

1 Introdução

O objetivo do presente trabalho é o estudo experimental e a análise de desempenho, à luz da 1ª e 2ª leis da termodinâmica, de um sistema de geração combinada de frio, calor e potência elétrica – trigeração, acionado por um motor Diesel adaptado para operar consumindo gás natural. Condições ótimas e limites de operação para parâmetros como as vazões dos fluidos de trabalho, o percentual de substituição do óleo Diesel por gás natural e a razão entre os diferentes produtos energéticos, são determinadas experimentalmente.

No presente capítulo apresenta-se uma série de possibilidades de uso do gás natural quando se faz necessária a geração combinada de energia elétrica e calor ou refrigeração (ou ambas). Explicam-se, também, as soluções frequentemente encontradas na indústria, diferentes campos de estudo dentro da área, introduzem-se os conceitos de cogeração e trigeração, assim como as perspectivas e potencial de desenvolvimento destas aplicações.

Tanto o planejamento quanto as políticas energéticas são ditadas internamente pelas nações e negociadas em bloco. Enrijecem-se, são redirecionadas ou adaptadas na medida que o homem percebe o esgotamento dos recursos naturais e a degradação do meio ambiente ou, então, por questões meramente financeiras. Tal situação manifestou-se recentemente nos acordos de Kioto, por exemplo, Wigley (1998), direcionados à preservação do meio ambiente, assim como nas políticas de exploração e comercialização do grupo de países exportadores de petróleo – OPEP.

É neste contexto que aparece o gás natural (*GN*) como uma alternativa econômica e com um potencial de poluição muito menor do que os portadores energéticos mais tradicionais. Paralelamente, a procura por sistemas mais eficientes, compactos, econômicos e menos poluidores levou à interligação de

processos e procedimentos dentro da indústria (posteriormente estenderam-se aos setores privado e comercial) estabelecendo-se a combinação da produção de potência elétrica e calor (e, eventualmente, de frio) como uma linha a ser seguida e implementada na medida das possibilidades e disponibilidade do empreendimento. Conhecem-se estas combinações de produção de produtos energéticos como cogeração e trigeração.

Enquanto um ciclo de geração de vapor, sem considerar as perdas do sistema de distribuição e do próprio processo onde é utilizado, alcança eficiências de 80% a 85%, a eficiência de uma planta termelétrica se encontra na faixa de 30% a 40%. Igualmente, uma turbina a gás para geração de eletricidade chega a operar com eficiência de 35%, e uma planta de geração combinada de vapor e eletricidade pode operar com eficiência térmica entre 55% e 60% (Jaber e Vetterick, 2001).

1.1. Cogeração

Chama-se de cogeração o processo através do qual se produz, de forma combinada, calor e eletricidade ou eletricidade e refrigeração. A proporção de geração destes produtos, em função do consumo de portadores energéticos primários, vai estar diretamente ligada às demandas da instalação. Uma planta de cogeração é considerada eficiente, segundo Eames e Wu (1998), quando a razão entre a potência elétrica e a potência térmica (razão de energia, que determina a demanda de cada produto energético da instalação) tende a 1,0. Vedamurthy e Sarathy (1990), desenvolveram um trabalho avaliando a influência desta razão sobre os parâmetros termoeconômicos da planta e demonstrando, através de um modelo computacional, a existência de um valor ótimo desta, dependendo do tipo de processo a que a planta se destina.

Quando o interesse está centrado na produção de eletricidade e potência térmica (calor) é usual a utilização de plantas bem conhecidas (Vedamurthy e Sarathy, 1990 e Jaber e Vetterick, 2001) a saber: a) plantas de ciclo “*topping*” e b) plantas de ciclo “*bottoming*”. Os termos “*topping*” e “*bottoming*” dizem respeito

à inserção de ciclos operando com níveis de temperatura acima ou abaixo do ciclo em questão, respectivamente.

Um sistema típico de cogeração consiste de um motor a combustão interna, uma turbina a vapor ou uma turbina a gás, que aciona um gerador elétrico. Um trocador de calor recupera o calor dos gases de exaustão e/ou da água de arrefecimento do cilindro do motor para produzir água quente ou vapor.

Uma planta de cogeração, segundo Jaber e Vetterick (2001), fornece a quantidade de calor e potência elétrica determinada por um dado processo, com uma economia de combustível que pode chegar a 10% ou 30% do que seria necessário para produzir separadamente o calor e a eletricidade que o processo requer. Pode-se recorrer, também, dependendo da razão de energia da instalação e de valorações termoeconômicas, à utilização de bombas de calor acionadas eletricamente (Smith e Few, 2001).

O produto energético primário de uma planta de ciclo “*topping*” é eletricidade ou potência mecânica. As instalações que geram potência elétrica podem produzir eletricidade para seu uso próprio, e vender a geração adicional à rede de distribuição ou transferi-la a uma outra instalação que a requeira.

Há quatro tipos de sistemas de cogeração do tipo “*topping*”. O primeiro tipo queima o combustível em uma turbina a gás ou em um motor Diesel para produzir potência elétrica ou mecânica. A exaustão fornece o calor para um processo, ou vai a uma caldeira de recuperação onde se gera o vapor necessário para acionar uma turbina a vapor secundária. Este sistema é conhecido como ciclo combinado (CC).

O segundo tipo de sistema queima o combustível (do tipo que for) para produzir vapor a alta pressão que, através de uma turbina de vapor, gera potência elétrica ou mecânica. A exaustão fornece vapor a baixa pressão para o processo. Este é um sistema turbina a vapor (ST).

Um terceiro tipo é composto por um motor que aciona um gerador elétrico. A água quente obtida do sistema de arrefecimento do motor é direcionada a uma caldeira de recuperação onde se gera vapor para um processo e/ou água quente para aquecimento de locais.

O quarto tipo é o sistema baseado no uso de turbinas a gás onde uma turbina a gás natural aciona um gerador elétrico. Os gases de exaustão passam para uma caldeira de recuperação de calor onde se gera o vapor ou calor para um processo.

As plantas de ciclo “*bottoming*” são menos comuns do que as de ciclo “*topping*”. Estas plantas existem em indústrias pesadas tais como a do vidro ou as de manufatura de metais, onde são usadas fornalhas de temperaturas muito altas.

Uma caldeira recupera o calor de rejeito de um processo de aquecimento ou manufatura determinado. Este calor é usado então para produzir o vapor para o acionamento de uma turbina de vapor gerando, assim, eletricidade. Desde que o combustível é queimado primeiramente no processo de produção, nenhum combustível extra é requerido para produzir eletricidade.

Uma tecnologia emergente que apresenta possibilidades de aplicação em cogeração é a célula de combustível (Parise et al., 2005). Uma célula de combustível é um dispositivo que converte hidrogênio em eletricidade, sem combustão, produzindo, também, calor.

A maioria das células de combustível usam o gás natural (composto principalmente por metano) como fonte de hidrogênio. A primeira célula de combustível posta no mercado foi a de ácido fosfórico. Há, aproximadamente, 50 dessas células instaladas e operando nos Estados Unidos (Jaber e Vetterick, 2001). Outras tecnologias da célula de combustível estão em estágios adiantados de desenvolvimento, algumas das quais podem ser usadas em cogeração, dado o calor gerado a altas temperaturas para sua operação.

Já no caso da cogeração de eletricidade e refrigeração, usa-se a mesma tecnologia na produção da eletricidade e recorre-se a “*chillers*” acionados

eletricamente ou a “*chillers*” por absorção, baseados no mesmo processo de recuperação de calor, para atender à demanda de frio da instalação (Maidment e Tozer, 2002; Mostafaivi et al., 1998; Mostafavi e Agnew, 1996a, 1996b, 1996c, 1997; Lazzarin e Gasparella, 1997).

Nos últimos anos tem-se recorrido com frequência à implementação dos chamados CCPP (*combined cycle power plant*) onde se combinam os ciclos Brayton e Rankine. A mais importante qualidade desta combinação é a flexibilidade para cobrir demandas variáveis de forma econômica e eficiente (Dharmadhikari, 1998; Najjar, 2001; Najjar e Akyurt, 1994).

1.1.1. Cenário

O uso da cogeração é incentivado, fundamentalmente, pelas altas produções de energia elétrica ou por políticas energéticas que promovam o uso racional e eficiente dos combustíveis fósseis (Caputo et al., 2004; Brown e Minet, 1996; Maldague, 1984).

Às vantagens decorrentes do uso da cogeração em termos da economia de portadores energéticos (Lindenberger et al., 2000 e Lukas, 2001), entre 15% e 35%, e da redução do volume da planta pela interligação dos processos, soma-se a redução do impacto ambiental e opõem-se um aumento no custo de implementação entre 20% e 140%, assim como a incerteza derivada da concorrência entre os preços dos combustíveis e as tarifas elétricas (*COGEN*, 2000; Soares et al., 2001). Deve-se considerar, também, que a introdução de sistemas de cogeração promove uma maior complexidade do projeto e operação da instalação, na medida em que se faz necessária a compatibilidade entre subsistemas (nem sempre possível). Tais considerações têm trazido consigo uma série de discussões ao redor das decisões políticas e econômicas que regulam a produção de energia e o uso da cogeração em países como os Estados Unidos (Dismukes e Kleit, 1999; Hughes, 2000), os membros da União Européia e Japão

(Bonilla et al., 2003; Hendriks e Blok, 1996; Babus'Haq e Probert, 1996a, 1996b, 1994).

Com relação a esta última, na Polônia desenvolveu-se (*COGEN*, 1998) o primeiro de uma série de relatórios nacionais, o qual apresentou uma extensa descrição do setor energético polonês centrado nos mais importantes aspectos da cogeração. Nele se consideram aspectos tais como a informação na legislação e a organização no setor, análise das oportunidades de mercado, informação sobre possíveis fontes de financiamento e condições gerais de investimento.

Na França (*CeGIBAT*, 1998), foi apresentado um relatório da reunião especializada de 27 de novembro de 1997, abordando temas que incluíram a cogeração. Discutiram-se temas como a auto-suficiência e eficiência energética, o potencial de aplicação na Europa, as regulamentações, a tecnologia disponível e as metas para a cogeração.

Na prática, existem múltiplos exemplos da utilização bem sucedida dos princípios da cogeração em situações das mais diversas tendências. Estes exemplos encontram-se, fundamentalmente, onde a economia de recursos energéticos é altamente desejável, como demonstram Wimberly et al. (1996), com uma descrição passo a passo do processo e exemplos concretos de aplicação em um grande centro de convenções e uma universidade.

Nos diversos ramos de produção podem-se encontrar aplicações de cogeração na indústria de alimentos (Fantozzi et al., 2000), química e de destilados, entre outros (Mohanty e Panda, 1993; Lemar, Jr., 2001). Gunzbourg e Larger (1999) apresentam a cogeração aplicada às plantas térmicas de alta eficiência para dessalinização de água de mar, a qual deve reduzir o custo de água desalinizada a um nível mais competitivo quando comparado à técnica de osmose reversa para a água potável. Apresenta-se um conceito original de cogeração que relaciona uma turbina a gás de múltiplos estágios a uma unidade de dessalinização mais uma bomba de calor por absorção. Tomou-se como exemplo uma turbina a gás de 9,0 MW relacionada a uma unidade de dessalinização de 9600 m³/dia. O consumo específico de calor da unidade de dessalinização é de 35 kW-h/m³ e o

custo estimado da água destilada na tomada da planta é, sob circunstâncias econômicas razoáveis, menos do que $\$0.5/m^3$. Encontram-se, também, relatos de aplicações residenciais (Roflsman, 2004; Grohnheit e Mortensen, 2003; d'Accadia et al., 2003; Bourgeois et al., 2003) e comerciais (Alanne e Saari, 2004; Szklo et al., 2004).

1.1.2. Cogeração de eletricidade e aquecimento

O ciclo Brayton e o ciclo Rankine são os dois ciclos termodinâmicos mais utilizados para a produção descentralizada de energia elétrica. A escolha entre um e outro dependerá fundamentalmente do combustível disponível no local onde será instalada a planta, além de considerações de ordem econômica entre as quais se destacam o custo de construção e manutenção da instalação, o tempo de retorno do investimento (período de *pay-back*) e variáveis estratégicas como o número e as características dos usuários (Fantozzi et al., 2000).

O ciclo Rankine (baseado em turbinas a vapor) é o mais antigo e o que tem custo capital maior, maior tempo de construção (Najjar, 2001). Trabalhos, como o desenvolvido por Najjar (1999), demonstram que a eficiência deste ciclo tem aumentado ao longo dos anos. Nele, a produção de energia elétrica ocorre em um gerador acionado diretamente pelo eixo da turbina, a qual é acionada através do processo de expansão de vapor de água superaquecido.

O vapor que sai da turbina é logo condensado, num processo de recuperação de calor, através do aquecimento de água, geralmente num trocador do tipo casco e tubo. O produto da condensação a baixa pressão (condensado) é bombeado à caldeira. Com o bombeamento, aumenta a pressão e, na caldeira, recebe calor até chegar ao estado de vapor superaquecido pressurizado, no qual retorna à entrada da turbina.

Quando da cogeração de calor e eletricidade, existem três formas de suprir a demanda de calor da instalação, relacionadas ao ciclo Rankine, a saber: com o

calor transferido à água no processo de condensação, superdimensionando a caldeira ou usando uma caldeira auxiliar.

O ciclo Brayton (aplicado a turbinas a gás) requer uma tecnologia mais sofisticada do que o Rankine, devido à pressurização do ar e o gás e à necessidade de manter as proporções entre estas duas vazões, entre outros fatores, para obter a máxima eficiência da combustão (Paul e Jhan, 1996). Da mesma forma que no ciclo anterior, a produção de energia elétrica ocorre em um gerador diretamente ligado ao eixo da turbina, a qual é acionada através do processo de expansão dos gases produzidos pela combustão da mistura ar-gás.

Os gases de exaustão da turbina acionam, por sua vez, o compressor que fornece o ar comprimido para a combustão. Em turbinas estacionárias estes gases passam por um trocador de calor onde se recupera o calor de rejeito para pré-aquecer o ar na entrada da câmara de combustão.

Na figura 1 apresenta-se o esquema de uma planta de cogeração baseada no ciclo Brayton (turbina a gás) para geração de eletricidade, vapor de água e água quente (cogeração potência elétrica-calor).

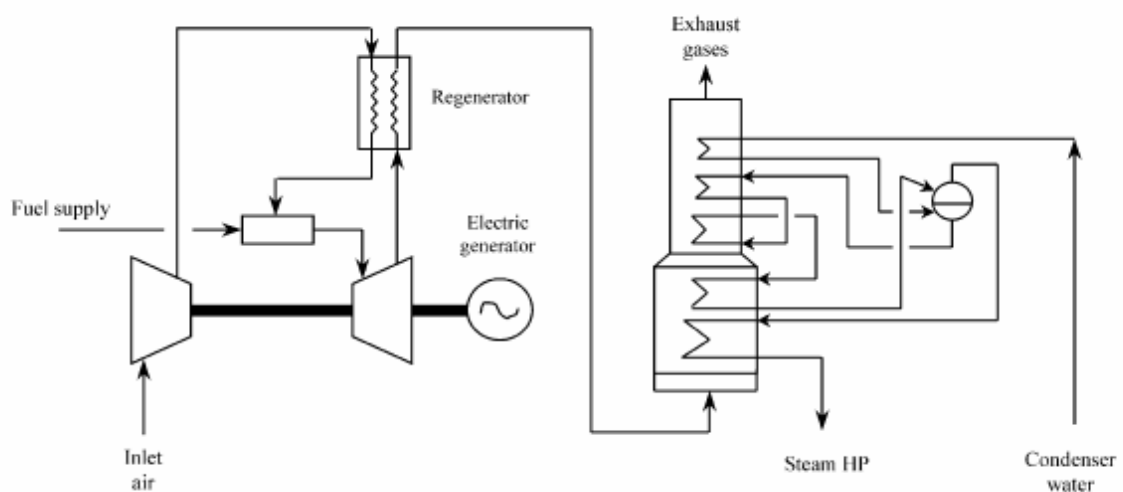


Figura 1 – Esquema de cogeração com ciclo Brayton (Hernández-Santollo e Sánchez-Cifuentes, 2003)

Quando da cogeração de calor e eletricidade, existem duas formas de suprir a demanda de calor da instalação, relacionadas ao ciclo Brayton (Paul e Jhan, 1996), a saber: a) com o calor transferido à água no processo de recuperação de calor dos “gases de exaustão” da turbina e b) combinando este processo com uma caldeira auxiliar. Alguns trabalhos se referem também ao arrefecimento do ar, antes de entrar na turbina, como uma forma de melhorar a eficiência do sistema, o que gera um outro ponto de recuperação de calor para os processos paralelos (Abedin, 2003).

Deve-se considerar, na hora de eleger a forma de complementar a demanda de calor, que a escolha vai estar em função de suprir a demanda de potência às temperaturas requeridas, paralelamente ao uso da eletricidade, pelos usuários ou processos que acontecem na instalação (Curti et al., 2000a, 2000b).

Uma outra forma de complementar a produção de calor para suprir a demanda da instalação é através de bombas de calor acionadas eletricamente, sendo que a eletricidade usada nesse acionamento é parte da própria produção da planta (d'Accadia, 2001).

No que diz respeito à cogeração em níveis residenciais ou comerciais de pequeno e médio porte (Bidini et al., 1998), encontram-se motores a combustão interna operando de acordo com os ciclos Otto e Diesel, consumindo gás (de Witt, 1996) no primeiro caso e usando combustível Diesel ou uma mistura de Diesel e gás no segundo (Sauperl et al., 1998). Nestas aplicações o motor aciona diretamente um gerador elétrico e calor é obtido a partir da recuperação de calor de rejeito da água de arrefecimento e dos gases de exaustão (Swanson, 1996; Knowles, 1997a e 1997b).

É comum a utilização de bombas de calor acionadas eletricamente ou por absorção para complementar a geração de calor necessária para suprir a demanda da instalação. Devido às altas temperaturas dos gases de exaustão, bombas de calor por absorção de até dois estágios podem ser utilizadas com a descarga do motor diretamente ligada ao gerador da bomba de calor.

1.1.3. Cogeração de eletricidade e refrigeração

Quando a demanda dos produtos energéticos está determinada pelo consumo de energia elétrica e de refrigeração (Langreck, 2000), utilizam-se os mesmos motores térmicos primários, a saber: turbina a gás, turbina a vapor e motor de combustão interna. A configuração destes sistemas é muito semelhante à configuração correspondente, na cogeração de potência térmica e eletricidade, no que diz respeito à produção de eletricidade.

Na figura 2 apresenta-se um motor Diesel com turboaspiração e interresfriador que aciona um gerador elétrico e cujo calor de rejeito é aproveitado para acionar um sistema de refrigeração por absorção.

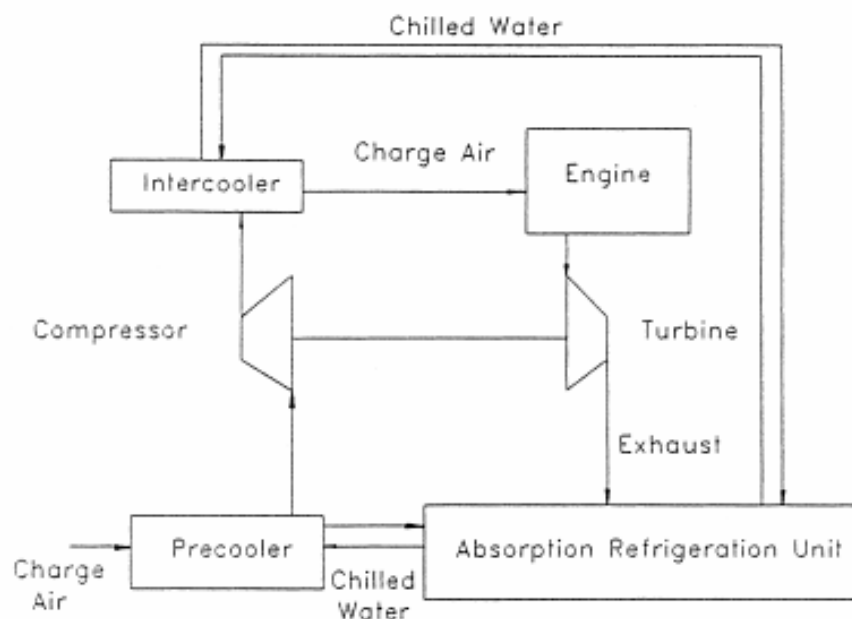


Figura 2 – Esquema de cogeração com ciclo Diesel (Agnew et al., 1999)

Quanto à geração de frio, existem três formas bem difundidas de se obter. A primeira é com o acionamento elétrico direto de um “*chiller*” ou sistema de refrigeração ou condicionador de ar por compressão de vapor (VCR), de expansão direta, com a própria energia elétrica produzida pelo sistema (Silveti, 1996). A segunda é pelo acionamento direto do compressor pelo MCI (Parise e Cartwright,

1988; del Zoppo, 2001). A outra forma é através da utilização de sistemas de refrigeração por absorção – ARS (Silveira et al., 1983; Zu et al., 1992; Mashimo e Ikumi, 1998; Watt, 2002).

Esta última é uma forma de converter demanda de frio em demanda de calor, quando se requer produção de eletricidade, calor e frio – Trigerção (Lazzarin et al., 1996; Knowles, 1997b; Pak e Suzuki, 1997a, 1997b).

1.2. Trigerção

Nos últimos anos, vem se dando uma considerável atenção aos sistemas de trigerção, com o objetivo de maximizar sua eficiência energética e diminuir o impacto ambiental. A trigerção pode ser definida como a produção combinada de três formas úteis de energia (eletricidade, calor e frio) a partir de uma única fonte de energia preliminar (Héteu e Bolle, 2002).

Em um sistema do trigerção, (a) a potência elétrica é produzida por um motor térmico convencional (turbina a gás ou motor de combustão interna), ou por uma célula de combustível (Gunes e Ellis, 2003; Burer et al., 2003; Parise et al., 2005); (b) o calor rejeitado (dos gases de exaustão, da água de arrefecimento e do óleo lubrificante, quando aplicável) é recuperado para suprir, parcial ou totalmente, a demanda do calor (água quente ou vapor superaquecido); e (c) a potência frigorífica requerida é obtida por meio de sistemas de refrigeração por absorção (aproveitando-se assim parte do calor de rejeito do motor) ou de tradicionais por compressão do vapor (acionados elétrica ou mecanicamente).

São inúmeras as possíveis configurações de sistema, tendo todas em comum a possibilidade de reduzir o consumo de combustível primário e as emissões de CO₂. Por sua vez, a integração dos componentes e dos subsistemas transforma-se numa importante questão durante os estágios de projeto, desenvolvimento e operação da instalação.

A trigerção, da mesma forma, e sendo um caso particular da cogeração, se apresenta como mecanismo de obtenção de maior rendimento dos processos de

conversão de energia através da redução no consumo de combustíveis primários. Destaca-se que uma grande parcela dos esforços realizados no desenvolvimento destes complexos sistemas baseia-se no crescente interesse na redução do impacto ambiental da indústria.

Uma planta de trieração é descrita, por exemplo, por Hernández-Santollo e Sánchez-Cifuentes (2003), como uma planta de cogeração à qual adicionou-se um “*chiller*” de absorção, que, por sua vez, utiliza o calor de rejeito da planta de cogeração, para a produção de frio. Isto é descrito graficamente na figura 3 que representa a conversão da planta de cogeração da figura 1 em uma de trieração. Outros sistemas de trieração com refrigeração por absorção são apresentados, por exemplo, por Minciuk et al. (2003) e Colonna e Gabrielli (2003).

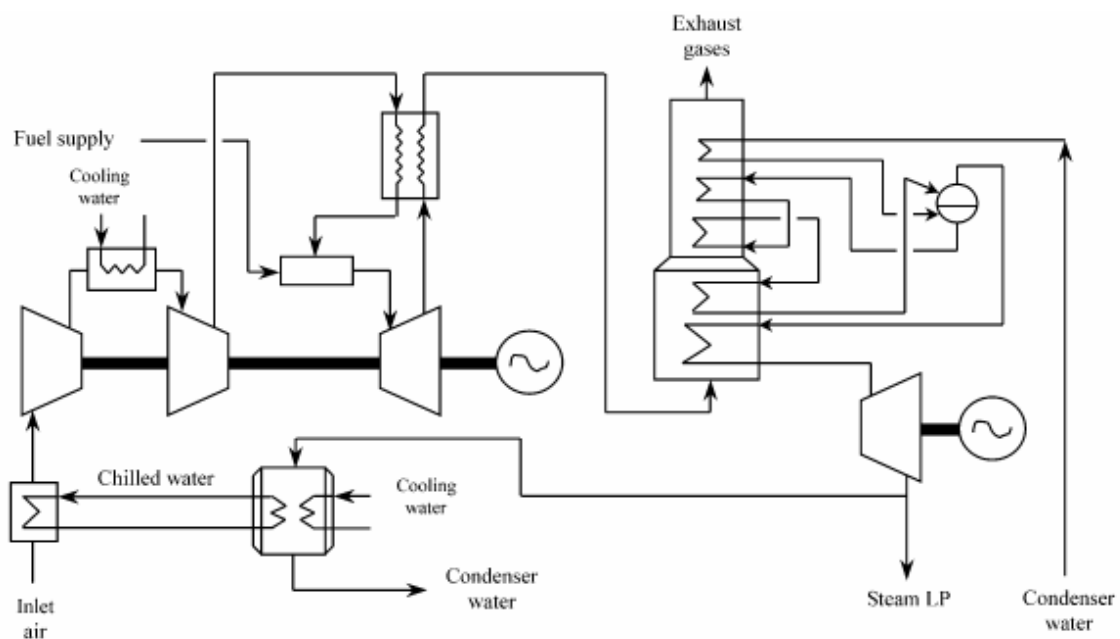


Figura 3 – Planta de trieração baseada no ciclo Brayton e um “*chiller*” de absorção. Hernández-Santollo e Sánchez-Cifuentes (2003)

Outras formas aplicadas à geração conjunta de calor, frio e potência elétrica baseiam-se na instalação de um “*chiller*” de compressão de vapor (Míguez et al., 2004; Porteiro et al., 2004), acionado mecânica ou eletricamente. Aplicam-se combinações destes equipamentos que incluem o seu funcionamento como

bombas de calor. São utilizados aquecedores elétricos ou a gás para cobrir picos de demanda de energia térmica.

Costuma-se, também, interligar a instalação à rede de distribuição local de energia elétrica. Esta interligação, segundo d'Accadia (2001), permite um consumo de eletricidade em períodos que resulte econômico ou indispensável e a eventual venda do excedente produzido pela instalação à concessionária de distribuição.

Os sistemas de Trigerção podem ser projetados sob encomenda para responder a demandas de potência elétrica ou de calor (“ajuste a calor ou potência”). A demanda de refrigeração, por outro lado, pode ser grande e constante (típica de alguns processos industriais) ou apresentar uma variação horária, com períodos de pico, como nas aplicações residenciais e comerciais.

Para suprir tais perfis diferentes de demanda, sistemas de refrigeração por absorção (Rizy et al., 2001 e 2002) ou sistemas de refrigeração por compressão de vapor podem ser empregados.

No caso da refrigeração por compressão de vapor, o compressor pode ser acionado eletricamente (Héteu e Bolle, 2002; Braun et al., 2004; Few et al., 1997) ou por um motor de combustão interna, em cujo caso, é possível a recuperação de calor da água de arrefecimento e dos gases de exaustão do motor (Parise e Cartwright, 1988). Uma combinação dos dois ciclos de refrigeração pode também ser empregada (Gunes e Ellis, 2003).

1.2.1. Classificação dos sistemas de trigerção

A classificação dos sistemas de trigerção e de seus modos de operação pode adotar formas diferentes, como descritas a seguir.

Héteu e Bolle (2002), por exemplo, distinguem duas categorias de plantas de trigerção, quanto ao uso de calor e frio.

- 1) plantas de trigerção contínua (*all time*): além da geração de potência elétrica, calor e frio são produzidos simultaneamente. Exemplos típicos são os hospitais e alguns processos industriais.
- 2) plantas de trigerção "sazonais": apesar de terem condições permanentes para a geração de calor e potência frigorífica, o uso do aquecimento é predominantemente limitado ao inverno e da refrigeração, ao verão. Estas plantas encontram aplicação residencial (Gunes e Ellis, 2003), em edifícios de escritório e em hotéis.

Míguez et al. (2004) vão além, seguindo Few et al. (1997) e Smith e Few (2001), ao definir cinco modos de operação diferentes de uma planta de trigerção, a saber:

- 1) modo “*stand-by*”: não há demanda térmica nem elétrica, ou os acumuladores elétricos e térmicos estão carregados;
- 2) modo gerador elétrico: somente eletricidade é requerida;
- 3) modo de cogeração: além da demanda de potência elétrica requer-se, também, suprir uma demanda de aquecimento moderada, que seja coberta pelo calor de rejeito do motor ou da célula de combustível;
- 4) modo bomba de calor – verão: este modo é adotado sempre que existe demanda de refrigeração. Potência elétrica e calor podem, também, ser requeridos;
- 5) modo bomba de calor – inverno: Este modo de operação é requerido quando o calor de rejeito recuperado do motor principal está abaixo da demanda de calor da instalação.

Finalmente, diferentes siglas têm sido utilizadas para a denominação de sistemas de cogeração e trigerção: CHP (combined heat and power; Maldague,

(1984); Few et al., (1997); Alanne e Saari, (2004); Szklo et. al., (2004)); CCHP (combined cooling heating and power, Kong et al., (2004)); CCPP (combined cycle power plant, Franco e Casarosa, (2002)); IGSC (integrated gas and steam cycle, Najjar e Akyurt, (1994), Najjar, (1999), Valdés e Rapún, (2001); Shin et al., (2002); Franco e Carosa, (2002); Franco e Russo, (2002); Colpier e Cornland, (2002); ACC (advanced combined cycles, Akiyama et al., (1997); d'Accadia, (2001); Sistemas Híbridos, Oliveira et al. (2002).

1.2.2. Diferentes sistemas e capacidades

Ainda que o nome de trigerção seja relativamente novo (dez últimos anos), podem ser encontradas referências na literatura especializada que demonstram uma forte tendência à implantação deste tipo de instalações já em novos empreendimentos. Há, também, alguns trabalhos precursores sobre o assunto.

Tal é o caso de Lazzarin e Gasparella (1997), que avaliam a possibilidade do uso da energia térmica disponível em plantas de cogeração para a produção de frio (em princípio, destinado ao condicionamento do ar) através de sistemas de refrigeração menos convencionais como os sistemas de absorção e adsorção. Os autores sugerem uma grande economia de energia com a aplicação destas idéias. Lin et al. (2001) estudaram a influência das temperaturas de fornecimento e retorno da água quente e fria num sistema que combinava a geração de potência elétrica e calor com resfriamento (*Combined Heat Cooling and Power*) a ser implementado na cidade de Beijing, na China, com capacidade de geração de 275 MW de potência elétrica. Os autores concluíram que, em sistemas que utilizam “*chiller*” de absorção, a temperatura de retorno da água influencia de forma mais marcante o desempenho do sistema (e o consumo de portadores energéticos primários) por afetar consideravelmente a performance do “*chiller*”.

Um setor que, por suas características, é muito susceptível à aplicação do conceito de trigerção é a indústria de alimentos. Bassols et al. (2002) analisaram diferentes plantas e mostraram como a adição de um “*chiller*” de absorção,

acionado por vapor, água quente ou, ainda, gases de exaustão, permitiria utilizar, para a produção de frio, grande parte do calor gerado.

A figura 4 mostra, entre as possibilidades avaliadas, o esquema simplificado de um sistema de refrigeração por absorção, combinado com outro de compressão de vapor, em uma planta de cogeração na produção de margarina na Holanda. Os autores demonstraram como a capacidade de transformar energia térmica a baixa temperatura (de baixo valor econômico) em potência de refrigeração de elevado valor, mediante o uso dos sistemas de refrigeração por absorção, representa um investimento economicamente atrativo quando combinado com uma planta de cogeração.

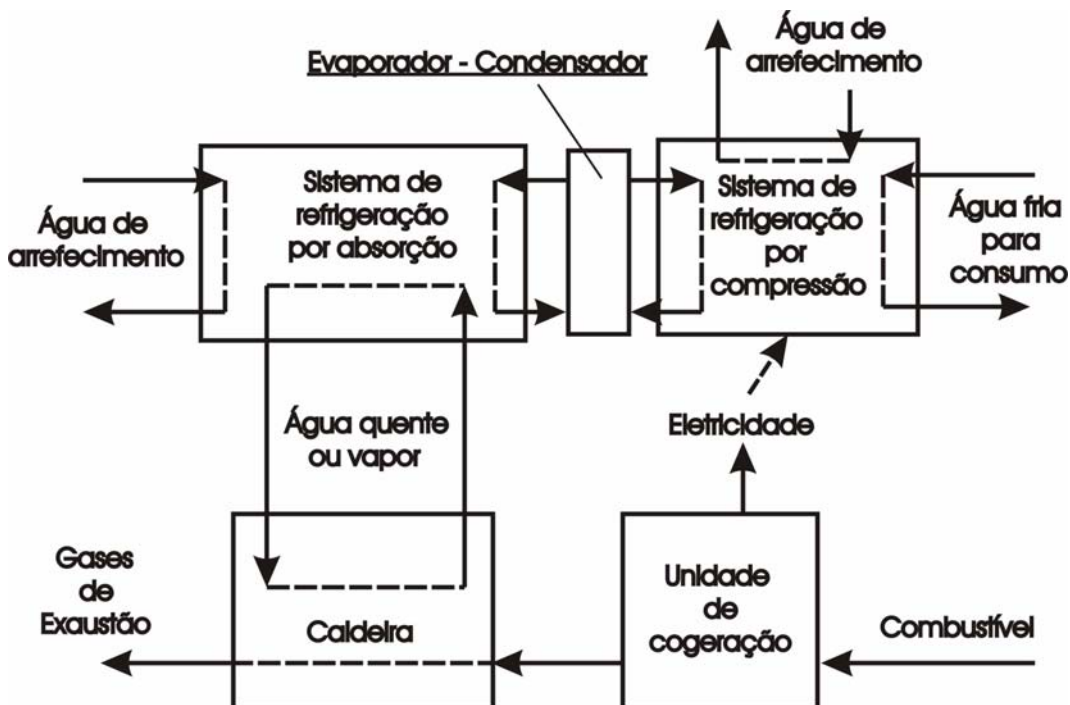


Figura 4 – Planta de trigeração na indústria de alimentos (esquema simplificado).

Bassols et al. (2002)

Cardona e Piacentino (2003b) desenvolveram uma metodologia para monitoramento de uma instalação de trigeração de médio porte para atender a uma demanda de 500 kW de potência elétrica e de 600 a 700 kW entre energia térmica e refrigeração, distribuídas em função da época do ano. O sistema é composto por um motor de combustão interna a gás natural, o qual aciona um gerador elétrico. Calor é recuperado da água de arrefecimento do motor e dos gases de exaustão e utilizado para suprir a demanda de potência térmica da instalação e do gerador de

um “*chiller*” de absorção que provê a potência frigorífica requerida pela instalação. Os dados, por eles obtidos, possibilitam a eleição de critérios para operação da planta. Também colocam em evidência a relação entre os modos de operação (determinados pelas variações na distribuição da demanda dos diferentes produtos energéticos na instalação) e as principais variáveis de projeto.

Hernández-Santoyo e Sánchez-Cifuentes (2003) desenvolveram uma comparação entre a eficiência de um sistema de cogeração e outro de trigerção, ambos baseados em turbinas a gás (ciclo Brayton). Concluíram, dessa experiência, a possibilidade de se economizar até 10% de combustível com o uso da trigerção.

Míguez et al. (2004) e Porteiro et al. (2004) desenvolveram um sistema de trigerção cujo núcleo é um motor de combustão interna de 9,6 kW que aciona mecanicamente um gerador elétrico e o compressor de um sistema de refrigeração reversível (bomba de calor). Concluíram que a contribuição da bomba de calor é determinante sobre a eficiência global do sistema, considerando o desempenho do mesmo em condições tanto de verão quanto de inverno. Numa análise de viabilidade, os autores determinaram a incapacidade do motor de trabalhar acima de 60% da sua capacidade nominal quando não existe demanda elétrica, pelo que esta demanda se revela como o ponto mais conflitante quanto à operação do sistema. Para contornar este inconveniente adicionaram ao sistema um aquecedor elétrico auxiliar que possibilitava a conversão da demanda de potência térmica em demanda de potência elétrica. Esta solução caracteriza mais uma vez a flexibilidade demonstrada pelos sistemas de trigerção em face às exigências da instalação e ao equipamento disponível.

Na figura 5 mostra-se um esquema simplificado da planta considerada no trabalho de Temir e Bilge (2004). Esta planta é semelhante, no que diz respeito ao conceito, ao sistema apresentado por Cardona e Piacentino (2003a).

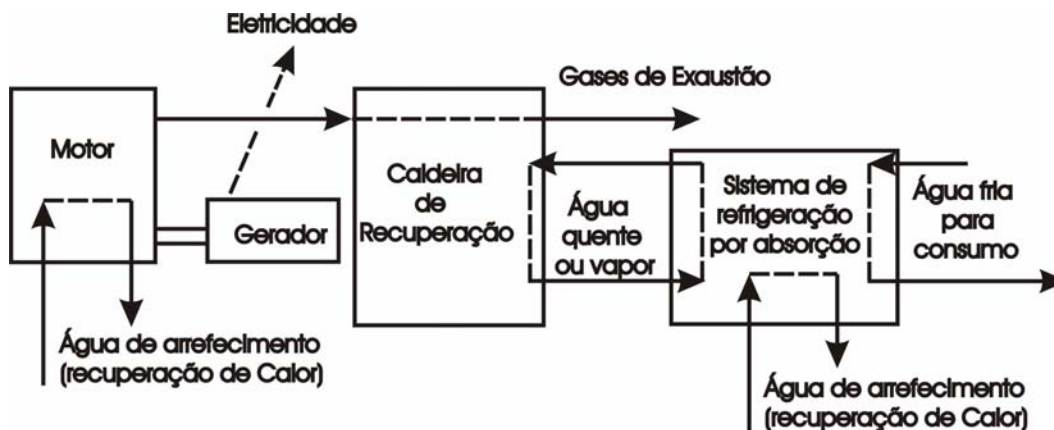


Figura 5 – Planta de trieração com motor de combustão interna a gás natural (esquema simplificado). Temir e Bilge (2004)

Os autores estudaram o desempenho termo-econômico de um sistema de trieração de grande porte que produz energia elétrica através do acionamento de um gerador elétrico por um motor de combustão interna a gás de 1900 kW de potência. Calor é recuperado do sistema de arrefecimento e dos gases de exaustão do motor e utilizado para suprir a demanda de potência térmica da instalação e acionar um “*chiller*” de absorção. O trabalho destaca a alta irreversibilidade dos processos termodinâmicos existentes no motor, pelo que seu uso somente para produção de energia elétrica torna-se desaconselhável. Concluíram, Temir e Bilge (2004), que os custos de operação e manutenção junto ao capital inicial requerido para a implementação do sistema de refrigeração por absorção têm maior peso sobre a eficiência econômica da planta do que a própria eficiência do sistema de refrigeração.

1.3. Critérios de avaliação e influência das políticas de incentivos

No que diz respeito à literatura consultada, não se apresentam ainda, de forma unânime, critérios para a avaliação da eficiência energética das plantas de trieração. Cada autor estabelece critérios, fundamentalmente baseados na análise termoeconômica do sistema, para avaliar o desempenho de seu aparato em relação à demanda estabelecida pela instalação correspondente.

Com a grande quantidade e variedade de alternativas para o projeto de uma planta de trigeração resulta verdadeiramente difícil estabelecer parâmetros (ou índices) de eficiência que se adaptem a qualquer instalação.

Cardona e Piacentino (2003a; 2003b), por exemplo, apresentam metodologias para o dimensionamento de uma planta de trigeração e a posterior medição dos parâmetros de operação e controle da instalação. Fazem questão de ressaltar a importância do “*chiller*” de absorção para um melhor aproveitamento da energia térmica residual e da importância do correto gerenciamento da planta para atingir os resultados esperados. Concluem pela necessidade de se projetar e gerenciar a planta de forma a satisfazer a demanda térmica enquanto a energia elétrica produzida puder ser vendida à distribuidora regional (ver também d’Accadia, 2001). Apresentam os critérios termodinâmicos mais usuais e obtêm correlações para o dimensionamento dos componentes da planta.

Temir e Bilge (2004) estabelecem um fator termo-econômico baseado na análise exérgica da instalação. Este fator é aplicado aos componentes do sistema de forma que algumas configurações possam ser avaliadas, de forma a subsidiar uma tomada de decisão. Em seu trabalho propõem o fator *exergoeconômico*, f , que relaciona as perdas por ineficiência (baixos valores de f) aos custos de implantação, manutenção e operação (valores de f altos).

Cardona e Piacentino (2005) apresentam uma comparação termodinâmica entre os diferentes critérios de avaliação e elegibilidade de plantas de cogeração e trigeração adotados pela União Européia, enquanto destacam a política e as ações de promoção de tecnologias com baixo impacto ambiental adotadas pelos países que compõem a União Européia.

Da avaliação dos critérios de *alta eficiência* concluíram que:

- 1) Deve-se centrar em benefícios energéticos ou ambientais, com uma definição clara entre o uso civil e industrial.

- 2) Para análises comparativas, aproximações do tipo *eficiência elétrica equivalente*, *2ª lei da termodinâmica* ou *eficiência global* não são confiáveis, dado que diferentes estruturas (concepções) de plantas podem apresentar idêntico saldo energético.
- 3) Devem ser determinados, criteriosamente, os valores de referência para cada tipo de produto energético da instalação. Estes valores serão atualizados constantemente, conforme se percebe o progresso tecnológico que garanta o aumento de eficiência dos processos de conversão energética.
- 4) Devem ser levados em conta os níveis de temperatura dos fluxos de calor.

Quanto à política energética em desenvolvimento nos países da União Européia, a respeito da cogeração e trigeração, destacaram a necessidade de se estabelecer um incentivo econômico, em função dos benefícios obtidos, que deverão promover a instalação de plantas mais eficientes. Enfatizam, no entanto, que se deve tomar o cuidado destes incentivos não distorcerem o mercado de energia *não cogerativo* e a sua importância para promover o diálogo com o setor privado, com o intuito de encorajar a implementação destes procedimentos.

1.4. Perspectivas e tendências

Uma idéia constante nos trabalhos revisados é a de que as eficiências de cada equipamento, dos diferentes subsistemas componentes da planta e da própria instalação, não podem ser avaliadas fora de um contexto onde limites são impostos pela demanda de operação (curvas de demanda e requerimentos de suprimento dos produtos energéticos, assim como os níveis de temperatura dos diferentes fluxos, entre outros).

Uma tendência clara no mercado e indústria da cogeração é o desenvolvimento e aprimoramento tecnológico dos ciclos combinados. Tem-se,

também, pesquisado e aplicado diferentes combustíveis na procura de processos mais econômicos, eficientes e com menor impacto ambiental (gás de aterros sanitários, óleo e gás do xisto betuminoso, gás de carvão, queima simultânea) (Buskies, 1996; Qin et al., 2001; Rodrigues et al., 2003) além, é claro, do gás natural.

Outras áreas de estudo que têm avançado e demonstram ser de grande utilidade no melhoramento dos sistemas cogenerativos são as de otimização e análise termodinâmica (Bandyopadhyay et al., 2001; Kwak, 2003; Burer et al., 2003) e a de programação matemática e modelagem, (Bojic e Stojanovic, 1998; Bruno et al., 1999; Gamou et al., 2002; Sciubba, 2003; Roosen et al., 2003; Frangopoulos e Dimopoulos, 2004).

Constatou-se, da literatura consultada, tratar-se a trigerção de um tema ainda com vasto campo de possibilidades de estudo. Como uma consequência natural da cogeração, a trigerção apresenta, atualmente, diversas questões ainda por serem respondidas, incluindo uma classificação genérica e abrangente, critérios para avaliação de desempenho, tipos de combustíveis disponíveis, otimização, atendimento a três demandas distintas – de calor, frio e eletricidade, entre outras.

Observou-se, também, um número muito pequeno de trabalhos sobre sistemas de trigerção com frio sendo produzido a partir de um ciclo de compressão de vapor. Não obstante a vasta disponibilidade de calor de rejeito, o uso de ciclos de refrigeração acionados termicamente, como o de absorção, pode se mostrar menos vantajoso que o de compressão de vapor, em função da distribuição das demandas entre frio, calor e eletricidade.

Com o propósito de se atender a algumas destas questões, o presente trabalho propõe-se estudar experimentalmente um sistema de trigerção com o sistema de produção de frio a partir da compressão de vapor.

1.5. Objetivos da tese

Este trabalho tem como primeiro objetivo o desenvolvimento e análise do protótipo de um sistema de trigeriação com fins de estudo em nível de laboratório. O sistema é integrado por um conjunto motor–gerador e um sistema de refrigeração por compressão de vapo, sendo o calor de rejeito recuperado da água de arrefecimento do motor, dos gases de exaustão e da condensação do refrigerante no “*chiller*”.

Numa segunda fase do trabalho experimental, o combustível de trabalho original do motor (óleo Diesel) é substituído, parcialmente, por gás natural veicular (*GNV*), com a consequente diminuição do consumo de Diesel, objetivando, desta forma, uma redução do impacto ambiental do sistema, dentre outras vantagens.

A instalação é analisada em seu conjunto, por sub-sistemas e por componentes, a partir de critérios estabelecidos com base na *1ª e 2ª Leis da Termodinâmica*.

1.6. Conteúdo da tese

No capítulo 2 é apresentada uma análise experimental com descrição dos equipamentos utilizados e dos procedimentos experimentais.

No capítulo 3 estabelece-se o modelo matemático do sistema (baseado na 1ª e 2ª leis da termodinâmica) que permitirá a subsequente análise termodinâmica. Estabelecem-se, também, os critérios de avaliação da eficiência da instalação.

No capítulo 4 se apresenta a redução dos dados e faz-se uma análise da propagação das incertezas das medições nos cálculos dos diferentes parâmetros apresentados.

Os resultados obtidos do sistema operando nos diferentes regimes, e dos componentes e subsistemas são descritos no capítulo 5, com as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, sendo apresentadas no capítulo 6.