

Medidas Transversais de Eficiência Energética para a Indústria

Edição

Direção-Geral de Energia e Geologia, novembro de 2016

Autores IST:

Maria Cristina Fernandes
Henrique A. Matos
Clemente Pedro Nunes

Autores DGEG:

João Correia Bernardo
Isabel Cabrita
Paulo Martins
Cristina Cardoso
Paulo Partidário
Paula Gomes

Agradecimentos:

Agradecemos os contributos de Tiago Dias e Catarina Braz, alunos de doutoramento do IST, a Carlos Madureira Pimparel e Sandro Silva Pereira, engenheiros da Direção de Sustentabilidade Energética, da DGEG, pela revisão de alguns capítulos desta obra.

Ficha Técnica

Título

Medidas Transversais de Eficiência Energética para a Indústria

Desenhos dos separadores dos Capítulos

Inês Ramos Costa

Edição

1ª edição

Data

novembro de 2016

Tiragem

2000 exemplares

ISBN:

978-972-8268-41-1

Produção

Europress Indústria Gráfica

Depósito Legal

427748/17

ÍNDICE

1	ENQUADRAMENTO ESTRATÉGICO NO ÂMBITO NACIONAL E INTERNACIONAL	3
1.1	Introdução e Objetivos	3
1.2	Plano de Ação para a Eficiência Energética na vertente industrial	6
1.2.1	União Europeia	6
1.2.2	Portugal	7
1.2.3	Dinamarca	13
1.2.4	Reino Unido	14
1.2.5	Espanha	15
2	INICIATIVAS INTERNACIONAIS PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	19
2.1	Plano Estratégico Europeu para as Tecnologias Energéticas	19
2.2	Tecnologias e Sistemas Industriais relacionados com energia AIE/IETS	22
2.2.1	Anexo IX - Sistemas de Separação	23
2.2.2	Anexo XI - Indústria baseada em Biorrefinarias	24
2.2.3	Anexo XIII - Aplicações de Bombas de Calor Industriais	24
2.2.4	Anexo XIV - Integração de processos na Indústria do Aço e do Ferro	25
2.2.5	Anexo XV - Recuperação do calor industrial em excesso	27
2.2.6	Anexo XVI - Eficiência Energética em PME's	27
3	MEDIDAS PARA SISTEMAS ACIONADOS A MOTORES ELÉTRICOS	31
3.1	Motores elétricos	31
3.1.1	Otimização de motores	32
3.1.2	Substituição de motores convencionais por motores mais eficientes	33
3.1.3	Utilização de variadores eletrónicos de velocidade (VEV)	35
3.2	Sistemas de bombagem	37
3.2.1	Aplicação de VEV aos sistemas de bombagem	39
3.3	Sistemas de ventilação	41
3.4	Sistemas de compressão de ar	42
3.4.1	Otimização da pressão do ar comprimido	45
3.4.2	Utilização de variadores eletrónicos de velocidade	46
3.4.3	Melhoramentos do sistema de controlo de funcionamento carga/vazio	46
3.4.4	Redução de fugas de ar comprimido	46
3.4.5	Recuperação e utilização do calor desperdiçado pelos compressores	47
3.4.6	Discussão sobre configuração de compressores - um exemplo	47
3.5	Sistemas de transportadores de sólidos	49
3.5.1	Transportadores de correias	49
3.5.2	Transportadores de esteiras	50

3.5.3	Transportadores por gravidade	50
3.5.4	Transportadores de rosca/parafuso (helicoidal)	50
3.5.5	Transportador vibratório	51
3.5.6	Transportador pneumático	51
3.5.7	Transportador de elevador de cestos	52
4	PRODUÇÃO DE CALOR E FRIO	55
4.1	Sistemas de combustão	55
4.1.1	Diminuição das perdas térmicas num sistema de combustão	56
4.1.2	Tecnologias de combustão com ar a temperaturas elevadas (HiTAC)	58
4.1.3	Aumento de eficiência energética de fornalhas e fornos	60
4.2	Eficiência energética nos sistemas de produção e distribuição de vapor	61
4.2.1	Utilização de economizadores para pré-aquecimento de água de alimentação	61
4.2.2	Remoção preventiva de depósitos nas superfícies de transferência de calor	61
4.2.3	Minimização de purgas das caldeiras	62
4.2.4	Recuperação de calor nas correntes de purga	62
4.2.5	Implementação de programas de controlo, e manutenção de purgadores	62
4.2.6	Recolha de condensados para reutilização na caldeira	62
4.2.7	Utilização de vapor flash	63
4.2.8	Isolamento térmico no sistema de produção e distribuição de vapor	63
4.2.9	Instalação de um pré-aquecedor de ar	63
4.2.10	Medidas de controlo e manutenção	63
4.2.11	Minimização de perdas em ciclos curtos de funcionamento das caldeiras	64
4.3	Sistemas de produção de frio industrial	64
4.3.1	Sistemas alternativos para a produção de frio	65
4.3.2	Termoacumulação ou armazenamento de energia térmica	68
5	PRODUÇÃO COMBINADA DE ENERGIA MECÂNICA E ELÉTRICA	73
5.1	Sistemas de cogeração	73
5.1.1	Cogeração com turbina a vapor	75
5.1.2	Cogeração com turbina a gás	75
5.1.3	Cogeração com ciclo combinado	76
5.1.4	Cogeração com motor alternativo de combustão interna	77
5.1.5	Utilização de microturbinas e outras novas tecnologias	77
5.2	Sistemas de trigeração	77
6	RECUPERAÇÃO DE CALOR	83
6.1	Permutadores de Calor	83
6.1.1	Manutenção	84
6.2	Metodologias de Integração de Processos	84

6.2.1	Conceitos básicos da Análise do Ponto de Estrangulamento	85
6.2.2	Condicionantes à Integração Energética	88
6.3	Bombas de calor	88
6.3.1	Conceitos termodinâmicos	89
6.3.2	Ciclos de compressão mecânica	90
6.3.3	Ciclos de compressão térmica	90
6.3.4	Recompressão mecânica de vapor (MVR)	92
6.3.5	Recompressão térmica de vapor (TVR)	93
6.4	Aproveitamento do excesso entálpico de baixa temperatura	93
7	ILUMINAÇÃO INDUSTRIAL	97
7.1	Estudo Luminotécnico	99
7.2	Lâmpadas	99
7.3	Luminárias	101
7.4	Ecodesign e etiquetagem energética	102
7.5	Sistemas de controlo de iluminação	103
7.5.1	Aplicação de balastros eletrónicos	103
7.5.2	Sistemas de regulação DALI	104
7.6	Integração da iluminação nos sistemas de climatização	104
7.7	Manutenção de sistemas de iluminação	104
8	OUTRAS MEDIDAS PARA AUMENTO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	107
8.1	Sistemas de gestão de energia	107
8.1.1	A família ISO 50001	109
8.2	Monitorização e controlo	109
8.2.1	Metodologia para a implementação de sistemas de monitorização e controlo	110
8.2.2	Smart Grid Industrial / Planeamento Industrial	110
8.3	Manutenção preventiva e preditiva de equipamentos	112
8.4	Isolamentos térmicos	113
8.5	Tratamento de efluentes	113
8.5.1	Tratamento anaeróbio de águas residuais	114
8.5.2	Tratamento de águas residuais com tecnologia de membranas	114
8.6	Formação e sensibilização de recursos humanos	114
	BIBLIOGRAFIA	117

PREFÁCIO



Jorge Seguro Sanches
Secretário de Estado da Energia

Portugal tem registado uma melhoria nas exportações de bens e serviços que é urgente consolidar, particularmente, através da criação de condições políticas e estruturais em setores de atividade que apostem na produção de bens transacionáveis, como é o caso da indústria transformadora.

Esta atividade tem uma tradição muito forte em Portugal, nomeadamente em setores como, o agroalimentar, a madeira e cortiça, o têxtil e vestuário, o couro e calçado, a química, a cerâmica, só para citar alguns. Apesar de representar apenas 6% no universo das empresas existentes no país, continua a contribuir com cerca de 13% para o PIB nacional. A ambição é que esta contribuição possa ter um peso superior no futuro próximo, associada a um desenvolvimento suportado num aprofundamento da especialização industrial e na conquista de novos mercados para esses produtos.

Serão, por conseguinte, estratégias baseadas na inovação e no aumento do valor acrescentado das exportações as que poderão ser relevantes, caso se pretenda corrigir de forma estrutural e sustentável o défice externo da economia portuguesa.

O desempenho energético tem um impacto muito importante na competitividade da economia, razão pela qual é fundamental investir neste setor, de forma a torná-lo mais competitivo e sustentável. Neste âmbito, a eficiência energética tem um papel essencial a desempenhar, contribuindo de forma determinante para oferecer soluções que permitam avaliar e reduzir os consumos energéticos, possibilitando assim a redução dos respetivos custos.

Apesar da abundante legislação e informação que existe sobre esta matéria e refiro-me, em particular, ao Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE), ao Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia (SGCIE), ao Fundo de Eficiência Energética e aos outros mecanismos de apoio e financiamento, nomeadamente no âmbito do Portugal 2020, é de extrema importância a publicação desta obra, um manual de boas práticas em eficiência energética na indústria, que permita sistematizar os principais equipamentos e sistemas onde se podem identificar e executar medidas de melhoria neste domínio.



Carlos Manuel Almeida

Diretor Geral de Energia e Geologia

A ideia desta publicação nasceu da constatação da inexistência de um manual que abordasse as medidas transversais de eficiência energética para a indústria, atualmente disponíveis, de uma forma sistematizada. O último documento publicado com esta abrangência já datava de 2010 pelo que se impunha uma atualização. Para elaborar esta tarefa convidámos o IST que, em conjunto com os quadros da DGEG, produziram o presente documento.

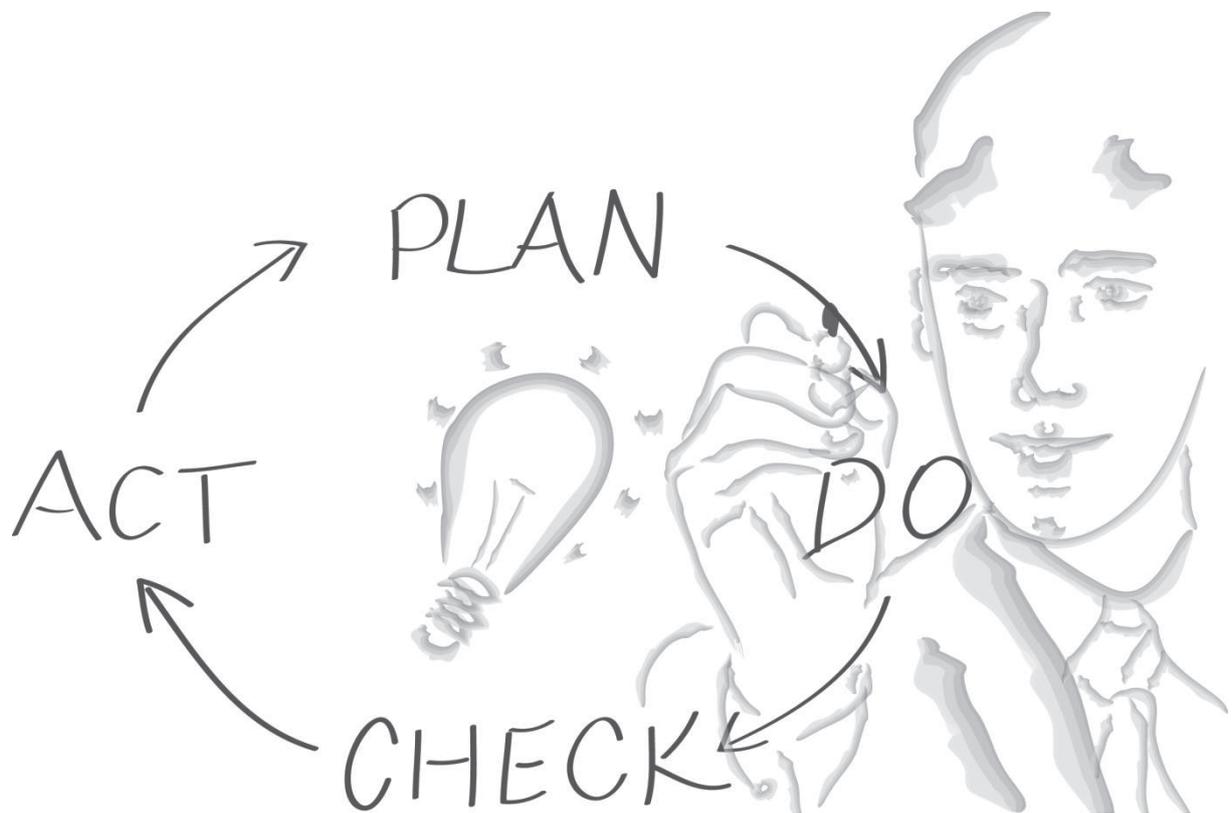
Em vez da lógica setorial, que também é importante, decidiu-se olhar para os equipamentos e tecnologias que, de uma forma generalizada, se encontram na indústria transformadora, procedendo à sua identificação e descrição, destacando e enfatizando as medidas de melhoria que se podem alcançar desde a aquisição dos equipamentos, às condições de operação e manutenção.

Este documento para além do fim pedagógico e formativo que naturalmente pretende deve também constituir uma ferramenta essencial para a realização de auditorias no âmbito do Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia (SGCIE), bem como das obrigações decorrentes da implementação do Decreto-Lei nº 68-A/2015, de 30 de abril, que transpõe para o direito nacional a Diretiva 2012/27/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de outubro, relativa à eficiência energética, no que toca à obrigatoriedade de realização de auditorias energéticas às empresas não-PME, descrevendo as soluções tecnológicas mais adequadas e atualmente disponíveis para aplicação no setor Industrial.

O SGCIE é a principal medida direcionada para o setor Industrial no Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE, RCM n.º 20/2013, de 10 de abril). Precisamente o PNAEE vai estar em revisão durante 2017 e deverá integrar já um conjunto de preocupações neste domínio alinhado com as atuais prioridades da EU elencadas num documento recentemente lançado, "Clean Energy for All Europeans", em que a eficiência energética é um dos 3 objetivos principais, juntamente com as renováveis, para assegurar a transição dos mercados energéticos para um novo paradigma sustentado em energias limpas.

Relativamente aos grandes pilares da política energética, como são a segurança de abastecimento, a competitividade e a sustentabilidade, a contribuição da eficiência energética é significativa. Pelo impacto muito positivo na nossa dependência energética, ao diminuir a intensidade energética, o que se traduz na redução do consumo de energia primária e por conseguinte nas nossas importações em energia. Por outro lado, a redução da intensidade energética é um fator para o aumento da competitividade das empresas, dado o peso que a energia tem como custo de produção para a maioria das atividades económicas. A redução dos consumos energéticos contribui também para uma descarbonização da sociedade, associada a uma diminuição geral das emissões poluentes com um efeito positivo na defesa do meio ambiente, na biodiversidade e na saúde pública, sobretudo nos grandes aglomerados urbanos ou nas cinturas industriais.

ENQUADRAMENTO ESTRATÉGICO NO ÂMBITO NACIONAL E INTERNACIONAL



1.

1. ENQUADRAMENTO ESTRATÉGICO NO ÂMBITO NACIONAL E INTERNACIONAL

A progressiva adesão da sociedade aos compromissos do Desenvolvimento Sustentável, reforçada pela necessidade de um aumento da competitividade económica do nosso país, exige a utilização da energia de forma mais eficiente.

Alguns indicadores podem ser apontados em Portugal, mostrando a evolução da intensidade energética, os consumos de energia primária, a evolução da dependência energética e o seu reflexo em termos de metas de emissão de gases poluentes. Estes indicadores determinaram objetivos que permitiram estabelecer Planos de Ação para a Eficiência Energética para a Europa em geral e para Portugal em particular. Neste momento é já possível analisar os resultados da aplicação do PNAEE 2008 e a sua transformação no PNAEE 2016. Neste capítulo é ainda possível fazer um estudo comparativo entre as ações e metas estabelecidas no nosso país com as políticas de eficiência energética desenvolvidas num país nórdico (Dinamarca), num país com fortes tradições de elevada industrialização num contexto de alta eficiência energética (Reino Unido) e finalmente num país com condições climáticas e económicas razoavelmente semelhantes às nossas, como é o caso da Espanha.

1.1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Nos últimos 10 anos, Portugal tem vindo a diminuir a sua intensidade energética, expressa em consumo de energia primária (tep^1) por unidade de Produto Interno Bruto (PIB em milhões de euros, a preços constantes de 2011). Através da Figura 1.1 pode observar-se uma convergência com o valor da média europeia. De acordo com os dados disponibilizados pela DGEG, ADENE e PORDATA [1] [2] [3], a intensidade energética em Portugal foi inferior à média europeia, entre 2009 e 2013. Tal facto pode ser explicado não só pela utilização de tecnologia com maior eficiência energética, mas também devido ao contexto económico difícil que teve como consequência a diminuição do consumo de energia final.

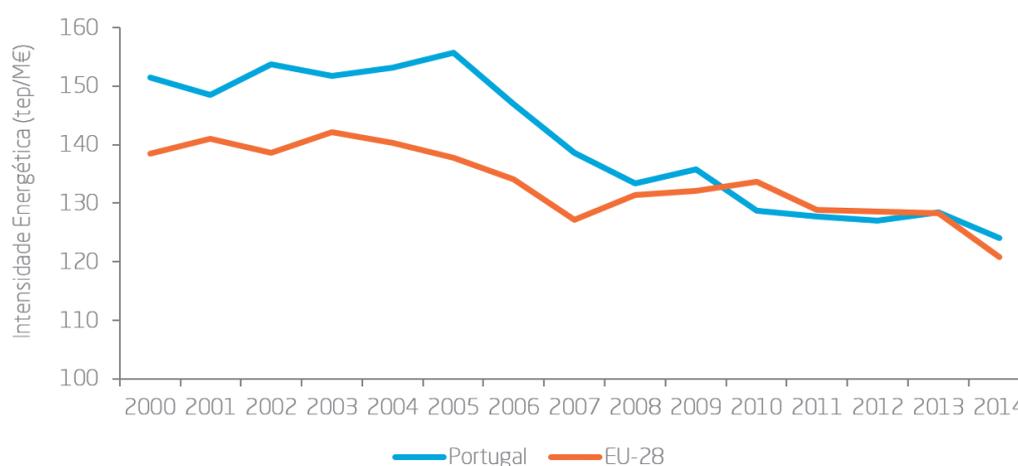


Figura 1.1 - Evolução da Intensidade Energética (Energia Primária por PIB a preços constantes de 2011) de Portugal comparada com a média da União Europeia a 28 [1] [2] [3]

¹ Toneladas equivalentes de petróleo

Em 2014, a intensidade energética apresentou o valor de 124 tep/M€² (-3,4% face a 2013). Comparativamente ao valor de 2000, o ano de 2014 apresenta uma redução de 18,1% na intensidade energética.

Em termos de intensidade energética por setor de atividade, em 2014 o setor da Indústria registou uma intensidade energética de 151 tep/M€ (-1,2% face a 2013), o setor da Agricultura e Pescas 129 tep/M€ (-5,7% face a 2013), o setor dos Transportes 33 tep/M€ (+0,3% face a 2013), o setor Doméstico 24 tep/M€ (-4,7% face a 2013), enquanto o setor dos Serviços registou uma intensidade energética de 17 tep/M€ (+2,5% face a 2013), tal como se pode observar na Figura 1.2.

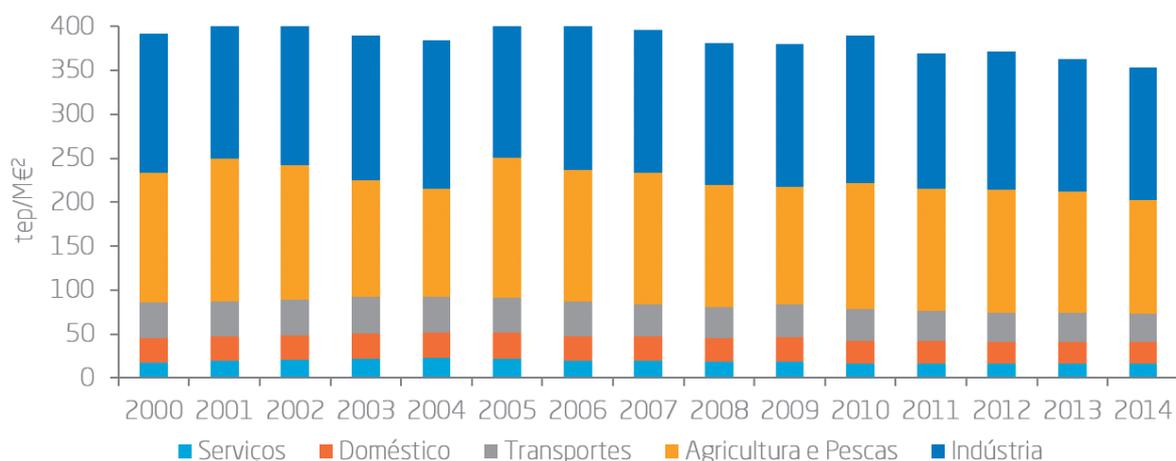


Figura 1.2 - Evolução da Intensidade Energética por setor de atividade [1] [4]

Os principais desafios e objetivos da atual política energética nacional prendem-se com a redução da dependência energética (definida como a percentagem de importação de energia primária face ao total de energia primária consumida) em relação ao exterior, com a garantia de segurança de abastecimento a preços competitivos e com a necessidade de assegurar uma base energética capaz de colocar a energia ao serviço das empresas e da sociedade em geral, garantindo simultaneamente a sustentabilidade de preços e a competitividade da economia nacional nos mercados internacionais.

Portugal apresentou até 2009 uma dependência energética elevada, entre 81 e 89%, fruto da inexistência de produção nacional de fontes de energia fósseis, como o petróleo ou gás natural, que têm um peso muito significativo no consumo de energia. A aposta nas energias renováveis e na eficiência energética permitiu a Portugal, a partir de 2010, diminuir a sua dependência para níveis inferiores a 80%, tendo atingido 72,4% em 2014.

Em 2015, a dependência energética fixa-se em 78,3% representando um aumento de 5,9 pontos percentuais face a 2014. A subida da dependência energética de 2014 para 2015, deveu-se essencialmente à redução acentuada da contribuição da energia hídrica, face à baixa pluviosidade verificada nesse ano, tendo sido compensada pelo aumento das importações de carvão e gás-natural, feitas em grande parte para responder ao consumo verificado no setor eletroprodutor.

2 Neste documento os valores de PIB são todos referidos a preços constantes de 2011

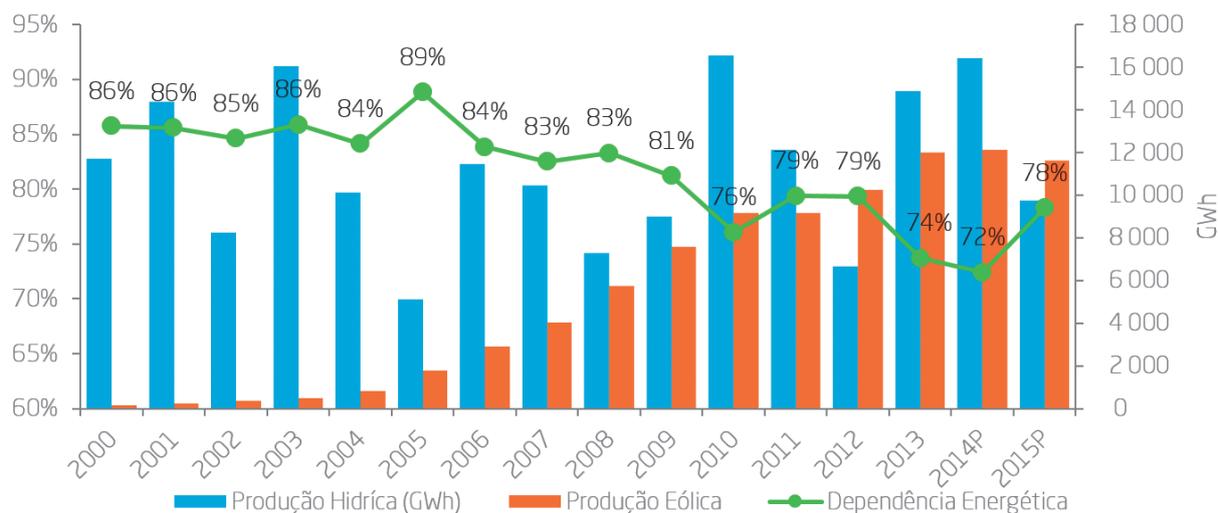


Figura 1.3 - Evolução da dependência energética de Portugal [1] [4]

É de referir todavia que se a eficiência energética aponta para o cumprimento simultâneo dos objetivos fundamentais da política energética, o aumento da competitividade económica, a segurança de abastecimento e a redução da dependência energética, já a aposta nas energias renováveis promove a redução da dependência e a segurança de abastecimento, mas pode colocar em causa a competitividade económica caso se optem por soluções de remuneração que não sejam a custo de mercado. As emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE) têm registado um decréscimo significativo nos últimos anos, devido à adoção de medidas específicas. Em particular, o setor energético é responsável por cerca de 70% das emissões totais de GEE..

Em 2013, as emissões totais de GEE situaram-se nos 65,3 Mton CO₂eq, das quais 44,5 Mton CO₂eq são relativas ao setor energético. Em comparação com o ano de 2012, as emissões totais de GEE decresceram 2,8%, enquanto as emissões do setor energético decresceram 4,2%. As emissões totais de GEE em 2013 situaram-se 7,6% acima do valor registado no ano de 1990, sendo que o valor máximo admissível para Portugal, pela Meta de Quioto, seria uma emissão de 76,4 Mton CO₂eq, ou seja um aumento de 27%. Isto significa que, pelo menos nesta matéria Portugal parece estar confortável face à meta imposta. Isto não significa, obviamente, que não se mantenham ou mesmo se intensifiquem os esforços destinados a mitigar as emissões de GEE, tanto na indústria como no setor energético.

Tabela 1.1 - Emissões de Gases com Efeito de Estufa em Portugal [1]

Emissões GEE (Mton CO ₂ eq)					
1990	2011	2012	2013	2014	Meta
60,7	69,2	67,2	65,3	64,5	76,4

Com base nos argumentos económicos e ambientais apresentados, uma utilização mais eficiente da energia é fundamental para o desenvolvimento industrial e, conseqüentemente, para o crescimento económico. O aumento da eficiência energética requer desenvolvimentos a nível tecnológico, medidas que regulamentem o consumo energético e as emissões de gases com o efeito de estufa e incentivos ao investimento que conduzam a melhorias processuais e comportamentais. A diminuição da intensidade energética na maioria dos países europeus deve-se à aplicação de medidas políticas que visam o aumento

da economia e da eficiência energética. Estas medidas são aplicadas, em especial, nos setores com maiores consumos energéticos, nomeadamente a indústria, os transportes e os serviços.

A União Europeia enquanto player de peso no mercado económico mundial, não pode deixar de assumir as suas responsabilidades na criação de condições que promovam a competitividade das empresas europeias e das economias dos seus estados-membros. Especialmente no que se refere à dependência energética e à segurança de abastecimento, existe o risco de se agravar a dependência excessiva de alguns fornecedores como a Rússia que aparece como principal fornecedor de gás natural (cerca de 40%), petróleo em bruto (entre 30 e 35%) e carvão (cerca de 30%). A construção de alternativas de fornecimento (novos gasodutos, maior interligação de redes e, sobretudo, terminais marítimos) poderá permitir num futuro próximo a diversificação da origem, assim como o estabelecimento de novas rotas e formas de abastecimento de energia à Europa.

Com esta preocupação em mente, a União Europeia vai também fazendo o seu trabalho interno, obrigando a que cada Estado-membro defina o seu Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e inclua propostas de medidas de carácter político e tecnológico com vista ao aumento da eficiência energética. As medidas de carácter político são essencialmente medidas regulatórias e de incentivo que visam prioritariamente o controle e diminuição do consumo energético e das emissões dos gases de estufa. As medidas de carácter tecnológico resultam de estudos, ensaios e trabalhos científicos relativos à identificação e validação das diferentes alternativas de elevado potencial de economia de energia.

1.2 PLANO DE AÇÃO PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA VERTENTE INDUSTRIAL

1.2.1 União Europeia

Em março de 2010 o Conselho Europeu definiu os chamados “Objetivos 20/20/20” no âmbito da Política Energética da União Europeia (UE), para serem atingidos até 2020:

- (i) 20% de redução da emissões de gases com efeito de estufa;
- (ii) 20% de quota de energias renováveis;
- (iii) 20% de aumento em eficiência energética.

De facto, as atuais políticas no domínio do clima e da energia têm gerado progressos tão substanciais que os objetivos a que a UE se comprometeu estão a ser alcançados num espaço de tempo mais curto que o proposto:

- As emissões de gases com efeito de estufa em 2015 diminuíram 22% em relação às emissões em 1990, projetando-se atingir uma redução de 24% em 2020. São esperadas medidas adicionais em 2030 para atingir uma nova redução de 40% face a 1990 [5];
- A quota de energias renováveis aumentou para 15,2% em 2014, enquanto percentagem do consumo de energia final, e espera-se um novo aumento para 20,6% em 2020 [6];
- No final de 2015, a UE tinha instalado, no seu território, cerca de 23,2% do total da eletricidade renovável mundial [7];
- A intensidade energética teve uma redução de 32% entre 1990 e 2013 [8];
- A intensidade carbónica da economia da UE diminuiu 58% entre 1995 e 2014 [9].

O Plano de Ação para a Eficiência Energética da UE, lançado em 2006, foi atualizado em 2011, tendo em conta a implementação reportada nos planos nacionais de ação para a eficiência energética enviados pelos Estados-membros para a Comissão Europeia. Embora o objetivo do Plano de Ação para a Eficiência Energética possa ser atingido através de tecnologias já existentes, é encorajado o desenvolvimento de novas tecnologias mais inovadoras.

A diminuição da intensidade energética na maioria dos países europeus deve-se em grande parte à imposição de medidas

políticas, bem como ao interesse empresarial em aumentar a rentabilidade dos processos à custa da diminuição da fatura energética. Nas próximas quatro subsecções descrevem-se algumas dessas medidas políticas no caso particular de Portugal, Dinamarca, Reino Unido e Espanha.

1.2.2 Portugal

A promoção da eficiência energética e de fontes de energias renováveis estão integradas na nova visão para 2020 do setor energético, a qual procura articular as estratégias para a procura e oferta de energia, tendo como principal objetivo colocar a energia ao serviço da economia e das famílias e garantindo simultaneamente a sustentabilidade de preços.

A atual política energética aposta numa estratégia de liderar a transição energética. Na área da utilização racional de energia, esta política assenta principalmente em três eixos

- 1) **Afirmar Portugal como fornecedor energético da Europa:** Portugal deve passar a encarar a energia como um bem transacionável, numa lógica de exportação. Será necessário um reforço das interligações elétricas com a Europa e o terminal de GNL de Sines poderá vir a funcionar como porta de entrada de gás natural para o centro da Europa devendo-se investir em gasodutos de ligação com Espanha e desta com o centro da Europa, obviamente com a mobilização de fundos europeus.
- 2) **Retomar a aposta nas energias renováveis:** A UE estabeleceu, em 2014, o objetivo de alcançar uma quota de 27% de fontes renováveis no consumo final de energia até 2030. Portugal, atendendo às suas condições naturais, e ao esforço que já realizou nesta matéria, está na vanguarda dos países europeus com maior uso deste recurso, com uma aposta muito diversificada em várias fontes de energia renovável (FER), tendo atingido, já em 2015, a meta de incorporação de FER no consumo final bruto de energia de 28%. Neste contexto, embora Portugal apoie a meta estabelecida a nível da UE, tem condições para assumir objetivos mais ambiciosos neste domínio, caso se concretize o reforço das interligações energéticas entre a Península Ibérica e França, nomeadamente em termos elétricos.
- 3) **Impulso à eficiência energética:** Uma economia muito mais eficiente do ponto de vista energético traz vantagens óbvias para as empresas e para os cidadãos. O próprio Estado deve implementar medidas ativas de eficiência energética, com o objetivo de, até 2020, reduzir em 30% os consumos de eletricidade (e combustíveis) das atividades prosseguidas em cada ministério, designadamente as associadas aos edifícios, frotas e consumos intermédios. Devem ser implementadas estratégias alternativas de financiamento de medidas ativas de eficiência energética, nomeadamente através da contratualização com Empresas de Serviços Energéticos, que concebem, financiam e executam projetos de redução de consumos energéticos, sendo remuneradas pelo valor da poupança assim obtida. Na parte do setor privado, é fundamental definir objetivos, metodologias e formas de premiar os ganhos de eficiência por parte de instalações intensamente consumidoras de energia (como fábricas, armazéns, grandes superfícies comerciais, hospitais, hotéis, etc.). Também devem ser promovidas iniciativas de *fuel switching* que possam contribuir para a geração de economia de energia, contribuindo desse modo para o aumento da competitividade dos setores de atividade em causa.

Neste contexto, Portugal tem desenvolvido ações concretas para atingir as metas estabelecidas pela União Europeia, nomeadamente na criação do Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE).

O PNAEE de 2008 estabeleceu como meta uma redução de consumo de energia final em 10% até 2015, definindo 50 medidas, organizadas em 12 programas.

A Diretiva 2012/27/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa à eficiência energética, estabeleceu um novo enquadramento para promover a eficiência energética na UE, contribuindo deste modo para o cumprimento das metas identificadas no Roteiro de Transição para uma Economia Hipocarbónica Competitiva em 2050.

A maioria das preocupações referidas na Diretiva 2012/27/UE, já tinham correspondência em práticas e regulamentos em vigor no nosso país e consagrados na legislação nacional, em particular no que respeita aos Regulamentos de gestão dos

Consumos de Energia, aplicáveis aos consumidores intensivos e ao setor dos transportes, entre outros. Por conseguinte, a elaboração do Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética para o período 2013 – 2016 (PNAEE 2016), publicado em 2013, para além de novas medidas, já pode incorporar um conjunto de iniciativas que já se encontravam a ser aplicadas no nosso país, algumas desde os anos oitenta.

O PNAEE 2016 aponta para a concretização da meta geral de redução de 25% e da meta específica para o Estado de redução de 30% do consumo de energia primária até 2020. Para tal, foi necessário adequar os objetivos do PNAEE de 2008 à realidade nacional, tendo em conta as fontes e o nível de financiamento disponíveis. A meta do primeiro PNAEE, publicado em 2008, era a de poupar 1792 ktep durante o período de 2008 a 2015. Devido ao facto de existirem medidas com problemas de quantificação, impacto limitado ou que requerem um elevado investimento e que por isso foram eliminadas, procedeu-se a uma nova reestruturação da meta de economia energética, publicada no PNAEE 2016.

Objetivos PNAEE 2016

- Aumentar a eficiência energética da economia e em particular no setor Estado, contribuindo para a redução da despesa pública e o aumento da competitividade das empresas;
- Cumprir todos os compromissos assumidos por Portugal de forma economicamente mais racional;
- Reforçar a monitorização e acompanhamentos das diversas medidas;
- Lançar novas medidas a partir das existentes abrangendo novos setores de atividade;
- Aumentar a eficiência energética no setor do Estado, através do Programa de Eficiência Energética na Administração Pública (Eco.AP).

Medidas PNAEE 2016

Tendo por base as áreas, programas e medidas do PNAEE de 2008, o PNAEE 2016 passa a abranger seis áreas específicas: Transportes, Residencial e Serviços, Indústria, Estado, Comportamentos e Agricultura. Estas áreas agregam um total de 10 programas, que integram um leque de medidas de melhoria da eficiência energética.

Tabela 1.2 - Áreas e programas do PNAEE 2016

Áreas						
	Transporte	Residencial e Serviços	Indústria	Estado	Comportamentos	Agricultura
Programa	Eco Carro	Renove Casa&Escritório				
	Mobilidade Urbana	Sistema de Eficiência Energética nos Edifícios	Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia	Eficiência Energética do Estado	Comunicar Eficiência Energética	Eficiência no Setor Agrário
	Sistema de Eficiência Energética nos Transportes	Solar Térmico				

A **área dos Transportes** integra os seguintes programas de melhoria da eficiência energética:

- Eco Carro, que agrega as medidas direcionadas para a melhoria da eficiência energética nos veículos;
- Mobilidade Urbana, que abrange as medidas relacionadas com a necessidade de incentivar a utilização de transportes coletivos e de modos suaves de transporte em detrimento do transporte individual motorizado, com um enfoque particular nas zonas urbanas;
- Sistema de Eficiência Energética nos Transportes, que integra medidas que visam dinamizar a utilização das redes ferroviárias de passageiros, bem como a gestão energética das frotas de transportes.

A **área de Residencial e Serviços** integra os seguintes programas de melhoria da eficiência energética:

- Renove Casa & Escritório, que integra um conjunto de medidas destinadas a potenciar a eficiência energética na iluminação, eletrodomésticos e reabilitação de espaços;
- Sistema de Eficiência Energética nos Edifícios, que reúne as medidas que resultam do processo de certificação energética nos edifícios;
- Integração de Fontes de Energia Renováveis Térmicas, relativo às medidas dirigidas à promoção de uma maior integração de fontes de energia renováveis nos edifícios e equipamentos residenciais e de serviços.

A **área da Indústria** é abrangida por um programa designado por Sistema de Eficiência Energética na Indústria, que inclui a revisão do Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia, continuando a destacar-se as medidas transversais no setor industrial e outras medidas setoriais para a eficiência no processo industrial.

A **área do Estado** é agrupada num programa designado por Eficiência Energética no Estado, com um conjunto de medidas dirigidas à certificação energética dos edifícios do Estado, aos Planos de Ação de Eficiência Energética, designadamente no âmbito do Eco.AP, frotas de transporte do Estado e à Iluminação Pública (IP).

A **área da Agricultura** é abrangida por um programa designado Eficiência Energética no Setor Agrário e tem como objetivo agrupar e dinamizar as ações realizadas neste setor com vista a induzir a redução de consumos energéticos.

A **área de Comportamentos** integra medidas que visam promover hábitos e atitudes de consumidores energeticamente eficientes, como sejam a recomendação de produtos eficientes, através de campanhas de sensibilização e comunicação.

Objetivos PNAEE 2016

A meta de economia induzida pelo PNAEE 2016, durante 2013 a 2016, é de 1501 ktep em energia final, correspondente a uma redução do consumo energético de aproximadamente 8,2% relativamente à média de consumo verificada no período entre 2001 e 2005, o que se aproxima da meta indicativa definida pela União Europeia de 9% de economia energética até 2016. Esta redução de 1501 ktep em energia final, representa 1773 ktep em termos de energia primária no horizonte 2016.

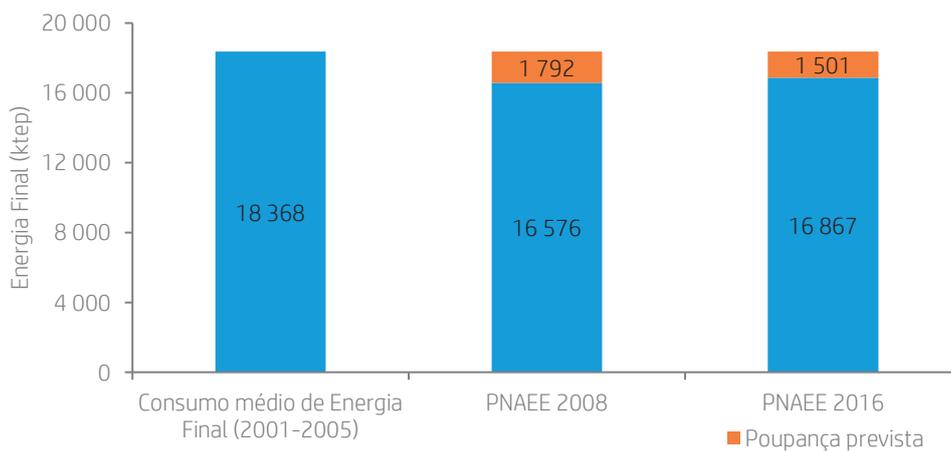


Figura 1.4 - Objetivo dos Planos Nacionais de Eficiência Energética [4] [10]

O estabelecimento do horizonte temporal de 2020 para efeitos de acompanhamento e monitorização do impacto estimado no consumo de energia primária, permite perspetivar antecipadamente o cumprimento das novas metas assumidas pela União Europeia, de redução de 20% dos consumos de energia primária até 2020, bem como o objetivo, mais ambicioso assumido pelo Governo Português de redução no consumo global de energia primária de 25% e o objetivo específico para a Administração Pública de uma redução de 30%.

Resultados PNAEE

A análise do impacto estimado das medidas previstas nos PNAEE 2008 e PNAEE 2016 tem sido efetuada de acordo com as normas europeias sobre monitorização de planos e medidas de eficiência energética. Nesta análise foram consideradas as economias geradas entre 2010 e 2013. Tendo em conta, conforme já referido, que a nova meta em 2016 é de 1773 ktep de redução de energia primária, a implementação do PNAEE 2008 permitiu atingir, em termos acumulados até 2010, 48% do atual objetivo em energia primária.

Na Tabela 1.3, encontram-se descritas as poupanças energéticas resultantes do PNAEE 2008 para cada um dos setores.

Tabela 1.3 - Resultados do PNAEE até 2010, por programa e por setor, em termos de energia primária³

	Programa	2010	Impacto energia primária (tep)	Meta 2016 (tep)	Execução %
Transportes	Renove Carro	43.643			
	Mobilidade Urbana	104.931			
	Sistema de Eficiência Energética nos Transportes	48.544	252.959	343.683	74
	Medidas Retroativas(*)	55.841			
Residencial e Serviços	Renove Casa & Escritório	249.660			
	Sistema de Eficiência Energética nos Edifícios	100.652	371.147	8.363.277	44
	Solar Térmico	20.835			
Indústria	Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia	44.503	179.812	377.221	48
	Medidas Retroativas (*)	135.309			
Estado	Eficiência Energética no Estado	14.190	14.190	153.634	9
Comportamentos	Comunicar Eficiência Energética	32.416	32.416	32.416	100
Agricultura	Eficiência no Setor Agrário	0	0	30.000	0
TOTAL			850.524	1.773.231	48%

(*) Contributos de Medidas aprovadas em Programas anteriores

³ Dados retirados de Resolução do Conselho de Ministros nº 20/2013 D.R. nº70/2013, Série I.

Até ao ano de 2013, estão contabilizadas as medidas do PNAEE 2016 relativas aos diversos setores abrangidos, onde já é possível observar uma execução de 61% face ao objetivo esperado para 2016, como está descrito na Tabela 1.4.

Tabela 1.4 - Contribuição, por programa, da economia de energia primária (tep) até 2013 para as metas de 2016 e 2020⁴

Programa	Valores de execução (2013)	Meta 2016		Meta 2020	
		(tep)	Execução(%)	(tep)	Execução(%)
Total PNAEE	1.076.034	1.773.231	61	2.394.064	36
Agricultura	0	30.000	0	40.000	0
Comportamentos	16.208	32.416	50	32.416	50
Estado	35.336	153.634	23	295.452	12
Indústria	241.421	377.221	64	521.309	46
Residencial e Serviços	485.041	836.277	58	1.098.072	44
Transportes	281.820	343.683	82	406.815	69

Conforme indicado na Figura 1.4, a implementação do novo PNAEE prevê uma economia de 1501 ktep, em energia final, no ano de 2016, correspondendo à redução de 8,2% face ao período de referência (média do consumo total de energia final no período 2001-2005). A implementação deste Plano permitiu atingir, em termos acumulados até finais de 2013 um total de 946 ktep, como se pode ver pela Figura 1.5, o que corresponde a 63% de execução, em termos de energia final.

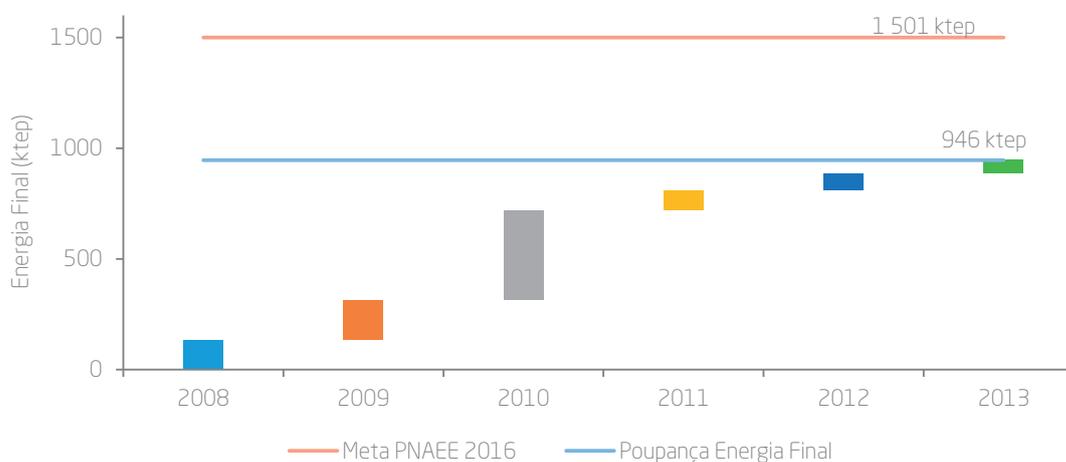


Figura 1.5 - Economias anuais totais (tep), em energia final, alcançadas para a meta do PNAEE 2016 [4]

⁴ Dados retirados de <http://www.pnaee.pt/pnaee#resultadospnaee>

1.2.3 Dinamarca

As principais medidas do PNAEE da Dinamarca (PNAEE-D) aplicadas à indústria são descritas em seguida de acordo com a referência [11]:

- Aumento gradual dos impostos relativos às emissões de gases derivados da queima de combustíveis fósseis;
- Benefícios fiscais a indústrias que implementem medidas que contribuam para a eficiência energética;
- Atribuição de empréstimos a PME's (Pequenas e Médias Empresas) para a implementação de projetos de eficiência energética;
- Divulgação das tecnologias de gestão ambiental e os respetivos benefícios.

Como parte do objetivo a longo prazo do Governo para a independência de combustíveis fósseis, a estratégia de transporte sustentável a partir de 2008 inclui uma série de medidas de redução de CO₂ na forma de aumento da utilização de transportes públicos, um imposto verde (*green car tax*) e a promoção das melhores tecnologias de utilização de combustíveis.

A já referida Directiva da Eficiência Energética de 2012, foi implementada na legislação dinamarquesa em 2014. Neste âmbito são realizadas auditorias energéticas obrigatórias para as grandes empresas, com isenções para as que implementaram a ISO 50001.

A estratégia inclui ainda uma enorme expansão de energia renovável a partir da energia eólica, da biomassa e do biogás, o que irá aumentar a quota das energias renováveis para 33% do consumo de energia ao longo das próximas décadas. Um dos grandes objetivos neste campo será atingir o valor de 10% de consumo de energia no setor dos transportes, com origem em energias renováveis até 2020.

Como resultado do acordo energético de 2008, foram aumentados os impostos sobre as emissões de CO₂ e foram definidos vários compromissos para reduzir ainda mais o consumo de energia, particularmente na indústria e em edifícios.

Uma das metas do governo dinamarquês é que metade do consumo de eletricidade em 2020 provenha de fontes de energia renovável e que as emissões de CO₂ sejam reduzidas em 34% quando comparadas com as de 1990.

O Acordo Energético de 2012 permitiu também impedir a instalação de caldeiras alimentadas a fuelóleo em edifícios e apoiar a ligação a sistemas de aquecimento urbanos.

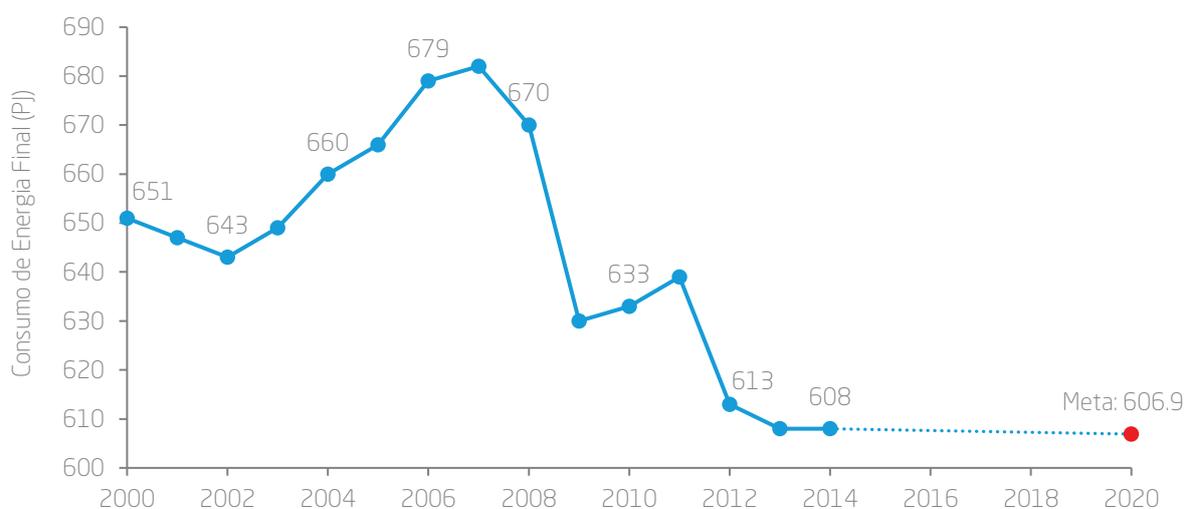


Figura 1.6 - Evolução do consumo de energia final na Dinamarca [12]

Inicialmente o PNAEE da Dinamarca (2008-2016) tinha como objetivo uma redução de 56,5 PJ no consumo de energia final. Em 2014 esse valor já se encontra em 62 PJ. O segundo PNAEE de 2010-2016 tem como meta, uma redução de 10,3 PJ/ano de consumo de energia final [13].

1.2.4 Reino Unido

Em 2012, o governo do Reino Unido iniciou a Estratégia de Eficiência Energética que incidiu preferencialmente sobre a redução das emissões de gases poluentes, com o objetivo de aumentar a eficiência energética [14]. No setor doméstico, foram promovidos sistemas eficientes de aquecimento.

Algumas das medidas políticas do PNAEE do Reino Unido aplicadas à indústria englobam: o *Climate Change Levy* (CCL), *Climate Change Agreement* (CCA) e o *Carbon Trust* [15].

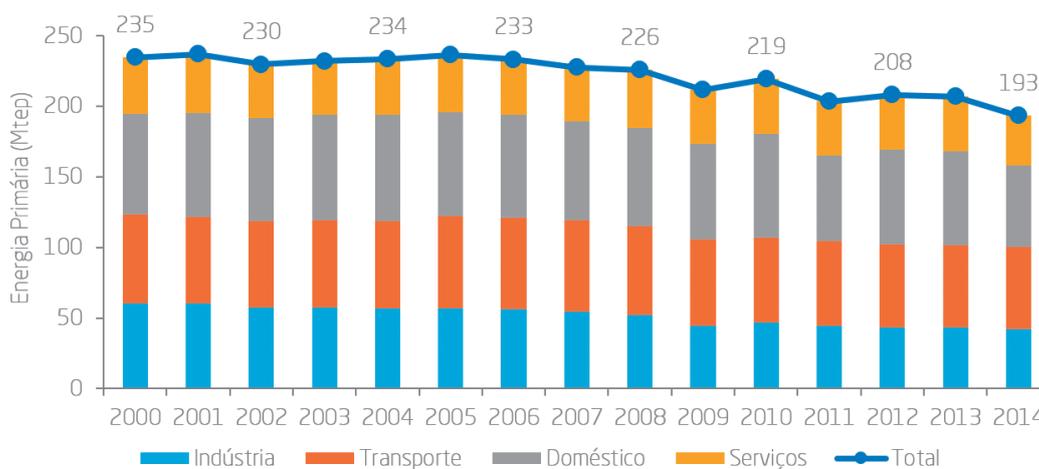


Figura 1.7 - Consumo de Energia Primária (Mtep) no Reino Unido [16]

O CCL é um imposto sobre a utilização de energia que impõe tarifas fiscais mais elevadas às indústrias mais gastadoras de energias não renováveis. O dinheiro resultante destas tarifas serve para investir em tecnologias e equipamentos com maior eficiência energética e, conseqüentemente, menos emissões de carbono.

Com os acordos voluntários CCA, o governo tenta aliciar as empresas a aceitar um acordo de redução de emissões de carbono, em troca de um desconto fiscal de 80% sobre os CCL's. De forma a complementar o programa CCA, foi criado o *Carbon Reduction Commitment Scheme* (Esquema CRC), que tem como meta, emissões que não são abrangidas pelo CCA e promove o desenvolvimento de estratégias de gestão de energia que levem a um uso mais eficiente da energia [14].

A *Renewable Transport Fuel Obligation* (RTFO) obriga a que todos os fornecedores de combustíveis facultem provas de que os combustíveis para abastecer o setor dos transportes incluam uma componente de fontes renováveis.

O programa *Carbon Trust* permite informar e auxiliar as empresas que pretendam diminuir a emissão de gases poluentes.

Em 2013 o Reino Unido tinha como objetivo para 2020 obter um consumo de energia final de 129,2 Mtep, enquanto o PNAEE de abril de 2014, já projeta para 2020 um consumo de 126,6 Mtep, 2% abaixo da meta anterior. Em termos de energia primária, a meta para 2020 foi fixada em 175 Mtep, o que corresponde ainda a uma redução de 9,5% do valor de consumo de energia comparando com o ano de 2014. Note-se que o consumo de energia primária atingiu um mínimo histórico no ano de 2014 [16].

1.2.5 Espanha

A Estratégia de Economia e Eficiência Energética em Espanha aprovada a 28 de novembro de 2003 propõe para cada um dos principais setores envolvidos uma série de medidas que foram implementadas ao longo do período entre 2004 a 2014, [17].

No âmbito desta estratégia, as medidas aplicáveis ao setor industrial espanhol são as seguintes:

- Realização de Auditorias Energéticas;
- Projetos empresariais de Eficiência Energética (Acordos Voluntários);
- Programas de Ajudas Públicas.

As auditorias energéticas permitem a realização de um estudo detalhado sobre os equipamentos responsáveis pelo consumo de energia. Permitem também determinar com alguma precisão, os investimentos necessários para concretizar as medidas propostas, bem como a rentabilidade e a viabilidade das mesmas.

Os acordos voluntários têm por objetivo incentivar as indústrias do setor a adotar medidas de economia de energia e de comprometer as associações empresariais e as indústrias a alcançar o potencial de economia de energia. Esta última medida, no entanto, não teve o impacto desejado e deverá ser descontinuada em futuros planos.

O objetivo dos programas de ajudas públicas é o de facilitar a viabilidade económica dos investimentos no setor da indústria com o foco na economia e eficiência energética. Para tal vão ser incentivados investimentos para promover a substituição de equipamentos ou de instalações consumidoras de energia, por outros que utilizem tecnologias de alta eficiência ou por tecnologias que tenham como objetivo reduzir o consumo energético e as emissões de CO₂.

Em termos de medidas horizontais de eficiência energética, as medidas mais relevantes são a *JESSICA-FIDAE Fund*, que visa o financiamento de projetos para a eficiência energética e o uso de energia renovável nos setores da indústria, transporte e edifícios. Foi também criado o *National Fund for Energy Efficiency*, visando promover a competitividade baseada no uso eficiente de energia através de medidas económicas e de assistência técnica.

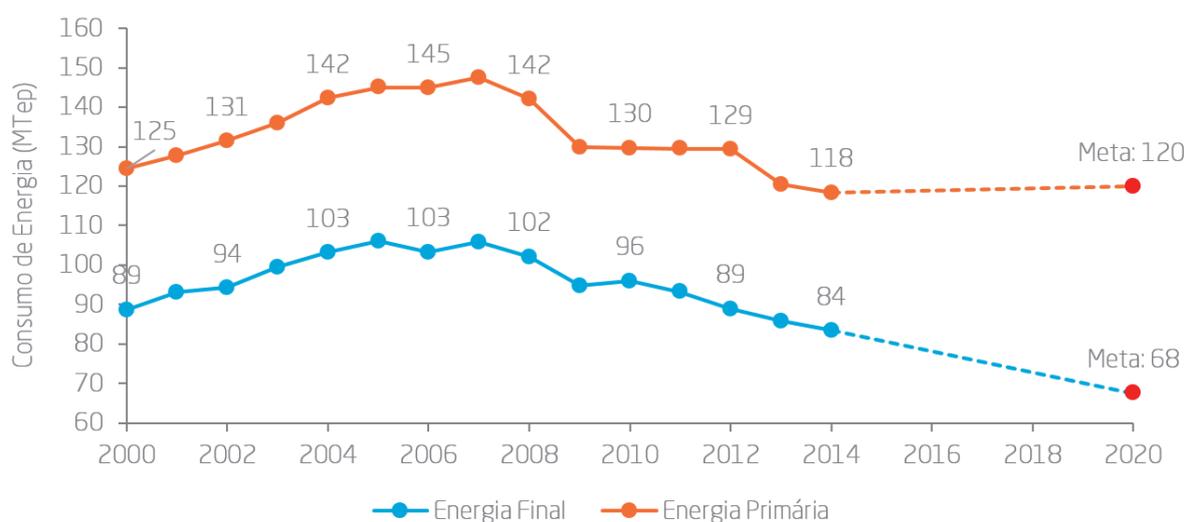
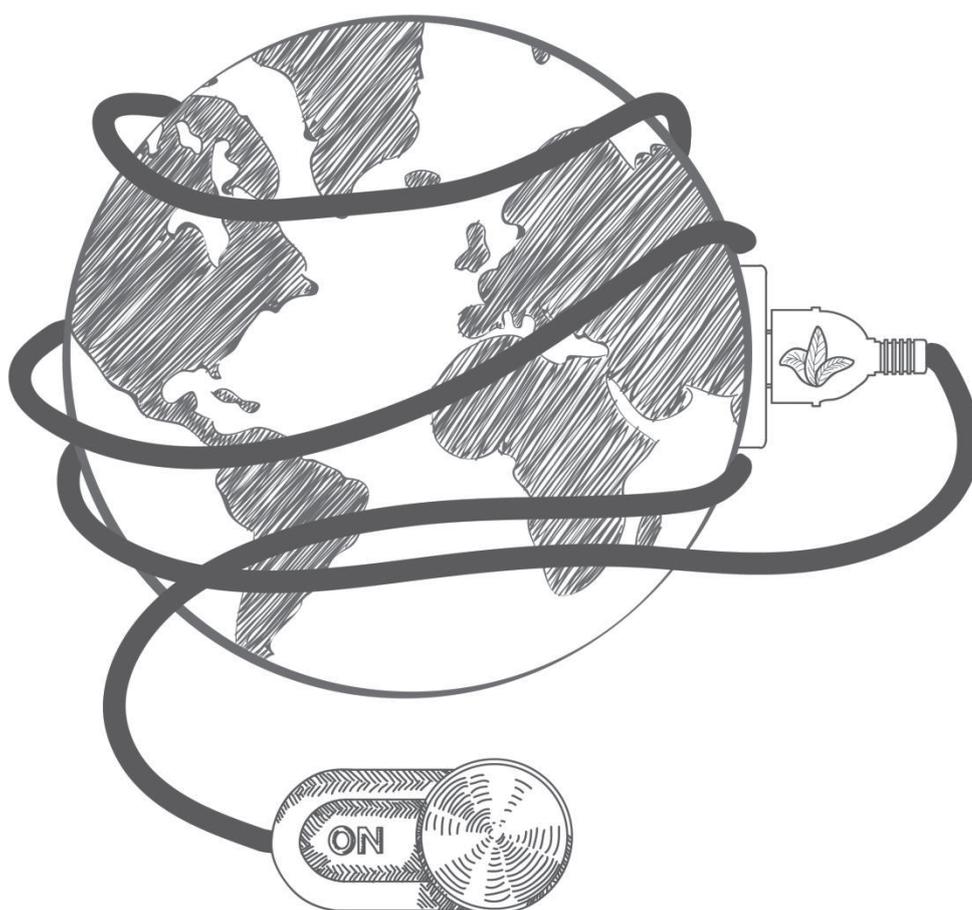


Figura 1.8 - Consumo de energia final e primária em Espanha [18]

Do Plano Espanhol de Ação para a Eficiência Energética, destacam-se duas metas principais: a redução do consumo de energia primária até 2020 e a economia de 15,98 Mtep em energia final entre 2014 e 2020 [18].

INICIATIVAS INTERNACIONAIS PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA



2. INICIATIVAS INTERNACIONAIS PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A Estratégia da União Europeia para a Energia está alicerçada na ambição de se conseguir de forma rentável uma transformação fundamental do sistema energético Europeu, transitando para soluções mais sustentáveis, seguras e competitivas no fornecimento de energia a preços acessíveis aos consumidores. A investigação e inovação (I&I) constituem um pilar crucial para cumprir esse objetivo tendo sido definida desde 2007 uma estratégia de inovação que conduziu ao Plano Estratégico Europeu para as Tecnologias Energéticas (*SET Plan*). Em paralelo no âmbito da Agência Internacional de Energia (AIE) foi desenvolvido um acordo de cooperação internacional denominado *Industrial Energy-Related Technologies and Systems* (IETS). Este surge por fusão de anteriores acordos (*Process Integration and Pulp&Paper*) que desenvolviam atividades de divulgação de tecnologia no âmbito da Agência Internacional de Energia. Este acordo desenvolve a sua atividade principal na criação de grupos de trabalho internacionais temáticos (Anexos), juntando representantes de vários países que analisam os aspetos significativos para elaboração de relatórios de estado de arte e dos resultados das aplicações industriais mais relevantes na área.

2.1 PLANO ESTRATÉGICO EUROPEU PARA AS TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS

A Europa adotou uma abordagem estratégica da inovação desde 2007 [COM (2007)1 - *An Energy Policy for Europe*], e identificou as prioridades que foram disponibilizadas através do Plano Estratégico Europeu para as Tecnologias Energéticas, com o objetivo de acelerar a transição energética. Em setembro de 2015, a "*SET Plan Communication*" aborda o sistema energético Europeu como um todo e, ultrapassando a arquitetura compartimentada dominante de "silos tecnológicos", define 10 Ações-Chave prioritárias a nível da União Europeia em Investigação, Inovação e Competitividade (<https://setis.ec.europa.eu/>):

- **Ação 1:** Sustentar a liderança tecnológica através do desenvolvimento de tecnologias renováveis de elevado desempenho e da sua integração no sistema energético da UE;
- **Ação 2:** Reduzir o custo das tecnologias-chave;
- **Ação 3:** Desenvolver tecnologias e serviços para habitações inteligentes que forneçam soluções inteligentes aos consumidores de energia;
- **Ação 4:** Aumentar a resiliência, segurança e inteligência do sistema energético;
- **Ação 5:** Desenvolver novos materiais e tecnologias para soluções de eficiência energética dos edifícios, bem como a sua adoção pelo mercado;
- **Ação 6:** Prosseguir os esforços para tornar a indústria da UE menos intensiva em energia e mais competitiva;
- **Ação 7:** Aumentar a competitividade no setor global de baterias para impulsionar a e-mobilidade;
- **Ação 8:** Fortalecer a adoção no mercado dos combustíveis renováveis necessários para soluções de transporte sustentável;

- **Ação 9:** Intensificar as atividades de investigação e inovação em captura e armazenagem de carbono (*Carbon Capture and Storage - CCS*) e na viabilidade comercial da captura e utilização de carbono (*Carbon Capture and Utilization - CCU*);
- **Ação 10:** Manter um elevado nível de segurança dos reatores nucleares e dos ciclos associados de combustível durante a operação e desmantelamento, melhorando simultaneamente a sua eficiência.

Desde então, por via de um processo participativo, os governos nacionais, a indústria e os atores da investigação, desenvolvimento e inovação, envolvendo organizações representativas de 16.700 entidades, estabeleceram objetivos ambiciosos de I&I em cada uma daquelas 10 ações prioritárias. O objetivo global é acelerar a descarbonização dos sistemas energéticos, tornando as tecnologias mais rentáveis e com melhor desempenho.

O Programa-Quadro da União Europeia para a I&I (Horizonte 2020), atingiu em 2014 o financiamento de 1,1 mil milhões de euros, destinado a tecnologias de baixo carbono. No mesmo ano, o investimento público com origem em programas de investigação e desenvolvimento (I&D) ascendeu aproximadamente a 4,2 mil milhões de euros. Excluindo os investimentos da UE no Programa Horizonte 2020, o investimento total da UE-28 nas prioridades de I&I ascenderam em 2014 a 27 mil milhões de euros, sendo que o investimento do setor privado representou 85% do investimento total neste ano. No caso do investimento do setor público, o enfoque dos programas nacionais deslocou-se para tópicos relacionados com os sistemas energéticos integrados e inteligentes – a única prioridade em I&I da União Europeia para a Energia onde o investimento público aumentou.

No âmbito das 10 Ações-Chave prioritárias, as Ações 5&6 do “*SET Plan*” abordam a eficiência energética nos setores dos edifícios e da indústria, respetivamente. No âmbito da Ação 5, há um enfoque nos novos materiais, tecnologias e processos de construção e renovação para melhor desempenho energético do sistema, bem como um enfoque transversal dedicado às tecnologias de aquecimento e arrefecimento. A Ação 6, por seu turno, aborda a eficiência energética na indústria, sob os pontos de vista setorial e transversal face a um conjunto de prioridades pré-identificadas

SET Plan - Ação 5 (Eficiência Energética em Edifícios)

a) Desenvolvimentos tecnológicos e materiais.

Estes desenvolvimentos representam uma oportunidade para promover uma maior eficiência energética nos edifícios, oferecendo soluções novas/melhoradas que respondam às necessidades do mercado. Como objetivos acordados com os *stakeholders* (setembro de 2016) identificaram-se ações de I&I tendo os seguintes objetivos principais:

- 1) Posição de liderança na renovação das principais tipologias de edifícios existentes na Europa, com soluções de remodelação integradas e ambiciosas para edifícios (residenciais e não residenciais);
- 2) Redução dos custos de construção e manutenção de edifícios NZEB (*Nearly Zero-Energy Buildings*);
- 3) Operacionalização da reabilitação energética em edifícios de forma menos onerosa e disruptiva para os ocupantes;
- 4) Resolução da lacuna existente entre desempenho energético previsto e medido em edifícios novos e reabilitados.

As iniciativas de operacionalização da Ação 5 tinham em consideração:

- Desenvolver um plano de implementação detalhado a curto prazo, para suportar aquelas metas até 2025;
- Determinar ações conjuntas e/ou coordenadas;
- Identificar as formas como os programas comunitários e nacionais de investigação e inovação poderiam contribuir de forma mais útil para complementar outros esforços de I&I;

- Identificar as contribuições do setor privado, organizações de pesquisa e universidades;
- Identificar todas as questões de natureza tecnológica, socioeconómica, regulamentar ou outra que possam ser relevantes para a consecução das metas e informar regularmente sobre os progressos realizados com o objetivo de monitorizar o cumprimento dos objetivos e de tomar medidas corretivas sempre que necessário.

O plano detalhado de implementação até 2025 para o suporte daquelas metas considera:

- Ações conjuntas e coordenadas;
- Identificação de esforços concertados comunitários e nacionais em I&I;
- Identificação das contribuições do setor privado, das universidades e de outras organizações de I&D;
- Identificação das questões de natureza tecnológica, socioeconómica, regulamentar ou outra, os quais possam ter relevo para as metas, para o acompanhamento dos progressos alcançados, e para medidas corretivas.

b) Aquecimento e arrefecimento.

Tal como referido na Estratégia UE para o Aquecimento e Arrefecimento - COM(2016) 51 final, o aquecimento e o arrefecimento (A&A) são responsáveis por 51% do consumo final de energia da UE. Consequentemente, uma maior penetração das tecnologias renováveis no setor do A&A é crucial para que a UE cumpra os seus objetivos de renovação energética e de redução de CO₂. A UE está a progredir no sentido do cumprimento da meta de 20% nas FER e do objetivo de 20% em eficiência energética fixado para 2020. Os últimos dados disponíveis do Eurostat (2014) forneciam uma quota em FER de 16% na UE, sendo de 5,9% a penetração nos transportes, de 27,5% no setor elétrico, e de 17,7% no setor A&A.

As metas da tecnologia até 2025 são as seguintes:

1) Nas bombas de calor:

- 1.1) Reduzir em 50% os custos em equipamentos e instalação na próxima geração de bombas de calor de pequeno e grande porte, quando comparado com os preços de mercado em 2015;
- 1.2) Desenvolver sistemas pré-fabricados "*plug-and-play*" totalmente integrados e rentáveis;

2) No A&A em áreas urbanas:

- 2.1) Aumentar a percentagem em energia renovável e em calor recuperado para 25% nas redes urbanas, sem comprometer a qualidade do serviço prestado aos consumidores;
- 2.2) Diminuir 15% do custo de referência das subestações nas redes A&A para edifícios residenciais, em relação aos preços de 2015;

3) No armazenamento de energia térmica:

- 3.1) Melhorar em 25% o desempenho - em termos de eficiência energética, vida útil do sistema, da armazenagem de energia acima do solo e subterrânea, em relação a 2015;
- 3.2) Aumentar em 200% a densidade de armazenamento ao nível do sistema, tendo por referência o estado-da-arte de 60 kWh / m³.

Nas etapas subsequentes faz-se o acompanhamento e elaboração de relatórios com base na análise dos resultados de I&I e preparação de um estudo de mercado.

SET Plan - Ação 6 (Eficiência Energética na Indústria)

Em 2013, o setor industrial representou 25,1% do consumo final total de energia na UE-28. A energia na indústria é usada principalmente para aquecimento e arrefecimento de processos, o que representa cerca de 63% da procura total de energia final na Indústria. A I&I em eficiência energética industrial é necessária para garantir que a indústria contribui para as metas no âmbito do combate às alterações climáticas, e melhore a sua competitividade nas exportações a partir da diferenciação tecnológica para a economia de energia. É dado um destaque particular às tecnologias setoriais, e às tecnologias transversais.

a) Objetivos das tecnologias setoriais:

- 1) Pelo menos 1/3 das economias potenciais em energia relacionadas com as tecnologias específicas do setor, identificadas para os setores do "Ferro & Aço" e da "Química & Farmacêutica", se tornem economicamente viáveis até 2030 (período de retorno ≤ 3 anos);
- 2) 1/3 das tecnologias emergentes promissoras estejam em 2030 demonstradas com sucesso a larga escala, ou seja, níveis de maturidade tecnológica (*Technology Readiness Level* - TRL) superiores a 8.

b) Objetivos das tecnologias transversais:

- 1) Até 2025 desenvolver e demonstrar até um TRL 8, soluções rentáveis para a recuperação de calor/frio perdido (p. ex., permutadores de calor, upgrade para temperaturas mais elevadas, armazenamento, distribuição, conversão de calor em energia, e de calor em frio, e de eletricidade em calor);
- 2) Até 2025, desenvolver e demonstrar (até TRL 8) componentes industriais com redução de perdas em 15% (p. ex. caldeiras, secadores, bombas, compressores, ventiladores, transportadores – sistemas estes dependendo de motores e sistemas de transmissão);
- 3) Até 2025, desenvolver e demonstrar soluções que permitam às pequenas e grandes indústrias reduzir o seu consumo de energia em 20%, e que procurem reduzir proporcionalmente as emissões de GEE.

Nas etapas de seguimento desenvolve-se um plano de implementação detalhado para cumprir estes objetivos de I&I. É dada atenção particular às iniciativas seguintes:

- Identificar ações conjuntas/coordenadas e formas em que os programas comunitários e nacionais de I&I podem contribuir;
- Identificar as contribuições do setor privado, da universidade e de organizações de I&D;
- Identificar as questões de natureza tecnológica, socioeconómica, regulamentar ou outra que sejam relevantes para se atingirem os objetivos;
- Acompanhar e informar regularmente sobre os progressos realizados, e tomar medidas corretivas quando necessário.

2.2 TECNOLOGIAS E SISTEMAS INDUSTRIAIS RELACIONADOS COM ENERGIA AIE/IETS

Em 2005, foi criado um acordo de cooperação internacional denominado *Industrial Energy-Related Technologies and Systems*. Este surge por fusão de anteriores acordos (*Process Integration and Pulp&Paper*) que desenvolviam atividades de divulgação tecnológica no âmbito da Agência Internacional de Energia.

O IETS tem como objetivo promover a cooperação internacional para a investigação e desenvolvimento tecnológico de sistemas relacionados com o uso final da energia utilizada em processos industriais.

Em novembro de 2013, foram definidas cinco áreas de interesse, para o desenvolvimento de atividades: materiais; tecnologias de separação; motores e sistemas associados; fornalhas e caldeiras; captura e armazenamento de CO₂.

Atualmente são dez os países membros do IETS: Alemanha, Áustria, Bélgica, Coreia do Sul, Dinamarca, EUA, Holanda, Noruega, Portugal e Suécia.

O IETS desenvolve a sua atividade em termos de sistematização e divulgação de conhecimento tecnológico através de grupos de trabalho internacionais designados por Anexos. Os Anexos mais recentes estão listados em seguida, sendo que alguns deles já apresentaram o seu relatório final que está disponível no *website* do IETS.

Assim, informação complementar pode ser encontrada no website do IETS (<http://www.iea-industry.org/>), nomeadamente o relatório de atividades de 2015.

2.2.1 Anexo IX - Sistemas de Separação

Nas indústrias de processo, os sistemas de separação são o maior responsável pelo consumo de energia. Chegam a ser responsáveis por 45% de energia consumida pela indústria química e refinação de petróleo. Por isso, tecnologias e sistemas de separação de maior eficiência energética são fatores críticos na sustentabilidade a longo prazo da indústria e da respetiva competitividade.

Este Anexo focou-se na descrição de “sistemas” com atividades de separação. O Anexo diz respeito a processos que utilizam uma ou mais formas de energia, tais como térmica, química ou elétrica, para isolar e/ou recombinar componentes selecionados de um conjunto inicial de materiais ou misturas para produzir um produto final útil e melhorado com uma pegada ambiental aceitável. Além da divulgação e discussão do trabalho e resultados do Anexo, foram delineadas quatro tarefas no Anexo IX:

- Visão geral do mercado e barreiras para aplicação das tecnologias;
- Conceção, operação e metodologias para sistemas de separação;
- As melhores tecnologias e áreas de aplicação;
- Eficiência energética e métricas de sustentabilidade.

Os principais resultados obtidos na finalização deste Anexo em 2013 são os seguintes:

- 1) Em 2009, a indústria química consome 19% da energia total na Europa, sendo 40-60% desta energia utilizada em separações que usam energia térmica. Cerca de 95% da energia térmica necessária nas unidades de separação é utilizada na destilação;
- 2) Espera-se que o tipo de recurso energético utilizado afete a escolha das tecnologias de separação utilizadas na indústria, desde a destilação até à adsorção por *Pressure-Swing*;
- 3) A alteração das matérias-primas (baseadas em biomassa) para a produção de químicos pode conduzir a sistemas mais diluídos, pelo que é provável que resulte num aumento do excesso de calor de baixa temperatura. Este exige um acentuado desenvolvimento tecnológico para a sua recuperação e reutilização;
- 4) Estão disponíveis as melhores práticas para a conceção e operação de sistemas de separação. No entanto, os métodos avançados de otimização dos processos de engenharia química utilizados amplamente em indústrias petroquímicas são recomendados para outros setores industriais, em especial no setor alimentar e nas indústrias bio-farmacêuticas;

5) A conceção ótima das tecnologias de separação não significa nada, se a sua implementação na prática não for feita adequadamente. A revisão regular, manutenção e ajuste do sistema de controle e automação em operação são necessários e altamente recomendados;

6) Uma rede intersetorial de fornecedores de tecnologia e *benchmarking* específicos pode contribuir para identificar e adaptar as melhores tecnologias de separação e a sua operação em várias indústrias.

O coordenador deste Anexo foi o Dr. Gürkan Sin sendo que o relatório pode ser encontrado em: <http://www.iea-industry.org/ongoing-annexes/annex-09.html>.

2.2.2 Anexo XI - Indústria baseada em Biorrefinarias

O Anexo XI (<http://www.iea-industry.org/ongoing-annexes/annex-11.html>) tem uma abordagem multidisciplinar sobre o conceito de biorrefinarias integradas em complexos industriais, com o objetivo da otimização energética em termos globais. Esta abordagem tem como base as necessidades da indústria, através da tecnologia aliada com a eficiência energética e com os processos de conversão de biomassa, de forma a obter energia e/ou biomateriais.

2.

Tem como objetivo a partilha de conhecimentos e experiências, bem como a realização de estudos de avaliação baseados em projetos de I&DT para promover o conceito das biorrefinarias e a sua utilização prática em todos os países membros do IETS.

A coordenadora deste Anexo é a Dra. Isabel Cabrita.

2.2.3 Anexo XIII - Aplicações de Bombas de Calor Industriais

As bombas de calor são sistemas de recuperação de calor que aumentam a temperatura do calor residual de um processo industrial, de forma que essas correntes possam voltar a ser usadas no mesmo processo ou num processo adjacente. O objetivo deste Anexo tem sido o de reduzir o consumo de energia e as emissões de gases de efeito de estufa através de uma maior utilização de bombas de calor na indústria.

O Anexo XIII teve início a 1 de abril de 2010 e terminou a 30 de abril de 2014, com 15 organizações participantes da Áustria, Canadá, Dinamarca, França, Alemanha, Japão, Holanda, Coreia do Sul e Suécia.

O Anexo foi desenvolvido em cinco tarefas e as principais conclusões apontadas neste relatório podem ser resumidas no seguinte:

Foi demonstrado que, em muitas empresas e especialmente nas PME, a informação sobre o consumo de energia térmica real disponível é muito escassa e aparece de forma agregada. Para obter os dados desagregados, tais como o consumo de processos individuais e subprocessos, estes têm de ser estimados ou determinados através de medições com elevados custos, o que muitas vezes requer a integração de vários processos em diferentes níveis de temperatura e com diferentes horários de funcionamento.

A exploração dos potenciais de recuperação de calor existentes exige frequentemente a combinação de diferentes tecnologias disponíveis para obter soluções ótimas.

A **Tarefa 1** resumiu a atual situação energética em geral e o consumo de energia, bem como o mercado de bombas de calor com ele relacionado nos países participantes. Sobre estas informações, será dada prioridade ao trabalho futuro para enfrentar os desafios de aplicação mais alargada das tecnologias industriais de bombagem de calor.

Embora as bombas de calor para uso industrial tenham sido disponibilizadas nos mercados nos últimos anos, muito poucas aplicações concretas podem ser encontradas.

As principais dificuldades à aplicação em bombas de calor podem ser resumidas no seguinte: 1) falta de conhecimento; 2) baixa consciência do consumo de calor nas empresas; 3) longo tempo de retorno do investimento; 4) alta temperatura exigida para as aplicações.

Estas barreiras podem ser ultrapassadas, como demonstrado nos resultados do Anexo: o tempo de retorno é curto, em geral são possíveis soluções com menos de 2 anos; obtém-se alta redução das emissões de CO₂ (em alguns casos superiores a 50%), temperaturas superiores a 100 °C são possíveis e temperaturas de alimentação < 100 °C são habituais.

A **Tarefa 2** analisou a utilização de *software* para a integração de bombas de calor industriais nos processos.

O estado da arte, bem como as necessidades industriais apresentadas pelos organismos de investigação, grandes empresas, e consultores de energia devem ser revistas criticamente. A conclusão do Anexo é que a aplicação de métodos de otimização gerais é limitada a um número bastante pequeno de grupos de investigação e grupos altamente especializados dentro de grandes empresas. Em geral deve-se considerar a tese de H.C. Becker [19] como referência importante uma vez que apresenta uma metodologia sistemática, baseada na análise do ponto de estrangulamento e em técnicas de integração de bombas de calor em processos industriais.

A **Tarefa 3** pretendeu identificar no setor industrial bombas de calor como uma tecnologia de utilização de calor residual de forma eficaz e ambientalmente aceitável. Como o calor residual industrial disponível a baixas temperaturas representa cerca de 25% da energia utilizada pela indústria de transformação, o trabalho de I&D tem de ser centrado em bombas de calor capazes de recuperar calor a temperaturas relativamente baixas, geralmente entre 5 °C e 35 °C para, entre outros, o fornecimento de água quente, pré-aquecimento da alimentação de ar, aquecimento de água quente circulante e vapor a temperaturas iguais ou superiores a 100 °C.

Alguns desenvolvimentos recentes empregando bombas de calor industrial utilizando R-134a, R-245fa, R-717, R-744, Hidrocarbonetos (HCs), etc., foram obtidos recentemente. Contudo, com exceção do R-744, R-717 e dos HCs que são refrigerantes naturais com um efeito potencial de aquecimento global (GWP) extremamente baixo, os fluidos R-134a e R-245fa têm valores de GWP elevados. O uso destes últimos deverá ser muito regulado tendo em vista a prevenção do aquecimento global. Portanto, o desenvolvimento de refrigerantes alternativos com baixo GWP é uma área de investigação premente.

O relatório final deste anexo pode ser obtido em <http://www.iea-industry.org/ongoing-annexes/annex-13.html>.

O coordenador deste Anexo foi o Dr. Hans-Jürgen Laue.

2.2.4 Anexo XIV - Integração de processos na Indústria do Aço e do Ferro

É desejável que o excesso de calor gerado a partir da própria indústria seja utilizado na produção de um determinado produto, diminuindo também a poluição térmica. O objetivo do Anexo XIV é o de reduzir o consumo de energia bem como as emissões de gases de efeito de estufa na indústria siderúrgica através da:

- 1) Criação de uma rede de especialistas sobre projetos na indústria siderúrgica e do uso de métodos de integração de processos;
- 2) Partilha de conhecimento para otimizar os sistemas em relação à energia e emissões de gases de efeito de estufa;
- 3) Criação de normas para a aplicação de métodos de integração de processos na indústria.

Para os processos da indústria siderúrgica, a modelação matemática é uma técnica adequada para lidar com as complexas interações materiais e energéticas. A análise exergética e a integração de processos (Análise do Ponto de Estrangulamento) são adequadas para analisar as possibilidades de recuperação de calor. Os modelos foram desenvolvidos em diferentes organizações. Esta associação entre indústria, universidades e institutos, facilitou o desenvolvimento/ inovação para melhorar a eficiência dos recursos da indústria.

Como a integração de processos é um campo emergente no setor siderúrgico, são necessários esforços para educar o pessoal e promover a aceitação e implementação desta metodologia. Embora existam vários bons exemplos de aplicações industriais, são ainda insuficientes os relatórios de histórias de sucesso.

Este é o primeiro Anexo focado na indústria siderúrgica e foi dividido em três tarefas:

Tarefa 1 - Métodos e Ferramentas

Coordenador da tarefa: Henrik Saxén, Universidade Åbo Akademi, Finlândia.

As três principais características dos métodos de integração de processo são o uso de heurísticas (*insight*), sobre *design* e economia, o uso da termodinâmica e o uso de técnicas de otimização. Existe uma sobreposição significativa entre os vários métodos e a tendência atual é fortemente orientada para métodos usando todos os três recursos mencionados acima. A finalidade desta primeira tarefa é a de coletar e reunir informações de métodos (p. ex., Análise do Ponto de Estrangulamento, programação matemática, exergia, análise hierárquica, métodos de busca estocástica, etc.), para modelação e análise das ferramentas disponíveis que são utilizadas, ou podem potencialmente ser utilizadas, para otimizar a indústria siderúrgica ou outras indústrias metalúrgicas.

Tarefa 2 - Eficiência energética

Coordenador da tarefa: Marianne Viart, I&D da ArcelorMittal, França.

A utilização eficiente da energia é um objetivo fundamental do Anexo. Atualmente, a energia representa cerca de 20% do custo total de produção de aço. O aumento do custo da energia e mesmo a sua disponibilidade atual e futura levaram à necessidade de reorientar a atenção para a intensidade energética na produção de ferro e aço. Os desenvolvimentos do processo que visam a economia de energia incluem a eliminação da aglomeração de minérios e a formação de coque. A integração de processos oferece ferramentas poderosas para análise de processos novos ou modificados. Existem perdas de energia nos sistemas industriais de hoje que podem ser minimizadas através de:

- Utilização eficiente de gases de processo e minimização de *flares*;
- Utilização eficiente do calor residual através da interação com a sociedade (calor, arrefecimento, geração de eletricidade, etc.), ou integração com outras indústrias;
- Possibilidade de utilizar fontes de calor de baixa temperatura a serem recicladas internamente /ou a gerar um produto útil (produção de eletricidade e/ou calor através de ciclos de *Rankine* ou outras técnicas).

Tarefa 3 - Redução de gases de efeito estufa

Coordenador da tarefa: Habib Zughbi, BlueScope Steel, Austrália.

A produção de aço gera emissões de GEE direta e indiretamente. Por exemplo, o processo do alto-forno produz CO₂ ao transformar coque e minério de ferro em aço. Além disso, todas as unidades consomem quantidades significativas de eletricidade, cuja geração resulta muitas vezes em emissões de GEE. A nível internacional, a indústria siderúrgica estabeleceu o Programa de Descoberta de CO₂ para financiar o desenvolvimento de novas tecnologias siderúrgicas que não emitem CO₂, e/ou que capturam e sequestram CO₂.

A principal atenção no Anexo será a mitigação de GEE com as tecnologias já existentes, através da racionalização dos sistemas de produção, e da utilização de agentes redutores alternativos na produção de ferro, pela utilização de combustíveis alternativos para fins de aquecimento nos processos de produção e pós-tratamento e/ou por sistemas de processos de apoio mais eficientes.

O principal meio de colaboração entre os vários participantes surgiu durante os três *workshops* que ocorreram na Alemanha, Suécia e Japão.

Assim, as conclusões específicas deste Anexo podem ser resumidas:

- Os modelos estáticos do *site* industrial são desenvolvidos em detalhe permitindo uma modelação de cenários. Por exemplo uma alteração numa unidade possibilita a análise das suas consequências no *site* total;
- As ferramentas padrão da indústria para modelação dos processos metalúrgicos são inexistentes;
- A falta de interconetividade dos modelos irá inibir a cooperação entre as partes interessadas;
- Os métodos são mais elaborados para análise estratégica, e não para a otimização no dia-a-dia das unidades industriais;
- A otimização do uso de energia requer mais desenvolvimento do método, da modelação em tempo real e da modelação dinâmica;
- Os modelos de *site* e de processo podem ser desenvolvidos e utilizados como ferramentas de treino de operadores;
- A aceitação dos modelos e resultados de modelos são obstáculos importantes para uma implementação bem-sucedida.

O coordenador deste Anexo foi o Dr. Lawrence Hooney e informações adicionais podem ser encontradas em <http://www.iea-industry.org/ongoing-annexes/annex-14.html>.

2.2.5 Anexo XV - Recuperação do calor industrial em excesso

A energia industrial é responsável por um terço do total da energia utilizada na sociedade. Por isso, as atividades que promovem o uso eficiente de energia com baixo impacto ambiental serão cruciais para o desenvolvimento, implementação e sustentabilidade destes processos industriais. Para isso é necessário, nomeadamente, tentar otimizar os processos para aproveitar correntes entálpicas oriundas doutras zonas processuais e que estejam ainda a ser desperdiçadas.

Este Anexo aborda as necessidades da indústria, combinando o conhecimento tecnológico industrial com a eficiência energética e otimização do binómio custo-eficiência.

O relatório da primeira tarefa pode ser obtido em <http://www.iea-industry.org/ongoing-annexes/annex-15.html>.

O coordenador deste Anexo é o Dr. Thore Berntsson.

2.2.6 Anexo XVI - Eficiência Energética em PME's

O objetivo deste Anexo é o de analisar os sistemas de energia e promover os fatores que contribuam para uma maior eficiência energética nas pequenas e médias empresas industriais. As áreas específicas de estudo são: desenvolver políticas e programas para as PME's; desenvolver tecnologias de eficiência energética; desenvolver auditorias e boas práticas de gestão de energia.

O Anexo XVI foi dividido em quatro tarefas, onde se destacam as seguintes conclusões:

Apesar de o uso de energia global pelas PME's ser consideravelmente inferior ao de indústrias maiores ou mais intensivas, o impacto económico das PME's é de grande relevância para um país. Para além disso, a rentabilidade das medidas de política de utilização final de energia entre as PME's industriais é muitas vezes elevada, em comparação com as grandes empresas que muitas vezes implementem medidas de baixo custo, uma vez que têm capacidade de gestão suficiente.

A implementação de políticas de uso final de energia deve ser visto pelas PME's não só como uma tentativa de melhorar a sua eficiência energética, mas também como a aquisição de vantagens competitivas que apoiem a empresa na sua sobrevivência e sucesso a longo prazo. Para isso torna-se essencial a existência de informação detalhada dos consumos do processo, algo que não é muito frequente neste tipo de indústrias.

A **Tarefa 1** descreve o contexto energético dos países alvos de estudo e das políticas e programas implementados para as PME's.

A **Tarefa 2** faz uma análise da energia utilizada pelas PME's e da sua localização no processo de produção, compara os potenciais de eficiência energética através de auditorias energéticas ou de propostas de melhoria com exemplos concretos sobre os locais onde a eficiência pode ser melhorada. Por fim, faz uma visão geral dos principais obstáculos à eficiência energética nas PME's industriais com base nesses exemplos.

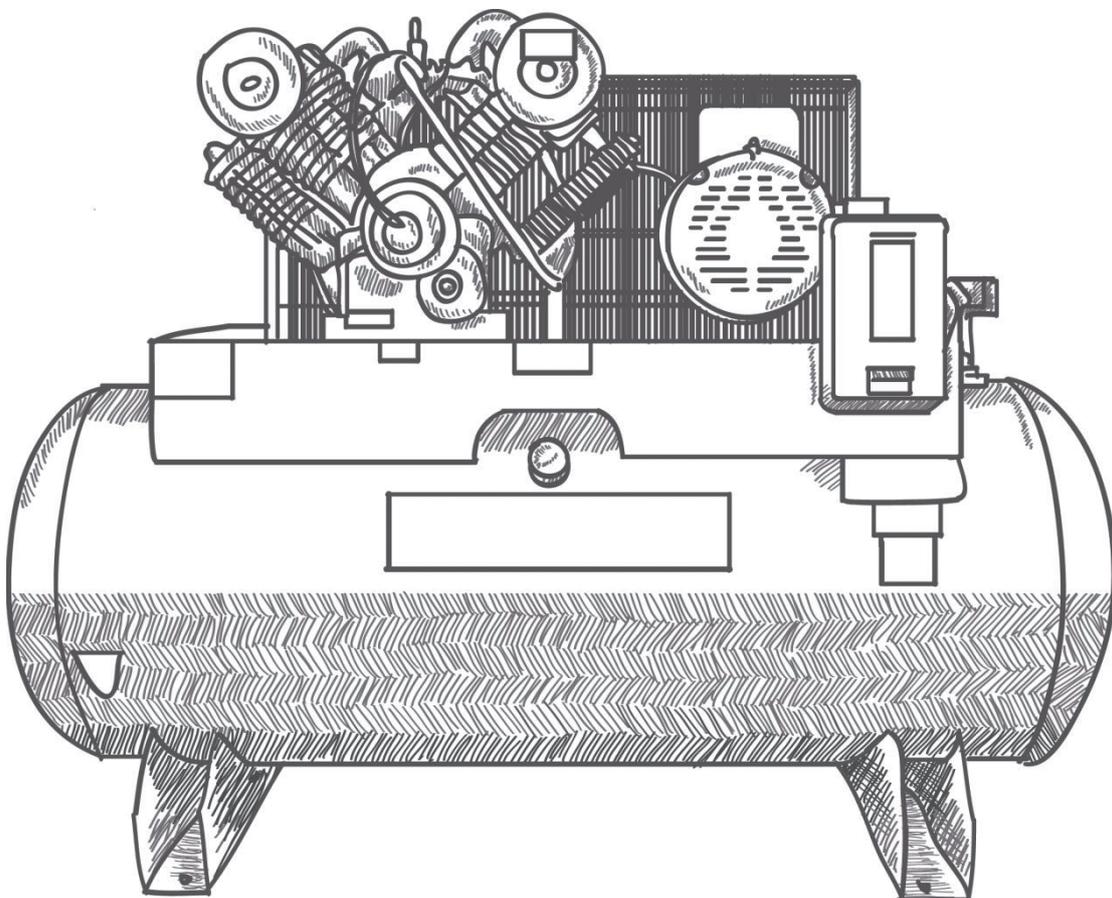
A **Tarefa 3** sugere métodos e ferramentas para auditorias técnicas e implementação de práticas de gestão energética, assim como uma descrição das tecnologias emergentes e de integração de processos, para tornar a utilização de energia mais eficiente, usando casos de estudo.

2.

A **Tarefa 4** dá uma visão geral dos modelos de negócio e ofertas de serviços de energia por empresas de consultoria, empresas de utilidades e ESCOs (*Energy Service Company*) com exemplos práticos das tecnologias implementadas.

O coordenador deste Anexo foi o Prof. Patrik Thollander e informação complementar pode ser obtida em <http://www.iea-industry.org/ongoing-annexes/annex-16.html>.

MEDIDAS PARA SISTEMAS ACIONADOS A MOTORES ELÉTRICOS



3.

3. MEDIDAS PARA SISTEMAS ACIONADOS A MOTORES ELÉTRICOS

O consumo de energia elétrica na indústria é essencialmente devido à utilização de equipamentos que convertem energia elétrica em mecânica (motores elétricos). Para estes existem soluções de motores de alta eficiência cuja seleção deverá ser fundamentada numa análise custo/benefício, no entanto, sempre que possível, deverão ser instalados variadores de velocidade que permitam adaptar o funcionamento do motor às necessidades específicas do processo. Como casos particulares de aplicação de motores elétricos, podemos referir os sistemas de bombagem utilizados habitualmente no transporte de líquidos, os sistemas de ventilação e compressão usualmente aplicados a transporte de gases e finalmente os transportadores de sólidos. Para cada um destes sistemas são apresentadas as melhores práticas, procurando-se encontrar as soluções ótimas quer em termos de operação, quer em termos de configuração.

3.1 MOTORES ELÉTRICOS

Os motores elétricos efetuam a conversão de energia elétrica, recebida da rede, em energia mecânica. De todos os tipos de motores, os motores elétricos são os mais usados, pois combinam as vantagens de utilização de energia elétrica – facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando com a sua construção simples e uma grande versatilidade de adaptação às diferentes cargas [20].

Os motores elétricos desempenham um papel fundamental na indústria, o que se reflete igualmente num peso elevado nos custos energéticos associados ao seu funcionamento. Em Portugal, são responsáveis por 77% do consumo de eletricidade da indústria [21].

A Figura 3.1 apresenta o consumo de eletricidade dos motores, pelas principais utilizações finais na Indústria Portuguesa.

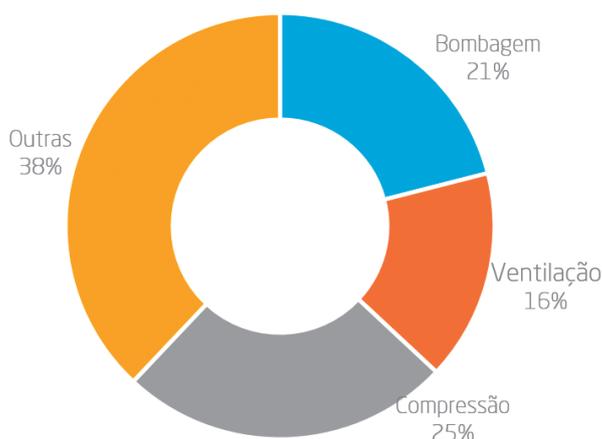


Figura 3.1 - Consumo de energia dos motores elétricos na Indústria Portuguesa [22]

Como se pode verificar, as aplicações em que ocorre movimentação de fluidos representam 62% do consumo elétrico total dos motores industriais.

Os motores elétricos podem ser alimentados com corrente contínua ou alternada. Os motores elétricos com corrente alternada podem ser divididos em duas categorias: síncronos e assíncronos (ou de indução).

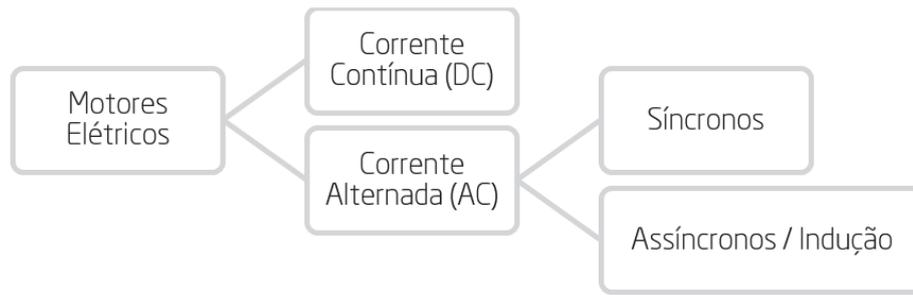


Figura 3.2 - Classificação de motores elétricos

Os motores síncronos funcionam com velocidade fixa. Utilizam um circuito induzido que possui um campo constante pré-definido e com isso aumentam a resposta ao processo de arrasto criado pelo campo girante. São geralmente utilizados quando são necessárias velocidades estáveis, com cargas variáveis, ou para grandes potências, com um binário constante.

Os motores assíncronos ou de indução funcionam normalmente a uma velocidade constante que varia ligeiramente consoante a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido à sua simplicidade, baixo custo e manutenção mínima são os motores mais utilizados. Ocorrem em várias aplicações, tais como bombas, ventiladores, compressores de ar, misturadores, tapetes rolantes, etc.

Embora o motor elétrico tenha sido corretamente dimensionado e funcione em condições adequadas, existem perdas térmicas que habitualmente provocam aumento de temperatura no motor.

De forma a aumentar a eficiência dos sistemas de potência industriais têm sido desenvolvidas e aplicadas várias tecnologias que incluem motores elétricos de alto rendimento, os variadores eletrónicos de velocidade (VEV) ou a otimização dos sistemas de transmissão mecânica entre o motor e o equipamento final.

A eficiência dos motores elétricos é um tópico fundamental, devido ao elevado custo da energia elétrica. O facto de os motores elétricos terem um consumo elevado de eletricidade, e de existirem tecnologias que permitem aumentar a sua eficiência energética, tornou a aplicação de motores elétricos numa área com possíveis economias energéticas bastante significativas.

3.1.1 Otimização de motores

A transformação de energia elétrica em mecânica acarreta sempre perdas, como se verifica pelo esquema da Figura 3.3.

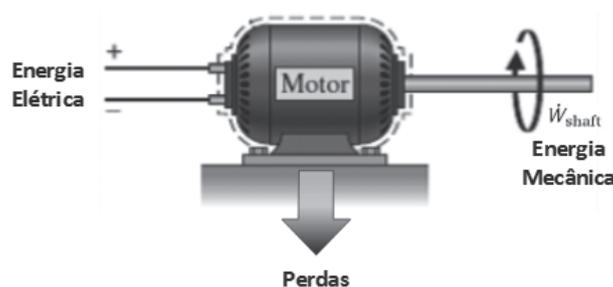


Figura 3.3 - Balanço energético simples a um motor elétrico

As perdas, que são inerentes ao processo de transformação, são quantificadas através do rendimento. O rendimento de um motor, η , é igual à potência mecânica, P_{mec} , disponível no veio do motor a dividir pela potência elétrica, P_{el} , fornecida ao motor:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}} = \frac{P_{el} - \text{perdas}}{P_{el}} \quad (3.1)$$

As perdas não só contribuem para a redução do rendimento do motor, como também vão provocar um aumento da temperatura do motor, o que levará a uma redução do tempo de vida útil do motor.

As perdas num motor de indução podem dever-se aos efeitos descritos em seguida [20]:

- Perdas no cobre por efeito de Joule – devem-se à passagem da corrente nos enrolamentos do estator e na gaiola do rotor. São proporcionais ao quadrado da corrente e ao valor da resistência;
- Perdas magnéticas no ferro – estão associadas à variação no tempo do fluxo magnético, produzindo correntes induzidas no ferro e perdas por histerese. São proporcionais ao quadrado da densidade do fluxo magnético;
- Perdas mecânicas – resultam do atrito nos rolamentos e da ventilação do motor;
- Perdas extraviadas – ou perdas suplementares, estão associadas a imperfeições no fabrico, às irregularidades na densidade de fluxo magnético no entreferro e à distribuição não uniforme da corrente nos condutores.

As medidas para a otimização da eficiência energética dos motores elétricos e sistemas de potência associados têm como objetivo a minimização das perdas energéticas inerentes. Neste âmbito, as medidas seguintes encontram-se entre as mais efetivas:

- Substituição de motores convencionais por motores mais eficientes;
- Utilização de VEV;
- Utilização de arrancadores suaves para evitar picos de corrente durante o arranque;
- Garantir a manutenção adequada dos motores;
- Evitar o sobredimensionamento dos motores e desligar os mesmos quando estes não estão a ser utilizados.

3.1.2 Substituição de motores convencionais por motores mais eficientes

Os motores de alta eficiência apresentam perdas, em geral, inferiores a 30-50% relativamente aos motores *standard*.

A melhoria de rendimento obtida para os motores de alta eficiência situa-se normalmente nos 3-4%, podendo, no entanto, atingir um valor máximo de 8% [20].

Os motores de alto rendimento, por terem menores perdas, funcionam normalmente a mais baixa temperatura, o que conduz a uma vida útil mais longa. Há, contudo, aspetos menos positivos no funcionamento de um motor de alto rendimento, que são causados pela menor resistência do rotor.

O Comité Europeu de Fabricantes de Máquinas Elétricas e de Sistemas Eletrónicos de Potência (CEMEP) e a Comissão Europeia estabeleceram, em 1998, um esquema de etiquetagem da eficiência do motor aplicado a motores trifásicos de indução de 2 ou 4 polos (400 V, 50 Hz, classe de funcionamento S1), com gamas de potência entre 1,1 e 90 kW. O esquema de etiquetagem CEMEP-CE estabelece 3 classes de rendimentos que se encontram descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Classificação CEMEP-CE da eficiência de motores elétricos

Classe de eficiência do motor	Denominação da classe
EFF 3	Motores convencionais com eficiências menores
EFF 2	Motores de eficiência melhorada
EFF 1	Motores de alta eficiência

A Figura 3.4 mostra para a gama de potência, os domínios de eficiência dos motores das classes EFF1, EFF2 e EFF3.

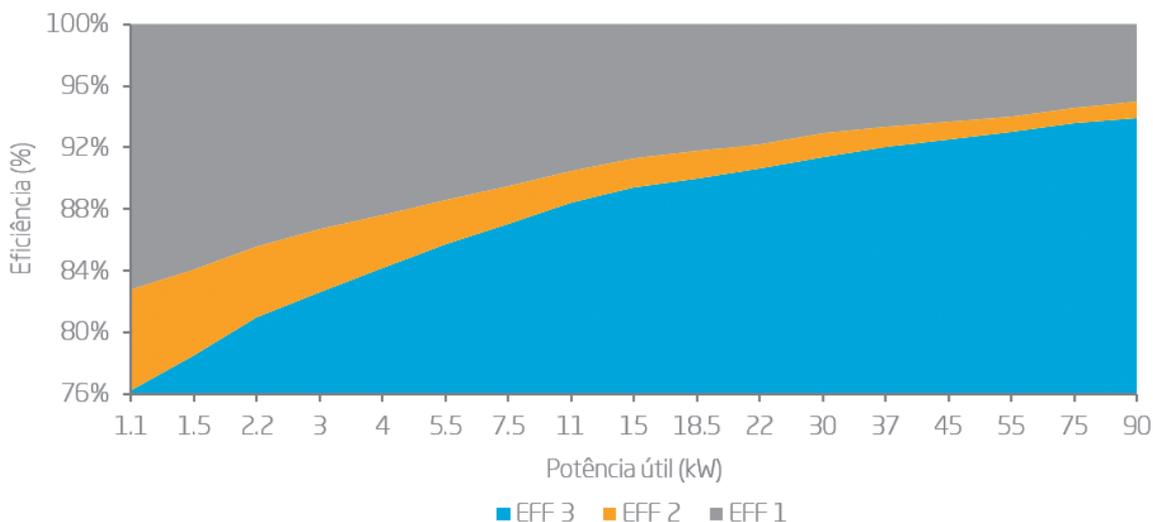


Figura 3.4 - Eficiência vs. potência útil para motores das classes EFF1, EFF2 e EFF3 de acordo com o esquema de etiquetagem CEMEP-CE [23]

Com base na Figura 3.4, a Tabela 3.2 apresenta, para vários motores de 4 polos com diferentes potências úteis e para um período de funcionamento de 4000 h/a, os valores mínimos de economia energética possíveis de obter através da substituição de motores de classe EFF3 por motores de classe EFF1.

Tabela 3.2 - Economias energéticas obtidas por substituição de motores de classe EFF3 por motores de classe EFF1. Valores calculados para motores com diferentes potências úteis e para um período de funcionamento de 4000 h/ano

Classe de eficiência do motor	Potência Útil (kW)			
	4	22	45	75
Eficiência máxima de motor EFF3 (%)	84,2	90,5	92,5	93,6
Consumo energético (MWh/ano)	19,0	97,2	194,6	320,5
Eficiência mínima de motor EFF1 (%)	88,3	92,6	93,9	94,7
Consumo energético (MWh/ano)	18,1	95,0	191,7	316,8
Redução energética mínima (%)	4,6	2,3	1,5	1,2
Redução energética mínima (MWh/ano)	0,9	2,2	2,9	3,7

Apesar de serem energeticamente mais eficientes e por essa razão mais económicos em termos operacionais, os motores de alta eficiência, são motores que exigem um investimento inicial cerca de 25 a 30% superior em relação aos motores convencionais. Devido ao acréscimo de custo de investimento, é aconselhada a realização de uma avaliação prévia técnico-económica global do investimento através de uma análise custo-benefício.

A avaliação económica do investimento ligado à substituição de um motor convencional por um motor de alta eficiência é feita através do cálculo do tempo de recuperação do investimento. Para tal usa-se a Equação (3.2).

$$\text{tempo de recuperação investimento (anos)} = \frac{\text{Investimento (€)}}{\text{Poupança anual (€/ano)}} \quad (3.2)$$

Em que a poupança anual é dada pela Equação (3.3):

$$\text{Poupança anual (€/ano)} = t \times C_{el} \times \left(\frac{P_{st}}{\eta_{st}} - \frac{P_{MAE}}{\eta_{MAE}} \right) \quad (3.3)$$

onde: t é o número de horas de funcionamento do motor num ano, C_{el} é o preço médio da eletricidade (€/kWh), P_{st} é a potência útil mecânica do motor standard (kW), P_{MAE} é a potência útil mecânica do motor de alta eficiência (kW), η_{st} é o rendimento do motor standard e η_{MAE} é o rendimento do motor de alta eficiência.

A substituição de um motor convencional por um motor de alta eficiência é na maioria dos casos justificada, sendo o investimento amortizado em 1 a 2 anos para períodos de funcionamento à volta das 4000 h/ano, e em cerca de 3 anos para 2000 h/ano de funcionamento.

3.1.3 Utilização de variadores eletrónicos de velocidade (VEV)

Vários estudos apontam para a utilização de VEV, como a medida com maior potencial de poupança em sistemas motorizados devido ao papel extremamente importante na redução dos consumos de energia. Almeida *et al* 2005 [24] apresenta os resultados de uma investigação a nível europeu sobre as considerações técnicas e económicas de aplicação de VEV a sistemas motorizados e tem sido um documento de referência sobre esta matéria.

Na indústria em Portugal, o sobredimensionamento de motores de indução é uma situação muito frequente, devido à utilização sistemática de fatores de segurança muito elevados. O sobredimensionamento excessivo conduz a três desvantagens principais:

- Investimento inicial superior na aquisição do motor e na aparelhagem de comando e proteção do motor;
- Degradação do rendimento do motor, conduzindo a maiores custos de funcionamento da instalação;
- Degradação do fator de potência da instalação, com o consequente aumento dos custos na fatura elétrica ou na necessidade de aquisição de equipamentos para compensar o fator de potência.

Por conseguinte, seria muito benéfico para a maioria das aplicações se a velocidade do motor se ajustasse às necessidades. A velocidade dos motores de indução é determinada pela frequência da tensão de alimentação, pelo seu número de polos e pelo seu fator de carga. Deste modo para controlar a velocidade dos motores é necessário variar a frequência da tensão de alimentação.

Os VEV, normalmente, convertem a tensão da rede de 50 Hz numa tensão contínua e em seguida sintetizam uma frequência variável sob controlo externo do utilizador que pode ir de 0 a 400 Hz. Existem diversos tipos de configurações do circuito eletrónico dos VEV, consoante o tipo de motor e a gama de potência.

Os VEV com inversor por fonte de tensão e modulação por largura de impulso são os que mais se utilizam para o controlo de motores de indução. Este tipo de VEV é basicamente constituído por um retificador (controlado ou não controlado) que converte a tensão alternada em contínua e por um inversor que converte a tensão contínua em alternada.

3.1.3.1 Aplicações dos VEV

As principais aplicações dos VEV são para o acionamento de bombas, ventiladores e compressores, onde se pode encontrar o maior potencial para conservação de energia.

Os caudais de fluido necessitam de ser reguláveis ao longo do processo, pelo que são utilizados dispositivos de estrangulamento (válvulas reguladoras de pressão (*throttles*) e amortecedores de pulsações/vibrações (*dampers*). Embora contribuam

para as funções desejadas, os dispositivos fazem-no à custa de introdução de perdas de carga no sistema, desperdiçando quantidades consideráveis de energia.

A implementação de VEV é aconselhada para os motores elétricos que funcionam numa carga variável a menos de 50% da capacidade durante pelo menos 20% do seu tempo de funcionamento e no mínimo durante 2000 horas por ano.

As principais vantagens da aplicação dos VEV a motores elétricos na indústria, são:

- Economias de energia até 50%, com um valor médio entre 20-25%;
- Redução/limitação de picos de corrente durante o arranque e paragem do motor;
- Prolongamento da duração do motor;
- Aumento da produtividade;
- Capacidade de *by-pass* em caso de falha;
- Melhoria do processo de controlo e da qualidade do produto e/ou serviço;
- Diminuição da quantidade de partes mecânicas, dado o carácter compacto dos VEV e estes incorporarem já diversos tipos de proteções para o motor (contra curto-circuitos, sobreintensidades, falta de fase, etc.) que deixam assim de ser adquiridas isoladamente.

3.1.3.1 Análise económica da instalação e utilização de um VEV

Os variadores eletrónicos de velocidade têm vindo a tornar-se atrativos do ponto de vista económico. A melhoria do desempenho e fiabilidade dos VEV fornece maiores reduções dos consumos energéticos e acelera a amortização dos investimentos associados à sua instalação e utilização, diminuindo dessa forma o tempo de recuperação do investimento.

A rentabilidade dos VEV depende da potência do motor a controlar e do tipo de aplicação. No entanto, existem outros fatores importantes: (i) número de horas de funcionamento; (ii) regime de carga do motor. Em relação a este último fator, quanto mais variável for o regime de carga, maior será o potencial de economia de energia.

Para estudar a viabilidade económica da instalação de um VEV num determinado motor de indução, é necessário contabilizar o rendimento global considerando os vários regimes espectáveis. Se por um lado o controlo da velocidade pode permitir uma diminuição do consumo de energia bastante significativo em determinados regimes de carga, o facto de tal ser conseguido através de um dispositivo que introduz consumos adicionais, pode levar a poupanças negativas noutros regimes de carga [25].

Assim, considerando a existência de i regimes de carga, a poupança anual total resultante da implementação de um VEV num motor elétrico inicialmente sem controlo de velocidade, é dada pela Equação (3.4).

$$\text{Poupança anual (€/ano)} = \sum_i \left[t_i C_{el,i} \times \left(\frac{P_{M,i}}{\eta_{M,i}} - \frac{P_{VEV-M,i}}{\eta_{VEV-M,i}} \right) \right] \quad (3.4)$$

onde:

i – índice correspondente ao regime de carga;

t_i – número de horas de funcionamento do motor no regime de carga i (h/a);

$C_{el,i}$ – custo médio de eletricidade durante o período (€/kW.h);

$P_{M,i}$ – potência mecânica útil do motor no regime de carga i (kW);

$P_{VEV-M,i}$ – potência mecânica útil do motor com VEV no regime de carga i (kW);

$\eta_{M,i}$ – rendimento do motor no regime de carga i ;

$\eta_{VEV-M,i}$ – rendimento do motor com VEV no regime de carga i .

3.2 SISTEMAS DE BOMBAGEM

Os sistemas acionados por motores elétricos são responsáveis por cerca de 2/3 do consumo de energia elétrica no setor industrial da União Europeia. Em Portugal este valor é superior, representa 77% do consumo de energia elétrica na indústria [22]. Os sistemas de bombagem são muito importantes a nível industrial, representando cerca de 21% do consumo elétrico da Indústria Portuguesa, tal como apresentado na Figura 3.1.

A importância dos sistemas de bombagem na indústria deve-se essencialmente ao seu número. De facto, como muitas unidades industriais têm centenas destes sistemas, o primeiro passo para aumentar a eficiência energética envolve a identificação dos sistemas que têm maiores perdas, tornando-os alvo de planos de otimização. Estes planos devem envolver os seguintes passos [26]:

- Avaliar todos os sistemas de bombagem e identificar aqueles que necessitam de ser rapidamente melhorados;
- Analisar detalhadamente os sistemas identificados;
- Desligar bombas desnecessárias ou usar interruptores de pressão de modo a controlar o número de bombas em funcionamento;
- Repor as folgas internas das bombas;
- Substituir ou modificar as bombas sobredimensionadas;
- Instalar VEV ou usar arranjos com múltiplas bombas (p. ex., bombas em paralelo) para garantir uma variação de caudal sem recorrer a válvulas reguladoras de caudal;
- Substituir os motores elétricos convencionais por motores de alta eficiência;
- Reparar fugas e válvulas deficientes;
- Estabelecer um programa de manutenção periódico.

Numa etapa inicial deverá ser efetuada a listagem dos principais **problemas associados à seleção/dimensionamento e manutenção de bombas** e respetivas medidas a implementar para solucionar esses problemas.

Os principais problemas apontados podem ser resumidos em cinco grupos:

- **Excessiva manutenção de bombas.** Este problema pode indicar: a) bomba em cavitação; b) bomba envelhecida; c) bomba não adequada à operação em causa;
- **Excesso de estrangulamento na descarga.** Uma bomba estrangulada para carga na sucção, com carga e caudal constante, significa um excesso de capacidade;
- **Uma bomba com ruído** geralmente indica a existência de cavitação. As válvulas de controlo ou de desvio de caudal (*by-pass*) que provocam ruído indicam, frequentemente, a existência duma queda exagerada de pressão;
- **Alterações nas condições de projeto.** Modificações nas condições de operação da instalação podem levar a situações de perda de eficiência;
- **Bombas com sobredimensionamento desadequado.** O sobredimensionamento provoca um desperdício de energia porque um determinado caudal é bombeado a uma pressão superior à exigida.

As medidas ou soluções a adotar para resolver esses problemas podem ser sintetizadas também em cinco grupos:

- **Substituir bombas sobredimensionadas.** As bombas sobredimensionadas são a maior fonte de desperdício de energia em sistemas de bombagem. A sua substituição deve ser sempre avaliada em relação a outros métodos possíveis para reduzir a capacidade (p. ex., mudança de impulsores e uso de VEV para o controlo de variação da velocidade);

- **Utilizar uma pequena bomba auxiliar de aumento de pressão (*booster*).** As necessidades energéticas do sistema global podem ser reduzidas através do uso de uma bomba auxiliar que garanta um escoamento de alta pressão para um determinado utilizador e que permita ao resto do sistema funcionar a uma pressão mais baixa e a uma potência reduzida;
- **Limpar ou modificar o diâmetro dos impulsores.** Para corrigir o sobredimensionamento de bombas, a carga na sucção pode ser reduzida 10 a 50% através da limpeza ou alteração do diâmetro do impulsor da bomba segundo as recomendações indicadas pelo fabricante;
- **Repor as folgas internas.** A capacidade e o rendimento da bomba diminuem à medida que as fugas internas aumentam devido a folgas excessivas entre componentes desgastados da bomba;
- **Aplicar revestimentos na bomba.** A aplicação de revestimentos na bomba reduzirá as perdas por atrito.

Por outro lado os principais **problemas associados ao controlo de sistemas de bombagem** e respetivas **medidas a implementar para solucionar** esses problemas podem ser sintetizadas nos pontos seguintes:

- **Bombas com grandes variações de caudal ou pressão.** Quando os escoamentos ou pressões normais são menores que 75% dos seus valores máximos, está a ser desperdiçada energia. Este desperdício energético deve-se normalmente a um estrangulamento excessivo, a grandes caudais de desvio (*by-pass*) ou ao funcionamento de bombas desnecessárias;
- **O desvio de caudal por *by-pass*,** quer através de sistemas de controlo ou de orifícios de proteção de perdas de pressão, constitui um desperdício de energia;
- **Nos sistemas com múltiplas bombas,** a energia é habitualmente desperdiçada por *by-pass* do caudal em excesso, operação de bombas desnecessárias, excesso de pressão, ou por existir um grande aumento de caudal entre bombas;
- **Desligar bombas desnecessárias.** Esta medida pode ser realizada após uma redução significativa das necessidades da instalação a alimentar;
- **Utilizar variadores eletrónicos de velocidade nos motores elétricos das eletrobombas.** Utilizar várias bombas em paralelo para funcionamento de acordo com as necessidades. A utilização de várias bombas em paralelo oferece uma alternativa ao controlo por *by-pass*, ao controlo por estrangulamento ou aos VEV. Quando os sistemas com múltiplas bombas funcionam a baixo caudal, esta medida aumenta a economia energética porque permite desligar uma ou mais bombas enquanto as restantes funcionam com um rendimento elevado;
- **Instalar contadores volumétricos e elétricos para monitorizar o desempenho do sistema.** Deve ser feito um registo regular dos indicadores de desempenho do sistema. Este registo regular deve acompanhar adequadamente o funcionamento do sistema e, se necessário, deve ser usado como informação de base para futuras melhorias no controlo.

A eficiência total de um sistema de bombagem depende da eficiência dos vários componentes do sistema. Como se pode ver no exemplo da Figura 3.5, para a mesma potência de saída, o sistema ineficiente absorve mais do dobro da potência absorvida pelo sistema otimizado, realçando a importância do *design* de sistemas motorizados integrados [24].

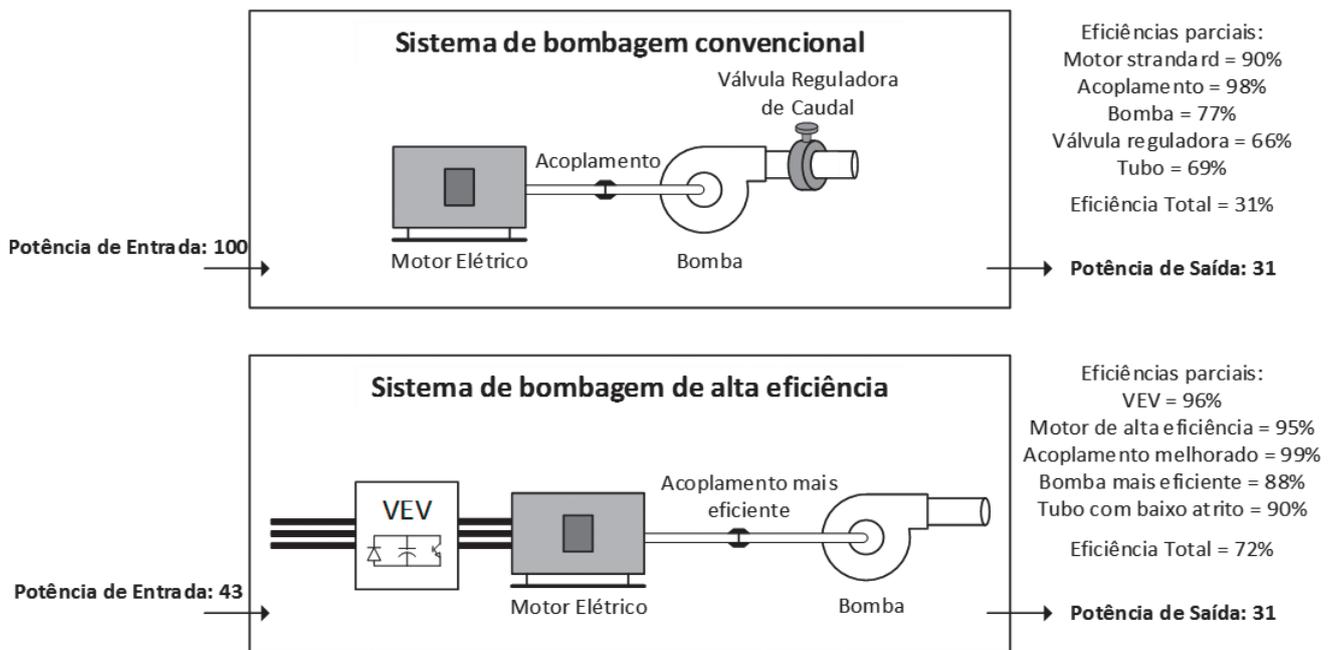


Figura 3.5 - Comparação de um sistema de bombeamento convencional com um sistema de bombeamento de alta eficiência possuindo um VEV. Ambos os sistemas debitam a mesma potência de saída [24]

3.

De acordo com o exemplo da Figura 3.5, duas das principais medidas que transformam sistemas convencionais em sistemas de bombeamento de alta eficiência são: aplicação de VEV que permitem variar a velocidade de rotação dos motores elétricos e a substituição de bombas convencionais por bombas mais eficientes.

De referir ainda, que existem grandes diferenças de rendimento hidráulico (eficiência) entre as bombas convencionais e as bombas de alto rendimento. Em alguns casos, esta diferença pode ultrapassar os 10%, como é o caso do exemplo da Figura 3.5, em que esta diferença se situa nos 11%.

A medida que possibilita as maiores oportunidades de economia energética é aquela que através da aplicação de VEV, converte os grupos de eletrobomba de velocidade constante em grupos eletrobomba de velocidade variável. Assim, é dada especial atenção a esta medida na secção seguinte.

3.2.1 Aplicação de VEV aos sistemas de bombeamento

Em alguns sistemas de bombeamento podem ser alcançadas reduções no consumo de energia elétrica que dependem do caudal relativo e em certos casos podem situar-se acima de 65% simplesmente com a aplicação de variadores eletrónicos de velocidade nos motores elétricos das eletrobombas. Tendo em conta que atualmente cerca de 80% das eletrobombas aplicadas em todo o mundo são unidades de velocidade constante, o potencial de economia de energia desta medida tem um valor extremamente elevado.

A Figura 3.6 apresenta a variação de potência elétrica necessária para controlar o caudal de uma bomba. Usando uma válvula convencional (controlo por estrangulamento), verifica-se que reduzindo o caudal, a potência absorvida pouco decresce. Se, pelo contrário, a redução do caudal é conseguida através da redução de velocidade da bomba, então a potência absorvida decresce fortemente. Assim, a Figura 3.6 apresenta, de forma gráfica, a economia energética potencial decorrente da aplicação do controlo de velocidade através de um VEV.

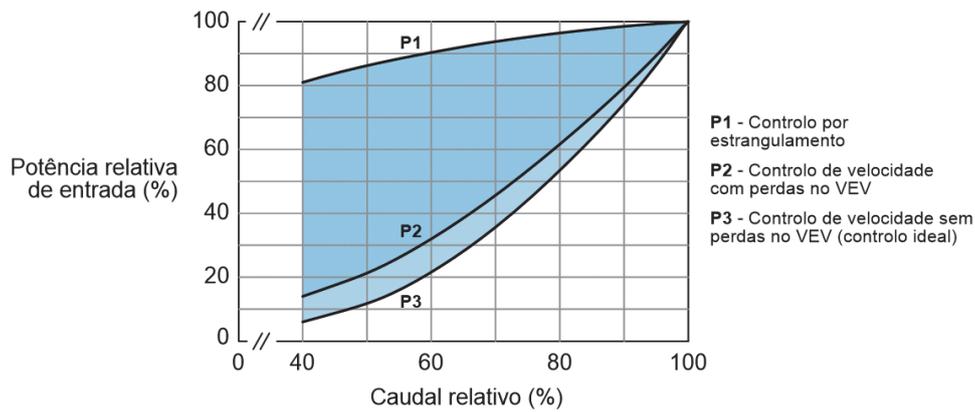


Figura 3.6 - Potência relativa de entrada para vários métodos de controlo do caudal de uma bomba centrífuga

É ainda de salientar que, no caso das bombas, existe uma relação do tipo aproximadamente cúbico entre a velocidade de rotação e a potência mecânica absorvida, enquanto o caudal é aproximadamente proporcional à velocidade de rotação. Destas relações, infere-se que reduzindo, por exemplo, o caudal em 20%, o consumo de energia elétrica pode ser reduzido para metade.

A Figura 3.7 também permite visualizar a comparação entre regimes de regulação de caudal por estrangulamento e por velocidade regulável da bomba.

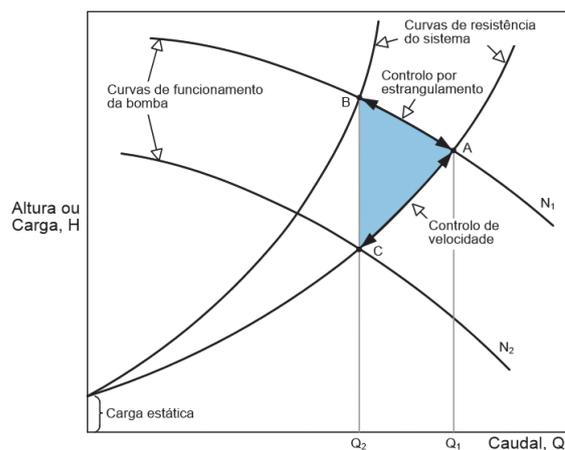


Figura 3.7 - Comparação entre o controlo de caudal por estrangulamento e o controlo de caudal por variação da velocidade de rotação da bomba (através de um VEV)

A gama referida de variação de caudal situa-se entre Q_1 e Q_2 . Para uma velocidade constante da bomba, N_1 , a válvula de estrangulamento fará deslocar o ponto de funcionamento entre A e B. Se a velocidade variar entre N_1 e N_2 , o ponto de funcionamento deslocar-se-á entre A e C para as mesmas variações de caudal. Não só esta linha corresponde a um conjunto de pontos de maior rendimento como também corresponde a produtos menores de H por Q e, portanto, a um menor consumo de energia.

Refira-se ainda que em muitas aplicações de bombagem, onde são utilizadas várias bombas em paralelo para produzir o caudal requerido, a substituição do tradicional ciclo *on/off* pela operação contínua de todas as bombas com velocidade variável (através da utilização de VEV) leva a economias de energia elétrica significativas [24]. Esta situação exemplificada na Figura 3.8 é especialmente indicada para sistemas onde a altura manométrica a vencer não é um fator importante.

Outras vantagens da operação contínua com variação de velocidade são [24]:

- Eliminação dos arranques bruscos típicos dos ciclos *on/off*;
- Controlo do efeito de “golpe de aríete” que degrada as tubagens, através de acelerações e desacelerações controladas.

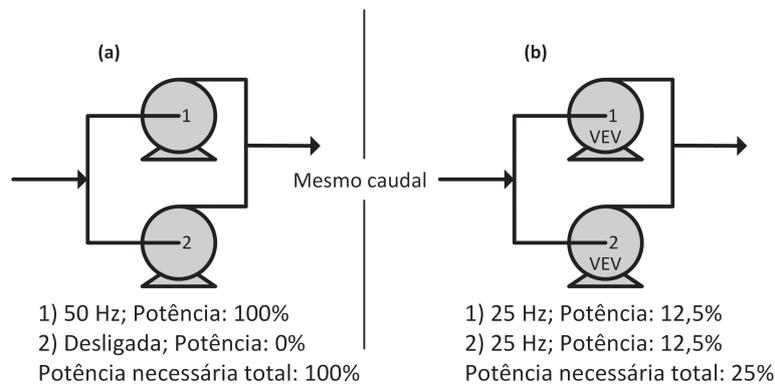


Figura 3.8 - Dois modos de operação em que as mesmas bombas em paralelo debitam um caudal total igual. Caso A: bombas a operarem em ciclos *on/off*; e caso B: bombas com variação de velocidade (VEV acoplado) [24]

3.3 SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

A principal função de um ventilador é movimentar grandes volumes de ar ou gases a pressões que sejam suficientes para superar a resistência dos sistemas aos quais estão agregados. Para reduzir a energia utilizada em ventiladores é necessário ter uma compreensão básica de como os sistemas de ventilação funcionam.

Os principais fatores e considerações a ter em conta para garantir que um sistema de ventilação é eficiente em termos de desempenho e consumo de energia são:

Selecionar o tipo adequado de motor para o ventilador;

- Determinar a velocidade do ar como parte do projeto de dimensionamento;
- Minimizar a perda de pressão através da tubagem de distribuição;
- Selecionar o ventilador mais adequado para a aplicação particular em questão;
- Efetuar uma instalação correta;
- Efetuar manutenção regular;
- Efetuar uma revisão anual.

No que concerne aos motores elétricos dos ventiladores devem ser aplicadas as mesmas medidas de economia energética já referidas na secção 3.1.

Tal como nos sistemas de bombagem, a instalação de VEV em sistemas de ventilação é a medida que, à partida, conduz a maiores economias energéticas (mesmo em motores já a operar perto da sua carga ótima). Nos sistemas convencionais a energia gasta é elevada sempre que se utilizam válvulas ou dispositivos similares para regular o caudal de ar.

A Figura 3.9 apresenta o exemplo de um *chiller* onde a instalação de VEV permite controlar a velocidade da bomba e a velocidade do ventilador, com base na temperatura ambiente e na temperatura da saída do fluido refrigerante, respetivamente. O resultado é que comparativamente com a operação baseada em ciclos *on/off*, este sistema não só permite um controlo mais estável da temperatura do espaço refrigerado como também leva a reduções do consumo de eletricidade que tipicamente atingem os 25-50% [24].

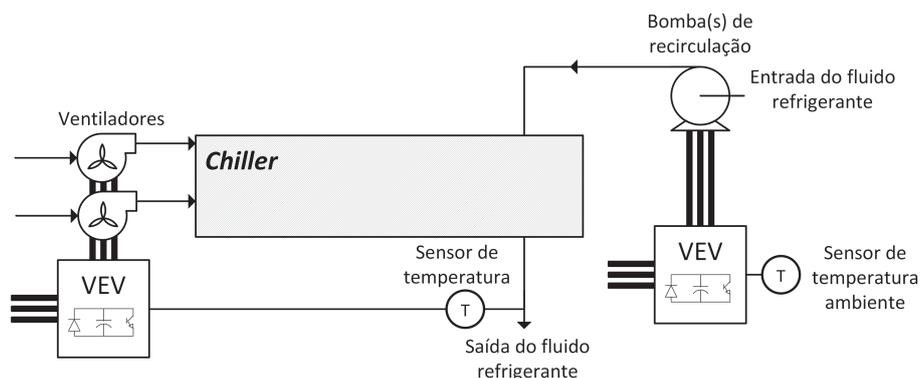


Figura 3.9 - Exemplo da aplicação de VEV a um sistema de ventilação: chiller com ventiladores e com a bomba de recirculação de fluido refrigerante acoplado a VEV [24]

3.4 SISTEMAS DE COMPRESSÃO DE AR

Existem sistemas de compressão de ar, em Portugal, cuja quantidade de ar produzido não é a adequada tendo como consequência o aumento dos custos de manutenção, as paragens de produção, a diminuição da qualidade dos produtos e o aumento do consumo energético. Os principais constituintes de um sistema de produção de ar são: (i) compressores; (ii) secadores; (iii) reservatório de armazenamento de ar comprimido; (iv) rede de distribuição; (v) filtros; (vi) lubrificadores.

Os principais tipos de compressores encontram-se divididos em dois grupos: (i) compressores volumétricos; (ii) compressores dinâmicos.

Nos compressores volumétricos, a compressão do ar é feita com base na redução do gás a comprimir, este é admitido numa ou mais câmaras de compressão, nas quais o seu volume será reduzido, provocando um aumento da pressão do próprio gás [27]. Dentro dos compressores volumétricos temos dois tipos: (i) rotativo – espiral, palhetas, anel líquido, parafuso, *roots* e dente; (ii) alternativo – pistão de efeito simples, pistão de efeito duplo e diafragma.

No que diz respeito aos compressores dinâmicos, a compressão do gás é efetuada através da conversão de energia cinética em pressão. A massa é acelerada a uma velocidade elevada por meio de um impulsor, posteriormente é forçada a desacelerar ao ser expandida num difusor. O fenómeno de expansão permite a conversão de energia cinética em pressão [27]. Os compressores centrífugos e axiais, são exemplos de compressores dinâmicos.

Na Tabela 3.3 encontram-se enumerados os tipos de compressores que estão disponíveis no mercado, bem como algumas condições de operação e as respetivas aplicações.

O ar comprimido é uma forma versátil, flexível e segura de transmitir energia. De facto, mais de 10 % da energia elétrica consumida na indústria é utilizada em ar comprimido. Contudo, perto de 20% desta energia é perdida devido a fugas de ar, má utilização do ar comprimido ou à negligência da manutenção.

Tabela 3.3 - Tecnologia e aplicações de compressores [27]

Tipo de compressor	Pressão (bar)	Qualidade de ar	Gama de potência (kW)	Regime	Aplicações Industriais
Centrífugo	0,3 - 200	Isento de óleo	>400	Contínuo	Separação de gases; Vidreira; Petróleos; Química
Parafuso Isento de Óleo	0,3 - 13	Isento de óleo	55 - 900	Variável e contínuo	Alimentar; ETAR; Eletrônica; Pasta e Papel; Cimenteira; Produção de energia
Dente	4 - 10	Isento de óleo	15 - 55	Variável e contínuo	Alimentar; Farmacêutica; Eletrônica
Roots	0,3 - 1	Isento de óleo	1 - 400	Variável e contínuo	ETAR; Gráficas; Transporte pneumático
Pistão Isento de Óleo	>15	Isento de óleo	1,5 - 600	Variável e contínuo	PET (garrafas de água); Compressão de gases; Aeronáutica
Parafuso Lubrificado	4 - 20	Lubrificado	5 - 500	Variável e contínuo	Metalomecânica; Minas; Cimentos; Pneus; Produção de energia
Pistão Lubrificado	4 - 40	Lubrificado	1,5 - 20	Intermitente	PET (detergentes)
Espiral	4 - 10	Isento de óleo	1 - 20	Intermitente	Alimentar; Clínicas dentárias; Laboratórios

A otimização energética dos sistemas de ar comprimido deverá passar por intervenções nas seguintes áreas: produção e tratamento do ar comprimido; redes de distribuição de ar comprimido; dispositivos de utilização final; projetos e operação do sistema global.

Em termos mais específicos e relativamente às três primeiras áreas, as principais medidas a considerar com vista ao aumento da eficiência dos sistemas de ar comprimido são as apresentadas em seguida.

Produção de ar comprimido

- Otimização da utilização do sistema: ajuste dos controlos e regulação da pressão, desligar quando não utilizado;
- Otimização do nível de pressão do ar comprimido do sistema em função dos dispositivos de utilização final;
- Redução da temperatura do ar de admissão, mantendo uma ótima filtragem na tomada de ar;
- Melhoramento do sistema de controlo do compressor;
- Otimização das mudanças de filtros (em função da queda de pressão);
- Filtração e secagem do ar até aos requisitos mínimos do sistema (possivelmente mediante instalação de filtros/secadores pontuais para necessidades específicas);
- Recuperação e utilização do calor desperdiçado através dos sistemas de arrefecimento dos compressores;
- Aumento da capacidade do reservatório principal de ar comprimido;
- Utilização de variadores eletrónicos de velocidade;
- Utilização de um sistema de múltiplas pressões, com a utilização de *boosters* para aumentar a pressão em determinados locais;
- Substituição dos motores elétricos convencionais avariados ou em fim de vida por motores de alto rendimento;
- Substituição de compressores exageradamente sobredimensionados por outros com menores consumos específicos de energia e ajustados às necessidades do sistema.

Rede de distribuição de ar comprimido

- Instituição de um programa regular para a verificação de fugas de ar comprimido;
- Redução de fugas com a utilização de adaptadores de fugas reduzidas, uniões rápidas de elevada qualidade, etc.;
- Divisão do sistema em zonas, com reguladores de pressão apropriados ou válvulas de corte;
- Fecho de linhas que estão fora de serviço;
- Utilização de purgas de condensados do tipo “sem perdas de ar”;
- Dimensionamento adequado das capacidades de armazenamento (permite que os compressores funcionem com um rendimento otimizado e evita arranques e paragens bruscas);
- Instalação de reservatórios suplementares de ar comprimido próximos de cargas variáveis;
- Diminuição da extensão da rede e criação de uma rede em anel;
- Otimização do diâmetro da tubagem;
- Limitação do número de cotovelos, de mudanças de direção e de mudanças de seção.

Dispositivos de utilização final

- Eliminação de utilizações não apropriadas de ar comprimido;
- Reparação ou substituição de equipamentos com fugas de ar comprimido;
- Interrupção do ar comprimido quando o dispositivo não está em operação;
- Verificação e otimização da necessidade de dispositivos específicos de regulação de pressão, filtros e secadores;
- Utilização preferencial de aspiradores elétricos nas limpezas. Estes consomem menos energia que os aparelhos insufladores de ar (bicos de sopro ou pistolas de ar).

A avaliação de cada uma das medidas acabadas de referenciar deve ter em conta a respetiva aplicabilidade e rentabilidade, tendo em conta não apenas o custo do investimento necessário e as economias de energia anuais, mas também outras eventuais alterações nos custos anuais de operação e manutenção dos sistemas de ar comprimido em questão.

De todas as medidas referenciadas anteriormente, as mais importantes são: redução de fugas de ar comprimido; melhor conceção do sistema; utilização de variadores eletrónicos de velocidade; recuperação de calor.

A Tabela 3.4 resume a contribuição potencial, em termos de economias energéticas, de algumas das principais medidas técnicas referenciadas [28]:

Tabela 3.4 - Valores típicos de economia de energia associados a várias medidas [28]

Medidas de economia de energia	% de aplicação ⁽¹⁾	% de economia ⁽²⁾	Contribuição potencial (%) ⁽³⁾
Instalação ou renovação do sistema			
Melhoria dos acionamentos (substituição de motores convencionais por motores de alto rendimento)	25	2	0,5
Utilização de variadores eletrónicos de velocidade	25	15	3,8
Melhoria do compressor	30	7	2,1
Utilização de sistemas de controlo sofisticados e precisos	20	12	2,4
Recuperação de calor para outras utilizações	20	20	4,0
Melhoria dos sistemas de arrefecimento, secagem e filtragem	10	5	0,5
Conceção geral do sistema, incluindo sistemas de multipressão	50	9	4,5
Redução de perdas de carga	50	3	1,5
Otimização de dispositivos de utilização final, consumidores de ar comprimido	5	40	2,0
Operação e manutenção do sistema			
Redução de fugas de ar comprimido	80	20	16,0
Maior frequência na substituição de filtros	40	2	0,8
TOTAL			38,1

Legenda:

- (1) % de sistemas em que a medida é aplicável e viável economicamente
- (2) % de economia do consumo energético anual
- (3) Contribuição potencial (%) = Aplicação (%) x Economia (%)

A redução do consumo de eletricidade é mais facilmente conseguida a partir de uma correta conceção dos sistemas e, portanto, aquando da instalação de um sistema novo. No entanto, também são possíveis economias significativas aquando da substituição dos principais componentes de um sistema já existente. Além disso, ações relacionadas com a operação e manutenção, nomeadamente a manutenção regular de filtros e a deteção de fugas de ar comprimido, podem ser introduzidas em qualquer momento do ciclo de vida de um sistema de ar comprimido [28].

Em seguida são abordados, em maior detalhe, algumas medidas e/ou soluções tecnológicas referenciadas anteriormente, cuja aplicação em sistemas de ar comprimido pode levar a reduções energéticas consideráveis.

3.4.1 Otimização da pressão do ar comprimido

Na indústria é prática corrente produzir ar comprimido a pressão elevada e depois expandi-lo até à pressão desejada, com grandes perdas neste procedimento. A solução mais energeticamente favorável é a produção de ar comprimido à pressão mínima requerida (p. ex., redução de pressão do compressor de 8,2 bar para 6,9 bar permite ganhos energéticos de 9,1 % na potência de compressão).

Como regra de base, pode afirmar-se que para uma redução de 1 bar na pressão de trabalho da rede, a redução de energia elétrica associada pode atingir os 6%. Estas economias energéticas são conseguidas com a ajuda de sistemas de controlo apropriados.

A utilização de controladores baseados em computadores industriais é frequente em sistemas modernos de produção e tratamento de ar comprimido. Estes sistemas podem ser utilizados apenas no controlo do compressor ou no controlo global dum sistema completo de ar comprimido. Com tais sistemas de controlo, a pressão máxima de trabalho pode ser reduzida, as perdas de potência são significativamente reduzidas e é conseguido um controlo efetivo dos custos.

A simples redução da pressão do sistema através de controladores modernos também tem outra vantagem: a diminuição das perdas causadas por fugas no sistema de distribuição do ar comprimido, sem que tal esteja associado a qualquer reparação.

3.4.2 Utilização de variadores eletrónicos de velocidade

O funcionamento em modo carga-vazio não tira partido da operação em modo contínuo dos compressores. O uso de VEV ajusta a velocidade do compressor em função das exigências do sistema, permitindo inclusive desligar o compressor quando este não está a ser utilizado.

A integração de VEV em sistemas de ar comprimido pode revelar-se bastante viável do ponto de vista económico em situações de carga variável, o que acontece em cerca de um quarto das instalações existentes. Ainda assim, a utilização de VEV limita-se à instalação de novos compressores, já que a reconversão de compressores já instalados coloca normalmente vários problemas técnicos [28].

Entre as vantagens da utilização de VEV encontram-se [25]:

- Redução de fugas, diminuindo as oscilações bruscas de pressão associadas ao modo de funcionamento em carga-vazio;
- Maior durabilidade do compressor.

3.4.3 Melhoramentos do sistema de controlo de funcionamento carga/vazio

No sistema de controlo de funcionamento em carga/vazio, um compressor pode estar bastante tempo em vazio, estando em funcionamento sem gerar pressão útil para o sistema. Há que ter presente que um compressor a funcionar em vazio, embora dependendo do tipo de compressor e do sistema de acionamento, poderá consumir cerca de 20% da energia a plena carga. Nestes casos, a otimização passa pela utilização de compressores pouco sobredimensionados, ou por uma série de compressores de menores dimensões de modo a que seja possível desligar alguns quando as necessidades do sistema são menores.

3.4.4 Redução de fugas de ar comprimido

De todas as medidas que levam a economias energéticas, a redução de fugas de ar comprimido é a medida mais importante, sendo aplicável a quase todos os sistemas de ar comprimido. A maior parte dos utilizadores de ar comprimido é pouco sensível à importância de um programa regular de deteção de fugas, em parte porque são invisíveis e geralmente não provocam danos.

Uma rede de distribuição concebida e instalada corretamente pode diminuir significativamente as fugas de ar comprimido, por exemplo, através da utilização de dispositivos modernos de drenagem de condensados sem perdas de ar, ou através da especificação de ligações de elevada qualidade e duração. Contudo, o aspeto essencial relacionado com este tópico tem a ver com uma manutenção adequada. Existem no mercado aparelhos de uso manual que detetam as fugas de ar comprimido pelo ruído que estas provocam, permitindo a redução dos custos associados à deteção de fugas.

3.4.5 Recuperação e utilização do calor desperdiçado pelos compressores

Em operação, os compressores geram calor que tanto quanto possível deverá ser recuperado e utilizado noutras aplicações. Uma vez conhecidos os sistemas de recuperação de calor e a disponibilidade do calor gerado na compressão, o potencial de recuperação desta energia térmica e a escolha do sistema de recuperação dependem dos seguintes fatores [25]:

- Tipo de compressor: blindado ou não, alternativo ou de parafuso, volumétrico ou dinâmico;
- Tipo, caudal e temperatura do fluido de arrefecimento do compressor (água, ar ou óleo);
- Existência, a curta distância e no mesmo instante, de áreas a aquecer, caldeiras ou outros equipamentos consumidores de energia térmica;
- Tempo de funcionamento e fator de carga do compressor.

Os sistemas de recuperação de calor baseiam-se essencialmente no aquecimento de ambientes próximos, através de condutas de ar quente e, eventualmente, recorrendo a ventiladores de baixa pressão para compensar o aumento das perdas de carga adicionais introduzidas pelas condutas. As vantagens destas instalações residem na sua simplicidade e baixo custo, mas não permitem a acumulação da energia recuperada e têm carácter sazonal [28].

A recuperação de calor produzido pelos compressores é uma operação cuja viabilidade económica depende do custo e disponibilidade do equipamento necessário (permutadores de calor, tubagem, reguladores, etc.) e da comparação com soluções alternativas.

3.4.6 Discussão sobre configuração de compressores - um exemplo

Pretende-se efetuar a compressão de 100 m³/h de ar a 25 °C, de 1 atm para 15 atm. Qual a melhor estratégia para atingir este objetivo?

Esta compressão deverá utilizar um compressor de múltiplos andares, visto que é bem aceite que o rácio de compressão máximo não deve ultrapassar o valor 3. Foram, efetuadas simulações recorrendo ao pacote de simulação *AspenPlus* de modo a verificar o impacto que o rácio de compressão tem na potência do compressor.

Foram simulados três casos. O primeiro consiste num compressor de 3 andares, em que nos dois primeiros o rácio de compressão é 3 e no último esse valor é de 1,67 para perfazer as 15 atm. Entre cada andar encontra-se um arrefecedor, pois a corrente de ar que sai de um compressor com destino ao compressor seguinte, não pode exceder os 215 °C. O segundo e o terceiro caso, diferem do primeiro, no valor da temperatura de saída de cada um dos arrefecedores.

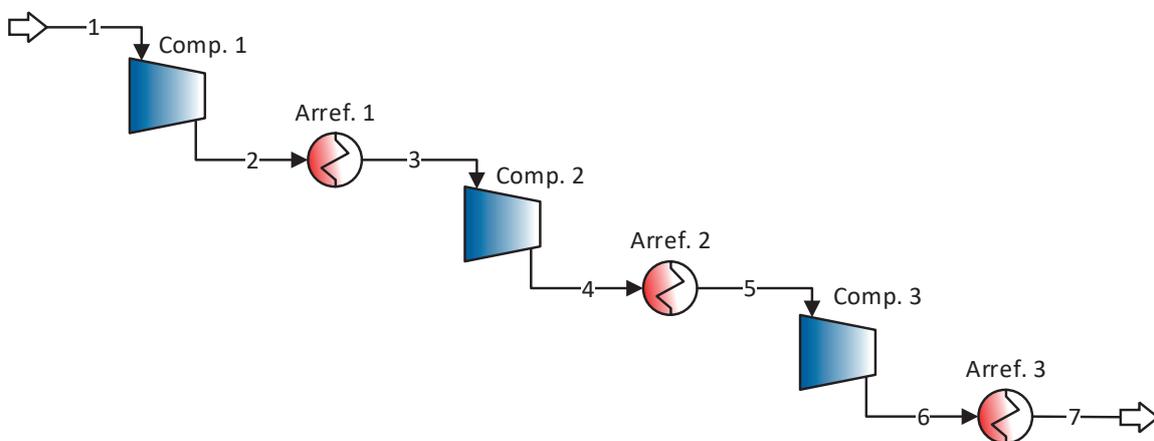


Figura 3.10 - Esquema de compressão em 3 andares com arrefecimento intermédio para o exemplo apresentado

Os resultados obtidos para os valores das principais variáveis encontram-se apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.5 - Resultados da simulação do Caso 1

Corrente	P (bar)	T (°C)
1	1	25
2	3	117,5
3	3	37,8
4	9	196,6
5	9	37,8
6	15	105,8
7	15	37,8

Como é possível verificar, a temperatura não excede em nenhum dos compressores, o valor de 210 °C, pelo que nesta simulação os valores de temperatura e pressão estão dentro da gama recomendada segundo as boas práticas industriais.

Outras simulações, considerando a configuração base dos três compressores e as respetivas razões de compressão, mostram a influência do arrefecimento do ar à saída do compressor na potência consumida pelos compressores seguintes. Nesta análise, estudou-se o efeito do arrefecimento a 50 °C ou a 75 °C.

Os resultados da simulação mostram (Tabela 3.6), como seria de esperar, que o consumo de água aumenta com o grau de arrefecimento nos estágios intermédios, enquanto a potência consumida pelo compressor diminui para valores mais baixos de temperatura de ar no arrefecimento. Em conclusão, a minimização dos custos globais do sistema de compressores, deve ser um *tradeoff* entre o consumo de água de refrigeração e o consumo de eletricidade, sendo que o valor ótimo da temperatura de saída do ar vai depender dos custos de ambas as utilidades.

Tabela 3.6 - Resultados obtidos alterando as condições de arrefecimento do ar

Equipamento	Potência (kW)	F _{Água R.} (kg/h)	Potência (kW)	F _{Água R.} (kg/h)	Potência (kW)	F _{Água R.} (kg/h)
	Caso Base		T _{ar de saída} = 50 °C		T _{ar de saída} = 70 °C	
Compressor 1	5,0	-	5,0	-	5,0	-
Compressor 2	5,2	-	5,4	-	5,8	-
Compressor 3	2,2	-	2,3	-	2,5	-
Arrefecedor 1	-	790	-	721	-	580
Arrefecedor 2	-	904	-	939	-	1 010
Arrefecedor 3	-	390	-	404	-	434
Total	12,4	2084	12,7	2064	13,3	2024

F_{Água R.} - Caudal de água de refrigeração

3.5 SISTEMAS DE TRANSPORTADORES DE SÓLIDOS

Os custos de transporte de sólidos podem representar uma parcela muito relevante nos custos operatórios de uma unidade industrial.

Na indústria, o transporte de materiais sólidos pode ocorrer pela movimentação desses sólidos fluidizados (transporte pneumático) ou, quando o material apresenta granulometria grosseira ou é abrasivo, através de dispositivos mecânicos que transportam os sólidos em regime contínuo. A escolha do tipo de transportador está fortemente dependente da função que irá desempenhar, tal como se apresenta na Tabela 3.7.

Os equipamentos podem dividir-se em dois grandes grupos:

- Móveis, que se movimentam ao mesmo tempo que o material que transportam (guindastes, empilhadoras);
- Fixo, cuja posição permanece fixa durante o tempo, embora possam conter partes móveis (pneumáticos, elevadores de cestos, arrastadores).

Tabela 3.7 - Transportador para material a granel [29]

Função	Tipo de transportador
Transportar na horizontal	Tabuleiro, correia, fluxo contínuo, de arraste, de parafuso, oscilatório, cestos, baldes, articulada, pneumático
Transportar materiais acima ou abaixo de uma inclinação	Tabuleiro, correia, fluxo contínuo, de arraste, de parafuso, cestos elevatórios, pneumático
Elevar materiais	Elevador de cestos, fluxo contínuo, pneumático
Trajcetórias horizontais e verticais	Fluxo contínuo, baldes, pneumático
Distribuir ou coletar materiais de silos	Correia, de arraste, de parafuso, a fluxo contínuo, pneumático

Na indústria, a seleção e o dimensionamento do equipamento a ser utilizado dependem de muitos fatores, sendo os mais importantes:

- **A capacidade**, diretamente relacionada com a quantidade de material processado e armazenado na unidade;
- **A distância e o desnível entre carga e descarga** que influenciam diretamente a construção do equipamento de transporte;
- **A natureza do material a ser transportado**, uma vez que permanece muitas vezes em contato direto com o transportador. A granulometria, a forma da partícula, a densidade, a fragilidade, a humidade, a dureza e a aglomeração podem ser características determinantes na escolha do equipamento;
- **Os fatores económicos** que influenciam a qualidade e tipo de equipamento.

Apresenta-se em seguida a descrição das tecnologias de transporte de sólidos existentes atualmente.

3.5.1 Transportadores de correias

Os transportadores de correia são muito utilizados para o transporte de materiais sólidos dentro da indústria devido ao seu baixo custo, construção compacta e excelente desempenho funcional. São compostos por uma correia sem fim que trabalha sob o efeito da força de atrito.

Estes sistemas podem ser horizontais ou inclinados e de comprimentos variados. Operam a uma velocidade de até 5 m/s e transportam, no máximo, 5 ton/h. Podem também operar em distâncias curtas, com velocidades baixas, permitindo a manipulação individual dos materiais transportados.

As correias são fabricadas numa grande variedade de materiais, como couro, *nylon*, poliéster, polietileno, PVC, mas normalmente são de borracha com reforço de fios metálicos. A espessura e o material a ser utilizado depende do tipo de material a ser transportado, da largura e da tensão aplicada.

A Figura 3.11 representa esquematicamente um transportador por correia.



Figura 3.11- Exemplo de um sistema de transporte de sólidos por correias [30]

3.5.2 Transportadores de esteiras

Este tipo de sistema é uma variação do transportador de correia aplicável ao transporte pesado de materiais quentes ou muito abrasivos, ou ainda quando se deseja percursos diferentes. A esteira é geralmente metálica e construída com bandejas ou caçambas fixas numa correia ou corrente.

Muitas vezes as esteiras são reforçadas para atender à necessidade de transporte de pesados a curtas distâncias.

A esteira transportadora pode ter secções diferentes, em função da disposição dos rolos, que são escolhidos com base no material a ser transportado.

3.5.3 Transportadores por gravidade

O Transportador por gravidade é considerado o sistema mais simples para o transporte de sólidos. É utilizado em processos onde a relação custo-benefício não justifica a colocação de um motor para o acionar. São implementados devido à natureza do processo. O sólido escoar por gravidade sobre um plano inclinado em relação à horizontal com um ângulo superior ao do repouso do material. O transportador por gravidade pode ser em roldanas ou dutos inclinados por onde o sólido escoar livremente. O ângulo de inclinação determinará a velocidade do escoamento das partículas. Quanto maior o ângulo de inclinação, mais as partículas vão ser aceleradas durante o processo de transporte podendo haver queda excessiva das partículas.

3.5.4 Transportadores de rosca/parafuso (helicoidal)

Os transportadores de rosca consistem num tubo ou calha em forma de U pela qual um parafuso sem fim, com ou sem eixo central, gira pela ação de um motor. É adequado ao transporte de materiais granulares, densos ou volumosos e viscosos. É um dos principais modos de alimentação de sólidos em secadores ou incineradores.

Na Figura 3.12 encontra-se representado uma ilustração deste tipo de transporte.



Figura 3.12 - Representação de um sistema de transporte helicoidal de calha [31]

3.5.5 Transportador vibratório

Os transportadores vibratórios são constituídos por um tabuleiro horizontal suportado por molas e posto a vibrar através de um braço. O movimento para cima e para a frente inculido às partículas, dá-lhes movimento através de uma sequência de pequenos saltos.

3.5.6 Transportador pneumático

O transporte pneumático consiste em movimentar um produto sólido no interior de uma tubagem através de uma corrente com ar ou outro gás como fluido transportador.

O transportador pneumático é um equipamento utilizado em larga escala na indústria para movimentação e elevação de sólidos através das mais variadas distâncias e tipos de trajeto.

O sistema de transporte pneumático é constituído basicamente por:

- Tubulação por onde circulam os sólidos e o fluido transportado;
- Um ventilador e/ou bomba de vácuo;
- Um alimentador de sólidos;
- Um separador de fluido e sólido na parte terminal tais como:
 - Ciclones;
 - Filtros de limpeza por ar comprimido ou contra-corrente.

Este tipo de sistema é útil para transportar sólidos para locais de uma zona do processo, difíceis ou economicamente inviáveis de serem transportados por transportadores mecânicos, e apresenta como vantagens: (i) um consumo eficiente de energia e mão-de-obra; (ii) um menor desgaste do sistema; (iii) uma maior flexibilidade, permitindo instalações de sistemas complexos em espaços bem reduzidos.

As desvantagens destes transportadores são: (i) elevado custo de instalação; (ii) baixa viabilidade para curtas distâncias;

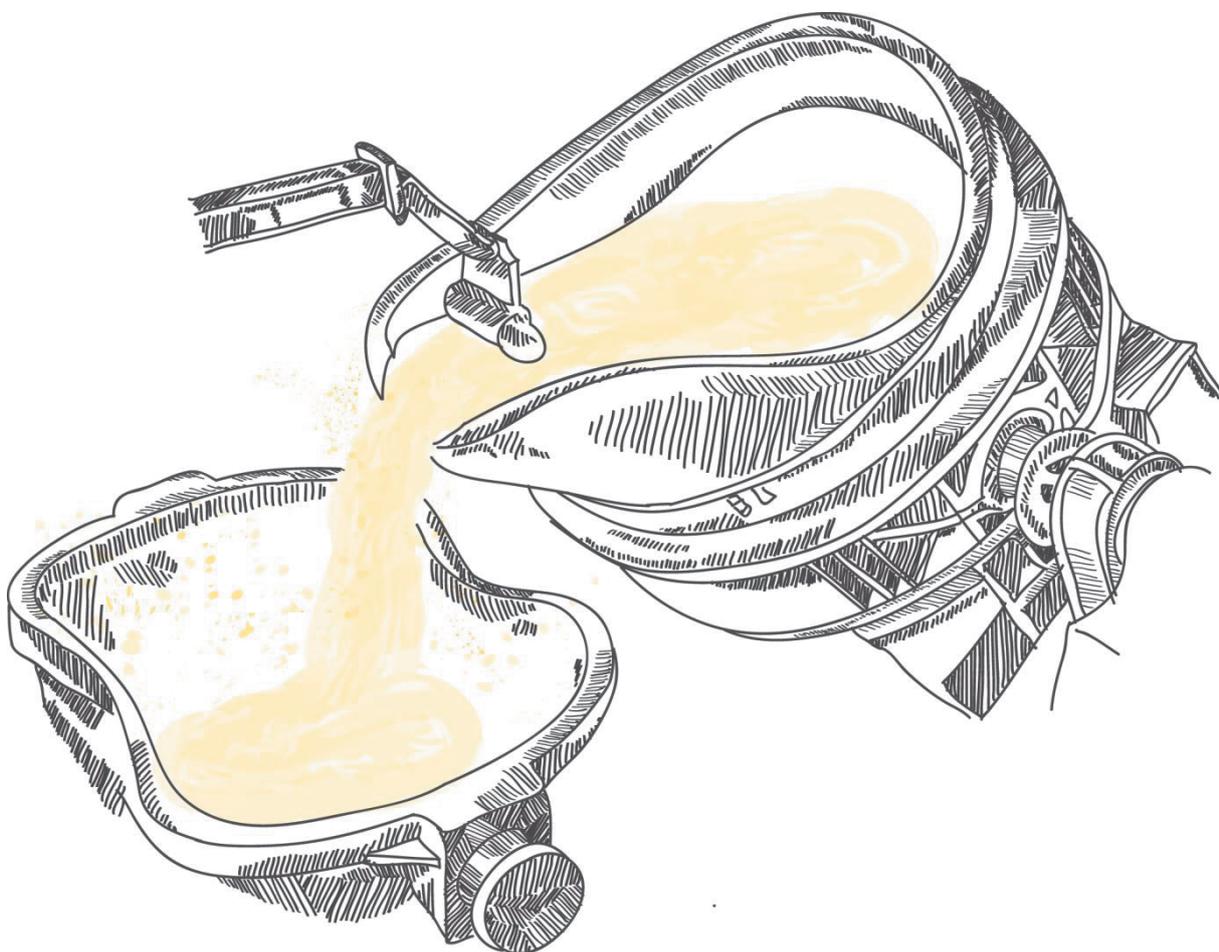
(iii) limitação da distância no transporte de materiais frágeis; (iv) exigência de um gás inerte no transporte de materiais potencialmente explosivos.

3.5.7 Transportador de elevador de cestos

Estes transportadores são sistemas constituídos por cestos fixos sobre correias verticais ou de grande inclinação. Movimentam-se geralmente no interior de caixas de madeiras ou de aço. A descarga é feita pela inversão dos cestos.

São utilizados para a elevação de cereais, carvão, minérios e reagentes químicos a granel. A altura de elevação pode chegar a 100 m.

PRODUÇÃO DE CALOR E FRIO



4. PRODUÇÃO DE CALOR E FRIO

A produção de calor e frio são habitualmente duas componentes de energia térmica que permitem o funcionamento dos Processos Industriais. O calor, sendo energia em movimento, pode ser obtido pela combustão direta de combustíveis fósseis ou não fósseis. Apesar de, em termos ambientais, ser preferível usar esta última forma de energia primária, neste momento tal não é muitas vezes possível dentro do quadro do atual desenvolvimento económico-tecnológico. Nestas circunstâncias, devem ser adotadas medidas que melhorem os sistemas de queima, bem como o aumento da eficiência energética nos sistemas de produção e distribuição de vapor de água. Este fluido é a utilidade quente mais utilizada na indústria transformadora, e toma por isso mesmo um lugar de destaque em termos de enumeração das medidas de melhores práticas para a sua utilização. O sistema de frio é usualmente obtido através de equipamentos de compressão e evaporação que recorrem também ao consumo de energia elétrica, utilizando fluidos refrigerantes.

4.1 SISTEMAS DE COMBUSTÃO

Nos sistemas baseados em combustível, o calor é obtido por combustão direta ou indireta de combustível sólido, líquido ou gasoso. Os gases de combustão podem estar em contacto com o material (aquecimento direto), ou serem confinados e, portanto, separados do material (aquecimento indireto – exemplo: tubo de queimador radiante, retorta, etc.). Exemplos de equipamentos de aquecimento de processos baseados em combustível incluem fornalhas e caldeiras.

Os sistemas de combustão estão na origem da maior parte do calor que é utilizado na concretização dos Processos Industriais. Assim, neste tópico são apresentadas algumas das melhores técnicas disponíveis (equivalente à sigla inglesa BAT – *Best Available Techniques*) para aumentar a eficiência energética em sistemas de combustão. Estas técnicas são tão válidas para sistemas de chama (com queimadores), como para sistemas de combustão em leitos fluidizados [25].

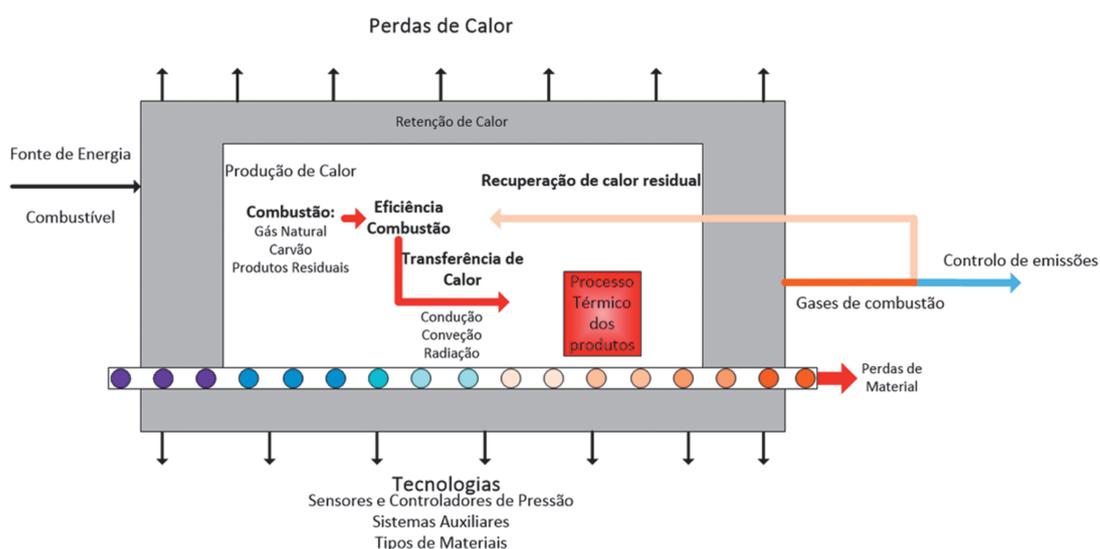


Figura 4.1 - Esquema geral de um sistema de queima

Neste subcapítulo são analisadas as melhores tecnologias relacionadas com fornalhas, caldeiras e fornos, bem como com os respetivos modos de operação industrial.

Apesar de algumas das técnicas aqui apresentadas também se aplicarem a sistemas de vapor, o aumento da eficiência energética destes últimos será alvo de atenção específica na secção 4.1.3.

4.1.1 Diminuição das perdas térmicas num sistema de combustão

Num sistema de combustão que teoricamente apresente uma eficiência energética de 100%, toda a energia libertada na queima do combustível é transferida para o processo de destino. No entanto, estes sistemas ideais não existem, pelo que parte dessa energia é dissipada para o meio envolvente através das paredes e dos gases de combustão, como se encontra exemplificado na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Balanço de conservação de energia a um sistema de combustão genérico

De acordo com a Figura 4.2, a eficiência energética (η) de um sistema de combustão é dada pela Equação (4.1) ou (4.2).

$$\eta = \frac{\text{Calor transferido para o processo}}{\text{Calor do combustível}} \quad (4.1)$$

$$\eta = 1 - \frac{\text{Calor dos gases de combustão} + \text{Calor através das paredes}}{\text{Calor do combustível}} \quad (4.2)$$

A definição de eficiência energética expressa pela Equação (4.2) indica que as estratégias tecnológicas para o aumento da eficiência devem ser orientadas para a diminuição das perdas térmicas através das paredes e dos gases de combustão.

A diminuição das perdas térmicas pode ser conseguida através de:

- Redução da temperatura de saída dos gases de combustão;
- Diminuição do caudal mássico dos gases de combustão;
- Substituição de isolamentos térmicos danificados e aplicação de isolamentos mais eficazes.

4.1.1.1 Redução da temperatura de saída dos gases de combustão

As principais estratégias para reduzir a temperatura de saída dos gases de combustão são:

- O aumento da área ou da taxa de transferência de calor;
- A integração energética de modo a alimentar processos que necessitem de calor;
- O pré-aquecimento do ar de entrada dos sistemas de combustão;
- A limpeza e manutenção das superfícies de transferência de calor de modo a evitar a deposição de resíduos sólidos.



O aumento de 1 mm do *fouling* nas superfícies de permuta de calor pode levar a um aumento de 2% no consumo de combustível.



A diminuição de 20 °C na temperatura nos gases de saída das caldeiras pode levar a um aumento de cerca de 1% na eficiência energética do sistema.

No entanto, as estratégias de redução da temperatura dos gases de combustão devem respeitar alguns requisitos:

- Só se procede à recuperação do calor excedentário dos gases se existirem pontos nas proximidades disponíveis para o receber;
- Nos sistemas com combustíveis que tenham elevado teor de enxofre, a temperatura de saída dos gases não deverá ser inferior à temperatura de condensação da mistura de água e ácido sulfúrico, encontrando-se normalmente entre 110 e 170 °C, dependendo essencialmente da percentagem de enxofre presente.



As estratégias acima descritas requerem um investimento adicional e são melhor aplicadas no *design* e construção da instalação. O retorno do investimento situa-se entre os 5 e os 15 anos.

4.1.1.2 Diminuição do caudal mássico dos gases de combustão

A diminuição do caudal mássico dos gases de combustão é conseguida através da redução do excesso de ar à entrada da instalação de combustão. Este excesso de ar pode ser minimizado através do ajuste proporcional do fluxo de ar em relação ao de combustível.



A minimização do excesso de ar leva a uma menor emissão de NO_x .



É necessário garantir a quantidade estequiométrica de oxigénio necessária a uma combustão total e evitar atmosferas explosivas. Por motivos de segurança e ambientais, a combustão deve sempre decorrer numa atmosfera com pelo menos 5% de excesso de ar.

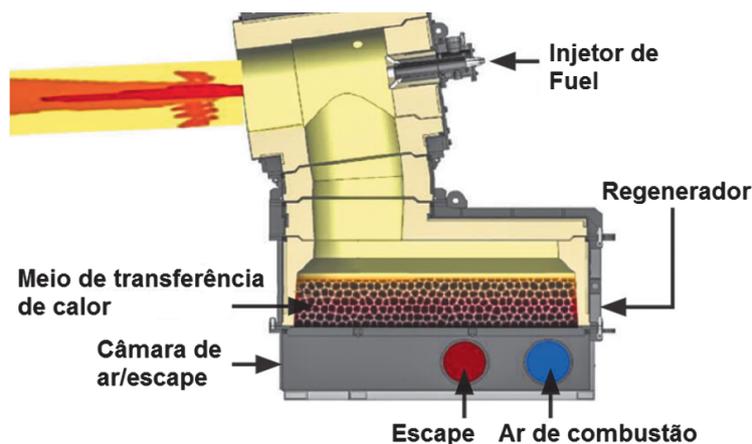


Figura 4.4 - Esquema de um queimador regenerativo [33]



A redução do consumo de combustível pode atingir entre os 50 e 60% [26].



Embora o pré-aquecimento de ar de entrada aumente a eficiência energética da combustão, leva a um aumento da temperatura de chama e conseqüentemente tende a promover maiores produções de NO_x , cujos custos de tratamento (remoção catalítica) são elevados.

Nesta área, têm sido desenvolvidos estudos centrados na utilização de queimadores auto-recuperativos e de recuperadores cerâmicos para altas temperaturas. Estes desenvolvimentos visam sempre a eficiência energética aliada à minimização das emissões de NO_x .

Com a tecnologia *HiTAC*, o ar de combustão é pré-aquecido a temperaturas bastante elevadas antes da injeção na fornalha a alta velocidade, permitindo a queima total de combustível, mesmo na presença de baixos teores de oxigênio. As principais vantagens desta tecnologia são [34]:

- Perfil de temperaturas mais uniforme no interior da câmara de combustão;
- Emissões reduzidas de NO_x ;
- Maior durabilidade do sistema de combustão (fornalha e tubagens);
- Aumento da produtividade e qualidade do produto;
- Maior eficiência energética com redução das emissões de CO_2 ;
- Baixas emissões de CO e NO_x ;
- Aumento da transferência de calor;
- Dispensa de outros equipamentos para aumentar a economia energética nos sistemas de combustão;
- Aumento da produtividade e qualidade do produto (se o sistema de combustão fizer parte de um processo produtivo);



A implementação deste sistema envolve um grande investimento. A diminuição dos custos de energia por si só raramente compensa o investimento, logo, deve-se considerar a maior produtividade na fornalha e a redução de emissões na análise custo-benefício.

4.1.3 Aumento de eficiência energética de fornalhas e fornos

Neste tópico são referidos os equipamentos que geram calor através da queima de combustíveis e transferem-no para um determinado processo [25].

Os principais sistemas de produção de calor na indústria são:

- Fornalhas para produção de calor por queima de combustível;
- Fornos para cozedura e calcinação.

As principais medidas a considerar com vista ao aumento da eficiência energética dos sistemas de combustão são apresentadas em seguida.

Fornalhas:

- Controlar o rácio ar/combustível;
 - Redução do excesso de ar
 - Pré-aquecimento do ar de combustão ou oxidante
 - Excesso de oxigénio
- Melhorar o armazenamento, preparação e distribuição do combustível;
- Instalar e inspecionar isolamentos térmicos.



- O controlo do rácio ar/combustível leva a um aumento da eficiência entre 5 a 25%.
- O pré-aquecimento do ar de combustão origina uma melhoria de 15 a 30%.
- Usar excesso de oxigénio, proporciona um aumento de eficiência entre 5 a 25%.

Deve-se ter em conta também possíveis perdas de ar de combustão a jusante da válvula de controlo, controlar a mistura ar/combustível nas condições de funcionamento do equipamento e verificar o excesso de oxigénio nos gases de combustão, pois este parâmetro indica que se está a usar um excesso de ar superior ao necessário.

Fornos:

- Efetuar a manutenção adequada dos isolamentos, reparação de fugas e limpeza dos queimadores;
- Controlar a combustão através da análise dos gases de combustão (regulação do excesso de ar);
- Verificar os sistemas de controlo de combustão;
- Efetuar a programação das cargas.

4.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR

As principais medidas para aumentar a eficiência energética em sistemas de produção e distribuição de vapor são as seguintes [25]:

- Utilização de permutadores de calor, denominados de economizadores, para pré-aquecer a água de alimentação à caldeira;
- Remoção de depósitos de calcário e/ou fuligens das superfícies de transferência de calor;
- Minimização de purgas da caldeira;
- Recuperação do calor das purgas;
- Reutilização do vapor de flash (p. ex., vapor gerado por expansão de condensados);
- Isolamento de tubagens, válvulas e flanges;
- Eliminação de fugas de vapor e condensados;
- Programa de controlo e manutenção dos purgadores;
- Remoção preventiva de depósitos nas superfícies de transferência de calor.

4.2.1 Utilização de economizadores para pré-aquecimento de água de alimentação

A colocação de um economizador à saída dos gases de combustão permite o pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira. O teor de enxofre do combustível vai ter um grande impacto na corrosão dos equipamentos, pelo que o *design* do economizador deve permitir uma troca fácil das peças que estão sujeitas a corrosão.



A utilização destes equipamentos em caldeira com gases de combustão a 230 °C, leva a um aumento da eficiência global em cerca de 4%, sendo uma opção para produções de vapor acima de 10 ton/h [25].

4.2.2 Remoção preventiva de depósitos nas superfícies de transferência de calor

Esta ação consiste na remoção química ou mecânica de depósitos sólidos e numa possível reformulação do sistema de tratamento de águas caso a necessidade de limpeza se torne demasiado frequente. O inconveniente da limpeza mecânica é que só pode decorrer durante os períodos de paragem programados [25].

Um eventual reajuste na pressão de vapor também é uma hipótese a ter em conta, pois menores pressões implicam menores temperaturas o que leva a uma redução na formação de depósitos.



1 mm de espessura na superfície metálica dos permutadores de calor representa uma diminuição de 9% na transferência de calor através dessa superfície.

4.2.3 Minimização de purgas das caldeiras

A diminuição do caudal de purga das caldeiras reduz substancialmente as perdas energéticas, os custos de tratamento da água de alimentação e os custos de tratamento associados às purgas [25].

As duas principais medidas para minimizar a quantidade de água e a energia desperdiçadas nas purgas, são as seguintes:

- Recolha dos condensados e reciclagem dos mesmos à caldeira. Se metade dos condensados forem reutilizados, as purgas são reduzidas em 50%;
- Pré-tratamento da água de alimentação das caldeiras para remoção de impurezas e iões indesejados, através de permuta iónica ou de processos de membranas (p. ex., osmose inversa). No entanto, no tratamento de águas duras, comuns no Centro e Sul de Portugal, a utilização de processos de membranas pode causar problemas de colmatação, por isso, a análise caso a caso é aconselhada.

4.2.4 Recuperação de calor nas correntes de purga

O calor recuperado pode ser utilizado para o pré-aquecimento da água de alimentação das caldeiras. A purga pode ser também alimentada a um tanque *flash* de produção de vapor, onde o vapor gerado pode ser utilizado no desarejador da água de alimentação. Esta técnica é economicamente viável para valores de caudais de purga a partir de 5% do caudal de vapor produzido pela caldeira [25].

4.2.5 Implementação de programas de controlo, e manutenção de purgadores

A implementação de programas de inspeção e manutenção regulares dos purgadores de um sistema de vapor possibilita a obtenção de elevadas economias energéticas. Os sistemas de vapor com frequência de inspeção superior a 3 anos possuem frequentemente um número elevado de purgadores defeituosos (até 30% do número total) que conduzem a perdas elevadas de vapor. Em contrapartida, nos sistemas com programas de inspeção e manutenção regulares, os purgadores com fugas constituem normalmente menos de 5% do número total.



Embora os purgadores tenham tempos de vida útil muito curtos, os custos associados à substituição de purgadores defeituosos é sempre muito inferior ao custo das perdas de vapor que podem ocorrer.

4.2.6 Recolha de condensados para reutilização na caldeira

Esta técnica apresenta as seguintes vantagens imediatas:

- Redução da quantidade de água a tratar;
- Diminuição do consumo de combustível (os condensados têm uma energia térmica maior do que a água de alimentação fresca);
- Redução do caudal de purgas das caldeiras.

4.2.7 Utilização de vapor flash

A recuperação do vapor *flash* representa uma economia de energia bastante superior à que se verifica com a simples recuperação de condensados, principalmente para condensados a alta pressão, porque o vapor flash destes condensados contém um valor energético muito elevado. Este vapor pode ser utilizado no desgaseificador e/ou no pré-aquecimento de ar.

A recuperação de condensados a baixa temperatura também permite a obtenção de vapor flash que pode ser utilizado no aquecimento de componentes a temperaturas inferiores a 100 °C, por exemplo, água para banhos.

4.2.8 Isolamento térmico no sistema de produção e distribuição de vapor

O reforço ou reparação dos isolamentos térmicos é justificado e conduz a economias energéticas significativas, se existir uma diferença mínima de 50 °C entre a temperatura da superfície exterior do equipamento e a do meio ambiente.

As perdas de calor que se verificam em válvulas e flanges não isoladas equivalem a perdas de calor em vários metros de tubagem não isolada. Por exemplo, as perdas numa válvula não isolada são idênticas às que se verificam num metro de tubagem não isolada com o mesmo diâmetro enquanto que as que se verificam numa flange não isolada são metade do valor atrás indicado. Informação mais detalhada pode ser consultada na secção 8.4.

4.2.9 Instalação de um pré-aquecedor de ar

Entre as vantagens do pré-aquecimento do ar (através dos gases de combustão) encontram-se as seguintes:

- Por cada 20 °C adicionais que são retirados aos gases de saída, a eficiência da caldeira aumenta em 1 %;
- O ar aquecido pode ser utilizado na secagem de combustível, nomeadamente se este se tratar de carvão ou matéria orgânica (biomassa), ou ser utilizado como ar de combustão;
- O pré-aquecimento permite ter caldeiras mais pequenas.

No entanto, algumas desvantagens práticas ocorrem também, entre as quais:

- A permuta de calor entre gases e ar é pouco eficiente, requerendo grandes áreas de permuta;
- A queda de pressão adicional que se verifica nos gases de combustão pode ser significativa, o que implica um aumento da pressão a fornecer pelo ventilador de extração;
- A utilização de ar mais quente, transportando menos oxigénio por unidade de volume que o ar que não é aquecido, requer uma adaptação/readaptação dos queimadores.

4.2.10 Medidas de controlo e manutenção

Para o bom funcionamento de uma caldeira, devem ser executadas as seguintes operações:

- A produção de vapor na caldeira deve ser medida, direta ou indiretamente, medindo-se o total da água de alimentação e calculando as quantidades perdidas nas descargas de fundo da caldeira. A relação vapor-combustível é a melhor medida de eficiência da caldeira e deve ser mantida a um nível elevado;
- Um registo permanente da eficiência da caldeira deve ser mantido de modo que os sinais de mau funcionamento possam ser detetados com antecedência;
- Os contadores de vapor devem ser examinados periodicamente, pois deterioram-se com o tempo. Se a pressão de operação for alterada, o contador deverá ser recalibrado ou, alternativamente, as leituras realizadas devem ser corrigidas;

- O sistema de tubagem deve ser vistoriado regularmente;
- As tubagens fora de uso devem ser isoladas ou retiradas se redundantes;
- O cálculo do consumo e do fornecimento de energia à casa das caldeiras deve ser o mais realista possível;
- A manutenção da casa de caldeiras deve ser revista, principalmente no que diz respeito ao equipamento de combustão, ao controlo e aos instrumentos. Deve adotar-se uma rotina de verificação regular;
- A limpeza periódica das superfícies de transferência de calor ou dos tubos de fumo deve ser mantida;
- O estado das alvenarias e do sistema de exaustão das caldeiras deve ser verificado periodicamente;
- As canalizações subterrâneas de exaustão devem ser inspecionadas com vista a possíveis infiltrações de água, especialmente em instalações de caldeiras mais antigas;
- As fugas de vapor e de ar comprimido devem ser prontamente reparadas de modo a evitar desperdícios de energia e potenciais acidentes.

4.2.11 Minimização de perdas em ciclos curtos de funcionamento das caldeiras

Este ponto tem importância quando a caldeira estiver sobredimensionada, ou seja a funcionar a 25% da sua capacidade nominal ou menos) e/ou a funcionar apenas ocasionalmente. Estas perdas energéticas podem ser minimizadas através da substituição de uma caldeira por duas outras mais pequenas, podendo estar apenas uma em *stand-by*.

4.3 SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE FRIO INDUSTRIAL

Os sistemas de refrigeração são cada vez mais utilizados em Portugal, principalmente no acondicionamento alimentar (p. ex., carnes, vegetais e frutas), para além de constituírem a componente de frio dos sistemas de ar condicionado, atualmente em forte expansão. Estes sistemas são caracterizados por um elevado consumo energético resultando em custos de operação elevados.

Os equipamentos de refrigeração devem ser concebidos de modo a que possam funcionar em condições variadas, de acordo com as exigências dos produtos a acondicionar, devendo funcionar eficientemente do ponto de vista energético, levando a uma redução dos custos de operação.

A Figura 4.5 apresenta um esquema de um circuito de refrigeração por compressão de vapor.

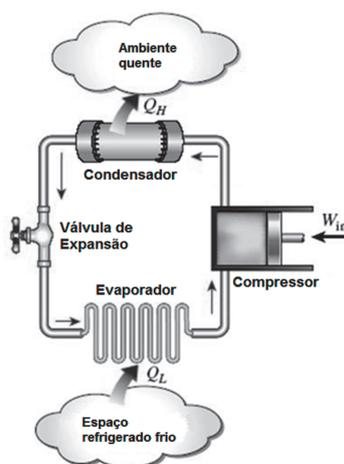


Figura 4.5 - Esquema de um ciclo de refrigeração [35]

Os principais componentes de um sistema de refrigeração são:

Compressor – O vapor à saída do evaporador é comprimido até à pressão do condensador, para que o condensador funcione de forma eficiente;

Condensador – O vapor comprimido arrefece e condensa;

Válvula de expansão – O condensado é expandido, arrefecendo significativamente, devido ao efeito Joule-Tomson;

Evaporador – O refrigerante a baixa temperatura evapora retirando calor, obtendo-se o efeito de arrefecimento local.

A maior parte da refrigeração industrial é efetuada através de sistemas de refrigeração por compressão mecânica. Em alguns casos, são usados sistemas de refrigeração por absorção.



Os sistemas de refrigeração consomem elevadas quantidades de eletricidade podendo ser responsáveis por 85% do consumo total de energia, dependendo do setor industrial [28].

4.3.1 Sistemas alternativos para a produção de frio

A aplicação de novos sistemas de refrigeração inclui a utilização de:

- Bombas de calor de absorção;
- Novos fluidos criogénicos (p. ex., amoníaco, CO₂);
- Acumulação térmica de frio através de energia latente.

A definição das limitações do sistema de refrigeração que se encontra instalado numa dada fábrica é um ponto crucial, para a obtenção da solução que mais contribui para o aumento da eficiência energética.



- A otimização dos processos de refrigeração reduz 15 a 40 % no consumo de energia.
- A melhoria de práticas de operação tende a reduzir, no mínimo, 15% dos custos energéticos.

4.3.1.1 Melhorar a eficiência de um sistema já instalado

Muitas vezes um sistema de refrigeração é ineficiente porque opera em condições diferentes daquelas para as quais foi dimensionado. Assim, é possível melhorar o sistema de refrigeração através de [36]:

- Revisão das necessidades de refrigeração;
- Revisão da instalação;
- Alteração do sistema de distribuição do refrigerante;
- Controlo da fábrica e *set-points*;
- Otimização da manutenção.

É bastante importante identificar no processo que etapas são críticas para o consumo de frio, bem como se é possível agrupar essas etapas, de modo a facilitar a operação do sistema. Uma instalação de refrigeração pode ter muitos problemas, tais como:

- Tubagens mal colocadas e não isoladas;
- Permutadores de calor inadequados;
- Má instalação de equipamentos;
- Infiltração de ar.

Outro aspeto importante é a quantidade de produção de frio industrial, isto é, convém que a oferta (quantidade produzida pelo sistema refrigerante) seja, o mais possível, próxima da procura (quantidade necessária para o bom funcionamento da instalação). Caso contrário a instalação encontra-se a produzir excesso de fluido refrigerante, que, ao não ser utilizado de forma útil no processo, é classificado como uma perda e prejuízo.

Desta forma, a carga de frio está diretamente relacionada com a melhoria da eficiência do sistema de refrigeração. Por exemplo, se a temperatura de um produto ao chegar ao sistema de refrigeração for superior à desejada, vai trazer consequências. Uma possível solução seria aumentar a carga de frio para o produto sair do sistema de refrigeração com a especificação pretendida. Esta solução não será a mais eficiente, pois se a anomalia se verifica antes do sistema de refrigeração, deve-se atuar no equipamento responsável pelo aumento da temperatura do produto [37].

A falta de isolamento ou a existência de falhas conduz à absorção de calor vindo do exterior através das tubagens, o que vai proporcionar efeitos negativos na funcionalidade do sistema de refrigeração. Por exemplo, se o sistema está a aumentar a sua energia, quer dizer que a temperatura do evaporador é superior à necessária, portanto o consumo de energia no compressor irá aumentar.

Outro aspeto importante é o sistema de distribuição. Toda a energia envolvida para o bombeamento do fluido refrigerante pelo sistema pode contribuir para um gasto ineficiente de energia. É importante que a bomba esteja pronta para operar para cargas de fluido refrigerante diferentes. Em sistemas de bombas com cargas de fluido variáveis é comum usar bombas com variadores eletrónicos de velocidade (VEV). A Tabela 4.1 indica as possíveis poupanças com a utilização de VEV para motores de 5,5 kW e 18,5 kW, que operam 8000 horas por ano.

Tabela 4.1 - Poupanças resultantes da instalação de VEV [36], operando 8000 h/ano

	Motor 5,5 kW sem VEV	Motor 5,5 kW com VEV	Motor 18,5 kW sem VEV	Motor 18,5 kW com VEV
Energia (kWh/ano)	44.000	35.200	148.000	118.400
Custo (\$/ano)	4400	3520	14.800	11.840
Poupança (\$/ano)	-	880	-	2960
Custo VEV (\$)	-	1295	-	3460
Payback (anos)	-	1,5	-	1,2



A utilização de bombas com VEV resulta numa redução do consumo de energia de 20%.

Todo o sistema de refrigeração deve estar bem controlado, para um melhor entendimento sobre como o sistema está a operar. Um sistema de controlo eficiente e fidedigno pode ajudar numa rápida atuação sobre qualquer problema que ocorra com o condensador, compressor e evaporador.

A manutenção do sistema também é de extrema importância. Para evitar uma reduzida transferência de calor, o operador deve ser capaz de efetuar testes de desempenho, tal como é recomendado pelos fabricantes [37].

As falhas no compressor podem por vezes ser difíceis de identificar, embora estejam relacionadas com falhas mecânicas ou com bloqueios internos. Os níveis de óleo e fugas devem ser verificados [37].

Falhas com as válvulas de expansão, estão geralmente relacionadas com o facto de estas abrirem ou fecharem quando não devem, aumentando a pressão à entrada do compressor.

Monitorizar a temperatura ótima do condensador é bastante importante para tornar eficiente a operação. Os problemas relacionados com o condensador são devido a uma transferência de calor pobre. A presença de ar e não-condensáveis no fluido refrigerante vão aumentar a temperatura de condensação e diminuir a eficiência [37].

A Tabela 4.2 apresenta um resumo do impacto de cada medida na eficiência energética do sistema de refrigeração.

Tabela 4.2 - Resumo das economias por abordagem

	Economia (%)
Válvulas de expansão eletrónicas	20 (energia)
Motores com VEV	20
Evaporador com VEV	2 – 3 (custo do sistema de refrigeração)
Substituição do sistema com mais de 10 anos	30 – 40
Seleção do refrigerante	3 – 10
Redução do ΔT <small>ciclo refrigeração</small>	3 – 4 (por °C reduzido)

Em vez de um motor elétrico, é possível utilizar um motor a gasolina para transmitir energia mecânica ao compressor de um sistema de refrigeração. Este sistema já foi testado na produção de gelo, na indústria alimentar e na indústria química. Além disso, um sistema de refrigeração com motor a gasolina pode ter um refrigerador de absorção (*absorption chiller*) acoplado.

- 

A utilização de um motor a gasolina permite poupar até 52% do consumo de energia primária inicial. Acoplado com um refrigerador de absorção essa economia pode atingir os 77%.
- 

O motor a gasolina aumenta as emissões de NO_x , podendo implicar a implementação de medidas extra para a diminuição dessas emissões.
- 

Os sistemas com e sem refrigeração de absorção necessitam de investimentos consideráveis, tendo períodos de *payback* que atingem os 4 anos e os 2 anos, respetivamente.

4.3.1.2 Seleção de equipamentos

Geralmente, o compressor é o grande consumidor de energia no sistema de refrigeração, tornando-se importante escolher o compressor adequado à carga.

Tabela 4.3 - Valores típicos de eficiência de compressores

	Eficiência (kWe/kWr)	COP
Recíproco	0,27 - 0,29	3,5
Centrífugo	0,18 - 0,22	5
Centrífugo (com VEV)	0,09 - 0,17	5,5 - 10
Parafuso	65 - 75	-

O condensador e o evaporador devem ser dimensionados de forma a obter a menor temperatura de condensação (origina menor consumo de energia) e a maior temperatura de evaporação.

A diferença entre a temperatura de evaporação e condensação está diretamente relacionada com o coeficiente de desempenho do sistema de refrigeração. O coeficiente de performance do sistema de refrigeração (COP) fornece o valor de frio que se consegue produzir em função do valor de energia gasta para o produzir.

O COP será tanto maior quando menor for a diferença entre a temperatura do evaporador e a do condensador ($\Delta T_{\text{ciclo refrigeração}}$).

O dimensionamento do evaporador deve ser feito para cada processo específico, de modo a minimizar todas as perdas que estão associadas a este tipo de equipamento.

4.3.2 Termoacumulação ou armazenamento de energia térmica

A termoacumulação é uma tecnologia “antiga” que tem vindo a ser redescoberta para aplicações industriais (p. ex., indústria alimentar). Esta tecnologia permite a produção de gelo nos períodos em que a eletricidade é mais barata (períodos de vazio) e o armazenamento do gelo em *ice ponds*, até que este possa ser utilizado para refrigeração. Com sistemas de armazenamento de energia térmica é possível responder às necessidades dos vários setores – comercial, industrial e utilidades – em aplicações como aquecimento de espaços e águas domésticas, refrigeração e ar condicionado [38].

A acumulação de energia térmica é um princípio de conservação temporária de energia para posterior utilização. Alguns exemplos de sistemas de armazenamento de energia térmica são:

- Acumulação de energia solar para utilização noturna;
- Armazenamento de frio no inverno para o arrefecimento na época do verão;
- Armazenamento de calor no verão para o aquecimento de espaços no inverno;
- Armazenamento nas horas de baixas tarifas de eletricidade (refrigeradores a funcionar durante a noite para depois o fluido refrigerante ser utilizado na rede industrial somente quando existir procura).

Na Figura 4.6 encontram-se esquematizados os dois tipos de armazenamento de energia térmica. Existem duas vertentes de calor armazenado: calor sensível e calor latente.

O processo de armazenamento de energia térmica pode ser obtido por arrefecimento ou aquecimento de uma substância

(calor sensível), ou por mudança de fase desta, quer por fusão ou vaporização (calor latente), ficando a energia disponível aquando da ocorrência do processo inverso. Se o armazenamento for feito através do aumento ou diminuição da temperatura do material é denominado armazenamento de calor sensível [38].



Figura 4.6 - Tipos de armazenamento de energia térmica

Outra característica que distingue os diferentes sistemas de armazenamento de energia térmica é a duração de armazenamento: curta, média ou longa.

O armazenamento por um curto período de tempo é utilizado para resolver cargas de potência de pico, desde durações de umas horas até ao máximo de um dia, com vista à redução da dimensão dos sistemas e ao aproveitamento da estrutura diária das tarifas de energia. Este tipo de armazenamento é denominado armazenamento diurno.

O armazenamento de médio ou longo período de tempo é recomendado quando há a possibilidade do calor residual e das cargas sazonais de energia serem transferidos com um atraso desde algumas semanas até meses.

A principal característica de um sistema sazonal de armazenamento é a grande capacidade que esta solicita. As perdas térmicas revelam-se significativas nos sistemas de longo prazo, por esta razão são necessários mais cuidados para preveni-las num sistema sazonal por comparação com um sistema diurno.

Os custos associados ao tamanho e ao isolamento dos sistemas de armazenamento sazonal impedem que a maior parte destes sejam económicos.

Os sistemas de armazenamento diurnos apresentam vantagens, tais como, o capital de investimento, baixas perdas energéticas e unidades mais pequenas. Os sistemas anuais apresentam maiores dimensões, embora sejam ideais para parques industriais [38].

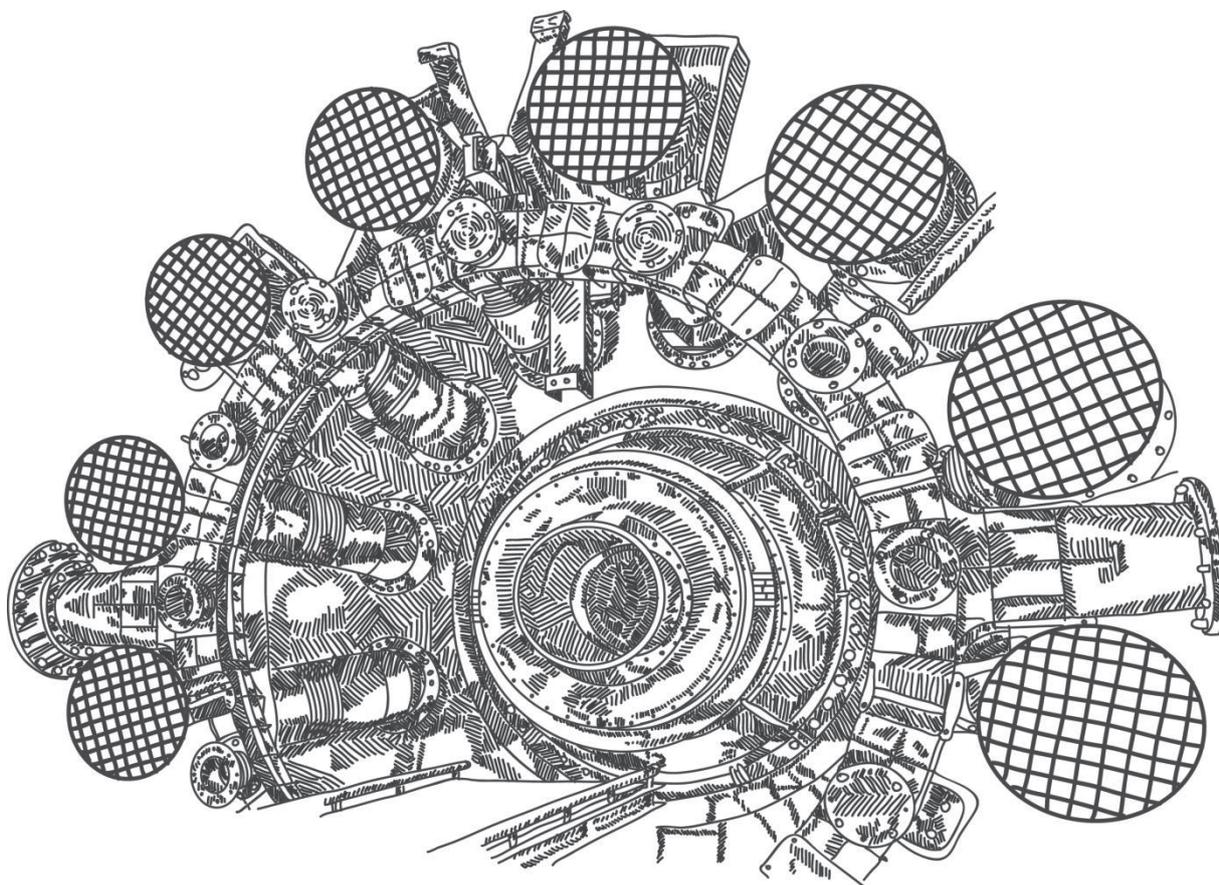
Existem já empresas que gerem, de forma centralizada em zonas restritas habitacionais e de serviços, sistemas de climatização para o aquecimento central dos edifícios, a sua refrigeração e o aquecimento das águas sanitárias destes.

As centrais podem funcionar com um sistema de trigeriação, isto é, a partir da mesma fonte energética (gás natural) produzem em simultâneo energia elétrica, calor e frio.

As principais vantagens da rede urbana de frio e calor é a redução do consumo de energia primária e das emissões de dióxido de carbono.

A distribuição da energia térmica é efetuada com água arrefecida ou aquecida e processa-se através de uma rede de tubagens. A transferência de energia entre a rede de distribuição e os edifícios é efetuada em subestações existentes nos edifícios através de permutadores de calor.

PRODUÇÃO COMBINADA DE ENERGIA MECÂNICA E ELÉTRICA



5.

5. PRODUÇÃO COMBINADA DE ENERGIA MECÂNICA E ELÉTRICA

A produção combinada de energia mecânica e elétrica é habitualmente conhecida por sistema de cogeração e tem como objetivo principal a utilização mais eficiente da energia primária utilizada. Os diferentes sistemas baseados na queima de combustível (fóssil ou não fóssil) podem incluir a produção de energia elétrica usando unicamente turbinas a gás ou a vapor, ou então através de um ciclo combinado. Atualmente estão a cair em desuso os sistemas de motor de combustão interna. A utilização da componente térmica destes sistemas pode ser feita diretamente por vapor, fluido térmico ou água quente. Estes sistemas podem ainda aparecer numa configuração de trieração, onde é possível, para além da produção de energia elétrica, obter a produção simultânea de frio e calor usando habitualmente os denominados *chillers* de absorção.

5.1 SISTEMAS DE COGERAÇÃO

A cogeração é a produção sequencial e conjunta de energia térmica e energia mecânica, que normalmente é usada na produção de eletricidade, num sistema único integrado a partir de uma fonte de energia primária. A cogeração pode ser usada na indústria, comércio ou serviços, mas para que uma unidade de cogeração seja viável, a eficiência global em termos do aproveitamento da energia primária deve ser superior à de uma central de ciclo combinado convencional.

Numa unidade de geração termoelétrica, a queima de combustível fóssil produz vapor a alta temperatura e pressão, que seguidamente é direcionado para uma turbina que gera energia mecânica e subsequentemente a converte em energia elétrica. A maioria das centrais termoelétricas convencionais tem rendimentos inferiores a 40%, como se encontra esquematizado pela Figura 5.1 [39].



Figura 5.1- Rendimento típico de uma unidade convencional de geração de energia elétrica

Numa central termoelétrica de ciclo combinado, o aproveitamento da energia do combustível (primária) é no máximo de 60%.

Nas centrais termoelétricas convencionais, a energia térmica não aproveitada perde-se na sua maior parte através dos gases de combustão que saem pela chaminé, e perde-se também nas operações de condensação e arrefecimento do ciclo termodinâmico. A cogeração, através do aproveitamento de uma parte importante da energia térmica que normalmente é

perdida nas unidades convencionais, aumenta a eficiência energética global do processo, como se pode verificar pela Figura 5.2.



Figura 5.2 - Rendimento típico de uma unidade de cogeração

Quando se passa da produção independente de calor e de eletricidade para a cogeração, o aumento significativo da eficiência energética que se verifica conduz a uma diminuição do consumo global de combustível (p. ex., petróleo, gás natural, carvão, biomassa) e a uma redução das emissões de gases poluentes, relativamente à energia total utilizada. Ao contrário das técnicas tradicionais de controlo de poluição que atuam somente no tratamento dos gases de combustão, a cogeração reduz as emissões de gases poluentes através da prevenção, não afetando a produção de energia e a eficiência do processo [25].

Num plano teórico todos os combustíveis podem ser usados como matéria-prima para unidades de cogeração. Dos combustíveis fósseis, o gás natural (GN) é o que predomina, por ser o mais fácil de aplicar tecnologicamente e também pelo facto de ser um dos menos nocivos para o ambiente. As unidades de cogeração podem ser concebidas de modo a que seja possível a utilização de diferentes tipos de combustível. Esta opção permite a escolha e utilização do combustível mais barato em cada momento.

5.

Ao nível industrial, os principais benefícios da cogeração são:

- Redução da fatura energética por unidade da energia efetivamente consumida;
- Possibilidade de a unidade industrial ser energeticamente autossuficiente;
- Possibilidade de venda de eletricidade à rede de distribuição nacional caso haja produção excedente de energia elétrica;
- Redução dos custos de produção;
- Melhorias no fornecimento e distribuição da eletricidade aos processos industriais.

Atualmente existem unidades de cogeração preparadas para gerar energia com potências elétricas que variam entre 1 kW e 500 MW durante um período mínimo de 20 anos. Os projetos mais eficientes, do ponto de vista energético, são aqueles que conseguem satisfazer na totalidade as exigências térmicas das instalações industriais adjacentes. Se originar um excesso na produção de energia elétrica, este excesso pode ser injetado na rede elétrica nacional. É de grande importância quantificar a energia elétrica e térmica necessária para a unidade industrial, pois é desta forma que se seleciona a melhor tecnologia.

As tecnologias mais utilizadas em cogeração são: turbinas a vapor, turbinas a gás, ciclos combinados e motores de combustão interna. Estas e outras tecnologias mais recentes são abordadas em seguida.

5.1.1 Cogeração com turbina a vapor

Na Figura 5.3 encontra-se esquematizada uma unidade de cogeração com turbina a vapor. A produção de energia elétrica depende do nível de redução da pressão de vapor que passa através da turbina antes de este ser usado como energia térmica. Estas unidades são usadas principalmente em instalações onde as necessidades de energia térmica são pelo menos quatro vezes superiores às necessidades de energia elétrica.

As condições típicas de valor de entrada na turbina são de 42 bar e 600 °C ou de 63 bar e 480 °C, ao passo que a saída depende das condições de operação do sistema de turbinagem ou das necessidades de energia térmica do processo.

Existem três tipos de turbinas a vapor:

- **Turbinas de contrapressão** – o vapor que abandona a turbina é enviado diretamente para o processo industrial em condições próximas das que são requeridas. Denomina-se contrapressão porque o vapor é rejeitado a pressões da ordem de grandeza da pressão atmosférica, portanto superiores ao vácuo do condensador;
- **Turbinas de condensação** – em que o vapor após ser expandido na turbina é rejeitado (a baixa pressão) para um condensador de vácuo, onde se processa a condensação do vapor, sendo o condensado bombeado de novo à caldeira para reinício do ciclo. Este tipo de turbina não é a mais adequada para sistemas de cogeração, uma vez que o seu dimensionamento é feito com o intuito de otimizar o rendimento da conversão em energia elétrica;
- **Turbinas de extração** – um misto dos dois tipos anteriores, permitindo que uma parte do vapor seja enviado para o processo industrial, a uma pressão intermédia, enquanto o remanescente é condensado.

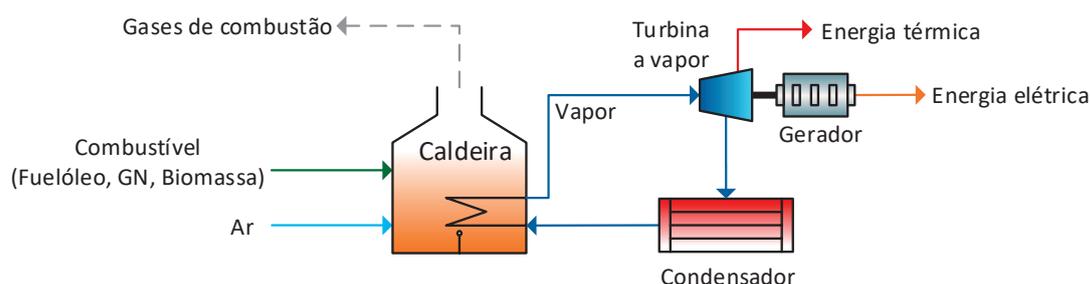


Figura 5.3 - Esquema de cogeração com turbina a vapor de extração

5.1.2 Cogeração com turbina a gás

A cogeração com turbina a gás é adequada para os processos em que se requer uma grande quantidade de energia térmica, ou rácios calor/eletricidade maiores que 2.

As turbinas a gás são as mais usadas para gerar energia elétrica em grande escala, gerando potências elétricas entre 1 e 100 MW. O seu custo é inferior ao das turbinas a vapor, além de possuírem uma instalação mais simples e ocuparem menos espaço.

Na cogeração com turbina a gás, como está esquematizado na Figura 5.4, o compressor é responsável pela produção de ar comprimido a alta pressão que alimenta uma câmara de combustão onde também é injetado o combustível. Da combustão resultam gases a elevada temperatura (900 – 1200 °C) e pressão, que depois alimentam a turbina onde são expandidos para gerar energia mecânica. Esta energia é em seguida transformada em eletricidade através de um gerador que se encontra ligado à turbina. Os gases à saída da turbina encontram-se a uma temperatura entre 450 e 550 °C, e a energia contida nesses gases é usada consoante as necessidades térmicas da instalação. Caso seja necessária uma maior quantidade

de calor, pode ser colocada outra câmara de combustão entre a turbina e o recuperador de calor, com a qual se pode elevar a temperatura dos gases até 1000 °C.

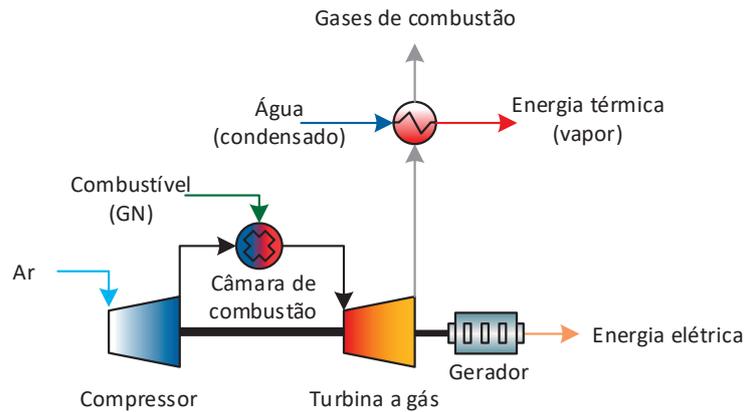


Figura 5.4 - Esquema de cogeração com turbina a gás

Neste tipo de cogeração, a pureza dos gases de entrada (combustível e ar) é de extrema importância pois não podem conter poluentes que levem à corrosão das tubagens e equipamentos. Esta é uma das principais razões pelo qual o gás natural é o tipo de combustível mais utilizado numa cogeração com turbina a gás.

5.1.3 Cogeração com ciclo combinado

A cogeração com ciclo combinado, apresentada na Figura 5.5, é a mais indicada para alimentar sistemas que requerem grandes quantidades de energia elétrica, sendo especialmente indicada para sistemas que necessitam de rácios eletricidade/calor superiores a 6.

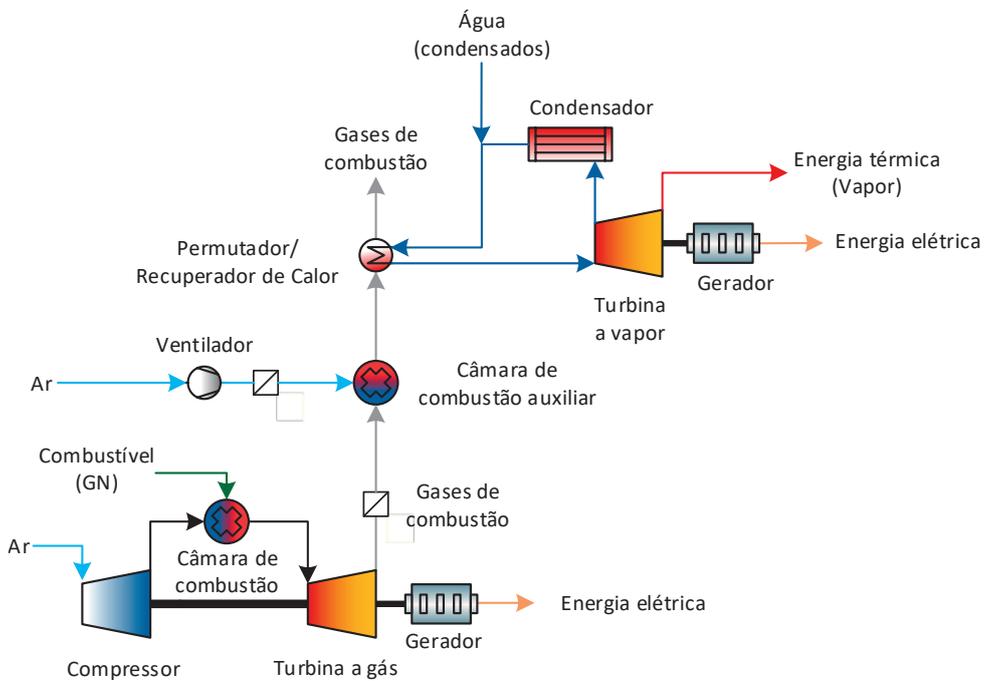


Figura 5.5 - Esquema de cogeração de ciclo combinado

Uma unidade de cogeração de ciclo combinado faz uso de uma turbina a gás e outra a vapor. Os gases de saída da turbina têm uma temperatura de cerca de 500 °C e, devido a essa temperatura elevada, estes gases são usados numa caldeira de recuperação de calor para produzir vapor que vai alimentar a turbina a vapor. As duas turbinas encontram-se associadas a geradores que produzem energia elétrica.

5.1.4 Cogeração com motor alternativo de combustão interna

As unidades de cogeração que utilizam motores alternativos de combustão interna, embora tenham como principal vantagem a obtenção de uma maior eficiência elétrica, apresentam dificuldades no uso da energia térmica, pois parte desta encontra-se a temperaturas mais baixas.

5.1.5 Utilização de microturbinas e outras novas tecnologias

As tecnologias descritas anteriormente apresentam eficiências baixas quando utilizadas em unidades de cogeração pequenas, i.e., unidades com potências elétricas menores que 1 MW. Atualmente estão a ser desenvolvidas microturbinas que geram potências elétricas entre 30 e 350 kW e que são mais eficientes nesta gama de baixa potência [39]. Estas microturbinas apresentam custos de projeto e manutenção menores e baixos níveis de emissões de óxidos de azoto (NO_x).

Tabela 5.1 - Eficiências parciais e globais de vários tipos de cogeração

Cogeração com:	Eficiência Elétrica (%)	Eficiência Térmica (%)	Eficiência Total (%)
Turbina a vapor	33	52	85
Turbina a gás	38	47	85
Ciclo combinado	57	33	90
Motor alternativo	40	30	70
Microturbinas	30	50	80

5.2 SISTEMAS DE TRIGERAÇÃO

A trigerção é um processo que converte a energia primária em três tipos de energia útil: eletricidade, água quente ou vapor e água refrigerada, sendo bastante vantajoso quando estas três formas de energias são necessárias de uma forma permanente. Num sistema de trigerção o sistema de cogeração está ligado a um *chiller* (refrigerador) que pode funcionar por compressão ou por absorção.

Os *chillers* de compressão necessitam de energia elétrica para alimentação do compressor do ciclo de refrigeração, enquanto os *chillers* de absorção utilizam o calor (água quente, vapor, gases de combustão) gerado no processo de cogeração para produzir frio. Os *chillers* de absorção são os mais utilizados, e dentro deles, os mais usuais baseiam-se em ciclos de evaporação e de condensação de uma solução concentrada de brometo de lítio, como se mostra na Figura 5.6.

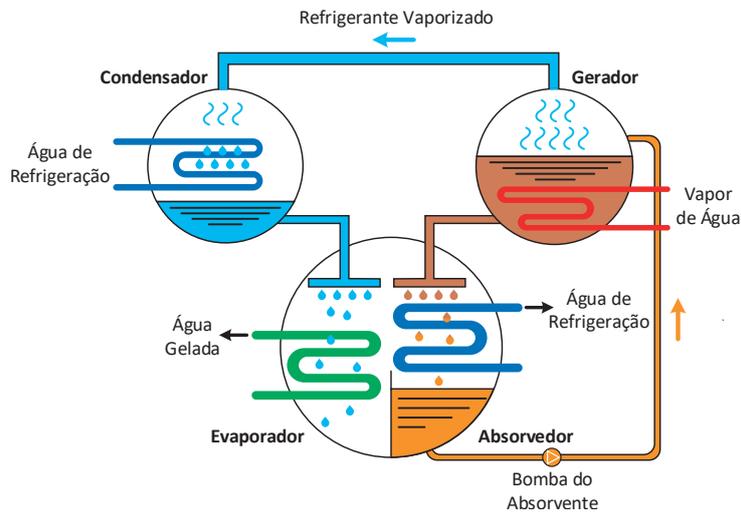


Figura 5.6 - Esquema de um chiller de absorção

Num sistema de refrigeração de absorção de água/brometo de lítio, a água é usada como refrigerante enquanto o brometo de lítio é usado como absorvente. No absorvedor, o brometo de lítio absorve a água, formando uma solução de água e brometo de lítio. Esta solução é bombeada para o gerador, onde a solução é aquecida. A água é vaporizada e tem como destino o condensador onde irá ser arrefecida, enquanto o brometo de lítio volta para o absorvedor, onde posteriormente irá absorver mais água que vem do evaporador.

Existem algumas condições críticas para o uso de sistema de refrigeração com água e brometo de lítio:

- O brometo de lítio tem grande afinidade com o vapor de água, no entanto quando a solução água-brometo de lítio é formada, não são completamente solúveis um no outro nas condições de operação do sistema de refrigeração. Por este motivo, o *design* do sistema deve ser feito para evitar a cristalização e precipitação do brometo de lítio;
- Dado que a água é usada como refrigerante, isso significa que a pressão do condensador e do evaporador deve ser baixa. A própria diferença de pressões entre condensador e evaporador deve ser bastante baixa.

No exemplo da Figura 5.7, encontra-se esquematizado uma unidade comum de trigeração, com um refrigerador de absorção (o calor útil produzido alimenta um *chiller* de absorção para a produção de frio).

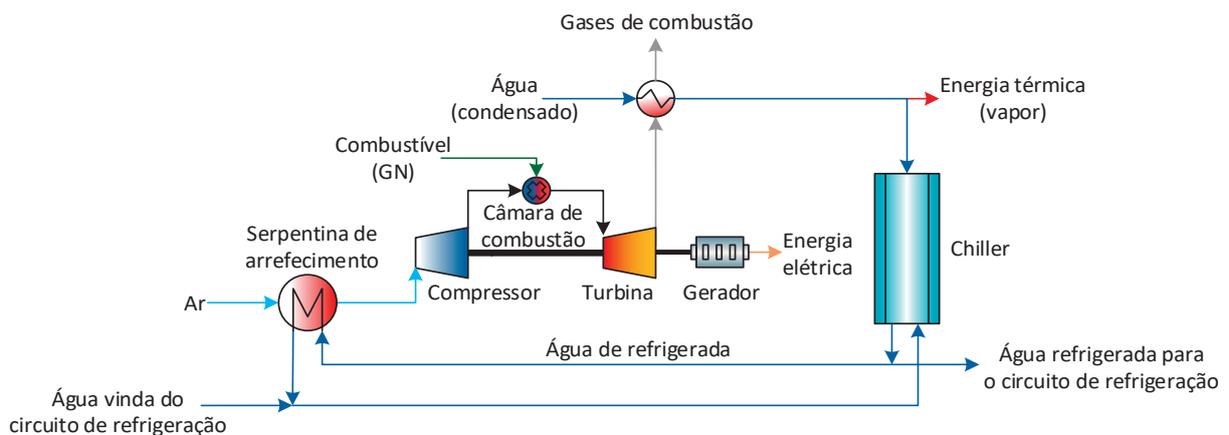


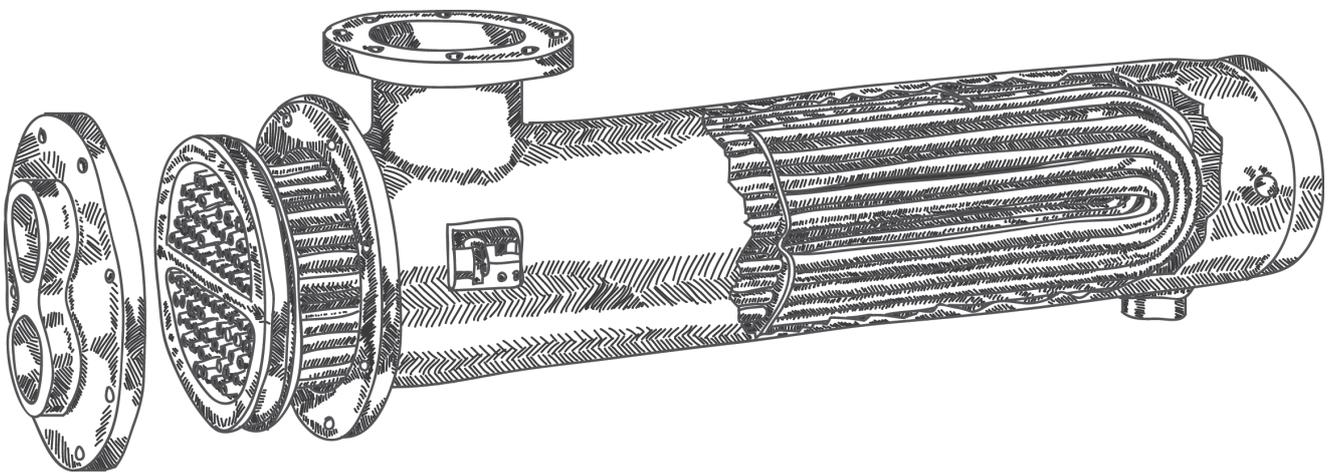
Figura 5.7 - Esquema de trigeração com refrigerador (chiller) de absorção

O sistema de trigeriação necessita de estar localizado perto do consumo de água refrigerada (*chillers*) e da corrente quente aí utilizada.

A central térmica localizada perto do consumo de água quente e fria, leva a menores perdas na distribuição de vapor. O modo de trigeriação consiste em acrescentar a unidade de *chiller* à cogeração. Numa primeira análise, não existe uma vantagem para o investimento extra se todo o calor recuperado puder ser utilizado de modo eficiente durante o período de operação da central.

No entanto, este investimento extra começa a ser vantajoso nos períodos em que o calor não pode ser usado ou quando não se verifica procura de calor, mas antes de água fria ou de ar frio. Por exemplo, os sistemas de trigeriação são bastante comuns para a ventilação de edifícios, para o aquecimento do espaço no inverno e arrefecimento durante o verão, ou para o aquecimento de uma zona e arrefecimento de outra.

RECUPERAÇÃO DE CALOR



6.

6. RECUPERAÇÃO DE CALOR

A recuperação de calor é uma das ferramentas no âmbito da engenharia de processos que permite uma redução significativa no consumo de energia no setor industrial. A recuperação de calor tem como principal objetivo aproveitar, da melhor forma possível, o excesso de calor das correntes do processo que tenham um nível térmico superior ao que é requerido para ser usado em zonas deficitárias.

A recuperação do excesso de calor pode ser obtida a partir de várias fontes:

- Gases de combustão;
- Efluentes quentes ou frios;
- Ar de exaustão;
- Água de arrefecimento e óleo hidráulico;
- Calor de sobreaquecimento e de condensação rejeitados dos processos de refrigeração;
- Correntes do processo que necessitem de ser arrefecidas.

As tecnologias mais comuns para o aproveitamento deste calor são:

- Uso direto, por exemplo, dos gases de combustão nos permutadores de calor;
- Utilização de bombas de calor e recompressão de vapor, que transformam o calor de modo a gerar energia mais útil ao processo promovendo o aumento da temperatura inicial;
- Recurso a operações multi-estágio, tais como evaporadores multi-efeito, expansão de vapor e combinações das técnicas acima mencionadas.

Metodologias de Integração de Processos podem ser utilizadas para uma melhor identificação dos potenciais energéticos existentes no conjunto do processo, encontrando a melhor configuração possível para a permuta entre correntes e as melhores condições de operação do processo que conduzam ao consumo mínimo de energia primária externa.

6.1 PERMUTADORES DE CALOR

Um permutador de calor permite a recuperação direta de calor, ou seja a transferência de calor entre dois fluidos através de uma superfície sólida. A transferência de calor ocorre por convecção e condução, fluindo o calor naturalmente das temperaturas mais elevadas (fonte de calor) para as zonas com temperaturas mais baixas (destino de calor).

A escolha do tipo de permutador e dos diferentes materiais de construção deve ter em atenção a gama de temperaturas de operação e as propriedades físicas dos fluidos envolvidos na transferência de calor.

Devido ao seu *design*, os permutadores de caixa e tubos com *pitch* triangular que utilizem vapor *flash* impuro do lado da caixa, podem ter graves problemas devido ao depósito de sólidos. Se o vapor arrastar consigo gotículas de líquido e espumas que contenham quantidades apreciáveis de sólidos dissolvidos, estes terão tendência a depositarem-se na superfície exterior dos tubos que se situam perto da entrada de vapor na caixa. Este fenómeno diminui a eficiência energética do permutador, dificulta a sua limpeza, podendo mesmo levar à inutilização deste. Uma das soluções poderá ser a alteração para um *pitch* quadrangular e mais largo.

6.1.1 Manutenção

Devido à sua importância na maioria dos processos industriais, uma manutenção eficaz dos permutadores de calor é imprescindível. Não existindo uma limpeza regular das paredes do permutador, a formação de incrustações e detritos vai diminuir a eficiência da transferência de calor ou dar origem à falha do equipamento.

Para manter a performance dos permutadores de calor recomenda-se [40]:

- Aumentar ocasionalmente a velocidade de escoamento;
- Executar uma limpeza com jato de alta pressão;
- Incluir ciclos de limpeza programados;
- Realizar limpezas *in situ* e profundas "até ao metal";
- Incluir a limpeza das superfícies externas (casco, espelhos, chicanas, etc.);
- Usar as ferramentas apropriadas de acordo com o tipo de sujidade;
- Não aceitar métodos de limpeza *standard*.

No caso de estarem sujeitos a uma limpeza rotineira com ácido para renovar a superfície interna dos tubos e recuperar a eficiência do processo de transferência de calor, os permutadores devem ser resistentes ao ácido (construídos geralmente em aço inoxidável), traduzindo-se numa maior durabilidade.

6.2 METODOLOGIAS DE INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS

A Integração de Processos surgiu, na década de 70 como uma área científico-tecnológica devidamente estruturada no âmbito da engenharia de processos, mas trouxe já um elevado impacto à comunidade industrial. Os benefícios da sua aplicação em vários setores industriais traduzem-se geralmente em processos mais competitivos económica e ambientalmente [41].

Uma integração significa combinar necessidades/tarefas de tipos opostos para que possam ser obtidas economias ou sinergias. Exemplos desta integração nas indústrias de processo são:

- Integração energética
 - Recuperação de calor;
 - Refrigeração e condensação integradas com aquecimento e evaporação;
 - Projeto da correspondente rede de permutadores de calor.
- Integração de potência
 - Expansão integrada com compressão;
 - Mesmo eixo ou combinado em *compander*.

➤ Integração química

- Subprodutos de uma unidade podem ser utilizados como matéria-prima em outras unidades;
- A ideia de integração de materiais é utilizada em *clusters*.

➤ Integração de equipamentos

- Várias operações unitárias (reação, separação, transferência de calor) são integradas na mesma peça de equipamentos, a isto chama-se a intensificação de processos.

O principal foco da Integração de Processos é reduzir significativamente os custos de produção, satisfazendo políticas de utilização racional de energia e de matérias-primas, bem como, a redução de efluentes e subprodutos e a minimização de emissões gasosas. Uma das áreas mais importantes da Integração de Processos é efetivamente a integração energética, que pode ser aplicada em projetos novos ou em fábricas que já se encontrem instaladas, tanto em processos simples como nos de elevada complexidade, que operem em contínuo ou em descontínuo. Existem várias metodologias de integração energética que permitem determinar os valores ótimos das variáveis de projeto que minimizem os custos globais do sistema e aproveitem ao máximo o potencial energético do processo: métodos heurísticos, estocásticos, programação matemática, análise exérgica, e a Análise do Ponto de Estrangulamento (*Pinch Analysis*). A metodologia da Análise do Ponto de Estrangulamento é apresentada neste capítulo, através da sua aplicação a um exemplo prático.

6.2.1 Conceitos básicos da Análise do Ponto de Estrangulamento

As correntes de processo podem requerer aquecimento ou arrefecimento, pelo que se impõe o uso de utilidades. Quando se recorre exclusivamente a utilidades externas ao processo, o consumo de energia é maximizado pelo que a respetiva competitividade é prejudicada.

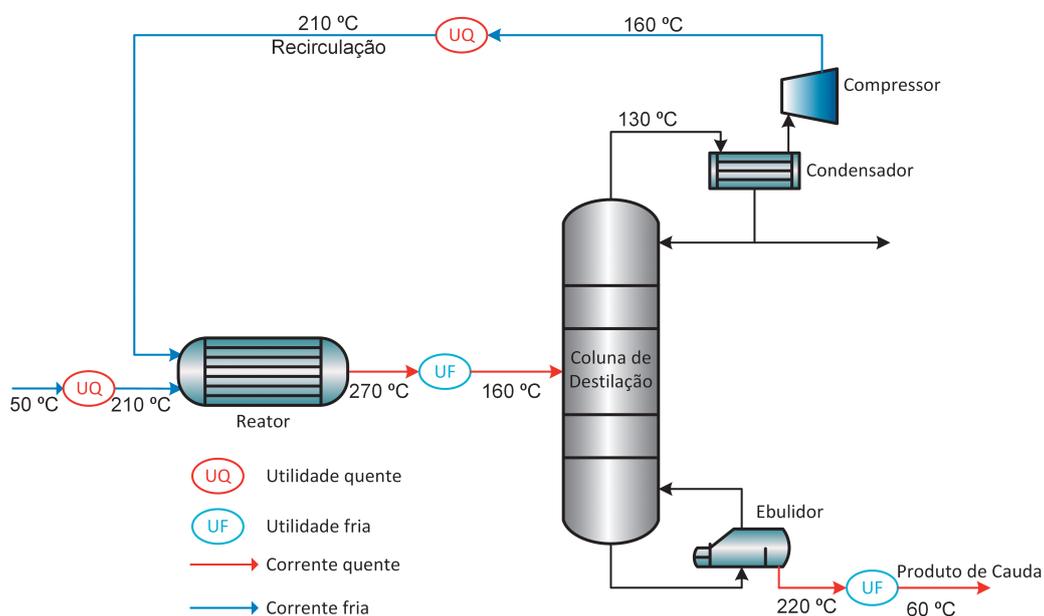


Figura 6.1- Esquema de um processo químico tipo: exemplo de aplicação

A Figura 6.1 apresenta o esquema de um exemplo de aplicação, onde são evidenciadas as correntes que utilizem, neste caso, exclusivamente utilidades exteriores ao processo. Neste esquema identificam-se quatro correntes que necessitam de aquecimento ou de arrefecimento usando utilidades exteriores. Numa primeira abordagem é necessário definir alguns conceitos básicos:

- > Correntes frias – Estas correntes recebem calor porque a sua temperatura precisa de aumentar e/ou porque sofrem uma mudança de estado por absorção de calor. Estas necessidades são satisfeitas por um fluido de aquecimento, usualmente vapor de água;
- > Correntes quentes – Estas correntes cedem calor porque a sua temperatura precisa de diminuir e/ou porque sofrem uma mudança de estado por libertação de calor. Estas necessidades são satisfeitas por um fluido de arrefecimento, usualmente água de refrigeração;
- > Utilidades Externas – fluidos exteriores ao processo que permutam diretamente calor com as correntes, para fornecer ou retirar calor. Podem ser quentes (vapor de água, fluidos térmicos, gases de combustão, entre outros) ou frias (água de refrigeração, ar atmosférico, fluido de arrefecimento, entre outros);
- > ΔT_{\min} – Diferença mínima de temperatura atingida entre duas correntes que trocam calor. Num permutador de calor em contracorrente, os perfis de temperatura das correntes aproximam-se num dos extremos. Esta diferença mínima de temperaturas é estabelecida segundo critérios de projeto e tem influência nos custos de capital do processo. Se for selecionado um valor mais elevado de ΔT_{\min} , a recuperação de calor no permutador diminui, ainda que com uma menor área de transferência exigida, e a necessidade de utilidades externas aumenta. Assim, a seleção do valor de ΔT_{\min} tem implicações nos custos de capital e de energia. Valores típicos de ΔT_{\min} baseados na experiência estão disponíveis na literatura para referência e são listados na tabela seguinte.

Tabela 6.1- Valores de ΔT_{\min} típicos

Setor industrial	ΔT_{\min}
Refinarias	10-40 °C
Petroquímica	10-20 °C
Química	10-20 °C
Processos de baixa temperatura	3-5 °C

6. A Análise do Ponto de Estrangulamento, introduzida por Bodo Linnhoff, é uma metodologia de integração energética que é de fácil aplicação e que se baseia na Primeira e na Segunda Lei da Termodinâmica, permitindo analisar sistematicamente os processos químicos e os sistemas de utilidades. A Primeira Lei da Termodinâmica fornece a equação de energia para calcular as variações de entalpia nas correntes que passam através de um permutador de calor, enquanto a Segunda Lei determina a direção do fluxo de calor. Ou seja, a energia térmica só pode fluir naturalmente na direção da fonte quente para um recetor frio. Num permutador de calor, nem uma corrente quente pode ser arrefecida abaixo da temperatura de fornecimento de fluxo frio, nem uma corrente fria pode ser aquecida a uma temperatura superior à temperatura de alimentação da corrente quente. Na prática, a corrente quente só pode ser arrefecida até uma temperatura definida pela diferença de temperatura mínima permitida, ΔT_{\min} (Figura 6.2).

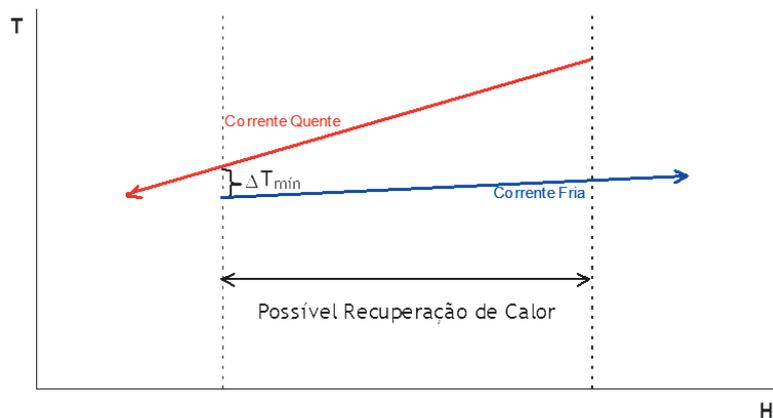


Figura 6.2 - Exemplificação esquemática do ΔT_{\min}

A integração energética por aplicação da Análise do Ponto de Estrangulamento permite reduzir o consumo de utilidades exteriores ao processo, aproveitando os excessos entálpicos de correntes (correntes quentes) para fornecer às correntes com deficiência de entalpia (correntes frias). Após a integração, as correntes do processo deixam de permutar calor exclusivamente com as utilidades externas e passam a permutar calor também entre si. A aplicação da integração energética ao processo da Figura 6.1 permite obter um novo diagrama do processo, esquematizado na Figura 6.3. Assim, o objetivo principal da análise é conseguir poupanças financeiras através de uma melhor integração do calor do processo, maximizando a recuperação do calor do processo e reduzindo as utilidades externas.

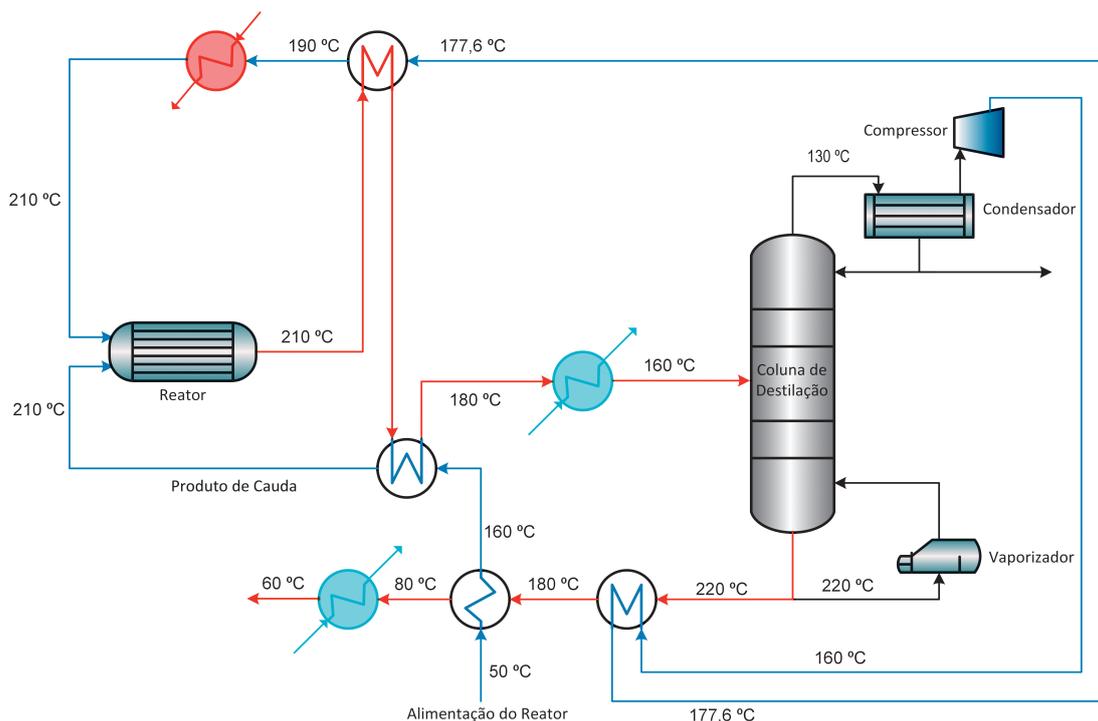


Figura 6.3 - Esquema do processo químico da Figura 6.1 com integração energética incorporada

O consumo total de energia reduz-se de 11 MW para 1,8 MW, embora este processo passe a apresentar sete permutadores de calor, em vez dos quatro existentes na Figura 6.1. No entanto, os custos globais anuais, calculados através da soma algébrica dos custos energéticos anuais e dos custos da amortização anual do investimento, apresentam uma redução de 50%.

Uma estratégia adequada para a aplicação da Integração Energética passa por quatro etapas essenciais:

- Recolha de dados e características sobre o processo e o sistema de utilidades;
- Determinação dos objetivos a alcançar de modo a maximizar o desempenho em diversos aspetos;
- Construção de uma rede de permutadores de calor;
- Simplificação da rede proposta para diferentes cenários económicos.

Existem vários *softwares* no mercado, a maioria não gratuitos, que permitem realizar estudos de Integração Energética, baseados na Análise do Ponto de Estrangulamento. Uma parceria entre o IST e a ADENE permitiu desenvolver uma ferramenta computacional livre, a FI²EPI (Ferramenta Informática para Integração Energética de Processos Industriais, em português), com versões em português e inglês. A FI²EPI é uma ferramenta que recorre à Análise de Ponto de Estrangulamento e pode ser aplicada em instalações industriais com consumo de energia térmica, possibilitando o traçado automático das curvas compostas e da curva composta global do processo. Este *software* permite ainda a construção automática da rede de permutadores de calor correspondente ao consumo de energia mínimo e fazer a sua evolução para diminuir o custo global do processo [41].

6.2.2 Condicionantes à Integração Energética

O *layout* da unidade fabril pode impossibilitar algumas trocas de calor por envolver correntes que se distanciam bastante fisicamente, traduzindo-se em elevados custos de tubagem e bombagem, entre outros.

A segurança é também um fator a ter em consideração quando a troca de calor é efetuada entre correntes quimicamente incompatíveis, ou sempre que a corrente contenha produtos altamente poluentes ou perigosos.

A pureza do produto final pode eventualmente ficar comprometida se a operação final de purificação ficar sujeita a permuta de calor entre correntes, o que de alguma forma dificulta o controlo das condições operatórias que nesta unidade são mais exigentes, e pode também gerar potencialmente alguma contaminação.

Questões operatórias que possam estar em causa no arranque ou paragem da unidade poderão também ser condicionantes de certos cenários, bem como o controlo e a flexibilidade do próprio processo.

6.3 BOMBAS DE CALOR

A importância das bombas de calor para o aumento de eficiência e a redução de emissões tem sido crescente. Os mercados estão em expansão constante, mas em muitos países o foco é essencialmente no setor residencial para a regulação da temperatura ambiente ou para a distribuição de água quente [42].

As bombas de calor industriais (BCI's), cada vez mais utilizadas, usam o calor residual do processo como fonte de calor, promovendo-o a uma temperatura superior, de tal forma que permita a sua utilização noutra local do processo, para aquecimento ou pré-aquecimento. Esta tecnologia tem como vantagem a redução significativa do consumo de combustíveis fósseis e da emissão de gases de efeito de estufa, por exemplo em processos de secagem, lavagem, evaporação, destilação e aquecimento e refrigeração de edifícios industriais e comerciais. As indústrias que podem beneficiar da implementação de bombas de calor incluem o processamento de alimentos e bebidas, produtos florestais, têxteis e químicos.

A implementação de bombas de calor industriais apresenta alguns problemas, como:

- Falta de refrigerantes no intervalo de temperatura pretendido;
- Tecnologia e equipamentos ainda pouco acessíveis e divulgados junto dos potenciais utilizadores;
- Incerteza na fiabilidade, por parte dos possíveis utilizadores.

No entanto, as BCI's apresentam vantagens muito relevantes quando comparadas com as bombas de calor para aquecimento de espaços:

- > Elevados coeficientes de desempenho (COP - *coeficiente of performance*);
- > Elevada duração de operação;
- > Baixo custo de investimento, devido à curta distância entre a origem de calor e destino;
- > Procura de calor e produção de calor residual em simultâneo.

6.3.1 Conceitos termodinâmicos

As bombas de calor usam energia externa para realizar trabalho de forma a efetuar a transferência de calor da fonte para o destino.

Como se pode verificar pela Figura 6.4 a fonte de calor residual encontra-se a um nível térmico inferior (T_c) ao qual será usado (T_H). Para tal, existe a necessidade de realizar trabalho para obter o calor a uma temperatura superior que permita a sua utilização noutra ponto do processo.

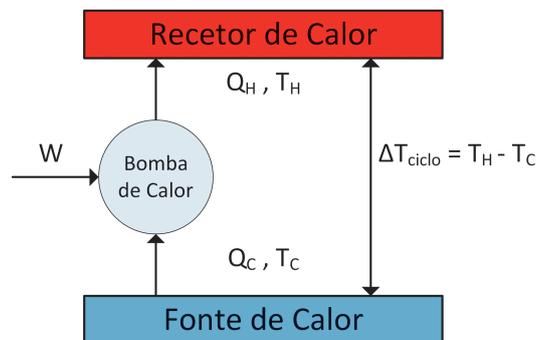


Figura 6.4 - Bomba de calor, transferindo calor de uma fonte fria para uma fonte quente à custa de trabalho

Com base na Primeira Lei da Termodinâmica, o calor transferido, Q_H à temperatura T_H está relacionado com o calor extraído Q_C à temperatura T_C e o trabalho realizado W , como está ilustrado na Equação (6.1).

$$Q_H = Q_C + W_S \quad (6.1)$$

As bombas de calor de compressão podem atingir um COP de 6, significando que um calor de 6 kWh pode ser produzido a partir de 1 kWh de energia elétrica de um compressor.

$$COP = \frac{Q_H}{W_S} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (6.2)$$

Apesar das vantagens das BCI's, o número de instalações de bombas de calor na indústria é quase insignificante em comparação com as que estão instaladas para aquecimento de edifícios.

Ao comparar sistemas de bombas de calor com diferentes fontes de energia, é mais apropriado usar o rácio de energia primária (PER), descrito na Equação (6.3):

$$PER = \frac{\text{calor de destino}}{\text{energia fornecida}} \quad (6.3)$$

Este rácio relaciona-se com o COP através da eficiência (η), como é descrito pela Equação (6.4):

$$PER = \eta \times COP \quad (6.4)$$

Onde η é a eficiência com que a energia primária é convertida em trabalho, através do compressor.

Se o processo onde a bomba de calor vai ser inserida for simples e composto por poucas correntes, em que a fonte e o destino estão bem definidos, pode não existir a necessidade de efetuar uma avaliação minuciosa. O estudo de apenas alguns parâmetros, como a temperatura, a carga térmica e as propriedades físicas, pode ser suficiente para garantir a fiabilidade do sistema.

Na indústria, a maioria das bombas de calor são utilizadas nas gamas de potência de 50 a 150 kW e 150 kW a 10 MW.

O parâmetro-chave para a escolha da bomba de calor industrial é a temperatura da fonte e de destino.

Os principais processos termodinâmicos para uma bomba de calor industrial são:

- > Ciclo de compressão mecânica;
- > Ciclo de compressão térmica;
- > Recompressão mecânica a vapor (MVR);
- > Recompressão térmica a vapor (TVR).

6.3.2 Ciclos de compressão mecânica

Na Figura 6.5 apresenta-se um esquema simplificado de ciclo de compressão fechado.

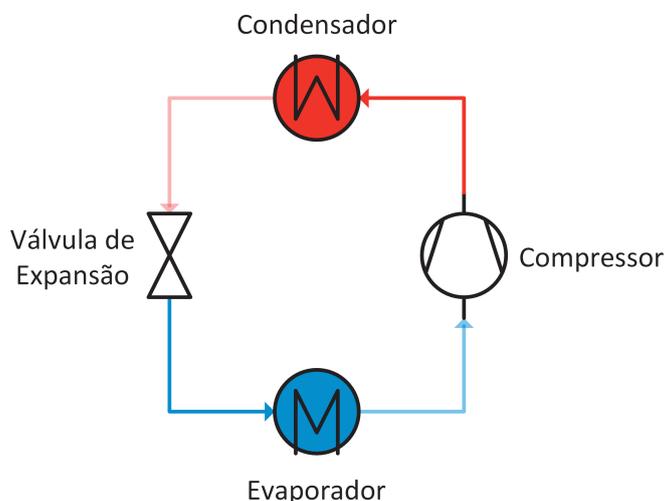


Figura 6.5 - Ciclo de compressão mecânica

As bombas de calor de compressão podem usar quatro tipos diferentes de compressores: espiral, pistão, parafuso-rotativo e centrífugo.

A escolha do tipo de compressor está relacionada com a quantidade de calor final. O compressor espiral é usado para um *output* até 100 kW, o compressor pistão até 500 kW, o compressor parafuso-rotativo até 5 MW e o compressor centrífugo usado em sistema de grandes dimensões acima de 2 MW [41].

6.3.3 Ciclos de compressão térmica

6.3.3.1 Bombas de calor de absorção

Enquanto uma bomba de calor mecânica opera a eletricidade, a de absorção opera a energia térmica, que pode ser obtida através de vapor ou pela combustão de gás natural. Este tipo de bombas de calor torna-se economicamente atrativa quando existe uma fonte de energia térmica barata a temperaturas de 100 a 200 °C, como energia geotérmica, energia solar ou calor excedente dos processos de cogeração ou centrais de vapor. Existem dois princípios-chave: absorção e evaporação do refrigerante. É comum usar o sistema Água (meio absorvente) – Amónia (refrigerante).

Na Figura 6.6 encontra-se um esquema simples deste tipo de tecnologia.

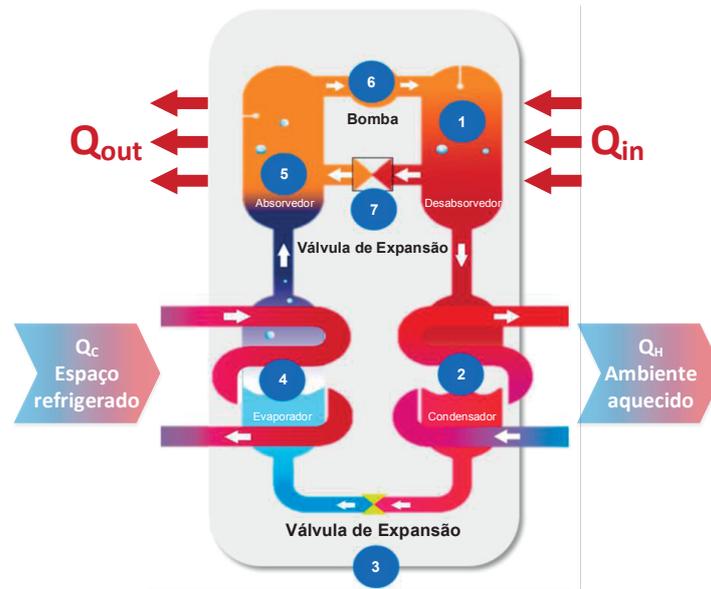


Figura 6.6 - Bomba de calor de absorção

A energia térmica é fornecida ao desabsorvedor, o que faz com que o fluido refrigerante se evapore do meio absorvente. Por sua vez, o meio absorvente através de uma válvula é direcionado para o absorvedor. A absorção do fluido refrigerante gasoso acontece no absorvedor, provocando a libertação de calor. A mistura é redirecionada ao desabsorvedor através de uma bomba. De modo a aumentar a eficiência, efetua-se um pré-aquecimento da mistura fria com a mistura quente.

Devido ao uso de energia térmica para separar os dois componentes, o fluido refrigerante gasoso entra no condensador. Após a condensação, existe a libertação de calor e o fluido refrigerante líquido segue para uma válvula de expansão antes de entrar no evaporador. Com o fornecimento de calor, ocorre a evaporação do fluido refrigerante que segue para o absorvedor [42].



Na produção de calor a uma temperatura de 70 °C, este sistema apresenta uma eficiência de 150%, ou seja, com 1 kWh de gás natural obtêm-se 1,5 kWh de calor.

6.3.3.2 Bombas de calor de absorção-compressão

Este tipo de tecnologia engloba tanto o processo de absorção como o de compressão. Na Figura 6.7 encontra-se um esquema simplificado da tecnologia híbrida absorção-compressão.

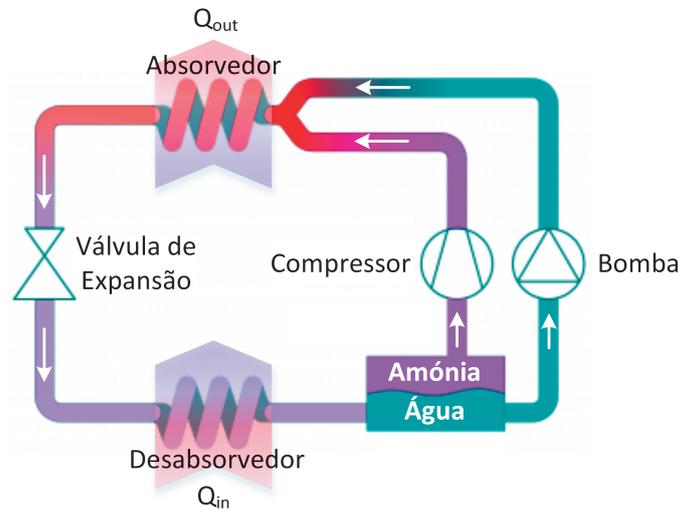


Figura 6.7 - Ciclo de absorção-compressão

A diferença entre o ciclo híbrido de absorção-compressão para o de absorção, é que no processo híbrido, a absorção ocorre a pressão e temperatura elevadas e a dessorção ocorre a pressão e temperatura baixa [42].

6.3.4 Recompressão mecânica de vapor (MVR)

Neste tipo de tecnologia, o vapor de baixa pressão proveniente de processos industriais (caldeiras ou evaporadores) é comprimido e condensado, gerando calor a uma temperatura mais elevada, podendo assim substituir uma fonte de energia exterior. Na Figura 6.8 está representado um esquema simplificado deste tipo de bomba de calor.

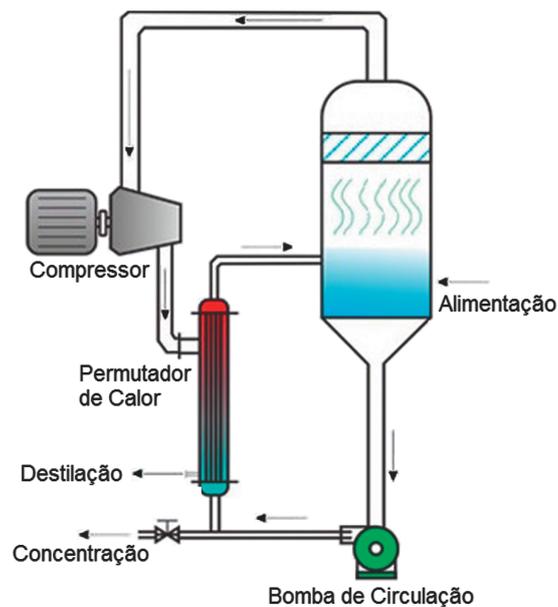


Figura 6.8 - Recompressão mecânica de vapor (MVR)

Caso o vapor se encontre contaminado, é necessário um permutador de calor intermédio (ebulidor). Neste caso diz-se que o sistema é semiaberto.

O COP para instalações de recompressão mecânica de vapor situa-se entre 10 a 30.

A recompressão mecânica é usada em operações de destilação, evaporação, secagem e para a produção de vapor para uma rede de distribuição de vapor [42].

6.3.5 Recompressão térmica de vapor (TVR)

Neste tipo de tecnologia o vapor é comprimido num ejetor e ao contrário da recompressão mecânica, não é necessário o uso de energia mecânica. Pode ser usado em inúmeras aplicações, em que exista uma diferença significativa entre os preços dos combustíveis e o da eletricidade. Tal como a recompressão mecânica, também pode ser usada em unidades de evaporação.

Na Tabela 6.2 encontra-se um resumo das principais tecnologias de bombas de calor industriais, bem como os parâmetros de temperatura da fonte e a temperatura a que se consegue produzir o calor.

Tabela 6.2 - Gama de temperaturas em bombas de calor industriais

Sistema	Temperatura da fonte de calor (°C)	Temperatura de produção (°C)
Compressão	-	
Absorção	35	100
TVR	70 – 80	110 – 150, 200

Em algumas situações, o sistema TVR pode permitir a produção de calor a níveis térmicos elevados, cerca de 200 °C [42].

6.4 APROVEITAMENTO DO EXCESSO ENTÁLPICO DE BAIXA TEMPERATURA

Muitos dos processos industriais possuem necessidades entálpicas numa gama de temperaturas de 90 a 120 °C e têm disponíveis fontes de calor residuais com temperaturas entre 30 e 60 °C. A aplicação de bombas de calor para colmatar as necessidades entálpicas seria muito útil, reduzindo o consumo energético específico (por quantidade de produto final). Atualmente, muitos refrigerantes encontram-se restringidos a temperaturas que não permitem o fornecimento de fluxos de calor às temperaturas indicadas. Têm sido, por esta razão, desenvolvidos refrigerantes que possam cobrir estas necessidades, tendo em conta não só as propriedades termodinâmicas como o ponto de ebulição, mas também, por exemplo o potencial de aquecimento global (*global warming potential, GWP*), que em muitos refrigerantes atuais é relativamente elevado.

O excesso entálpico de uma corrente (gás, água, ar, etc) é a entalpia da corrente que não tem uso direto no processo num determinado momento. Todo o excesso entálpico que for possível reutilizar, técnica e economicamente, deverá ser tido em conta.

Existem três tecnologias para recuperação/reutilização de excesso entálpico:

- (i) Uso direto;
- (ii) Bombas de calor;
- (iii) Produção de energia elétrica.

O uso direto quer dizer que o calor sensível ou latente, não é enriquecido através de uma bomba de calor, pelo que pode ser armazenado.

A seleção da tecnologia de recuperação de calor depende de fatores como:

- (i) Temperatura;
- (ii) Fase física;
- (iii) Composição da corrente.

O excesso de calor industrial a baixas temperaturas, inferiores a 50 °C, costuma ser usado por exemplo, para o aquecimento de estufas ou na produção de comida.

A produção de energia piezoelétrica é uma opção para utilizar excesso de calor a baixas temperaturas (100 – 150 °C), embora tenha uma eficiência baixa (1%) e custos de investimento elevados.

No geral, a produção de energia através de excesso de calor, está limitada a temperaturas médias/altas. No entanto, devido ao avanço tecnológico nos ciclos de energia, tem sido possível aumentar a fiabilidade da produção de energia a baixas temperaturas. Embora as eficiências sejam baixas, estes sistemas podem ser economicamente interessantes, se a quantidade de calor a recuperar for elevada.

O Ciclo de *Rankine* Orgânico (CRO), opera de forma semelhante ao ciclo de *Rankine* com vapor, mas usa um fluido orgânico em vez de vapor. O intervalo de temperaturas do CRO irá depender do fluido usado, das propriedades termodinâmicas do fluido que vão influenciar a eficiência do ciclo. O CRO usa um fluido orgânico de alta massa molecular como por exemplo silicone, propano, isopentano, isobutano, p-xileno e tolueno.

O fluido permite a recuperação do calor do ciclo de *Rankine* de fontes a temperaturas baixas. O calor de baixas temperaturas é convertido em trabalho útil, e posteriormente transformado em eletricidade.

Apesar da elevada eficiência de turbina (80 - 85%), a eficiência global do CRO é somente de 10-20%, dependendo da temperatura do condensador e evaporador.

ILUMINAÇÃO INDUSTRIAL



7. ILUMINAÇÃO INDUSTRIAL

A energia elétrica consumida nos sistemas de iluminação de uma instalação industrial representa hoje em dia 2 a 10%, do seu consumo total. Apesar de representar uma fração pequena do consumo total, este consumo está em grande parte relacionado com o elevado desperdício na utilização dos sistemas de iluminação atualmente instalados. Os recentes desenvolvimentos nas tecnologias de iluminação em conjunto com o planeamento de estratégias de controlo de iluminação podem resultar em poupanças significativas, tipicamente cerca de um terço até metade dos custos associados à iluminação tradicional [43].

Adicionalmente, a qualidade da iluminação tem um grande impacto no bem-estar dos colaboradores, devendo-se ter especial atenção para manter ou melhorar os níveis de conforto, uma vez que vão ter impacto na sua produtividade, saúde e segurança, e levar a uma melhor aceitação e contribuição para a implementação de um programa de eficiência energética [44].

As medidas base para a economia de energia na área da iluminação incluem [43]:

- Usar os equipamentos mais eficientes (lâmpadas, luminárias e acessórios);
- Maximizar o uso de iluminação natural, mantendo limpas as áreas de entrada de luz;
- Utilizar sistemas de controlo de iluminação localizados;
- Utilizar sempre que possível luminárias que permitam uma integração com o ar condicionado;
- Pintar as paredes e os tetos com cores claras;
- Definir um plano de limpezas regulares e manutenção das instalações;
- Envolver os colaboradores no plano de economia de energia.

No âmbito da fotometria são definidas as seguintes grandezas e unidades descritas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Grandezas e unidades dos parâmetros de fotometria

Grandeza	Símbolo	Unidade (SI)
Energia luminosa	$\text{lm}\cdot\text{s}$	Lúmen segundo
Fluxo luminoso	lm	Lúmen
Intensidade luminosa	$\text{Cd} = \text{lm}/\text{sr}$	Candela
Iluminância	$E = \text{lm}/\text{m}^2$	Lux
Luminância	$L = \text{Cd}/\text{m}^2$	Candela/ m^2
Eficiência luminosa	lm/W	Lúmen/Watt

Existem diretrizes claras para o funcionamento de sistemas de iluminação industrial e comercial e dos requisitos mínimos para a iluminação dos locais de trabalho. A norma europeia de iluminação interior EN 12464-1:2011 inclui critérios de qualidade da luz, Figura 7.1, como a iluminância, uniformidade, redução do brilho e contraste, que servem para quantificar a qualidade da luz especificada de acordo com a tarefa visual. A norma de iluminação exterior EN 12464-2:2016 define, entre outros requisitos, os limites máximos de iluminação, prevenindo assim a poluição luminosa no exterior.

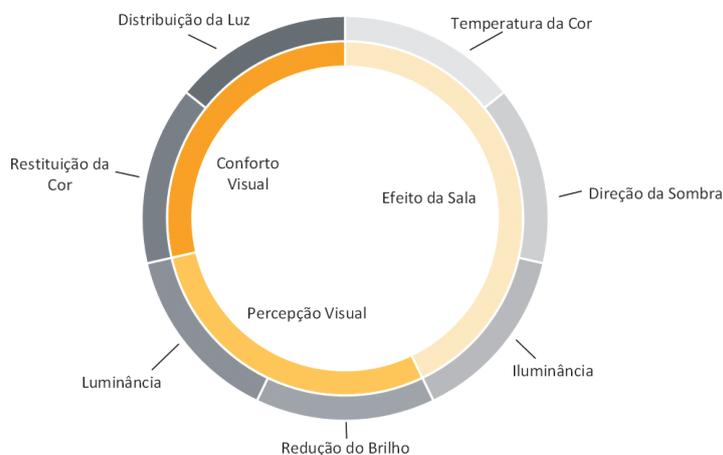


Figura 7.1 - Dimensões da qualidade da luz [45]

No anexo da norma EN 12464-1 são especificados quatro critérios com os parâmetros para cada aplicação:

- Média de iluminância mínima requerida por tarefa (\bar{E}_m);
- UGR (*Unified Glare Rating*) máximo - expressa a probabilidade de encandeamento direto por parte das luminárias;
- Uniformidade mínima (U_0);
- Restituição da cor (R_a).

A Tabela 7.2 apresenta como exemplo os critérios de qualidade de iluminação definidos na norma EN 12464-1:2011 aplicada a escritórios.

Tabela 7.2 - Valores dos critérios de qualidade de iluminação para escritórios [46]

Tipo de interior, tarefa ou atividade	\bar{E}_m	UGR_L	U_0	R_a
Desempenho do trabalho, fotocópia, etc.	300	19	0.4	80
Escrita, digitação e leitura, processamento de dados num PC	500	19	0.6	80
Desenho técnico	750	16	0.7	80
Postos de trabalho CAD	500	19	0.6	80
Salas de conferências e reuniões	500	19	0.6	80
Secretárias de receção	300	22	0.6	80
Arquivos	200	25	0.4	80

É necessário ter especial atenção à atualização da Portaria n.º 949-A/2006 do artigo 2.º do Decreto-Lei n.º 226/2005, pela Portaria n.º 252/2015 onde são feitas alterações das Regras Técnicas das Instalações Elétricas de Baixa Tensão.

7.1 ESTUDO LUMINOTÉCNICO

A luminotécnica é o estudo da aplicação de iluminação artificial, tanto em espaços interiores como exteriores. Através da identificação e caracterização dos pontos de luz existentes, Luminosidade - Lux (lx), tipos de projetores e lâmpadas e as respetivas características, é possível mapear a luz existente nos pontos de trabalho e recolher informação no que toca ao consumo de energia e determinar o correto fornecimento de luminosidade de acordo com as necessidades de cada posto de trabalho.

Exemplos de ferramentas para realizar um projeto luminotécnico incluem o AGI32 [47], Visual [48] e DIALux [49], entre outros, que permitem encontrar a solução mais económica em termos de investimento e consumo, e garantir a iluminação ideal e o uso de tecnologias específicas de acordo com o local e as necessidades.

7.2 LÂMPADAS

As soluções de iluminação industrial devem apresentar uma completa fiabilidade em termos de funcionalidade e tempo de vida útil máximo.

Existem vários tipos de lâmpadas que podem apresentar diferentes rendimentos ou eficiências luminosas. O seu valor é expresso em *lumens por watt* (lm/w) e representa a relação entre a quantidade de luz emitida e a quantidade de energia elétrica absorvida.

As reduções do consumo de energia elétrica nas instalações de iluminação passam pela utilização de lâmpadas de elevada eficiência luminosa.

Na Figura 7.2 são indicados os consumos e os *outputs* de vários tipos de lâmpadas existentes para a produção de 1600 lumens, permitindo fazer uma comparação das respetivas características básicas em termos de desempenho (potência, eficácia energética, duração e custos).

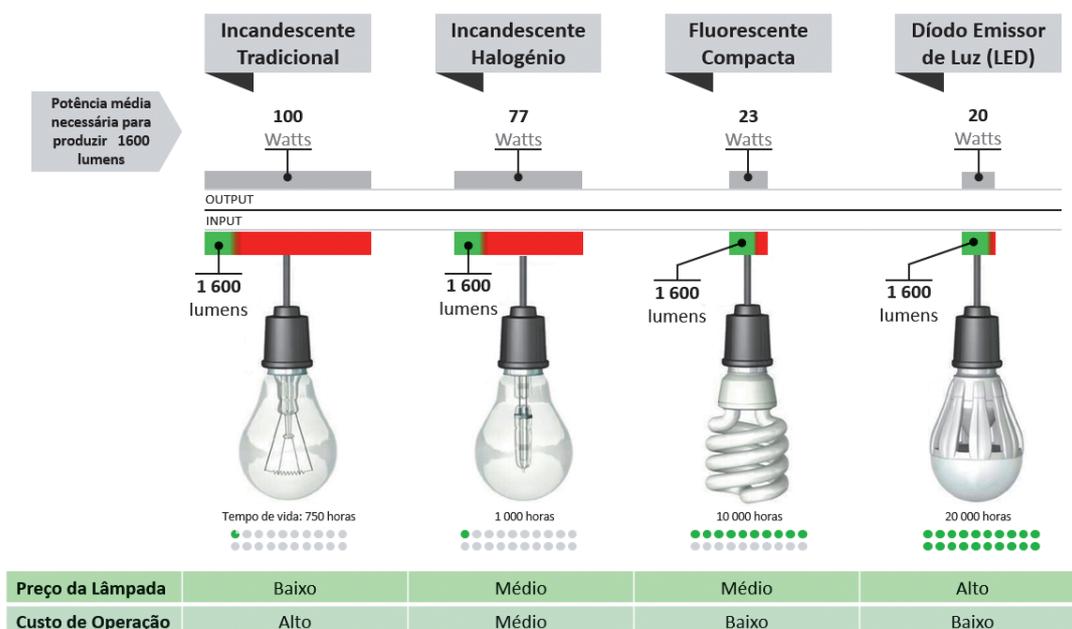


Figura 7.2 - Comparação do desempenho de diferentes tipos de lâmpadas na produção de 1600 lumens

As lâmpadas incandescentes tradicionais emitem luz através do brilho de um filamento de tungstênio quando passa uma corrente elétrica, no entanto, cerca de 90% da energia utilizada é emitida com calor (a vermelho) em vez de luz (a verde). As lâmpadas incandescentes de halogéneo são ligeiramente mais eficientes que as anteriores, mas mesmo assim bastante longe das alternativas existentes.

A Tabela 7.3 apresenta as alternativas às lâmpadas incandescentes com as respetivas características e aplicações.

Tabela 7.3 - Características e aplicações das fontes de luz com alta eficiência energética [50]

Tecnologia	Características	Aplicações
LED	<ul style="list-style-type: none"> • Altamente direcionada ou omnidirecional • Excelente manutenção do lúmen e da temperatura da cor ao longo do tempo • Alternativa à iluminação fluorescente linear em espaços apertados • Alta durabilidade e resistência • Brilho instantâneo • Menor produção de luz ultravioleta e calor • Maior poupança nos controladores devido ao <i>instant on</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Iluminação em tetos altos • Armazéns • Armazenamento a frio, áreas refrigeradas • Zonas perigosas, empoeiradas ou sujas • Espaços interiores de escritórios • Iluminação de tarefas • Postes exteriores e paredes • Aplicações com comutas frequentes
Fluorescente T8 linear de alto desempenho com balastro eletrónico	<ul style="list-style-type: none"> • Ampla distribuição de luz • Baixo custo inicial • Excelente manutenção do lúmen • Ampla gama de opções de potência e temperaturas de cor • Baixo custo operacional • Boa alternativa às lâmpadas de descarga de alta densidade • Várias opções de controlo, que incluem <i>on/off</i> instantâneo • Requer eliminação de resíduos perigosos 	<ul style="list-style-type: none"> • Iluminação em tetos baixos • Espaços interiores de escritórios • Corredores, salas de conferências, salas de estar
Fluorescente T5 HO (<i>high-output</i>) linear com balastro eletrónico	<ul style="list-style-type: none"> • Ampla distribuição de luz brilhante • O tamanho pequeno da lâmpada oferece um excelente controlo ótico • Boa alternativa às lâmpadas de descarga de alta densidade • Excelente manutenção do lúmen • Uniformidade na iluminação • Várias opções de controlo • Requer eliminação de resíduos perigosos 	<ul style="list-style-type: none"> • Tetos acima de 6 metros • Armazéns
Indução	<ul style="list-style-type: none"> • Ampla distribuição de luz • <i>On</i> instantâneo • Requer eliminação de resíduos perigosos 	<ul style="list-style-type: none"> • Adequada para áreas de difícil acesso, como zonas acima dos equipamentos



As lâmpadas de alta eficiência energética duram 8 a 20 vezes mais do que as lâmpadas incandescentes convencionais e economizam até cerca de 85% de energia.

A 1 de Setembro de 2009 foi implementado pelo Regulamento (CE) n.º 244/2009 um plano de *phase-out* do mercado de lâmpadas ineficientes usadas em fins domésticos, iluminação pública e comercial. A Tabela 7.4 mostra o cronograma do *phase-out* de lâmpadas para o setor terciário.

Tabela 7.4 - Cronograma do plano de *phase-out* para a iluminação pública, escritórios e indústria [51]

Ano	Tipo de lâmpada	Alternativas
2010	• Tubos fluorescentes T8 standard (halofósforos) e IRC<80	→ Tubos fluorescentes T8 trifósforos e pentafósforos
2012	• Tubos fluorescentes T10 e T12 • Vapor de sódio a alta pressão <i>standard</i> • Iodetos metálicos standard (E27/E40/PGZ12)	→ Vapor de sódio a alta pressão de eficiência superior → Iodetos metálicos de eficiência superior
2014	Revisão da regulamentação pela Comissão da UE	
2015	• Mercúrio a alta pressão • Vapor de sódio a alta pressão para substituição direta (<i>retrofit</i>) da lâmpada anterior	→ Iodetos metálicos → Fluorescentes compactas integradas (CFLi) de alta eficiência
2017	• Iodetos metálicos com descarga em queimador de quartzo (E27/E40/PGZ12) • Fluorescente compactas não integradas (CFLni) com 2 pinos	→ Iodetos metálicos com descarga em queimador cerâmico → Fluorescentes compactas não integradas (CFLni) com 4 pinos

7.3 LUMINÁRIAS

Em cada tipo ou sistema de iluminação existem equipamentos com rendimentos bastante diferentes. Os mais eficientes serão aqueles que incluem não só a utilização de lâmpadas de elevada eficiência, mas também luminárias equipadas com refletores espelhados, que permitem elevar o rendimento total do sistema.

A economia de energia através de uma utilização dos sistemas de iluminação pode também ser conseguida através da regulação da altura e do seccionamento das luminárias. Quanto mais alta estiver instalada a luminária, maior terá que ser o fluxo luminoso ou o número de luminárias necessárias. É possível então reduzir a fatura da eletricidade baixando a altura das luminárias o máximo possível, desde que não interfira com o processo de produção [43]. O seccionamento dos circuitos elétricos das luminárias tem a vantagem de permitir que uma determinada secção seja desligada sempre que a iluminação natural seja suficiente, possibilitando desta forma uma redução no consumo de energia.

A norma europeia EN 60598-1:2015 define os requisitos gerais e ensaios para as luminárias, incluindo os sistemas de iluminação para tensões de alimentação acima de 1000 V. Todos os requisitos e ensaios abrangidos pela norma referem-se à marcação, conceção mecânica e construção elétrica, tendo em conta os aspetos de segurança elétrica, bem como a segurança térmica e mecânica. Inclui também os requisitos para a construção de luminárias para lâmpadas LED que irão entrar no mercado.

7.4 ECODESIGN E ETIQUETAGEM ENERGÉTICA

Com o objetivo de responder à procura de produtos mais eficientes energeticamente e menos poluentes, foram lançadas diretivas de *ecodesign* e etiquetagem energética para eliminar os produtos menos eficientes do mercado e impulsionar a competitividade e inovação industrial através da promoção de uma melhor performance ambiental dos produtos existentes no mercado.

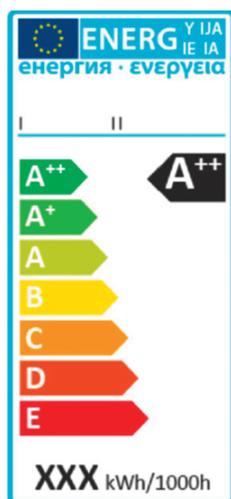
A diretiva de *ecodesign* é implementada através da regulamentação específica para cada produto e é aplicada a todos os países da União Europeia. Já a etiquetagem energética permite informar os consumidores sobre o desempenho energético dos produtos que adquirem, para que possam escolher com plena informação e fundamentar as suas opções de compra.

Os regulamentos atuais de *ecodesign* e etiquetagem energética para a iluminação foram publicados entre 2009 e 2010, tendo sido entretanto revistos, e são apresentados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 - Diretivas dos regulamentos de *ecodesign* e etiquetagem para lâmpadas e luminárias [52]

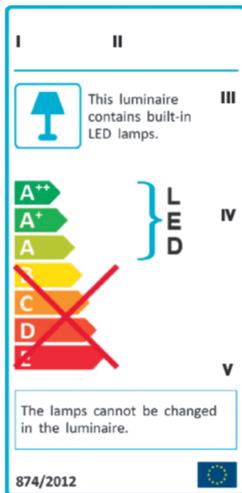
Tema/Produto	<i>Ecodesign</i>	Etiqueta energética
Lâmpadas elétricas não direcionadas (<i>Domestic lighting</i>)	Reg. nº 244/2009, alterado pelo Reg. nº 859/2009, alterado pelo Reg. nº (EU) 2015/1428	
Lâmpadas direcionais, LEDs e equipamentos conexos (<i>Directional lighting</i>)	Reg. nº 1194/2012, alterado pelo Reg. nº (EU) 2015/1428	Reg. delegado nº 874/2012, alterado pelo Regulamento delegado nº 518/2014
CFL sem balastro integrado, lâmpadas de descarga de alta densidade e respetivos balastros e luminárias (<i>Tertiary lighting</i>)	Reg. nº 245/2009, alterado pelo Reg. nº 347/2010, alterado pelo Reg. nº (EU) 2015/1428	

De acordo com os regulamentos acima descritos, as lâmpadas devem ser vendidas acompanhadas com uma etiqueta energética com a seguinte informação:



- I Nome ou símbolo do fornecedor
- II Identificação do modelo
- III Classificação da eficiência energética
- IV Consumo de energia em kWh por 1000 horas

No caso das luminárias, é de referir que a etiqueta energética não se refere à eficiência energética da luminária em si, mas sim da sua compatibilidade com as lâmpadas das classes de eficiência energética assinaladas na etiqueta da luminária, informando sobre os seguintes parâmetros:



- I Nome ou símbolo do fornecedor
- II Identificação do modelo
- III De acordo com a situação, a frase de compatibilidade da luminária com a lâmpada pode ser:
 - “Esta luminária é compatível com lâmpadas das classes energéticas”;
 - “Esta luminária contém lâmpadas LED embutidas”;
 - “Esta luminária contém lâmpadas LED embutidas e têm casquilhos para lâmpadas das classes energéticas”.
- IV De acordo com a situação específica, o intervalo de classes energéticas de lâmpadas compatíveis são identificadas por:
 - Pictograma da lâmpada com a classe;
 - Cruz vermelha sobre as classes para as quais a luminária não é compatível;
 - As letras “LED” dispostas verticalmente ao longo das classes A a A++ se a luminária contém módulos LED que não devem ser removidos pelo utilizador.
- V De acordo com a situação específica, a frase referindo o tipo de lâmpada instalada (se houver) pode ser:
 - “A luminária é vendida com uma lâmpada da classe energética: (pictograma da classe)”;
 - “As lâmpadas da luminária não podem ser trocadas”;
 - Espaço vazio no caso de a luminária não incluir lâmpadas.

7.5 SISTEMAS DE CONTROLO DE ILUMINAÇÃO

Os sistemas de controlo de iluminação, possuidores de tecnologias de automação, são fundamentais para a redução do consumo energético. Num processo industrial, a zona fabril deve estar dividida em vários setores de iluminação independentes, cujo funcionamento deve refletir a sequência operacional do processo, sob pena de existir iluminação onde esta não é necessária. A utilização de sistemas de controlo permite o funcionamento otimizado dos vários setores de iluminação, adaptando o nível de iluminação de acordo com as características do local e do processo.

Estes sistemas de controlo são baseados em:

- > Regulação da intensidade luminosa em função da luz natural;
- > Detecção de presença;
- > Programação horária;
- > Controlo constante dos níveis de luz.

7.5.1 Aplicação de balastros eletrónicos

Os balastros para lâmpadas fluorescentes e transformadores para lâmpadas de halogéneo deverão ser, sempre que possível, eletrónicos.

Poupanças médias na utilização de balastros eletrónicos:

- 25% para fluorescência;
- 18% para lâmpadas de descarga de alta densidade;
- 15% em transformadores.

Associado ao aumento da eficácia, a utilização de soluções eletrónicas dispensam outros acessórios, como os arrancadores e condensadores, e funcionam como filtros aos defeitos da rede elétrica, garantindo maior qualidade no funcionamento da lâmpada, assim como o aumento do seu tempo de vida.

Em 2017 prevê-se a proibição no mercado de todos os balastros eletromagnéticos e balastros eletrónicos de classe A3 para lâmpadas fluorescentes.

7.5.2 Sistemas de regulação DALI

O sistema *Digital Addressable Lighting Interface* (DALI) introduzido pela IEC 62386-101/102:2014 pode ser facilmente integrado no sistema de controlo central de um edifício e em conexão com um *software* de visualização, o sistema pode ser monitorizado, definido e controlado através de uma unidade central. Este sistema permite também monitorizar a operação individual das luminárias e calcular o seu tempo de vida, o que contribui também para o planeamento da manutenção de todo o sistema de iluminação.



- A introdução de interruptores com controlo horário e/ou luz natural permitem alcançar 20 a 40% de economias de energia;
- A introdução de reguladores de fluxo acoplados a sensores de presença permitem economias de 20%.

7.6 INTEGRAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NOS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO

Na generalidade das instalações de iluminação, apenas uma pequena parte da energia radiada é luminosa (21%), sendo a maior parte emitida sob a forma de calor (79%), contribuindo assim para o aquecimento interior dos edifícios.

Assim, é importante dimensionar um sistema de climatização, não só tendo em conta as condições climáticas da região para os diferentes períodos do ano, mas também considerando as condições de iluminação.

A possibilidade de integração dos sistemas de iluminação nos de climatização ambiente permite otimizar as condições de emissão do fluxo luminoso e permite uma melhor gestão das cargas térmicas, o que se poderá traduzir numa redução dos consumos energéticos.

7.7 MANUTENÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

As operações de limpeza e manutenção são práticas que permitem manter sistemas de iluminação a funcionar com a máxima eficiência, mantendo o conforto e segurança dos colaboradores. Das várias medidas para a manutenção de sistemas de iluminação, destacam-se as seguintes [53]:

- Desenvolver um manual de operações com indicações dos objetivos da iluminação, a listagem das operações de manutenção e os parâmetros a serem medidos durante a instalação;
- Executar as ações descritas no manual de forma regular e de acordo com um plano pré-estabelecido;
- Manter as lâmpadas e os acessórios limpos. Usar panos de algodão macio e húmido, escovas anti-estáticas de cerdas macias ou aspiradores de baixa potência;
- Manter as superfícies iluminadas, como tetos e paredes, limpas.

OUTRAS MEDIDAS PARA O AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA



8. OUTRAS MEDIDAS PARA O AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Neste último capítulo serão abordados outros tópicos relevantes para o aumento da eficiência energética na indústria. Destaca-se a implementação de sistemas de gestão de energia, onde um conjunto de procedimentos descritos na família da ISO 50001 podem ser adotados com inúmeras vantagens em termos de caracterização, análise e identificação de ações para o aumento da eficiência energética. Do mesmo modo a monitorização e controlo, a manutenção preventiva e preditiva de equipamentos, os isolamentos térmicos e uma estratégia mais adequada no tratamento de efluentes podem conduzir à redução do consumo de energia primária. Finalmente, o tópico relativo à formação e sensibilização dos recursos humanos pode claramente conduzir a melhorias incrementais acumuladas que no final poderão ter algum impacto sobre os consumos energéticos, e portanto na eficiência energética global.

8.1 SISTEMAS DE GESTÃO DE ENERGIA

A gestão do consumo energético é um processo que geralmente tem um custo inicial de implementação, com um rápido retorno do investimento tendo em conta as possíveis melhorias de poupanças energéticas e produtividade. No entanto, este pode ser um processo relativamente complexo que envolve a recolha de informação detalhada sobre os consumos nos diferentes setores da empresa, e em seguida o planeamento, implementação e monitorização das estratégias definidas.

Com o objetivo de orientar as empresas na implementação de um sistema de gestão de energia (SGE) eficiente, a Organização Internacional de Normalização (ISO) desenvolveu a ISO 50001:2011 que define regras e metodologias para o desenvolvimento e implementação de uma política energética, metas para a utilização de energia e planos de ação para as atingir.

A ISO 50001:2011 define também, entre outros, o conceito de performance energética que inclui o uso de energia, a eficiência energética e o consumo energético, Figura 8.1. Assim, a organização pode escolher entre uma ampla gama de atividades de desempenho energético, como reduzir o pico de procura, utilizar o excedente energético, reduzir o desperdício ou melhorar as operações dos sistemas, processos ou equipamentos [54].



Figura 8.1 - Representação conceptual da performance energética

Tal como outras normas ISO, a ISO 50001 baseia-se no esquema de melhoria contínua *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) e incorpora a gestão de energia nas práticas diárias das organizações, como ilustrado na Figura 8.2.

A abordagem PDCA pode ser descrita como:

- *Plan* (Planear) – realizar uma avaliação energética e estabelecer a linha de base, os indicadores de desempenho energético (IDE), objetivos, metas e planos de ação necessários para a produção de resultados que se traduzam numa melhoria do desempenho energético e que esteja de acordo com a política energética da organização;
- *Do* (Executar) – Implementar os planos de ação definidos;
- *Check* (Verificar) – Monitorizar e medir o processo e os parâmetros chave das operações que determinam o desempenho energético face à política energética e os objetivos estabelecidos. Reportar os resultados;
- *Act* (Atuar) – Implementar ações que visem melhorar continuamente o desempenho do SGE de acordo com os resultados obtidos.

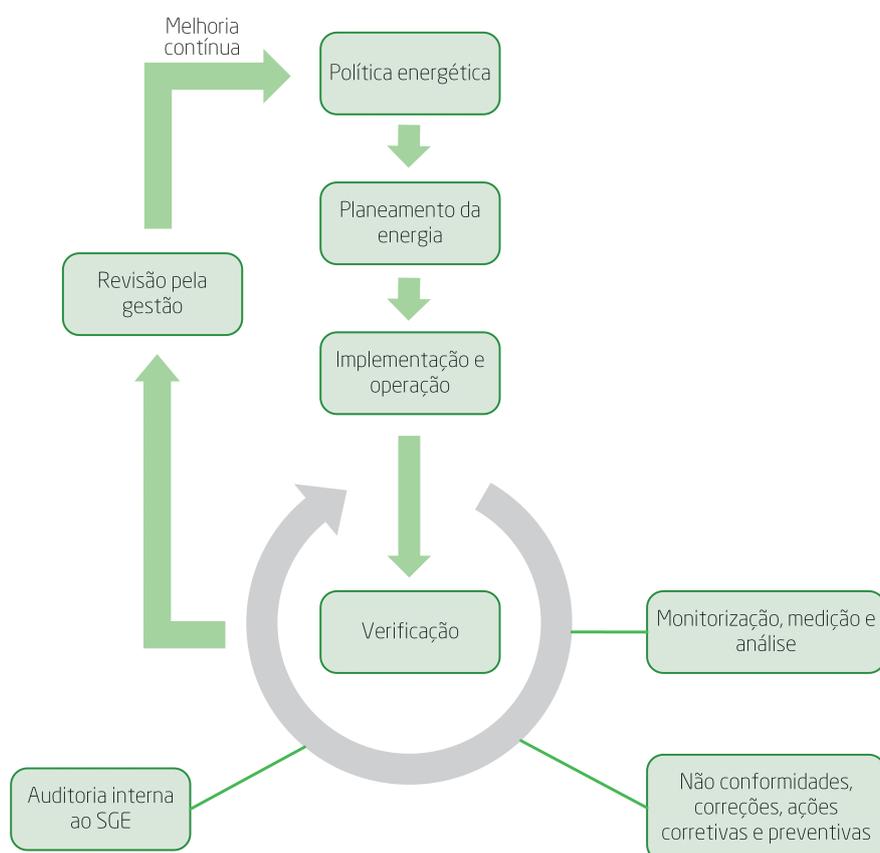


Figura 8.2 - Modelo do sistema de gestão de energia da ISO 50001 [54]

A Tabela 8.1 apresenta algumas das aplicações da ISO 50001 e a suas vantagens de acordo com alguns parâmetros de performance.

Tabela 8.1 - Características da ISO 50001 e as vantagens da sua implementação [55]

Parâmetros	ISO 50001	Vantagens
 Conformidade	<ul style="list-style-type: none"> • Considera os requisitos legais ao configurar e implementar a ISO 50001 	<ul style="list-style-type: none"> • Cumprimento dos requisitos legais • Menor probabilidade de multas e processos judiciais • Melhor organização e documentação dos gastos energéticos
 Custo	<ul style="list-style-type: none"> • Identifica a energia que é usada e onde • Identifica os pontos de desperdício • Implementa controlo operacional para gerir o uso de energia 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduz os custos • Controla e previne os riscos e impactos de um desempenho deficiente • Reduz eventuais investimentos devido a alterações da legislação
 Reputação	<ul style="list-style-type: none"> • É reconhecida internacionalmente • Garante que as melhores práticas de gestão de energia estão em vigor 	<ul style="list-style-type: none"> • Melhora a imagem da empresa perante terceiros • Intruduz possíveis vantagens competitivas

8.1.1 A família ISO 50001

Desde a sua publicação em 2011, várias outras normas têm sido desenvolvidas para completar o programa de gestão de energia.

Estas incluem [56]:

- ISO 50002:2014 – Requisitos do processos para a realização de um auditoria energética e que tipo de informação deve ser requerida aos auditados;
- ISO 50003:2014 – Requisitos para os organismos de auditoria e certificação de sistemas de gestão de energia;
- ISO 50004:2014 – Guia para a implementação, manutenção e melhoria de um sistema de gestão de energia;
- ISO 50006:2014 – Princípios e guias para a medição do desempenho energético através do consumo energético de referência e de indicadores de desempenho energético;
- ISO 50015:2014 – Medição e verificação de desempenho energético das organizações.

8.2 MONITORIZAÇÃO E CONTROLO

A gestão da energia consumida é uma tarefa que engloba várias medidas, tais como o planeamento, a monitorização e a implementação de estratégias de controlo otimizadas que permitam determinar em tempo real os consumos energéticos de uma instalação e detetar as zonas críticas que vão ter um maior impacto na fatura energética obtendo-se os seguintes benefícios:

- Tomadas de decisão mais apoiadas que irão originar intervenções localizadas e com investimentos com níveis de retorno competitivos;
- Redução da fatura energética;
- Melhores previsões do consumo energético;
- Aumento da sustentabilidade no consumo de energia.

De facto, devido ao seu domínio transversal, os sistemas de controlo de processo modernos não são desenhados exclusivamente para a eficiência energética, mas também para a otimização da produção, da qualidade do produto e da segurança dos trabalhadores.

8.2.1 Metodologia para a implementação de sistemas de monitorização e controlo

De forma a implementar com sucesso um sistema de monitorização e controlo, a empresa terá de adotar um certo número de procedimentos com vista a determinar as suas necessidades específicas.

A primeira ação a executar é a realização de um diagnóstico energético à instalação de modo a identificar os locais suscetíveis de controlo dos consumos de energia. Estes locais são denominados por Centros de Custos e podem corresponder a uma linha de produção, a um único equipamento, à totalidade da instalação, ou a outro qualquer local em que o consumo de energia apresenta valores que justifiquem o seu controlo.

Uma vez definidos os Centros de Custos, são determinadas as necessidades de aparelhos de medida, procedendo-se de seguida à sua instalação. Os consumos de energia passam a ser medidos regularmente bem como os valores da produção de cada Centro de Custos, sendo assim calculados os consumos específicos de energia, ou seja, a quantidade de energia consumida por unidade produzida.

Através da análise dos dados obtidos, e tendo em conta o modo como o consumo de energia depende da produção, são estabelecidos valores padrão. Estes valores resultam das medições efetuadas durante um determinado período de tempo em circunstâncias normais de funcionamento da instalação e serão os valores de referência em relação aos quais os desempenhos energéticos da instalação são comparados. Em termos de gestão pretende-se que os valores padrão sejam constantemente alcançados, uma vez que a experiência já provou que tal é possível.

De seguida são estabelecidas metas realistas de redução dos consumos com vista a melhorar a eficiência energética para além dos valores padrão através de determinadas medidas que se julguem possíveis de implementar.

A monitorização do consumo de energia e da produção deverá ser contínua, sendo os valores padrão e as metas sujeitos a uma atualização sempre que tal se justifique, nomeadamente, sempre que as metas inicialmente propostas sejam atingidas.

8.2.2 Smart Grid Industrial / Planeamento Industrial

O termo *smart grid* (rede elétrica inteligente) refere-se a um sistema que integra a tecnologia elétrica com a tecnologia de informação para fazer com que o sistema seja mais eficiente, tanto económica como energeticamente, confiável e sustentável. Esta integração abrange todo o sistema, desde a produção, transmissão e distribuição até ao consumo. Ao nível da baixa tensão, é denominada de *microgrid* [57].

Globalmente, os objetivos das redes inteligentes são:

- Aumentar o uso de energias renováveis;
- Reduzir a dependência sobre o petróleo importado e gás;
- Assegurar a capacidade de resposta para a crescente procura de eletricidade;
- Reduzir os custos de energia.

O princípio é o de que quanto mais distribuídos e sofisticados forem os dispositivos instalados, mais localizadas serão as ações de controlo, permitindo que os operadores na sala de controlo operem de forma mais efetiva. Todos os equipamentos associados à rede estão conectados *in-line* por sensores para formar uma rede completa. A informação é integrada e analisada de modo a otimizar os recursos de energia, reduzir os custos e aumentar qualidade da energia elétrica.

Para operar de uma forma eficiente, a *Smart Grid* Industrial deve ser desenhada com as seguintes características:

- **Adaptativa**, respondendo automática e rapidamente às alterações das necessidades do sistema;
- **Previsível**, em termos da aplicação dos dados operacionais às práticas de manutenção de equipamentos, identificando também possíveis interrupções antes que estas aconteçam;
- **Integrada**, em termos de comunicações em tempo real de funções de controlo;
- **Otimizada** para maximizar a fiabilidade, a eficiência e o desempenho económico;
- **Segura** relativamente a ataques externos e a outros incidentes naturais.

Para garantir a interoperabilidade entre IED's (*intelligent electronic devices*) de diferentes fabricantes foi desenvolvida pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) a norma IEC 61850 para ser um padrão internacional de comunicação e integração. Diferentes protocolos e sinais, desde os simples contactos binários I/O, alertas de proteção, comunicações de voz, SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) de baixa velocidade, videovigilância, transferência de dados de alta velocidade, acesso à internet e ligações LAN, estão conectados através da tecnologia multiplex para sistemas de comunicação complexos por forma a garantir uniformidade na comunicação entre os diferentes ambientes dos sistemas de vários fabricantes.

Uma das aplicações diretas da *Smart Grid* industrial é a automatização do planeamento industrial na utilização de energia. Em alguns casos é possível, por exemplo, programar a produção para alturas do dia em que o pico de procura é mais baixo, e o preço da eletricidade é mais baixo. Outro exemplo é, no caso de estarem instalados produtores de energias renováveis (torres eólicas ou painéis solares), existir um sistema que alterna a fonte de eletricidade consoante as condições atmosféricas permitam, ou não, usar esses recursos.

O objetivo é que no futuro estas redes inteligentes estejam integradas em toda a rede de eletricidade, desde as centrais de produção (nuclear, termoelétrica, eólica, fotovoltaica, etc.) até todos os setores de consumo (doméstico, empresarial e industrial) nas chamadas "Cidades Inteligentes", conforme a Figura 8.3. Em Portugal, o primeiro projeto de rede elétrica inteligente foi implementado em Évora em Abril de 2010 [58].

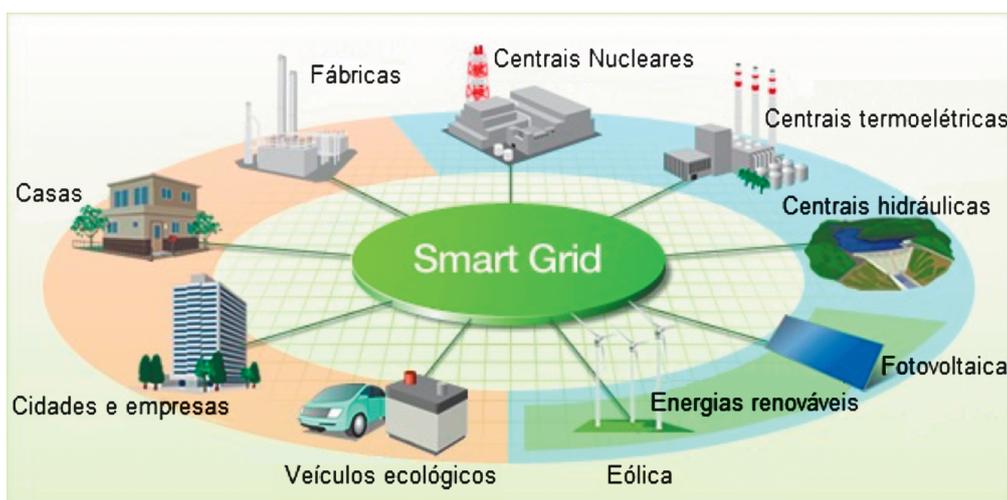


Figura 8.3 - Representação do conceito de cidade inteligente [59]

8.3 MANUTENÇÃO PREVENTIVA E PREDITIVA DE EQUIPAMENTOS

A manutenção preventiva é uma operação de manutenção que é realizada de forma planeada e regular a um equipamento com o objetivo de aumentar o seu tempo de vida e diminuir a probabilidade deste falhar. É efetuada enquanto o equipamento ainda está a funcionar, para que não avarie de forma inesperada e deve ser programada para que todos os recursos necessários estejam disponíveis. Neste caso é formulado um plano de revisões baseado no tempo de utilização dos equipamentos (p. ex., a manutenção preventiva de um motor de um veículo a cada 10.000 km).

Já a manutenção preditiva tem como objetivo prever quando é que o equipamento pode avariar e prevenir essa falha corrigindo os possíveis problemas. A manutenção preditiva é mais complexa do que a preventiva, pois implica o estabelecimento de estratégias de monitorização e de interpretação de resultados, no entanto, assegura que uma peça de equipamento que precise de revisão apenas seja desligada antes de uma falha eminente, reduzindo o tempo total e os custos da manutenção com o equipamento.

A vantagem de ambas é a diminuição da manutenção não planeada que acarreta muitos custos que podem ser evitados, incluindo a perda de produto, custos mais elevados com peças e remessas, bem como o tempo perdido na resposta a emergências e diagnósticos de falhas enquanto o equipamento não está a funcionar.



A manutenção devido a falhas inesperadas pode custar 3 a 9 vezes mais do que a revisão planeada dos equipamentos.

8.4 ISOLAMENTOS TÉRMICOS

O melhoramento do isolamento térmico de superfícies (caldeiras, condutas de distribuição de vapor ou de água quente) é uma medida de implementação simples que, pelo reduzido investimento que habitualmente envolve, deve merecer uma atenção imediata por parte das empresas.

O isolamento térmico cria uma barreira térmica que permite reduzir a transferência de calor. A utilização de isolamentos térmicos permite:

- Reduzir os custos de energia ao minimizar as perdas de calor;
- Controlar a condensação;
- Fornecer proteção para o frio;
- Fazer a proteção aos equipamentos;
- Controlar as temperaturas de processo;
- Proteger contra o fogo;
- Servir de isolamento acústico.

As condutas de vapor, de água quente, de fluido térmico e de condensados devem ser isoladas termicamente para evitar perdas.



Um isolamento correto pode economizar até 10% do combustível utilizado para gerar a energia térmica transportada pela tubagem.

Tendo em conta todos os fatores que vão influenciar o transporte de fluidos térmicos, o correto dimensionamento torna-se de extrema importância para garantir a eficiência da rede de transporte e minimizar as perdas de energia através da escolha adequada dos materiais e da arquitetura da linha de transporte. Assim, devem ter-se em conta os seguintes fatores:

- Isolar termicamente e proteger do clima todos os tubos e válvulas contendo vapor ou condensado;
- Limitar, ao longo da linha, o número de acessórios, curvas, derivações, uniões, etc.;
- Escolher uma velocidade de escoamento adequada.

Para a manutenção deve ser implementada uma rotina de inspeção periódica do isolamento térmico das tubagens e válvulas. Esta rotina deve dar especial atenção aos equipamentos novos e aos trechos de tubagem que tenham sofrido reparação ou manutenção recente, providenciando a substituição imediata do isolamento se tal for necessário. Além disso, na troca do revestimento isolante deve recalcular-se a espessura do mesmo numa perspetiva de otimização da relação custo/benefício, de modo a evitar-se o sobredimensionamento da espessura do isolamento. Se estas medidas forem aplicadas a grandes áreas de tubagem podem levar a poupanças consideráveis.

A magnitude dos desperdícios desnecessários de energia associados à falta de isolamento térmico ou a um isolamento degradado é bem representada pelos dois exemplos seguintes [35]:

Exemplo 1 - Se uma conduta com 10 cm de diâmetro nominal, transportar vapor a uma pressão de 8,6 barg e possuir 10 flanges não isoladas, verificam-se perdas térmicas através das suas paredes equivalentes a 2450 Nm³/ano de gás natural (aproximadamente 97 GJ/ano ou 2,3 tep/ano).

Exemplo 2 - Uma conduta de vapor sem isolamento, com 10 cm de diâmetro nominal e 3 m de comprimento, desperdiça por ano o equivalente a mais de duas vezes o dinheiro necessário para isolar a mesma conduta com fibra de vidro e revestimento de alumínio. Ou seja, o custo anual inerente às perdas térmicas será duas vezes superior ao investimento para efetuar o isolamento.



O investimento no isolamento de condutas de grande diâmetro tem um *payback* de poucas semanas, enquanto o isolamento de tubos de menor diâmetro paga-se em alguns meses.

8.5 TRATAMENTO DE EFLUENTES

8.5.1 Tratamento anaeróbio de águas residuais

O tratamento anaeróbio é um método alternativo para limpar as águas residuais industriais, que se baseia na conversão dos compostos orgânicos existentes no efluente, em biogás contendo metano, dióxido de carbono e sulfureto de hidrogénio. Este processo é levado a cabo por bactérias num ambiente anaeróbio, isto é, na ausência de oxigénio [32].

O tratamento anaeróbio de águas residuais não só poupa eletricidade como também permite a utilização do biogás produzido numa caldeira de vapor. Esta tecnologia é usada em todo o mundo em centenas de instalações industriais, estando a ser adotada no Brasil, no Japão, na China e na Europa.



Os resultados obtidos no Reino Unido, Holanda, Canadá e EUA apontam para que o período de *payback* associado à implementação desta tecnologia se situe entre os 1,4 e os 3,7 anos.

A aplicação do tratamento anaeróbio de águas residuais depende não só dos custos da energia, mas também dos custos de controlo e descarga dos efluentes. A adoção de regulamentação ambiental mais rigorosa, a implementação de programas de demonstração patrocinados pelo governo e o investimento em programas de incentivo, são algumas das medidas que podem ajudar a promover a aplicação desta tecnologia.

8.5.2 Tratamento de águas residuais com tecnologia de membranas

Atualmente, os processos de separação com membranas são utilizados numa grande variedade de setores industriais, por exemplo, metalúrgico, químico, papel, eletrónica, alimentação e bebidas [32].

Os processos de membranas conseguem remover muitos dos contaminantes existentes nas águas residuais, obtendo-se água tratada que pode ser reaproveitada no processo ou eliminada sem problemas ambientais associados. Os contaminantes removidos nestes processos são muito diversos, por exemplo, compostos orgânicos e compostos metálicos, sólidos dissolvidos ou suspensos, bactérias, resíduos de emulsões, etc.

Os processos de membranas mais utilizados no tratamento de águas residuais são a microfiltração (MF), a ultrafiltração (UF), a nanofiltração (NF) e a osmose inversa (OI). A diferença entre estes processos de membranas reside nas diferentes capacidades de separação (rejeição) de cada um deles. Esta capacidade de rejeição é função do tamanho dos poros das membranas e do tamanho dos compostos, da sua carga elétrica e de outras propriedades. Um composto rejeitado é um composto (partícula, molécula, ião) que não consegue atravessar a membrana.

A principal força motriz para a aplicação de processos de membranas é o custo global do tratamento das águas residuais (usando um método alternativo), e não o custo da energia, embora os processos de membranas possam ter consumos energéticos 40 a 55% mais baixos que a evaporação. São também conseguidas poupanças adicionais ao nível dos custos operacionais, do consumo de água e da qualidade dos produtos.

O investimento e os custos de operação dependem fortemente da especificidade da aplicação e do local. Os custos de capital dos processos de membranas são relativamente elevados, mas podem ser menores que alguns processos de separação alternativos. Geralmente, nos sistemas de membranas, metade dos custos de capital são para os equipamentos (bombas, tubagens, etc.).

A reutilização de água tratada diminui os custos associados ao consumo de água e à sua descarga.



O tempo de vida útil de um sistema de membranas a operar corretamente excede facilmente os 10 anos.

8.6 FORMAÇÃO E SENSIBILIZAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS

A proposta e implementação de um sistema de gestão de energia com sucesso deve ter presente um processo de melhoria contínua (*Kaizen*) que vai depender diretamente de uma boa gestão dos recursos humanos envolvidos em toda a estrutura da empresa. O papel dos recursos humanos num sistema de gestão energética pode ser visto por um lado, nas medidas para a redução da produção de energia obtida a partir de fontes fósseis e do aumento da produção a partir de fontes renováveis e por outro, na diminuição do consumo de energia, independentemente da sua origem, para atingir os objetivos de desenvolvimento sustentável.

Ao nível processual, a era da informação (ou era tecnológica) contribuiu para o rápido desenvolvimento do *know-how* e de novas tecnologias, criando um problema no que toca à resposta a estas tecnologias, ou seja, os colaboradores de processos que envolvam consumos energéticos dificilmente usarão novas tecnologias se antes não tiverem formação ou preparação

adequada. Neste âmbito, a formação contínua e a implementação de modelos educativos viáveis e sustentáveis são medidas chaves para se alcançar um sistema de gestão de energia eficiente.

Um exemplo concreto está relacionado com a operação de caldeiras. O emprego de mão-de-obra de nível excessivamente baixo em instalações consumidoras intensivas de energia (p. ex., caldeiras) é uma atitude errada, representando uma falsa economia. Uma empresa deve sempre certificar-se de que os operadores conhecem os procedimentos operacionais corretos. De facto, o investimento em cursos para operadores de caldeira é uma medida com muito baixo tempo de retorno do investimento efetuado.

Finalmente, ao nível comportamental é essencial a sensibilização e formação dos recursos humanos para a utilização de energia de uma forma responsável, centralizando-se nos seguintes temas:

- Impactos ambientais da utilização de energia;
- Benefícios da economia de energia;
- Dependência energética da empresa e possíveis melhorias no desempenho energético;
- Atitudes cívicas individuais para economizar energia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Direção Geral de Energia e Geologia, "Indicadores Energéticos", 2016.
- [2] ADENE, "Consumo de Energia Primária", Maio 2016, <http://www.adene.pt/indicador/consumo-de-energia-primaria-ktep>, Acedido em Abril 2016.
- [3] PORDATA, "Consumo de Energia Primária", Maio 2016, <http://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+prim%C3%A1ria+total+e+por+tipo+de+fonte+de+energia-1130>, Acedido em Abril 2016.
- [4] Direção Geral de Energia e Geologia, "Energia em Portugal", 2016.
- [5] European Environment Agency, "Total greenhouse gas emissions trends and projections", Junho 2016, http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/greenhouse-gas-ghg-emission-trends-2#tabchart_1, Acedido em Abril 2016.
- [6] European Environment Agency, "Renewable energy in Europe 2016 - Recent growth and knock-on effects", 2016.
- [7] International Renewable Energy Agency, "Renewable Capacity Statistics 2016", 2016. http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2016.pdf, Acedido em Abril 2016.
- [8] European Environment Agency, "Energy Intensity", Outubro 2016, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/total-primary-energy-intensity-3/assessment>, Acedido em Abril 2016.
- [9] PORDATA, "Intensidade Carbónica da Economia", Outubro 2016, [http://www.pordata.pt/Europa/Intensidade+carb%C3%B3nica+da+economia+\(t+CO2eq+por+milh%C3%A3o+de+PPS\)-3276](http://www.pordata.pt/Europa/Intensidade+carb%C3%B3nica+da+economia+(t+CO2eq+por+milh%C3%A3o+de+PPS)-3276), Acedido em Abril 2016.
- [10] Associação Portuguesa de Energia, "O PNAEE 2016 e PNAER 2013-2020: Estratégias para a Eficiência Energética e Energias Renováveis", 2016.
- [11] Danish Ministry of Energy, Utilities and Climate, "Denmark's National Energy Efficiency Action Plan (NEEAP)", Abril 2014, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014_neeap_en_denmark.pdf, Acedido em Abril 2016.
- [12] Danish Energy Agency, "Energy in Denmark 2013", 2015.
- [13] Danish Energy Agency, "The Second Danish National Energy Efficiency Action Plan under Directive 2006/32/EC", Abril 2014, <http://www.buildup.eu/sites/default/files/content/DK%20-%20Energy%20Efficiency%20Action%20Plan%20EN.pdf>, Acedido em Abril 2016.
- [14] Department of Energy & Climate Change, "UK National Energy Efficiency Action Plan", Abril 2014, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014_neeap_united-kingdom.pdf, Acedido em Abril 2016.
- [15] ODYSSEE-MURE Project, "Energy Efficiency Trends and Policies in the United Kingdom", Setembro 2015, <http://www.odyssee-mure.eu/publications/national-reports/energy-efficiency-united-kingdom.pdf>, Acedido em Abril 2016.
- [16] Department of Energy & Climate Change, "Energy Consumption in the UK (2015)", Julho 2015, https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/ecuk_chapter_3_-_domestic_fact-sheet.pdf, Acedido em Abril 2016.

- [17] Ministério de Industria, Energia Y Turismo, "Energy Efficiency Trends and Policies in Spain", Setembro 2015, <http://www.odyssee-mure.eu/publications/national-reports/energy-efficiency-spain.pdf>, Acedido em Abril 2016.
- [18] Ministério de Industria, Energia Y Turismo, "La Energía en España 2014", 2014 http://www.minetad.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/La_Energ%C3%ADa_2014.pdf, Acedido em Abril 2016.
- [19] H. C. Becker, "Methodology and Thermo-Economic Optimization for Integration of Industrial Heat Pumps", École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2012.
- [20] ADENE, "Cursos de utilização Racional de Energia - Eficiência Energética na Indústria", Gaia, 2004.
- [21] EDP, "Soluções de Eficiência PME - Motores de Alto Rendimento".
- [22] A. ISR-UCoimbra, "Guia Técnico - Soluções para melhorar os sistemas acionados por motores elétricos," 2007.
- [23] Comissão Europeia/CEMEP, "Electric motor efficiency - Saving Europe's energy and environment", 2003.
- [24] A. T. de Almeida, F. J. T. E. Ferreira e D. Bock, "Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives With Electric Motor Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, pp. 188-199, 2005.
- [25] European Commission, "Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency", Fevereiro 2009, http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ENE_Adopted_02-2009.pdf, Acedido em Junho 2016.
- [26] ADENE, "Medidas de Eficiência - Indústria", <http://www.adene.pt/textofaqs/industria>, Acedido em Junho 2016.
- [27] ADENE, "Manual de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido", 2016.
- [28] P. Radgen e E. Blaustein, "Compressed Air Systems in the European Union – Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions", 2001, <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/x/de/publikationen/c-air/web-version.pdf>, Acedido em Junho 2016.
- [29] H. Feise, "Chemical Engineering and Chemical Process Technology - Handling of Solids", vol. II, UNESCO-EOLSS, 2010.
- [30] ACSI, <http://www.automatedconveyors.com/horizontal-powered/model-tsb>, Acedido em Junho 2016.
- [31] BraNorte, <http://mbranorte.com.br/loja/linha-fabrica-de-racao/transportador-helicoidal-chupim-linha-fabrica-de-racao/transportador-helicoidal/>, Acedido em Junho 2016.
- [32] N. Martin, E. Worrell, M. Ruth, L. Price, R. N. Elliott, A. M. Shipley e J. Thorne, Emerging energy - efficient industrial technologies, eScholarship - University of California, 2010.
- [33] Industrial Heating, "Improving Energy Efficiency with Recuperative and Regenerative Burners", <http://www.industrialheating.com/articles/92444-improving-energy-efficiency-with-recuperative-and-regenerative-burners>, Acedido em Junho 2016.
- [34] H. Tsuji, A. Gupta, T. Hasegawa, M. Katsuki, K. Kishimoto e M. Morita, High Temperature Air Combustion: From Energy Conservation to Pollution Reduction, CRC Press, 2002.
- [35] M. A. Boles e Y. A. Çengel, "Thermodynamics: An Engineering Approach", Seventh Edition ed., Mc Graw Hill, 2011.
- [36] S. G. Victoria, "Energy Efficiency Best Practice Guide: Industrial Refrigeration", Australia, 2009.
- [37] W. Stoecker, "Industrial Refrigeration Handbook", McGraw-Hill, 1998.
- [38] I. Dinçer e M. Rosen, "Thermal Energy Storage: Systems and Applications", Wiley, 2011.
- [39] H. Al Moussawi, F. Fardoun e H. Louahlia-Gualous, "Review of tri-generation technologies: Design evaluation, optimization, decision-making and selection approach", Energy Conversion and Management, vol. 120, pp. 157-196, 2016.
- [40] B. Lloyd, "7 Tips for cleaning heat exchangers", Process Heating, vol. 21, nº 5, 2014.

- [41] J. Klemes, "Handbook of Process Integration (PI) - Minimisation of Energy and Water use, Waste and Emissions", First Edition, Woodhead Publishing, 2013.
- [42] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, "Waste Heat Recovery: Technology and opportunities in U.S. Industry",
https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf, Acedido em Outubro 2016.
- [43] R. Kralikova, M. Andrejiova e E. Wessely, "Energy Saving Techniques and Strategies for Illumination in Industry", *Procedia Engineering*, vol. 100, pp. 187-195, 2015.
- [44] European Commission, "A Study on Energy Efficiency in Enterprises: Energy Audits and Energy Management Systems," Abril 2016.
- [45] Siteco, "Light solutions for industry",
http://www.siteco.com/fileadmin/downloads/application_brochures/1403_Application_Industry_en.pdf, Acedido em Novembro 2016.
- [46] ETAP lighting, "Dossier EN 12464-1", Junho 2012,
http://www.etaplighting.com/uploadedFiles/Downloadable_documentation/documentatie/brochures_ETAP_verlichting/Dossier%20EN%2012464-1_AT_PT_A4_lr.pdf, Acedido em Novembro 2016.
- [47] Lighting Analysts - Illumination Engineering Software,
<http://www.agi32.com/>, Acedido em Novembro 2016.
- [48] Visual,
<https://www.visual-3d.com/>, Acedido em Novembro 2016.
- [49] DIAL,
<https://www.dial.de/en/dialux/>, Acedido em Novembro 2016.
- [50] Energy Trust of Oregon,
<https://energytrust.org/library/GetDocument/3222>, Acedido em Novembro 2016.
- [51] Regulamento (CE) N° 244/2009 da Comissão de 18 de Março de 2009,
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0003:0016:PT:PDF>, Acedido em Novembro 2016.
- [52] DGEg,
<http://www.dgeg.pt/>, Acedido em Novembro 2016.
- [53] Autodesk Sustainability Workshop, "lighting operations & Maintenance",
http://www.iberdrola.pt/02sicb/gc/prod/pt_PT/aboutus/docs/MANuAl_BoAS_PRACTICAS.pdf, Acedido em Novembro 2016.
- [54] ISO 50001:2011 - Energy Management Systems - Requirements with guidance for use, 2011.
- [55] BSI group, "ISO 50001 - Features and Benefits",
<https://www.bsigroup.com/LocalFiles/en-GB/iso-50001/resources/ISO-50001-Features-and-Benefits-web.pdf>, Acedido em Novembro 2016.
- [56] ISO,
www.iso.org, Acedido em Novembro 2016.
- [57] ABB, "Industrial Smart Grid",
https://library.e.abb.com/public/18f20edbb8069e-5c1257b4a004a943c/Industrial%20Smart%20Grid_EN.pdf, Acedido em Novembro 2016.
- [58] "Energia: Primeira rede elétrica inteligente arranca hoje em Évora," *Expresso*, 6 Abril 2010.
- [59] HITACHI, "Smart Grid",
<http://www.hitachi.com/environment/showcase/solution/energy/smartgrid.html>, Acedido em Novembro 2016.

