

Cogeração

Trabalho no âmbito da cadeira:
Produção e Planeamento de Energia Eléctrica



Outubro 2004

Sérgio da Silva Brandão

“ Thomas Edison was a man of great foresight, but who would have thought he could have been more than 100 years ahead of his time? When he set up his first heat-and-electricity plant near Wall Street in 1882, he imagined a world of micropower. Edison thought the best way to meet customers’ needs would be with networks of nimble, decentralised power plants in or near homes and offices. What goes around comes around. After a century that seemed to prove Edison wrong – with power stations getting ever bigger, and the transmission grids needed to distribute their product ranging ever wider – local generation for local consumption is back in fashion. “

in THE ECONOMIST, 5 Agosto de 2000

Índice

1. Introdução	3
2. Energia/Ambiente	4
3. Cogeração	5
Cogeração no Sector Terciário	7
Vantagens e Benefícios	8
4. Tecnologias de Cogeração/Trigeração	9
Tecnologias de Cogeração	9
Turbina de Gás	10
Turbina de Vapor	13
Ciclo Combinado	15
Motor alternativo de Combustão Interna	17
Pilhas de Combustível	20
Micro-Turbinas	24
Tecnologias de Trigeração	26
Frio por Absorção	26
5. Avaliação Técnico-Económica	29
Seleccção do Sistema	29
Análise Económica	31
6. Cogeração/Trigeração em Portugal	32
Esquemas de Apoio	33
7. Enquadramento Jurídico	35
8. Conclusões	37
9. Bibliografia	38

1. Introdução

Normalmente, as indústrias necessitam para os seus processos industriais de energia eléctrica e 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.

Estas formas de energia são utilizadas para a geração de ar quente, água quente, vapor ou termofluido, sendo posteriormente efectuada a respectiva distribuição interna e utilização em permutadores 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 fluidos intermédios por queima directa, entre outras. De uma eficiente utilização da energia depende em muito a redução dos custos de exploração e das emissões gasosas nocivas para o meio ambiente.

A Cogeração surge 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.

Este trabalho que aqui é apresentado foi desenvolvido no âmbito da cadeira de Produção e Planeamento de Energia Eléctrica e vai focar diferentes aspectos relativos às tecnologias de Cogeração, procurando abranger todas as suas áreas e vertentes importantes. De notar também que este trabalho foi desenvolvido numa base de pesquisa e melhoramento de outros trabalhos que este assunto também abordaram.

2. Energia/Ambiente

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. Contudo, embora abundantes estas não são renováveis à escala humana, trazendo portanto consequências negativas para o meio ambiente. Surge então um novo conceito, designado por desenvolvimento sustentado.

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.

Em Portugal, as energias renováveis tiveram sempre uma importância superior à média europeia. 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 – biomassa – mais de 5% dos combustíveis consumidos.

Portugal tem condições para atingir e ultrapassar o objectivo de 18% de origens renováveis de energia, considerando o seu potencial hídrico e os produtos florestais disponíveis, mas atingir o objectivo de 18% de produção de energia por cogeração pode ser bem mais difícil se se exigirem rendimentos de transformação da energia primária superiores aos da central do sistema electroprodutor com melhor rendimento.

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.

A confiança na capacidade de realização tecnológica ou de descoberta de novas fontes de energia pode não ser garantia bastante, é preciso isso e, sobretudo, gastar menos.

3. Cogeração

As centrais termo-eléctricas 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 óbvio. Portanto, a necessidade de aumentar a eficiência do processo de produção de electricidade é imperativa. 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 (simultânea) de duas fontes de energia, eléctrica (ou mecânica) 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.

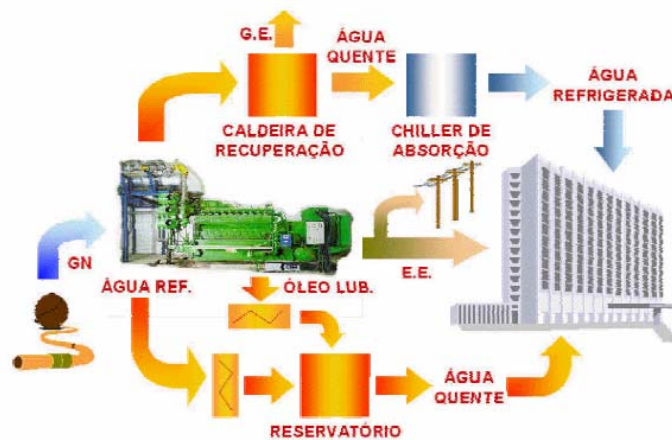


Fig.1 – Esquema típico de representação - Cogeração/Trigeração

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.

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.

Apesar de conhecida desde o início do século XX, a cogeração foi incrementada, nos EUA, em meados dos anos 80, quando a queda no preço do gás natural apresentou-a como uma atractiva alternativa a novos sistemas de geração de energia. Na realidade, o sistema de Cogeração é o responsável pelo dramático declínio da construção de plantas de energias nuclear e hidráulica.

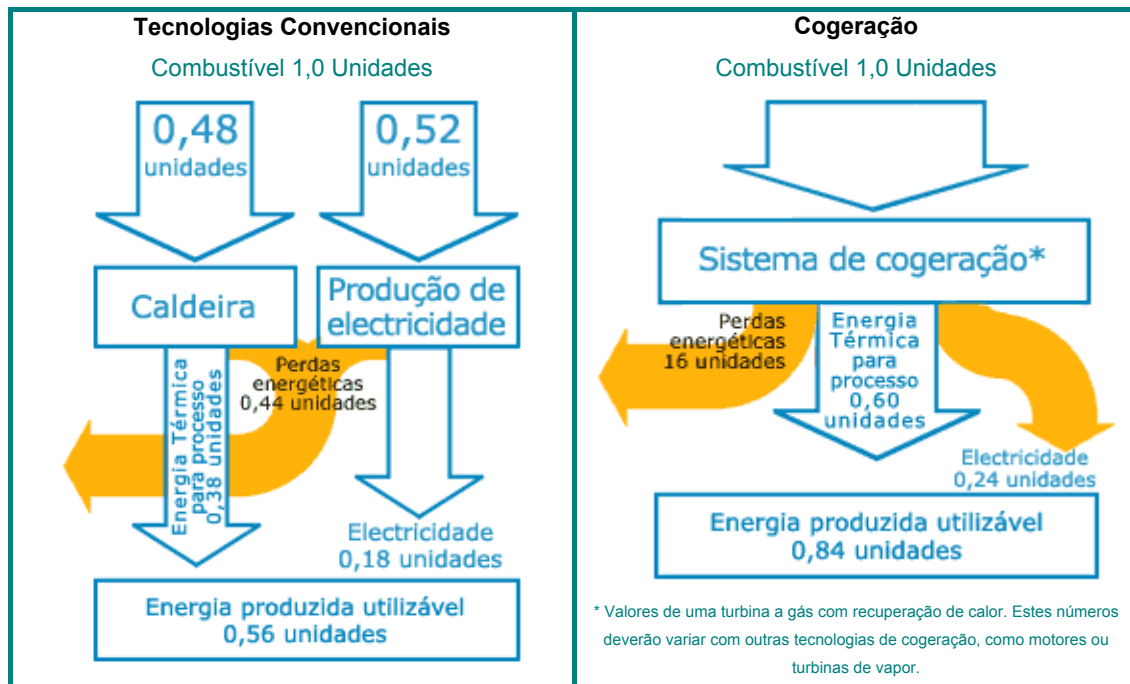


Fig.2 – Comparativo - Tecnologias Convencionais/Cogeração

Além do alto desempenho comprovado, a Cogeração tem uma 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 nocivos, evitando o efeito estufa, superior a qualquer outra tecnologia.

Para entender o conceito de Cogeração é preciso saber que a maioria dos sistemas de geração 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 básico da física, não mais que 1/3 da energia potencial do óleo combustível poder ser convertida em vapor para geração de electricidade. Por outro lado, a cogeração utiliza-se do excesso de calor, usualmente na forma de vapor saturado exaurido 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 seria desperdiçado. 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 relação:

$$\varepsilon = \frac{\text{Trabalho útil produzido} + \text{Energia térmica produzida}}{\text{Energia térmica fornecida}}$$

$$\varepsilon = \frac{W_{\text{util}} + Q_{\text{processo}}}{Q_{\text{in}}}$$

Cogeração no Sector Terciário

Os potenciais utilizadores de Cogeração são instalações que verificam as seguintes características:

- ❖ 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. 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, esterilização, etc.

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 ("*district heating*"). 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, as flutuações das necessidades térmicas, etc. 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.



Fig.3 – Unidades de Cogeração utilizadas no Sector Terciário

Vantagens e Benefícios

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 e Piscinas, Escolas/*Campus* Universitários, Aeroportos, Hipermercados e grandes 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 “convencionais”. A 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 termo-eléctricas. Contribuem também para o aumento do emprego a nível local.
- ❖ **Aumento de estabilidade do sistema eléctrico:** As unidades de Trigeração proporcionam um alívio significativo às redes do sistemas 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 largamente 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, porquanto os picos de verão são servidos pelas empresas eléctricas distribuidoras através de unidades de apoio ineficientes e linhas de transporte de energia eléctrica sobrecarregadas.



Fig.4 – Ponto de vista do cliente

4. Tecnologias de Cogeração/Trigeração

A parte básica 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.

Tecnologias de Cogeração

Presentemente, as tecnologias mais importantes disponíveis no mercado para Cogeração são:

- ❖ **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;**

As primeiras quatro tecnologias supramencionadas, usando 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 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.

Para Trigeração, os tipos vulgarmente 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 edifícios tais como hospitais ou redes urbanas de calor e frio. As turbinas de vapor não são utilizadas no Sector Terciário.

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 penetração no mercado, o que espera que venha a ocorrer dentro de poucos anos. A outra vantagem fundamental deste sistema, na verdade, reside nos sub-produtos 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 extremamente importante para o aumento do rendimento global (e do factor de utilização) da instalação de Cogeração/Trigeração.

Uma última tecnologia, sob intensa investigação durante os anos mais recentes, é as Micro-Turbinas. Uma notável investigação tem tido lugar principalmente nos E.U.A., para o desenvolvimento de tais turbinas, dando ênfase à sua aplicação em veículos e em instalações de Cogeração. Como seria de esperar neste estágio, o rendimento é baixo e o preço elevado. A U.E. não tem empreendido investigação significativa no desenvolvimento desta tecnologia.

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

Turbina de 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 queima contínua de um combustível.

Este sistema de Turbina a Gás é actualmente muito difundido 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.

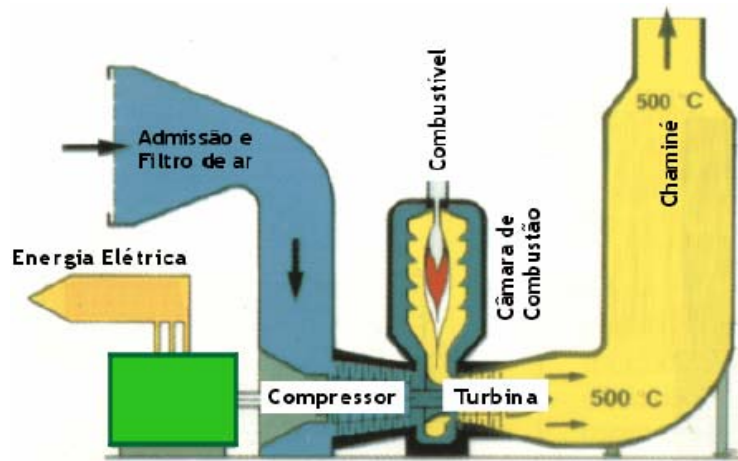


Fig.5 – Funcionamento típico dum sistema com Turbina a Gás

O sistema de Turbina a Gás, tal como se pode verificar na figura, é constituído de uma forma geral pelos seguintes elementos:

- ❖ Sistema de admissão de ar;
- ❖ Dispositivo de compressão do ar (compressor);
- ❖ Câmara de combustão;
- ❖ Turbina de expansão;
- ❖ Sistema de exaustão;

Quanto ao funcionamento deste tipo de turbinas pode-se dizer que, neste tipo de sistema, o ar atmosférico é continuamente succionado 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 figura), onde se expandem, extraíndo 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 media pressão com vista ao accionamento de um *Chiller* de Absorção, ou ainda para pré-aquecer o ar de combustão.

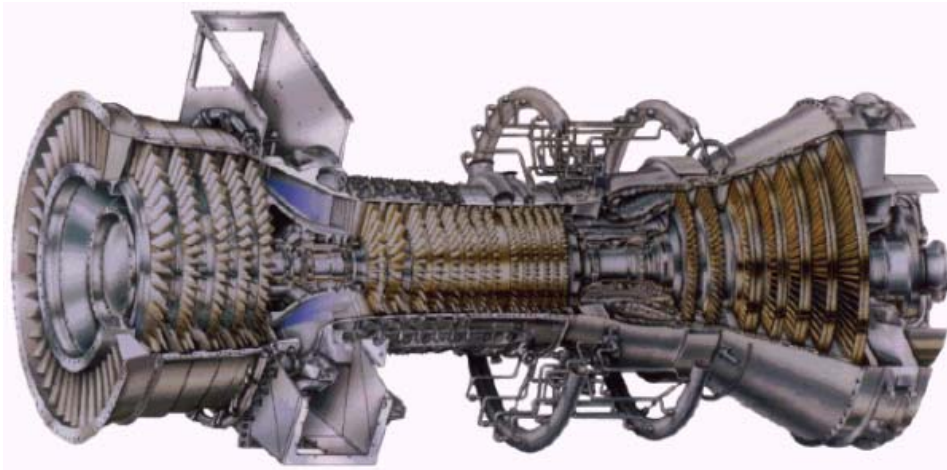


Fig.6 – Turbina a Gás usada na Cogeração

Quanto à eficiência energética deste tipo de sistema, pode-se considerar que é bastante boa, não sendo como é óbvio de 100%, uma vez que como é sabido tal sistema é virtualmente impossível. No entanto o uso de Turbinas a Gás na Cogeração proporciona uma eficiência global de aproximadamente 75% 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, sendo o resto perdido 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 a performance/rendimento do sistema.

Em relação a aplicações desta tecnologia podemos referir que este tipo de Cogeração é habitualmente usado em sistemas de media e grande dimensão, onde são exigidas potências no escalão entre os 40KW e os 250MW, e em que as exigências de energia são constantes.

Das diversas aplicações pode-se destacar:

- ❖ Sector Alimentar;
- ❖ Sector Petroquímico;
- ❖ Sector Papeleiro;



Fig.7 – Instalação industrial com quatro Turbinas a Gás (Virgínia - USA)

A título de exemplo de uma indústria inserida no sector alimentar, pode-se referir a indústria da cerveja. Na figura seguinte 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 outra figura o sistema é constituído por três turbinas de 4,9 MW cada, totalizando 14,7 MW de energia produzida.



Fig.8 – Dois sistemas de Turbina a Gás (Fábrica de Cerveja Kaiser - Brasil)



Fig.9 – Sistema de Turbinas a Gás (Fábrica de Cerveja Brahma -Brasil)

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°);
- ❖ 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);

Turbina de Vapor

O emprego 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 empregado como calor de 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, química pesada, entre outras. 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 a recursos florestais (madeira,etc), incluindo também o fuelóleo e o gás natural.

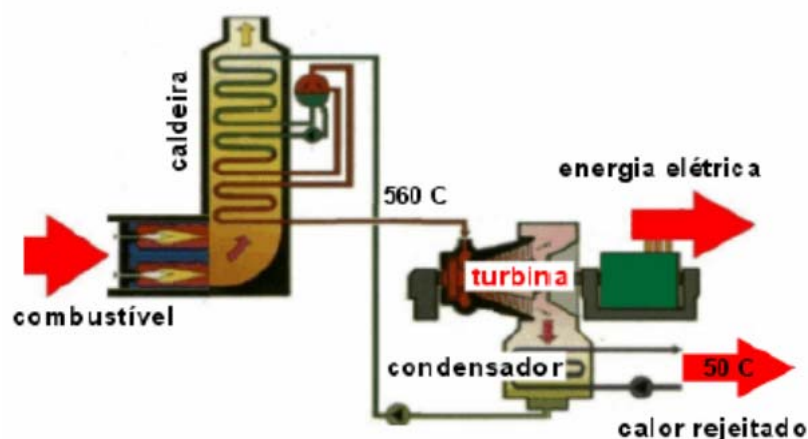


Fig.10 – Funcionamento base do sistema de Cogeração com Turbina a Vapor

Os sistemas de Cogeração com Turbina a Vapor são de uma forma geral constituídos por cinco grandes módulos: pré-aquecedor (onde a água é pré-aquecida), caldeira, turbina, condensador e gerador (ver figuras). 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.

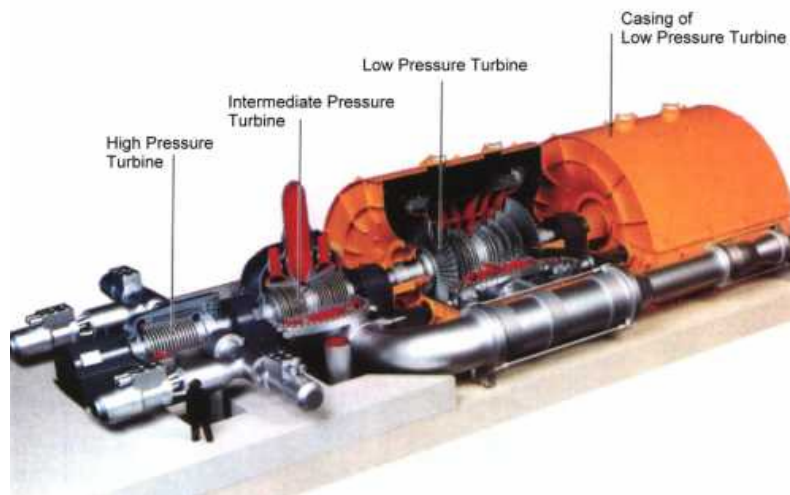


Fig.11 – Módulos de uma Turbina a Vapor

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 altíssima pressão. Este vapor de água entra na turbina, onde sofre uma poderosa 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.

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.



Fig.12 – Exemplos de Turbinas a Vapor usadas na Cogeração

As turbinas a vapor, podem ainda dividir-se em dois grandes 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, basicamente são turbinas onde a pressão do vapor de saída é superior à pressão atmosférica.



Fig.13 - Instalação industrial onde se usa turbinas a vapor, de notar à esquerda caldeira de condensação, uma das maiores do mundo (Matimba, Africa do Sul)

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;

Ciclo Combinado

Com a evolução tecnológica dos sistemas energéticos, têm surgindo 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.

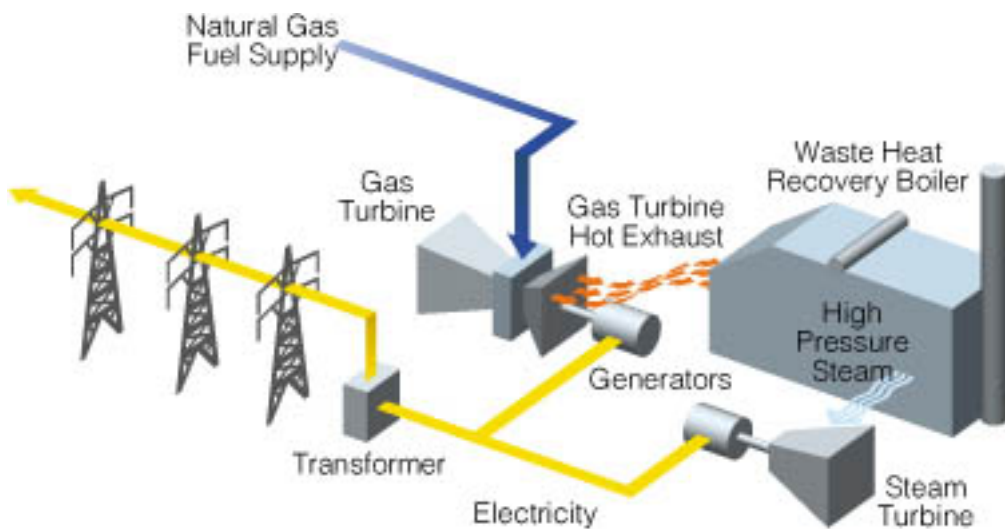


Fig.14 – Esquema generalizado dum sistema de Cogeração em Ciclo Combinado

Este novo tipo de Cogeração, denominada de Cogeração em Ciclo Combinado (ver figura) 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.

Na Cogeração com Turbinas a Gás, verifica-se que os gases de exaustão contêm ainda uma grande quantidade de oxigénio (aproximadamente 15%) que pode ser utilizado para uma queima 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 doutra forma diferente da descrita no anteriormente. Este segundo método consiste em tirar partido do calor destes gases para produzir vapor numa caldeira de recuperação, sem haver queima 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.

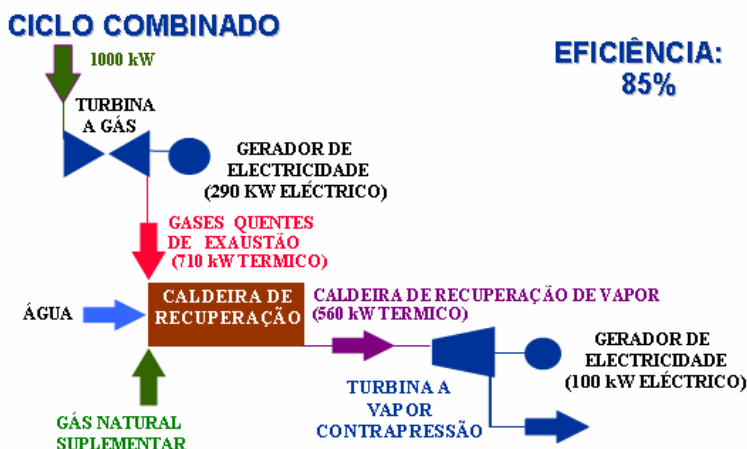


Fig.15 - Distribuição energética da Cogeração em Ciclo Combinado

Este tipo de Cogeração é predominantemente utilizada em situações em que se deseja produzir energia eléctrica e térmica úteis 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 demanda de electricidade é superior à

demanda de vapor, ou seja nas indústrias electrointensivas. Existem plantas tão flexíveis que podem operar desde a produção máxima de energia eléctrica sem extracção de vapor para uso no processo industrial, até à produção máxima de vapor para processo sem a produção de energia eléctrica. 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, face às várias possibilidades de arranjo destes sistemas. 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 figura anterior, o ciclo combinado tem uma eficiência maior quando comparada com a dos ciclos com Turbina a Gás e a Vapor separadamente.



Fig.16 - 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)

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;

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.

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.

Tal como se pode analisar nas figuras seguintes, 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.

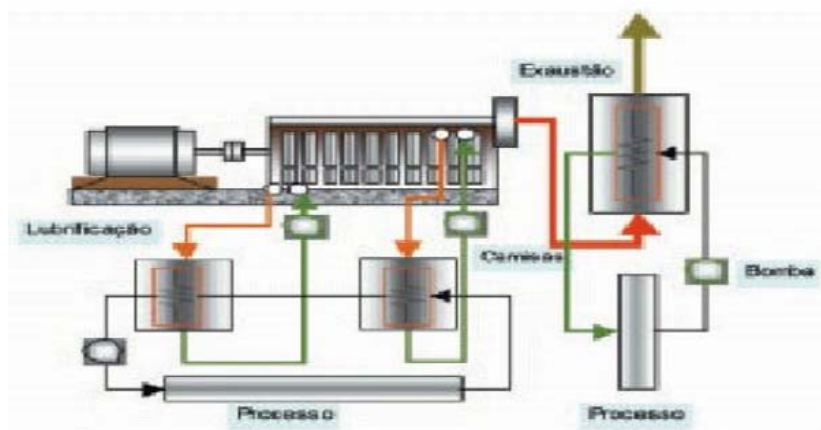


Fig.17 – Esquema geral de funcionamento dum sistema de Cogeração com motor alternativo

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 - porte e se o motor é turbo alimentado ou de aspiração natural - assim como do regime operacional.

A recuperação de calor dos óleos lubrificantes e do fluido de refrigeração dos turbo compressores, usualmente disponível a cerca de 70 °C, é limitada para finalidades de produção de água quente, que pode ser empregada 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 sua temperatura abaixo de 150 a 180 °C para evitar que surjam alguns problemas no sistema, nomeadamente:

- ❖ refluxo de condensados para o motor
- ❖ a corrosão prematura de componentes do sistema de escape
- ❖ e a elevação da área da superfície de troca de calor, limitando a recuperação a aproximadamente 50% do disponível.

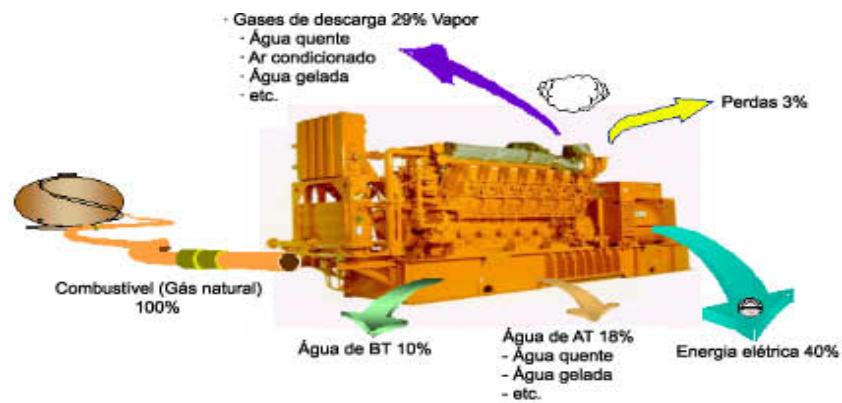


Fig.18 – Esquema geral de funcionamento dum sistema de Cogeração com motor alternativo

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 combustão. A força expansiva dos gases de combustão provocam 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.

A diferença básica entre o Ciclo Otto e Diesel está na forma como ocorre a combustão do combustível (ver figuras a seguir). 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 básicos são muito semelhantes aos usados nos motores tradicionais dos automóveis a gasolina e a gasóleo (e os Diesel).

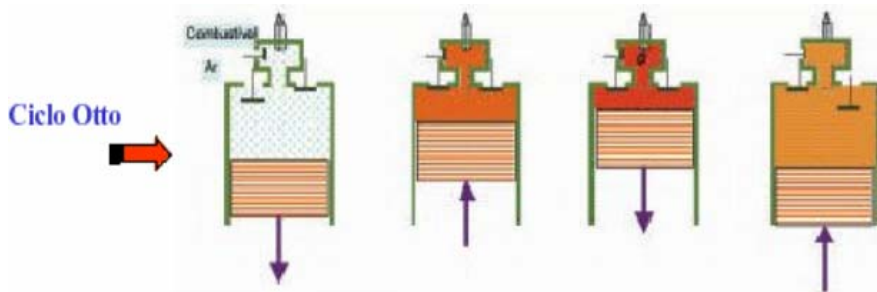


Fig.19 – Ilustração das quatro etapas do ciclo Otto

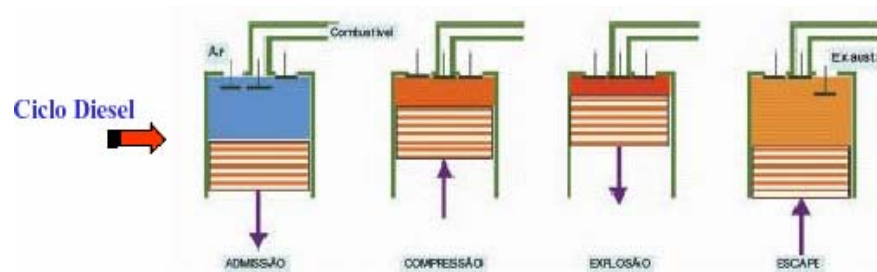


Fig.20 – Ilustração das quatro etapas do ciclo Diesel

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, nafta química, entre outros. 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.



Fig.21 - Dois exemplares de motores que usam gás natural como combustível

Em diversas situações/indústrias torna-se vantajoso o uso do gás natural como combustível de sistemas de Cogeração com motor alternativo, quer por questões logísticas/físicas, quer 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 as elevadas pressões de gás necessárias à injeção deste nas câmaras/cilindros de combustão.

A eficiência global deste tipo de equipamento ronda os 75%, sendo que cerca de 30% da energia contida no combustível é directamente transformada em energia mecânica e aproximadamente 45% em energia térmica, aproveitada através dos métodos descritos anteriormente.

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);

Pilhas de Combustível

Uma Pilha de Combustível é um dispositivo electromecânico, que converte a energia química do combustível directamente em energia eléctrica, sem estágios intermédios de combustão e produção de energia mecânica.

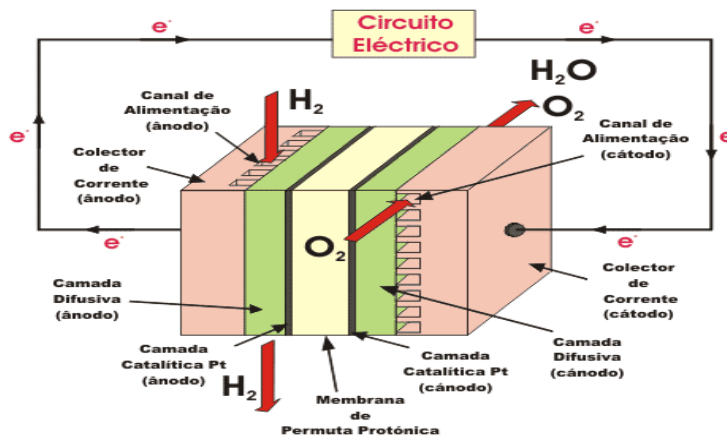


Fig.22 – Esquema típico de representação de uma célula de combustível

Uma célula de combustível pode converter mais do que 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.

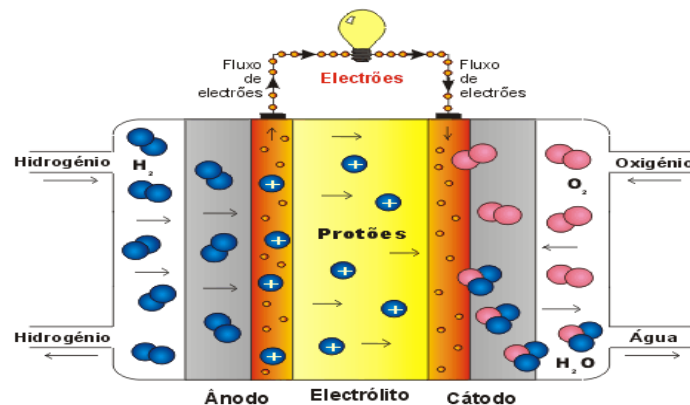


Fig.23 – Representação de uma célula de combustível

O rendimento de uma Pilha de Combustível varia de forma inversa à potência devido a perdas por efeito de ohm 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.

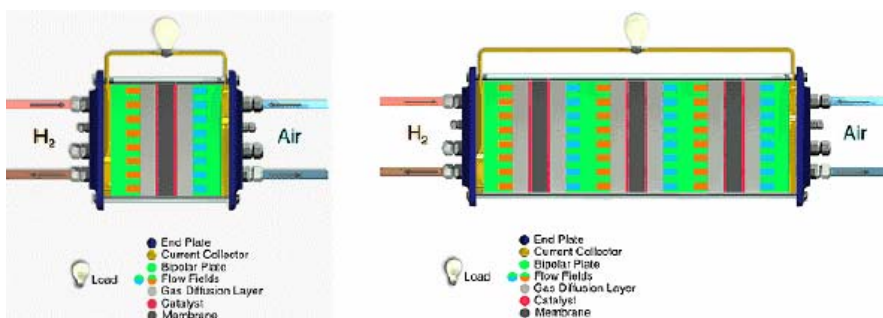


Fig.24 – Célula de combustível (à esquerda) e Pilha de Combustível (à direita)

O hidrogénio (combustível) é alimentado ao ânodo da célula de combustível (ver figura), onde é oxidado no catalisador de platina (camada difusiva/catalítica), havendo a produção de dois electrões e dois protões hidrogénio, H⁺ (reacção ânodo). De seguida, os electrões produzidos pela reacção de oxidação do hidrogénio são transportados através de um circuito eléctrico e utilizados para produzirem trabalho (corrente contínua). Por sua vez, os protões 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 protões 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.

A selecção do electrólito é de extrema importância, 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, podendo ir dos mWatts até aos MWatts.

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.

- ❖ AFC – *Alkaline Fuel Cell*;
- ❖ PEFC / FEM – *Polymer Electrolyte Fuel Cell / Proton Exchange Membrane*;
- ❖ PAFC – *Phosphoric Acid Fuel Cell*;
- ❖ MCFC – *Molten Carbonate Fuel Cell*;
- ❖ SOFC – *Solid Oxid Fuel Cell*;

Tipo de fuel cell	Electrólito	Combustível	Oxidante	Ião 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)	OH ⁻	60 - 90	55 - 60	< 7 kW
PEFC / PEM	Membrana de polímero	H ₂ puro	Ar (s/CO)	H ⁺	70 - 90	35 - 45	5 - 250 kW
PAFC	Ácido fosfórico	H ₂	Ar (s/CO)	H ⁺	200	35 - 45	200 kW
MCFC	Lítium, potássio, carbonato fundido	CH ₄ , H ₂ , CO	Ar + CO ₂	CO ₃ ²⁻	600 - 650	45 - 55	2 - 3 MW
SOFC	Óxidos de Ytria e Zircónio	CH ₄ , H ₂ , CO	Ar	O ²⁻	800 - 1000	45 - 55	Tubular: 100-5000 kW Planar: 50-100 kW

Tab.1 – Diferentes tipos de células de combustível

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 do gases rejeitados pelo ânodo;
- ❖ Controlador do sistema;
- ❖ Dispositivos de controlo de CO;
- ❖ Sistema de armazenagem e alimentação do combustível;

Em relação a vantagens e desvantagens desta tecnologia em aplicação de sistemas de Cogeração descrevemos o seguinte quadro:

	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 250kW 	<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 (especialmente as PEMFC) • 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 (PAFC) 	<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 híbridos

Tab.2 – Vantagens e desvantagens das Pilhas de Combustível em Cogeração

O campo de aplicação das Pilhas de Combustível é extremamente 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.



Fig.25 – Pilhas de Combustíveis



Fig.26 – Sistema de cogeração utilizando Pilhas de Combustíveis

Micro-Turbinas

O termo “Micro-Turbina” 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 250kW e 1MW é usualmente utilizado o termo “Mini-Turbina”.

A maioria das Micro-Turbinas existentes no mercado têm como função principal produzir electricidade, podendo funcionar em Cogeração utilizando equipamento adicional. No entanto existem Micro-Turbinas criadas de raiz para funcionamento em Cogeração. Em alguns (raros) casos a produção de calor é mesmo a função principal da Micro-Turbina.

As Micro-Turbinas são na maioria Turbinas a Gás, com um andar de expansão. O ar novo admitido é conduzido ao compressor onde a pressão é elevada até cerca de 70psig. Com o objectivo de aumentar o rendimento da Micro-Turbina é usual integrar no sistema um recuperador de calor (regenerador) que permite aproveitar o calor disponível nos gases de escape para aquecer o ar novo antes de este entrar na câmara de combustão (ver figura).

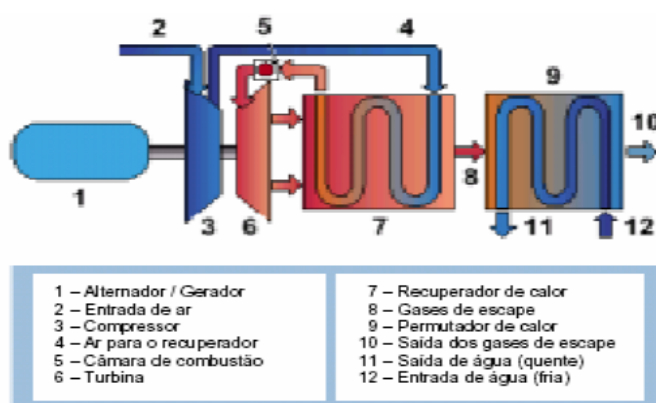


Fig.27 – Esquema de um sistema Micro-Turbina (com um único veio)

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, accionado o compressor e o gerador. O rendimento eléctrico atingido é da ordem dos 30% em Micro-Turbinas 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 Micro-Turbina, o que permite atingir temperaturas mais elevadas e consequentemente rendimentos mais elevados.

Quando se pretende que a Micro-Turbina funcione em Cogeração é utilizado um permutador de calor adicional de forma a tirar partido da relativamente elevada temperatura dos gases de escape. Algumas Micro-Turbinas vêm preparadas de série com o referido permutador, enquanto que em outras o equipamento auxiliar é vendido separadamente.

Vários tipos de combustíveis podem ser utilizados na maioria das Micro-Turbinas: gás natural, gasolina s/ chumbo, gasóleo, álcoois, kerosene, propano, etc. Um compressor adicional poderá ser utilizado quando a pressão de alimentação do combustível não for suficiente



Fig.28 – Sistemas de Cogeração com uso em Micro-Turbinas

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 Micro-Turbinas estão equipadas com sistemas electrónicos que asseguram o controlo do circuito eléctrico e o funcionamento da Micro-Turbina em condições de segurança.

Para comparação a tabela seguinte resume as características técnicas dos tipos de sistemas de cogeração mais utilizados, incluindo parâmetros e custos importantes associados.

Máquina Motriz	Turbina de Gás	Turbina de Vapor	Ciclo Combinado	MCI Otto/Disel	Célula de Combustível
Potência (MWe)	0.2 – 100	0.5 – 100	4 – 100	0.015 – 30	0.01 - 0.25
Calor/Electric.	1.25 – 2	2 – 10	0.5 - 1.7	0.4 - 1.7	1.1
Rend. Eléct. (%)	15 – 35	10 – 40	30 – 40	25 – 45	35 - 40
Rend. Térm. (%)	40 – 59	40 – 60	40 – 50	40 – 60	20 - 50
Rend. Total (%)	60 – 85	60 – 85	70 – 90	70 – 85	55 – 90
Tempo de vida (anos)	15 – 20	20 – 35	15 – 25	10 – 20	> 5
Carga Min. (%)	75	20	75	50	Sem Limites
Eficácia (%)	90 - 98	99	90 – 98	92 – 97	> 95
Custo Instalação (€/kWe)	600 – 800	700 – 900	600 – 800	700 – 1400	>2500
Custo Operação (€/MWh)	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
Temp. Utilizável (°C)	450 – 800	-	450 – 800	300 – 600	250 - 550
Uso de Energia Térmica	Aquecim., AQS, vapor BP-AP, "district heating"	Vapor BP-AP, "district heating"	Vapor BP-AP, "district heating"	Aquecim., AQS, vapor BP-AP, "district heating"	AQS, vapor BP-AP
Combustível	Gasoso, líquido	Todos	Gasoso, líquido	Gás, Gasolina, Gasóleo	Gás

Tab.3 – Comparativo das principais tecnologias utilizadas em Cogeração

Frio por absorção

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. A energia de elevação de calor de uma baixa temperatura para uma temperatura maior é fornecida como energia mecânica ao compressor.

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 queima directa por recurso a um queimador ou por queima 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.

O princípio básico de uma máquina de refrigeração por absorção pode ser ilustrado na figura a seguir. Na sua concepção mais simples 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 vapor gerado no evaporador é absorvido por um líquido absorvente no absorvedor. 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 no condensador. 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.

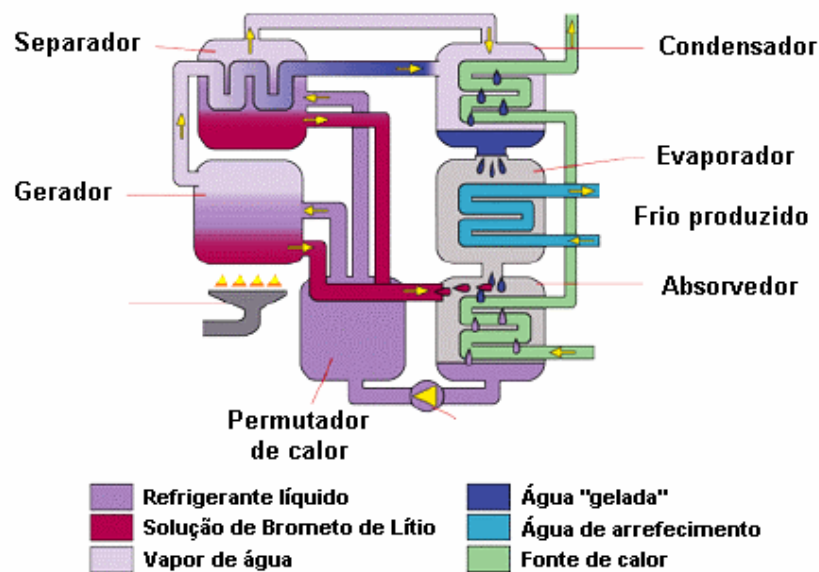


Fig.29 – Princípio básico de uma máquina de frio por absorção

O refrigerante e o absorvente num ciclo de absorção formam o que se designa de par de trabalhos. Muitos pares têm sido propostos ao longo dos anos mas apenas dois têm sido largamente utilizados: amoníaco com água

como absorvente e água juntamente com uma solução aquosa de brometo de lítio como absorvente. O par amoníaco-água é sobretudo encontrado em aplicações de refrigeração, com temperaturas de evaporação baixas, inferiores a 0 °C. O par água-brometo de lítio é muitíssimo utilizado em aplicações de arrefecimento de ar, em que sejam necessárias temperaturas superiores a 0 °C. Os níveis de pressão num *Chiller* de amoníaco-água estão geralmente acima da pressão atmosférica, ao passo que em *Chillers* de água-brometo de lítio estes operam geralmente sob vácuo parcial.

Os fluxos de calor num ciclo básico são os seguintes:

- ❖ é fornecido calor do meio que se pretende arrefecer, e o efeito refrigerante é obtido a baixa temperatura;
- ❖ é dissipado calor no condensador a um nível de temperatura intermédio;
- ❖ é dissipado calor do absorvedor, também a uma temperatura intermédia;
- ❖ é fornecida energia térmica ao gerador a uma temperatura elevada;

Relativamente aos sistemas de frio por absorção que utilizam brometo de lítio como absorvente e água como refrigerante, a fonte de calor (energia calorífica proveniente do sistema de Cogeração, em princípio) deve estar a uma temperatura mínima de 60-80 °C, ou tão elevada como 150 °C se se considerar um sistema de duplo efeito. Para sistemas que utilizam amoníaco como refrigerante o requisito da fonte de calor é 100-120 °C (sistema de efeito simples).

O ciclo básico ilustrado na figura anterior pode ser modificado de diversas maneiras. Uma consiste em utilizar todas as possibilidades para recuperação de calor no interior do ciclo de modo a melhorar a economia de energia térmica. Por exemplo, é habitual a permuta de calor entre os fluxos absorvente diluído que deixa o absorvedor e de absorvente concentrado que volta ao absorvedor. Quando todas as oportunidades de recuperação de calor que podem ser razoalmente utilizadas estiverem incorporadas na concepção da máquina, obtém-se um COP de refrigeração de aproximadamente 0.7 para o sistema água-brometo de lítio e aproximadamente 0.6 para o sistema amoníaco-água.

Outros melhoramentos podem ser obtidos através de um processo de cascata, mais eficiente, da energia térmica de temperatura elevada disponível para alimentação do gerador. Os chamados sistemas de duplo efeito incorporam dois blocos gerador-absorvedor que constituem distintos andares da máquina, de modo a utilizar o calor fornecido mais ou menos duas vezes. A energia térmica é fornecida a cerca de 170 °C ao primeiro gerador e o calor dissipado no correspondente condensador é utilizado para alimentação do segundo gerador de baixa temperatura, a cerca de 100 °C como numa máquina de efeito simples.

As vantagens da absorção sobre os *chillers* convencionais são:

- 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;
- A ausência de emissões de substâncias nocivas para a camada de ozono;

A tabela seguinte sintetiza as gamas de variação dos principais parâmetros respeitantes a *Chillers* de Absorção. *Chillers* de triplo efeito não são considerados, dado que os equipamentos existentes deste tipo são máquinas experimentais. Estas máquinas têm COPs acima de 1.6 e funcionam na gama de temperaturas de 170 °C a 200 °C.

Índices	NH3 - absorção	LiBr - absorção	
		Simple	Duplo
Número de efeitos	Simple	Simple	Duplo
Capac. refrigeração (kW)	20 - 2500	300 - 5000	300 - 5000
COP térmico	0.6 - 0.7	0.5 - 0.6	0.9 - 1.1
Gama de Temp. (°C)	120 - 132	120 - 132	150 - 170
Custo da máquina (€/TR)	1250 a 1750	870 a 920	930 a 980

Tab.4 – Características dos *Chillers* de Absorção

Os custos de manutenção das máquinas de absorção variam grandemente em função do tipo de contrato. Na maior parte dos casos é utilizado *outsourcing* e o contrato existente inclui a manutenção de todo o sistema de ar condicionado. Muitas vezes a operação é também assegurada por via de *outsourcing* 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.



Fig.30 – *Chillers* de Absorção

5. Avaliação Técnico-Económica

Seleccção do sistema

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

O estudo preliminar deve envolver as seguintes fases:

1. Análise da actual situação energética;
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 (edifício). 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 e 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 feitas. A partir das análises anteriores a razão calor/electricidade é calculada, que é um dos principais critérios pelo qual a máquina é seleccionada.

Também deve ser realizado um estudo detalhado sobre possíveis acréscimos de procura, sua calendarização, etc.

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, etc.

A estrutura de consumos eléctricos e térmicos e também outros factores, tais como tempos de operação, combustíveis disponíveis, etc, têm que ser tidos em consideração em todas estas avaliações. 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 natural está disponível, embora isto não seja um factor limitativo;
 - se há preferência pela produção de energia térmica;
 - se o consumidor requer 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;

❖ Etc.

Se o gás natural está disponível, instalações baseadas em motores alternativos a gás serão em geral a escolha mais adequada.

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, determinado-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.

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 a seguir:

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 <input type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/>
2. Elevado consumo de electricidade	> 500.000 kWh/ano	SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/>
3. Elevada potência da base do diagrama de carga eléctrico	min. 100kWe durante min. 5.000 horas/ano	SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/>
4. Razão de consumos electricidade/calor	> 0,7	SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/>
5. Existe autoprodução de energia eléctrica, através de um gerador a diesel ou por outro meio similar?		SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/>

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

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 (efeito simples/duplo), etc.) com base nas suas características de energia de alimentação (ex. temperatura à entrada) que têm que condizer com as características da energia térmica à saída da máquina de base.

A análise económica é que irá provar se a Cogeração/Trigeração é aceitável e qual a tecnologia a ser implantada. Para uma instalação de Cogeração há 3 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 carência será complementada com electricidade adquirida à rede pública e energia térmica gerada 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.

O custo de uma instalação consiste 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 tubagens, de cablagens, de sistemas de controle 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/Trigeração consiste no maior custo operacional. A isto “acresce” o balanço no que concerne 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 resultado da análise económica, são obtidos parâmetros de rentabilidade, geralmente o período de retorno simples do investimento (“*payback*”), o Valor Actual Líquido e a Taxa Interna de Rentabilidade, permitindo que uma decisão seja tomada sobre a viabilidade do sistema seleccionado.

6. Cogeração/Trigeração 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 satisfaziam 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.

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 SEM – Sistema Eléctrico Nacional. O custo de investimento numa central de Cogeração ronda os 750 €/kW.

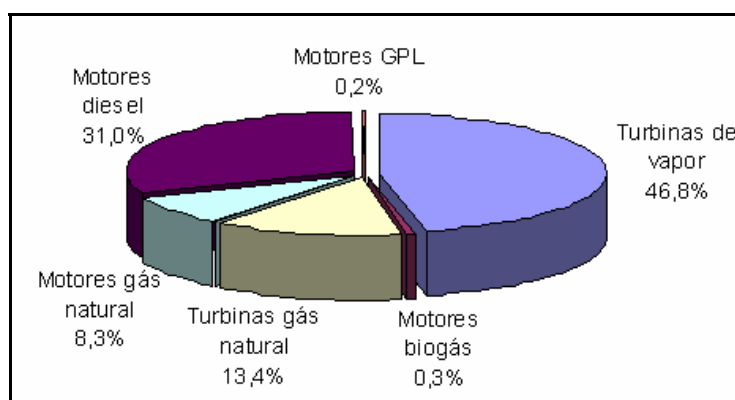


Fig.31 – Distribuição da potência total instalada de Cogeração em Portugal por tecnologia

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 fortemente 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. Em 2001 o preço médio de aquisição do SEP aos cogeradores foi de 0,056 €/kWh, enquanto que em 2000 tinha sido de 0,047€/kWh.

As aplicações de Cogeração no Sector Terciário têm um peso insignificante, apesar do enorme potencial expectável para esta tecnologia. Um total de 20 instalações utilizam Cogeração “pura” (não Trigeração), pretendendo a apenas 4 subsectores distintos, com a potência total instalada destas unidades a ser aproximadamente de 9,6 MWe, o que é equivalente a 0,9% da potência total instalada de Cogeração em Portugal.

Relativamente à desagregação da potência instalada por subsectores, os Hóteis 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%. 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 ETARs, 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.

Perto do final de 2002, havia 9 instalações de Trigerção em Portugal, estando apenas 8 a funcionar satisfatoriamente. Ainda para 2002 estava previsto o arranque de uma nova instalação. Aquelas 9 instalações representam aproximadamente 26 MWe, o que equivale a 2,4% da potencia 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 5 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.

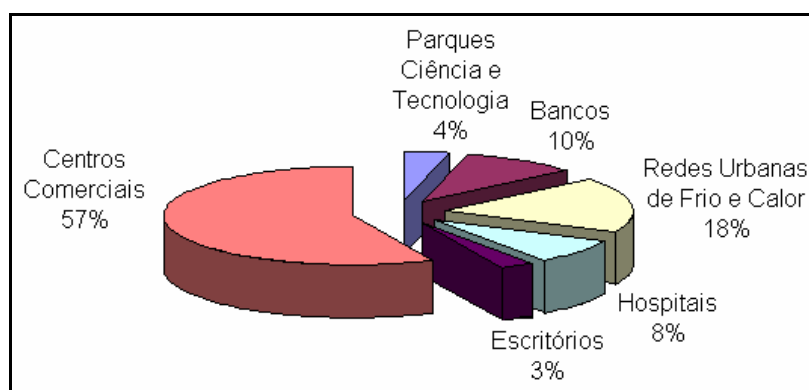


Fig.32 – Desagregação da potência eléctrica total de Trigerção instalada no Sector Terciário português por subsector (100% = 26,3 MWe)

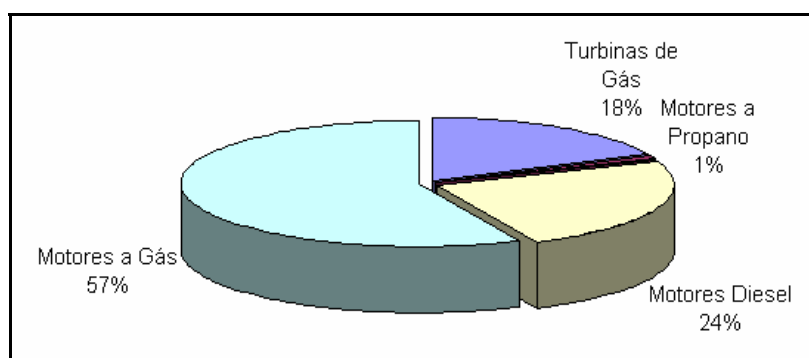


Fig.33 – Desagregação da potência eléctrica total de Trigerção instalada no Sector Terciário português por tecnologia de Cogeração utilizada (100% = 26,3 MWe)

Esquemas de apoio

Os projectos de Cogeração/Trigerção podem ser apoiados financeiramente no âmbito do Programa Operacional da Economia (POE), através do MAPE (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) e de outra reembolsável (IR). O INR pode atingir 20% das despesas consideradas elegíveis, ou 40% se forem utilizados mais de 50% de recursos renováveis (ER) ou resíduos industriais, agrícolas ou urbanos (OR), 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 Rendimento Eléctrico Equivalente (REE) da instalação, e para projectos utilizadores de mais de 50% de ER ou OR pode ser 40% no máximo. 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 2 anos.

Outro programa de apoio financeiro possível é o SIME (Sistema de Incentivos à Modernização Empresarial). 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, etc. 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, 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).

7. Enquadramento Jurídico

Evolução da legislação referente à cogeração, de notar que esta listagem tem apenas um carácter informativo, para um melhor enquadramento jurídico no sector aconselha-se a consulta da legislação no Diário da República.

- ❖ Lei nº 2002, de 26 de Dezembro de 1944
 - Electrificação do País;
 - Reconhece a importância da figura do pequeno produtor de energia;
- ❖ Decreto-Lei nº 502/76, de 30 de Julho
 - Criação da Empresa Pública Electricidade de Portugal – EDP;
 - Prevê a figura do pequeno produtor de energia eléctrica;
- ❖ Decreto-Lei nº 20/81, de 28 de Janeiro
 - Medidas de incentivo à autoprodução de energia eléctrica;
- ❖ Lei nº 21/82, de 28 de Julho
 - Produtor independente de energia eléctrica;
 - Possibilidade de proceder à distribuição;
- ❖ Decreto-Lei nº 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 nº 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 nº 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 nº 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 5º do diploma de 95 *versus* artigos 5º e 8º do diploma de 99;
- ❖ Direito de fornecer energia ao SEP (1995);
- ❖ Direito de fornecer energia ao SEP ou às entidades referidas no artigo 8º 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 cogrador, ou pelo estabelecimento que consuma, pelo menos, 40% da energia térmica útil;
- ❖ Nos casos de autoconsumo pode ser consumida, através de linha directa, em qualquer entidade que detenha pelo menos 10% do capital social do cogrador;

Fornecimento de energia eléctrica pelo cogrador

- ❖ 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 cogrador;
 - 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 cogradores 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 13º a 20º do Decreto-Lei nº 538/99

Informação, fiscalização e auditorias

- ❖ Exames periódicos e auditorias (artigo 23º)

8. Conclusões

Como conclusão, podemos apenas reforçar a ideia de que a gestão da energia deverá constituir para as empresas um campo de acção prioritário, por razões económicas imediatas e porque, a curto prazo, a pressão ambiental sobre a sua produção e sobre o seu consumo será crescente.

Para as empresas portuguesas, os motivos de preocupação serão ainda maiores, pois os nossos sectores industriais, em média, apresentam intensidades energéticas superiores à média europeia e, em período de crescimento moderado ou nulo da protecção industrial, os seus consumos de energia crescem mais de 15% ao ano.

A indústria portuguesa terá de melhorar os seus indicadores energéticos e é melhor que o faça por razões voluntárias antes que tal lhe seja imposto, por força de lei ou por via administrativa, através da fixação de objectivos sectoriais cujo cumprimento seja difícil, ou mesmo até, inatingível.

No caso particular da cogeração, as empresas deverão estar bem conscientes que:

- A liberalização do sector eléctrico e a criação do Mercado Interno da Electricidade, tem vindo a originar alterações de fundo nas regras que regulam a actividade da cogeração
- As preocupações da EU em matéria ambiental estão cada vez mais “omnipresentes” em quase todas as áreas de actividade, em especial no sector energético.

Devemos preocupar-nos em questões globais e preocupantes para o nosso futuro e para isso nunca esquecendo que a cogeração será hoje, amanhã e sempre uma resposta para uma evolução.



“Cogeração o futuro do amanhã”

9. Bibliografia

- Especificações técnicas e informações de fabricantes de turbinas e motores
- Publicações diversas sobre Cogeração, em revistas da especialidade
- Brochuras sobre Cogeração e Gestão de Energia da DGE
- Diários da República – Legislação
- Sites de Internet
 - <http://www.cogen.org>
 - <http://www.cogenportugal.com>
 - <http://www.energy.rochester.edu/cogen>
 - <http://www.cogeneration.net/>
 - <http://www.gasbrasil.com.br/tecnicas/artigos>
 - <http://www.trigemed.com>
 - <http://www.sfiac.org.br/palestras/energia>
 - <http://ecogen-sa.com/ECOGEN/Micro-geracao>
 - <http://www.gasenergia.com.br>
 -