

## **Sistemas de Produção Simultânea de Calor, Frio e Eletricidade**

**Alunos: Igor Magalhães de Oliveira Velho  
Felipe de Souza Camara Mello**

**Orientadores: José Alberto dos Reis Parise  
Mario Fernando Fariñas Pino**

### **Introdução**

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. Estabeleceram-se, assim, combinações de sistemas que conseguiriam produzir energia elétrica, frio e calor de maneira simultânea (trigeração), o que vem sendo uma extensão dos sistemas que produziam energia elétrica e calor, conhecidos como sistemas de cogeração (Pruzaesky, et al., 2005).

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, de maneira simultânea, é mediante a utilização de estações ou plantas de refrigeração por absorção (Absorption Refrigeration Systems), que produzem água quente e fria a partir da queima direta de um combustível fóssil (Biodiesel, GN, óleo diesel, querosene) ou, inclusive, da utilização dos gases quentes da combustão destes combustíveis.

No Brasil, não existem produtores de refrigeradores por absorção. Este 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.

### **Objetivos**

Teve-se por objetivo geral o desenvolvimento de sistema piloto de trigerção para o estudo da viabilidade técnica da operação de sistemas integrados moto-gerador/bomba de calor (Robur, GAHP – W - LB) para a produção simultânea de energia elétrica, calor e frio a partir da queima de combustível. Tem-se, por objetivo específico, o desenvolvimento de um sistema de trigerção com bombas de calor, por ciclo de absorção e moto-gerador operando com combustível.

### **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 e frio, sendo ainda possível a produção de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) 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.

Os sistemas de cogeração quando estudadas para a produção de eletricidade e potência (calor) é dividida, basicamente, em dois sistemas: sistemas que utilizam plantas de ciclo “*topping*” e sistemas 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 do 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.

### **Cogeração de eletricidade e aquecimento**

Temos 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).

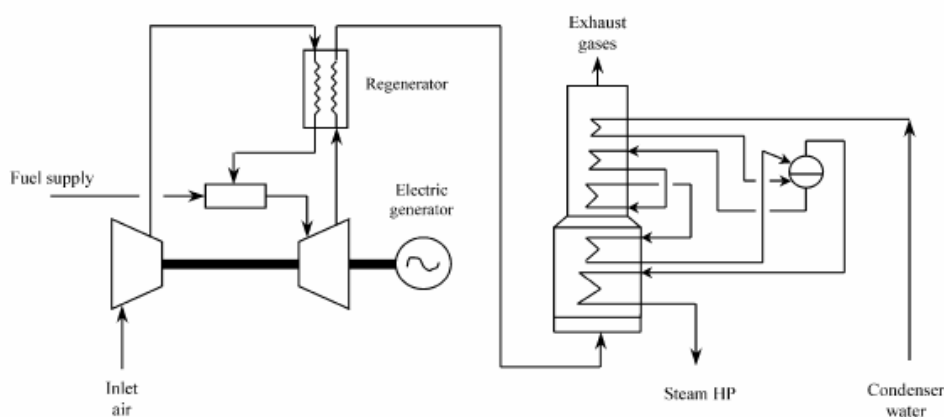


Figura 1 – Esquema de cogeração com ciclo Brayton.

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. 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 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.

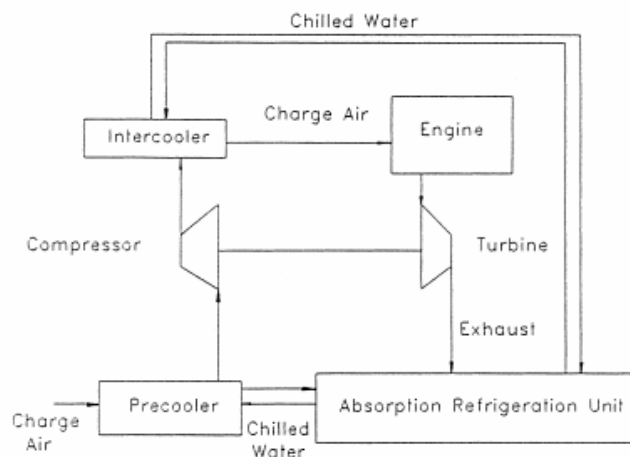


Figura 2 – Esquema de cogeração com ciclo Diesel.

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 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 MCI. A outra forma é através da utilização de sistemas de refrigeração por absorção – ARS. Esta última é uma forma de converter demanda de frio em demanda de calor, quando se requer produção de eletricidade, calor e frio – Trigeração

### **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 caso de estudo, o sistema de trigeração utilizará dois combustíveis, já que o calor dos gases gerados pela combustão do MCI não é suficiente para o bom funcionamento do sistema de absorção. Para corrigir este problema, os gases de escape são usados para aquecer o ar que será mesclado com gás natural e introduzido na câmara de combustão do sistema de refrigeração por absorção. Assim se consumirá somente o gás necessário para obter o calor requerido para este sistema, logo dessa maneira obtemos um funcionamento eficiente do sistema.

Em um sistema de trigeração, (a) a potência elétrica é produzida por um motor térmico convencional (em caso de estudo utilizará um MCI), 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 CO<sub>2</sub>. 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 trigeração, 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 trigeração 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 trigeração.

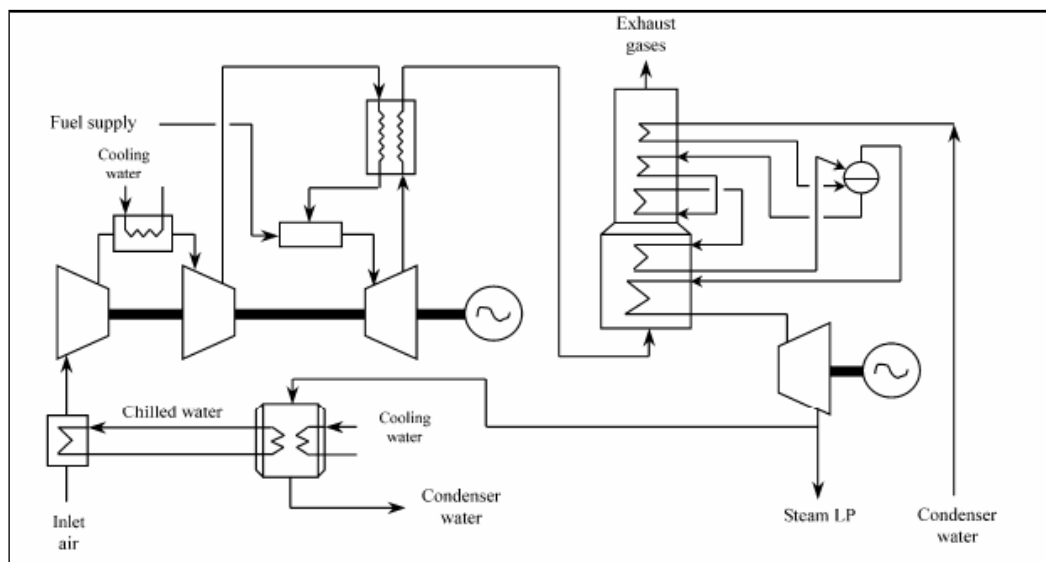


Figura 3 – Planta de trigeração baseada no ciclo Brayton e um “*chiller*” de absorção.

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 Trigeração 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.

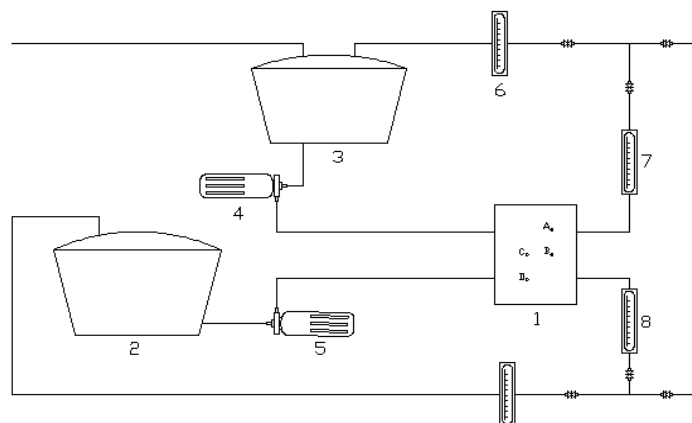
Para suprir tais perfis diferentes de demanda, sistemas de refrigeração por absorção ou sistemas de refrigeração por compressão de vapor podem ser empregados. No caso da refrigeração por compressão de vapor, o compressor pode ser acionado eletricamente ou por um motor de combustão interna, em cujo caso, 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.

### Caracterização dos subsistemas que compõem o sistema de trigeração.

O sistema está instalado com um MCI de marca Tramontini®, um gerador elétrico acoplado no motor por correias e polias, um sistema de refrigeração por absorção, marca Robur, um intercambiador de calor gás-gás, duas bombas de água, dois recipientes para armazenar água quente e água fria, um painel de controle que simula carga elétrica e a instrumentação necessária. Os combustíveis utilizados são o diesel e o gás natural.

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.



1. ARS (Robur); 2. Reservatório Frio; 3. Reservatório Quente; 4 e 5. Bombas de Circulação; 6,7,8, e 9. Rotâmetros



Figura 4 - Sistema simplificado da bomba de calor por absorção



Figura 5 – Esquema de instalação de trigeção.

Para a montagem da instalação foram utilizados materiais existentes e outros foram comprados (intercambiador de calor, bateria do motor, aquecedor de água e gás). Foi necessário construir uma base para o recipiente de água quente com vigas.

#### **Subsistema do MCI - gerador elétrico.**

Dentre suas qualidades, pode-se destacar a construção compacta e simples e pouca complexidade de manutenção, e possui uma operação segura.

Este motor tem uma potência nominal entre 9,9 e 11,2 kW, velocidade angular entre 1800 e 2000 rpm. Possui um cilindro de 100 mm de diâmetro um espaçamento de 115 mm e uma cilindrada de 903 cm<sup>3</sup>. A injeção de diesel é forçada. Em cima da carcaça tem um recipiente que acumula água fria, esta circula trocando calor por convecção.

O sistema de arranque é elétrico mediante uma bateria de 12 V, 70 Ah (840 W), conectada a um carregador, para garantir sua vitalidade.

O gerador elétrico de marca Kohlbach®, modelo GR-GCR, do tipo Compound, monofásico, 110-220 V, 60 Hz, tem uma potência nominal de 7,5 kVA (6 kW), a voltagem é controlada em função da velocidade de rotação do rotor.

A transmissão do motor com o gerador utiliza 3 correias trapezoidais de marca Rexon®, modelo B-65. A tensão das correias é mantida e controlada de acordo com as instruções do

fabricante (espaçamento equivalente a altura da correia, com uma força de 4kgf/HP de potência transmitida, aplicada normalmente a correia no centro geométrico da transmissão).

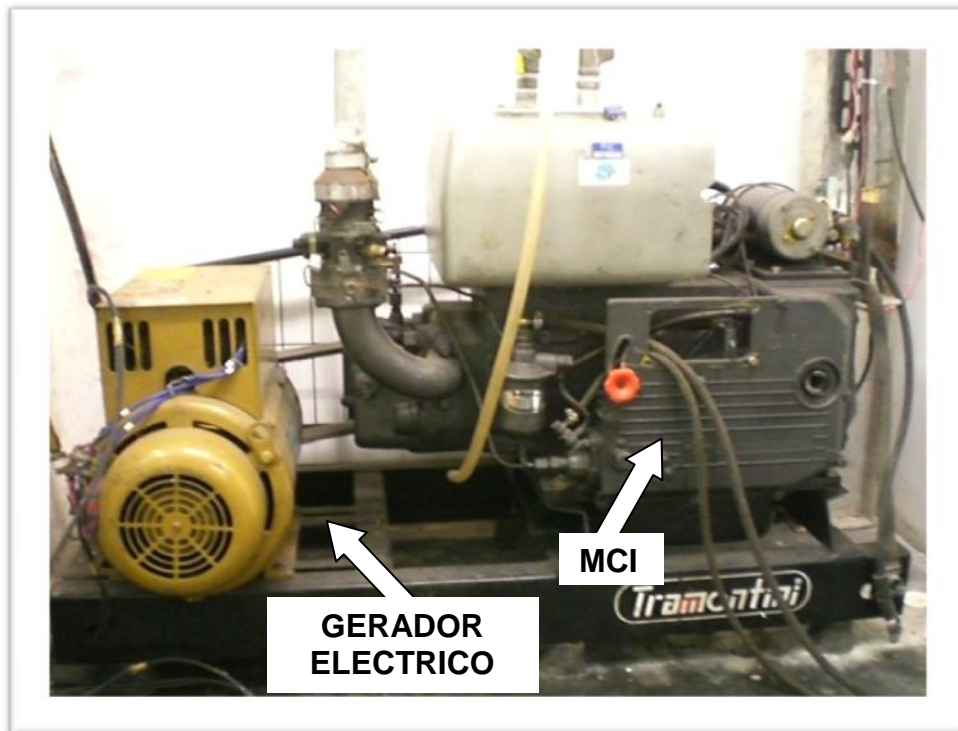


Figura 6. Subsistema do motor de combustão interna – gerador elétrico.

Para a medição do fluxo de combustível se utiliza dois fluxômetros, que baseia no princípio do funcionamento do efeito de coriolis, como a bomba fornece mais combustível que admite o motor, tem um T na saída do primeiro fluxômetro para fornecer combustível excedente que vai para a entrada do segundo fluxômetro, mesclando com o retorno do motor. A diferença da medição do primeiro instrumento com o segundo, sem tem como resultado o consumo de combustível do MCI.



Figura 7. Sistema para medição de fluxo de combustível consumido pelo MCI.

Foi necessário utilizar este sistema de medição instantânea, pois o medidor de consumo de combustível é pouco preciso para esse estudo, onde se pretende determinar quando e como o sistema de trigeração é mais eficiente.

### Subsistema de refrigeração por absorção.

O sistema de refrigeração por absorção amônia-água, é composto por um gerador, um retificador, um regenerador absorvedor, um condensador, um intercambiador de calor entre o refrigerante que sai do condensador e do evaporador e uma bomba da solução, todos estes elementos se relacionam entre si, a fim de produzir água fria e quente, como pode se observar na figura abaixo.

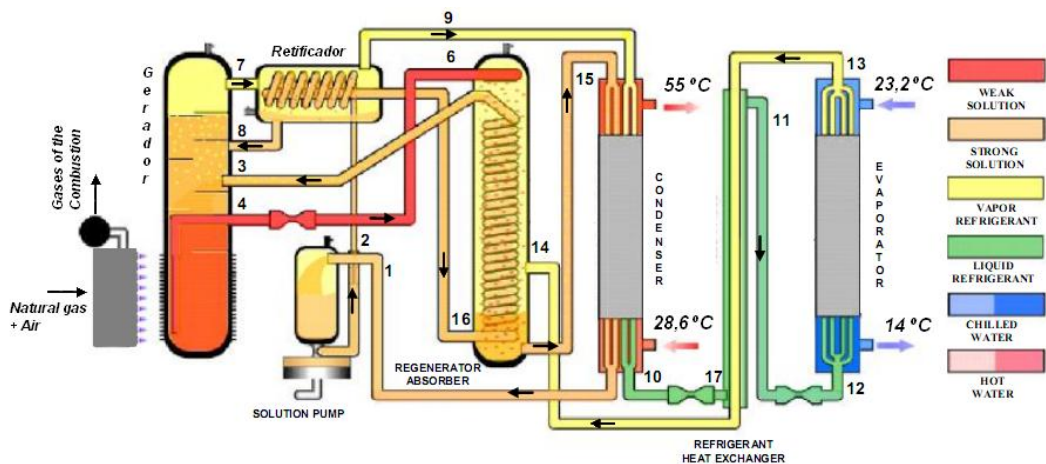


Figura 8. Sistema de refrigeração por absorção amoníaco-água. Marca Robur.

O refrigerante que se utiliza é o par amônia-água, onde a amônia trabalha como refrigerante e a água como absorvente, com o objetivo de obter água fria e água quente para uma instalação determinada.

O sistema em estudo não alimenta nenhuma dessas variantes já que é um sistema de escala de laboratório, onde se simula as necessidades de frio mediante a conexão de resistências elétricas e as necessidades de calor se simula repondo água fria (temperatura ambiente) no sistema.

### **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.

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. Estima-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:

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

A voltagem,  $V_{CP}$ , no sistema de refrigeração por absorção 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*,  $\cos(\varphi)$ , será 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.

## **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<sup>®</sup> 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 será fixada, por limitação do sistema, em uma leitura a cada 2 segundos. São 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 será 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 será 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, estabelece-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:  $0,2\text{ psi}$  ( $29\text{ Pa}$ ).
- 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 devem oscilar durante os testes e o valor das suas oscilações, em média, são: 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) a temperatura dos gases de exaustão à saída do economizador ( $\pm 5,0^{\circ}\text{C}$ ). Estes parâmetros serão considerados estáveis, quando sua média não variar mais do que 5% do valor da oscilação, no tempo do teste.

#### **D. Planificação e objetivo dos testes**

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

Estudaremos, experimentalmente, a influência sobre a eficiência da instalação, de parâmetros como a potência elétrica gerada, a vazão de *Biodiesel*, 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.

Realizaremos duas séries de testes mudando o grau de subresfriamento do refrigerante à saída do condensador da bomba de calor. Para cada caso variaremos 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 subresfriamento na saída do condensador.

##### 2. Testes para análise do sistema de trigeriação com o motor operando com Biodiesel puro.

Variaremos a potência gerada pelo sistema para determinar a eficiência para diferentes condições de carga do motor.

Verificaremos, também, a vazão de água no sistema de recuperação de calor e no evaporador, para otimização experimental do sistema de trigeriação em função destes

parâmetros. Escolheremos quatro valores de vazão de água nos respectivos sistemas hidráulicos com o intuito de se encontrar valores destes parâmetros que otimizam 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).

### **Análise Experimental de Bombas de Calor Operando entre Dois Reservatórios Térmicos**

Estamos dando continuidade à montagem e ao ensaio da bancada experimental. Porém, a literatura sobre nano fluidos tem mostrado as vantagens e desvantagens de seu uso como fluidos secundários e como utilizá-los em bombas de calor ou, no presente caso, em sistema de refrigeração água-água.

Os objetivos da utilização de nano fluidos em processos de transferência de calor são uma potencial diminuição do impacto ambiental devido à suposta maior eficiência energética dos sistemas. Ainda não existe consenso definitivo quanto aos resultados das experiências e estudos realizados, mas, há, por outro lado, uma grande lacuna de informação e conhecimento e quanto às aplicações que podem usufruir do desenvolvimento desta nova tecnologia.

A aplicação deste tipo de tecnologia nas áreas de processos poderia vir a se refletir em [5]:

1) Maior eficiência energética dos sistemas;

2) Na diminuição da área necessária de transferência de calor e, conseqüentemente do porte total do equipamento, o que resulta na diminuição da vazão volumétrica dos fluidos de trabalho e de seu correspondente impacto ambiental.

Apesar da maior eficiência energética com a utilização de nanofluidos, podem existir desvantagens pois, os nanofluidos em geral, são formados por nano- partículas de um determinado metal previamente tratadas com uma substância que atende à função de dispersante, num fluido base. Isto significa que, apesar da melhor condutividade térmica, se comparado ao fluido base equivalente, o nanofluido pode apresentar problemas de estabilidade, é ,mais viscoso.

Além das desvantagens acima descritas, a falta de um profundo entendimento teórico dos mecanismos de transporte e calor e de momentum em nanofluidos é um fato que constitui impedimento tecnológico. Entretanto, esta situação somente será resolvida dando-se continuidade aos estudos.

### **Conclusões**

Vimos, 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. 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 biodiesel, e sua utilização em sistemas de cogeração e trigeração, tem surgido 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. Permite, assim, a economia de recursos e a redução dos impactos da indústria e a sociedade em geral sobre o meio ambiente.



Para o uso de nanofluidos como fluido secundário, em bombas de calor operando entre dois reservatórios térmicos, pode-se afirmar que, segundo material estudado [6], as vantagens no uso de nanofluidos superam as desvantagens. Os resultados aqui levantados contribuirão incrementalmente para um melhor entendimento de nanofluidos.

### **Informações adicionais**

Foi realizado, no mês de julho, um treinamento para habilitação no uso do EES(Engineering Equation Solver), programa computacional que usaremos no processo experimental. Junto ao treinamento, também, participamos do levantamento de informações para um projeto direcionado a FAPERJ [7].

### **Referências**

- 1 - Benito, Y.R., Modelagem da Produção Simultânea de Frio, Calor e Energia Elétrica, Dissertação de Mestrado, 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.
- 3- Vargas, J.V.C., Núcleo de pesquisa e desenvolvimento de energia auto-sustentável a partir do biodiesel de microalgas e outras fontes, Departamento de Engenharia Mecânica, UFPR, 2009.
- 4- Torres, Felipe Carneiro da Cunha, Estudo da utilização do biodiesel para geração de energia elétrica no Brasil, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2006.
- 5- Pruzaesky, F. C. ; Parise, J. A. R. . Estudo Preliminar sobre a Aplicação de Nanofluidos em Processos de Transferência de Calor. In: CITARE - Ibero-American Conference on Technology Innovation and Strategic Areas, 2007, Rio de Janeiro. Nanotechnology: The New Dimension of the Oil Industry, 2007.
- 6- Cheng L., Bandarra Filho, E.P., Thome, J.R., Nanofluid Two-Phase Flow and Thermal Physics: A New Research Frontier of Nanotechnology and Its Challenges, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol.8, p. 1–18, 2008.
- 7- Segue em anexo.