

# DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA TRIGERADOR COM PRODUÇÃO SIMULTÂNEA DE CALOR, ELETRICIDADE E FRIO

## J. C. Berndsen

Programa de Pós-Graduação em Engenharia, PIPE, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
jcb@redel.com.br

## J. V. C. Vargas

Programa de Pós-Graduação em Engenharia, PIPE, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
jvargas@demec.ufpr.br

## E. Dilay

Programa de Pós-Graduação em Engenharia, PIPE, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
jvargas@demec.ufpr.br

## F. G. Dias

Programa de Pós-Graduação em Engenharia, PIPE, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
gallego@ufpr.br

## J. C. Ordonez

Department of Mechanical Engineering and Center for Advanced Power Systems, Florida State University, Tallahassee, Florida, 32310, USA  
ordonez@caps.fsu.edu

## J. A. R. Parise

Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, RJ 22453-900, Brazil  
parise@mec.puc-rio.br

## M. C. Campos

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
mccampos@demec.ufpr.br

## V. D. Maciel

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
v.d.maciell@ufpr.br

## L. R. C. G. Oçoski

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
leoracaoski@ufpr.br

**Resumo.** Este estudo investiga experimentalmente a possibilidade de utilização de sistemas de trigeração para conservação de energia, e sua prática relevante no incremento da eficiência em processos industriais. Máquinas Térmicas, para produzir trabalho, necessariamente não usam todo o fornecimento de energia na forma de calor, por consequência da segunda lei da termodinâmica. Os sistemas em sua maioria não utilizam toda a energia disponível e a rejeitam na forma de calor. Este tipo de calor rejeitado é abundante em plataformas e em refinarias de petróleo. O sistema de trigeração desenvolvido neste trabalho utiliza gases quentes de exaustão para a produção de vapor de água utilizando trocadores de calor para o aquecimento, sendo que para produção de frio utiliza um sistema de refrigeração por absorção. O trabalho consistiu no desenho e construção do protótipo em laboratório, sua caracterização operacional e instrumentação.

**Palavras chave:** Refrigeração por absorção, trocador de calor, cogeração

## 1. Introdução

Cada vez mais a sociedade moderna está dependente deste bem tão importante que é a energia. A satisfação da maior parte das necessidades energéticas é feita às custas do combustível fóssil, como o petróleo, carvão e gás natural. No entanto, as reservas mundiais de combustível fóssil devem se esgotar nos próximos 50 a 100 anos. Embora utilizadas, essas fontes não renováveis vem trazendo consequências negativas para o meio ambiente. Diante de um enfoque geral de conservação de energia, que incorpora a idéia de alteração do estilo de desenvolvimento energético, a trigeração e as técnicas de gestão podem ser situadas em diferentes níveis de intervenção como práticas coadjuvantes e

salutares neste processo (Balestieri, 2002). Surge então, um novo conceito designado por desenvolvimento sustentável. O desenvolvimento sustentado consiste na utilização racional da energia e na satisfação das necessidades energéticas. Em se tratando de energia e utilidades industriais ou comerciais, de maneira geral, observa-se no mercado um grande desperdício das várias formas de energia, principalmente a energia térmica.

A necessidade hoje de se consumir energia de uma forma racional se faz presente ao nível mundial, considerado motivo principal para o desenvolvimento de estudos nesta área tais como o de Maidment e Tozer (2002), que analisam em seu estudo, plantas de trigerção operando em supermercados, avaliando os diferentes sistemas de trigerção, incluindo diferentes tipos de refrigeração e tecnologia de motores.

Bassols et al. (2002) apresentam diferentes exemplos de trigerção na indústria de alimentos, utilizando máquinas por absorção, comparando ainda o ciclo por absorção de amônia com o ciclo de compressão. Colonna e Gabrielli (2003) descrevem a aplicação de sistemas de refrigeração por absorção com amônia (AAR – “ammonia water absorption refrigeration”), fazendo referência a sistemas de absorção com brometo de lítio também. Na comparação, são utilizados dois processos de geração de gases quentes, o primeiro de uma turbina a gás e outro de um do motor de combustão interna (MCI). Magloire et al. (2002) mencionam em seu trabalho a variação do coeficiente de desempenho (COP), i.e., o coeficiente de desempenho em uma unidade de refrigeração LiBr/H<sub>2</sub>O, e desenvolvem a análise energética e exergética de um chiller com simples efeito (90 °C/70 °C) e de um com duplo efeito usando vapor a 120 °C/2 bar.

Minciuc et al. (2003) estudaram um sistema de trigerção com possibilidade de utilizar em conjunto uma máquina de compressão, consumido energia elétrica que complementa a produção de frio. As fontes quentes do sistemas são produzidas por uma turbina a gás ou por motor de combustão interna (MCI). Parise et al. (1985) estudaram a produção simultânea de calor e frio em motor diesel, tendo como resultado a produção de 5 kW de frio, somando-se a contribuição do condensador, arrefecimento e exaustão, 9,9 kW de calor, muito embora somente 7,5 kW de combustível foram consumidos. Smith e Few (2001) em uma planta experimental, transformaram um motor de combustão interna (MCI), convertendo o mesmo para utilização com gás natural e acionamento de uma bomba de calor doméstica.

È neste contexto, que este trabalho se propôs a construir e caracterizar um protótipo sistema de trigerção para geração simultânea de eletricidade, calor e frio. Para atingir o objetivo estabelecido, adotou-se uma metodologia experimental. O trabalho consistiu primeiramente do projeto de um sistema de trigerção (frio, calor e energia elétrica) e a seguir, os componentes foram adquiridos comercialmente no mercado ou construídos em laboratório. A unidade experimental foi então montada e colocada em operação. Uma etapa seguinte consistiu na instrumentação e instalação de um sistema de aquisição de dados computacional (SAD), utilizado para a medição de temperaturas em tempo real. Os dados coletados serviram de base para cálculo da eficiência do sistema.

## **2. Desenvolvimento do protótipo**

O protótipo experimental foi concebido para ser uma unidade autônoma, auto suficiente e com possibilidade de movimentação (montagem sobre rodas). Cada um de seus componentes foi estudado para atender as características necessárias ao experimento. Este foi o caso de uma válvula pneumática de três vias, tendo como parâmetros construtivos a alta temperatura dos gases de exaustão. O suprimento do ar comprimido para acionamento da válvula três vias é realizado através de um compressor de ar e um reservatório que atuam acoplados ao motor somente a partir do ponto em que a pressão manométrica de ar atinja níveis inferior à 0,5 bar. Outro componente específico foi o sistema de controle de aceleração, originalmente desenvolvido com a aplicação de um cilindro pneumático, sendo posteriormente substituído por um servo-motor para melhorar a precisão da aceleração e possíveis variações de rotação do gerador elétrico. Para melhor apresentar a caracterização do sistema e detalhes definem-se abaixo três unidades básicas, que são representadas na Fig. 1, e descritas nos itens a seguir.

### **2.1. Unidade Motriz e Geração elétrica (UGPE)**

Na concepção do protótipo, foi utilizado um motor de combustão interna (MCI) automobilístico com 1800 cc, originalmente utilizando gasolina como combustível. O motor foi convertido para um sistema bi-combustível, utilizando também gás natural veicular (GNV). Assumindo no experimento papel de destaque, o motor de combustão produz em seus cilindros a queima do combustível, propiciando desta forma a transformação do combustível em energia térmica (calor) e energia mecânica (potência de eixo). No eixo foi acoplado um gerador elétrico (30 kW) ligado a um quadro elétrico. Responsável pelo gerenciamento da energia elétrica, o quadro é composto de proteções através de disjuntores, fusíveis, chaves contactoras, e botoeiras. Nos motores de ciclo de quatro tempos, ocorrem primeiramente a admissão da mistura combustível (primeiro tempo), compressão da mistura (segundo tempo), combustão, expansão dos produtos de combustão e escape (terceiro tempo) e finalmente a expulsão dos produtos da combustão (quarto tempo). Os gases quentes de combustão e a água de arrefecimento do motor são fontes de energia térmica que são utilizadas no sistema de trigerção para aquecimento de água (calor) e para o sistema de refrigeração por absorção (frio) simultaneamente com a produção de energia elétrica.

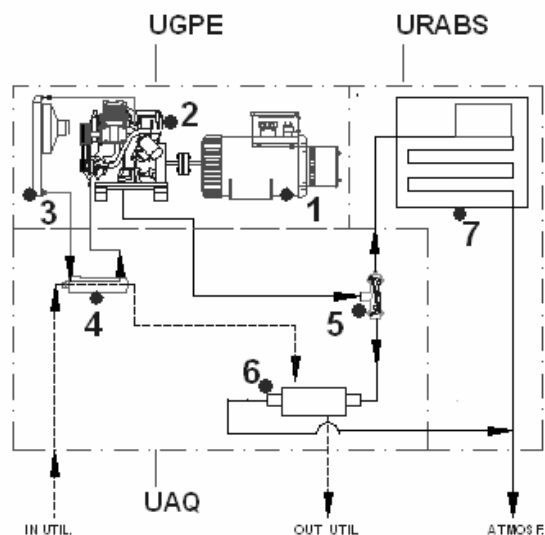


Figura 1. Caracterização do sistema de trigeração: Gerador (1), Motor de combustão (2), Radiador (3), Trocador de calor primário (4), Válvula de três vias (5), Trocador de calor secundário (6), Refrigerador por absorção (7).

## 2.2. Unidade de aquecimento (UAQ)

No sistema de aquecimento, a aplicação dos princípios da transferência de calor no experimento desempenha função de extrema importância para o aproveitamento da energia térmica. Neste estudo, foram considerados somente os trocadores de calor para os quais a transferência de calor se dá predominantemente por condução e convecção. Isto não quer dizer que a radiação não seja importante, mas será desconsiderada no presente trabalho. A aplicação de um trocador de calor primário, denominado  $TC_1$ , do tipo casco e tubo, tem como finalidade o aproveitamento da energia térmica da água que circula no sistema de arrefecimento do motor, propiciando com isso um pré-aquecimento da água de alimentação. A água de alimentação, aquecida em  $TC_1$ , é conduzida através de tubulação específica para o trocador de calor secundário  $TC_2$ , para gases quentes/água, instalado no fluxo dos gases de exaustão, propiciando um incremento na sua temperatura inicial através de troca térmica. O trocador de calor secundário foi concebido a partir de um elemento silenciador comum, do qual foram retirados os elementos internos. No interior foi colocada uma serpentina de aço em duas camadas, para permitir o fluxo da água em contra-corrente com os gases.

## 2.3. Unidade de refrigeração por absorção (URABS)

O sistema de absorção utiliza uma unidade Electrolux, modelo EA3380, alterada, equipada com um elemento onde se dá a troca térmica, o gerador (trocador de calor regenerativo). O trocador de calor (gerador) foi concebido, dimensionado e construído em laboratório. Trata-se de um trocador de calor de duas correntes paralelas de fluido sem mistura.

Dado o pequeno espaço disponível para a instalação do novo componente no equipamento existente, um bloco cilíndrico com várias voltas de tela de aço inoxidável foi inserido no espaço a ser percorrido pela corrente de gases quentes (entre o casco e o tubo). Isto teve a finalidade de aumentar a efetividade da troca de calor entre a corrente de gases quentes e a corrente de fluido refrigerante que escoava no interior do tubo interno do equipamento (Pallú e Vargas, 2003).

## 3. Experimento

### 3.1. Sistema de aquisição de dados

Após a montagem completa do sistema trigerador apresentado na Fig. 1, o mesmo foi instrumentado para ser realizada a coleta de dados e determinar os parâmetros de funcionamento do sistema experimental com aquisição de dados de voltagem, corrente, rotação, vazão e temperaturas em tempo real. Essas tarefas foram realizadas com a utilização de um sistema de aquisição de dados computacional (SAD) que consistiu de um microcomputador PC Pentium III, uma placa multímetro digital, NI PCI-4060, uma placa de saída analógica NI PCI-6703 para controle, com 16 canais, e uma placa multiplexadora SCXI-1127 com 32 canais, e um aplicativo computacional LABVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench), todos fabricados pela empresa National Instruments, EUA. O aplicativo LABVIEW registrou as temperaturas lidas, forneceu gráficos das temperaturas, rotações do eixo, velocidades

de ar e de gases, sinal de abertura e fechamento da válvula três vias de direcionamento de gases, potência elétrica gerada, voltagem das fases, e frequência.

### 3.2. Sensores de temperatura

Os sensores térmicos utilizados nesse estudo foram dos tipos termopares e termistores. Os termopares são formados pela junção de elementos metálicos distintos que devido a suas características eletrônicas geram uma diferença de potencial, esta diferença de potencial depende da temperatura. Os termopares utilizados para monitorar as altas temperaturas dos gases de exaustão são do tipo K, tendo como liga Chromel/Alumel, e suas características fundamentais são de  $0,040 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ , para a obtenção do valor de temperatura em função da voltagem medida, com um limite de precisão nominal de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Para as temperaturas mais baixas a opção foi por termistores. Os termistores usados neste trabalho são compostos de manganês, níquel e óxido de cobalto, misturados em proporções iguais, obtendo a forma de uma pequena esfera de 2.4 mm de diâmetro, modelo YSI 44004 (resistência de  $2250 \Omega$  para  $25^\circ\text{C}$ ), EUA. Os termistores foram calibrados no laboratório para determinar o limite de precisão intrínseco do sensor. Os termistores foram imersos em um banho de temperatura constante mantido por um circulador de banho, e um total de 64 medidas da temperatura foram feitas para 20, 30, ...,  $80^\circ\text{C}$ . O desvio padrão maior destas medidas foi  $0,0005^\circ\text{C}$ , e conseqüentemente o limite de precisão intrínseco do sensor foi ajustado para  $\pm 0,001^\circ\text{C}$  em todos os termistores; este limite de precisão intrínseco do sensor está em concordância com o  $\pm 0,0003^\circ\text{C}$  dos mesmos termistores utilizados em uma experiência em convecção natural de Howle et al. (1992) e com o  $\pm 0,0005^\circ\text{C}$  limite de precisão intrínseco do sensor, listado em um manual de instrumentação (Dally et al., 1993).

### 3.3. Sensor de rotações por minuto

O sensor utilizado é do tipo ótico, empregando fotodiodos e uma fonte luminosa, a fonte de luz e o sensor ficam em lados opostos. Na passagem pelo furo, o feixe de luz atinge o sensor gerando um pulso, sendo que a frequência desses pulsos é igual a velocidade em ciclos por segundo (CPS), convertendo através do aplicativo LABVIEW esses dados em rotações por minuto (RPM).

### 3.4. Desempenho do sistema

O coeficiente de desempenho, COP, da URABS pode ser calculado isoladamente em laboratório. Para tanto, é necessário quantificar a taxa de transferência de calor retirado da câmara fria,  $\dot{Q}_L$ , e a taxa de transferência de calor fornecido pelos gases quentes,  $\dot{Q}_H$ . Desta maneira determina-se o COP pela razão entre as duas taxas:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H} \quad (1)$$

A taxa de transferência de calor dos gases quentes, no lado quente do trocador de calor regenerador,  $\dot{Q}_H$ , é determinada pela Primeira Lei da Termodinâmica, i.e.:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_g \cdot c_{p,g} \cdot (T_{e,g} - T_{s,g}) \quad (2)$$

onde  $\dot{m}_g$  – vazão dos gases quentes;  $c_{p,g}$  – calor específico à pressão constante dos gases;  $T_{e,g}$  e  $T_{s,g}$  – temperatura de entrada e de saída dos gases quentes, respectivamente.

Neste trabalho, considera-se como taxa de transferência de calor retirado da câmara fria,  $\dot{Q}_L$ , apenas o que é retirado de um trocador de calor de tubos aletados colocado no interior do refrigerador, i.e., o que é obtido como resultado do uso do equipamento. Não se considera em  $\dot{Q}_L$ , o calor retirado da massa de ar interno, da massa das paredes e o que é perdido para a atmosfera pelo isolamento das paredes. É necessário, portanto, medir a temperatura de entrada e de saída de água desse trocador, e monitorar a sua evolução no tempo. Do início ao fim do experimento quantifica-se, aproximadamente, a taxa de transferência de calor retirado,  $\dot{Q}_L$ , como:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_{\text{ag,ref}} \cdot c_{\text{ag}} \cdot (T_{\text{e,ag,ref}} - T_{\text{s,ag,ref}}) \quad (3)$$

onde  $c_{ag}$  – calor específico da água;  $T_{e,ag,ref}$  e  $T_{s,ag,ref}$  – temperatura da água de entrada e saída do trocador de calor, respectivamente.

As equações (1) – (3) demonstram, portanto, a necessidade de se realizar a medição experimental de várias grandezas, i.e.,  $\dot{m}_g$ ,  $\dot{m}_{ag,ref}$ ,  $T_{e,g}$ ,  $T_{s,g}$ ,  $T_{e,ag,ref}$  e  $T_{s,ag,ref}$ . Para obter a vazão dos gases é necessário medir a velocidade de dos gases em algum ponto do escoamento,  $V_g$ .

Na medição de vazão de água de arrefecimento do motor, e da água de alimentação do trocador  $TC_1$  foram utilizados sistemas de medição independentes. A vazão da água de arrefecimento do motor (lado quente de  $TC_1$ ) foi medida com um dispositivo de medição calibrado em laboratório que utiliza uma relação da vazão medida e a diferença de temperatura de saída da água de arrefecimento do motor em  $TC_1$ , e a temperatura imediatamente após uma resistência elétrica de dissipação térmica de 100 W, acoplada diretamente a tubulação do fluido de arrefecimento do motor de combustão interna (MCI). A vazão da água de alimentação (lado frio de  $TC_1$ ) foi medida através de um rotâmetro instalado na entrada do trocador de calor. Para a vazão de combustível (gasolina) foi utilizada uma escala graduada localizada junto ao tanque de combustível, com utilização de um indicador de nível. Pela elaboração do cálculo de volume consumido em relação ao tempo ( $V \times T$ ), a vazão de gasolina é obtida em  $m^3/h$ . Para a medição da vazão de gases quentes e do ar admitido pelo motor, tomou-se a velocidade do escoamento na saída do fluido na extremidade do tubo de escape do motor para os gases quentes, e na entrada do filtro de ar. A medição das velocidades dos gases e do ar foi feita utilizando um anemômetro de pás rotativas, modelo HHF 300A (OMEGA Engineering INC.), com faixa de operação de 0 a  $35 \text{ ms}^{-1}$ , sendo que o limite de precisão intrínseco da velocidade é de  $\pm 2.5\%$  da leitura. A área da seção reta do tubo de escape e do tubo de entrada do filtro de ar são conhecidas, donde se calculam as vazões mássicas supridas por:

$$\dot{m}_i = \rho_i \cdot V_i \cdot A_i \quad (i = ar, g) \quad (4)$$

onde  $\rho$  é a densidade (gases considerados como ar à temperatura de  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $\text{kg/m}^3$ ;  $A$  é a área da seção do tubo,  $\text{m}^2$ , e  $V$  é a velocidade,  $\text{m/s}$ .

Para avaliar o desempenho do sistema trigerador, adota-se uma função objetivo que inclui todos os produtos do sistema. Trata-se da eficiência do sistema trigerador, definida como:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_L + \dot{Q}_{ag} + \dot{W}_{elet}}{\dot{Q}_{comb}} \quad (5)$$

onde  $\dot{Q}_{ag}$  é a taxa de transferência de calor total aproveitada no aquecimento e vaporização de água ( $TC_1 + TC_2$ ), calculada a partir da primeira lei da Termodinâmica (Bejan, 1998; Moran e Shapiro, 2002), medindo a vazão de água,  $\dot{m}_{ag,aq}$ , e as temperaturas de entrada e saída de  $TC_1$  e  $TC_2$ , levando em consideração a mudança de fase da água (vaporização) no processo de aquecimento, bem como o calor específico da água;  $\dot{W}_{elet}$  é a potência elétrica consumida pela aplicação alimentada pelo gerador elétrico, e  $\dot{Q}_{comb} = \dot{m}_{comb} PCI_{comb}$  é o a energia fornecida pelo combustível consumido,  $\dot{m}_{comb}$  é a vazão de combustível,  $\text{kg/s}$ , e  $PCI_{comb}$  é o poder calorífico do combustível,  $\text{kJ/kg}$ .

#### 4. Resultados e discussão

Para caracterizar o protótipo construído em laboratório, mostrado esquematicamente na Fig.1 e fisicamente na Fig. 2, foram realizados vários testes de funcionamento. No entanto, por brevidade, neste texto, apresenta-se apenas os resultados de um dos testes finais.



Figura 2. Sistema de trigeração: aquisição de dados e URABS (esquerda), UGPE (centro) e trocador de calor de água usado como carga térmica (direita).

Nos experimentos, para testar a unidade motriz e de geração de potência elétrica (UGPE), utilizou-se como carga um forno elétrico de 18 kW (Fig. 2 – centro, em azul). O motor de combustão interna operou à rotação de 3600 rpm, ajustada automaticamente pelo sistema de controle de aceleração. Assim, como esperado, o sistema gerou a potência

elétrica requerida pelo forno, inclusive sob variações programadas da carga solicitada pelo forno elétrico. No entanto, o foco principal do trabalho residiu na avaliação da viabilidade de utilização dos gases de exaustão do motor para geração simultânea de calor e frio. Desta maneira, neste artigo, são detalhados apenas os testes de geração de calor e frio com o protótipo construído.

O primeiro teste realizado foi o teste de funcionamento do refrigerador de absorção ELECTROLUX utilizado no protótipo, operando com as suas resistências elétricas originais, porém com a inclusão do trocador de calor regenerador concebido para operar com gases quentes, conforme mostra a Fig. 2 à esquerda. Este teste teve a finalidade de verificar o funcionamento do refrigerador após a inclusão do trocador de calor regenerador. Para este teste e todos os outros, foi utilizada uma mesma carga térmica, i.e., um trocador de calor de tubos aletados com uma vazão de água circulante  $\dot{m}_{ag,ref} = 0,04344$  kg/s, conforme mostra a Fig. 2 à direita. A Figura 3 mostra o resultado deste primeiro teste, mostrando a temperatura medida no interior do congelador, e também a temperatura observada na saída de gases do trocador de calor regenerador, obviamente sem escoamento de gases quentes neste teste, porém, para efeitos de comparação com o teste seguinte com gases quentes, denominou-se a temperatura nesse local como  $T_{s,g}$ . Até cerca de 80 minutos,  $T_{s,g}$  aumenta, quando o congelador começa a apresentar uma queda de temperatura, i.e., quando o sistema de absorção inicia efetivamente a prover efeito refrigerante. A seguir,  $T_{s,g}$  continua a cair, estabilizando no nível de cerca de 135 °C. Observa-se que o congelador atingiu 0 °C com cerca de 200 minutos de operação, e prosseguiu diminuindo a temperatura até atingir -14,2 °C, ao final do teste, i.e., com 390 minutos, aproximando-se do regime estacionário.

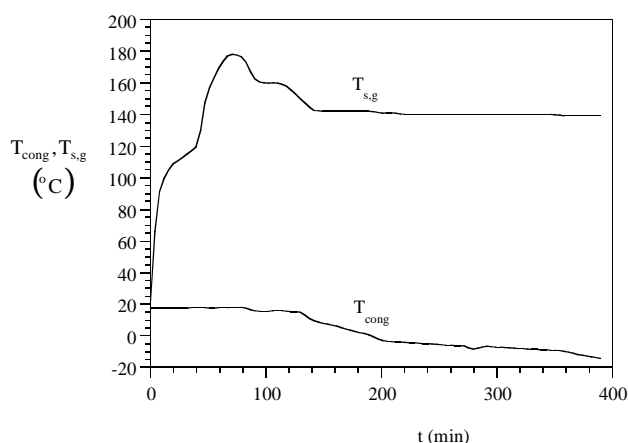


Figura 3. Teste do refrigerador de absorção com eletricidade.

Na seqüência, foi realizado o teste de operação e caracterização do sistema trigerador operando a 3600 rpm, com uma carga elétrica de 18 kW (UGPE), e simultaneamente com a URABS e a UAQ. A Figura 4 mostra os resultados obtidos com o refrigerador de absorção operando com gases quentes. Até cerca de 60 minutos,  $T_{s,g}$  aumenta, quando o congelador começa a apresentar uma queda de temperatura, i.e., quando o sistema de absorção inicia efetivamente a prover efeito refrigerante. A seguir,  $T_{s,g}$  tende a estabilizar no nível de cerca de 130 °C. Observa-se que o congelador atingiu 0 °C com cerca de 100 minutos de operação, i.e., na metade do tempo do refrigerador funcionando com as resistências elétricas, e prosseguiu diminuindo a temperatura até atingir -14,2 °C, ao final do teste, i.e., com 340 minutos, aproximando-se do regime estacionário.

A Figura 5 mostra o cálculo da transferência de calor retirado da câmara fria,  $\dot{Q}_L$ , bem como da taxa de transferência de calor fornecido pelos gases quentes no trocador de calor regenerador,  $\dot{Q}_H$ , e do coeficiente de desempenho da URABS operando com gases de exaustão. Para tanto, foi utilizada a teoria apresentada nas Eqs. (1) – (4). A vazão medida de gases quentes que circula no lado quente do trocador de calor regenerador foi  $\dot{m}_g = 0,003$  kg/s. A vazão medida de ar admitido foi  $\dot{m}_{ar} = 0,0006$  kg/s. A vazão medida de combustível consumido foi  $\dot{m}_{comb} = 0,004$  kg/s. Por conservação de massa, deveríamos observar que  $\dot{m}_{comb} = \dot{m}_g + \dot{m}_{ar}$ , mas há uma diferença de 0,0004 kg/s, provavelmente devido a vazamentos no sistema de escape de gases. As curvas resultantes mostram o comportamento dessas grandezas ao longo da execução do teste. Observa-se que o COP do refrigerador atingiu o valor de 0,112, na parte final do teste. Tipicamente, seria esperado um COP em torno de 0,5 para esse refrigerador, que aliás ocorre no teste elétrico alimentado por resistências elétricas de 115 W apresentado na Fig. 3. A variação de temperatura da água

resfriada na parte final de ambos os testes foi  $T_{e,ag,ref} - T_{s,ag,ref} = 0,337 \text{ } ^\circ\text{C}$ , o que resultou em  $\dot{Q}_L = 61,748 \text{ W}$ , portanto, resultando para o teste elétrico  $\text{COP} = 0,537$ . Na realidade, no teste com gases, a disponibilidade de calor dos gases quentes é muito maior do que o refrigerador necessita, uma vez que os gases quentes saem ainda à temperatura de  $131 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Além disso, a temperatura de entrada dos gases quentes poderia aumentar até cerca de  $500$  a  $600 \text{ } ^\circ\text{C}$ , utilizando-se um isolamento térmico melhor a partir do coletor de escapamento do motor. Este fato revela o potencial de aplicação do sistema trigerador para sistemas de absorção de maior potência nesse mesmo protótipo no futuro, usando os gases quentes como fonte de calor.

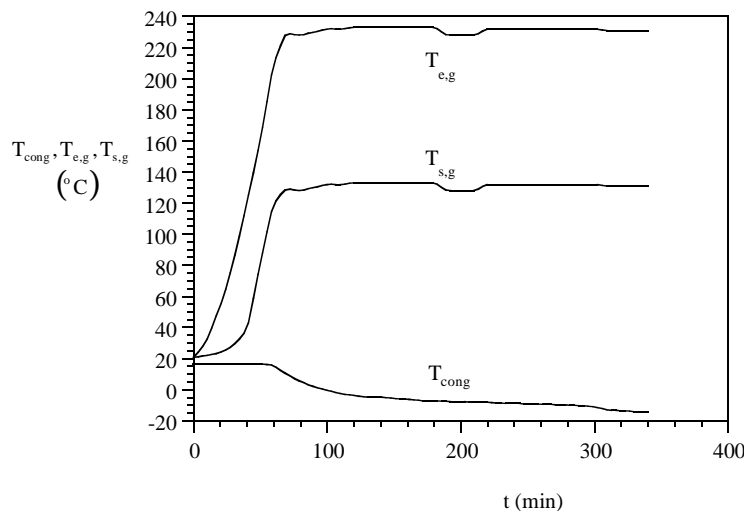


Figura 4. Teste do refrigerador de absorção com gases quentes.

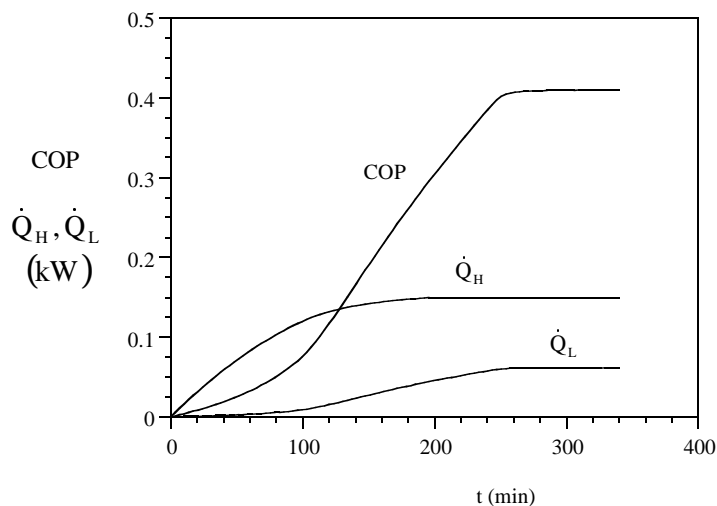


Figura 5. Desempenho do refrigerador de absorção com gases quentes.

A Figura 6 mostra os resultados do calor recuperado com o aquecimento e vaporização de água na UAQ. O sistema UAQ operou simultaneamente com a URABS, sendo que ambos foram controlados por uma válvula de três vias, mostrada no ponto 5 da Fig. 1. A válvula foi acionada por um termostato ajustado para a temperatura desejada no congelador do refrigerador de absorção ( $-14 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), direcionando os gases exclusivamente para o refrigerador de absorção até que o congelador atingisse essa temperatura. Quando o congelador atingia essa temperatura, os gases eram dirigidos pela válvula para  $\text{TC}_2$ , passando a aquecer a água. Desde o início a água vai sofrendo um pré-aquecimento em  $\text{TC}_1$  através da água de arrefecimento do motor. A válvula foi concebida no projeto a partir de válvulas utilizadas em freios motores de caminhões, para permitir a operação a altas temperaturas, uma vez que não existia tal produto no mercado.

Válvulas solenóide foram encontradas disponíveis no mercado, porém operando a temperaturas de no máximo 150 °C. A válvula tem acionamento pneumático e pode permitir a divisão da vazão mássica entre TC<sub>2</sub> e o refrigerador de absorção, caso se deseje isso. O sistema como um todo estabilizou numa eficiência de cerca de 57 %, a partir de 250 minutos de operação. Observou-se também que a água não evaporou totalmente, permanecendo a 100 °C, tendo sido necessário obter o seu título para determinar  $\dot{Q}_{ag}$ , o que foi determinado com a utilização de um condutivímetro elétrico calibrado para água nas fases líquida, vapor ou mistura de duas fases. Assim, a fração mássica de vapor (ou título) é determinada na mistura de duas fases por proporcionalidade direta com a condutividade elétrica. Optou-se por este procedimento ao invés de simplesmente calcular  $\dot{Q}_{ag}$  pelo lado dos gases quentes, para evitar uma super estimativa do calor transferido para a água, considerando a possibilidade de perda de calor para o ambiente através do isolamento térmico. A eficiência total do sistema foi calculada com a Eq. (5). Observa-se, portanto, um alto ganho de eficiência em comparação com o nível de eficiência esperado de cerca de 25 a 30 %, caso o sistema estivesse operando somente como gerador elétrico acoplado ao motor de combustão interna.

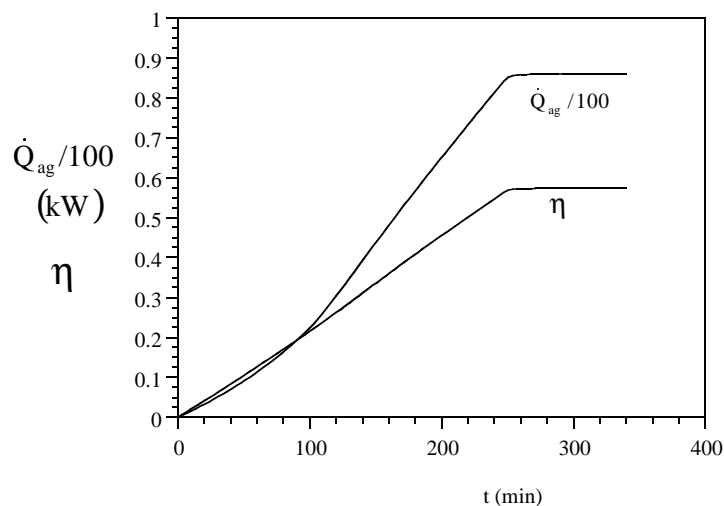


Figura 6. Taxa de transferência de calor absorvido pela água aquecida e desempenho do sistema trigerador.

## 5. Conclusão

Este trabalho apresenta as fases elaboradas para construção de uma bancada experimental em laboratório de um sistema de trigeração com motor de combustão interna com a finalidade da produção combinada de frio, calor e energia elétrica e sua caracterização a partir de um motor utilizando dois combustíveis (gasolina ou Gás Natural). Do ponto de vista termodinamico foi atingido o objetivo através de um maior desempenho de eficiência em relação à consideração apenas ao motor isoladamente. O presente estudo é parte de um projeto maior que utilizará no futuro outras fontes de combustível, tais como o biogás para uso em comunidades isoladas. Os resultados apresentados têm caráter preliminar e inicial, estando sujeitos a aprimoramentos subsequentes. No entanto, a concepção estudada e análise certamente poderão ser utilizadas em outros casos de plantas de trigeração, tendo utilidade na decisão técnica de implantação e de novos investimentos.

## 6. Referências

- Balestieri, J., Cogeração, geração combinada de eletricidade e calor, Florianópolis, Ed. UFSC, 2002, p. 279.
- Bassols, J., Kuckelkorn, B., Langreck, J., Scheneider, R., e Veelken, H., Trigeration in food industry, Applied Thermal Engineering 22 (2002) 595 – 602.
- Bejan, A., Advanced Engineering Thermodynamics, Wiley, New York, 1988.
- Colonna, P., e Gabrielli, S., Industrial Trigeration using ammonia – water absorption refrigeration systems (AAR) Applied Thermal Engineering 23 (2003) 381 – 396.
- Dally, J., Riley, W. F., e McConnell, K. G., 1993, Instrumentation for Engineering Measurements, Wiley, New York, p. 425.
- Howle, L., Georgiadis, J., e Behringer, R., 1992, "Shadowgraphic Visualization of Natural Convection in Rectangular-Grid Porous Layers," ASME HTD, 206(1), pp.17-24.



- Maidment, G. G., e Tozer, R. M., Combined cooling heat and power in supermarkets, *Applied Thermal Engineering* 22 (2002) 663 -665.
- Magloire, P., Heteu, T., e Bolle, L. , Economie d' énergie en trigénération ,*International Journal of Thermal Sciences* (2002) 1151-1159.
- Minciuc, E., Le Corre, O., Athanasovici, V., Azerout, M. T., e Bitir, I., Thermodynamic analysis with absorption chilling machine, *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 1391-1405
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., *Princípios de Termodinâmica para Engenharia* , LTC , Rio de Janeiro, 2002.
- Pallú, E. L., e Vargas, J. V. C., Construção e ensaio de funcionamento e determinação do "Pull down" de um protótipo de refrigerador de absorção alimentado por emissões automotivas, monografia de graduação, UFPR (2003) p. 6.
- Parise, J.A.R, e Cartwright, W. G., Experimental analyses of diesel engine driven water-to-water heat pump, *Heat recovery and CHP*, vol 8 , n2, pp 75-58, 1985.
- Smith, M. A., e Few, P. C., Second law analysis of an experimental domestic scale cogeneration plant incorporating a heat pump *Applied Thermal Engineering* 23 (2001) 21 – 110.

## **EXPERIMENTAL DEVELOPMENT OF A TRI-GENERATOR SYSTEM FOR SIMULTANEOUS PRODUCTION OF HEAT, ELECTRICITY, AND COLD**

### **J. C. Berndsen**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia, PIPE, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
jcb@redel.com.br

### **J. V. C. Vargas**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia, PIPE, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
jvargas@demec.ufpr.br

### **E. Dilay**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia, PIPE, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
jvargas@demec.ufpr.br

### **F. G. Dias**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia, PIPE, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
gallego@ufpr.br

### **J. C. Ordóñez**

Department of Mechanical Engineering and Center for Advanced Power Systems, Florida State University, Tallahassee, Florida, 32310, USA  
ordonez@caps.fsu.edu

### **J. A. R. Parise**

Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, RJ 22453-900, Brazil  
parise@mec.puc-rio.br

### **M. C. Campos**

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
mccampos@demec.ufpr.br

### **V. D. Maciel**

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
v.d.maciell@ufpr.br

### **L. R. C. G. Oçowski**

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, Curitiba, PR 81531-990, Brazil  
leoracaoski@ufpr.br

**Abstract.** *This study investigated experimentally the possibility of utilizing tri-generation systems for energy conservation, as a relevant practice to increase energy conversion efficiency in industrial processes. Thermal machines, to produce work, necessarily do not use most of the supplied energy in the form of heat, as a consequence of the second law of thermodynamics. The majority of the non-utilized energy is rejected in the form of heat. Such type of waste heat is abundant in off-shore platforms and refineries in the oil industry. The tri-generation system developed in this work utilizes such waste heat to produce water vapor, directly by means of a heat exchanger, and to produce cold utilizing an absorption refrigeration system. The work consisted of the design and assembly of a prototype in the laboratory, its operational characterization and instrumentation.*

**Keywords:** *absorption refrigerator, hot heat exchanger, cogeneration*