

Análise Termodinâmica de Sistemas de Cogeração

Aluno: Igor Magalhães de Oliveira Velho
Orientadores: José Alberto dos Reis Parise
Frank Chaviano Pruzaesky

Introdução

Cresce, no mundo, o emprego de sistemas de refrigeração e climatização como itens fundamentais para a elevação da qualidade de vida dos seres humanos. Paralelamente ao aumento das instalações frigoríficas, amplia-se o consumo de energia elétrica e, com este, a emissão de gases nocivos ao meio ambiente. A cogeração, cujo objetivo é produzir simultaneamente eletricidade e energia térmica de maneira que se utilize a maior parte da energia contida num combustível, apresenta-se como a forma de utilização mais racional de energia primária. A refrigeração por absorção, por sua parte, pode ser usada como alternativa para diminuir o consumo de energia elétrica, ou para atender as demandas de frio em localidades isoladas que não dispõem de interligação com o sistema elétrico convencional.

Para estes sistemas, tem-se o gás natural (GN) como principal aliado, que se coloca no panorama energético mundial como uma alternativa econômica e com menor emissão de poluentes do que outros portadores energéticos. Paralelamente, a procura por sistemas mais eficientes, compactos, econômicos e menos agressivos ao meio-ambiente, levou à integração de processos e procedimentos dentro da indústria que, posteriormente, estenderam-se aos setores privado e comercial.

Uma forma de se obter calor e frio é mediante a utilização de estações ou plantas de refrigeração por absorção, que produzem água quente e fria a partir da queima direta de um combustível fóssil (GN, óleo diesel, querosene) ou, inclusive, da utilização dos gases quentes da combustão destes combustíveis.

No Brasil, não existem produtores de refrigeradores por absorção. O presente trabalho faz parte de um outro projeto, mais abrangente, destinado a preencher esta necessidade nacional, elaborando os modelos que caracterizam o comportamento das instalações de refrigeração por absorção.

Enquanto um ciclo de geração de vapor, sem considerar as perdas do sistema de distribuição e do próprio processo onde é utilizado, alcança eficiências da ordem 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%.

Objetivos

Teve-se, por objetivos, analisar termicamente alguns sistemas de cogeração de energia, como por exemplo: cogeração de eletricidade e aquecimento, cogeração de eletricidade e refrigeração, e trigeração. O presente trabalho visa a modelagem termodinâmica de sistemas de cogeração a partir das características de operação dos diferentes componentes, utilizando dados levantados em uma instalação experimental.

Cogeração

A cogeração consiste no processo através do qual se produz, de forma combinada, calor e eletricidade, ou eletricidade e refrigeração, a partir do uso de um combustível convencional (gás natural, óleo combustível, diesel e carvão). Com ela pode-se alcançar um aproveitamento de até 80% de energia contida no combustível. Esta energia pode ser transformada em vapor, eletricidade, força motriz ou frio, sendo ainda possível a produção de gás carbônico (CO₂) a partir da descarga dos gases de combustão. Os sistemas de cogeração tanto de biomassa quanto de gás natural são ambientalmente sustentáveis pois produzem baixos níveis de emissão e, além disso, possibilitam reduzir dos impactos ambientais.

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.

O sistema de cogeração, quando estudado para a produção de eletricidade e potência (calor) é dividido, basicamente, em duas categorias de sistemas: os que utilizam plantas de ciclo “*topping*” e os que utilizam 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.

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 é gerado 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.

Cogeração de eletricidade e aquecimento

Tem-se duas principais formas de produção de cogeração de energia. Dependemos de variáveis para efetuarmos a escolha, como por exemplo: tipo de combustível a ser usado, custo de construção e manutenção da instalação, o tempo de retorno do investimento.

As opções são o ciclo Brayton e o ciclo Rankine. O ciclo Rankine (baseado em turbinas a vapor) é o que tem maior custo de capital e o maior tempo de construção. 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. 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).

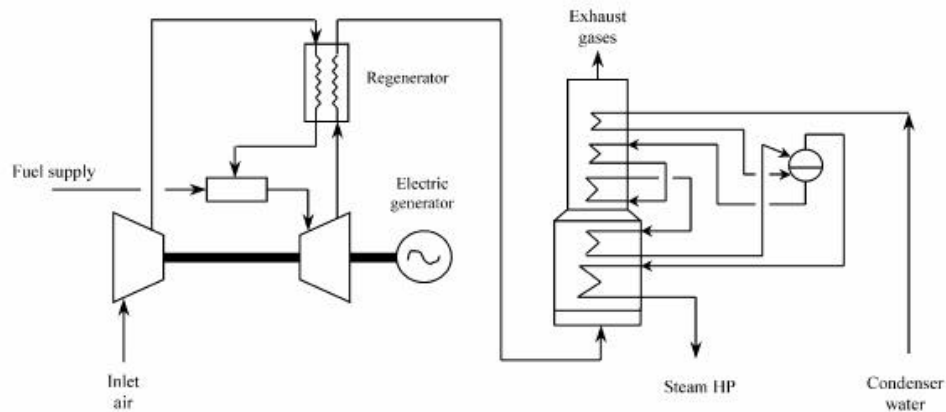


Figura 1 – Esquema de cogeração com ciclo Brayton.

Quando da cogeração de calor e eletricidade, existem duas formas de suprir a demanda de calor da instalação, relacionadas ao ciclo Brayton: com o calor transferido à água no processo de recuperação de calor dos “gases de exaustão” da turbina e 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.

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. No que diz respeito à cogeração em níveis residenciais ou comerciais de pequeno e médio porte, encontram-se motores a combustão interna operando de acordo com os ciclos Otto e Diesel, consumindo gás no primeiro caso e usando combustível Diesel ou uma mistura de Diesel e gás no segundo. 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.

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.

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.

Cogeração de eletricidade e refrigeração

Quando a demanda dos produtos energéticos está determinada pelo consumo de energia elétrica e de refrigeração, 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 o esquema de um motor Diesel com turbo-compressão e interresfriador o qual aciona um gerador elétrico e cujo calor de rejeito é aproveitado para acionar um sistema de refrigeração por absorção.

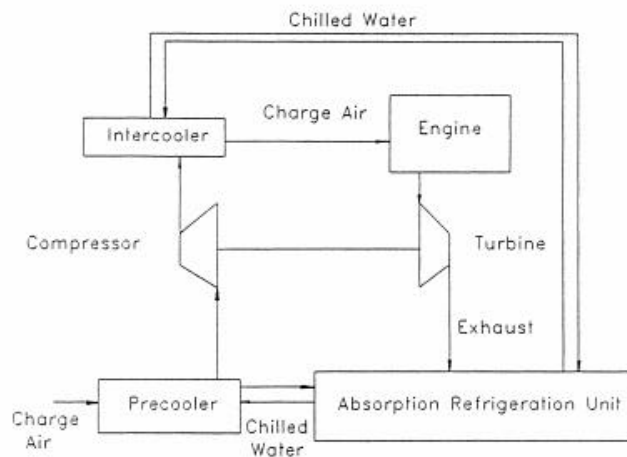


Figura 2 – Esquema de cogeração com ciclo Diesel.

Existem três formas de se obter a cogeração de eletricidade e refrigeração. A primeira é com o acionamento elétrico direto de um “*chiller*”, ou sistema de refrigeração, ou sistema condicionador de ar, por compressão de vapor (VCR), de expansão direta, com a própria energia elétrica produzida pelo sistema. A segunda é pelo acionamento direto do compressor pelo motor a combustão interna (MCI). A outra forma é através da utilização de sistemas de refrigeração por absorção.

Trigeração

Nos últimos anos, vem se dando uma considerável atenção aos sistemas de trigeração, com o objetivo de maximizar sua eficiência energética e diminuir o impacto ambiental. A trigeração 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.

Em um sistema de 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; (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 trigerção é descrita, 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 trigerção.

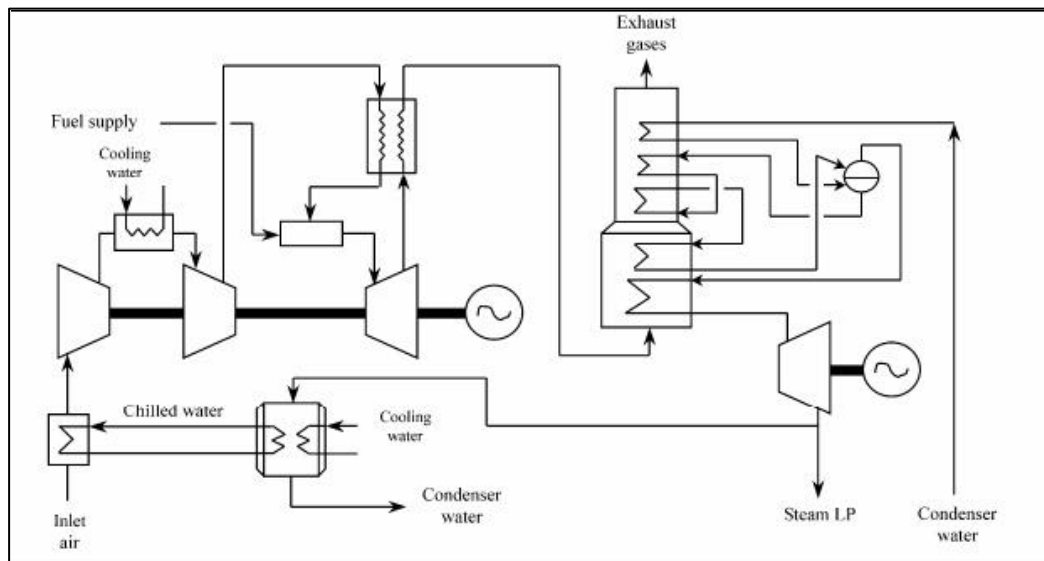


Figura 3 – Planta de trigerção baseada no ciclo Brayton e um “chiller” de absorção.

Outras formas aplicadas à geração conjunta de calor, frio e potência elétrica baseiam-se na instalação de um “chiller” de compressão de vapor, 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, 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 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 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. Uma combinação dos dois ciclos de refrigeração pode também ser empregada.

Análise experimental de um sistema de refrigeração por absorção visando sua utilização em uma planta de cogeração

Um sistema hidráulico, formado por dois circuitos de água, fornece os fluxos necessários a cada um dos componentes do sistema. Duas bombas centrífugas de aplicação hidráulica, de 1 *HP* de potência, fazem a água resfriada circular no evaporador da bomba de calor e a água aquecida no condensador, respectivamente.

Cada circuito consta de um tanque de armazenamento, ou *tanque quente* e *tanque frio*, como pode se observar na figura 4, cuja função é garantir a estabilidade da temperatura da água para as diferentes condições de teste.

Dada a condição de equipamento de teste do sistema em questão, e pela inexistência de uma demanda real dos produtos energéticos do sistema, nas formas de água quente e fria, fez-se convergir os dois circuitos em um trocador de calor (*carga térmica*, na figura 1). Este trocador de calor tem a função de garantir o retorno da água aos respectivos tanques de armazenamento nas condições de temperatura necessárias aos testes.

Em uma primeira etapa, foram testadas várias vazões de água em cada componente, assim como diferentes temperaturas de entrada desta água (temperaturas dos reservatórios). Para cada condição foi calculado o coeficiente de desempenho (Coefficient Of Performance - COP), tanto para o processo de resfriamento quanto para o de aquecimento. O COP é definido como a razão entre o “valor energético” do produto e o “valor energético” consumido pela planta. Em uma segunda etapa, foi adicionada à água resfriada uma quantidade de etileno-glicol (em concentração de 18%), que abaixou o ponto de solidificação da água, permitindo o teste em condições de temperaturas abaixo de 0°C.

Não foi possível realizar testes que considerassem a variação da vazão de GN e, com isso, o “valor energético” consumido, devido ao complexo sistema de automação e controle da planta comercial de refrigeração por absorção. Pela mesma razão não foi possível realizar testes da planta em regime de operação de carga parcial.

Os testes em que foi usada a mistura de água e etileno-glicol se apresentaram como mais satisfatórios, pois permitiram explorar uma faixa de melhor desempenho da bomba de calor por absorção. Ou seja, a menores temperaturas de evaporação obteve-se um melhor desempenho da bomba de calor.

Percebeu-se que, para maiores vazões de água, tanto no evaporador quanto no condensador, o valor do COP avaliado no processo de resfriamento é maior, oscilando entre valores de 0,43 e 0,49.

Já no caso do processo de aquecimento, observa-se que o COP aumenta para menores valores da vazão de água no condensador e a vazão de água no evaporador quase não influencia estes resultados. Os valores do COP de aquecimento variaram entre 0,81 e 0,90.

1. ARS (Robur); 2. Reservatório Frio; 3. Reservatório quente;
4. Trocador de Calor Intermediário; 5 e 6. Bombas de Circulação;
7 e 8. Rotâmetros.

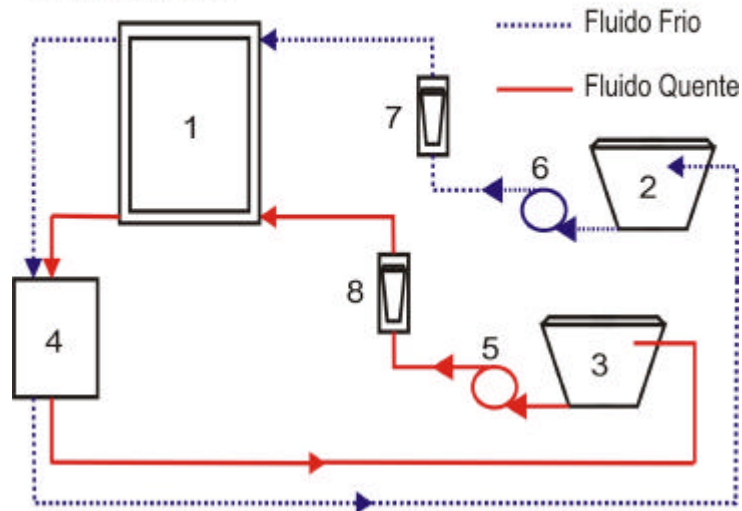


Figura 4 – Esquema simplificado da instalação experimental da bomba de calor por absorção.

A. Instrumentação da instalação experimental de trigeração

Detalham-se, na presente seção, as grandezas medidas no estudo da bomba de calor por absorção. Ressaltam-se, igualmente, as características mais relevantes da instrumentação e do equipamento utilizado para tal.

A vazão do GLP consumido nos testes é medida através de um transdutor de vazão tipo turbina. Este sensor é da série SVT da *Contech*, modelo SVTG ½". Esse instrumento é alimentado por uma fonte de corrente direta de 20 V. A resposta do sensor vem dada na forma de corrente direta (DC), na faixa de 4 a 20 mA, correspondentes a vazões entre 0 e 7,2 m³/hora. As vazões medidas são referentes às condições normais (temperatura de 25°C e pressão de 1 kgf/cm²) e, na calibração do instrumento, se considera um fator de compressibilidade de 0,997. Por esta razão, posteriormente, na redução dos dados, leva-se em consideração o efeito da temperatura sobre a massa específica do GLP para realizar a devida correção.

O funcionamento deste sensor baseia-se numa turbina acoplada diretamente na tubulação por onde escoar o fluido. O rotor da turbina, quando acionado pelo fluido, adquire uma velocidade de rotação proporcional à vazão volumétrica do mesmo. Sensores eletromagnéticos determinam a velocidade de rotação do rotor da turbina. O sensor possui uma linearidade de ± 1% na faixa de trabalho utilizada, uma repetibilidade de ± 0,3% e pode operar a temperaturas entre -20 e 120 °C. Todas as recomendações e exigências do fabricante foram levadas em consideração na hora de se fazer a montagem e instalação deste equipamento.

As temperaturas dos fluidos de trabalho nos diferentes pontos de interesse para a análise do sistema (i.e., à entrada e saída de cada componente), são medidas com termopares *OMEGA* dos tipos K e T. Estimou-se a incerteza na medição das temperaturas em 0,5 °C, seguindo-se a recomendação do fabricante.

No sistema experimental apresentado tem-se como relevante a medição da potência elétrica consumida pela bomba de calor, P_{CP} , que é calculada segundo a equação:

$$P_{CP} = V_{CP} I_{CP} \cos(\mathbf{j})$$

A voltagem, V_{CP} , no compressor é medida manualmente mediante o uso de um multímetro digital, da marca HP, modelo 973A. este instrumento apresenta fundo de escala de 0,1 V. Já a corrente, I_{CP} , é medida com uma pinça amperimétrica (*clamp meter*), da marca *LIGHTEX®*, modelo LT 266 com fundo de escala de 0,1 A.

O termo correspondente ao *Fator de Potência*, $\cos(\mathbf{j})$, foi calculado a partir da expressão acima, medindo-se a potência consumida pelo compressor mediante o uso de um wattímetro digital calibrado, da marca *TIF Instruments Inc.* Modelo *Tif – 2000A*, com precisão de 10 W na escala de 0 – 9 kW e de 100 W na escala de 0 – 100 kW. Determinou-se que existe pouca variação no valor deste termo para diferentes condições de operação da bomba de calor, situando-se o mesmo em, aproximadamente, 0,9.

B. Aquisição de dados

A aquisição dos dados realiza-se por meio de um sistema (DAS) *HP Agilent 34970-A*. Este instrumento é conectado, através de uma porta serial, a um computador pessoal com processador Pentium® 4 e velocidade de processamento de 2,4 GHz.

O DAS consta de três módulos (ou placas) de aquisição, cada um com 22 canais multiplexados. Cada placa possui capacidade para leituras de corrente, voltagem, temperatura (termopares, PTR, etc.) e frequência.

O controle e a leitura dos parâmetros são efetuados através de uma interface gráfica que permite a especificação das características dos sensores utilizados, da taxa de aquisição, dos parâmetros de comunicação PC-DAS e do monitoramento, através de gráficos e tabelas de leitura, dos diferentes parâmetros envolvidos na operação do sistema.

A taxa de aquisição foi fixada, por limitação do sistema, em uma leitura a cada 2 segundos. Foram lidos, armazenados e processados os principais parâmetros de desempenho e operação do sistema testado, o que inclui:

- 10 canais de temperatura (termopares dos tipos K e T);
- 01 canal de pressão (leitura em mV);
- 01 canal de vazão de GLP (leitura em mV).

C. Procedimento experimental

Para a realização dos testes foi necessário seguir uma seqüência de operação assim como uma série de medidas de segurança, as quais são numeradas como segue:

- 1) Antes de se iniciar qualquer teste, tem que se ligar, com antecedência de ao menos 30 minutos, o DAS e os transmissores dos sinais de vazão de GLP, conforme operação indicada pelo fabricante destes sensores;
- 2) Liga-se o exaustor de ar do laboratório;
- 3) Liga-se o computador e ativa-se a interface de comunicação, abrindo-se uma nova seção de aquisição. A taxa de aquisição foi fixada em duas aquisições por segundo;
- 4) Ligam-se as bombas de circulação dos subsistemas hidráulicos e estabelecem-se as vazões de água estipuladas para o teste planejado, em cada um dos componentes;
- 5) Espera-se até a bomba de calor atingir o regime permanente.

Durante a realização dos testes, monitora-se a estabilidade e anotam-se os valores dos seguintes parâmetros:

- a) Vazão de água no evaporador e no condensador da bomba de calor.
- b) Voltagem, corrente e potência consumida pela bomba de calor.

Uma vez fixados os parâmetros e variáveis de controle, o tempo para se atingir o regime permanente varia, dependendo das condições estabelecidas para o teste e das condições de partida. A bomba de calor demora entre duas e três horas para atingir o regime permanente, sendo o parâmetro limitante a temperatura de saída da água quente.

Uma vez atingido o regime permanente, a resposta a variações de parâmetros de operação da bomba de calor (diferentes vazões de água, variação da temperatura de entrada da água quente ou fria, etc.) é razoavelmente rápida, situando-se entre 15 e 30 minutos, dependendo do parâmetro variado, e da magnitude dessa variação.

Pelas características do sistema e para o controle dos inúmeros parâmetros medidos, estabeleceram-se critérios de validação dos testes. Esses critérios são relacionados a seguir:

- 1) Tempo em regime permanente estabelecido como padrão para considerar o teste concluído: 30 minutos.
- 2) Variação permissível das temperaturas: $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 3) Variação permissível da pressão: $0,2\text{ } \textit{psig}$ ($29\text{ } \textit{Pa}$).
- 4) A vazão de água nos diferentes componentes do sistema é continuamente monitorada para se manter nos valores estabelecidos para o teste, repercutindo sua variação nas temperaturas medidas (i.e., garantindo a estabilidade das temperaturas e pressões, garante-se, indiretamente, a estabilidade das diferentes vazões de água).
- 5) A variação da voltagem repercute diretamente nas pressões de evaporação e condensação da bomba de calor. Uma vez que as temperaturas e pressões do refrigerante têm se estabilizado, em função das condições de vazão e temperatura da água no evaporador e no condensador, qualquer variação na voltagem do gerador é imediatamente percebida pelo compressor e, conseqüentemente, pela bomba de calor.
- 6) Parâmetros que oscilaram durante os testes e o valor das suas oscilações, em média, foram: a) a temperatura de saída da água do evaporador da bomba de calor ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$); b) a temperatura de saída da água do motor ($\pm 1,0^{\circ}\text{C}$); c) a temperatura de saída da água do economizador ($\pm 2,0^{\circ}\text{C}$); d) a temperatura de saída dos gases de exaustão do motor ($\pm 5,0^{\circ}\text{C}$, chegando a $\pm 10,0^{\circ}\text{C}$); e e) a temperatura dos gases de exaustão à saída do economizador ($\pm 5,0^{\circ}\text{C}$). Estes parâmetros foram considerados estáveis, quando sua média não variou mais do que $\pm 5\%$ do valor da oscilação, no tempo do teste.

D. Planificação e objetivo dos testes

No trabalho que se apresenta, foi planejada uma série de testes para definir os limites de operabilidade da instalação. Os parâmetros e condições de operação permitiram realizar a análise de desempenho de cada um dos componentes.

Estudou-se, experimentalmente, a influência sobre a eficiência da instalação, de parâmetros como a potência elétrica gerada, a vazão de *GNV*, a vazão de água no evaporador e condensador da bomba de calor, a vazão de água no sistema de recuperação de calor e o consumo de ar do motor.

1. Testes para caracterização da bomba de calor.

Realizaram-se duas séries de testes mudando o grau de subresfriamento do refrigerante à saída do condensador da bomba de calor. Para cada caso variaram-se as vazões de água no evaporador e no condensador da bomba de calor, obtendo-se, com isso, a variação da temperatura de evaporação e condensação. Os resultados dos testes e da redução dos dados referentes à bomba de calor apresentam-se, então, em função da temperatura de evaporação, da temperatura de condensação e do grau de sub-resfriamento na saída do condensador.

2. Testes para análise do sistema de trigerção com o motor operando com Diesel puro.

Fez-se variar a potência gerada pelo sistema para determinar a eficiência para diferentes condições de carga do motor.

Verificou-se, também, a vazão de água no sistema de recuperação de calor e no evaporador, para otimização experimental do sistema de trigerção em função destes parâmetros. Escolheram-se quatro valores de vazão de água nos respectivos sistemas hidráulicos com o intuito de se encontrar valores destes parâmetros que otimizaram o desempenho do sistema (i.e., valores para os quais se possa estabelecer um máximo de eficiência do sistema, à luz da 1ª e 2ª leis da termodinâmica).

3. Testes para análise do sistema de trigerção com o motor operando com Diesel e gás natural:

- a. Substituição em diferentes regimes de potência variando a vazão de *GNV*. Fixaram-se vários valores de potência e, para cada um desses valores, variou-se, a intervalos regulares, a vazão de *GNV*. A intenção desses testes é a de demonstrar a viabilidade técnica e econômica da substituição do óleo Diesel pelo uso do *GNV*.
- b. Substituição em diferentes regimes de potência variando a vazão de ar, a partir da regulação da válvula borboleta. Testes foram realizados com a válvula borboleta totalmente e parcialmente aberta.

4. Testes para a caracterização do sistema de cogeração.

Simulação do desempenho do sistema neste modo de operação, com os dados experimentais obtidos da trigerção, para se determinar os limites de aplicabilidade e da conveniência do uso da cogeração, antes da trigerção

Conclusões

Observaram-se, no desenvolver do presente trabalho, várias maneiras de se otimizar os recursos energéticos na produção de eletricidade, calor e frio. A cogeração é um conceito que deve ser adotado sempre que exista a demanda combinada de alguns dos produtos energéticos anteriormente referidos (frio, calor e energia elétrica). Para isto é necessário desenvolver critérios que permitam escolher a melhor forma de utilizá-la. Outro fator importante é o conhecimento das tecnologias referentes a cada sistema, o que permite, em última hipótese, a melhor adaptação destes sistemas a cada situação ou necessidade. Vimos, também, como o gás natural (*GN*) e sua utilização em sistemas de cogeração e trigerção têm aparecido no cenário mundial do comércio de energia como alternativas econômicas e com potencial de poluição muito menor do que os portadores energéticos e técnicas mais

tradicionais, permitindo, assim, a economia de recursos e a redução dos impactos da indústria e a sociedade em geral sobre o meio ambiente.

Bibliografia Consultada

1 - Benito, Y.R., Modelagem da Produção Simultânea de Frio, Calor e Energia Elétrica, Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2007.

2- Pruzaesky, F.C., Análise de um Sistema de Produção Simultânea de Eletricidade, Frio e Calor, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2005.