



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

**Cogeração e Trigeração: Estudo das Tecnologias,
Enquadramento Jurídico e Aplicações à Indústria**

Hugo Emanuel Fino dos Santos Bicho

(Licenciado)

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM

Engenharia e Gestão Industrial

Orientador: Doutor João Paulo da Silva Catalão

Co-orientador: Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes

Agosto 2008

Dissertação realizada sob orientação de
Professor Doutor Eng.º João Paulo da Silva Catalão
e sob co-orientação de
Professor Doutor Eng.º Victor Manuel Fernandes Mendes

Respectivamente, Professor Auxiliar do
Departamento de Engenharia Electromecânica da
UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Professor-coordenador com Agregação do
Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação do
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

À Filipa Fonseca, aos meus Pais e aos meus irmãos

Resumo

Esta dissertação incide sobre as tecnologias de cogeração e trigeração, o correspondente enquadramento jurídico, e aplicações à indústria. É hoje possível através de diversas tecnologias de cogeração e trigeração obter melhorias na eficiência energética. As transformações no sector energético apontam para novos investimentos em sistemas de cogeração e trigeração, originando assim novos agentes de capital privado. Um caso de estudo, baseado na Indústria de Serração de Madeira e Mobiliário, é apresentado nesta dissertação.

Palavras-chave

Cogeração

Trigeração

Energia

Tecnologia

Ambiente

Abstract

This dissertation focuses on the technologies of cogeneration and trigeneration, the corresponding legal framework, and applications for industry. It is now possible through various technologies of cogeneration and trigeneration to achieve improvements in energy efficiency. The changes in the energy sector point to new investments in cogeneration and trigeneration systems, therefore creating new agents of private capital. A case study, based on the Wood and Furniture Industry, is presented in this dissertation.

Keywords

Cogeneration

Trigeneration

Energy

Tecnology

Environment

Agradecimentos

Ao Professor Doutor João Catalão, Professor do Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior, principal responsável como orientador científico, desejo expressar o meu maior agradecimento, pela motivação e orientação da presente dissertação, pelos ensinamentos que me transmitiu em consequência do seu vasto conhecimento, pelo espírito crítico e construtivo que me inculcou, pela disponibilidade e empenho e pela discussão na clareza do texto que proporcionou a realização deste trabalho de investigação e pela amizade e compreensão sempre demonstrada.

Ao Professor Doutor Victor Mendes, Professor Coordenador da Secção de Economia e Gestão no Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, desejo expressar o meu agradecimento pelo apoio e pelo privilégio de poder contar com a sua vasta experiência e distinção como co-orientador.

Ao Professor Doutor João Matias, Presidente do Departamento de Engenharia e Gestão Industrial, desejo expressar profunda gratidão pelo encorajamento inicial e incentivo em desenvolver esta dissertação, pelo apoio, disponibilidade, amizade e ajuda sempre presente em todas as situações.

Aos Docentes do curso de Engenharia da Produção e Gestão Industrial, desejo expressar o meu reconhecimento e gratidão por todos os ensinamentos ao longo do meu percurso académico que proporcionaram uma fácil integração no mercado de trabalho e que em muito contribuem para o meu sucesso profissional.

Ao Engenheiro Paulo Chong, desejo expressar o meu reconhecimento, pela sua colaboração, apoio e convivência amigável.

A toda a equipa TemaHome, desejo expressar o meu obrigado, pelo apoio demonstrado, em especial ao Engenheiro José Melo, Director de *Supply Chain* da empresa TemaHome, pela disponibilidade concedida, compreensão, amizade, incentivo

e *Know-how* que me tem transmitido e que tem contribuído em muito para o meu sucesso profissional e respectiva realização profissional, um sincero obrigado.

Uma dissertação de mestrado apesar do processo solitário a que qualquer investigador está destinado, reúne contributos de várias pessoas.

À Filipa Fonseca por todo o apoio, ajuda, lealdade, cumplicidade, amizade, paciência, sentido crítico e construtivo que em muito contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus Pais por todo o esforço, toda a motivação e pela confiança que depositaram em mim ao longo de toda a minha vida, a eles devo tudo aquilo que sou hoje.

Aos meus irmãos pelo incentivo e por todas as palavras de apoio e de amizade que fazem com que nunca baixe os braços na luta pelos meus objectivos.

Nada na vida se conquista sozinho. Precisamos sempre de outras pessoas para alcançar os nossos objectivos. Muitas vezes um simples gesto pode mudar a nossa vida e contribuir para o nosso sucesso.

Índice

Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	2
1.2 Motivação.....	3
1.3 Perspectiva histórica da investigação.....	4
1.4 Organização do texto.....	6
1.5 Notação.....	7
Capítulo 2 – Cogeração e Trigeriação.....	10
2.1 Introdução.....	11
2.2 Energia e alterações climáticas	13
2.3 Cogeração.....	19
2.4 Cogeração no sector terciário.....	24
2.5 Análise <i>swot</i>	26
2.6 Tecnologias de sistemas de cogeração.....	30
2.6.1 Turbina a gás.....	32
2.6.2 Turbina a vapor.....	37
2.6.3 Ciclo combinado.....	41
2.6.4 Motor alternativo de combustão interna.....	44
2.6.5 Pilhas de combustível.....	50
2.6.6 Micro turbinas.....	56
2.7 Tecnologias de sistemas de trigeriação.....	60
2.7.1 Frio por absorção.....	60
2.7.2 Tipos de <i>chillers</i> de absorção.....	62
2.7.3 Componentes do <i>chiller</i>	62
Capítulo 3 – Recuperadores de Calor.....	69
3.1 Tipos de recuperadores de calor.....	70
3.2 Recuperadores de calor de passagem simples.....	72
Capítulo 4 – Avaliação Técnico-Económica.....	73
4.1 Selecção do sistema.....	74

4.2	Análise económica.....	77
4.3	Cogeração e trigeriação em Portugal.....	78
4.4	Enquadramento jurídico.....	84
Capítulo 5 – Aplicações na Indústria.....		87
5.1	Aplicações na indústria.....	88
5.2	Caso de estudo.....	88
5.2.1	Empresa promotora.....	88
5.2.2	Introdução.....	89
5.2.3	Memória descritiva.....	89
5.2.4	Projecto das instalações eléctricas.....	93
5.2.5	Informação do operador da rede de SEP.....	93
5.2.6	Equipamento da central.....	93
5.2.7	Cálculos.....	105
5.2.8	Considerações sobre a exploração.....	106
Capítulo 6 – Conclusões.....		108
6.1	Síntese de estudo e conclusão.....	109
6.2	Perspectivas de desenvolvimento futuro.....	110
Referências Bibliográficas.....		112

Lista de Figuras e Tabelas

Fig. 2.1	Ilustração da potência total instalada na União Europeia em 2000-2007 em MW.....	11
Fig. 2.2	Ilustração da repartição de energia na UE em 1995 (Total 532GW).....	12
Fig. 2.3	Ilustração da repartição de energia na UE em 2007 (Total 775GW).....	12
Fig. 2.4	Ilustração das metas das energias renováveis.....	14
Fig. 2.5	Ilustração do potencial hídrico de Portugal.....	15
Fig. 2.6	Ilustração dos objectivos em termos de energia hídrica para 2020.....	16
Fig. 2.7	Ilustração dos níveis de crescimento da energia eólica na Europa.....	17
Fig. 2.8	Ilustração de um esquema de princípio do aproveitamento de calor num sistema de cogeração.....	20
Fig. 2.9	Ilustração de um esquema típico de representação – cogeração/trigeração....	21
Fig. 2.10	Ilustração da comparação entre tecnologias convencionais e cogeração.....	22
Fig. 2.11	Ilustração da comparação dos rendimentos de um sistema de cogeração e de um sistema convencional de produção separada de electricidade e calor.....	23
Fig. 2.12	Ilustração de unidades de cogeração utilizadas no sector terciário.....	25
Fig. 2.13	Ilustração do ponto de vista do cliente.....	27
Fig. 2.14	Ilustração do funcionamento típico de um sistema com turbina a gás.....	32
Fig. 2.15	Ilustração de uma turbina a gás usada na cogeração.....	34
Fig. 2.16	Ilustração de uma instalação industrial com quatro turbinas a gás (Virginia-EUA).....	35
Fig. 2.17	Ilustração de dois sistemas de turbina a gás (fábrica da cerveja Kaiser – Brasil).....	36
Fig. 2.18	Ilustração de um sistema de turbina a gás (fábrica da cerveja Brahma – Brasil).....	36
Fig. 2.19	Ilustração de um funcionamento base do sistema de cogeração com turbina a vapor.....	38
Fig. 2.20	Ilustração dos módulos de uma turbina a vapor.....	38
Fig. 2.21	Ilustração de turbinas a vapor usadas na cogeração.....	39
Fig. 2.22	Ilustração de uma instalação industrial onde se usam turbinas a vapor, de notar à esquerda caldeira de condensação, uma das maiores do Mundo (Matimba – África do Sul).....	40

Fig. 2.23 Ilustração de um esquema generalizado de um sistema de cogeração em ciclo combinado.....	41
Fig. 2.24 Ilustração da distribuição energética da cogeração em ciclo combinado.....	42
Fig. 2.25 Ilustração de uma instalação industrial com sistema em ciclo combinado, uma turbina a gás e uma turbina a vapor, com sistema de condensação na zona à direita (Reino Unido).....	43
Fig. 2.26 Ilustração de um esquema geral de funcionamento de um sistema de cogeração com motor alternativo.....	44
Fig. 2.27 Ilustração de um esquema geral de funcionamento de um sistema de cogeração com motor alternativo.....	46
Fig. 2.28 Ilustração dos diagramas (P,v) e (T,s) do ciclo Otto.....	47
Fig. 2.29 Ilustração das quatro etapas do ciclo Otto.....	47
Fig. 2.30 Ilustração dos diagramas (P,v) e (T,s) do ciclo Diesel.....	48
Fig. 2.31 Ilustração das quatro etapas do ciclo Diesel.....	48
Fig. 2.32 Ilustração de dois exemplares de motores que usam gás natural como combustível.....	49
Fig. 2.33 Ilustração de um esquema típico de representação de uma célula de combustível.....	51
Fig. 2.34 Ilustração de um esquema de representação de uma célula de combustível.....	52
Fig. 2.35 Ilustração de uma célula de combustível (à esquerda) e pilha de combustível (à direita).....	52
Fig. 2.36 Ilustração de pilhas de combustível.....	56
Fig. 2.37 Ilustração de um sistema de cogeração utilizando pilhas de combustível.....	56
Fig. 2.38 Ilustração de um esquema de um sistema microturbina (com um único veio).....	57
Fig. 2.39 Ilustração de sistemas de cogeração usados em microturbinas.....	58
Fig. 2.40 Ilustração de uma máquina de frio por absorção.....	61
Fig. 2.41 Ilustração de <i>chillers</i> de absorção.....	68
<hr/>	
Fig. 3.1 Ilustração de um recuperador de calor de tubo duplo.....	71
Fig. 3.2 Ilustração de um esquema de um recuperador de calor de fluxo cruzado.....	71
Fig. 3.3 Ilustração de um perfil de temperatura ao longo de um recuperador de calor de passagem simples do tipo co-corrente (a) e contra-corrente (b).....	72
<hr/>	

Fig. 4.1	Ilustração da distribuição da potência total instalada de cogeração em Portugal por tecnologia.....	79
Fig. 4.2	Ilustração da repartição da potência eléctrica total de trigeriação instalada no sector terciário português por subsector (100% = 26.3 MW).....	80
Fig. 4.3	Ilustração da potência eléctrica total de trigeriação instalada no sector terciário português por tecnologia de cogeração utilizada (100% = 26.3 MW).....	80
Fig. 4.4	Ilustração da distribuição dos sistemas de cogeração por tecnologia.....	83
Fig. 4.5	Ilustração da distribuição dos sistemas de cogeração por sector de actividade.....	84
<hr/>		
Tabela 2.1	Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de sistemas de cogeração..	28
Tabela 2.2	Características operacionais e custos típicos dos diferentes tipos de sistemas de cogeração.....	29
Tabela 2.3	Diferentes tipos de células de combustível.....	54
Tabela 2.4	Vantagens e desvantagens das pilhas de combustível em cogeração.....	55
Tabela 2.5	Comparativo das principais tecnologias utilizadas em cogeração.....	59
Tabela 2.6	Características dos <i>chillers</i> de absorção.....	67
<hr/>		
Tabela 4.1	Razão entre potência eléctrica e calor.....	74
Tabela 4.2	Lista de verificação.....	77
<hr/>		
Tabela 5.1	Cálculo de rendimentos eléctricos.....	91

-Capítulo 1-

Introdução

1.1 Enquadramento

Esta dissertação enquadra-se na temática de um dos grandes desafios que a humanidade tem de ultrapassar, que é a problemática das alterações climáticas e degradação do meio ambiente. É sabido que estes desafios estão intimamente relacionados com o consumo actual de energia e formas de a obter. Assim, quanto maior for o consumo energético, mais rapidamente se levará à extinção de várias matérias-primas e conseqüente crise ambiental.

De forma a ser possível um desenvolvimento sustentável, este aumento contínuo no consumo energético não se pode manter. Uma das formas de reduzir este consumo energético é a utilização de soluções construtivas projectadas de forma a tirar partido das condições ambientais e, assim, reduzir as necessidades de utilização de sistemas de aquecimento e arrefecimento. Os sistemas de cogeração e trigeração são portanto sistemas capazes de obter reduções energéticas, capazes de contribuir para a eficiência energética e conseqüentemente beneficiar o meio ambiente [12].

Face a um enquadramento favorável, aos elevados custos da electricidade que, então, se verificavam e à inexistência de alternativas de abastecimento, o que preocupava seriamente as empresas e, de um modo especial, as que competiam em países com custos energéticos mais baixos, levou a que, a partir de 1990, tivessem sido instaladas em Portugal 64 novas centrais de cogeração com motores Diesel, consumindo fuelóleo e totalizando uma potência adicional de aproximadamente 350 MW. Os sistemas de cogeração são sistemas complexos e de alta tecnologia, mas capazes de tornar as indústrias mais competitivas e mais amigas do ambiente [27].

A actividade da cogeração, em Portugal, passou a ter um enquadramento legal adequado, com uma estrutura transparente de remuneração e que reconhece inequívocamente os benefícios energéticos e ambientais para toda a produção de cogeração [33].

1.2 Motivação

A excessiva dependência em termos energéticos das sociedades actuais, e a preocupação crescente com os problemas ambientais, motivam a exigência pela implementação de sistemas energéticos com base em recursos de origem renovável, promovendo sistemas energéticos mais sustentáveis.

As conhecidas condicionantes energético/ambientais, a escassez, o elevado preço dos recursos energéticos tradicionais e os preocupantes problemas de poluição e alterações climáticas, em que vivemos há já alguns anos têm intensificado a procura de fontes de energia alternativa e o desenvolvimento de sistemas energéticos de elevada eficiência.

Uma das correntes que tem vindo a ser explorada é a do desenvolvimento de sistemas cogeração e trigeração [12].

A viabilidade prática do crescimento destas alternativas está dependente do desenvolvimento de tecnologia adequada às especificidades.

A adaptação destas soluções a equipamentos apesar de parecer simples não é do domínio comum e necessita de ser estudada. Constitui, portanto, objectivo deste trabalho o estudo das tecnologias de cogeração e trigeração, o enquadramento jurídico e as possíveis aplicações à indústria percebendo os benefícios no sector industrial tanto do ponto de vista técnico-económico como sócio-ambiental [27].

1.3 Perspectiva histórica da investigação

O quadro legal estabelecido na comunidade europeia com a directiva para a promoção da cogeração 2004/08/EC considera a produção descentralizada de electricidade e a cogeração como uma medida eficaz de eficiência energética. Apresenta como objectivo principal o crescimento da eficiência energética e da segurança no abastecimento, mediante a criação de um quadro para a promoção e o desenvolvimento da cogeração.

Contrariamente ao que se verifica com outras fontes de energia, os custos evitados pela cogeração são de imediato induzidos no sistema, podem traduzir-se em: menores capacidades suplementares necessárias para reserva e reforço, menores consumos de combustíveis, menores emissões de gases de efeito de estufa, maior segurança no abastecimento; e, provocando no SEN - Sistema Energético Nacional um menor esforço de gestão operacional e de investimento, reduzindo significativamente a dependência do exterior e evitando novos custos ambientais ao país.

As empresas com projectos de cogeração analisam as suas facturas energéticas significativamente reduzidas, o que contribui seriamente para a sua competitividade nacional e internacional.

Tratando-se de empresas das mais agressivas e das mais competitivas dos seus sectores, maioritariamente fortemente exportadoras, são muitos os desequilíbrios evitados que contribuem para a manutenção de milhares de postos de trabalho e para o desenvolvimento futuro do tecido empresarial nacional.

A eficiência energética está hoje consagrada como a primeira linha de força da estratégia global para o desenvolvimento sustentável. É preciso reduzir o crescimento da procura e depois, satisfazê-la utilizando, de forma crescente, recursos renováveis. E é por isso que a eficiência energética é uma das prioridades estratégicas a nível da UE - União Europeia visando uma redução nos consumos através da alteração do comportamento dos consumidores e da utilização de tecnologias de elevada eficiência [11].

A produção descentralizada de energia e designadamente a cogeração é, indiscutivelmente, reconhecida como uma medida eficaz de eficiência energética, com impactos positivos na competitividade da economia e no ambiente.

Esperando-se dela, um contributo imprescindível para o cumprimento de objectivos Nacionais e Comunitários de ordem ambiental.

Porque: “... Quando a competitividade dos países se coloca à dimensão global e se mede pela forma como enfrentam os problemas energéticos e ambientais, não é possível esquecer o papel da cogeração no suporte e no sucesso de uma qualquer estratégia de desenvolvimento sustentável para Portugal...” [8].

Por tudo isso, o que se pretende e exige é que o Novo Enquadramento Legal Português defenda melhor o que são as reais aspirações Nacionais: “... De redução na dependência energética do exterior, de um melhor aproveitamento nos recursos energéticos disponíveis e de uma maior sensibilização ambiental, através de mais significativa utilização de energias renováveis e de maior eficiência na produção de electricidade. Tomando-os como princípios básicos para conseguir um desenvolvimento sustentável do ponto de vista económico, social e ambiental...” [8].

1.4 Organização do texto

O texto da dissertação está organizado em seis capítulos. O Capítulo 2 é destinado ao estudo da cogeração e trigeriação, nomeadamente ao estudo das tecnologias, vantagens e desvantagens e análise das mesmas. O Capítulo 3 é destinado aos recuperadores de calor, ao estudo dos seus diferentes tipos e aos recuperadores de passagem simples, onde é explicado o seu funcionamento e ilustrados exemplos. O Capítulo 4 é destinado respectivamente à avaliação técnico-económica nomeadamente à selecção do sistema, selecção essa que deve ser feita de forma criteriosa dada a importância do estudo de selecção tanto do ponto de vista técnico como económico, é apresentada uma análise económica e feita uma abordagem do tema cogeração em Portugal, assim como o seu enquadramento jurídico. O Capítulo 5 é destinado, respectivamente, ao caso de estudo onde é feita na prática uma aplicação na indústria no sector das madeiras. O Capítulo 6 conclui a dissertação, onde se enuncia uma síntese do estudo e apresentam-se as principais conclusões que se extraíram da investigação desenvolvida sobre o tema. Apontam-se ainda algumas direcções em que pode ser desenvolvida investigação de interesse relevante relacionada com o tema desta dissertação.

1.5 Notação

As figuras e tabelas são apresentadas com referência ao capítulo em que surgem e são numeradas de forma sequencial no capítulo respectivo. A identificação de expressões é apresentada entre parênteses curvos (), e a identificação de referências bibliográficas é apresentada entre parênteses rectos []. Apresenta-se a seguir uma lista abreviada de definições dos símbolos utilizados no decorrer do texto. Não constitui preocupação que esta lista fosse exaustiva no que respeita aos símbolos utilizados, já que os mesmos são definidos aquando da sua introdução ao longo do texto.

Siglas:

AFC – *Alkaline Fuel Cell*

AP – Vapor quando o ar desce

APPEC – Associação Portuguesa de Produção de Energia e Cogeração

AQS – Águas Quentes Sanitárias

BP – Vapor quando o ar sobe

CE – Conselho Europeu

CFC – Clorofluorcarboneto

COGEN – Associação Portuguesa para a Eficiência Energética e Promoção da Cogeração

COP – Coeficiente de Desempenho

DGE – Direcção Geral da Empresa

DE – Decreto de Lei

EDP – Empresa Pública de Electricidade de Portugal

ER – Energias Renováveis

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

EUA – Estados Unidos da América

GN – Gás Natural

HCFC – Hidroclorofluorcarboneto

INR – Investimento Não Reembolsável

IR – Investimento Reembolsável

LED – *Light Emitting Diode*

MAPE – Medida de Aproveitamento do Potencial Energético

MCFC – *Molten Carbonate Fuel Cell*
ME – Ministério da Economia
MCI – Motor de Combustão Interna
MT – Média Tensão
O&M – Organização e Métodos
PAFC – *Phosphoric Acid Fuel Cell*
PCI – Poder Calorífico Inferior
PEFC – *Polymer Electrolyte Fuel Cell*
PEM – *Proton Exchange Membrane*
PIP – Pedido de Informação Prévio
PME – Pequenas e Médias Empresas
POE – Programa Operacional da Economia
PPP – Princípio do Poluidor Pagador
PR – Ponto de Recepção
PS – Posto de Seccionamento; PST – Posto Seccionamento e Transformação
PTC – Posto de Transformação a Construir
PTN – Plano Tecnológico Nacional
REE – Rendimento Eléctrico Equivalente
SEN – Sistema Eléctrico Nacional
SENV – Sistema Eléctrico Não Vinculado
SEP – Sistema Eléctrico Público
SIME – Sistema de Incentivos à Modernização Empresarial
SOFC – *Solid Oxide Fuel Cell*
TI – Tensão de Isolamento
TIR – Taxa Interna de Rentabilidade
UE – União Europeia
VAL – Valor Actual Líquido
WADE – *World Alliance for Decentralized Energy*

Símbolos/ Unidades SI:

Tai – Temperatura de entrada do fluido quente
Tao – Temperatura de saída do fluido quente
Tbi – Temperatura de entrada do fluido frio
Tbo – Temperatura de saída do fluido frio

MVA – Potência instalada
Scc – Potência de curto-circuito
PCIm – Poder calorífico inferior médio
Zccr – Impedância de rede
Zcct – Impedância do transformador
Zccg – Impedância do gerador
Icc – Contribuição do gerador
Isi – Intensidade máxima na interligação
Isg – Intensidade estipulada do gerador
 Ω - Ohm;
 ε – Eficiência
 $W_{\text{útil}}$ – Trabalho útil
 $Q_{\text{produzido}}$ – Energia térmica produzida
 Q_m – Energia térmica fornecida
A – Ampere; V – Volt; J – Joule
W – Watts; kW – kilowatts; MW – Megawatts; GW – Gigawatts
kVA – Potência
Hz – Hertz
kcal/h – kilocalorias por hora
 $^{\circ}\text{C}$ – Graus Celsius
bar – Unidade de pressão
Ton/h – Tonelada por hora
rpm – Rotação por minuto
m/s – Metro por segundo; s – Segundo
mm – Milímetros: mm^2 - Milímetros quadrados
CO – Monóxido de carbono; CO_2 – Dióxido de carbono; CO_3^{2-} - Trióxido de carbono
 CH_4 – Metano
 H_2 , H^+ - Hidrogénio composto
LiBr – Brometo de lítio
KOH – Hidróxido de potássio
 NH_3 – Amoníaco
NOH – Óxido de nitrogénio
 O^{2+} – Oxigénio composto
 SO_2 – Dióxido de enxofre

-Capítulo 2-

Cogeração e Trigeração

2.1 Introdução

A cogeração é a geração simultânea de múltiplas formas de energia útil, nomeadamente energia eléctrica e energia térmica, num sistema integrado, a partir de uma única fonte primária [1].

O acentuado desenvolvimento da cogeração durante os últimos anos deveu-se sobretudo aos méritos desta tecnologia ao nível da racionalidade de utilização de energia, da integração da produção de energia eléctrica e energia térmica, junto do local de consumo final, traduzindo-se tipicamente numa poupança de energia primária próxima dos 35%, com reflexos naturais ao nível da factura energética dos utilizadores [2].

Normalmente, as indústrias necessitam para os seus processos industriais de energia eléctrica e de energia térmica. Tipicamente estas indústrias recebem a energia eléctrica da rede nacional e utilizam o fuelóleo, a biomassa, o gás de petróleo liquefeito e, mais recentemente, em Portugal, o gás natural como fonte de energia térmica [3].

Na Fig. 2.1 podemos ver a potência total instalada na UE-União Europeia.

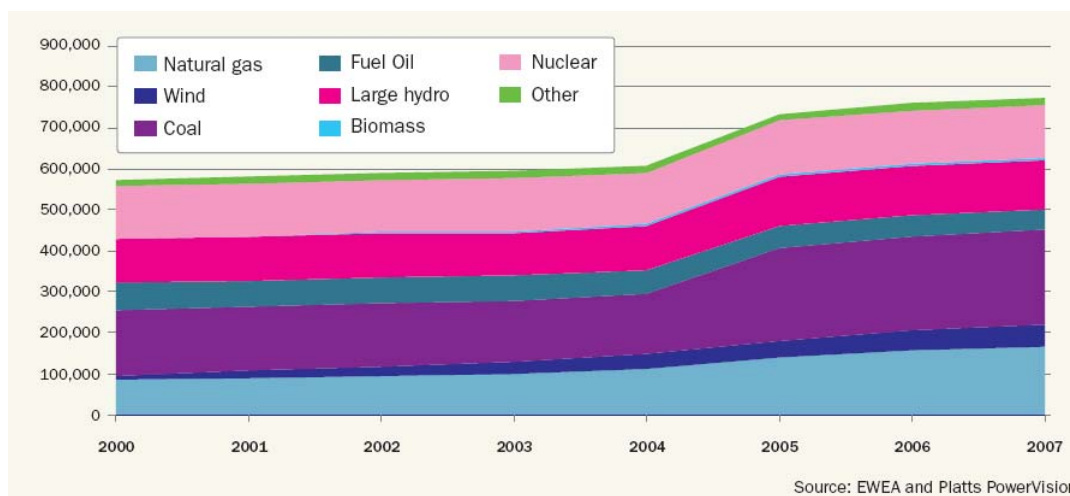


Fig. 2.1- Ilustração da potência total instalada na União Europeia em 2000-2007 em MW (imagem extraída de [7]).

Estas formas de energia são utilizadas para a produção de ar quente, de água quente, de vapor, sendo posteriormente efectuada a respectiva distribuição interna e utilização em recuperadores de calor, para a transferência de energia. Esta utilização das fontes

energéticas por vezes não é a mais eficiente, quer devido à forma como é processada a combustão, quer devido às enormes perdas provocadas pela própria distribuição.

Para muitos dos actuais processos produtivos, existem novas formas de utilização mais eficiente da energia, eliminando diversos factores intermédios, como é o caso da substituição de fluídos intermédios por queima directa, entre outras. De uma eficiente utilização da energia depende em muito a redução dos custos de exploração e das emissões poluentes para o meio ambiente [3-24].

A cogeração surge, assim, como uma tecnologia interessante ao garantir economias de energia e competitividade acrescida às empresas, e consiste basicamente na produção combinada de energia térmica e eléctrica num mesmo equipamento, destinando-se ambas ao consumo da própria empresa ou de terceiros, evitando ou atenuando a utilização de equipamentos próprios de produção de calor e aquisição de energia eléctrica à rede [3-14].

Na Fig. 2.2 e Fig. 2.3 podemos ver a comparação da produção de energia no ano de 1995 e 2007.

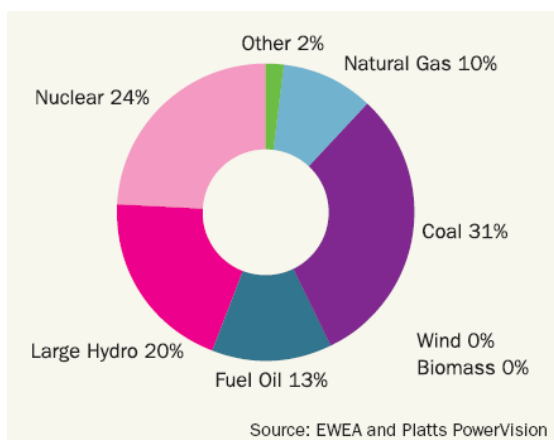


Fig.2.2 – Ilustração da repartição de energia na UE em 1995 (Total 532GW).
(imagens extraídas de [7]).

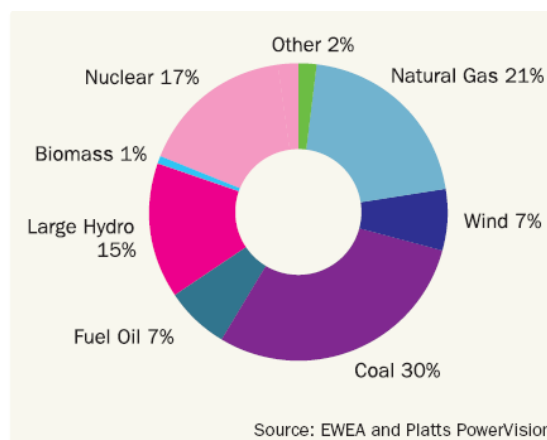


Fig.2.3- Ilustração da repartição de energia na UE em 2007 (Total 775GW).

2.2 Energia e alterações climáticas

A protecção do ambiente é um objectivo importante da UE. O actual nível de protecção do ambiente não é considerado suficientemente elevado e impõe-se redobrar esforços neste domínio. Tal deve-se nomeadamente ao facto de as empresas não tomarem em plena consideração os custos da poluição para a sociedade. Para suprimir esta deficiência do mercado e promover o reforço do nível de protecção do ambiente, os governos podem recorrer à regulamentação a fim de assegurar que as empresas suportem os custos inerentes à poluição que provocam (por exemplo, através de impostos ou sistemas de comércio de emissões) ou respeitem determinadas normas no domínio do ambiente.

Nalguns casos, podem igualmente justificar-se auxílios estatais a fim de incentivar as empresas privadas a investir mais na protecção do ambiente ou com o intuito de extinguir certas empresas de encargos financeiros relativamente elevados, tendo em vista a aplicação geral de uma política mais rigorosa no domínio do ambiente [4-16].

Cada vez mais as nossas sociedades modernas estão dependentes deste bem tão importante e escasso que é a energia. Contudo, a satisfação das nossas necessidades energéticas é feita à custa de energias convencionais como o petróleo, carvão e gás natural, as quais, embora abundantes, não são renováveis à escala humana, trazendo portanto consequências negativas para o meio ambiente. Surge então um novo conceito, designado por desenvolvimento sustentado [3-16].

Na Fig. 2.4 podemos ver as metas que se pretendem alcançar em todas as vertentes das energias renováveis.



Fig. 2.4 – Ilustração das metas das energias renováveis (imagem extraída de [5]).

O desenvolvimento sustentado consiste na utilização racional da energia e na satisfação das necessidades energéticas.

O recurso às energias renováveis e à produção centralizada de energia e calor, cogeração, é considerado uma prioridade, sendo hoje dedicados largos fundos e meios de investigação ao desenvolvimento da sua utilização [3].

Em anos hídricos normais, cerca de metade da energia eléctrica consumida pode ser de origem hídrica e a floresta nacional fornece, directamente ou através dos seus resíduos de biomassa, mais de 5% dos combustíveis consumidos [2].

Na Fig. 2.5 podemos ver o potencial hídrico por explorar em Portugal.

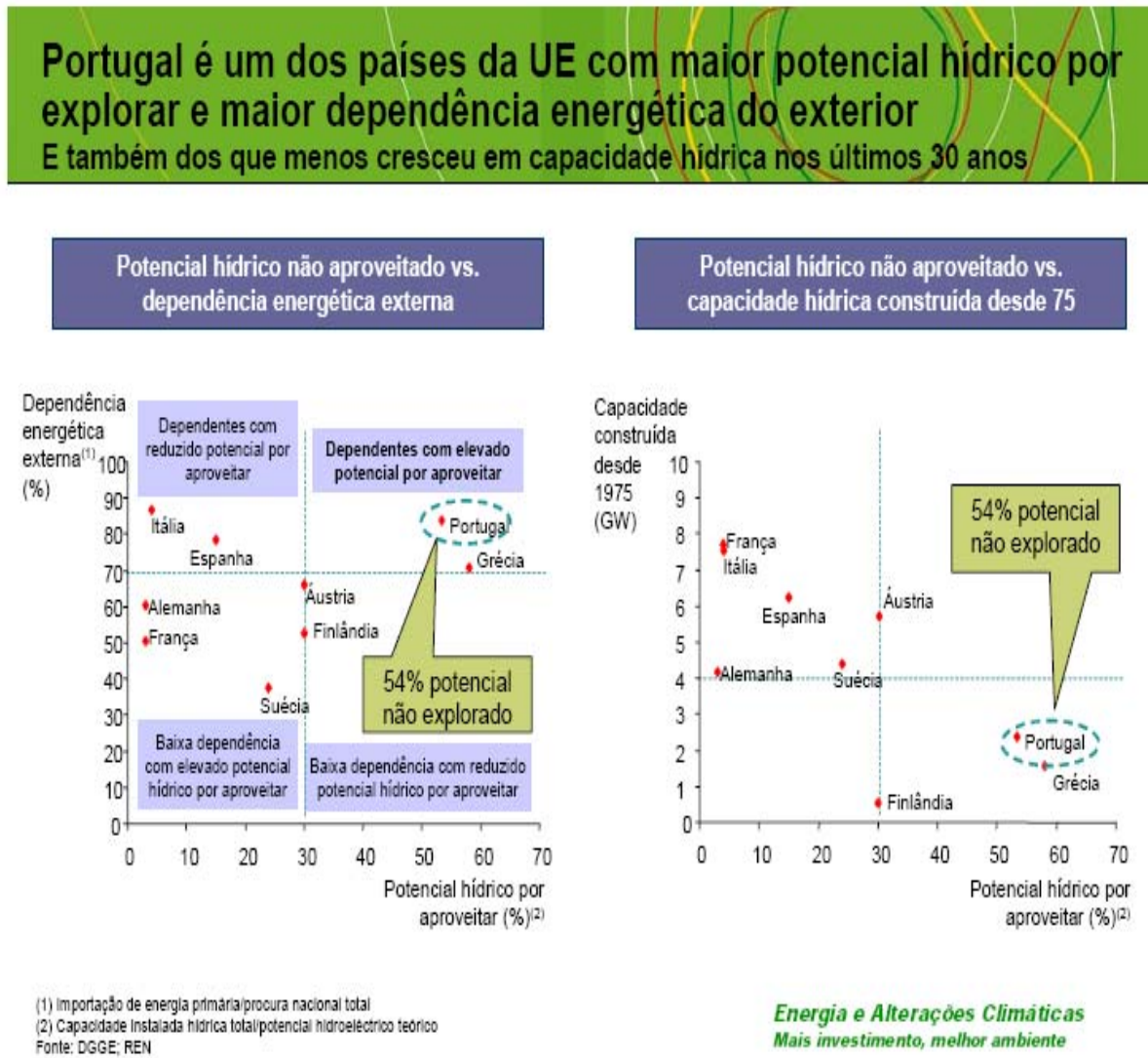


Fig. 2.5 – Ilustração do potencial hídrico de Portugal (imagem extraída de [5]).

Portugal tem condições para atingir e ultrapassar o objectivo de 45% de origens renováveis de energia, considerando o seu potencial hídrico e os produtos florestais disponíveis, mas atingir o objectivo de 45% de produção de energia por cogeração pode ser bem mais difícil se exigirem rendimentos de transformação da energia primária superiores aos da central do sistema electroprodutor com melhor rendimento [2].

Na Fig. 2.6 podemos ver os objectivos de Portugal em termos de energia hídrica para 2020.

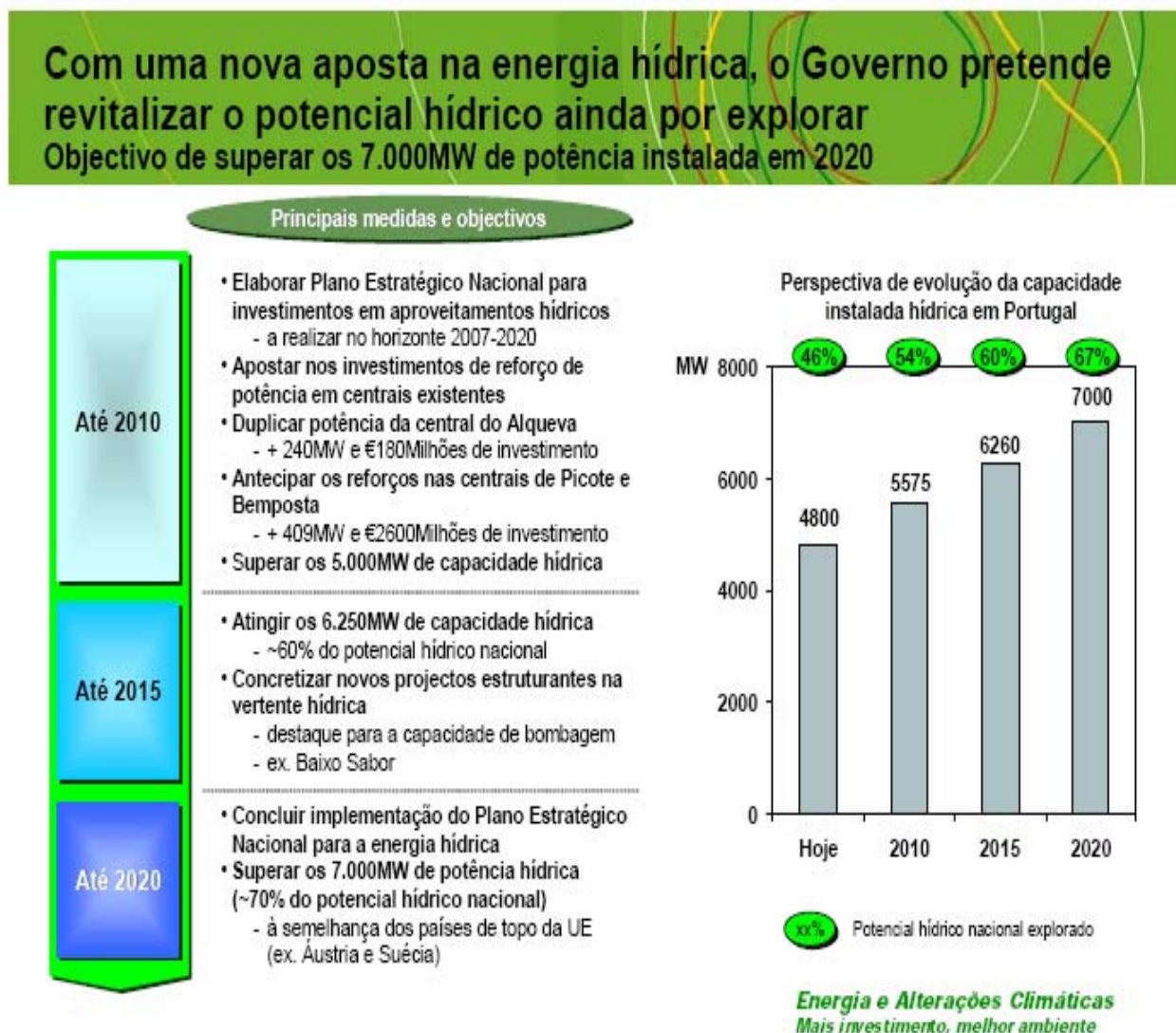


Fig. 2.6 – Ilustração dos objectivos em termos de energia hídrica para 2020 (imagem extraída de [5]).

A questão das alterações climáticas é, ao mesmo tempo, um desafio e uma oportunidade:

- É um desafio, porque foi necessário conjugar metas muito ambiciosas em termos de emissão de CO₂ por habitante (das mais baixas da UE) com a necessidade de deixar espaço para que se desenvolvam novos projectos industriais;
- É uma oportunidade, na medida em que pode criar de forma endógena uma oportunidade de crescimento para a nossa economia, pela via de mais investimento

e mais inovação. Neste sentido, a questão das alterações climáticas permite dar ainda mais força ao PTN-Plano Tecnológico Nacional [5].

Na Fig. 2.7 podemos ver os níveis de crescimento de energia eólica nos anos de 2005 e 2006 na UE.

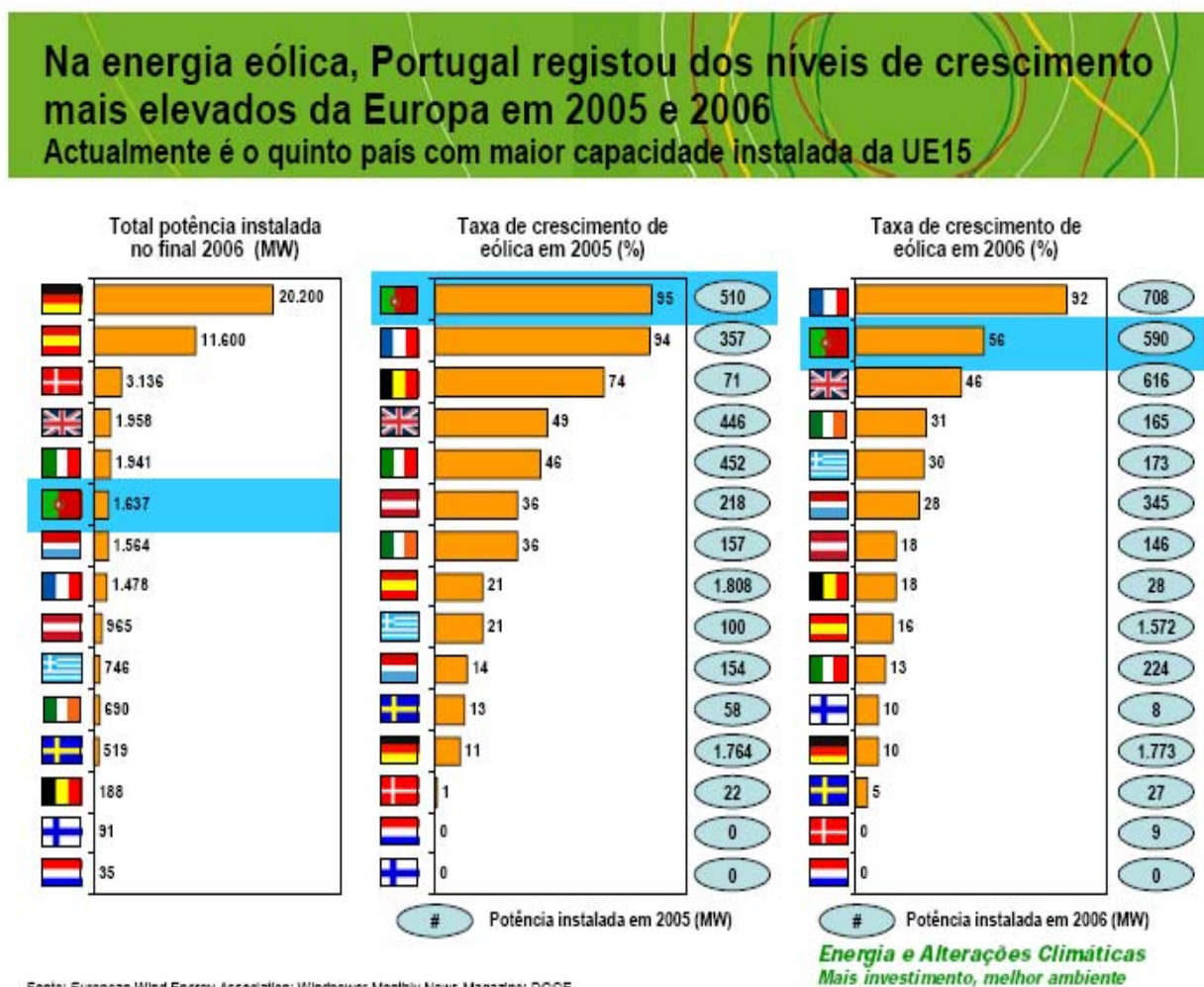


Fig. 2.7 – Ilustração dos níveis de crescimento da energia eólica na Europa. (imagem extraída de [5]).

A necessidade de controlar as alterações climáticas inspirou desde o início a estratégia nacional para a energia aprovada em Outubro de 2005. Esta estratégia tem como principais objectivos criar mais concorrência e promover a sustentabilidade ambiental. Os empresários estão conscientes desta realidade. De tal forma que o sector da energia é aquele em que se concentra um maior número de novos projectos de investimento. A aposta nas energias renováveis cria-nos uma grande exigência, por um lado, porque é necessário sermos capazes de controlar tecnologias que ainda não estão totalmente

estabilizadas, por outro lado, porque é necessário estabelecer um equilíbrio justo entre os incentivos dados aos produtores e a manutenção de taxas competitivas, o que requer gerir de uma forma dinâmica a oferta de energia e os custos gerais do sistema [5].

A nossa geração está perante um desafio difícil, tem a sua existência relativo bem-estar garantidos, mas sabe perfeitamente que está a tomar recursos de um modo excessivo e com risco das gerações futuras [2].

O CE-Conselho Europeu decidiu, em Março de 2007, fixar o objectivo de uma redução de 20% das emissões de gases com efeito de estufa e um objectivo obrigatório no sentido de a proporção das fontes de energia renovável representar 20% do consumo total de energia na UE até 2020.

No quadro do pacote de medidas no domínio da energia e das alterações climáticas, a comissão tem vindo a apresentar medidas políticas ambiciosas no que diz respeito, nomeadamente, às fontes de energia renovável e ao comércio de emissões. Para alcançar estes objectivos, o pacote de medidas introduz mecanismos de mercado que deverão garantir que os poluidores suportem os custos inerentes à poluição que provocam e ainda o apoio a tecnologias mais respeitadoras do ambiente. O novo enquadramento comunitário dos auxílios estatais a favor do ambiente constitui um vector importante do pacote de medidas destinado a criar os incentivos adequados para que os Estados-Membros e a indústria redobrem os seus esforços no domínio do ambiente [4].

Em primeiro lugar, ao preservar uma concorrência efectiva, o enquadramento apoia os instrumentos baseados no mercado, introduzidos pelo pacote de medidas. Sem uma concorrência efectiva, é evidente que não será possível atingir os objectivos visados. Se os poluidores não suportarem uma proporção suficiente dos custos e puderem eximir-se à realização dos investimentos adequados a favor do ambiente pelo facto de beneficiarem de auxílios estatais, tal não só distorcerá a concorrência, como comprometerá também a prossecução dos objectivos ambiciosos da União Europeia no domínio do ambiente[4-14].

Em segundo lugar, o enquadramento prevê diversas medidas que complementarão e apoiarão a realização do objectivo de uma maior protecção do ambiente. Podem verificar-se situações em que o PPP – Princípio do Poluidor Pagador não pode ser aplicado de forma adequada pelos Estados-Membros. Nesses casos, os auxílios estatais podem representar uma solução alternativa para responder a uma deficiência do mercado associada a externalidades negativas no domínio do ambiente. Os auxílios estatais podem permitir às empresas individuais alterar o seu comportamento e adoptar processos mais respeitadores do ambiente ou investir em tecnologias mais ecológicas [4-17]. Os auxílios

estatais podem igualmente permitir aos Estados-Membros adoptar regulamentações ou normas mais estritas que as normas comunitárias, reduzindo os encargos insustentáveis que recaem sobre algumas empresas. Tal pode facilitar a evolução no sentido da realização dos objectivos comunitários no domínio do ambiente.

Se os auxílios forem orientados de forma judiciosa, o enquadramento é muito favorável. Por exemplo, para a produção de energia renovável, os Estados-Membros dispõem da possibilidade de assegurar a cobertura a 100% dos custos suplementares incorridos pelas empresas [4].

2.3 Cogeração

Designa-se cogeração a qualquer sistema de produção de energia eléctrica em que seja aproveitada a energia térmica - calor, que lhe aparece associada sob a forma de água quente ou vapor, quer para um processo produtivo, aquecimento ou ar condicionado através de equipamento designado *chiller* de absorção [2].

As centrais termoeléctricas convencionais convertem apenas 1/3 da energia do combustível em energia eléctrica. O restante são perdas sob a forma de calor. O efeito adverso no ambiente derivado deste desperdício é significativo. Portanto, a necessidade de aumentar a eficiência do processo de produção de electricidade é imperativa [3-20].

Se, pelo menos, para os engenheiros, a utilização da electricidade é evidente, já o destino a dar ao calor que resulta da impossibilidade de converter totalmente em electricidade a energia contida numa fonte térmica (2ª Lei da Termodinâmica), pode ser menos óbvio. Como aplicações típicas deste tipo de sistemas, podem mencionar-se a indústria, com necessidades de calor no âmbito do processo industrial, e os edifícios, que possuem necessidades de calor para aquecimento [1,22-31].

A Fig. 2.8 mostra um esquema típico de aproveitamento do calor num sistema de cogeração, usando permutadores de calor intercalados nos circuitos de refrigeração e dos gases de exaustão da máquina térmica [1-9].

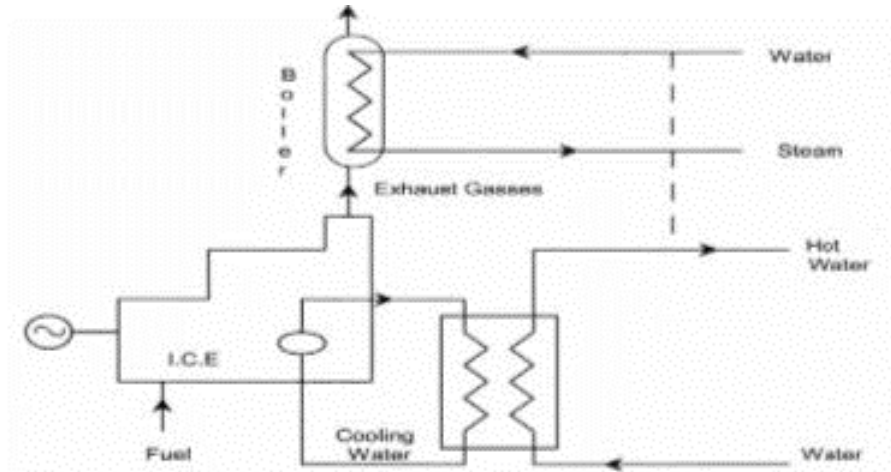


Fig. 2.8 – Ilustração de um esquema de princípio do aproveitamento de calor num sistema de cogeração (imagem extraída de [9]).

Um método para se conseguir isto é através da cogeração de energia eléctrica e calor, em que mais de 4/5 da energia do combustível é convertida em energia utilizável, resultando em benefícios financeiros e ambientais.

Cogeração pode ser então definida como um processo de produção e exploração consecutiva ou simultânea de duas fontes de energia, eléctrica e térmica, a partir de um sistema que utiliza o mesmo combustível permitindo a optimização e o acréscimo de eficiência nos sistemas de conversão e utilização de energia [2].

Na Fig. 2.9 podemos ver um esquema típico de cogeração/trigeração.



Fig. 2.9 – Ilustração de um esquema típico de representação – cogeração/trigeração (imagem extraída de [2]).

A energia térmica proveniente de uma instalação de cogeração pode, neste caso, ser utilizada para produzir frio, através de um ciclo de absorção. Este processo “alargado” de cogeração é conhecido por trigeração ou produção combinada de electricidade, calor e frio.

No sector terciário dos países com climas temperados, como é o caso de Portugal, as necessidades de calor confinam-se aos meses de Inverno. Contudo, nos meses de Verão, o calor pode ser aproveitado para produção de frio, usando um equipamento dedicado a conversão de calor em frio, chamado *chiller* de absorção [1].

A cogeração é um processo de produção de energia muito eficiente, possibilitando uma série de benefícios. A nível local, pode reduzir significativamente a factura energética do utilizador, enquanto que a um nível global reduz o consumo das reservas de combustíveis fósseis, conduzindo a uma redução significativa do impacto ambiental do uso destes mesmos combustíveis.

Substituindo o combustível fóssil pelo calor que normalmente é dissipado no processo de geração de energia, este sistema tem uma eficiência três, ou até mesmo quatro vezes superior ao convencional. Pode aplicar-se à indústria e aos edifícios onde há necessidades de energia eléctrica e energia térmica e, usualmente, em situações em que o número de horas anuais de operação seja superior a 4.500 horas [2-21].

Apesar de conhecida desde o início do século XX, a cogeração foi incrementada, nos EUA-Estados Unidos da América, em meados dos anos 80, quando a queda no preço do gás natural, apresentou-a como uma alternativa atractiva a novos sistemas de geração de energia. Na realidade, o sistema de cogeração é o responsável pelo declínio da construção de centrais nucleares [2-22].

Na Fig. 2.10 podemos ver o comparativo entre tecnologias convencionais e de cogeração.

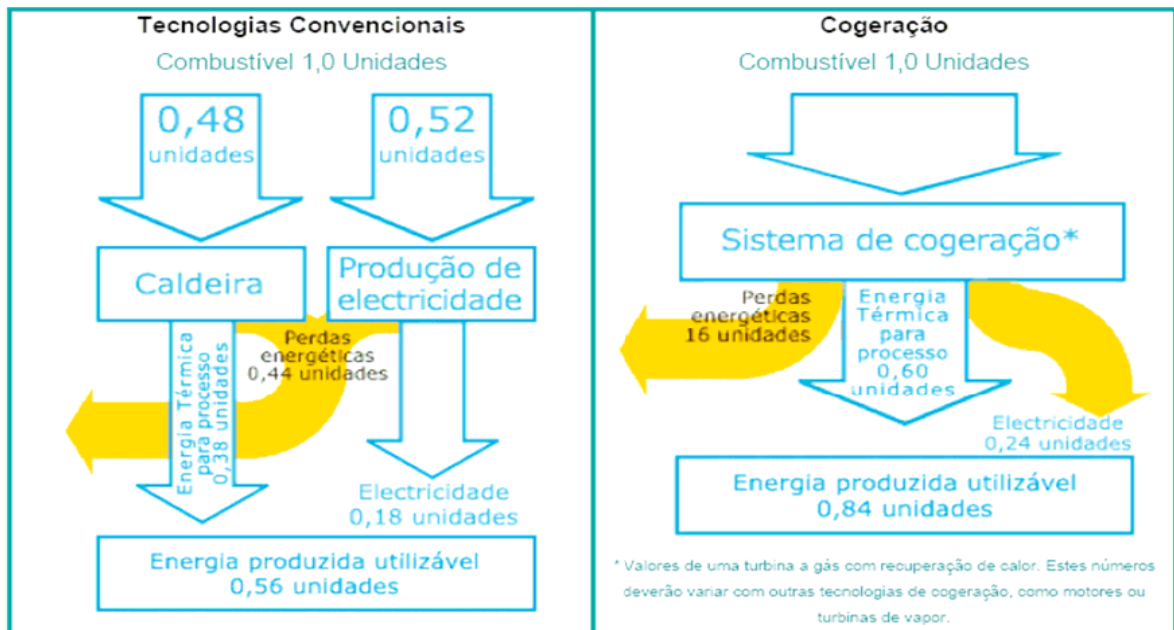


Fig. 2.10 – Ilustração da comparação entre tecnologias convencionais e cogeração (imagem extraída de [2]).

Um sistema de cogeração é mais eficiente que o tradicional sistema alternativo para obtenção do mesmo serviço de electricidade e calor, composto por um sistema gerador e por uma caldeira [1].

A Fig. 2.11 ilustra o acréscimo no rendimento global do processo.

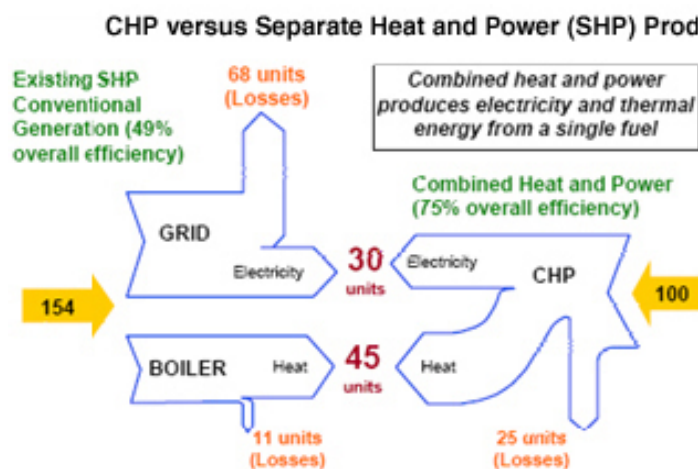


Fig. 2.11 – Ilustração da comparação dos rendimentos de um sistema de cogeração e de um sistema convencional de produção separada de electricidade e calor (imagem extraída de [1]).

Pode observar-se que, para obtenção do mesmo produto final, os sistemas de cogeração requerem apenas cerca de 70% da energia primária necessária num sistema tradicional. Como consequência deste ganho de eficiência, advêm benefícios ambientais significativos, decorrentes da diminuição das emissões poluentes por unidade de energia útil produzida [1].

Além do desempenho comprovado, a cogeração tem um carácter descentralizador, dada a necessidade de estar próxima da unidade consumidora. Assim, o impacto ambiental é reduzido, pois não existem linhas de transmissão extensas e suas conseqüentes infra-estruturas. Aliados aos distritos industriais, os sistemas de cogeração têm uma capacidade de reduzir a emissão de gases poluentes, evitando o efeito estufa, superior a qualquer outra tecnologia [2].

Para entender o conceito de cogeração é preciso saber que a maioria dos sistemas de produção de energia baseia-se na queima de óleos combustíveis para produção de vapor e é justamente a pressão desse vapor que torna as turbinas geradoras ineficientes. Por um princípio da física, não mais que 1/3 da energia potencial do óleo combustível poder ser convertida em vapor para produção de electricidade. Por outro lado, a cogeração utiliza-se do excesso de calor, usualmente na forma de vapor saturado extraído nas turbinas geradoras. Este vapor é adequado a uma enorme gama de aplicações e substitui,

com vantagem, a combustão de derivados de petróleo, com todas as suas implicações ambientais.

Como já foi dito anteriormente a cogeração consiste no aproveitamento do calor residual dos processos termodinâmicos, que de outra forma seriam desperdiçados. Assim, um processo de cogeração consiste em aproveitar o calor não convertido em energia mecânica, ou seja, perdas sob a forma de energia térmica do processo, para uma aplicação secundária. Definindo então desta maneira podemos dizer que a sua eficiência poderá ser dada pela equação: [2].

$$\varepsilon = \frac{\text{Trabalho útil produzido} + \text{Energia térmica produzida}}{\text{Energia térmica fornecida}}$$
$$\Leftrightarrow \varepsilon = \frac{W_{\text{útil}} + Q_{\text{processo}}}{Q_{\text{in}}} \quad (1)$$

2.4 Cogeração no sector terciário

Características de utilização de cogeração:

- Necessidades simultâneas e contínuas de energia térmica e energia eléctrica;
- Disponibilidade de combustíveis de qualidade;
- Período de funcionamento de pelo menos 4.500-5.000 horas por ano;
- Espaço suficiente e uma adequada localização para a implementação do novo equipamento;
- Calor residual disponível de elevada qualidade.

Estas características encontram-se frequentemente na indústria. Contudo, no sector terciário, se bem que o seu uso possa ser razoavelmente intensivo, um grande número de horas por ano, não se verifica uma relação muito estreita entre o consumo de energia e o tipo de actividade, dependendo aquele mais das condições climatéricas [3].

As principais necessidades de energia térmica são para aquecimento, ventilação e ar condicionado e em menos extensão como vapor e água quente para várias utilizações, tais como lavandarias, cozinhas e esterilização [2].

O principal potencial de cogeração neste sector verifica-se em hospitais, hotéis, centros de desporto, edifícios de escritórios, centros comerciais e sistemas de redes urbanas de calor. A escolha da tecnologia de cogeração mais apropriada depende de um conjunto de factores, tais como a razão calor/electricidade, os níveis de temperatura da energia térmica necessária, a disponibilidade de combustível e as flutuações das necessidades térmicas. Os motores alternativos e as micro-turbinas a gás, conjuntamente com *chillers* de absorção, são as tecnologias actualmente mais utilizadas em sistemas de trigeriação no sector terciário [3-21].

Na Fig. 2.12 podemos ver algumas unidades de cogeração utilizadas no sector terciário.



Fig. 2.12 – Ilustração de unidades de cogeração utilizadas no sector terciário (imagem extraída de [3]).

2.5 Análise *swot*

No sector terciário a cogeração/trigeração já provou ser uma solução adequada para uma vasta gama de tipos de edifícios, nomeadamente hotéis, hospitais, centros de lazer, piscinas, escolas, universidades, aeroportos, hipermercados e centros comerciais.

As vantagens específicas são:

- Economias de energia primária: a implementação bem sucedida de cogeração e trigeração conduz a uma redução do consumo de combustível em aproximadamente 25% comparativamente à produção convencional de energia eléctrica.
- Redução de emissões poluentes: a redução da poluição atmosférica segue a mesma proporção. Com a utilização de gás natural em vez de combustíveis derivados do petróleo ou carvão, as emissões de SO₂ e partículas são reduzidas a zero.
- Benefícios económicos: as vantagens para o utilizador final também são económicas. Os custos energéticos das instalações de trigeração são menores do que os das instalações ditas convencionais. O título indicativo pode dizer-se que a redução de preços é da ordem dos 20-30%.
- Aumento da fiabilidade do aprovisionamento energético: pequenas centrais de cogeração de energia eléctrica e calor ligadas à rede eléctrica, garantem uma operação ininterrupta da instalação, no caso de falha do funcionamento da central ou do abastecimento da rede. Ao nível nacional favorecem a produção descentralizada, reduzindo a necessidade de grandes centrais termoeléctricas. Contribuem também para o aumento do emprego a nível local.
- Aumento de estabilidade do sistema eléctrico: as unidades de trigeração beneficiam as redes do sistema eléctrico durante os meses quentes de verão. Cargas de arrefecimento são transferidas da electricidade para um combustível fóssil, uma vez que o processo de arrefecimento/refrigeração muda dos utilizados ciclos de compressão de vapor para os de absorção. Isto contribui ainda para o aumento da estabilidade das redes eléctricas e para a melhoria da eficiência do sistema, pelo que, os picos de verão são servidos pelas empresas eléctricas distribuidoras através de unidades de apoio ineficientes e linhas de transporte de energia eléctrica sobrecarregadas [2-23].

Na Fig. 2.13 podemos ver o eventual ponto de vista do cliente relativamente a um sistema de cogeração.



Fig. 2.13 – Ilustração do ponto de vista do cliente (imagem extraída de [2]).

Na Tabela 2.1 podemos ver as vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de sistemas de cogeração.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Turbina a gás	<p>Fiabilidade elevada Emissões poluentes baixas Calor a temperaturas elevadas (500-600°C) Não necessita de refrigeração</p>	<p>Operação com gás a alta pressão Rendimento reduzido a carga parcial Potência de saída diminui com o aumento da temperatura ambiente. Ineficiente em processos com poucas necessidades térmicas.</p>
Motores de explosão Motores de compressão interna	<p>Rendimento eléctrico elevado. Bom desempenho com carga parcial. Arranque rápido. Energia térmica a dois níveis de temperatura-gases de gases de escape e arrefecimento do motor. Manutenção no local com pessoal não especializado. Operação com gás a baixa pressão.</p>	<p>Custos de manutenção elevado. Calor de baixa temperatura. Emissões poluentes relativamente elevadas. Necessita de refrigeração. Ruído de baixa frequência.</p>
Turbinas a vapor	<p>Rendimento global elevado. Operação com diversos tipos de combustível. Grandes quantidades de calor disponíveis. Vida útil e fiabilidade elevadas. Vapor a alta pressão.</p>	<p>Arranque lento. Rendimento eléctrico baixo.</p>
Microturbinas	<p>Dimensões compactas. Peso reduzido. Emissões poluentes baixas. Não necessita de refrigeração.</p>	<p>Custos elevados. Calor de baixa temperatura. Tecnologia em maturação.</p>
Pilhas de combustível	<p>Emissões poluentes baixas. Ruído baixo. Não tem peças rotativas. Modularidade.</p>	<p>Custos elevados. Fiabilidade incerta. Tecnologia em maturação. Necessidade de pré-processamento do combustível (excepto H puro).</p>

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de sistemas de cogeração (extraída de [1]).

Na Tabela 2.2 podemos ver as características e custos típicos dos diferentes tipos de sistemas de cogeração.

Tecnologia	Turbinas a gás	Motores de explosão a GN	Motores de compressão interna	Turbinas a vapor	Microturbinas	Pilhas de combustível
Rendimento eléctrico	15%-35%	22%-40%	25%-45%	10%-40%	18%-27%	35%-40%
Rendimento térmico	40%-60%	40%-60%	40%-60%	40%-60%	40%-60%	20%-50%
Rendimento global	60%-85%	70%-80%	70%-85%	80%-85%	55%-75%	55%-90%
Potencia típica (MWe)	0.2-100	0.05-5	0.015-30	0.5-100	0.03-0.35	0.01-0.25
Relação Pt/Pe	1.25-2	0.4-1.7	0.4-1.7	2-10	1-2.5	1.1
Desempenho com carga parcial	Mau	Médio	Bom	Bom	Médio	Muito bom
Investimento (€/kWe)	600-800	700-1400	700-1400	700-900	1300-2500	>2500
O&M (€/MWe)	2-7	7-15	6-12	3	10(estimativa)	2-12
Disponibilidade	90%-98%	92%-97%	92%-97%	99%	90%-98%	>95%
Revisões (h)	30.000-50.000	24.000-60.000	25.000-30.000	>50.000	5.000-40.000	10.000-40.000
Arranque	10m-1h	10s	10s	1h-1dia	1m	3h-2dias
Pressão do combustível (bar)	8-35	0.07-3.1	<0.35	NA	3-7	0.03-3
Combustíveis	GN, bio gás, propano	GN, bio gás, propano	Diesel, óleo residual	Todos	GN, bio gás, propano	Hidrogénio, GN, propano, metanol
Ruído	Médio	Alto	Alto	Alto	Médio	Baixo
Uso do calor	Água quente, vapor AP e BP	Água quente, vapor BP	Água quente, vapor BP	Vapor de AP e BP	Água quente, vapor BP	Água quente, vapor BP
Densidade de potência	20-500	35-50	35-50	>100	5-70	5-20
NOx (Kg/MWh total)	0.2-2	0.5	1-14	0.9	0.07	0.01

Tabela 2.2 – Características operacionais e custos típicos dos diferentes tipos de sistemas de cogeração (extraída de [2-16]).

2.6 Tecnologias de sistemas de cogeração

A parte fundamental de uma instalação de cogeração é a máquina que produz electricidade e energia térmica. Esta máquina caracteriza a instalação ou central de cogeração. A segunda parte mais importante é o aparelho que produz frio, no caso de trigeração, utilizando a energia térmica do processo de cogeração, *chiller* de absorção. Esses dois componentes serão aqui apresentados em separado [2].

As soluções tecnológicas que hoje em dia equipam as centrais de cogeração podem ser divididas em dois grandes grupos, de acordo com o grau de maturidade, desenvolvimento tecnológico e expansão comercial em que se encontram:

- Turbina de Gás (ciclo de Brayton);
- Turbina de Vapor (ciclo de Rankine);
- Ciclo Combinado;
- Motor alternativo de Combustão Interna (ciclo Diesel ou Otto);
- Pilhas de Combustível;
- Micro-turbinas [1-2].

As primeiras quatro tecnologias supra mencionadas, ditas convencionais, usam turbinas ou motores alternativos de combustão interna. Têm sido aplicadas adequadamente em instalações de cogeração nas últimas décadas. As tecnologias de pilhas de combustível e micro-turbinas, ditas emergentes estão ainda numa fase de desenvolvimento e início de comercialização. Todas estas máquinas motrizes e sistemas têm sido continuamente desenvolvidas e produzidas por empresas europeias durante muitas décadas [2-21].

Para trigeração, os tipos mais aplicados são os motores de combustão interna, muitas das vezes em grupos de mais do que um para fazer face à variação de cargas. As turbinas de gás são utilizadas em grandes complexos de edificios, tais como, hospitais ou redes urbanas de calor e frio. As turbinas de vapor não são utilizadas no sector terciário [2-32].

As pilhas de combustível são ideais para operação no sector terciário, devido ao seu funcionamento eficiente e silencioso. Actualmente o seu custo de produção é demasiado elevado para permitir a sua implementação no mercado, no entanto espera-se que tal venha a ocorrer dentro de poucos anos. A outra vantagem fundamental deste sistema,

reside nos subprodutos da operação, nomeadamente o hidrogénio. Este pode ser utilizado como meio de armazenamento de energia, criando um tampão entre as necessidades energéticas e a produção. Isto é importante para o aumento do rendimento global, e para o factor de utilização da instalação de cogeração /trigeração.

Uma tecnologia mais recente, sob intensa investigação durante os anos mais recentes, é as micro-turbinas. Esta investigação tem tido lugar principalmente nos EUA, para o desenvolvimento das tais turbinas, dando ênfase à sua aplicação em veículos e em instalações de cogeração. Como seria de esperar nesta fase, o rendimento é baixo e o preço elevado. A UE não tem empreendido investigação significativa no desenvolvimento desta tecnologia.

As referidas tecnologias mais importantes disponíveis no mercado para cogeração são agora descritas com algum detalhe [2].

A conversão de energia nas centrais convencionais a carvão ou a fuel realiza-se de acordo com o ciclo de Rankine, em que o fluido de trabalho, a água, muda de fase ao longo do ciclo termodinâmico. Existem outros equipamentos de conversão, designadamente motores de explosão, motores Diesel, turbinas de gás, que se caracterizam por possuir um gás como fluido de trabalho. Contudo, o fluido de trabalho vai sofrendo uma mudança na sua composição à medida que o ciclo vai sendo percorrido: o fluido de trabalho começa por ser o ar, ao qual, durante o processo de combustão, é adicionado o combustível, transformando-se numa mistura de ar e combustível, designada por produto da combustão [1-32].

Esta é a razão porque estes equipamentos de conversão se designam de combustão interna, ao contrário dos primeiros que são de combustão externa porque o calor é transferido dos produtos da combustão para o fluido de trabalho que é sempre o mesmo. Nas máquinas térmicas de combustão interna o fluido de trabalho não percorre um ciclo termodinâmico fechado, operando em ciclo aberto. Contudo, na perspectiva da análise do seu funcionamento recorrendo a ciclos termodinâmicos, é conveniente trabalhar com ciclos fechados que aproximam os ciclos abertos reais.

Uma das aproximações mais usadas é o ciclo do ar-padrão, o qual é baseado nas seguintes hipóteses simplificativas:

- O fluido de trabalho é sempre o ar, considerado como um gás ideal. Consequentemente não se consideram os processos de admissão e de exaustão do ar.
- O processo de combustão é substituído por um processo de transferência de calor de uma fonte externa.

- O ciclo é completado por uma transferência de calor para o exterior, ao contrário do que se passa na realidade em que há rejeição de gases de escape e admissão de novo ar.
- O ar do processo é considerado como tendo um calor específico constante. Reconhece-se que a análise conduzida da forma que foi exposta é uma análise aproximada do funcionamento das máquinas térmicas de combustão interna. Embora as conclusões qualitativas sejam válidas, os resultados quantitativos devem ser encarados com precaução [1].

2.6.1 - Turbina a gás

Basicamente uma turbina a gás consiste em um tipo de motor térmico onde é produzido trabalho a partir de um fluxo contínuo de gases quentes, provenientes da combustão contínua de um combustível.

Este sistema de turbina a gás é actualmente muito usado nas instalações onde há necessidade de calor residual para o processo ou de uma grande quantidade de electricidade obtida em sistemas de cogeração que dispõem de gás natural [3].

Na Fig. 2.14 podemos ver o funcionamento típico dum sistema com turbina a gás.

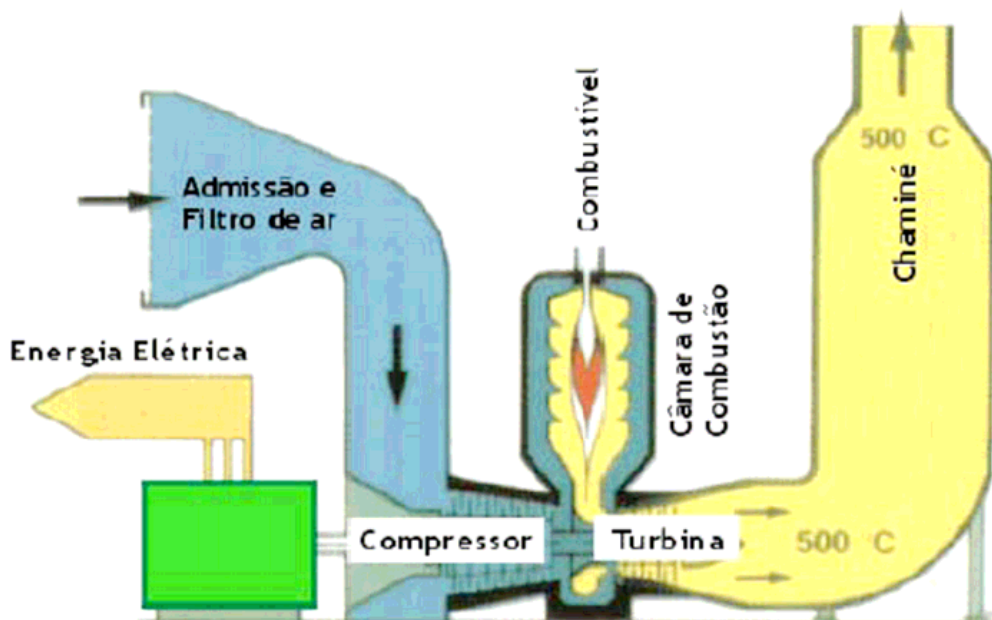


Fig. 2.14 – Ilustração de um funcionamento típico de um sistema com turbina a gás (imagem extraída de [3]).

O sistema de Turbina a Gás, tal como se pode verificar na Fig. 2.14, é constituído pelos seguintes elementos:

- Sistema de admissão de ar;
- Dispositivo de compressão do ar (compressor);
- Câmara de combustão;
- Turbina de expansão;
- Sistema de exaustão [3].

Quanto ao funcionamento deste tipo de turbinas pode dizer-se que, neste tipo de sistema, o ar atmosférico é continuamente puxado pelo compressor, onde é comprimido para alta pressão e posteriormente direccionado para a câmara de combustão. O ar comprimido entra na câmara de combustão (ou combustor), onde é misturado com o combustível respectivo, de modo a ocorrer a combustão, resultando num fluxo contínuo de ar de elevada temperatura e energia, gás de combustão. Os gases provenientes da combustão são direccionados para a turbina, ver Fig. 2.14, onde se expandem, extraindo assim a sua energia intrínseca. Esta expansão na turbina permite accionar, o compressor de ar e o dispositivo mecânico acoplado, que normalmente é um gerador eléctrico.

Com vista a maximizar a eficiência do sistema, o excesso de ar comprimido que não foi usado na combustão, ar que não chegou a ser misturado ao combustível, é normalmente usado no arrefecimento dos componentes das áreas quentes da turbina de gás. O fluxo de ar usado na refrigeração do sistema é misturado aos gases de combustão expandidos na turbina, sendo de seguida dirigidos para o sistema de exaustão. Estes gases de exaustão, devido ao facto de serem relativamente limpos e pouco húmidos, podem ainda ser aproveitados para processos de secagem industrial e para a produção de vapor de média pressão com vista ao accionamento de um *Chiller* de absorção, ou ainda para pré-aquecer o ar de combustão [3-28].

Na Fig. 2.15 podemos ver uma turbina a gás usada na cogeração.

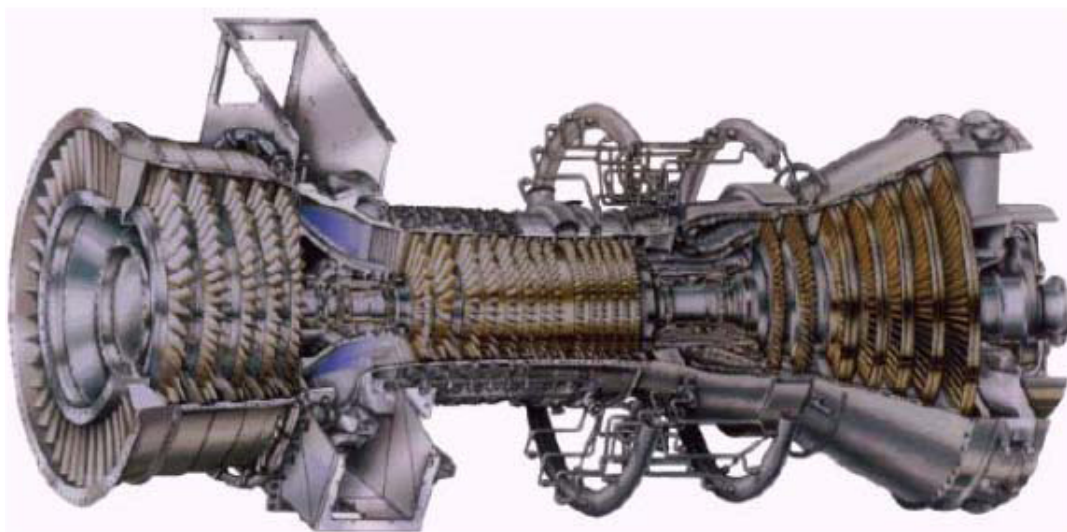


Fig. 2.15 – Ilustração de uma turbina a gás usada na cogeração (imagem extraída de [3]).

Quanto à eficiência energética deste tipo de sistema, pode considerar-se que é elevada. No entanto o uso de turbinas a gás na cogeração proporciona uma eficiência global de aproximadamente 80% que se pode justificar do seguinte modo: da energia total intrínseca ao combustível utilizado na combustão, cerca de 30% é convertida em energia mecânica, aproximadamente 50% encontra-se contida nos gases de exaustão, que são expulsos a temperaturas da ordem dos 500-600 °C, parte da restante energia, cerca de 20%, é absorvida pelo sistema de refrigeração e perdida no meio ambiente.

A obtenção de elevadas performances neste tipo de sistemas traz problemas mecânicos acrescidos, e a necessidade da realização de um estudo apurado da constituição dos componentes do sistema. Este facto explica-se, uma vez que a performance é directamente proporcional à temperatura de trabalho e às altas relações de compressão.

O facto de se trabalhar com temperaturas elevadas e altas pressões implica o uso de materiais mais sofisticados, e a implementação de sistemas mais complexos, de modo a maximizar o rendimento do sistema [3].

Em relação a aplicações desta tecnologia podemos referir que este tipo de cogeração é habitualmente usado em sistemas de média e grande dimensão, onde são exigidas potências entre os 40kW e os 250MW, e em que as exigências de energia são constantes [28].

Das diversas aplicações pode-se destacar:

- Sector alimentar;
- Sector petroquímico;
- Sector do papel [2-28].

Na Fig. 2.16 podemos ver uma instalação industrial com quatro turbinas a gás.



Fig. 2.16 – Ilustração de uma instalação industrial com quatro turbinas a gás, Virgínia – EUA (imagem extraída de [2]).

A título de exemplo de uma indústria inserida no sector alimentar, pode-se referir a indústria da cerveja. Na Fig. 2.17 encontra-se um sistema de duas turbinas a gás com uma potência de 5.2 MW cada (10.4 MW total) utilizado numa fábrica de cerveja no Brasil. Na Fig. 2.18 o sistema é constituído por três turbinas de 4.9 MW cada, totalizando 14.7 MW de energia produzida [2].

Na Fig. 2.17 podemos ver dois sistemas de turbina a gás numa unidade fabril no Brasil.



Fig. 2.17 – Ilustração de dois sistemas de turbina a gás, fábrica de cerveja Kaiser - Brasil) (imagem extraída de [2]).

Na Fig. 2.18 podemos ver um sistema de turbina a gás numa outra unidade fabril também no Brasil.



Fig. 2.18 – Ilustração de um sistema de turbinas a gás, fábrica de cerveja Brahma - Brasil) (imagem extraída de [2]).

Tal como todos os sistemas, o uso da turbina a gás tem vantagens e desvantagens, das quais se destacam as seguintes:

Vantagens:

- Manutenção simples (menores tempos de paragem);
- Elevada fiabilidade;
- Baixa poluição ambiental;
- Não necessita de vigilância permanente;
- Disponibiliza energia térmica a temperaturas elevadas (500 a 600°C);
- Unidades compactas e de pequeno peso;
- Arranque rápido;
- Baixo nível de vibrações.

Desvantagens:

- Limitado a nível de variedade de combustível consumido;
- Tempo de vida útil curto;
- Ineficácia em processos com poucas necessidades térmicas;
- Necessidade de uso de dispositivos anti-poeiras/sujidade, anti-corrosão (em especial em casos de pausas de funcionamento prolongado) [2].

2.6.2 Turbina a vapor

A utilização de turbinas a vapor é a opção tecnológica mais difundida em indústrias e em sistemas de rede de calor. O vapor na faixa de 20 a 100 bar, produzido em caldeiras, é utilizado no accionamento de turbinas a vapor para geração de potência. O vapor de escape ou de extracção, na faixa de 2 a 20 bar, é utilizado como calor e processo.

A cogeração com turbinas a vapor tem-se difundido principalmente na produção centralizada de energia eléctrica nas grandes instalações, acima dos 20MW, e em indústrias onde são indispensáveis elevadas quantidades de vapor para o processo. Entre as quais se destacam as indústrias de pasta de papel, refinação de petróleo e química. A grande difusão dos sistemas de cogeração com turbinas a vapor pode ser parcialmente atribuída às vantagens da longa vida útil e à adequação desses equipamentos ao uso de uma grande variedade de combustíveis. Estes podem ir desde o carvão, até aos recursos florestais, incluindo também o fuelóleo e o gás natural [16-17].

Os sistemas de cogeração com turbina a vapor são de uma forma geral constituídos por cinco módulos: pré-aquecedor, onde a água é pré-aquecida, caldeira, turbina, condensador e gerador como podemos ver na Fig. 2.19 [3].

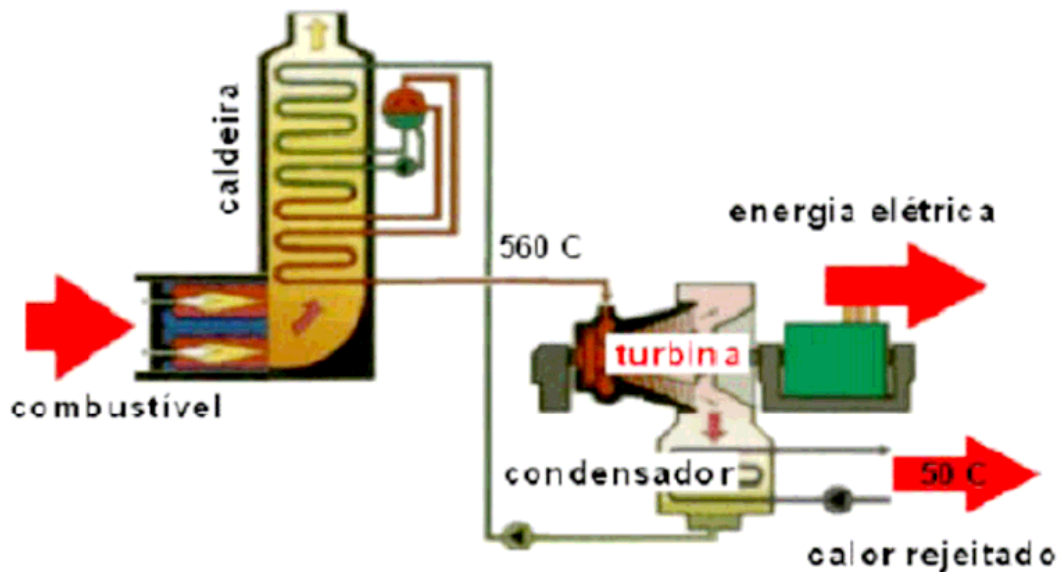


Fig. 2.19 – Ilustração de um funcionamento base do sistema de cogeração com turbina a vapor (imagem extraída de [3]).

Uma das particularidades deste método é o facto de ser possível usar como fonte de energia para produzir vapor, o calor residual de algum outro processo ou equipamento, através de absorção de calor [3].

Na Fig. 2.20 podemos ver os módulos de uma turbina a vapor.

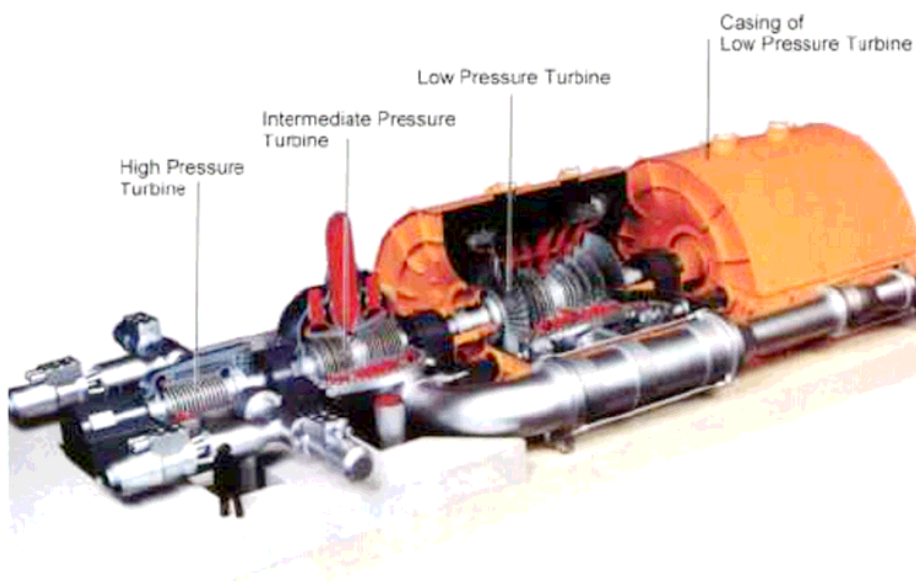


Fig. 2.20 – Ilustração dos módulos de uma turbina a vapor (imagem extraída de [3]).

O funcionamento deste sistema, começa com o pré-aquecimento da água, no pré-aquecedor. De seguida esta água é direccionada para a caldeira, onde a energia extraída do combustível usado é absorvida pela água fazendo com que esta atinja temperaturas suficientes para produzir vapor de alta pressão. Este vapor de água entra na turbina, onde sofre uma expansão, que faz com que a energia do vapor se transforme em energia mecânica, através da rotação da turbina, produzindo assim trabalho útil. Depois de produzir trabalho na turbina, o vapor já a uma pressão inferior (mas mesmo assim considerável), denominado de vapor exausto, dirige-se para a etapa seguinte, que consiste num condensador. Neste condensador o vapor é liquefeito, transformando-se uma vez mais em água, que retorna ao princípio do ciclo, ou seja à caldeira. De notar que neste caso já não é necessário usar o pré-aquecedor, uma vez que esta água encontra-se a uma temperatura já aceitável pela caldeira [16].

Acoplado ao eixo da turbina encontra-se normalmente um gerador, com vista a transformar a energia mecânica recebida, em energia eléctrica, para ser distribuída conforme as necessidades. O vapor depois de accionar a turbina, tal como já foi referido, ainda se encontra a uma pressão considerável, sendo que parte deste vapor pode ser desviado para ser usado no processo (a outra parte vai para o condensador), como fonte de vapor de alta ou baixa pressão. Esta diferenciação na pressão do vapor é conseguida extraindo o vapor antes ou depois de estar completamente expandido [3].

Na Fig. 2.21 podemos ver alguns exemplos de turbinas a vapor usadas na cogeração.

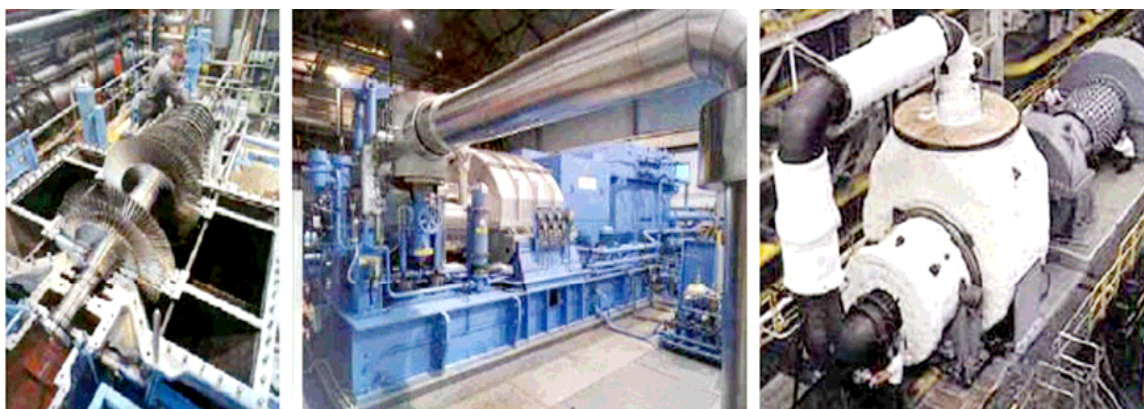


Fig. 2.21 – Ilustração de turbinas a vapor usadas na cogeração (imagem extraída de [3]).

As turbinas a vapor, podem ainda dividir-se em dois grupos, consoante a pressão de saída do vapor, turbinas de condensação e turbinas de contra-pressão. Turbinas de condensação, são turbinas onde a pressão de saída do vapor é menor que a atmosférica, sendo neste caso necessário o acréscimo de um condensador. As Turbinas de contra-

pressão, são turbinas onde a pressão do vapor de saída é superior à pressão atmosférica [2].

Na Fig. 2.22 podemos ver uma instalação industrial onde se usa turbinas a vapor.



Fig. 2.22 – Ilustração de uma instalação industrial onde se usa turbinas a vapor, de notar à esquerda caldeira de condensação, uma das maiores do mundo, Matimba, África do Sul. (imagem extraída de [2]).

De seguida são discriminadas, as principais vantagens e desvantagens da cogeração com turbinas a vapor.

Vantagens:

- Tempo de vida útil elevado;
- Não necessita de vigilância constante;
- Equipamento seguro;
- Eficiência global elevada;
- Capacidade de fornecer vapor a alta pressão e/ou pressão atmosférica;
- Elevado tempo de trabalho entre manutenções;

Desvantagens:

- Reduzido numero de aplicações;
- Baixo rendimento eléctrico;
- Arranque lento;
- Problemas de controlo de emissão de poluentes;
- Dependência de um tipo de combustível no dimensionamento, ou seja só pode usar o combustível idêntico aquele para que foi projectado o sistema;

- Reduzido número de aplicações;
- Investimento inicial elevado;
- Baixo rendimento eléctrico [3].

2.6.3 Ciclo combinado

Com a evolução tecnológica dos sistemas energéticos, têm surgido sistemas cada vez mais fiáveis e eficientes.

Este melhoramento dos sistemas isolados, conduziu à introdução de um novo tipo de cogeração que se baseia na agregação de dois sistemas isolados num só sistema, permitindo assim aumentar o rendimento e eficácia global da cogeração [3].

Na Fig. 2.23 podemos ver um esquema generalizado dum sistema de cogeração em ciclo combinado.

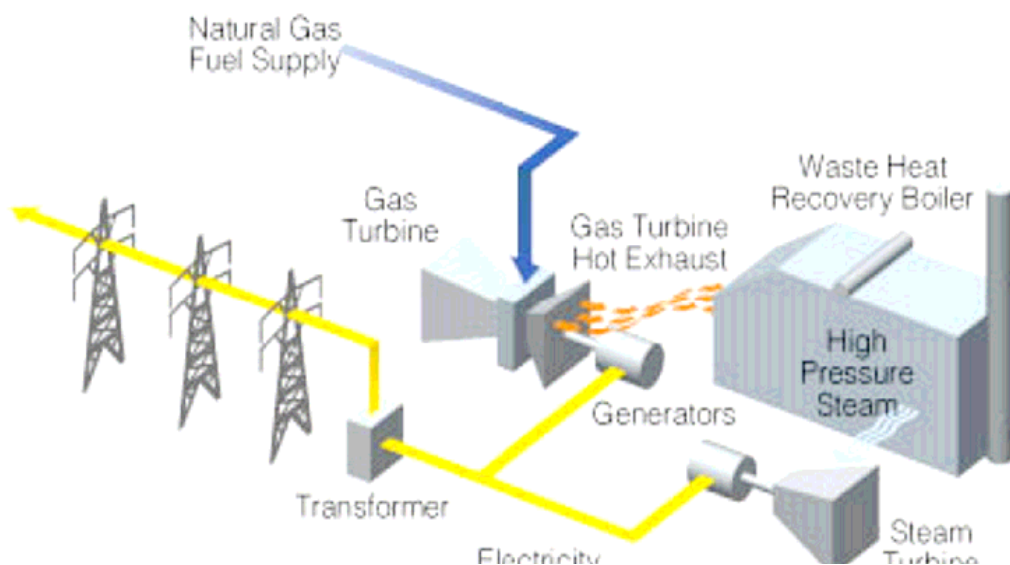


Fig. 2.23 – Ilustração de um esquema generalizado dum sistema de cogeração em ciclo combinado (imagem extraída de [3]).

Este tipo de cogeração, denominada de cogeração em ciclo combinado, representado na Fig. 2.23 é constituído de uma forma geral por um sistema de cogeração com turbinas a gás e por um sistema de cogeração com turbinas a vapor, que são projectados e executados de modo a complementarem-se [3].

Na cogeração com turbinas a gás, verifica-se que o gás de exaustão contém ainda uma grande quantidade de oxigénio, aproximadamente 15% que pode ser utilizado para uma

combustão suplementar de combustível numa caldeira de recuperação produzindo-se vapor de alta pressão. Estes gases de exaustão, uma vez que se encontram ainda a elevadas temperaturas, normalmente entre os 450 e 550°C podem ser usados de outra forma diferente da descrita anteriormente. Este segundo método para produzir vapor numa caldeira de recuperação, método consiste em tirar partido do calor destes gases sem haver combustão suplementar.

Parte deste vapor produzido na caldeira de recuperação é usado como fluido de trabalho para o accionamento de uma segunda turbina, através da sua expansão numa turbina de contra pressão ou de extracção/condensação. O restante vapor originado na caldeira, juntamente com o vapor residual usado para accionar a segunda turbina é conduzido de forma a poder usado como vapor de processo [2-26].

Na Fig. 2.24 podemos ver a distribuição energética da cogeração em ciclo combinado.

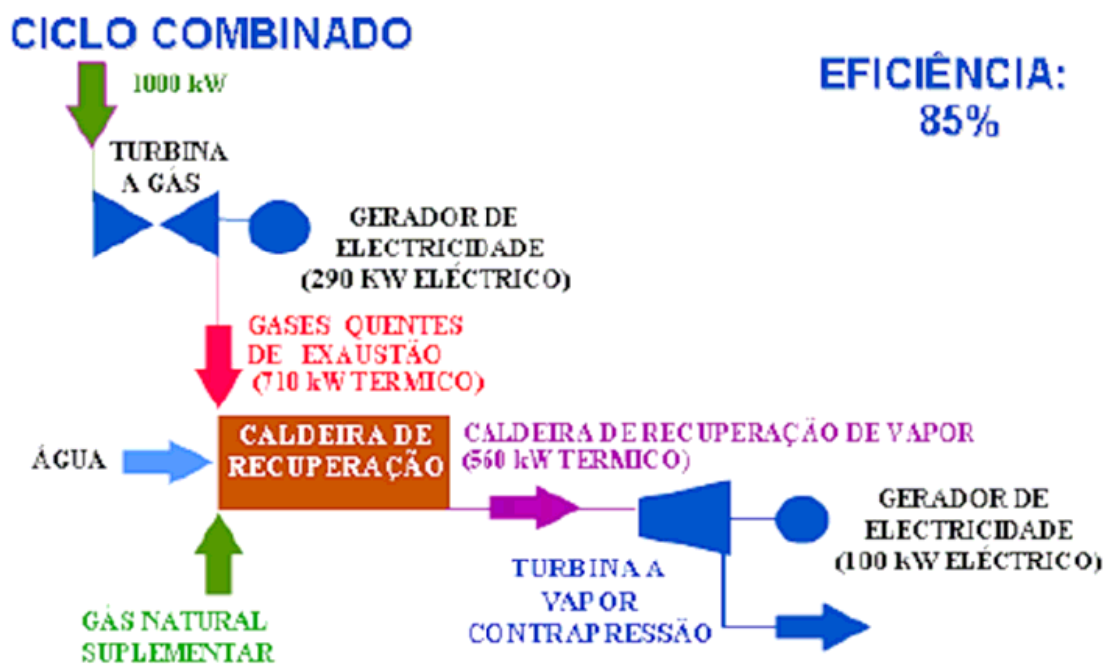


Fig. 2.24 – Ilustração da distribuição energética da cogeração em ciclo combinado (imagem extraída de [2]).

Este tipo de cogeração é predominantemente utilizada para produzir energia eléctrica e térmica útil em quantidades variáveis, de acordo com as cargas consumidoras, ou para atender a mercados específicos. Sendo ainda a melhor opção para as aplicações nas quais a procura de electricidade é superior à procura de vapor, ou seja nas indústrias

electro intensivas. Outro modelo deste tipo de cogeração é aquele em que os accionamentos são de equipamentos mecânicos ao invés de geradores eléctricos.

Os sistemas em ciclo combinado apresentam uma grande flexibilidade na relação de produção de electricidade e calor. Em comparação com grande parte das tecnologias apresentadas anteriormente, a de ciclos combinados permite, de uma maneira geral, uma maior extracção de potência por unidade de calor. Portanto e tal como se pode concluir da análise do esquema da Fig. 2.24, o ciclo combinado tem uma eficiência maior quando comparada com a dos ciclos com turbina a gás e a vapor separadamente [2].

Na Fig. 2.25 podemos ver uma instalação industrial com um sistema de ciclo combinado.



Fig. 2.25 – Ilustração de uma instalação industrial com sistema em ciclo combinado, uma turbina a gás e uma turbina a vapor, com sistema de condensação na zona à direita, RU-Reino Unido (imagem extraída de [2]).

As principais vantagens e desvantagens deste tipo de cogeração podem resumir-se do seguinte modo:

Vantagens:

- Elevada eficiência;
- Grande flexibilidade na quantidade de energia térmica produzida;
- Redução custos globais de operação.

Desvantagens:

- Sistema global sujeito a um somatório das desvantagens dos dois sistemas em separado, cogeração com turbina a gás e a vapor;
- Maior complexidade do sistema global [3].

2.6.4 Motor alternativo de combustão interna

Em sistemas de cogeração, quando estes têm determinadas características, podem ser usados motores alternativos para cumprir os objectivos propostos. Os motores alternativos, também denominados de combustão interna são utilizados de maneira mais disseminada no sector terciário e nas pequenas indústrias. Sendo que têm também bastantes aplicações em sistemas de produção de energia de emergência e na cobertura de situações de isolamento geográfico [3].

De uma forma geral estão associados à satisfação de necessidades industriais de energia eléctrica, em projectos de cogeração, sempre que as necessidades térmicas sejam pouco significativas, ou quando os consumos de energia sofrem variações ao longo do tempo. Este tipo de cogeração é habitualmente utilizada em instalações com potências da ordem dos 10 MW, embora possam ser encontrados alguns exemplos com consumos da ordem dos 20 MW ou mais.

Nestes sistemas, o aproveitamento de calor ocorre com a utilização da energia contida nos gases de exaustão e/ou nos fluidos de refrigeração e lubrificação [3-18].

Na Fig. 2.26 podemos ver um sistema geral de funcionamento de um sistema de cogeração com motor alternativo.

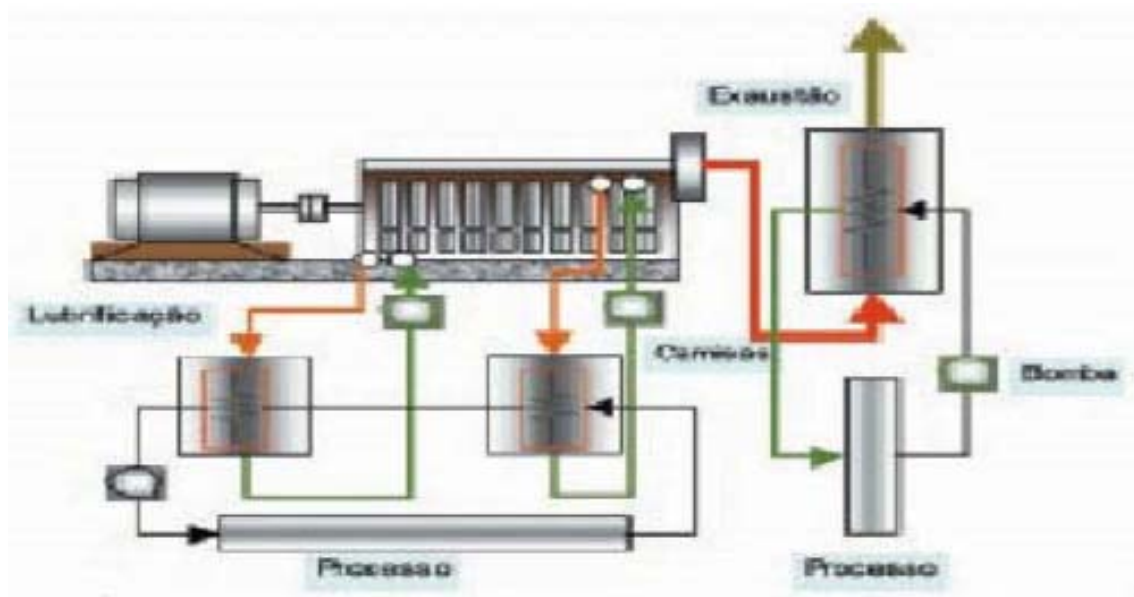


Fig. 2.26 – Ilustração de um esquema geral de funcionamento de um sistema de cogeração com motor alternativo (imagem extraída de [3]).

Esta tecnologia apresenta de uma forma geral, um rendimento térmico superior às demais tecnologias, como turbinas a gás e vapor, embora também tenha graves restrições associadas à recuperação de calor, face aos baixos níveis de temperatura. A viabilidade de aplicação dos motores em cogeração é limitada aos casos em que o processo requer uma quantidade relativamente grande de calor a baixas temperaturas. A quantidade de calor que pode ser efectivamente recuperada depende do tipo de motor em consideração, assim como o de regime operacional.

A recuperação de calor dos óleos lubrificantes e do fluido de refrigeração, usualmente disponível a cerca de 70 °C, é limitada para finalidades de produção de água quente, que pode ser usada em uso doméstico, em processos de lavagem e na alimentação de caldeiras. Já os gases de escape/exaustão, com temperaturas de até 700 °C, representam a segunda fonte mais importante para a recuperação de calor de um motor. O calor destes gases pode ser aproveitado directamente ou então ser recuperado numa caldeira para produção de vapor.

No entanto o aproveitamento do calor dos gases de exaustão está condicionado pelo facto de não ser recomendável reduzir a sua temperatura abaixo de 150 a 180 °C, para evitar que surjam alguns problemas no sistema, nomeadamente:

- Refluxo de condensados para o motor
- Corrosão prematura de componentes do sistema de escape
- Elevação da área da superfície de troca de calor, limitando a recuperação a aproximadamente 50% do disponível [3].

Na Fig. 2.27 podemos ver um esquema geral de funcionamento de um sistema de cogeração com motor alternativo.

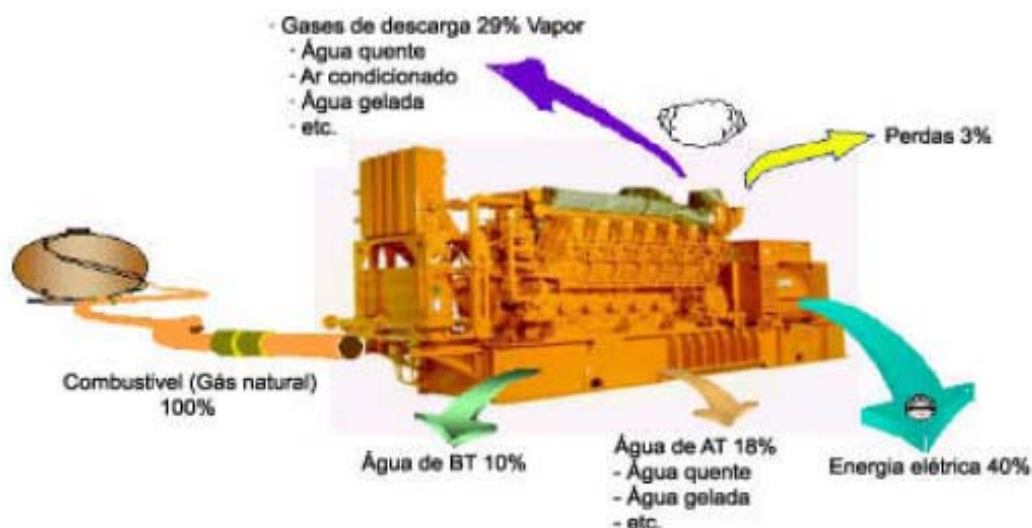


Fig. 2.27 – Ilustração de um esquema geral de funcionamento de um sistema de cogeração com motor alternativo (imagem extraída de [3]).

Quanto ao modo de funcionamento de um motor de combustão interna, distinguem-se dois grupos de motores, os de explosão, ou motores de ciclo Otto e os Diesel. Neste tipo de equipamento, o combustível é misturado ao ar atmosférico na câmara de combustão, onde ocorre a mesma. A força expansiva dos gases de combustão provoca o movimento cíclico de um pistão num cilindro, produzindo assim energia mecânica. Este trabalho desenvolvido pelo motor é usado para accionar um gerador eléctrico, com vista a produzir energia eléctrica [2].

A diferença básica entre o ciclo Otto e Diesel está na forma como ocorre a combustão do combustível. No ciclo Diesel, a combustão ocorre pela compressão do combustível na câmara de combustão, enquanto no ciclo Otto, a combustão ocorre pela explosão do combustível através de uma faísca na câmara de combustão. Ou seja os princípios são muito semelhantes aos usados nos motores tradicionais dos automóveis a gasolina e a gasóleo [2].

O ciclo Otto descreve o funcionamento do motor de explosão. A Fig. 2.28 ilustra os diagramas (p,v) e (T,s) correspondentes a este ciclo termodinâmico [1].

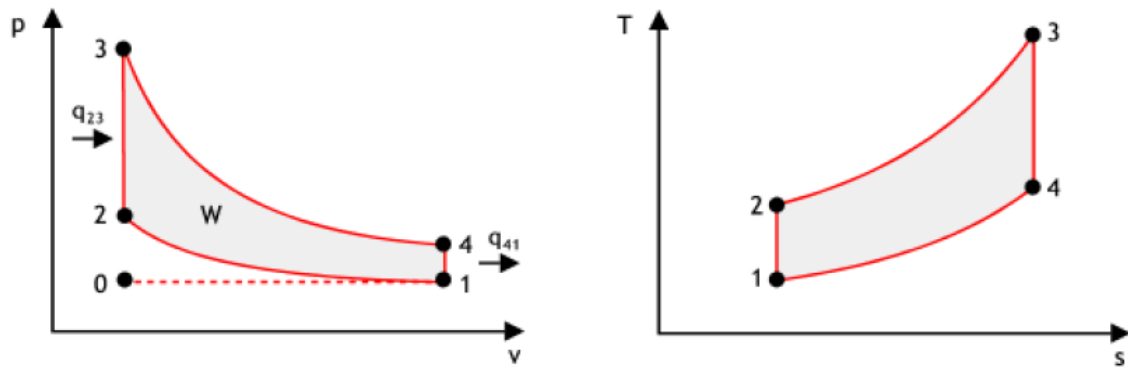


Fig. 2.28 – Ilustração dos diagramas (p,v) e (T,s) do ciclo Otto (imagem extraída de [1]).

- 0 – 1: aspiração da mistura ar-combustível (esta etapa não costuma ser considerada como fazendo parte do ciclo)
- 1 – 2: compressão isentrópica da mistura pelo movimento ascendente do pistão
- 2 – 3: adição de calor a volume constante através da ignição da mistura ar-combustível e subsequente explosão; aumento da pressão
- 3 – 4: expansão isentrópica associada ao movimento descendente do pistão
- 4 – 1: rejeição de calor, a volume constante; abertura da válvula de escape [1].

Na Fig. 2.29 podemos ver as quatro etapas do ciclo de Otto.

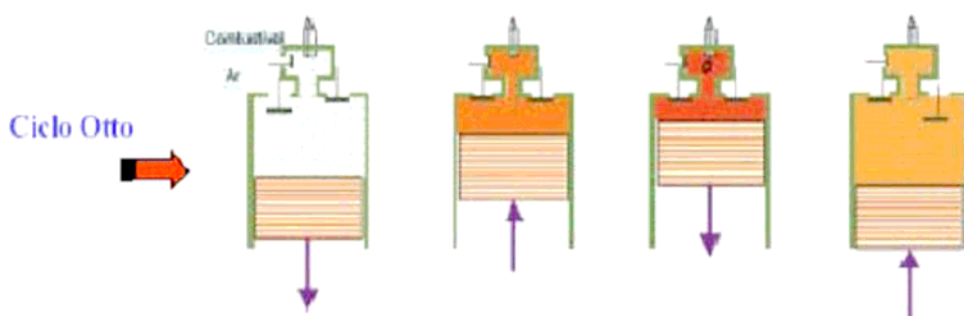


Fig. 2.29 - Ilustração das quatro etapas do ciclo Otto (imagem extraída de [2]).

O ciclo Diesel está associado à representação termodinâmica do funcionamento do motor de ignição por compressão – Diesel. Na Fig. 2.30 mostram-se os diagramas (p,v) e (T,s) do ciclo Diesel [1].

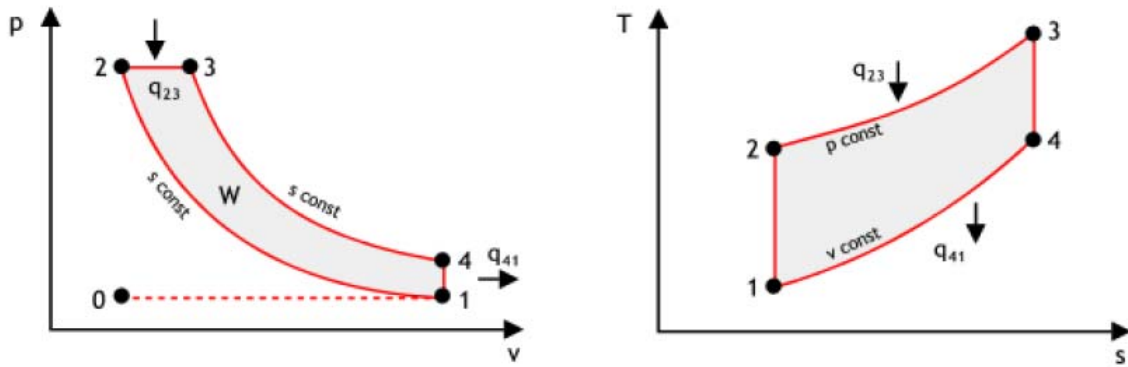


Fig. 2.30 – Ilustração dos diagramas (p,v) e (T,s) do ciclo Diesel (imagem extraída de [1]).

O ciclo Otto e o ciclo Diesel são muito parecidos. A diferença está no processo 2-3 de adição de calor que no ciclo Otto é isocórico (volume constante) e no ciclo Diesel é isobárico (pressão constante) [2].

Na Fig. 31 podemos ver as quatro etapas do ciclo Diesel.

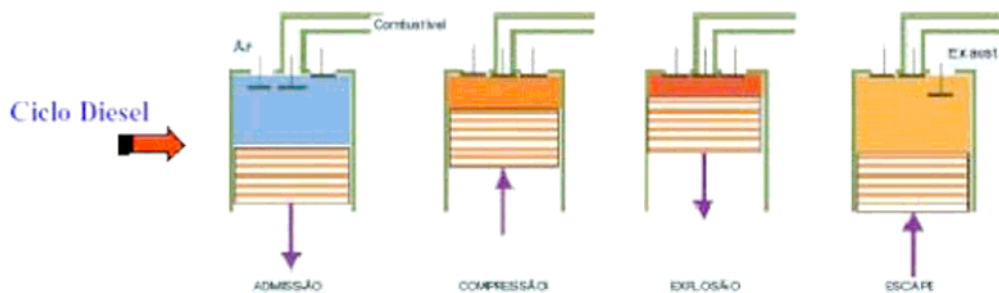


Fig. 2.31 - Ilustração das quatro etapas do ciclo Diesel (imagem extraída de [2]).

A taxa de compressão no ciclo Diesel é muito superior à do ciclo Otto, porque no primeiro, apenas o ar é comprimido, enquanto que, no segundo, é a mistura ar-combustível que é comprimida, o que é especialmente problemático na fase de explosão; daí a necessidade de taxas de compressão sensivelmente mais baixas [1].

Os motores de explosão utilizam como combustível mais frequente o gás natural, mas também podem queimar propano, butano ou uma mistura dos dois, bio-gás, gás de síntese e nafta química. Em relação aos motores que usam o ciclo Diesel, os combustíveis permitidos e mais utilizados abrangem uma grande variedade de combustíveis líquidos, desde os vários tipos de fuelóleo ao gasóleo e ainda misturas de combustíveis gasosos com líquidos em proporções que permitam a auto-ignição,

denominados de *dual fuel*. Na Fig. 2.32 podemos ver dois exemplos de motores que usam gás natural como combustível [2].

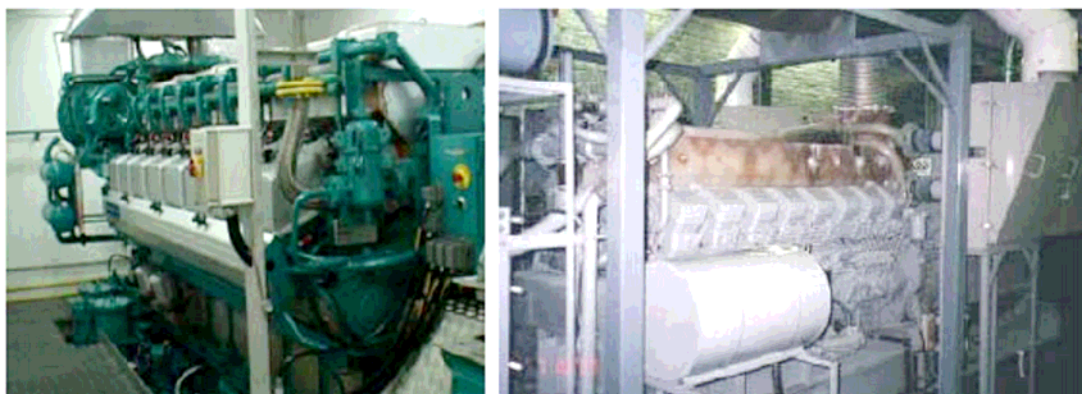


Fig. 2.32 – Ilustração de dois exemplares de motores que usam gás natural como combustível (imagem extraída de [2]).

Em diversas situações, nas indústrias torna-se vantajoso o uso do gás natural como combustível de sistemas de cogeração com motor alternativo, quer por questões logísticas, físicas, ou por questões económicas.

Para a utilização de gás natural como combustível, o ciclo recomendável é o ciclo Otto. Sendo nestes casos misturado o gás com o ar em determinadas proporções e a uma pressão e temperatura pré-estabelecidas. No entanto, pode-se utilizar o gás natural em equipamentos de ciclo Diesel desde que o combustível inserido na câmara de combustão seja uma mistura de gás natural com 3-5% de diesel. Estes equipamentos são conhecidos como *bi-fuel* ou *dual-fuel*, em função do modo em que são executadas as misturas de combustíveis. Nestes sistemas que fazem uso do ciclo Diesel, de modo a permitir que o gás natural seja inflamado por compressão é necessário recorrer ao uso de compressores de elevada potência, de modo a criar pressões elevadas de gás necessárias à injeção deste nas câmaras/cilindros de combustão [2-32].

As principais vantagens e desvantagens deste tipo de Cogeração podem resumir-se do seguinte modo:

Vantagens:

- Arranque rápido;
- Fácil adaptação a variações das necessidades térmicas;
- Elevada eficiência mecânica;
- Não necessita de vigilância constante.

Desvantagens:

- Tempo de vida útil curto;
- Baixo rendimento térmico;
- Custos de manutenção elevados (paragens frequentes) [3].

2.6.5 Pilhas de combustível

As pilhas de combustível, ainda em fase de desenvolvimento e aperfeiçoamento, configuram um modo de obtenção de energia eléctrica diferente tanto das tecnologias convencionais que usam combustíveis fósseis, como das tecnologias que fazem uso de recursos renováveis.

As pilhas de combustível são, de certo modo, semelhantes às conhecidas baterias, no sentido em que ambas geram energia em corrente contínua através de um processo electroquímico, sem combustão, nem transformação intermédia em energia mecânica. Contudo, enquanto as baterias convertem a quantidade finita, e muito limitada, de energia química armazenada em energia eléctrica, as pilhas de combustível podem, em teoria, operar indefinidamente, desde que lhes seja fornecida continuamente uma fonte de combustível, no caso, o hidrogénio. O hidrogénio requerido pode ser obtido, no local, a partir de um hidrocarboneto, tipicamente o gás natural, enquanto o oxigénio é retirado do ar ambiente [1-15].

Uma pilha de combustível é um dispositivo electroquímico, que converte a energia química do combustível directamente em energia eléctrica, sem estágios intermédios de combustão e produção de energia mecânica [2-15].

Na Fig. 2.33 podemos ver um esquema típico de representação de uma célula de combustível [2].

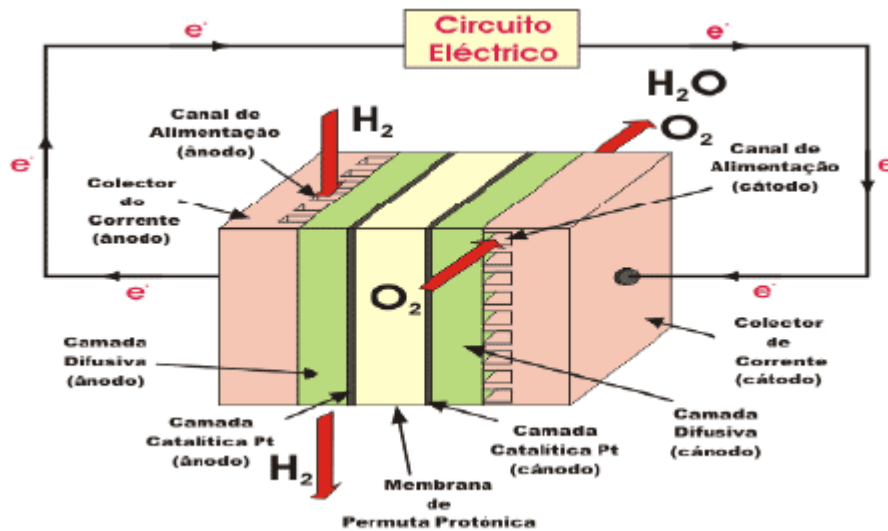


Fig. 2.33 – Ilustração de um esquema típico de representação de uma célula de combustível (imagem extraída de [2]).

Uma célula de combustível pode converter mais de 90% da energia contida num combustível em energia eléctrica e calor. Em termos históricos podemos dizer que no ano de 1996, as células de combustível com ácido fosfórico apresentavam uma eficiência de conversão eléctrica de 42%, com uma elevada produção de calor.

Todas as células de combustível são constituídas por dois eléctrodos, um positivo e outro negativo, designados por, cátodo e ânodo, respectivamente. Igualmente, todas as células têm um electrólito, que tem a função de transportar os iões produzidos no ânodo, ou no cátodo, para o eléctrodo contrário, e um catalisador, que acelera as reacções electroquímicas nos eléctrodos [2-15].

Na Fig. 2.34 podemos ver uma representação de uma célula de combustível.

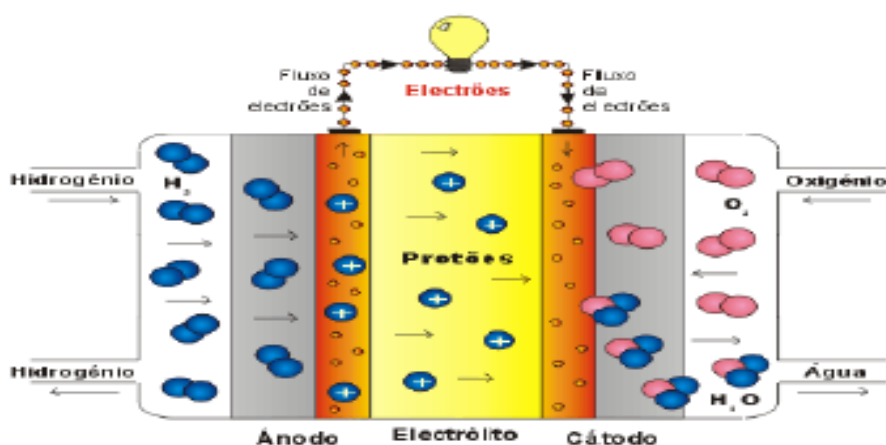


Fig. 2.34 – Ilustração de um esquema de representação de uma célula de combustível (imagem extraída de [2]).

O rendimento de uma pilha de combustível varia de forma inversa à potência devido a perdas por efeito de Joule e de polarização. De forma a obter potências mais elevadas podem associar-se várias células de combustível em série, resultando numa denominada Pilha de Combustível.

Na Fig. 2.35 podemos ver uma célula de combustível e uma pilha de combustível [2].

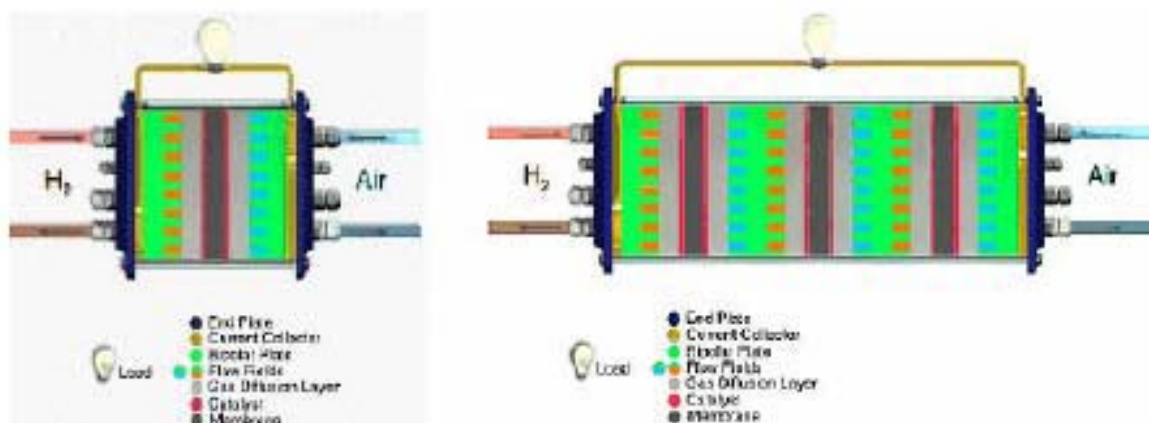


Fig. 2.35 – Ilustração de uma célula de combustível (à esquerda) e pilha de combustível (à direita) (imagem extraída de [2]).

O hidrogénio é alimentado pelo ânodo da célula de combustível, ver Fig. 2.35, onde é oxidado no catalisador de platina (camada difusiva/catalítica), havendo produção de dois elétrons e dois prótons hidrogénio, H^+ (reação ânodo). De seguida, os elétrons produzidos pela reação de oxidação do hidrogénio são transportados através de um

circuito eléctrico e utilizados para produzirem trabalho (corrente contínua). Por sua vez, os prótons produzidos na reacção anódica são transportados do ânodo para o cátodo, através do electrólito (no centro da célula). No cátodo, o oxigénio é alimentado e reage com os prótons transportados através do electrólito e com os electrões provenientes do circuito eléctrico (reacção cátodo). O produto final da reacção que ocorre no cátodo é o vapor de água [2].

A selecção do electrólito é importante, visto que este deve permitir somente a transferência de iões do ânodo para o cátodo, ou vice-versa. Por sua vez, de maneira a obter-se o funcionamento mais eficiente possível de uma célula de combustível, os eléctrodos devem ter elevadas áreas de contacto e o electrólito deve ter uma espessura reduzida. Um electrólito comum nas células de combustível é um ácido, com iões H^+ móveis. Na prática, cada uma das células de combustível pode produzir uma diferença de potencial inferior ou igual a 1 V. Isto significa que para se obterem níveis úteis de potência eléctrica têm de se associar diversas células de combustível em série (pilha). Deste modo, um sistema de células de combustível apresenta a vantagem de ser modular e, por isso, tem a possibilidade de ser construído para uma ampla gama de potências eléctricas [3-15].

Muitos dos requisitos apresentados pelos sistemas eléctricos convencionais implicam desafios técnicos específicos para as células de combustível. Por exemplo, de maneira a ter uma maior flexibilidade em relação ao combustível e melhor utilização do calor produzido, uma célula de combustível deverá funcionar a temperaturas elevadas. De maneira a responder aos diversos desafios técnicos, os investigadores desenvolveram diferentes tipos de células de combustível [3-31].

- AFC – *Alkaline Fuel Cell*;
- PEFC / PEM – *Polymer Electrolyte Fuel Cell / Proton Exchange Membrane*;
- PAFC – *Phosphoric Acid Fuel Cell*;
- MCFC – *Molten Carbonate Fuel Cell*;
- SOFC – *Solid Oxid Fuel Cell* [3].

Na Tabela 2.3 podemos ver diferentes tipos de células de combustível.

Tipo de célula de combustível	Electrólito	Combustível	Oxidante	Iso Cond.	Temperatura de funcionamento [°c]	Rendimento eléctrico [% PCI]	Dimensão típica
AFC	KOH (hidróxido de potássio)	H ₂ puro	Ar + H ₂ O (s/CO ₂)	H ⁺	60-90	55-60	<70kW
PEFC/ PEM	Membrana de polímero	H ₂ puro	Ar (s/CO)	H ⁺	70-90	35-45	5-250kW
PAFC	Ácido fosfórico	H ₂	Ar (s/CO)	H ⁺	200	35-45	200kW
MCFC	Lítium, potássio, carbonato fundido	CH ₄ , H ₂ , CO	Ar+CO ₂	CO ₃ ²⁻	600-650	45-55	2-3MW
SCFC	Óxido de Zircónio	CH ₄ , H ₂ , CO	Ar	O ²⁺	800-1000	45-55	Tubular: 1000000 kW Planar: 50-100 kW

Tabela 2.3 – Diferentes tipos de células de combustível (extraída de [3]).

Um sistema de produção de electricidade baseado em pilhas de combustível necessita de equipamento auxiliar que pode incluir componentes tais como:

- Compressor ou ventilador para fornecer o ar ao cátodo;
- Reformador;
- Circuito de refrigeração;
- Separador para remoção da água obtida nos produtos da reacção;
- Bomba para recirculação dos gases rejeitados pelo ânodo;
- Controlador do sistema;
- Dispositivos de controlo de CO;
- Sistema de armazenagem e alimentação do combustível [3-15].

Em relação a vantagens e desvantagens desta tecnologia em aplicação de sistemas de cogeração descrevemos na Tabela 2.4:

	Pilhas de combustível de baixa temperatura	Pilhas de combustível de alta temperatura
Tecnologias aplicáveis	<ul style="list-style-type: none"> • AFC • PAFC • PEFC/PEM 	<ul style="list-style-type: none"> • MCFC • SOFC
Dimensão típica	<ul style="list-style-type: none"> • Os produtos disponíveis no mercado e em desenvolvimento têm potências até 250 kW 	<ul style="list-style-type: none"> • A maioria dos equipamentos em desenvolvimento têm potências na ordem de 2 MW, mas existem planos para desenvolver unidades com menos de 1 MW.
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Rendimento elevado • Emissões reduzidas • Arranque rápido • Potencial para redução significativa do custo resultante de produção em larga escala se for alcançado sucesso na área dos transportes 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendimento muito elevado • Emissões reduzidas • Processamento de combustível mais simples • Não existe a necessidade de utilizar catalisadores de metais preciosos • Não são danificadas pelo CO • Potências mais elevadas
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de cogeração limitado • Processamento de combustível relativamente complexo • Mais sensível ao CO • Requer catalisadores de metais preciosos • Custo elevado 	<ul style="list-style-type: none"> • Mercado limitado inicialmente à produção de electricidade (o que reduz o potencial para redução do custo) • Complexidade dos sistemas hídricos

Tabela 2.4 – Vantagens e desvantagens das pilhas de combustível em cogeração (extraída de [3]).

O campo de aplicação das pilhas de combustível é vasto, abrangendo desde unidades móveis de cerca de 50W até centrais de produção eléctrica de 10MW. As aplicações mais importantes para as células de combustível são as centrais de produção de electricidade estacionárias e de distribuição, veículos eléctricos motorizados e equipamentos eléctricos portáteis [3].

Na Fig. 2.36 e Fig. 2.37 podemos ver exemplos de pilhas de combustível e aplicações em sistemas de cogeração.



Fig. 2.36 – Ilustração de pilhas de combustíveis (imagem extraída de [3]).



Fig. 2.37 – Ilustração de um sistema de cogeração utilizando pilhas de combustíveis (imagem extraída de [3]).

2.6.6 Microturbinas

O princípio de operação das microturbinas é muito semelhante ao das turbinas a gás, recorrendo ao ciclo de Brayton para caracterizar o seu funcionamento. A dimensão é a principal marca distintiva das duas tecnologias: as microturbinas situam-se na gama 30-300 kW, enquanto as turbinas a gás ocupam o campo desde 0.5 a 250 MW [1].

O termo microturbinas refere-se em geral a um sistema de dimensões relativamente reduzido composto por compressor, câmara de combustão, turbina e gerador eléctrico, com uma potência total disponível não superior a 250 kW. Para sistemas semelhantes mas com potências entre 250 kW e 1 MW é usualmente utilizado o termo miniturbina.

A maioria das microturbinas existentes no mercado têm como função principal produzir electricidade, podendo funcionar em cogeração utilizando equipamento adicional. No entanto existem microturbinas criadas de raiz para funcionamento em cogeração. Em alguns casos a produção de calor é mesmo a função principal da microturbina [16].

O ar novo admitido é conduzido ao compressor onde a pressão é elevada. Com o objectivo de aumentar o rendimento da microturbina é usual integrar no sistema um recuperador de calor que permite aproveitar o calor disponível nos gases de escape para

aquecer o ar novo antes de este entrar na câmara de combustão como podemos ver na Fig. 2.38. [2]

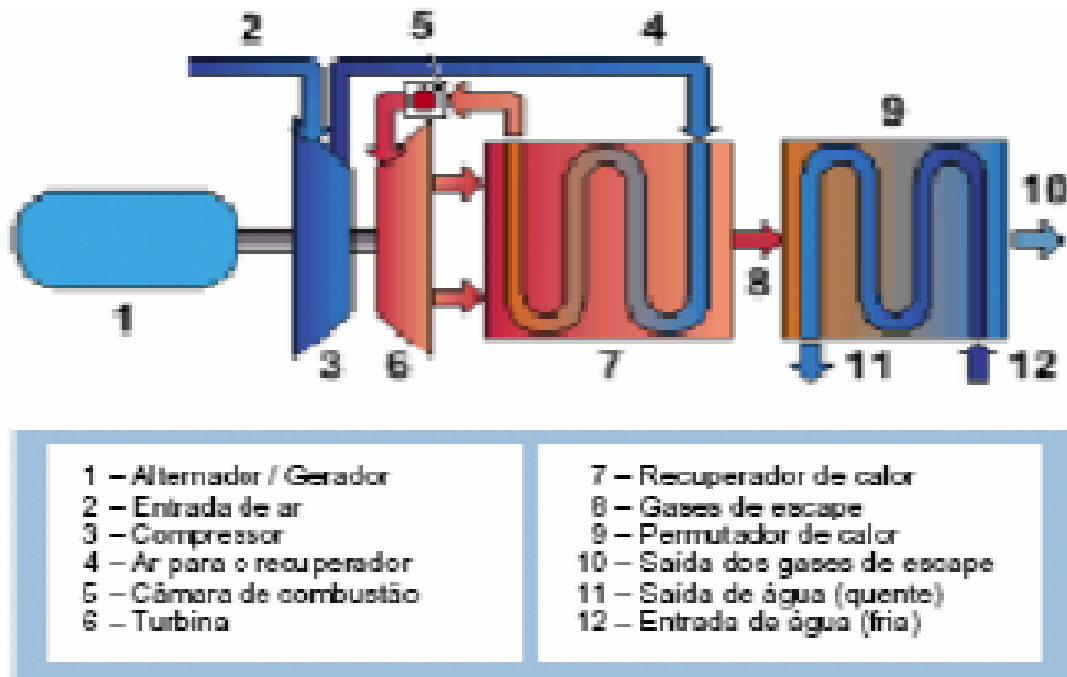


Fig. 2.38 – Ilustração de um esquema de um sistema microturbina com um único veio (imagem extraída de [2]).

O calor libertado na combustão eleva a temperatura da mistura ar-combustível e consequentemente a sua pressão. Ao passar na turbina a mistura expande-se transmitindo energia mecânica ao veio, accionando o compressor e o gerador. O rendimento eléctrico atingido é da ordem dos 30% em microturbinas com recuperador de calor. Em sistemas de cogeração o rendimento global pode atingir mais de 80%. Os últimos desenvolvimentos tecnológicos apontam para a utilização de materiais cerâmicos nas secções quentes da microturbina, o que permite atingir temperaturas mais elevadas e consequentemente rendimentos mais elevados [2].

Quando se pretende que a microturbina funcione em cogeração é utilizado um recuperador de calor adicional de forma a tirar partido da elevada temperatura dos gases de escape. Algumas microturbinas vêm preparadas de série com o referido recuperador, enquanto que em outras o equipamento auxiliar é vendido separadamente [2-32].

Vários tipos de combustíveis podem ser utilizados na maioria das microturbinas: gás natural, gasolina sem chumbo, gasóleo, álcoois, e propano. Um compressor adicional poderá ser utilizado quando a pressão de alimentação do combustível não for suficiente.

Na Fig. 2.39 podemos ver sistemas de cogeração com a aplicação de microturbinas. [2]



Fig. 2.39- Ilustração de sistemas de cogeração usados em microturbinas (imagem extraída de [2]).

O arrefecimento da máquina pode ser feito com ar ou água. No primeiro caso é usual forçar o ar novo a passar através do gerador antes de entrar na câmara de combustão, o que permite garantir o arrefecimento deste, enquanto que no segundo caso é necessário um sistema auxiliar para bombear a água. As microturbinas estão equipadas com sistemas electrónicos que asseguram o controlo do circuito eléctrico e o funcionamento da microturbina em condições de segurança [2].

Para comparação a Tabela 2.5 resume as características técnicas dos tipos de sistemas de cogeração mais utilizados, incluindo parâmetros e custos importantes associados [3].

Máquina motriz	Turbina de gás	Turbina de vapor	Ciclo combinado	MCI Otto/Diesel	Célula de combustível
Potência (MWe)	0.2-100	0.5-100	4-100	0.015-30	0.01-0.25
Razão calor/electricidade	1.25-2	2-10	0.5-1.7	0.4-1.7	1.1
Rend. eléctrico (%)	15-35	10-40	30-40	25-45	35-40
Rend. térmico (%)	40-59	40-60	40-50	40-60	20-50
Rend. total (%)	60-85	60-85	70-90	70-85	56-90
Tempo de vida útil (anos)	15-20	20-35	15-25	10-20	>5
Carga mínima (%)	75	20	75	50	Sem limites
Eficácia (%)	90-98	99	90-98	92-97	>95
Custo de instalação (€/kWe)	600-800	700-900	600-800	700-1400	>2500
Custo de operação (€/kWh)	2-7	3	2-6	6-12	2-12
NOx (Kg/MWh)	0.2-2	0.9	0.2-2	1-1.4	<0.01
Temperatura utilizável (°C)	450-800	-	450-800	300-600	250-550
Uso de energia térmica	Aquecimento, AQS, vapor BP-AP	Vapor BP-AP	Vapor BP-AP	Aquecimento, AQS, vapor BP-AP	AQS, vapor BP-AP
Combustível	Gasoso, líquido	Todos	Gasoso, líquido	Gás, gasolina, gasóleo	Gás

Tabela 2.5 - Comparativo das principais tecnologias utilizadas em cogeração (extraída de [10]).

2.7 Tecnologias de sistemas de trigeriação

2.7.1 Frio por absorção

A produção de frio no ciclo de absorção é um sistema que transforma o calor em frio por meio de transformações de solução. Em função da temperatura de entrada no sistema é possível a operação de um ciclo em cascata. A temperatura do calor de entrada é maior quanto maior o número de estágios.

No sistema de absorção tem-se um investimento maior do que o de compressão, porém, os custos de manutenção são menores. Estes também são silenciosos e têm o mérito ambiental, pois não utilizam CFCs, HCFCs ou outros refrigerantes que afectam o ozono [6].

Num *chiller* de ciclo de compressão, o frio é produzido no evaporador, onde o refrigerante ou meio de trabalhos é vaporizado e o calor é rejeitado no condensador, onde o refrigerante é condensado. Os *chillers* de absorção incluem também um dispositivo de condensação e um outro de evaporação para produzir refrigeração. Tal como nos *chillers* que funcionam segundo o ciclo de compressão de vapor, têm um evaporador que expande o refrigerante para produzir frio. Contudo, em vez de um compressor mecânico, estes *chillers* utilizam uma fonte de calor, quer por combustão directa por recurso a um queimador ou por combustão indirecta, sendo alimentados por vapor, água quente ou energia térmica de desperdício. As máquinas de absorção que estão disponíveis comercialmente são alimentadas por vapor, por água quente ou por gases de combustão [3-21].

O princípio de uma máquina de refrigeração por absorção pode ser ilustrado na Fig. 2.40. Na sua concepção mais elementar a máquina de absorção consiste num evaporador, um condensador, um absorvedor, um gerador e uma bomba de solução. No ciclo de absorção, a compressão do vapor do refrigerante é efectuada pela combinação do absorvedor, da bomba de solução e do gerador, em vez do compressor mecânico de vapor. O absorvente que retirou o refrigerante, mais diluído por essa acção, é bombeado para o gerador onde o refrigerante é libertado como vapor, o qual será condensado. O absorvente regenerado ou mais concentrado é então devolvido ao absorvedor para captar de novo vapor de refrigerante. É fornecido calor ao gerador a uma temperatura relativamente elevada, ao passo que o calor de absorção da secção do absorvedor é

dissipado, a um nível de temperatura relativamente baixo, por circulação de água do condensador nesta secção [3].

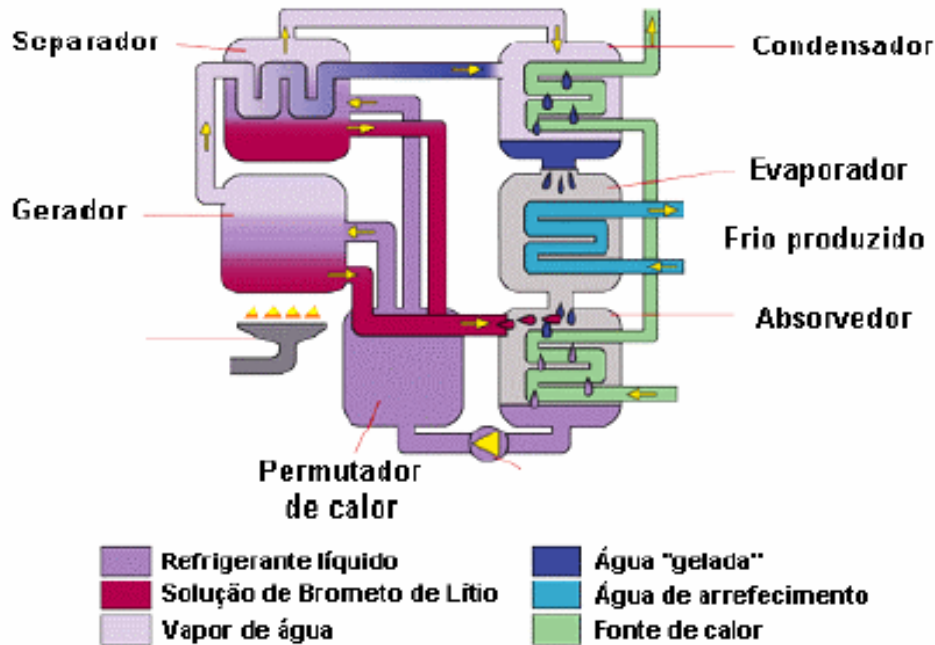


Fig. 2.40 - Ilustração de uma máquina de frio por absorção (imagem extraída de [3]).

Um *chiller* de água é uma máquina que tem como função arrefecer água ou outro líquido em diferentes tipos de aplicações, através de um ciclo termodinâmico. Os dois principais tipos de *chiller* são:

- *Chillers* de compressão ou eléctrico;
- *Chillers* de absorção [6].

Os *chillers* de compressão tal como o nome indica utilizam um compressor mecânico, de forma a aumentar a pressão em determinada fase do ciclo termodinâmico do sistema, usualmente accionado por um motor eléctrico. Este processo tem como principal desvantagem o elevado consumo energético. Os *chillers* de absorção permitem produzir água gelada a partir de uma fonte de calor, utilizando para tal uma solução de um sal num processo termoquímico de absorção. O princípio fundamental vai ser então a produção de frio através de calor. Na óptica da cogeração os *chillers* são muitas vezes integrados, pois aproveitam calor que seria completamente desperdiçado. O que

distingue o funcionamento dos *chillers* de absorção dos *chillers* de compressão é o facto do primeiro ter como princípio de base um compressor termoquímico [6-21].

2.7.2 Tipos de *chiller* de absorção

Os *chillers* de absorção podem ser divididos em quatro tipos principais:

- *Chillers* de ignição directa;
- *Chillers* de ignição indirecta;
- *Chillers* de efeito simples;
- *Chillers* de efeito duplo.

- *Chillers* de ignição directa: Este tipo de *chillers* recorre à combustão directa de um combustível para obter o calor necessário ao processo de aquecimento do gerador.

- *Chillers* de ignição indirecta: O calor necessário é fornecido através de vapores ou líquidos quentes de caldeiras ou de gases de exaustão de uma turbina a gás. Na óptica da cogeração estes *chillers* são sem dúvida os mais apropriados.

Estes tipos de *chillers* ainda podem ser divididos em dois tipos distintos:

- Sistemas onde o absorvente é o amoníaco: estes sistemas representam um investimento relativamente elevado, sendo normalmente utilizados apenas em instalações de grande capacidade.
- Sistemas onde o absorvente é o brometo de lítio: representa o sistema mais utilizado nos casos de integração com sistemas de micro-geração, devido essencialmente a uma melhor relação entre o seu custo e a sua eficiência energética.

- *Chillers* de efeito simples: O *chiller* possui apenas um gerador.

- *Chillers* de efeito duplo: Os *chillers* possuem dois ou mais geradores, todas as máquinas de ignição directa são deste tipo [6-25].

2.7.3 Componentes do *chiller*

Evaporador

O evaporador é o recuperador de calor, em que o fluido friogénico a baixa pressão e temperatura é reaquecido, arrefecendo neste processo a água a refrigerar. Como tal, uma maximização do coeficiente de transferência de calor é desejável, de modo a aumentar a

produção de água refrigerada. A temperatura de entrada da água anda normalmente à volta de 12°C e de saída de 3-7°C. Estas temperaturas podem ser modificadas alterando o valor do caudal no evaporador, com sistemas de controlo. Os tubos são normalmente em cobre e são construídos de modo a aumentar o coeficiente de convecção tanto exteriormente como interiormente. Os tubos são colocados de modo a não se tocarem. Deve eliminar-se a possibilidade de trocas de fluido entre a água e o líquido refrigerante. Colocam-se folhas de suporte intermediárias de modo a minimizar vibração e movimento dos tubos. O projecto do evaporador deve ter em conta que se deve utilizar toda a superfície de troca de calor mesmo quando o *chiller* está a trabalhar a carga parcial, garantindo assim uma alta eficiência para todo o regime de cargas. A folha e os tubos do evaporador estão normalmente isolados termicamente. Este isolamento permite evitar a condensação de água à superfície do evaporador em ambientes em que a humidade relativa é alta [6-26].

Condensador

O condensador é o recuperador de calor em que o fluido friogénico a alta pressão é arrefecido. Existem dois parâmetros importantes na concepção e optimização de um condensador:

- O caudal de água de refrigeração;
- As temperaturas de entrada e saída da mesma.

Temperaturas típicas de entrada e saída da água no condensador são 30°C e 35°C. Os parâmetros do condensador podem influenciar a potência de refrigeração e a potência fornecida, pelo que algumas empresas incluem nos seus sistemas de controlo a regulação da temperatura da água do condensador. O controlo simultâneo das temperaturas e caudais no evaporador e condensador, simultaneamente, permite maximizar a eficiência do *chiller* de acordo com o seu regime de cargas. Os condensadores são normalmente em cobre ou em cobre-níquel.

Para aplicações marítimas, aplicam-se anodos de zinco nas folhas para prevenir a corrosão marítima.

As empresas, em geral, tentam diminuir ao máximo o caudal de água refrigerante e o tamanho do condensador de modo a poupar energia e espaço.

Existem ainda alguns *chillers* que são vendidos desprovidos de condensador. Neste caso, a água é arrefecida no exterior. Na maioria dos casos, tem-se um condensador ligado a uma torre de arrefecimento.

O aquecimento da água no condensador representa uma energia substancial e permite novas possibilidades em termos de aproveitamento energético. Este calor pode ser reaproveitado parcial ou totalmente para outras aplicações. Águas não tratadas podem originar problemas de corrosão e erosão, nomeadamente nas paredes do condensador, onde as pressões e temperaturas são mais altas. Por outro lado, podem surgir problemas de saúde devido à proliferação de bactérias [6-19].

Absorvedor

Zona onde o vapor de água evaporada é absorvido pela substância absorvente (solução de brometo de lítio). O calor libertado no processo de absorção é dissipado através da passagem dos tubos de água do condensador ao atravessarem o absorvedor [6].

Gerador

Zona onde é fornecido o calor pela fonte quente, de forma a separar novamente o vapor de água da substância absorvente e a re-concentrar a solução [6].

Ciclo de absorção

O ciclo de absorção é muito similar ao ciclo de refrigeração com compressão a vapor. O trabalho pode ser fornecido ao compressor por um motor eléctrico, uma máquina a gás natural ou por uma turbina. O compressor é usado para comprimir o vapor refrigerante para uma pressão mais elevada. Ao aumentar a pressão do refrigerante aumenta também a temperatura no condensador. O vapor do refrigerante é condensado passando ao estado líquido com temperatura e pressão elevada. Por causa desta condensação a temperatura é maior que a temperatura do meio ambiente, o calor passa do condensador para o ar ambiente e é libertado ou rejeitado. O líquido de alta pressão passa então por uma válvula que reduz a pressão do líquido, reduzindo a sua pressão reduz-se também o seu ponto de ebulição. O mesmo líquido passa depois para o evaporador e é fervido a esta baixa temperatura e pressão. Devido à temperatura de ebulição ser mais baixa do que a temperatura do ar, o calor desloca-se para o evaporador e causa a ebulição deste líquido. Remover calor do ar desta maneira provoca a refrigeração [26].

Os *chillers* de absorção funcionam com o princípio que alguns materiais absorvem outros, mesmo quando os dois se encontram no estado líquido. A solução de brometo de lítio é uma substância que absorve o vapor de água. Uma das maiores diferenças entre o convencional ciclo de compressão a vapor e o ciclo de absorção é o refrigerante usado.

Os CFC's são os refrigerantes mais usados para a refrigeração de sistemas mecânicos, todavia, a água destilada é usada como refrigerante na maior parte dos sistemas comerciais de absorção. Ao contrário dos sistemas mecânicos convencionais, o ciclo de absorção necessita de um segundo líquido, a solução de água e brometo de lítio, que não é tóxica. Por causa do brometo de lítio, o absorvente, não ferver, a água o refrigerante é facilmente separada do brometo ao adicionar calor. Neste ciclo temos um conjunto de componentes que trabalham como um todo e que podemos denominar por compressor térmico, que tem a função de transformar o refrigerante de baixa pressão em refrigerante de alta pressão. O compressor térmico requer dois tipos de energia para funcionar: calor e trabalho. O calor é necessário para o gerador ferver o refrigerante da solução. Esta energia calorífica é fornecida normalmente por gás natural, vapor ou água quente. O trabalho é fornecido à bomba para subir a pressão da solução proveniente de baixa pressão de evaporação para alta pressão de condensação [23-26].

O vapor refrigerante, que num ciclo de absorção é normalmente a água, passa do compressor térmico para o condensador. Este vapor é então condensado num líquido e o calor da condensação é rejeitado pelo ar ambiente, tal como no ciclo de compressão a vapor. O líquido refrigerante passa depois por uma válvula que reduz a pressão e conseqüentemente reduz-se a temperatura de ebulição. O líquido de baixa pressão vai depois para o evaporador, onde o líquido é fervido tirando o calor do ar que entra, como no ciclo de compressão a vapor. De seguida o líquido refrigerante passa para o absorvedor. Devido à falta de refrigerante na solução do absorvedor, esta solução tem forte afinidade com o refrigerante e é chamada de solução forte. Desta maneira, o vapor do refrigerante é absorvido. Depois do vapor do refrigerante se juntar à forte solução absorvente, a solução vai conter muito mais refrigerante do que tinha anteriormente. Após a diluição a solução absorvente vai conter menos concentração de absorvente tornando-se uma solução fraca. Esta solução fraca é então enviada por uma bomba a pressões elevadas e depois passa para o gerador. No gerador, calor é adicionado para separar e remover o refrigerante da solução. O vapor refrigerante de alta pressão passa depois para o condensador e agora esta solução forte e concentrada é enviada de volta para o absorvedor depois da pressão ser reduzida por uma válvula [23-26].

Os sistemas de absorção de efeito duplo possuem um segundo gerador e condensador que operam a altas temperaturas. Estas diferenças traduzem-se no aumento do efeito de refrigeração no evaporador para a mesma entrada de calor, que leva ao aumento da massa de refrigerante. Tudo isto leva a um aumento de desempenho na ordem dos 40%.

Esta diferença relativamente ao *chiller* de efeito simples leva a uma grande diferença no COP – Coeficiente de Desempenho, destes dois tipos de *chillers* conforme tabela 2.6. [6].

Vantagens e desvantagens da utilização dos chillers de absorção:

Vantagens:

- Poupança dos custos de energia em 40 %;
- Poupança de custos devido à recuperação de calor desperdiçado;
- Vida útil longa (> 20 anos geralmente);
- Não existem componentes móveis no sistema;
- Exigem pouca manutenção;
- Não são utilizadas substâncias nocivas para a camada de ozono;
- Os *chillers* de ignição indireta funcionam com uma ampla gama de fontes quentes: vapor, água quente, energia solar e processos de purga quente;
- Ocupam pouco espaço nas infra-estruturas.
- O consumo eléctrico muito baixo;
- As muito poucas partes móveis da sua concepção que levam a um aumento da fiabilidade e a custos de manutenção baixos;
- Os níveis reduzidos de ruído e vibrações.

Desvantagens:

- Os *chillers* de absorção de ignição direta necessitam de produtos para combustão o que leva ao aumento dos custos;
- Baixo COP relativamente aos chillers de compressão;
- Investimento inicial muito elevado [6].

A grande desvantagem dos *chillers* de absorção frente aos *chillers* de compressão reside no seu relativamente reduzido rendimento energético-COP. Os *chillers* de absorção apresentam COPs de 1.1, enquanto nos *chillers* de compressão o valor pode subir até 6.0. Por outro lado, os *chillers* de absorção representam um investimento inicial muito superior, entre 1.5 e 2.5 vezes mais caro. Uma solução alternativa consiste em usar um sistema híbrido integrando os dois tipos de *chillers*, um *chiller* eléctrico como base, e um *chiller* de absorção funcionando durante os períodos de cheia e de ponta.

Nas aplicações de micro-geração, a água quente produzida, aumenta o número de horas de funcionamento anual do sistema. Esta combinada, poderá ser interessante em

edifícios de escritórios, onde existem necessidades de calor para o aquecimento do ambiente no inverno, e grandes necessidades de frio para o arrefecimento do ambiente no verão [6-26].

A tabela 2.6 sintetiza as gamas de variação dos principais parâmetros respeitantes a *chillers* de absorção. *Chillers* de efeito triplo não são considerados, dado que os equipamentos existentes deste tipo, são máquinas experimentais [3].

Índices	NH ₃ – absorção	LiBr – absorção	
		Simples	Duplo
Número de efeitos	Simples	Simples	Duplo
Capacidade refrigeração (kW)	20-2500	300-5000	300-5000
COP térmico	0.6-0.7	0.5-0.6	0.9-1.1
Gama de temperatura (°C)	120-132	120-132	150-170
Custo da máquina (€/TR)	1250 a 1750	870 a 920	930 a 980

Tabela 2.6 – Características dos chillers de absorção (extraída de [3]).

Os custos de manutenção das máquinas de absorção variam em função do tipo de contrato. Na maior parte dos casos é utilizada a subcontratação e o contrato existente inclui a manutenção de todo o sistema de ar condicionado. Muitas vezes a operação também é assegurada por via da subcontratação, e a mesma empresa sob um único contrato é responsável pela operação e manutenção de todo o sistema. Nalguns casos, a entidade utilizadora do *chiller* de absorção fornece o seu próprio pessoal para assistir a operação do sistema de ar condicionado e recorre a serviços externos para verificações periódicas. Na Fig. 2.41 podemos ver exemplos de *chillers* de absorção [3].



Fig. 2.41 – Ilustração de *chillers* de absorção (imagem extraída de [3]).

-Capítulo 3-

Recuperadores de Calor

3.1 Tipos de recuperadores de calor

Um equipamento que tem por função transferir energia entre dois fluidos designa-se por recuperador de calor. É usual distinguir entre:

- Regeneradores
- Recuperadores abertos
- Recuperadores fechados

Os regeneradores são recuperadores nos quais o fluido frio e o fluido quente fluem alternadamente no mesmo espaço físico. A quantidade de energia que é transferida depende das propriedades dos fluidos, da geometria e das propriedades térmicas da superfície.

Os recuperadores abertos são equipamentos de transferência onde os dois fluidos se misturam resultando num único fluido a uma temperatura intermédia.

Nos recuperadores fechados o fluido quente e o fluido frio não entram em contacto um com o outro, estão separados por uma superfície separadora. A transferência de energia dá-se por convecção de um dos fluidos para a parede, por condução através da parede, e, finalmente, por convecção outra vez, da parede para o segundo fluido.

Os recuperadores de calor constituem o tipo de recuperadores usados em sistemas de cogeração [1].

Os recuperadores de calor podem ser classificados em recuperadores de passagem simples, ou de passagem múltipla, se cada fluido atravessa o recuperador apenas uma vez, ou mais que uma vez, respectivamente. No que respeita ao sentido relativo dos dois fluidos, os recuperadores podem ser de fluxo paralelo ou de co-corrente, se os fluidos se deslocam no mesmo sentido, ou de contra-corrente, quando se deslocam em sentidos opostos, ou ainda de fluxo cruzado, para o caso de a direcção ser ortogonal.

Na Fig. 3.1 representa-se uma imagem de um recuperador de calor comum, designado de tubo duplo, que pode ser de co-corrente ou de contra-corrente, e na Fig. 3.2 mostra-se um esquema de um recuperador de fluxo cruzado [1-18].

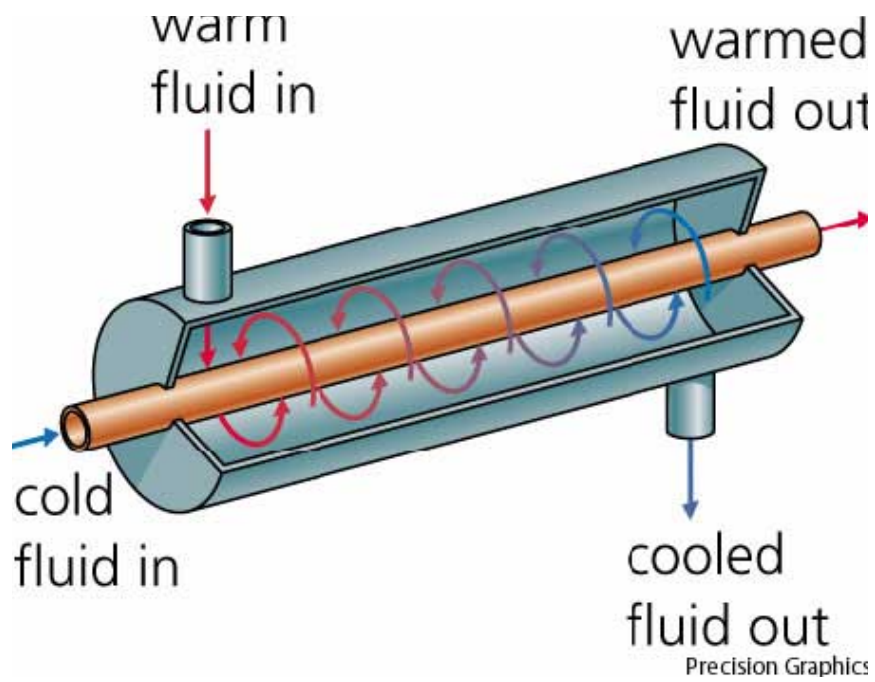


Fig. 3.1 – Ilustração de um recuperador de calor de tubo duplo (imagem extraída de [1]).

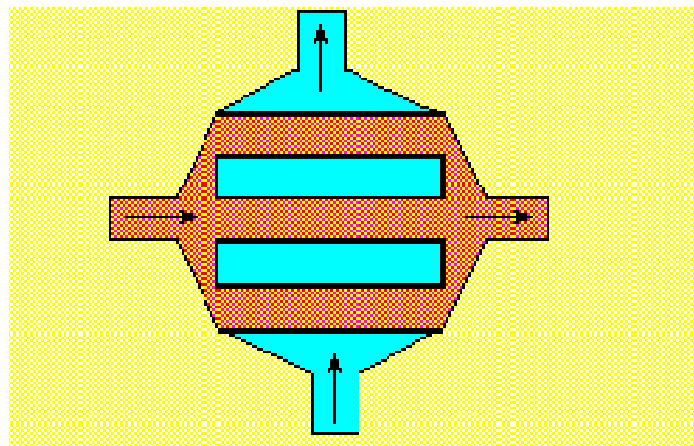


Fig. 3.2 – Ilustração de um esquema de um recuperador de calor de fluxo cruzado (imagem extraída de [1]).

3.2 Recuperadores de calor de passagem simples

Na Fig. 3.3 representa-se o perfil de temperaturas ao longo de um recuperador de calor de passagem simples do tipo (a) co-corrente e (b) contra-corrente. [1]

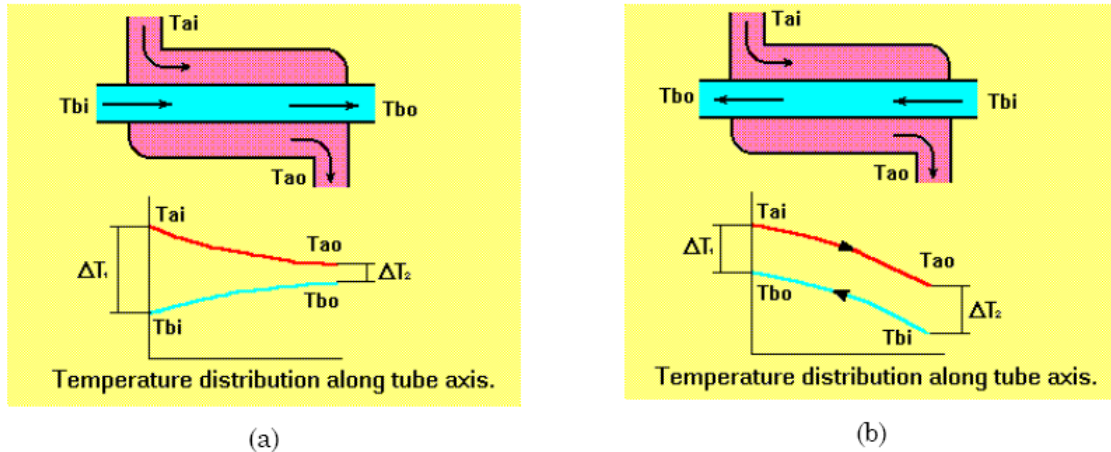


Fig. 3.3 – Ilustração de um perfil de temperatura ao longo do tubo: (a) co-corrente; (b) contra-corrente (imagem extraída de [1]).

Tai: temperatura de entrada do fluido quente; Tbi: temperatura de entrada do fluido frio; Tao: temperatura de saída do fluido quente; Tbo: temperatura de saída do fluido frio

Depreende-se da Fig. 3.3 que os perfis de temperatura exibidos pelos recuperadores de co-corrente e de contra-corrente são significativamente diferentes.

No primeiro caso, as temperaturas de saída dos dois fluidos são próximas. É possível demonstrar que esta temperatura seria a que se obteria, se os dois fluidos fossem misturados num recuperador aberto.

Nos recuperadores de contra-corrente pode verificar-se que é possível a temperatura de saída do fluido quente (Tao) ser inferior à temperatura de saída do fluido frio (Tbo). Esta hipótese não se coloca sequer no caso dos recuperadores de co-corrente.

Conclui-se, portanto, que a transferência de calor por unidade de área de recuperação é maior no caso dos recuperadores de contra-corrente do que nos recuperadores de co-corrente. Isto explica o uso mais generalizado dos primeiros, sendo a utilização dos segundos apropriada quando se pretende uniformizar a temperatura de dois fluidos, e não quando se pretende maximizar a transferência de calor entre fluidos [1-16].

-Capítulo 4 -

Avaliação Técnico-Económica

4.1 Selecção do sistema

A escolha da tecnologia mais adequada a cada aplicação, do conjunto de opções apresentadas, é um procedimento que deve ser realizado de forma cuidadosa e criteriosa, atendendo a diversos aspectos [6].

Um primeiro aspecto a ser analisado, é a relação entre potência e calor, que caracteriza cada tecnologia de cogeração. Uma vez que, de forma geral, essas relações não são coincidentes com relações de procura de potência eléctrica e calor em unidades industriais, a escolha de uma tecnologia em detrimento de outra implica sempre, na escolha pelo atendimento pleno de uma das duas formas de procura energética. Na tabela 7 podemos ver a razão entre potência eléctrica e calor [6-30].

	Turbina a vapor	Ciclo combinado	Motor diesel	Turbina a gás
Electricidade/Calor	0.10 a 0.30	0.60 a 1.50	0.80 a 2.40	0.30 a 1.2

Tabela 4.1 – Razão entre potência eléctrica e calor (extraída de [6]).

Outros aspectos a serem considerados na escolha da tecnologia a ser usada são:

- Disponibilidade de combustível adequado a cada tecnologia. É necessário que as empresas tenham combustíveis, com condições de fornecimento adequadas. Por exemplo, no caso de ser possível a utilização de combustível gasoso, nomeadamente o gás natural, é essencial saber a pressão máxima de fornecimento possível, sendo este um facto que pode limitar a utilização das tecnologias. É possível recorrer à utilização de um compressor de gás para a obtenção das pressões desejadas sendo, neste caso, o valor do investimento substancialmente mais elevado;
- Cuidados referentes ao impacto ambiental;
- Custo do investimento. Embora eventualmente viáveis financeiramente, existem projectos de cogeração que pela sua reduzida dimensão não justificam a complexidade subjacente ao projecto, para além de não terem o impacto energético a nível nacional que justifique a sua implementação. Um sistema de cogeração só é viável em empresas que operem, pelo menos, 4500 horas por ano

e que seja permanentemente necessário o fornecimento de energia térmica e eléctrica de forma estável.

- Eficiência de conversão. O factor mais importante que define a cogeração, como economicamente rentável, é a diferença entre o custo de energia eléctrica e o custo de combustível, para a empresa em questão. Normalmente, quanto maior for o diferencial, mais favorável é o projecto [30-11].

Os projectos de cogeração são flexíveis e não há soluções rígidas para cada tipo de consumidor energético. O ponto de partida para esses projectos é um estudo preliminar de viabilidade com o objectivo de identificar o sistema mais adequado para as necessidades do consumidor e determinar se é economicamente atractivo ou não [2].

O estudo preliminar deve envolver as seguintes fases:

1. Análise da situação energética actual;
2. Estimativa das necessidades futuras;
3. Avaliação técnica;
4. Avaliação económica.

A primeira fase deste processo diz respeito à determinação das necessidades energéticas da instalação. Todas as medidas de economia de energia deverão já ter sido aprovadas, antes de se enveredar por um projecto de um sistema de cogeração. Isto deve incluir a análise de consumos de energia eléctrica e energia térmica, e particularmente de energia para arrefecimento, e da sua distribuição, bem como dos custos correspondentes aos sistemas existentes. As necessidades de combustíveis, de água quente ou vapor, bem como de frio, durante um período correspondente aos 2-3 anos anteriores, devem estar cuidadosamente registadas. Perfis de consumo diário, durante dias típicos, fornecem indicação sobre a utilização potencial da instalação. Previsões sobre consumos e utilizações futuras deverão ser realizadas. A partir das análises anteriores, a razão calor/electricidade é calculada, que é um dos principais critérios pelo qual a máquina é seleccionada [2-3].

Também deve ser realizado um estudo detalhado sobre possíveis acréscimos de procura. Uma vez determinada a situação actual, é necessário tomar uma decisão sobre a instalação mais adequada para o caso particular, tal como: turbinas de gás, motores alternativos. A estrutura de consumos eléctricos e térmicos e também outros factores, tais como tempos de operação, combustíveis disponíveis, têm que ser tidos em consideração em todas estas avaliações [3].

A selecção de cada sistema será regida por diferentes critérios:

- Turbinas de gás devem ser preferidas;
- Se há necessidades contínuas de energia eléctrica;
- Se gás o natural está disponível, embora isto não seja um factor limitativo;
- Se há preferência pela produção de energia térmica;
- Se o consumidor necessita, grandes quantidades de vapor a pressão elevada;
- Se uma grande potência unitária é necessária;
- Num ciclo combinado com turbina de vapor;
- Para consumidores com necessidades de gases quentes a temperaturas (400-500°C);
- Motores alternativos devem ser preferidos;
- Se há variações nas necessidades de energia eléctrica, ou quando o funcionamento não é contínuo;
- Se é necessário vapor de água de baixa pressão, ou água quente até 110°C, ou gases quentes (90-150°C);
- Se o consumidor tem uma razão electricidade/calor elevada;
- Se os aprovisionamentos energéticos têm que ser faseados;
- Quando o gás natural não está disponível e não há restrições ambientais, dando-se preferência a um motor Diesel alimentado a fuelóleo;
- Se o gás natural está disponível, instalações baseadas em motores alternativos a gás, serão em geral a escolha mais adequada [3].

Uma vez seleccionado este componente principal, será necessário escolher o correspondente equipamento auxiliar e configurar o sistema de cogeração para satisfazer as necessidades energéticas do consumidor.

A fase seguinte consiste na avaliação técnica do sistema, determinando-se os consumos de electricidade e de combustíveis e calculando-se as economias de energia. Sempre que exista legislação regendo estas matérias, esta é uma área em que podem ser impostos limites. À decisão referente à máquina principal segue-se a escolha da unidade de produção de frio. Deve ser elaborada uma lista de máquinas de frio disponíveis com base nas suas características de energia de alimentação que têm que condizer com as características da energia térmica à saída da máquina de base. Uma lista de verificação como primeiro passo indicativo, com o objectivo de facilitar a primeira avaliação do potencial de aplicação de um sistema de cogeração, é apresentada na tabela 4.2 [3-30].

1. Consumo de energia térmica (vapor, água quente) Ex: Consumo de combustíveis para a produção de calor	> 80.000 l/ano de fuelóleo ou > 80.000 m ³ /ano de gás	SIM	NÃO
		SIM	NÃO
2. Elevado consumo de electricidade	>500.000 kWh/ano	SIM	NÃO
3. Elevada potência da base do diagrama de carga eléctrico	Min. 100 kWe durante min. 5.000 horas/ano	SIM	NÃO
4. Razão de consumos electricidade/calor	>0.7	SIM	NÃO
5. Existe autoprodução de energia eléctrica, através de um gerador a diesel ou por outro meio equivalente?		SIM	NÃO

Tabela 4.2 – Lista de verificação (extraída de [3]).

A possibilidade de uma utilização económica da cogeração torna-se maior à medida que mais questões forem respondidas afirmativamente.

4.2 Análise económica

A análise económica é que irá provar se a cogeração é aceitável e qual a tecnologia a ser implantada. Para uma instalação de cogeração há três regimes operatórios principais: a unidade funciona de modo a fornecer a energia eléctrica correspondente à base do diagrama de carga eléctrico e a energia térmica produzida; qualquer défice será complementado com electricidade adquirida à rede pública e energia térmica produzida nas caldeiras de apoio ou em aquecedores de reforço; a unidade funciona para produzir electricidade em excesso comparativamente às necessidades do edifício, sendo o excedente vendido à rede, enquanto toda a produção de calor é utilizada no edifício; a unidade funciona de modo a abastecer de electricidade o edifício, com ou sem venda de excedentes à rede, e a energia térmica produzida é utilizada em parte no edifício e a restante vendida a clientes externos. Usualmente as unidades de cogeração fornecem a energia eléctrica correspondente à base do diagrama de carga eléctrico, sendo o restante dos consumos eléctricos adquiridos às empresas eléctricas distribuidoras. Deve haver algum cuidado por forma a utilizar-se todo o calor produzido pelo sistema [30-11].

O custo de uma instalação baseia-se em:

- **Custo de investimento:** É a soma dos custos de aquisição da maquinaria de base de energia térmica/frio e de produção de energia eléctrica, de unidades de armazenagem de combustível, de possíveis filtros para os gases de combustão, de mão-de-obra, de instalações específicas do edifício, de tubulação, de cabeamento, de sistemas de controlo e finalmente de todos os trabalhos de engenharia e respectivos estudos.
- **Custos de operação e manutenção:** O custo do combustível da principal máquina motriz de cogeração consiste no maior custo operacional. A isto acresce o balanço no que respeita aos custos com a electricidade, entre as receitas resultantes das vendas de excedentes à rede e as despesas com aquisições à rede. Os custos com mão-de-obra e peças sobressalentes são calculados para a manutenção periódica do sistema, e adicionam-se aos custos operatórios.

Como resultados da análise económica, são obtidos parâmetros de rentabilidade, geralmente o período de retorno simples do investimento, o VAL – Valor Actual Líquido e a TIR – Taxa Interna de Rentabilidade, permitindo que uma decisão seja tomada sobre a viabilidade do sistema seleccionado [2].

4.3 Cogeração e trigeriação em Portugal

A cogeração foi introduzida em Portugal no sector industrial nos anos quarenta, sendo as primeiras instalações baseadas em turbinas de vapor, contra-pressão, que satisfiziam grandes necessidades de vapor de baixa pressão. Seria, no entanto, apenas na década de noventa que a cogeração viria a ter um crescimento significativo em termos de potência instalada e de energia produzida. A cogeração a gás natural é a única que actualmente se encontra em crescimento, enquanto que a cogeração Diesel e a cogeração em contra-pressão mantêm uma tendência de estabilização [3].

Actualmente, em Portugal, os cerca de 1.090 MW de potência instalada e os 5.623 GWh de energia eléctrica produzida em cogeração representam, respectivamente, cerca de 11% e 13% da potência eléctrica instalada e da produção de energia eléctrica no SEN - Sistema Eléctrico Nacional. O custo de investimento numa central de cogeração ronda os 750 €/kW. Na Fig. 4.1 podemos ver a distribuição da potência total instalada de cogeração em Portugal [2-3].

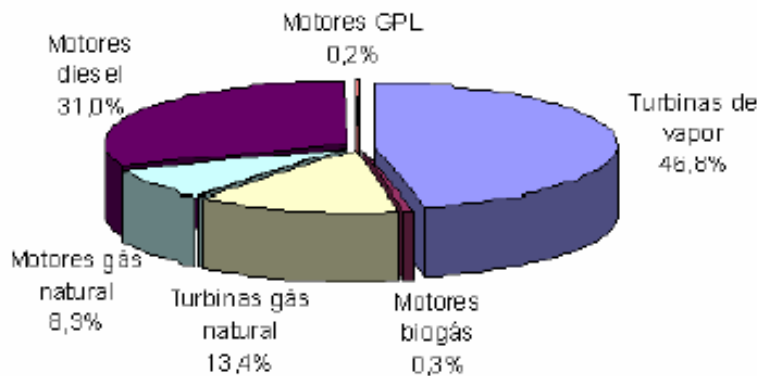


Fig. 4.1 - Ilustração da distribuição da potência total instalada de cogeração em Portugal por tecnologia (imagem extraída de [3]).

A rentabilidade dos sistemas de cogeração tem, em geral, vindo a diminuir nos últimos anos, devido essencialmente a uma subida do preço dos combustíveis e a uma diminuição do preço da electricidade. A viabilidade económica dos projectos de cogeração depende da diferença entre os preços destas duas energias, da sua estabilidade e também os preços de aquisição dos excedentes de produção por parte do SEP - Sistema Eléctrico Público. No entanto, as últimas alterações legislativas vieram valorizar a remuneração pelo fornecimento à rede eléctrica da energia produzida por cogeração, nomeadamente através da inclusão de uma parcela ambiental e de uma parcela representativa das perdas evitadas nas redes de transporte e distribuição de electricidade. As aplicações de cogeração no sector terciário têm um valor insignificante, apesar do enorme potencial expectável para esta tecnologia. Um total de vinte instalações utiliza cogeração, pretendendo a apenas quatro subsectores distintos, com a potência total instalada destas unidades em aproximadamente 9.6 MW, o que é equivalente a 0,9% da potência total instalada de cogeração em Portugal.

Relativamente à desagregação da potência instalada por subsectores, os hotéis representam 63.5% da potência total instalada do sector e as estações de tratamento de águas residuais aproximadamente 33%, enquanto que o subsector dos hospitais/serviços de saúde têm uma expressão insignificante, representando apenas 0.8% [3-11].

O subsector das piscinas, que contabiliza 30% do número de instalações de cogeração, em termos de potência instalada representa cerca de 3% da potência total do sector. A respeito das piscinas, além da baixa potência instalada, há uma situação semelhante às ETAR – Estação de Tratamento de Águas e Resíduos, isto é, não há necessidades de arrefecimento que possam justificar a evolução das instalações de cogeração existentes

para instalações de trigerção. Uma excepção poderia ser naquelas piscinas de grandes dimensões, para competições desportivas, dimensões olímpicas, mas devido ao pequeno número de piscinas deste tipo que existe no país, o respectivo potencial de trigerção é diminuto [3].

Perto do final de 2002, havia nove instalações de trigerção em Portugal, estando apenas oito a funcionar satisfatoriamente. Ainda para 2002 estava previsto o arranque de uma nova instalação. Aquelas nove instalações representam proximadamente 26 MW, o que equivale a 2.4% da potência total instalada de cogeração em Portugal. Todos os *chillers* de absorção utilizados nessas instalações têm água-LiBr como par de trabalho. As instalações existentes distribuem-se por cinco subsectores, sendo o dos centros comerciais o mais representativo em termos de número de instalações 33% e de potência eléctrica instalada em trigerção 57% no sector terciário. Na Fig. 4.2 podemos ver a repartição da potência eléctrica total de trigerção instalada no sector terciário português por subsector e na Fig. 4.3 por tecnologia de cogeração [2].

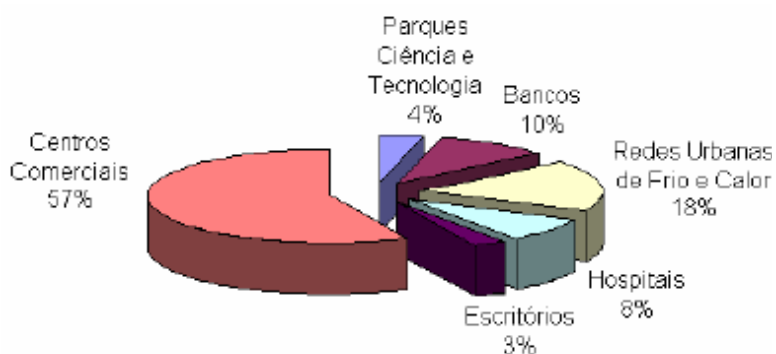


Fig. 4.2 - Ilustração da repartição da potência eléctrica total de trigerção instalada no sector terciário português por subsector (100% = 26.3 MW) (imagem extraída de [2]).

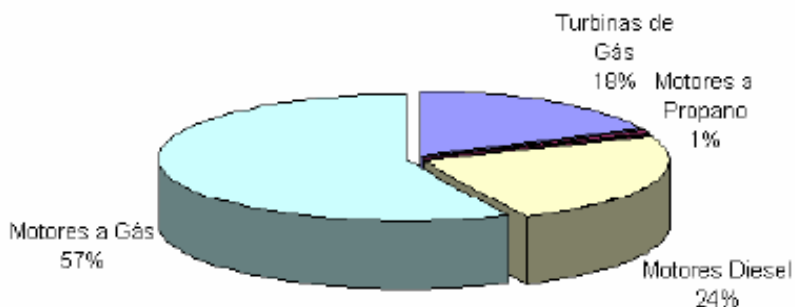


Fig. 4.3 - Ilustração da potência eléctrica total de trigerção instalada no sector terciário português por tecnologia de cogeração utilizada (100% = 26.3 MW) (imagem extraída de [2]).

Os projectos de cogeração/trigeração podem ser apoiados financeiramente no âmbito do POE - Programa Operacional da Economia, através de uma medida de apoio ao aproveitamento do potencial energético e racionalização de consumos, criado pelo Ministério da Economia. É possível obter um incentivo até um máximo de 1.500.000 Euros, composto de uma parcela não reembolsável INR – Incentivo Não Reembolsável e de outra reembolsável IR – Incentivo Reembolsável. O INR pode atingir 20% das despesas consideradas elegíveis, ou 40% se forem utilizados mais de 50% de recursos renováveis ou resíduos industriais, agrícolas ou urbanos, em ambos os casos até um máximo de 300.000 Euros. O IR varia entre 10% e 20% do montante remanescente das despesas elegíveis e está directamente indexado ao REE - Rendimento Eléctrico Equivalente da instalação. O apoio concedido sob esta última componente do incentivo é reembolsado em 5 anos, através de pagamentos semestrais e após um período de carência de dois anos.

Outro programa de apoio financeiro possível é o SIME - Sistema de Incentivos à Modernização Empresarial [2-11].

Contudo, o investimento deve incorporar um carácter integrado e estratégico para o promotor, ou seja, deve incluir várias componentes tais como inovação, qualidade e ambiente, energia e qualificação dos recursos humanos. O SIME não se aplica a todos os subsectores do sector terciário – por exemplo, os hospitais não são cobertos, mas pode ser uma boa alternativa para o subsector hoteleiro. O incentivo máximo não pode ultrapassar 50% do investimento total elegível para projectos promovidos por PME's – Pequenas e Médias Empresas, ou 45% nos restantes casos. O investimento mínimo elegível é variável entre 150.000 Euros (para PME's) e 600.000 Euros (não PME's). [2-3]

A COGEN Portugal - Associação Portuguesa para a Eficiência Energética e Promoção da Cogeração é uma associação sem fins lucrativos que tem por objectivo promover a utilização eficiente da energia, através de processos de produção combinada de calor e electricidade, conhecidos por cogeração ou através da produção descentralizada da energia, qualquer que seja a fonte de energia primária utilizada.

Face ao desenvolvimento da cogeração, verificado em Portugal a partir do início dos anos 90 e às dificuldades que rodeavam o exercício desta actividade, um grupo de dezasseis empresas, com instalações de cogeração, fundou a APPEC - Associação Portuguesa de Produção de Energia em Cogeração, em Janeiro de 1994, com a finalidade de conseguir um enquadramento legislativo e económico adequado às cogerações já existentes e potenciador de novos projectos, com uma actuação

concertada junto dos responsáveis pelas políticas e pela regulamentação do sector energético, dos fabricantes e instaladores de equipamentos, dos fornecedores de combustíveis e de lubrificantes e de outros agentes do mercado.

A associação foi rapidamente reconhecida pelo poder político e pela administração pública e ainda pelas instituições comunitárias, como a organização representativa dos interesses da cogeração em Portugal e nessa qualidade tem participado na discussão de matérias que lhe respeitam com as entidades e organismos dos sectores energético e ambiental.

A associação organiza uma conferência anual que tem vindo a ser um evento de referência no âmbito da energia e de modo especial na cogeração. Têm sido seleccionados temas de grande acuidade e oportunidade, tratados por reputados especialistas estrangeiros e nacionais. A adesão a esta conferência tem-se mantido em níveis elevados, com participantes nacionais e alguns estrangeiros com interesses na actividade da cogeração em Portugal.

É organizado, anualmente, um jantar-debate sobre um tema relevante e actual nas áreas da energia e do ambiente.

Workshops e seminários, abordando matérias essenciais para os responsáveis e técnicos das instalações de cogeração e destinados, em principio, às empresas associadas, ocorrem duas ou três vezes por ano.

São também promovidos encontros e debates técnicos entre os associados e os fabricantes de equipamentos e empresas fornecedoras de combustíveis e de lubrificantes, sempre que os problemas ou dificuldades o exijam ou para apresentação de novos produtos ou serviços [2-33].

A APPEC foi convidada, logo após a sua criação, a tornar-se membro nacional da *Cogen Europe* com sede em Bruxelas passando a integrar o seu comité executivo. Esta associação procura a promoção da cogeração na Europa, identificando as barreiras ao seu desenvolvimento e coordenando acções para as reduzir, em colaboração com as instituições comunitárias, comissão, conselho e parlamento e com as associações nacionais de outros países. Por a associação ter passado a integrar uma rede europeia de associações com objectivos semelhantes, foi alterada a denominação para COGEN Portugal, em 1997. É ainda membro da WADE - *World Alliance for Decentralized Energy*, com sede nos EUA, cuja missão é acelerar o desenvolvimento mundial de sistemas de energia descentralizada, incluindo cogeração.

A cogeração em Portugal foi-se desenvolvendo e com ela cresceu a COGEN Portugal, tendo hoje mais de cem associados com interesses na produção descentralizada de energia, e de um modo especial na cogeração. E assim, para além das empresas industriais e do sector dos serviços com unidades de cogeração, a Associação tem como membros:

- Promotores e investidores em projectos de energia e designadamente em cogeração;
- Fabricantes e fornecedores de equipamentos;
- Instaladores e empresas de manutenção;
- Empresas de engenharia;
- Fornecedores de combustíveis (fuelóleo e gás natural) e de lubrificantes;
- Entidades individuais.

No total, os últimos números disponíveis, indicam que a potência instalada em unidades de cogeração atinge cerca de 1200 MW, com a distribuição por tecnologia que se indica na Fig. 4.4 [2,29-33].

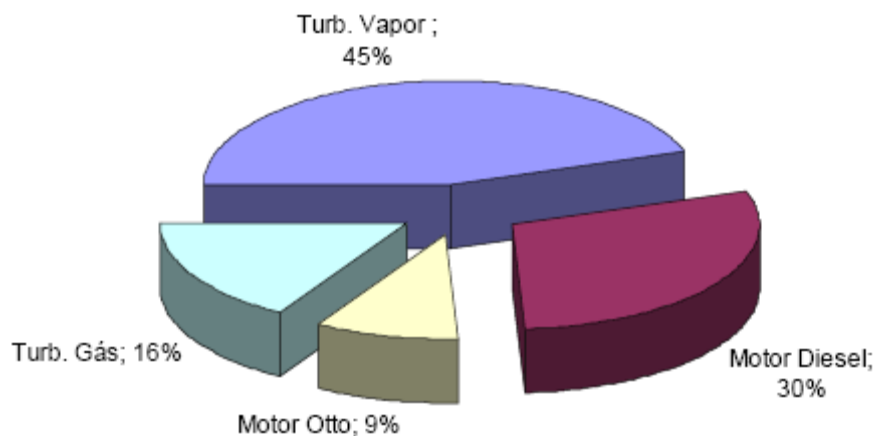


Fig. 4.4 - Ilustração da distribuição dos sistemas de cogeração por tecnologia (imagem extraída de [2]).

Em termos sectoriais, a distribuição é a que se apresenta na Fig. 4.5.

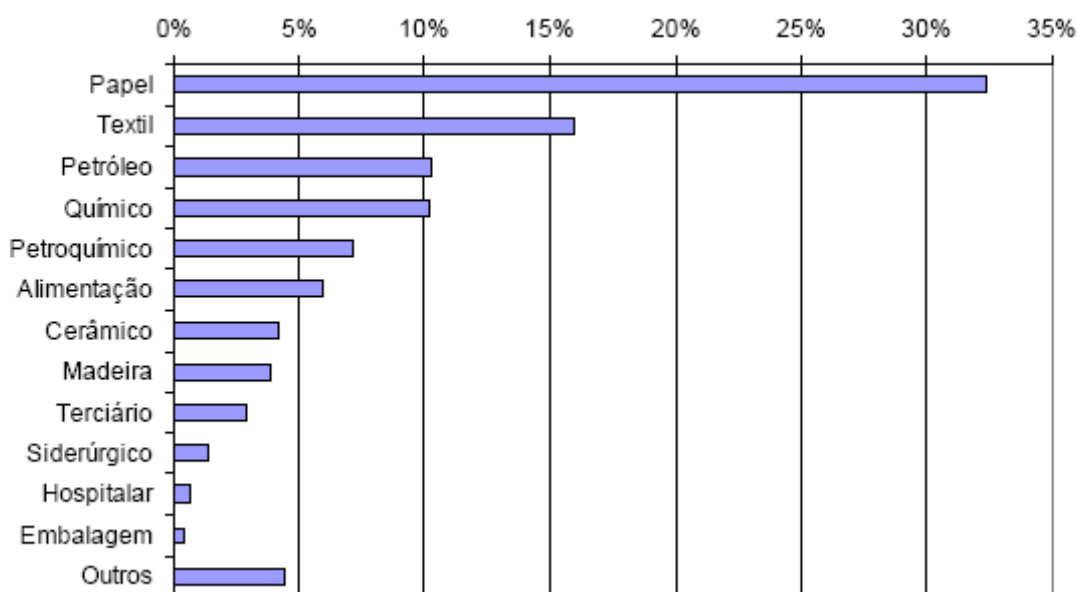


Fig. 4.5 - Ilustração da distribuição dos sistemas de cogeração por sector de actividade (imagem extraída de [2]).

4.4 Enquadramento jurídico

A evolução da legislação referente à cogeração, é apresentada seguidamente.

- Lei n.º 2002, de 26 de Dezembro de 1944
 - Electrificação do País;
 - Reconhece a importância da figura do pequeno produtor de energia;
- Decreto-Lei n.º 502/76, de 30 de Julho
 - Criação da Empresa Pública EDP - Electricidade de Portugal ;
 - Prevê a figura do pequeno produtor de energia eléctrica;
- Decreto-Lei n.º 20/81, de 28 de Janeiro
 - Medidas de incentivo à autoprodução de energia eléctrica;
- Decreto Lei n.º 21/82, de 28 de Julho
 - Produtor independente de energia eléctrica;
 - Possibilidade de proceder à distribuição;
- Decreto-Lei n.º 189/88, de 27 de Maio
 - Regula a actividade de produção de energia eléctrica;
 - Requisitos instaurados;
 - Originou um acentuado desenvolvimento de utilização do processo de cogeração;

- Surgimento de muitas especialidades;
- Necessidade de autonomização do enquadramento legal da cogeração;
- Decreto-Lei n.º 186/95, de 27 de Julho
 - Consagra a separação legislativa das formas de produção de energia eléctrica, aplicando-se exclusivamente à produção de energia em instalações de cogeração;
 - Estabelecimento de regras quantitativas;
- Decreto-Lei n.º 538/99, de 13 de Dezembro
 - A criação do mercado interno de electricidade;
 - A defesa do ambiente – estreitamento das políticas ambiental e energética;
- Decreto-Lei n.º 313/2001, de 10 de Dezembro
 - Reformulação das condições a que devem obedecer as instalações de cogeração;
 - Clarificação das situações de coexistência de duas ou mais instalações de cogeração associadas a uma mesma instalação de utilização de energia térmica cogerada;
 - Ajustamento do âmbito de aplicação do mecanismo de gestão conjunta de energia.

Diferenciação do tarifário aplicável ao fornecimento para a rede do SEP da energia eléctrica produzida em instalações de cogeração, relativamente à utilização dos varios tipos de combustíveis;

Direitos inerentes ao exercício da actividade de cogeração

. Artigo 5.º do diploma de 95 versus artigos 5.º e 8.º do diploma de 99;

. Direito de fornecer energia ao SEP (1995);

. Direito de fornecer energia ao SEP ou às entidades referidas no artigo 8.º a energia eléctrica que excede aquela que deve obrigatoriamente ser consumida internamente (1999);

Consumo de energia eléctrica produzido

- Cogeração com consumo de energia eléctrica;
- Fornecimento ao SEP, anualmente, menos de 60% da energia produzida;
- Fornecimento prioritário de energia eléctrica ao estabelecimento que seja o principal consumidor de energia produzida;

- Consumo da energia eléctrica produzida, através de linha directa, pelo accionista principal do cogedor, ou pelo estabelecimento que consuma, pelo menos, 40% da energia térmica útil;

Nos casos de auto consumo pode ser consumida, através de linha directa, em qualquer entidade que detenha pelo menos 10% do capital social do cogedor;

Fornecimento de energia eléctrica pelo cogedor

- Através de linha directa;
- As entidades que sejam abastecidas em MT, AT ou MAT e que:
 - Sejam maioritariamente detidas, directa ou indirectamente, por empresa que consuma, pelo menos, 50% da energia térmica útil produzida pelo cogedor;
 - Detenham uma participação maioritária no capital social de empresa que consuma, pelo menos, 50% de energia útil;
 - Sejam maioritariamente detidas pela entidade que detém uma participação maioritária no capital social de uma empresa que consuma, pelo menos, 50% da energia térmica produzida;
 - Tanto os cogedores que façam estes fornecimentos como as entidades por eles abastecidas ficam sujeitos na parte aplicável às disposições, regras e regulamentos que regem o SENV;
 - Autorização da instalação e requisitos técnicos
 - Artigos 13.º a 20.º do Decreto-Lei n.º 538/99
 - Informação, fiscalização e auditorias
 - Exames periódicos e auditorias (artigo 23.º) [2-3].

-Capítulo 5 -

Aplicações na Indústria

5.1 Aplicações na indústria

No actual período de incertezas na produção e transmissão de energia eléctrica, a utilização dos sistemas de cogeração tornou-se uma grande oportunidade económica, estratégica e tecnológica, para as pequenas e médias empresas, considerando a extensão e perspectivas de expansão da rede de distribuição de energia.

O aumento das taxas, associada à perspectiva de retoma do crescimento económico e à incerteza quanto a expansão da oferta de electricidade, faz com que a cogeração comece a ser avaliada como uma solução economicamente viável para o fornecimento de energia e garantia de operação das empresas [2].

5.2 Caso de estudo

Identificação da empresa:

Designação: COSTA IBÉRICA, Madeiras S.A.

Indústria: Indústria de Serração de Madeira e Mobiliário

Instalação e sede social:

Local - EN 16, Km 105.8, Vila Garcia, Fornos de Maceira Dão,

Concelho - Mangualde

Distrito - VISEU

5.2.1 Empresa promotora

Generalidades

Denominação Social: COSTA IBÉRICA, Madeiras, S.A.

Actividade Principal: Serração de madeiras, fabrico de painéis de madeira e paletes

Sede: Vila Garcia – Mangualde

Características Gerais da Instalação:

A central termoeléctrica será constituída por um gerador assíncrono com uma potencia de 287kVA, accionado por uma turbina de contra-pressão, alimentada por um gerador

de vapor de alta pressão a instalar, 1 transformador com uma potencia de 500kVA, e respectivo equipamento de comando, corte, protecção e medida.

A interligação da central termoeléctrica ao posto de transformação existente da fábrica, implicara alterações na instalação eléctrica actual da COSTA IBÉRICA, Madeiras, S.A.

A central termoeléctrica não ira funcionar isolada do SEP.

5.2.2 Introdução

Seguidamente é apresentado o Projecto de Licenciamento das Instalações Eléctricas de uma Instalação Termoeléctrica, utilizando como combustíveis desperdícios de madeira de pinho, principalmente a casca do pinheiro, a implementar nas instalações fabris da Costa Ibérica, Madeiras, S.A., sitas na freguesia de Fornos de Maceira Dão, concelho de Mangualde, distrito de Viseu.

Este projecto foi elaborado nos termos previstos no Decreto-Lei nº 189/88, de 27 de Maio, com a redacção dada pelo D.L. nº 313/95, de 24 de Novembro e no "Guia Técnico das Instalações de Produção Independente de Energia Eléctrica", editado pela Direcção-Geral de Geologia e Energia, dado referir-se a uma instalação produtora de energia eléctrica através de uma turbina de contra-pressão, tendo como combustível um recurso renovável (casca de pinheiro).

Da energia eléctrica produzida pela central termoeléctrica prevê-se a sua venda ao SEP.

A Central Termoeléctrica a instalar foi adquirida pelo promotor na sequência de um processo de falência da firma “ VICTOR ANGELO – Indústria de Madeiras, S.A.” de Travassô - Agueda, que licenciou o seu estabelecimento, junto da DGE, pelo Processo El 2.0/245

5.2.3 – Memória descritiva

Generalidades

Pretende esta firma executar um Projecto de Economia Energética visando a produção combinada de vapor e energia eléctrica, utilizando subprodutos de madeira próprios, casca de pinho, serrim, pó de lixadeiras, retestos.

A instalação compreenderá basicamente a substituição da parte da actual rede de tubagens e da substituição da caldeira de baixa pressão de água sobreaquecida de 1.000.000 kcal / h existente, por um gerador de vapor de alta pressão a 20 bar, com a capacidade nominal de 5.5 Ton/h. O Vapor produzido pela caldeira passará por uma turbina de contra-pressão e o escape desta alimentará os 2 secadores de madeira existentes e os 2 novos secadores/aero-arrefecedores a instalar.

Nestas condições conseguirão além dos benefícios da autoprodução de energia eléctrica, eliminar-se todos os resíduos de madeira existentes e sem qualquer outra utilização, e obter-se-á uma melhoria do rendimento global da instalação.

Prevê-se ainda a instalação dum desgaseificador térmico, em substituição do tanque de alimentação e expansão de água existente, de forma a permitir um funcionamento a 105 °C, utilizando para o aquecimento, o vapor de escape da turbina com a vantagem de reduzir significativamente o teor de oxigénio na água de alimentação da caldeira, permitindo ao mesmo tempo reciclar uma parte do vapor da turbina com a vantagem de aumentar a energia eléctrica produzida.

O novo equipamento de produção irá ser instalado num edifício próprio, em alvenaria, insonorizado para o efeito.

De acordo com o PIP – Pedido de Informação Prévio, registo DGE n.º 1361, não há inconveniente numa potência instalada de 325 kVA, para uma Scc mínima de 27 MVA. Assim, e conforme o disposto no artigo 11 do D.L. 189/88, de 27 de Maio, com a redacção do DL. Nº 313/95, de 24 de Novembro, o valor da potência aparente a instalar é inferior ao limite legal.

Regime de Funcionamento

Dado o elevado grau de automatização dos equipamentos a instalar, associado ao facto de quer a caldeira, quer a turbina, serem equipamentos de grande fiabilidade, prevê-se um regime de funcionamento de 8.000 horas/ano.

Consumos Actuais da Fábrica

Actualmente a empresa COSTA IBÉRICA – Indústria DE MADEIRAS, S.A., consome 287 ton/ano de raspa de madeira e 2327 MWh/ano de energia eléctrica, que se destinam à produção directa de painéis e mobiliário de madeira de pinho, principalmente.

Este novo grupo de produção de energia eléctrica não irá ter qualquer influência nos consumos da fábrica, visto que irá aproveitar um subproduto pobre da madeira, casca, podendo-se eventualmente vender a melhor preço os resíduos secos agora utilizados, raspa de madeira, na caldeira de água quente, que entretanto será desactivada.

Produções e Rendimentos

A quantidade de combustível disponível anualmente, é de cerca de 9200 Ton de casca de pinheiro com um PCI médio de 9,3 MJ/Kg.

Com esta quantidade de combustível serão produzidos 2100 MWh/ano de energia eléctrica.

A energia térmica produzida pelos geradores de vapor além da produção de energia eléctrica é utilizada nos secadores de madeira e aquecimento ambiente, indispensável numa indústria de madeiras. Na Tabela 5.1 podemos ver os cálculos de rendimentos eléctricos.

Cálculo de rendimentos eléctricos	Ton/ano	GWh/ano	%
Consumo do gerador de vapor	9200	10.700	100
Energia eléctrica produzida pelo gerador	-	2.100	19.6

Tabela 5.1 – Cálculo de rendimentos eléctricos

Balanço Económico

Para a instalação da nova unidade de produção de energia eléctrica está previsto um investimento total cerca de 500.000 €. Dado que se prevê a venda total de energia eléctrica ao SEP, o retorno deste investimento está na quantidade de energia eléctrica fornecida ao SEP.

Assim, a poupança económica está nos 2100 MWh/ano de energia eléctrica, produzidos pelo novo gerador, que, vendida ao SEP a preços médios de 2005 (0,085€/kWh, valor de compra de energia eléctrica pelo SEP), corresponde a 178.500 €/ano, estimando-se assim o período de retorno de investimento em 60 meses.

Impacto Ambiental (Ruído) e Segurança

- Insonorização

O equipamento de produção irá ser instalado no edifício fabril, devendo cumprir com o estabelecido por Lei (Regulamento Geral Sobre o Ruído Decreto-Lei nº 251/87, de 24 de Junho).

- Segurança

A nível de segurança, foram contemplados os seguintes aspectos:

. Protecção contra incêndios: A instalação obedecerá às normas de segurança em vigor, dispondo de diversos equipamentos contra incêndio, nomeadamente, de detecção e de combate.

. Protecção contra contactos accidentais com peças em movimento ou a altas temperaturas. As diversas tubagens e condutas quentes e peças em movimento estarão protegidas, as primeiras com isolamento térmico e protecção mecânica, e, as segundas, através de dispositivos adequados.

. Protecção contra contactos directos: serão escolhidos materiais com índice de protecção adequado e por afastamento.

. Protecção contra contactos indirectos: estabelecer-se-á ligação das massas metálicas a rede de terras.

. Informação de segurança: serão afixados quadros com instruções de primeiros socorros, para vítimas de electrocussão, bem como luvas e tapete isolante, no posto de transformação.

A instalação eléctrica cumpre com o disposto no Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e de Seccionamento, posteriores alterações e com o disposto no Regulamento de Segurança de Instalações de Utilização de Energia Eléctrica.

5.2.4 Projecto das instalações eléctricas

O presente projecto eléctrico diz respeito à instalação de média tensão, incidindo principalmente no grupo gerador e a sua interligação com o SEP, não esquecendo as consequências que advêm da sua introdução na já existente rede eléctrica da COSTA IBÉRICA – MADEIRAS, S.A.

5.2.5 Informação do operador da rede do SEP

De acordo com as informações contidas no PIP, relativo às características do ponto de interligação, este será localizado na linha a 15 kV Mangualde/ Nelas, no PR – Ponto de Recepção das instalações de 2.^a categoria existentes.

Tensão nominal:	15 kV±: 8%
Potência de curto-circuito:	$S_{CCMax} = 84 \text{ MVA}$
	$S_{CCmin} = 27 \text{ MVA}$

Regime de neutro: neutro isolado podendo vir a evoluir para neutro efectivamente ligado à terra com uma impedância limitadora da corrente de defeito a 300 A,

Dispositivos de reengate: religação rápida (0,3s) + 2 religações lentas (15 s+15s).

5.2.6 Equipamento da central

Concepção Geral

O Grupo gerador ficara interligado com a rede do SEP, no barramento de 15 kV existente no PS/ PTC- Posto de Seccionamento e Transformação, a Construir, da Costa Ibérica, MADEIRAS S.A., o qual, irá ser equipado de toda a aparelhagem própria de interligação e contagem, possuindo 1 transformador, de 500 kVA, 0.4/15 kV. Este PS/PTC tem duas saídas: para o PTC da fábrica, e outra para o PT elevador do gerador a instalar.

A electricidade produzida pelo novo gerador, com uma potência de 285 kW, 400 V, 50 Hz, será assim elevada à tensão de rede do SEP, pelo transformador interior atrás referido com um enrolamento em triângulo, para filtragem de harmónicas e isolar a rede de correntes de defeito homopolares.

A energia eléctrica produzida pelo grupo será transportada através de 6 cabos monopolares XV 3x2x120 mm² suportados por caminho de cabos.

Caldeira

Caldeira aquopiro-tubular modelo compacto horizontal para uma produção de 5.5 Ton/h de vapor saturado, de timbre de 20 bar, constituída por zona de radiação com grelhas escalonada e plana totalmente refrigeradas e zona de convecção gás tubular de tripla passagem de gases, com inclusão de um separador de vapor de alta eficiência colocado no interior da câmara de vapor do corpo de pressão, válvulas de purga de fundo, válvula de saída de vapor, válvula de purga contínua, duas bombas de alimentação de água, dimensionadas cada uma para um caudal de 50% superior à vaporização à marcha máxima contínua e para uma pressão 25% superior ao timbre e respectivas tubagens de alimentação de água, purgas e saída de vapor.

Alimentação automática do combustível para ante-fornalha policombustível, casca, serrim, pó húmido, como estes combustíveis são muito pobres, está prevista a instalação de uma máquina de briquetes com a capacidade de 900 a 1200 Kg/ h para compactar estes combustíveis, melhorando muito significativamente a sua queima na caldeira.

Está previsto ainda a instalação de um economizador gases/ar colocado entre a saída de gases da caldeira e a chaminé.

Esta caldeira deverá ser fornecida completa com todos os acessórios e seguranças impostas por lei sendo vistoriada pela D.G.E. e entidade controladora oficial. Esta caldeira deverá ser construída tendo em conta o Decreto-Lei 352/90 de 9 de Novembro do Ministério do Ambiente e Recursos Naturais.

Turbo-Grupo

➤ Condições de Serviço

- Pressão do vapor de alimentação:

normal -17 bar ef.

máximo – 18 bar ef.

mínimo – 14 bar ef.

-Temperatura do vapor de alimentação:

normal 207° C

- máximo – 209° C
- mínimo – 195° C
- Caudal máximo de vapor de alimentação:
 - 5 Ton/h
- Pressão do escape:
 - normal- 0.5 bar ef.
 - máximo – 1 bar ef.
 - mínimo – 0.3 bar ef.
- Temperatura de escape nas condições normais: 110°C
- Potência nos bornes do alternador, nas condições nominais:
 - mínima – 285 kW
- Características da tensão produzida: 3 x 400V – 50HZ
- Factor de potência nominal: 0.87

➤ Turbina

Turbina mono estágica

- Construção robusta utilizando rolamentos esféricos
- Velocidade: 3000 R.P.M.
- Potência no veio: 280 kW

➤ Gerador Assíncrono

Gerador assíncrono de marca EFACEC ou equivalente

- Velocidade: 3000 R.P.M
- Potência nominal: 300 kW
- Potência debitada nas condições normais: 258 kW
- Classe de protecção: IP 23

- Classe de isolamento: F
- Reactância subtransitória: 25%
- Rendimento nas condições nominais: 96%

➤ Equipamentos complementares

- Base comum em aço, para turbina e gerador, constituindo o conjunto um sistema monobloco;
- Sistema de lubrificação e armazenagem de óleo a montar numa estrutura sobre o maciço de betão;
- União elástica;
- Válvula de controlo da entrada de vapor regulada pela contra-pressão da turbina;
- Alarme de sobrepressão (válvula sentinela);
- Protecção mecânica de sobrevelocidade;
- Pressostato de pressão mínima de óleo de lubrificação;
- Termóstato de temperatura máxima de óleo.

➤ Quadro de Comando e Protecção

Quadro de comando e protecção com os seguintes equipamentos:

- Disjuntor motorizado de comando e protecção do gerador assíncrono;
- Relés de protecção ao disjuntor:
- Relés de máxima intensidade (instantâneo e temporizado);
- Relés de máxima e mínima tensão;
- Relé de retorno e potência;
- Relé de máximo e mínimo de frequência;
- Relé de máximo de velocidade;
- Sondas de temperatura.
- Relé taquimétrico de autorização de marcha em paralelo;

- Autómato programável com as seguintes funções:
- Arranque e paralelo do gerador;
- Alarmes e sinalizações do turbo-grupo, nomeadamente:
- Disparo por máxima intensidade;
- Disparo por máxima ou mínima tensão;
- Disparo por retorno de potência;
- Disparo por máxima ou mínima frequência;
- Disparo por sobrevelocidade;
- Disparo por falta de pressão de óleo;
- Disparo por temperatura alta do óleo
- Baterias para correcção do facto de potência de 130 kVAr com um contactor de 500 A que abrirá conjuntamente com o disjuntor principal.

➤ Cabos de ligação entre o Gerador e o QGBT

Os cabos de ligação serão do tipo XV 3x2x120 mm².

➤ Serviços Auxiliares do Grupo

Os serviços auxiliares são alimentados a partir do quadro de potência do grupo.

Este quadro é alimentado pelo quadro geral de baixa tensão da PT, conforme já foi mencionado, através de 6 cabos monoplares XV 3x2x120 mm² enterrados.

➤ Posto de Recepção/ Seccionamento

Será instalado um PST – Posto de Seccionamento e Transformação, para interligação à rede do SEP.

O PST objecto do presente projecto, será do tipo interior, composto por celas pré-fabricadas em invólucro metálico.

A chegada será subterrânea, em transição aéreo-subterrâneo, alimentada em antena da rede de média tensão de 15 kV, frequência de 50 Hz, sendo o operador da rede do SEP a EDP Distribuição.

➤ Características das Celas SM6

As celas a usar serão SM6 da Merlin Gerin, modulares, de isolamento em ar, equipadas com aparelhagem fixa que utiliza o gás hexafluoreto de enxofre – SF6 como elemento de corte e extinção, homologadas pela Direcção Geral de Energia, arquivo nº 13 118 processo nº 29/246.

Responderão na sua concepção e fabricação à definição de aparelhagem sob envolvente metálico compartimentada de acordo com as recomendações IEC: 298; 265; 129; 694; 420 e 56.

As celas terão os seguintes compartimentos:

- a) Compartimento de aparelhagem
- b) Compartimento de barramento
- c) Compartimento de ligação
- d) Compartimento de comando
- e) Compartimento de controlo

O sistema implementado é constituído pelos seguintes elementos:

- Cela ganho de barramento: Cella de ganho de barramento SM6 GAME, com dimensões: 375 mm de largura, 870 mm de profundidade e 1.600 mm de altura, contendo:
 - Barramento tripolar, 17.5 kV 400 A 20 kA
 - Ganho de barras de 400 A para ligação superior à esquerda ou à direita com outra cela
 - Preparada para ligação inferior de cabos unipolares secos
 - Colector de terra

- Cella de corte geral e medida: Cella de corte geral e medida, SM6 GCM-D, com entrada e saída superiores por barramento, com dimensões: 750 mm de largura, 1.020 mm de profundidade e 1.600 mm de altura, contendo:
 - Barramento tripolar de 400 A saída à direita
 - Interruptor-seccionador de corte em SF6 de 17.5 kV 400 A 20 kA
 - Comando CIT manual
 - Colector de terra
 - Seccionador de ligação à terra
 - 3 Transformadores de intensidade de relação 30-60/5 A, 15VA cl 0.5, Ith = 5kA e tensão de isolamento 17.5 kV.
 - 3 Transformadores de tensão, unipolares, modelo de alta segurança de relação 15.000:V3/110:V3, 50VA, cl 0.5, Ft = 1.2 Un e isolamento 17.5 kV.
 - 1 Resistência de carga contra ferro-ressonância.

- Cella de ganho intercalar: Cella de ganho intercalar de barras tipo SM6 GIM, com dimensões: 125 mm de largura, 840 mm de profundidade e 1.600 mm de altura, para separação física entre a zona da Empresa Distribuidora e a do cliente.
 - Barramento tripolar de 400 A

- Cella de protecção com fusíveis, (Entrada para TP do Grupo Gerador): Cella de protecção com interruptor e fusíveis combinados SM6 QM, com dimensões: 375 mm de largura, 940 mm de profundidade e 1.600 mm de altura, contendo:
 - Barramento tripolar para ligação superior com celas adjacentes
 - Interruptor-seccionador em SF6, 17.5 kV 200 A 20 kA, equipado com bobina de disparo à emissão de tensão a 220 V 50 Hz
 - Comando CII manual

- Três corta-circuitos fusíveis de alto poder de corte e baixa dissipação térmica tipo FUSARC CF ou MESA CF, de 24 kV, calibre de 50 A
- Seccionador de ligação à terra duplo (a montante e a jusante dos fusíveis)
- Sinalização mecânica de fusão do fusível
- Indicadores luminosos de presença de tensão
- Preparada para ligação inferior de cabos unipolares secos
- Colector de terra
- Encravamento por fechadura tipo C1 com a função de impedir o acesso ao transformador se o seccionador de terra da cela não for previamente fechado.
- Cela de protecção com disjuntor (Saída para PT1 2x800 kVA da Fábrica): Cela de protecção equipada com disjuntor, SM6 DM1-C, com dimensões: 750 mm de largura, 1.220 mm de profundidade e 1.600 mm de altura, contendo:
 - Barramento tripolar 400 A para ligação superior com celas adjacentes
 - Interruptor-seccionador em SF6
 - Comando CS1 manual
 - 3 transformadores de corrente com relação de transformação 30/5A, 15VA, 5P10, Ith = 5kA
 - Disjuntor de corte em SF6 tipo Fluarc SF1, 17.5 kV 400 A 20 kA, com bobina de disparo à emissão de tensão 220 Vca, 50 Hz
 - Comando RI manual
 - Indicadores de presença de tensão
 - Seccionador de ligação à terra
 - Colector de terra
 - Compartimento de BT de 450 mm de altura
 - Preparada para ligação inferior de cabos unipolares secos

- A cela será equipada com relé modelo SEPAM 1000+ S20 destinado a protecção da saída de linha, dispondo das seguintes funções:

1. Protecção

- Máxima de intensidade de fase (50/51) com um nível baixo a tempo dependente ou independente e de um nível alto a tempo independente,
- Máxima de intensidade de defeito a terra (50N/51N) com um nível baixo a tempo dependente ou independente e de um nível alto a tempo independente,
- Desequilíbrio / componente inversa (46).

2. Medida

- Correntes de fase (I1, I2, I3),
- Correntes máxima de carga (I1, I2, I3).

3. Controlo e monitorização

- *watchdog*
- Correntes de disparo (I1, I2, I3, Io),
- Osciloperturbografia,
- Lógica de segurança positiva (parametrizável).

O correcto funcionamento do relé será garantido por meio de um relé interno de auto-vigilância do próprio sistema. Três LED's de sinalização na face frontal do relé indicarão o estado do Sepam (aparelho em tensão, não disponível por inicialização ou falha interna, e um LED *trip* de ordem de disparo).

Disporá na face frontal de um visor digital alfanumérico para a leitura das medidas, parametrização e mensagens.

➤ Transformador Elevador (PT)

Um transformador elevador trifásico, interior, em banho de óleo, com as seguintes características principais:

Potência nominal:	500 kVA
Frequência:	50 Hz
Tensão primaria nominal:	15 kV, $\pm 5\%$
Tensão secundaria nominal:	400 V
Esquema de ligação:	dY 11
Tensão de curto-circuito:	4%
Arrefecimento:	ONAM
Montagem:	interior

O transformador terá associado equipamento próprio de protecção, supervisão e controlo.

Todas as peças metálicas, normalmente sem tensão, deverão estar ligadas à terra de protecção.

As protecções ao transformador actuarão nos órgãos de corte, e serão:

- máxima de intensidade;
- sonda de temperatura.

➤ Cella de Interligação e Contagem de Energia Eléctrica

- 2 Transformadores de tensão (para medida já existentes), com as seguintes características principais:

Tensão primária:	$15/\sqrt{3}$ kV
Tensão secundária:	$110/\sqrt{3}$ V
Tensão máxima admissível:	17,5 kV
Classe e potencia de precisão:	1,30 VA

- 2 Transformadores de corrente (para medida já existentes), com as seguintes características principais:

Corrente primária:	60A
Corrente secundária:	5A
Classe e potência de precisão:	0,230 VA

- Disjuntor motorizado a instalar, com as seguintes características principais:

Tensão nominal:	15kV
Tensão máxima admissível:	17,5 kV
Corrente nominal:	400A
Poder de corte:	> 5kA
Tensão de isolamento (onda de 1,2/50 μ s):	95kV
Tensão de isolamento (50 Hz/I min):	38kV
Comando:	24 Vcc

- 3 Transformadores de tensão (para protecção da interligação), com as seguintes características principais:

Tensão primária:	15/ $\sqrt{3}$ kV
Tensão secundária:	100/ $\sqrt{3}$ V
Tensão máxima admissível:	17,5kV
Classe e potência de precisão:	3P,50 VA

- 3 Transformadores de corrente (para protecção da interligação), com as seguintes características principais:

Corrente primária:	200 A
Corrente secundária:	5 A
Classe e potência de precisão:	5P10 5 VA

Estes TI's e TT's irão alimentar um aparelho denominado SEPAM da *Merlin Gerin* ou equivalente, que possui um relé multifunção que irá proteger a interligação com o SEP, por actuação do disjuntor atrás referido. Este aparelho substitui os tradicionais relés de interligação: relés de máximo/mínimo de frequência, relés máximo/mínimo de tensão, máximo de corrente e relé de máxima tensão homopolar, satisfazendo as recomendações da EDP.

➤ Quadro do Turbogruppo (Q.T.G.).

- Disjuntor com as seguintes características principais:

Tensão nominal:	400 V
Corrente nominal:	630 A
Poder de corte:	> 12 kA

- 3 Transformadores de corrente (para protecção do gerador), com as seguintes características principais:

Corrente primária:	500 A
Corrente secundária:	5 A
Classe e potência de precisão:	5PIO30 VA

- 3 Transformadores de corrente (para comando do gerador), com as seguintes características principais:

Corrente primária:	1000 A
Corrente secundária:	5 A
Classe e potência de precisão:	0,5, 30 VA

- 3 Transformadores de corrente (medidas para um analisador de rede), com as seguintes características principais:

Corrente primária:	1000 A
Corrente secundária:	5 A
Classe e potência de precisão:	0,5, 30 VA

5.2.7 Cálculos

Nos cálculos foi considerada uma potencia de curto-circuito de 100 MVA, como majoração dos 27 MVA indicados pela EDP e uma potência base $S_b = 0.287$ MVA

- Correntes de Defeito

Intensidade de curto-circuito nos 15 kV

$$U_n = 15 \text{ kV}$$

$$\text{Impedância de rede} \rightarrow Z_{cc_r} = U_n^2 / S_{cc} = 2,25 \Omega$$

$$\text{Impedância do transformador} \rightarrow Z_{CC_t} = U_{CC} \times U_n^2 / S_b = 31,4 \Omega$$

$$\text{Impedância gerador} \rightarrow Z_{cc_g} = x_d'' \times U_n^2 / S_b = 196 \Omega$$

$$\text{Contribuição da rede} \rightarrow I_{cc_r} = U_n / \sqrt{3} / Z_{cc_r} = 3,8 \text{ kA}$$

$$\text{Contribuição do gerador} \rightarrow I_{cc_g} = U_n / \sqrt{3} / (Z_{cc_t} + Z_{CC_g}) = 0,04 \text{ kA}$$

$$\text{Corrente de curto-circuito máxima:} \rightarrow I_{cc_{15}} = 3,84 \text{ kA}$$

Intensidade de curto-circuito nos 400 V:

$$U_n = 400 \text{ V}$$

$$\text{Impedância de rede} \rightarrow Z_{cc_r} = U_n^2 / S_{cc} = 0,0016 \Omega$$

$$\text{Impedância do transformador} \rightarrow Z_{cc_t} = U_{cc} \times U_n^2 / S_b = 0,022 \Omega$$

$$\text{Impedância do gerador} \rightarrow Z_{CC_g} = x_d'' \times U_n^2 / S_b = 0,139 \Omega$$

$$\text{Contribuição da rede} \rightarrow I_{cc_r} = U_n / \sqrt{3} / (Z_{cc_r} + Z_{CC_g}) = 9,8 \text{ kA}$$

$$\text{Contribuição do gerador} \rightarrow I_{cc_g} = U_n / \sqrt{3} / Z_{cc_t} = 1,7 \text{ kA}$$

$$\text{Corrente de curto-circuito máxima: } I_{cc_{0,4}} = 11,5 \text{ kA}$$

- Correntes em Regime Permanente

$$\text{Intensidade máxima na interligação} \rightarrow I_{si} = 500 / (\sqrt{3} \times 15) = 19,24 \text{ A}$$

$$\text{Intensidade estipulada do gerador} \rightarrow I_{s_g} = 287 / (\sqrt{3} \times 0,4) = 414 \text{ A}$$

$$\text{Intensidade máxima majorada no cabo de ligação ao PT} \rightarrow I_{S_{cabo}} \sim 500 \text{ A}$$

- Dimensionamento das Principais Canalizações Eléctricas

Considerou-se um tempo de eliminação de curto-circuito de 30 ms para a BT, e o coeficiente k, densidade de corrente de curto-circuito, de 140 A/mm^2 .

Cabos de ligação entre o grupo gerador de 287 kVA e o quadro geral:

Os cabos serão estabelecidos em caleiras, factor de correcção de 0,8 e uma temperatura ambiente de 35 °C, factor de correcção de 0,87, tem-se que:

$$I_z = I_{sg1} / (0,8 * 0,87) = 718,3 \text{ A.}$$

Utilizar-se-ão 2 cabos XV120 por fase.

Aquecimento em curto-circuito $\rightarrow s > I_{cc0,4} \sqrt{t_{cc}} / k = 14,2 \text{ mm}^2$

- **Condutores de Terra**

A rede de terras de Protecção da central de termoeléctrica será constituída por um anel em cobre de 35 mm² (enterrado a uma profundidade mínima de 0,8 metros), mínimo, ligado a vários piquets de 2 metros de comprimento, mínimo, com um diâmetro não inferior a 20 mm.

A esta terra de protecção, inferior a 10Ω serão ligadas todas as massas existentes da central termoeléctrica (através de cabos com uma secção mínima de 16 mm²).

5.2.8 Considerações sobre a exploração

A concepção geral da instalação do ponto de vista da exploração, permite respeitar os requisitos técnicos e de segurança definidos no Decreto-Lei no 186/95, de 27 de Julho, e no "Guia Técnico das Instalações de Produção Independente de Energia Eléctrica" editado pela Direcção-geral de Energia:

- O transformador de interligação tem um dos enrolamentos ligado em triângulo;
- Baterias de condensadores necessárias a compensação do factor de potencia de instalação;
- Órgãos de corte, de accionamento em caso de defeito, ou em regime normal de exploração;
- Aparelhagem de protecção necessária à detecção de defeitos na instalação de produção e no ponto de interligação dentro dos limites previstos no referido Guia (tensão entre 0.92e 1.08 p.u., frequência entre 49.8 e 50.2 Hz);

- O factor de potência da instalação globalmente deverá ter como valor mínimo 0.93 de forma a garantir o fornecimento de energia reactiva correspondente a 40% da energia activa;
- Um comutador de chave (ficando esta na posse do Operador da rede do SEP) que permita o funcionamento na situação de "Regime Especial de Exploração", retirando as temporizações dos relés de mínima tensão trifásica e máxima tensão homopolar, tomando-os instantâneos, permitindo que o operador da rede do SEP efectue trabalhos em tensão;
- Reposição de paralelo no seguimento de uma falha da rede, mínimo de 3 minutos após a estabilização do valor da tensão na rede entre 0.8 e 1.1 p.u. em relação ao seu valor nominal;

-Capítulo 6-

Conclusões

6.1. Síntese de estudo e conclusão

O principal tema abordado nesta dissertação foi a cogeração e trigeriação. A aplicação de cogeração ocorreu na empresa Costa Ibérica, Madeiras, S.A., a implementação deste sistema permite que a empresa tenha uma melhor imagem dado o benefício de um baixo impacto ambiental e permite também uma redução de custos tornando a empresa mais competitiva. A cogeração é uma alternativa que pode viabilizar economicamente a autoprodução, entretanto é necessário analisar os condicionantes económicos e identificar os riscos pois a sua implementação significa investimentos altos para as empresas com ganhos nem sempre quantificados, no caso da empresa em estudo procedeu-se à instalação de um sistema de cogeração constituído por um gerador assíncrono com uma potência de 287kVA, accionado por uma turbina de contra-pressão, alimentada por um gerador de vapor de alta pressão a instalar, um transformador com uma potência de 500 kVA e respectivo equipamento de comando, corte, protecção e medida. A interligação da central termoeléctrica ao posto de transformação existente na fábrica, implica alterações na instalação eléctrica actual, a central termoeléctrica irá funcionar ligada ao SEP.

Com esta instalação a empresa consegue além dos benefícios de autoprodução de energia eléctrica, eliminar todos os resíduos de madeira existentes e obtém uma melhoria no rendimento global da instalação. Dado o elevado grau de automatização dos equipamentos a instalar, associado ao facto de quer a caldeira, quer a turbina, serem equipamentos de grande fiabilidade, prevê-se um regime de funcionamento de 8.000 horas/ano. Os resultados dos rendimentos eléctricos foram de 9200 ton/ano e 10.700 GWh/ano de consumo do gerador de vapor realizados para um rendimento de 100% e 2.100 GWh de energia eléctrica produzida pelo gerador obtendo um rendimento de 19,6%. Esta instalação ronda um investimento de 500.000 €. Dado que se prevê a venda total de energia eléctrica ao SEP, o retorno está na quantidade de energia eléctrica fornecida ao SEP.

Assim, a poupança económica está nos 2.100 MWh/ano de energia eléctrica, produzidos pelo novo gerador, que, vendida ao SEP a preços médios de 2005 (0.085€/kWh, valor de compra de energia eléctrica pelo SEP), corresponde a 178.500 €/ano, estimando-se assim o período de retorno em 60 meses.

Neste contexto, é imprescindível que a política energética dê especial atenção à utilização racional e eficiente da energia, favorecendo a implementação de projectos que contribuam para uma eficaz melhoria da produtividade energética, como é o caso da cogeração.

Do ponto de vista das sociedades vocacionadas para a prestação de serviços energéticos, a liberalização dos mercados de energia poderá gerar novas oportunidades de negócio, dando origem a necessárias mudanças de mentalidade, de vocação, de posicionamento estratégico sobre o mercado e da própria lógica do negócio.

A evolução tecnológica esperada nesta área tem vindo a suscitar o interesse da indústria e das entidades públicas, dados os impactos ambientais conhecidos ao momento, sendo elevadas as expectativas.

O Protocolo de Quioto assinado pelos países europeus, veio reforçar a ideia de utilização de fontes renováveis para a produção de energia, sendo uma necessidade das gerações presentes e futuras e uma das prioridades globais.

6.2 Perspectivas de desenvolvimento futuro

É possível estabelecer um conjunto de direcções de investigação interessantes, quer no âmbito desta dissertação, uma vez que a mesma não esgota os assuntos nela abordados, quer no que concerne a novas perspectivas, que a própria dissertação deixa antever, para futura investigação. Assim, salientam-se as seguintes direcções de investigação:

- Desenvolvimento de projectos no sector terciário e na indústria, recorrendo a soluções de mini e microcogeração.
- Existe um vasto conjunto de medidas que podem ser adoptadas para minimizar os impactos ambientais associados ao sector eléctrico, desde as medidas orientadas para a redução dos consumos (gestão da procura), passando pela escolha das formas de produção (gestão da produção) é de considerar o estudo das medidas para minimização dos impactos gerados, medidas de controlo de poluição, gestão de resíduos, recuperação de *habitats*.
- Elaboração de um estudo de avaliação de desempenho ambiental na indústria e análise das estratégias ambientais das empresas do sector eléctrico.

- Realização de uma directiva de investigação ligada à logística em função do meio ambiente. O impacto ambiental de embalagens, a escolha de materiais, escolha essa que já determina um impacto ambiental e que define um processo, com o seu consumo de energia, a sua poluição e a sua logística. O material pode ter origem em recurso não renovável, como o plástico derivado do petróleo, ou ter origem em recurso renovável, como a madeira e a celulose, ou ter origem em recurso abundante, como a areia para produzir vidro. Então, este seria um primeiro critério de análise de impacto ambiental, o uso de recursos renováveis quando se trata de embalagens de madeira, por exemplo, surge a discussão: madeiras de reflorestamento ou de florestas naturais.

Não há nenhum problema ecológico na exploração de florestas naturais, se essa exploração for bem administrada. O problema é logístico: a floresta natural é heterogênea, o que exige uma selecção de árvores que nem sempre estão muito acessíveis e podem estar muito dispersas, não sendo admissível a destruição de áreas da floresta para corte de uma ou outra árvore, como nos processos tradicionais de exploração. São estas razões logísticas que podem ser alvo de estudo, estudando a proximidade dos centros de consumo.

- Referências Bibliográficas-

- [1] Rui M.G. Castro, “Energias renováveis e produção descentralizada. Introdução à cogeração”, UTL/IST, Maio 2007
- [2] Carlos Fortunato e Luís Neves, “Optimização de uma central de cogeração e trigeração”, EE/ISEL, Abril 2007
- [3] Sérgio da Silva Brandão, “Cogeração”, DEEC/UC, Outubro 2004.
- [4] www.ec.europa.eu
- [5] Ministério da economia e da inovação. Energia e alterações climáticas. www.portugal.gov.pt
- [6] EneDir Ghisi. Centro de ciências e tecnologias. Estudo da viabilidade técnica e económica em sistemas de cogeração. Março 2006
- [7] European wind energy association. www.ewea.org
- [8] www.revistaperspectiva.info
- [9] www.atehp.com
- [10] www.cogeneration.net
- [11] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos Caracterização do Sector Eléctrico – Portugal Continental, ERSE
- [12] Creyts J. C, Carey V. P. Use of extended energy analysis as a tool for assessment of the environmental impact of industrial processes. Advanced Energy Systems Division 1997;37: 129- 137.
- [13] Mora B. C. H, Oliveira J. S. Energy efficiency as a measure of the environmental impact of energy conversion processes. In: Proceedings of the ECOS’2004 17th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization and Environmental Impact of Energy Systems, Guanajuato, July 7-9, 2004. p. 423- 431. ISBN 968- 489-027-3.
- [14] [www.infoescola.com/energia/cogeração](http://www.infoescola.com/energia/cogerao)
- [15] João Carvalheiro, “Um modelo de pilhas de combustível ligadas ao sistema de energia eléctrica”, Tese de Mestrado, IST, Setembro 2004.
- [16] Catalogue of CHP Technologies, U.S. Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership, prepared by Energy Nexus Group, February 2002.
- [17] Portal de engenharia e tecnologia <http://myspace.eng.br/>
- [18] Engineers Edge
http://www.engineersedge.com/heat_transfer/parallel_counter_flow_designs
- [19] Portal universitário <http://html.rincondelvago.com/>
- [20] R. Sonntag, C. Borgnakke, G.J. Van Wylen, “Fundamentals of Thermodynamics”,

John Wiley & Sons, Sixth Edition, 2003.

[21] TriGeMed – Promotion of Tri-generation Technologies in the Tertiary Sector in Mediterranean Countries <http://www.trigemed.com/>

[22] Vijayaraghavam, S.& e Gaswami, D. Y., A Combined Power and Cooling Cycle Modified to Improve Resource Utilization Efficiency Using a Distillation Stage, Energy Vol. 31, pp 1177-1196, 2006.

[23] Koblitz, R. 1998 “Cogeração de Energia: Fórum de Cogeração e Distribuição de Energia”, INEE; Rio de Janeiro.

[24] Nogueira, L.A.H., 1996, “Coogeração: Uma Introdução”, EFEI, Itajubá.

[25] REN – Redes de Energia Nacional

http://pwp.net.ipl.pt/deea.isel/jlagarto/Erratas/REE_Cap1_4.pdf

[26] DANTAS, F.S. (2000) Cogeração em Pequena Escala, CEFET/RJ, pós-graduação – monografia, Rio de Janeiro.

[27] GPG227 (1999) How to Appraise CHP, Good Practice Guide nº 227, Energy Efficiency in UK – Best Practice Program, United Kingdom Department for the Environment, Transport and the Regions.

[28] GUIMARÃES, E. T. (1999) Sistemas de Cogeração, Cogerar Sistemas de Engenharia Ltda, artigo escrito para a Gasnet (<http://www.gasnet.com.br/>)

[29] INT (2002) Modelos de Sistemas de Cogeração de Energia com Gás Natural, Instituto Nacional de Tecnologia, estudo financiado com recursos da FINEP/CTPETRO.

[30] NOGUEIRA, L. A. H. (1996) Metodologia para Estimar o Potencial Técnico e Económico de Cogeração, EFEI, artigo para a revista Eletricidade Moderna, abril de 1996.

[31] SMITH, J. M., VAN NESS, H. C. (1980) Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química, 3ª edição, ed. Guanabara Dois.

[32] STRACHAN, N. D., DOWLATABADI, H. (2000) The Adoption of a Decentralized Energy Technology: The Case of UK Engine Cogeneration, Carnegie Mellon University, international symposium “CHP: Energy Solutions for the 21st Century”, DOE, Fevereiro de 2000, Washington.

[33] www.cogenportugal.com