2014), Comissão Europeia, http://ec.europa.eu/index_pt.htm. Consultado em Abril de 2014.

EDP (2015). Energia de Portugal, www.edp.pt. Consultado em Abril de 2015.

IEA (2014), International Energy Agency, www.iea.org/. Consultado em Abril de 2014.

Indústria e Ambiente (2014). *Energia – Relançamento da Economia*. Indústria e ambiente, www.industriaeambiente.pt/. Consultado em Dezembro de 2013.

Legislação

Despacho n.º 17449/2008, 2.ª série, N.º 123, p. 28093-28093. Direção-Geral de Energia e Geologia, Portugal. Consultado em Março de 2015.

Despacho n.º 19151/2002, 2ª série, N.º 198, p. 14664. Ministério da Economia, Portugal. Consultado em Março de 2015.

Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de Agosto de 2013, 1.ª série, N.º 159, p. 4988-5005. Ministério da Economia e do Emprego, Portugal. Consultado em Janeiro de 2014.

Decreto-Lei n.º 188/88, de 27 de maio, 1.ª série, N.º 123, p. 2284-2289. Ministério da Indústria e Energia, Portugal. Consultado em Novembro de 2013.

Decreto-Lei n.º 538/99, de 13 de Dezembro de 1999, 1ª série-A, p. 8801-8809. Ministério da Economia, Portugal. Consultado em Fevereiro de 2014.

Lei n.º 7/2013, de 22 de Janeiro de 2013, 1.ª série, N.º 15, p. 435-462. Portugal. Consultado em Janeiro de 2015.

Portaria n.º 26/2011, de 10 de Janeiro, 1.ª série, N.º 6, p. 165-168. Ministérios das Finanças e da Administração Pública, da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento e do Ambiente e do Ordenamento do Território, Portugal. Consultado em Março de 2015.

Portaria n.º 461/2007, de Abril de 2007, 2.ª série, N.º 108, p. 15378. Ministério da Administração Interna, do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, da Economia e da Inovação e das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Portugal. Consultado em Fevereiro de 2014.

Portaria n.º 1316/2010, de 28 de Dezembro, 1.ª série, N.º 250, p. 5943-5947. Ministério das Finanças e da Administração Pública, da Economia, da inovação e do Desenvolvimento, da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas, das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, do Ambiente e do Ordenamento do Território, da Educação e da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, Portugal. Consultado em Março de 2015.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, 1.ª série N.º 70, p. 2022-2091. Presidência do Conselho de Ministros, Portugal. Consultado em Janeiro de 2015.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2007, 1.ª série, p. 1289-1296. Portugal, Presidência do Conselho de Ministros, Portugal. Consultado em Setembro de 2014.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005, 1.ª série – B, p. 6168-6172. Resolução do Conselho de Ministros, Portugal. Consultado em Março de 2014.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

A. Anexos

Anexo I

Exemplo 1: Iluminação

O presente exemplo remete para uma fábrica de cerâmica utilitária, onde o sistema de iluminação poderia melhorar a sua eficiência energética, apenas substituindo as lâmpadas fluorescentes existente por lâmpadas fluorescentes de nova geração – TL5. Foram substituídas 900 lâmpadas de 58 W por lâmpadas de 36 W (TL5). A substituição permitiu manter a mesma intensidade luminosa e qualidade de iluminação. As tabelas A.1 e A.2 apresentam as economias antes e depois da aplicação da medida anteriormente referida, respetivamente, APICER (2012).

Tabela A.1 – Economias antes da aplicação da medida do exemplo 1.

	Consumo anual estimado [kWh/ano]	Custo anual da iluminação [€/ano]	Emissões de GEE [tCO ₂ e/ano]
Antes da aplicação da medida	172 260	15 000	81

Tabela A.2 - Economias depois da aplicação da medida do exemplo 1.

	Poupança anual estimada [kWh/ano]	Poupança anual da iluminação [€/ano]	Emissões de GEE Evitadas [tCO ₂ e/ano]
Economias com a aplicação da medida	65 340	5 700	30,71

São estimadas economias de cerca de 38%, em relação à situação original. A fábrica investiu 6750 € e obteve um tempo de retorno do investimento de 1 ano e 2 meses.

A figura A.1 mostra uma relação entre investimento e o tempo de retorno do investimento muito atrativa.

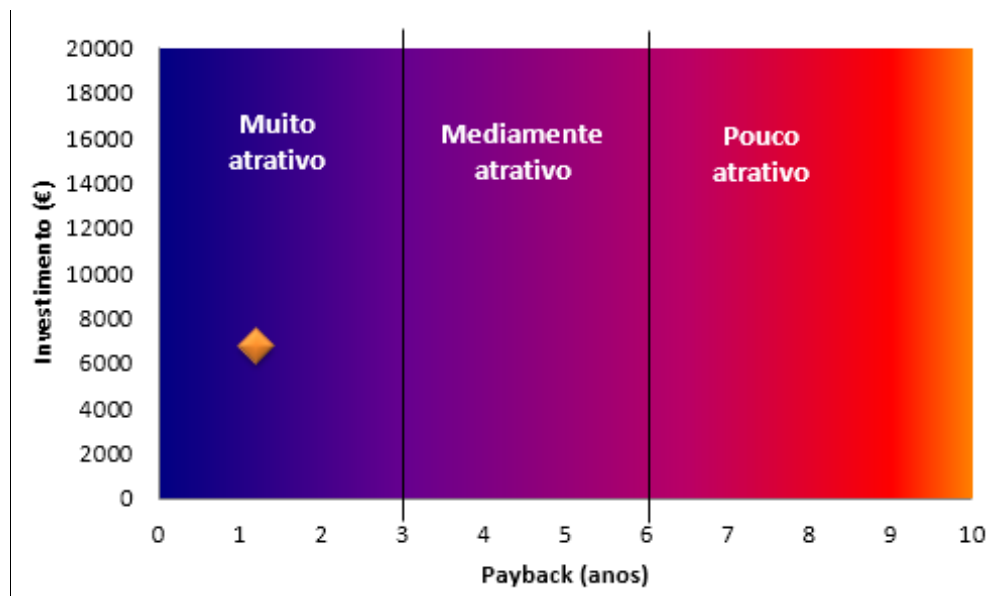


Figura A.1 - Relação entre o Investimento e tempo de retorno do investimento do estudo efetuado.

Nota: Um investimento é considerado muito atrativo quando tem um tempo de retorno do investimento inferior a 3 anos; mediamente atrativo para tempo de retorno do investimento no intervalo de 3 a 6 anos e pouco atrativo para um tempo de retorno do investimento superior a 6 anos.

Exemplo 2: Recuperação de calor

O presente exemplo remete para uma fábrica de pavimento e revestimento, onde se utilizam fornos de rolos. Observou-se que na zona de arrefecimento final do forno existe um caudal de ar quente com potencial de ser recuperado e que está a ser dissipado para o exterior. Este caudal pode ser redirecionado para o moinho pendular de modo a pré-aquecer o ar de moagem. A tabela A.3 mostra as economias obtidas com a aplicação da medida do exemplo 2, APICER (2012).

Tabela A.3 - Economias obtidas com a aplicação da medida do exemplo 2.

	Poupança anual estimada [m ³ (n)/ano]	Poupança anual de Gás Natural [€/ano]	Emissões de GEE Evitadas [tCO ₂ e/ano]
Economias obtidas com a aplicação da medida	28 500	9 400	69,2

São estimadas economias de cerca de 100%, em relação à situação original, uma vez que não existia medida nenhuma para a recuperação de calor nesta fábrica. A fábrica investiu 30000 euros e obteve um tempo de retorno do investimento de 3 anos e 2 meses.

A figura A.2 mostra uma relação entre o investimento e o tempo de retorno do investimento mediamente atrativa.

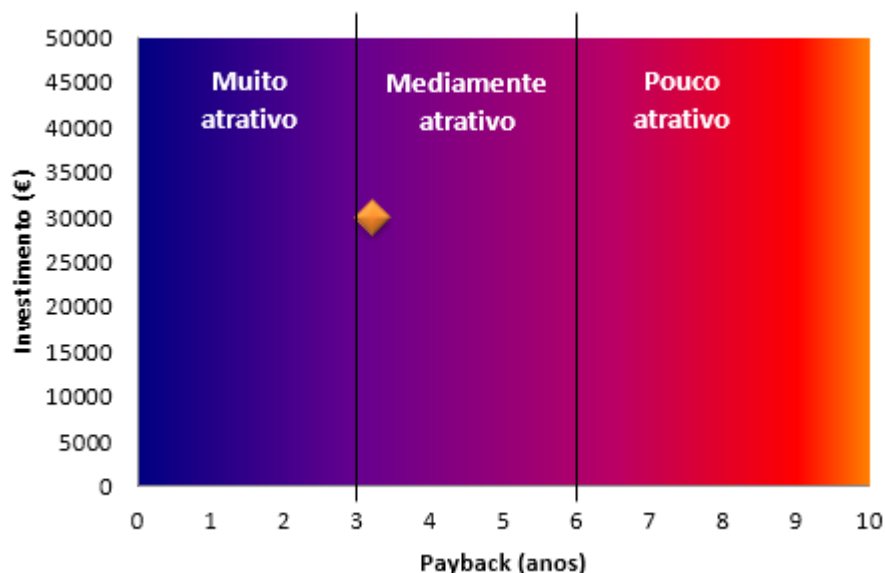


Figura A.2 - Relação entre o Investimento e tempo de retorno do investimento do estudo efetuado.

Exemplo 3: Ar comprimido

O presente exemplo remete para uma fábrica de tijolo, onde a sala que continha o compressor não era arejada. Desta forma sugeriu-se a admissão de ar do compressor, feita do exterior, de forma a melhorar a sua eficiência. Sabe-se que em condições normais, a temperatura exterior é sempre mais baixa que a temperatura na sala dos compressores. Observou-se uma redução de 4°C da temperatura do ar admitido, correspondente a um aumento de eficiência do compressor de 1%. As tabelas A.4 e A.5 mostram as economias antes e depois da aplicação da medida do exemplo 3, respetivamente, APICER (2012).

Tabela A.4 - Economia antes da aplicação da medida do exemplo 3.

	Consumo anual estimado [kWh/ano]	Custo anual de operação [€/ano]	Emissões de GEE [tCO₂e/ano]
Antes da aplicação da medida	201 304	14 100	94,6

Tabela A.5 - Economia depois da aplicação da medida do exemplo 3.

	Poupança anual estimada [kWh/ano]	Poupança anual em eletricidade [€/ano]	Emissões de GEE Evitadas [tCO ₂ e/ano]
Economias obtidas com a aplicação da medida	4 700	330	2,2

São estimadas economias de energia de cerca de 2,5%, em relação à situação original. Esta medida permite proporcionar ventilação á sala do compressor de forma a este admitir ar frio. A implementação da medida requer um investimento de 400 euros e o retorno do investimento é de 1 ano e 3 meses.

A figura A.3 mostra uma relação entre o investimento e o tempo de retorno do investimento muito atrativa.

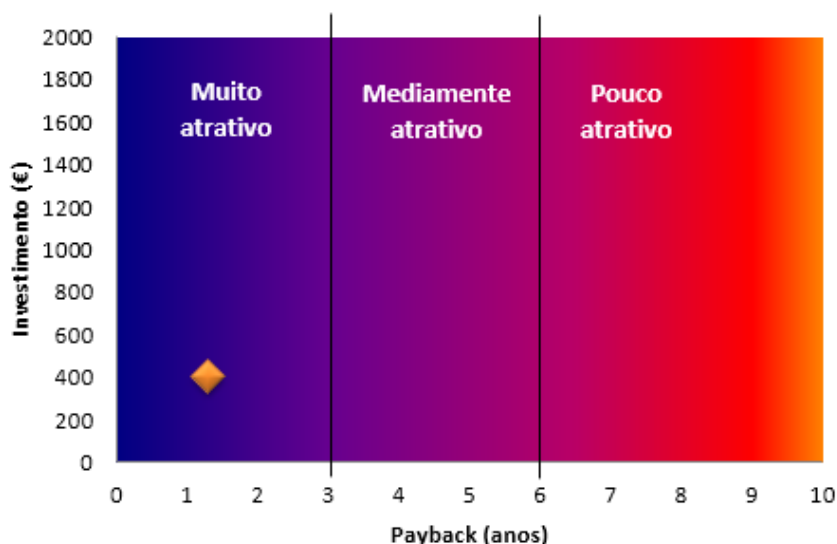


Figura A.3 - Relação entre o Investimento e tempo de retorno do investimento do estudo efetuado.

Exemplo 4: Cogeração

Este exemplo remete para a instalação de um sistema de cogeração com produção de vapor e água quente para um processo fabril, com venda de energia elétrica à rede (figura A.4), APICER (2012).

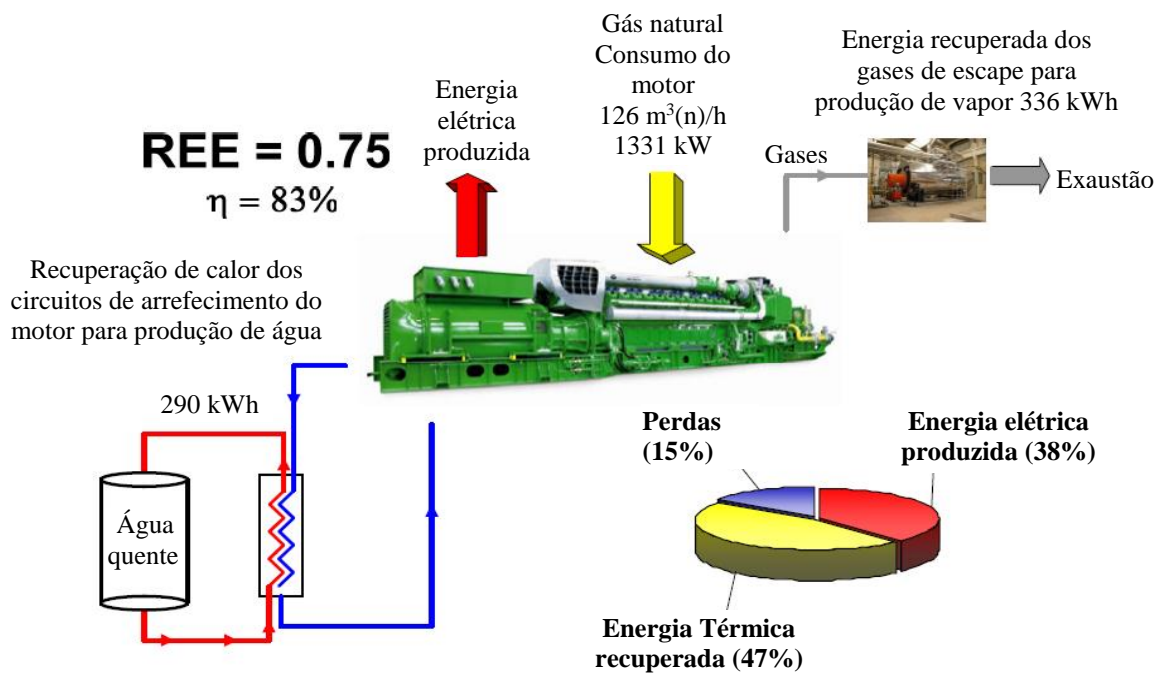


Figura A.4 - Instalação de um sistema de cogeração com produção de vapor e água quente para um processo fabril

A fábrica investiu 1000000 euros e obteve um tempo de retorno do investimento de 6 anos. As tabelas A.6 e A.7 mostram as receitas e os encargos da fábrica do exemplo 4, respetivamente.

Tabela A.6 - Tabela de receitas da fábrica do exemplo 4.

	kWh	€/ano
Energia produzida e fornecida á rede	1983433	317349
Recuperação técnica	2614176	74478
Total		391827

Tabela A.7 - Tabela de encargos da fábrica do exemplo 4.

		€/ano
Gás	529436 m ³ (n)/ano	158831
Óleo	2109 kg/ano	3163
Manutenção	[-]	63261
Total	[-]	225255

A figura A.5 mostra uma relação entre o investimento e o tempo de retorno do investimento considerada mediamente atrativa.

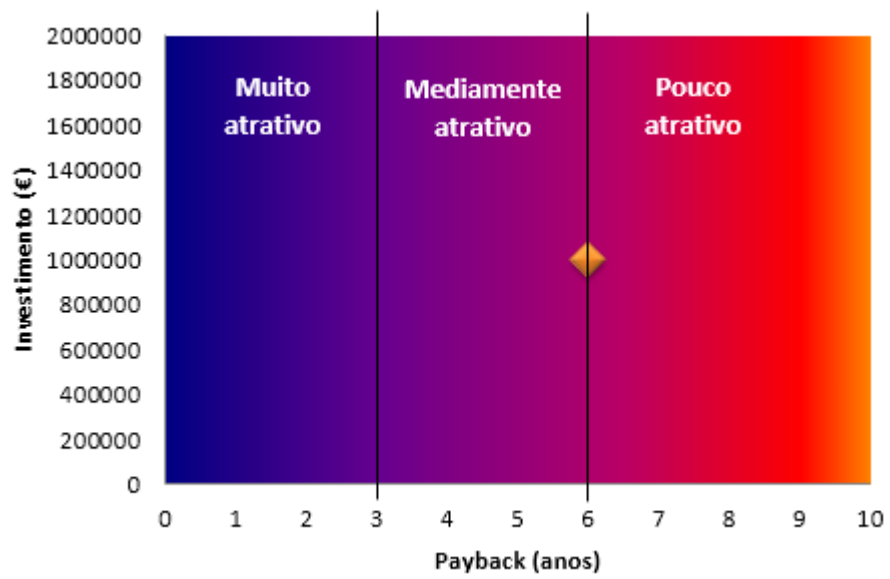
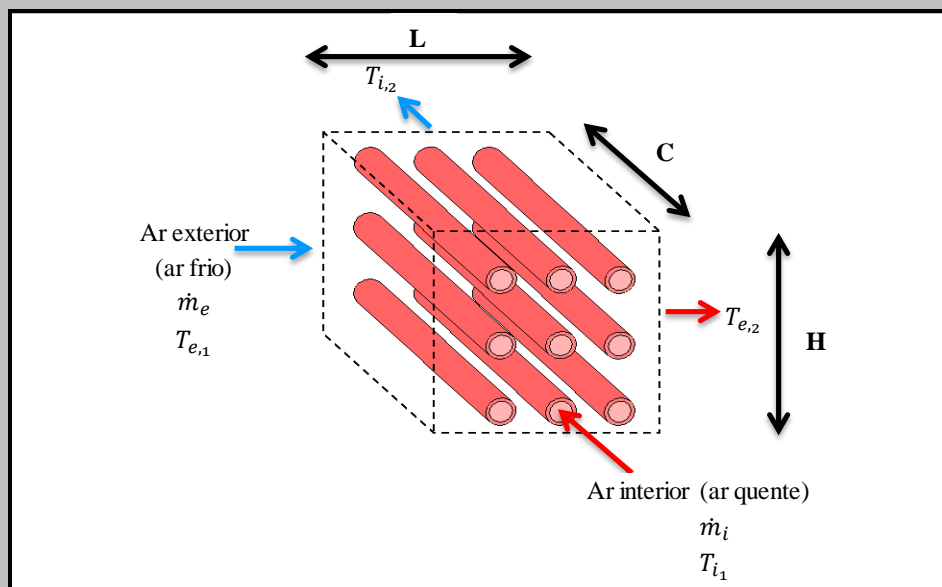


Figura A.5 - Relação entre o Investimento e tempo de retorno do investimento do estudo efetuado.

Anexo II

Dimensionamento de um permutador de calor ar-ar (P_{1A})



Caraterísticas gerais do permutador

Descrição - permutador de fluxo cruzado não misturado

Nº. Fileiras vertical	14	[uni]
Nº. Fileiras horizontal	14	[uni]
Nº. Tubos (N_t)	196	[uni]
Diâmetro interior (d_i)	0,055	[m]
Diâmetro exterior (d_e)	0,06	[m]
Raio interior (R_i)	0,0275	[m]
Raio exterior (R_e)	0,03	[m]
Comprimento dos tubos (C)	1,8	[m]
Altura do permutador (H)	1,095	[m]
Largura do permutador (L)	1,095	[m]
Tube pitch (t_p)	0,073	[m]
N.º de passes	1	[vez]
Cond. Térmica do AISI 360	15,8	[W/m.K]
PI	3,142	[-]

Volume do permutador (V_p) 2,158 [m³]

Condições de funcionamento

- **Ar interior (ar quente)**

Caudal mássico (\dot{m}_i) 5,13 [kg/s]

Temperatura de entrada (T_{i1}) 150 [°C]

- **Ar exterior (ar frio)**

Caudal mássico (\dot{m}_e) 4,1 [kg/s]

Temperatura de entrada (T_{e1}) 86 [°C]

Geometria do permutador

Áreas de permuta

Área interior (A_i) 60,96 [m²]

Ai de 1 tubo (A_{i1}) 0,311 [m²]

Área exterior (A_e) 66,50 [m²]

Ae de 1 tubo (A_{e1}) 0,339 [m²]

Áreas de passagem

Área de passagem interior (A_{pi}) 0,466 [m²]

Área de passagem exterior (A_{pe}) 1,971 [m²]

Propriedades dos gases

- **Ar interior (ar quente)**

Calor específico (C_{pi}) 1015 [J/kg.K]

Densidade (ρ_i) 0,8492 [kg/m³]

Viscosidade (μ_i) 0,0000237 [N.s/m²]

N.º de Prandtl (Pr_i) 0,714 [-]

Condutividade térmica (k_i) 0,034 [W/m.K]

- **Ar exterior (ar frio)**

Calor específico (C_{pe}) 1010 [J/kg.K]

Densidade (ρ_e) 0,99 [kg/m³]

Viscosidade (μ_e) 0,0000214 [N.s/m²]

N.º de Prandtl (Pr_e) 0,724 [-]

Condutividade térmica (k_e) 0,0299 [W/m.K]

Cálculo do coeficiente global de transferência de calor (U)

Coeficiente de transferência de calor por convecção interior (h_i)

Velocidade do ar no interior do tubo (V_i)	12,97	[m/s]
Número de Reynolds ($Re_{D,i}$)	25565,86	[-]
Número Nusselt ($\overline{Nu}_{D,i}$)	80,44	[-]
Coeficiente de transferência de calor por convecção (h_i)	49,73	[W/m ² .K]

Coeficiente de transferência de calor por convecção exterior (h_e)

Velocidade de aproximação do ar no exterior do tubo (V_e)	2,10	[m/s]
Velocidade máxima do ar no exterior do tubo ($V_{m\acute{a}x}$)	11,80	[m/s]
Número de Reynolds ($Re_{D,m\acute{a}x}$)	32750,22	[-]
Número Nusselt ($Nu_{D,e}$)	168,06	[-]
Valores de referência para o caso de estudo	C_1	0,27
	m	0,63
	$\frac{P_r}{P_{rs}}^{1/4}$	1
Coeficiente de transferência de calor por convecção (h_e)	83,75	[W/m ² .K]

Cálculo do coeficiente global de transferência de calor

Resistência térmica total (R_t)	0,10	[KW]
Coeficiente global de transferência de calor (U_t)	31,92	[W/m ² .K]

Cálculo da efetividade (ϵ)

Capacidade térmica do Ar interior (C_h)	5206,95	[W/K]
Capacidade térmica do Ar exterior (C_c)	4141	[W/K]
Taxa de capacidade térmica mínima (C_{mn})	4141	[W/K]
Taxa de capacidade térmica máxima ($C_{m\acute{a}x}$)	5206,95	[W/K]
Taxa de transferência de calor máx. ($Q_{m\acute{a}x}$)	265024	[W]
Rácio da capacidade térmica dos gases ar/ar (C_r)	0,80	[-]
Number of transfer units (NTU)	0,47	[-]
Cálculo da Efetividade (ϵ)	0,27	[%]

Cálculo da potência térmica Recuperada (Q_i)

Potência térmica recuperada (Q_i)	71613,86	[W]	≈	72	[kW]
Diferença de temp. Ar interior (ΔT_i)	13,75	[°C]			
Temperatura de saída do Ar quente (T_{i2})	136,25	[°C]			
Diferença de temp. Ar frio (ΔT_e)	17,29	[°C]			
Temperatura de saída do Ar frio (T_{e2})	103,29	[°C]			
Q_i / V_p	33,18	[kW/m ³]			

Anexo III

Análise económica de um permutador de calor

Cálculo do custo do permutador

Dimensões da estrutura do permutador

Distância entre tubo (altura)	0,052	[m]
Distância entre tubo (largura)	0,052	[m]
Comprimento do atravancamento	0,05	[m]
Isolamento e Forra	0,03	[m]
Contorno	0,15	[m]
Suportes	0,15	[m]
Total comprimento	1,85	[m]
Total altura	1,67	[m]
Total largura	1,67	[m]

Avaliação do custo do permutador

Peso dos tubos	2,41	[kg/m]
Peso da estrutura (caixa)	12,05	[kg/m ²]
Peso do isolamento	8,00	[kg/m ²]
Peso (outros)	30,00	[kg]
Valor de construção dos tubos	9,00	[€/kg]
Valor de construção da estrutura	25,00	[€/kg]
Valor da construção do isolamento	100,00	[€/m ²]
Valor de construção (outros elementos)	500,00	[€]
Comprimento total dos tubos	352,80	[m]
Custo total dos tubos	7652,23	[€]
Área externa do permutador	18,00	[m ²]
Peso do permutador	1241,07	[kg]
Custo do permutador	18643,18	[€]

Custo do permutador com as características indicadas

Custo da energia e poupança diária

Fonte de energia: Eletricidade

Custo da eletricidade	0,16	[€/kWh]
Custo hora	11,46	[€/h]
Horas de funcionamento p/ dia	8	[h/dia]
Poupança diária em energia elétrica (C _€)	91,67	[€/dia]

Fonte de energia: Gás Natural

Custo do gás Natural	0,07	[€/kWh]
Custo hora	5,16	[€/h]
Horas de funcionamento p/ dia	8,00	[h/dia]
Poupança diária em G.N (C _€)	41,25	[€/dia]

Cálculo do tempo de retorno do investimento

Fonte de energia: Eletricidade

Tempo de retorno do investimento	203,38	[dias]
	≈	
	203	[dias]

Fonte de energia: Gás Natural

Tempo de retorno do investimento	451,96	[dias]
	≈	
	452	[dias]

Anexo IV

Paybacks

	Custo total do equipamento [€]	Poupança [kW]	Poupança GN/dia [€]	Poupança Elec./dia [€]	Payback [dias]
P_{1A}	18643,2	71,6	41,25	91,67	452
P₂	19438,4	69,2	39,87	88,60	488
P₃	22288,4	73,4	42,29	93,98	527
P₄	16270,1	67,3	38,75	86,11	420
P₅	25086,9	75,9	43,71	97,14	574

Payback a longo prazo

P₂ - P_{1A}

Custo P ₂ - Custo P _{1A}	795,2	[€]	
Poupança Elec. P ₂ - Poupança Elec. P _{1A}	3,1	[€/dia]	
Payback longo prazo Elec.	259,02	[dias]	0,71 [anos]
Poupança GN P ₂ - Poupança GN P _{1A}	1,4	[€/dia]	
Payback longo prazo GN	576,23	[dias]	1,58 [anos]

P₃ - P_{1A}

Custo P ₃ - Custo P _{1A}	3645,3	[€]	
Poupança Elec. P ₃ - Poupança Elec. P _{1A}	2,3	[€/dia]	
Payback longo prazo Elec.	1578,03	[dias]	4,32 [anos]
Poupança GN P ₃ - Poupança GN P _{1A}	1,0	[€/dia]	
Payback longo prazo	3505,05	[dias]	9,60 [anos]

P_{1A} - P₄

Custo P _{1A} - Custo P ₄	2373,0	[€]	
Poupança Elec. P _{1A} - Poupança Elec. P ₄	5,6	[€/dia]	
Payback longo prazo Elec.	426,81	[dias]	1,17 [anos]
Poupança GN P _{1A} - Poupança GN P ₄	2,5	[€/dia]	
Payback longo prazo	949,22	[dias]	2,60 [anos]

P₅ - P_{1A}

Custo P ₅ - Custo P _{1A}	6443,7	[€]		
Poupança Elec. P ₅ - Poupança Elec. P _{1A}	5,5	[€/dia]		
<i>Payback</i> longo prazo	1178,00	[dias]	3,23	[anos]
Poupança GN P ₅ - Poupança GN P _{1A}	2,5	[€/dia]		
<i>Payback</i> longo prazo	2619,38	[dias]	7,18	[anos]

Quadro resumo de *Paybacks*

Comparação	Curto prazo G. N <i>Payback</i>	Longo prazo eletricidade	Longo prazo Gás Natural
Comparação entre P _{1A} e P ₂	P _{1A} - 452 dias	P ₂ compensa ao fim de 259,02 dias (0,71 anos)	P ₂ compensa ao fim de 576,26 dias (1,58 anos)
Comparação entre P _{1A} e P ₃	P _{1A} - 452 dias	P ₃ compensa ao fim de 1578,03 dias (4,32 anos)	P ₃ compensa ao fim de 3505,05 dias (9,6 anos)
Comparação entre P _{1A} e P ₄	P ₄ - 420 dias	P _{1A} compensa ao fim de 426,81 dias (1,17 anos)	P _{1A} compensa ao fim de 949,22 dias (2,60 anos)
Comparação entre P _{1A} e P ₅	P _{1A} - 452 dias	P ₅ compensa ao fim de 1178,00 dias (3,23 anos)	P ₅ compensa ao fim de 2619,38 dias (7,18 anos)

Anexo V

Cálculo da potência útil recuperada

Cálculo da potência consumida pelo ventilador exterior (\dot{V}_e)

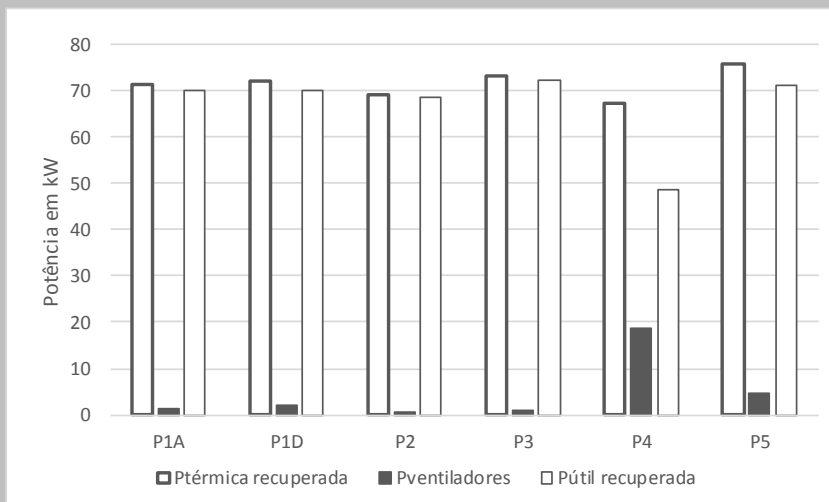
Caudal volumétrico de ar que circula no exterior dos tubos (\dot{V}_e)	4,14	[m ³ /s]
Caudal mássico de ar ($\dot{m}_{ar,e}$)	14909,09	[kg/h]
Constante K_1	1,01	[-]
$S_L = S_T$	1,22	[-]
Fator de atrito f	0,24	[-]
Diferença de pressão Δ_{pe}	234,13	[Pa]
Potência do ventilador a instalar $P_{ventilador\ ext}$	969,62	[W]
Conversão $P_{ventilador\ ext}$	0,97	[kW]

Cálculo da potência consumida pelo ventilador interior (\dot{V}_i)

Caudal volumétrico de ar que circula no interior dos tubos (\dot{V}_i)	6,04	[m ³ /s]
Caudal mássico de ar ($\dot{m}_{ar,i}$)	21747,53	[kg/h]
Rugosidade do aço (ϵ)	0,000046	[m]
Rugosidade relativa $R = \epsilon / d_i$	0,000836	[-]
Através do $Re_{D,i}$ e R pelo Diagrama de Moody: $f =$	0,026	[-]
hf	7,30	[m]
Diferença de pressão Δ_{pi}	60,80	[Pa]
Potência do ventilador a instalar $P_{ventilador\ int}$	367,32	[W]
Conversão de $P_{ventilador\ int}$	0,37	[kW]

Potência Consumida ventiladores Versos Potência Recuperada sistema

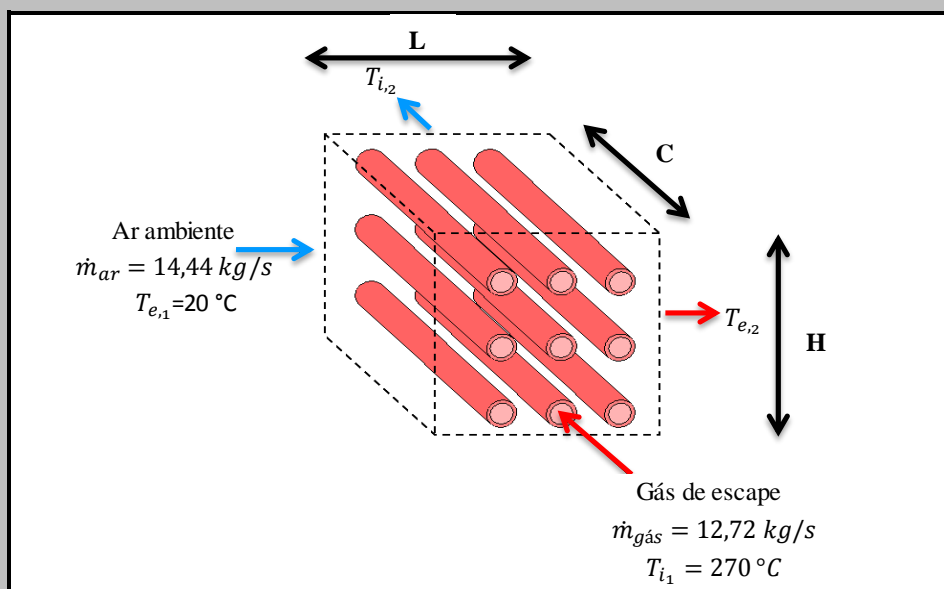
	P_{térmica recuperada}	P_{ventiladores}	P_{útil recuperada}	Unidades
P_{1A}	71,61	1,34	70,28	[kW]
P_{1D}	72,22	2,01	70,21	[kW]
P₂	69,21	0,61	68,60	[kW]
P₃	73,42	1,10	72,32	[kW]
P₄	67,27	18,65	48,62	[kW]
P₅	75,89	4,76	71,13	[kW]



Potência recuperada pelo sistema versos potência consumida pelos ventiladores interior e exterior

Anexo VI

Dimensionamento de um permutador de calor Gás-Ar (P_1)



Caraterísticas gerais do permutador

Descrição - permutador de fluxo cruzado não misturado

Nº. Fileiras vertical	35	[uni]
Nº. Fileiras horizontal	35	[uni]
Nº. Tubos (N_t)	1225	[uni]
Diâmetro interior (d_i)	0,025	[m]
Diâmetro exterior (d_e)	0,028	[m]
Raio interior (R_i)	0,0125	[m]
Raio exterior (R_e)	0,014	[m]
Comprimento dos tubos (C)	5,2	[m]
Altura do permutador (H)	1,095	[m]
Largura do permutador (L)	1,095	[m]
Tube pitch (t_p)	0,03	[m]
N.º de passes	1	[vez]
Cond. Térmica do AISI 360	15,8	[W/m.K]
PI	3,142	[-]
Volume do permutador (V_p)	6,23	[m ³]

Condições de funcionamento

- **Ar interior (gás de escape)**

Caudal mássico ($\dot{m}_{gás}$) 12,72 [kg/s]

Temperatura de entrada (T_{i1}) 270 [°C]

- **Ar exterior (ar ambiente)**

Caudal mássico (\dot{m}_{ar}) 14,44 [kg/s]

Temperatura de entrada (T_{e1}) 20 [°C]

Geometria do permutador

Áreas de permuta

Área interior (A_i) 500,30 [m²]

Ai de 1 tubo (A_{i1}) 0,408 [m²]

Área exterior (A_e) 560,33 [m²]

Ae de 1 tubo (A_{e1}) 0,457 [m²]

Áreas de passagem

Área de passagem interior (A_{pi}) 0,601 [m²]

Área de passagem exterior (A_{pe}) 5,694 [m²]

Propriedades dos gases

- **Ar interior (ar quente)**

Calor específico (C_{pi}) 1015 [J/kg.k]

Densidade (ρ_i) 0,8492 [kg/m³]

Viscosidade (μ_i) 0,0000237 [N.s/m²]

N.º de Prandtl (Pr_i) 0,714 [-]

Condutividade térmica (k_i) 0,034 [W/m.K]

- **Ar exterior (ar frio)**

Calor específico (C_{pe}) 1010 [J/kg.k]

Densidade (ρ_e) 0,99 [kg/m³]

Viscosidade (μ_e) 0,0000214 [N.s/m²]

N.º de Prandtl (Pr_e) 0,724 [-]

Condutividade térmica (k_e) 0,0299 [W/m.K]

Cálculo do coeficiente global de transferência de calor (U)

Coeficiente de transferência de calor por convecção interior (h_i)

Velocidade do ar no interior do tubo (V_i)	24,91	[m/s]
Número de Reynolds ($Re_{D,i}$)	22313,76	[-]
Número de Nusselt ($Nu_{D,i}$)	72,15	[-]
Coeficiente de transferência de calor por convecção (h_i)	98,12	[W/m ² .K]

Coeficiente de transferência de calor por convecção exterior (h_e)

Velocidade de aproximação do ar no exterior do tubo (V_e)	2,56	[m/s]
Velocidade máxima do ar no exterior do tubo ($V_{m\acute{a}x}$)	32,24	[m/s]
Número de Reynolds ($Re_{D,m\acute{a}x}$)	41762,73	[-]
Número Nusselt ($Nu_{D,e}$)	195,87	[-]
Valores de referência para o caso de estudo	C_1	0,27
	m	0,63
	$\frac{Pr}{Pr_s}^{1/4}$	1
Coeficiente de transferência de calor por convecção (h_e)	209,16	[W/m ² .K]

Cálculo do coeficiente global de transferência de calor

Resistência térmica total (R_t)	0,04	[K/W]
Coeficiente global de transferência de calor (U_t)	66,99	[W/m ² .K]

Cálculo da efetividade (ϵ)

Capacidade térmica do Ar interior (C_h)	12910,8	[W/K]
Capacidade térmica do Ar exterior (C_c)	14584,4	[W/K]
Taxa de capacidade térmica mínima (C_{min})	12910,8	[W/K]
Taxa de capacidade térmica máxima ($C_{m\acute{a}x}$)	14584,4	[W/K]
Taxa de transferência de calor máx. ($Q_{m\acute{a}x}$)	3227700	[W]
Rácio da capacidade térmica dos gases ar/ar (C_r)	0,89	[-]
Number of transfer units (NTU)	2,60	[-]
Cálculo da Efetividade (ϵ)	0,54	[%]

Cálculo da potência térmica Recuperada (Q_i)

Potência térmica recuperada (Q_i) [W] \approx [kW]

Diferença de temp. Ar interior (ΔT_i) [°C]

Temperatura de saída do Ar quente (T_{i_2}) [°C]

Diferença de temp. Ar frio (ΔT_e) [°C]

Temperatura de saída do Ar frio (T_{e_2}) [°C]

Q_i / V_p [kW/m³]

Anexo VII

Cálculo da potência útil recuperada

Cálculo da potência consumida pelo ventilador exterior (\dot{V}_e)

Caudal volumétrico de ar que circula no exterior dos tubos (\dot{V}_e)	14,59	[m ³ /s]
Caudal mássico de ar ($\dot{m}_{ar,e}$)	52509,09	[kg/h]
Constante K_1	1,01	[-]
$S_L = S_T$	1,09	[-]
Fator de atrito f	0,25	[-]
Diferença de pressão Δ_{pe}	4528,74	[Pa]
Potência do ventilador a instalar $P_{ventilador\ ext}$	66055,54	[W]
Conversão $P_{ventilador\ ext}$	66,06	[kW]

Cálculo da potência consumida pelo ventilador interior (\dot{V}_i)

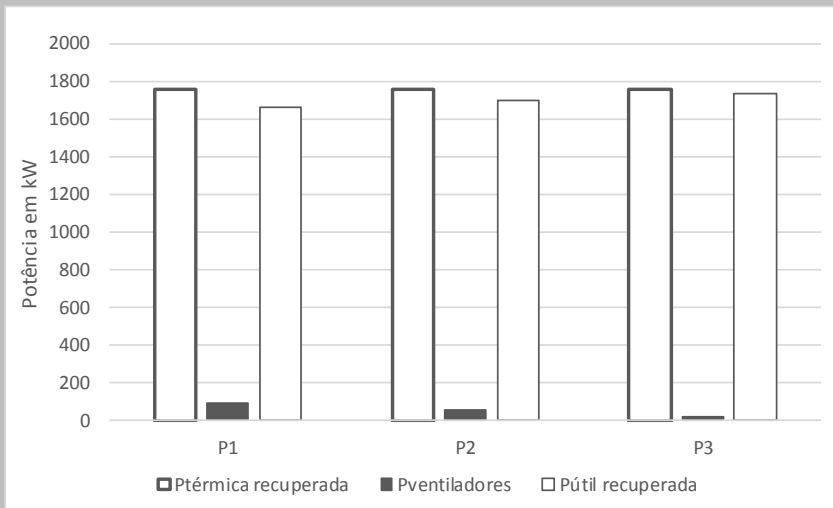
Caudal volumétrico de ar que circula no interior dos tubos (\dot{V}_i)	14,98	[m ³ /s]
Caudal mássico de ar ($\dot{m}_{ar,i}$)	53923,69	[kg/h]
Rugosidade do aço (ϵ)	0,000046	[m]
Rugosidade relativa $R = \epsilon / d_i$	0,001840	[-]
través do $Re_{D,i}$ e R pelo Diagrama de Moody: $f =$	0,026	[-]
hf	171,03	[m]
Diferença de pressão Δ_{pi}	1424,82	[Pa]
Potência do ventilador a instalar $P_{ventilador\ int}$	21342,05	[W]
Conversão de $P_{ventilador\ int}$	21,34	[kW]

Cálculo da potência útil recuperada pelo sistema ($P_{\text{útil recuperada}}$)

Potência térmica recuperada (Q_i)	1753,63	[kW]
Potência dos ventiladores (P_v)	87,40	[kW]
Potência útil recuperada ($P_{\text{útil recuperada}}$)	1666,24	[kW]

Potência Consumida ventiladores Versos Potência Recuperada sistema

	$P_{\text{térmica recuperada}}$	$P_{\text{ventiladores}}$	$P_{\text{útil recuperada}}$	Unidades
P_1	1753,63	87,40	1666,24	[kW]
P_2	1754,11	51,10	1703,01	[kW]
P_3	1754,05	19,80	1734,25	[kW]



Potência recuperada pelo sistema versos potência consumida pelos ventiladores interior e exterior

Anexo VIII

Análise económica de um permutador de calor

Cálculo do custo do permutador

Dimensões da estrutura do permutador

Distância entre tubo (altura)	0,022	[m]
Distância entre tubo (largura)	0,022	[m]
Comprimento do atravancamento	0,05	[m]
Isolamento e Forra	0,03	[m]
Contorno	0,15	[m]
Suportes	0,15	[m]
Total comprimento	5,25	[m]
Total altura	1,81	[m]
Total largura	1,81	[m]

Avaliação do custo do permutador

Peso dos tubos	2,41	[kg/m]
Peso da estrutura (caixa)	12,05	[kg/m ²]
Peso do isolamento	8,00	[kg/m ²]
Peso (outros)	30,00	[kg]
Valor de construção dos tubos	9,00	[€/kg]
Valor de construção da estrutura	25,00	[€/kg]
Valor da construção do isolamento	100,00	[€/m ²]
Valor de construção (outros elementos)	500,00	[€]
Comprimento total dos tubos	6370,00	[m]
Custo total dos tubos	138165,30	[€]
Área externa do permutador	44,68	[m ²]
Peso do permutador	16277,60	[kg]
Custo do permutador	159864,42	[€]

Custo do permutador com as características indicadas

Custo da energia e poupança diária

Fonte de energia: Eletricidade

Custo da eletricidade	0,16	[€/kWh]
Custo hora	266,60	[€/h]
Horas de funcionamento p/ dia	8	[h/dia]
Poupança diária em energia elétrica (C _€)	2132,78	[€/dia]

Fonte de energia: Gás Natural

Custo do gás Natural	0,07	[€/kWh]
Custo hora	119,97	[€/h]
Horas de funcionamento p/ dia	8,00	[h/dia]
Poupança diária em G.N (C _€)	959,75	[€/dia]

Cálculo do tempo de retorno do investimento

Fonte de energia: Eletricidade

Tempo de retorno do investimento	74,96	[dias]
	≈	
	75	[dias]

Fonte de energia: Gás Natural

Tempo de retorno do investimento	166,57	[dias]
	≈	
	167	[dias]

Esta página foi intencionalmente deixada em branco