

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO OPERANDO EM REGIME TRANSIENTE

Aldo Falconi Filho

Carlos Eduardo Reuther de Siqueira

Universidade Católica de Petrópolis, Rua Barão do Amazonas, 124 – Centro – Petrópolis – RJ, aldo.falconi@ucp.br

José Alberto dos Reis Parise

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea – Rio de Janeiro – RJ, parise@mec.puc-rio.br

Resumo. *O presente trabalho analisa experimentalmente um ciclo de refrigeração por absorção operando em regime transiente, em apoio a estudo da viabilidade técnica da aplicação do ciclo de refrigeração por absorção em sistemas condicionadores de ar automotivos. Nestes sistemas, o calor de rejeito dos gases de exaustão atua como fonte de calor de alta temperatura, necessária ao acionamento do ciclo de absorção. Esta fonte apresenta um funcionamento de caráter fortemente transiente, com rápidas variações na potência térmica e na temperatura, decorrentes das demandas de carga e velocidade impostas aos motores térmicos automotivos. Busca-se, com a utilização deste ciclo, a redução de consumo de combustível do veículo, visto que o ciclo de absorção não exige potência mecânica do motor a combustão interna, como ocorre no ciclo tradicional de compressão de vapor. O programa de estudos foi dividido em três etapas. Na primeira, foi analisado o desempenho do ciclo de absorção funcionando com uma resistência elétrica de potência variável. Na segunda etapa, foi utilizado um soprador de ar quente, simulando os gases de exaustão de um motor automotivo. Na terceira etapa, foi instalado um regenerador estático, na tentativa de minimizar as oscilações de temperatura da fonte de calor.*

Palavras-chave: *Ciclo de refrigeração por absorção, estudo experimental, condicionamento de ar automotivo, amônia e água.*

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho trata do estudo experimental de um sistema de refrigeração por absorção, de pequena capacidade térmica e com amônia, hidrogênio e água como fluidos de trabalho, operando em regime transiente. Um sistema de absorção de um refrigerador comercialmente disponível foi adaptado para operar a partir de um fluxo de ar quente, simulando, em laboratório, a operação do ciclo com os gases de exaustão de um motor a combustão interna. A atratividade da operação do ciclo de refrigeração por absorção em conjunto com um motor a combustão interna, ou uma turbina a gás, justifica-se pela ausência do consumo de energia mecânica de compressão, substituída, no ciclo de absorção, por uma fonte de calor a alta temperatura, no caso, o calor de rejeito de um motor a combustão interna.

Em sistemas condicionadores de ar automotivos convencionais, a parcela de potência roubada ao motor a combustão interna pelo compressor pode ser significativa e afetar o desempenho global do veículo, notadamente em motores de menor cilindrada, justificando um estudo de viabilidade técnica do uso do ciclo de absorção. Também, eventuais vazamentos do fluido de trabalho, como amônia e água, têm impacto nulo sobre o meio ambiente (Tyagi, 1988).

Vários fatores apontam favoravelmente para a utilização automotiva do ciclo de refrigeração por absorção, podendo-se destacar a redução de combustível, o baixo custo operacional e o reduzido impacto ao meio ambiente. Outras características do processo de condicionamento de ar veicular, e também do ciclo de refrigeração por absorção, entretanto, podem pesar contra esta aplicação: (1) a elevada carga térmica que, aliada aos baixos COPs obtidos com o ciclo de absorção, pode resultar em sistemas proibitivamente pesados e volumosos; (2) a expectativa de que a redução de

temperatura do habitáculo (*pull-down*) ocorra em tempo extremamente reduzido; (3) a grande variação com o tempo da carga térmica (devido ao trânsito, exposição intercalada do veículo ao sol e à sombra, abertura de portas, entre outros); (4) o caráter notoriamente transiente da fonte de calor empregada, os gases de exaustão, decorrente da constante variação de velocidade e potência no eixo do motor; (5) a redução do desempenho volumétrico do motor, em virtude da presença do recuperador de calor na exaustão. A propósito, é de interesse ressaltar que uma das condições de maior demanda de frio a um sistema condicionador de ar automotivo, por exemplo, veículo parado em trânsito, sob insolação e temperaturas elevadas, corresponde, em oposição, a uma situação de mínima potência do motor (marcha lenta, ponto morto, potência nula no eixo, baixa temperatura dos gases de exaustão). Em tal circunstância, o ciclo de absorção poderá não encontrar, no fluxo dos gases de exaustão, a potência térmica necessária para atender à alta demanda de carga térmica.

Diversos trabalhos são encontrados na literatura a respeito de sistemas de refrigeração por absorção acionados pelo calor de rejeito de motores térmicos. Podem-se citar, a título de exemplo, os trabalhos de Costa (1997), com um estudo experimental sobre o uso de ciclos de refrigeração por absorção em motores de embarcação, Teixeira (1997), que trata da produção de frio via ‘chillers’ de absorção, a partir de motores diesel ou turbinas a gás, empregados na geração de energia elétrica, Gallego (1998), com o ciclo de refrigeração operando a partir dos gases de exaustão de uma turbina a gás para geração de energia elétrica, Horuz (1999), que descreve um estudo experimental envolvendo o acoplamento de um ciclo de refrigeração por absorção a um motor Ford 150 Dover de 6 litros, diesel e turbo alimentado, todos operando em regime estacionário, e Reis e Silveira (2002), que efetuam análise energética e exergética a partir dos dados experimentais obtidos de um sistema de cogeração conjugando um ciclo de absorção à descarga de um motor estacionário Chevrolet (Corsa), funcionando com gás GLP.

Destaca-se, finalmente, o trabalho de Lima et al. (2002), com um ciclo de refrigeração por absorção (Electrolux sem bomba) idêntico ao utilizado no presente trabalho. Ao contrário de resistência ou soprador elétricos, operaram o ciclo de refrigeração a partir do próprio gás de escape de um motor a combustão interna (VW), este operando sem carga. A utilização de um regenerador (matriz metálica), para atenuar as variações de potência da fonte de calor, conforme estudado no presente trabalho, foi originalmente proposta por Lima et al (2002).

O presente trabalho busca contribuir para um melhor entendimento da operação de um sistema de refrigeração por absorção operando em regime transiente, com um fluxo de gás quente atuando como fonte de calor a alta temperatura.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada uma unidade de refrigeração por absorção completa da Electrolux modelo M-B-RA 125, a vapor de amônia, água e hidrogênio. A unidade adaptada utiliza a amônia como o refrigerante e água como o absorvente e tem a capacidade de resfriamento de aproximadamente 80W.

Uma visão do conjunto, já retirado do refrigerador, é apresentada nas Figs. (1a) e (1b).

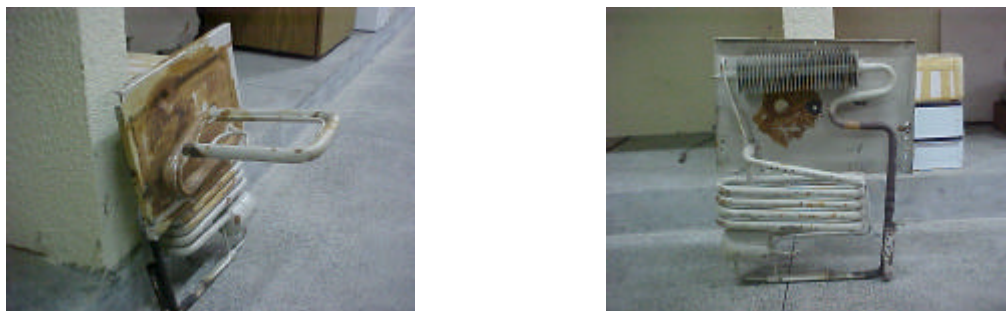


Figura 1. Unidade de refrigeração por absorção: (a) Vista Lateral Esquerda, (b) Vista Posterior

Ao se colocar em funcionamento o ciclo de absorção, com o aquecimento do tubo bomba em (C), a solução de amônia e água (água destilada a 66% e amônia a 34% - valores aproximados; Dossat, 1961), começa o seu movimento ascendente, por convecção natural. Conforme mostra o esquema, existem dois tubos concêntricos em (C). Uma seção do tubo, KK, está ilustrada na Fig. (2). No tubo central, uma solução forte de amônia e água é transportada para cima por diferença de densidade. Quando a solução chega na parte mais alta do tubo central, a água retorna pelo tubo externo, voltando para o tanque de absorção. A amônia, na fase vapor, e a uma temperatura de aproximadamente 150°C, escoam pelo tubo (D), que é um pré-condensador, em direção ao condensador. A amônia é resfriada pela troca de calor com o ambiente, representado por Q_2 . A amônia não é totalmente condensada no condensador, coexistindo uma parte líquida e vapor. A amônia líquida, mais pesada, vai para o tubo do evaporador e o vapor de amônia, mais leve, segue pelo tubo (E) ao tanque de absorção (G). A amônia líquida, que sai do condensador e entra no evaporador, se expande para um tubo de área maior. Nesse momento, absorve o hidrogênio que vem do absorvedor e do tubo (H). O absorvedor é construído em forma de serpentina espiral, a fim de evitar que a solução fique estagnada e não prejudique a circulação do hidrogênio. No evaporador ocorre o ganho de calor, a carga térmica Q_1 . No evaporador, conforme mostrado na seção J J, da Fig. (2), existem três tubos, sendo dois deles concêntricos. No tubo interno flui gás hidrogênio, e no tubo externo flui amônia e hidrogênio, que retorna para o tanque de absorção. No tanque de absorção, a amônia e o hidrogênio, proveniente do evaporador, se misturam com a água que lá está contida. Como a amônia tem mais afinidade com a água, libera o hidrogênio, que flui, por ser mais leve, para o tubo (H) e pelo absorvedor. Com a mistura de amônia e água, e a liberação do hidrogênio, forma-se uma solução forte novamente, deslocando-se para os tubos concêntricos (C), e então reiniciando o ciclo.

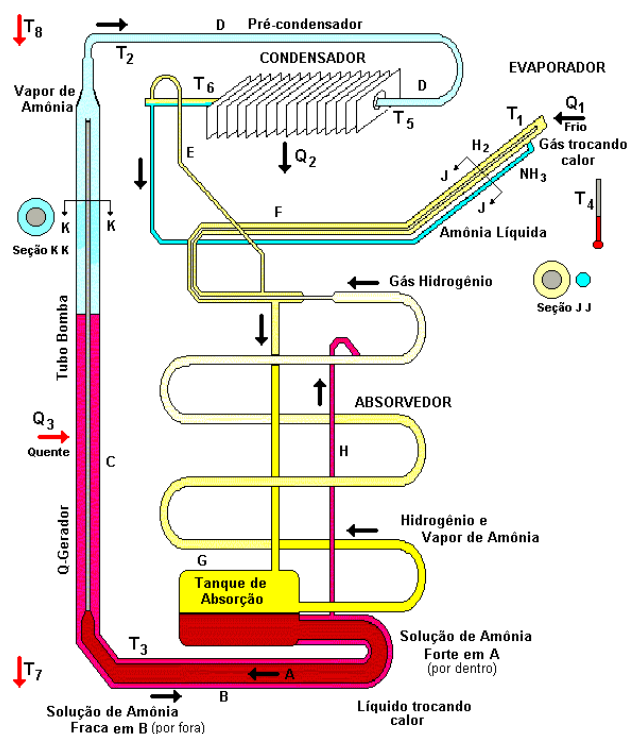


Figura 2. Esquema do ciclo de refrigeração por absorção

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O presente trabalho desenvolveu-se em três etapas distintas. Inicialmente, foram efetuadas medidas de temperatura em todos os pontos do ciclo, indicados na Fig. (2). Utilizou-se, inicialmente, como fonte de calor, uma resistência elétrica com potência de 140W. Esta etapa foi importante para o conhecimento do funcionamento do ciclo, suas temperaturas e seu desempenho termodinâmico. Na segunda etapa do trabalho, a resistência elétrica foi substituída por um soprador térmico com potência de até 1400W. O soprador térmico simulou uma fonte de calor de rejeito com escoamento de gases quentes.

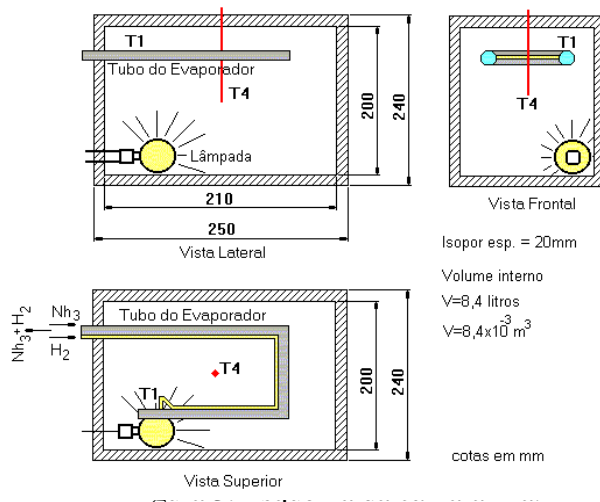
Os resultados obtidos, tanto na primeira etapa quanto na segunda, demonstraram que o sistema de refrigeração por absorção sofre rápidas variações de temperatura, em vários pontos do ciclo, quando a potência térmica fornecida varia. Isso pode representar um problema de operação quando fontes térmicas flutuantes são utilizadas como, por exemplo, o calor de rejeito dos gases de exaustão de um motor a combustão interna. Para a minimização deste problema, construiu-se um regenerador, com o intuito de manter as temperaturas no aquecedor constantes, quando a potência térmica fosse variada. O estudo do efeito da presença deste regenerador caracterizou a terceira etapa do presente trabalho.

4. DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Como este ciclo é considerado praticamente isobárico (ASHRAE, 1994), ressalta-se que não foram feitas modificações no sistema original, devido ao desconhecimento das cargas e volumes de amônia e água. As vazões das soluções, forte e fraca, nas seções da tubulação do sistema, também não foram medidas, devido à estanqueidade da tubulação e receio de vazamentos da carga do refrigerante.

4.1. O Ciclo de Absorção com Resistência Elétrica

A resistência elétrica utilizada apresentava uma potência máxima de 140W. Foi utilizado um controlador/variador de voltagem, Varivolt, tipo VM 215, com entrada de 220V e saída de 0 a 240V, com o objetivo de variar a tensão elétrica e, conseqüentemente, a potência na resistência (de 0 até 140W). Potência, voltagem e corrente eram medidas com um multímetro digital, marca Yocogawa, modelo WT 130. Dessa forma, pôde-se controlar a potência elétrica fornecida, para a avaliação do desempenho sob diferentes faixas de potência. Como câmara fria, confeccionou-se uma caixa de isopor, com espessura 20 mm, e de dimensões 240 x 250 x 240 mm, Fig. (3). Uma lâmpada incandescente, de potência constante, atuou como carga térmica.



4.2. O Ciclo de Absorção com Soprador sem Regenerador

Para a segunda etapa de testes, foi utilizado um soprador de ar quente, marca Bosch, com potência máxima de 1400W, temperatura nominal na saída do primeiro estágio, de 300°C, e no segundo, de 500°C, e com uma vazão nominal de 400 L/min. O soprador térmico foi escolhido com o intuito de simular o calor de rejeito do efluente gasoso de um processo industrial ou do motor de combustão interna, por sua simplicidade de adaptação, operação, controle, custo e construção do trocador de calor e do regenerador. O soprador foi fixado na parte posterior do aparato, com o fluxo de ar quente direcionado para o interior do trocador de calor, Fig. (4).



Figura 4. Vista lateral do aparato com soprador

O trocador de calor, tipo tubo e carcaça, com passe simples, foi construído especialmente para esta aplicação. A carcaça do trocador foi confeccionada em chapa de alumínio dupla, com 255 mm de comprimento por 70 mm de diâmetro interno e 100 mm de diâmetro externo. Uma camada de lã de rocha foi introduzida entre as chapas, como isolante térmico. A Fig. (5) mostra que o trocador de calor foi colocado de forma que envolvesse o tubo gerador. O fluxo de ar quente circula em torno do tubo gerador, aquecendo a solução amônia e água. A temperatura de entrada do ar ambiente no soprador é medida em T_8 . Na saída do trocador de calor é medida a temperatura T_7 .

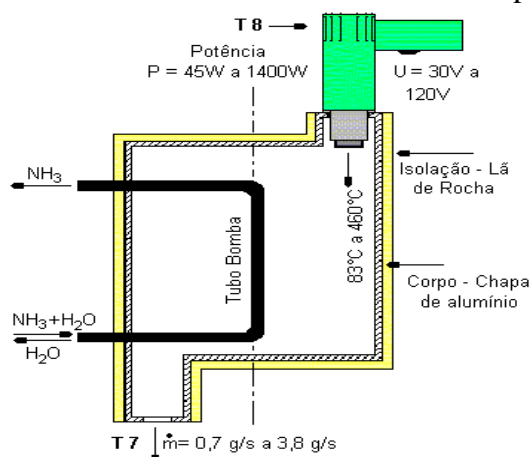


Figura 5. Esquema do trocador de calor com o soprador

4.3. O Ciclo de Absorção com Soprador e com Regenerador

Foi observado (Falconi Filho, 2002) que, ao se variar a potência fornecida, tanto da resistência elétrica quanto do soprador, a temperatura no evaporador rapidamente variava. Tal fato causava um problema para o funcionamento em regime transiente, afetando o desempenho global do sistema. Introduziu-se, então, o regenerador, para impor uma inércia térmica ao ciclo, minimizando as variações bruscas de temperatura no evaporador. Como material de enchimento do regenerador, foi utilizada palha de aço número 2 da marca Suzanbril.

O esquema de adaptação do trocador de calor está representado na Fig. (6), onde se observa, no interior do trocador de calor, uma massa de 25 g de palha de aço número 2 com um volume interno de $9,3 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ (Siqueira, 2000).

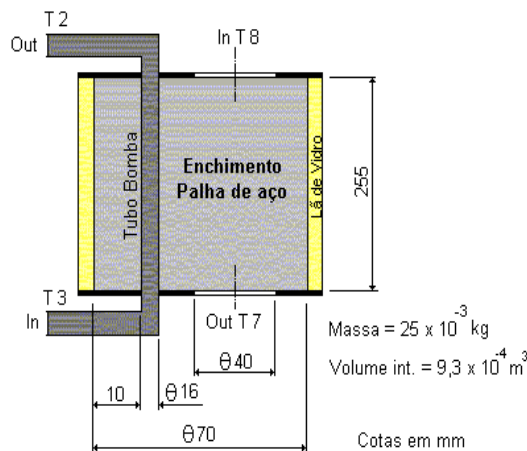


Figura 6. Esquema do trocador de calor com regenerador.

5. RESULTADOS

São apresentados, a seguir, alguns resultados experimentais com o sistema operando com o soprador de ar quente (etapas 2 e 3), comparando-se a variação das temperaturas do ciclo ao longo do tempo, operando-se com e sem o regenerador. Todas corridas tiveram início com a câmara fria à temperatura ambiente, tratando-se, portanto, de um teste tipo *pull-down*, pelo menos inicialmente. Para os testes comparativos (com e sem regenerador), três padrões de variação de potência foram aplicados, a saber:

- 1) Período de uma hora a 900W, seguido de uma redução abrupta para 650 W, e mantida por uma hora, e retorno, igualmente instantâneo, para 900W, e assim mantido por uma hora;
- 2) Período de, aproximadamente, uma hora a 500W, seguido por aumento instantâneo para 900W, e assim mantido por uma hora, e retorno a 500W;
- 3) Redução em escada de 1000W a 600W, passando por 750W, e retornando a 1000W, com períodos de manutenção de potência entre 30 e 60 minutos.

As corridas tiveram uma duração total de aproximadamente 3 horas. As Figs. (7), (9) e (11) apresentam a variação com o tempo da potência e das temperaturas T_1 , T_2 , T_3 , T_5 e T_6 , indicada na Fig. (2). Temperaturas levantadas com o ciclo operando com o regenerador são destacadas nos gráficos como T_{1R} , T_{3R} , T_{5R} e T_{6R} , correspondendo, exatamente, à mesma locação equivalente no ciclo sem regenerador.

5.1. Padrão de Potência 900W – 650W – 900W

Observa-se, na Fig. (7), um comportamento semelhante da temperatura T_3 , temperatura na saída do gerador, para a operação com ou sem o regenerador, devido à condição de saturação da mistura neste ponto. O comportamento da temperatura na saída do condensador, T_6 , também pouco se altera com a presença do regenerador, tendo-se apenas obtido valores mais elevados. Ao contrário, há uma nítida diferença entre as operações com e sem o regenerador, da ordem de 60-70°C, para a temperatura na entrada do condensador, provavelmente influenciada pela natureza contra-corrente do trocador de calor (Figs. (2) e (5)), e que igualmente se reflete em T_2 e seu equivalente, T_{2R} . No aspecto da produção de frio, a variação da temperatura do evaporador, T_1 , e da potência são destacadas na Fig. (8). O efeito da presença do regenerador é nítido: sua inércia térmica impõe uma redução mais lenta da temperatura no evaporador, tendo-se atingido uma temperatura de - 5 °C, acima dos -17 °C obtidos sem o regenerador. Entretanto, observa-se na Fig.

(8) que a redução da potência fornecida para 650W faz com que, sem o regenerador, a produção de frio se interrompa, com a temperatura do evaporador elevando-se até 13 °C. Ao contrário, com o regenerador, esta se reduz ligeiramente, apresentando um comportamento mais suave ao longo de todo o processo, mesmo quando a potência de 900W é retomada.

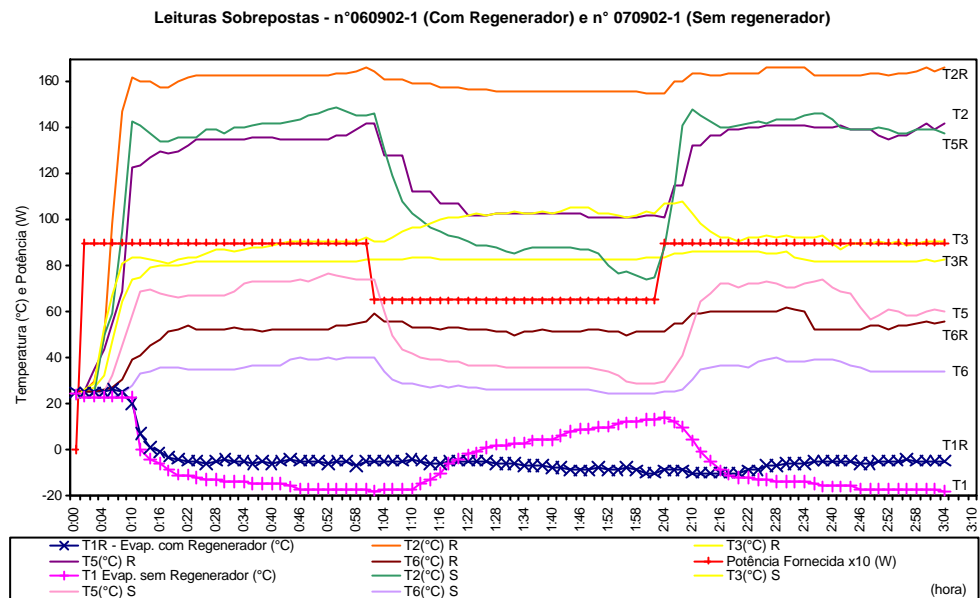


Figura 7. Variação das temperaturas do ciclo com o padrão 900W-650W-900W

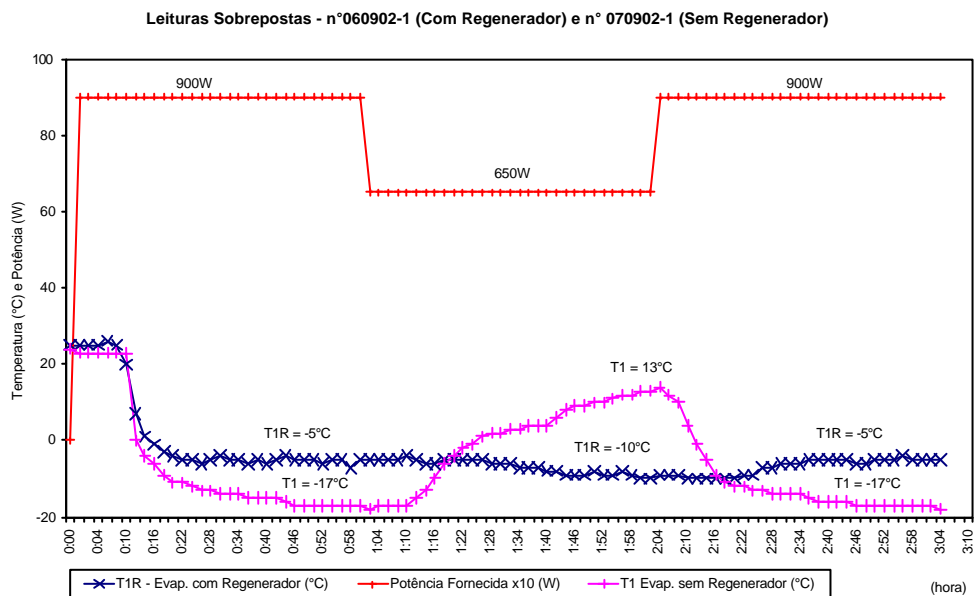


Figura 8. Variação da potência e da temperatura no evaporador para o padrão 900W-650W-900W

5.2. Padrão de Potência 500W – 900W – 500W

Neste padrão de potência, busca-se um comportamento oposto ao anterior, isto é, operação a baixa potência, 500W, seguida de aumento súbito, 900W, e retornando aos 500W, todos por um período de aproximadamente uma hora de duração. Na Fig. (9) pode-se observar, para as temperaturas T_3 , T_5 e T_6 , um comportamento muito próximo, independentemente da presença, ou não, do regenerador. Com relação a T_2 , temperatura na entrada do gerador, independentemente do padrão de potência, um comportamento pode ser observado: com regenerador, tem-se uma alta temperatura, 150-160°C, para qualquer nível de potência; sem regenerador, tem-se a temperatura T_2

proporcional ao nível de potência fornecida. No destaque de nível de potência e temperatura do evaporador, Fig. (10), observa-se, ao contrário do padrão anterior, comportamentos muito semelhantes entre os dois casos de operação, com e sem o regenerador. Importante ressaltar que a potência de 500W mal propiciou a produção de frio, Fig. (10), tendo T_i praticamente se mantido à temperatura ambiente, 21 °C, sem o regenerador, e apresentado uma baixa redução, para 17°C, com a sua utilização. Entretanto, na operação com regenerador e após redução de alta (900W) para baixa potência (500W), observa-se a manutenção da produção de frio, com a temperatura do evaporador oscilando em torno de 2°C (ao contrário, quando sem regenerador, o evaporador não passa dos 13°C). Novamente, todos os comportamentos aqui descritos podem-se explicar pela inércia térmica do regenerador.

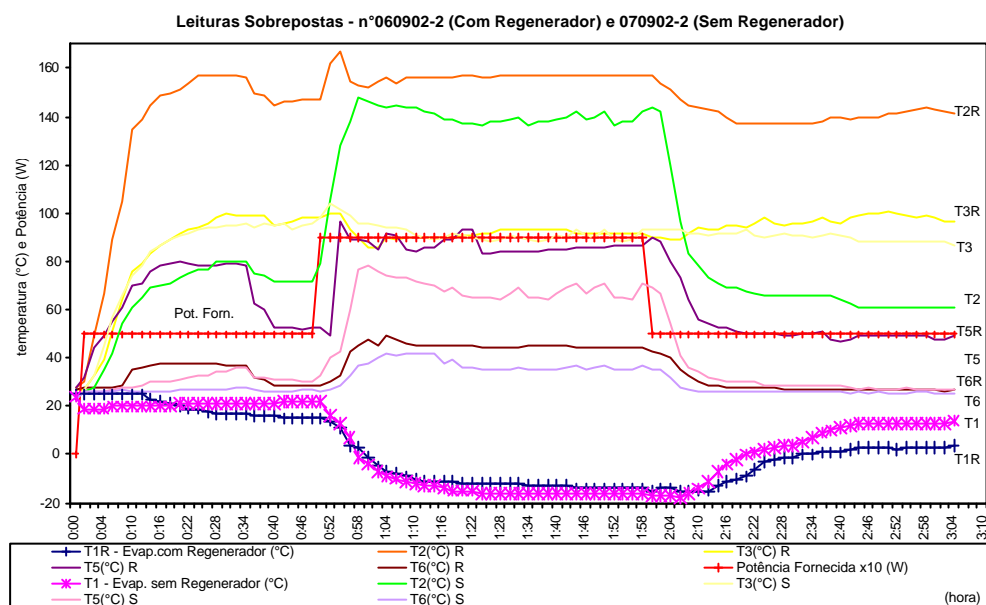


Figura 9. Variação das temperaturas do ciclo com o padrão 500W-900W-650W

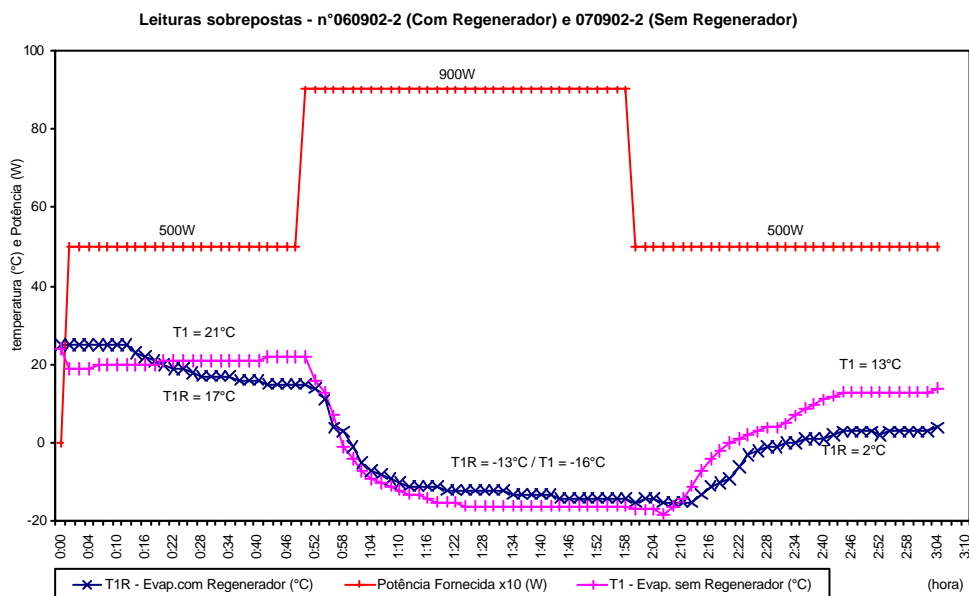


Figura 10. Variação da potência e da temperatura no evaporador para o padrão 500W-900W-500W

5.3. Padrão de Potência 1000W – 750W – 600W – 900W

A Fig. (10), obtida para um padrão de transiente mais diversificado (redução em escada) confirma um padrão de comportamento semelhante aos dois descritos acima. Destaca-se, na Fig.

(11), com o regenerador, a manutenção da condição de frio, isto é, baixas temperaturas no evaporador, mesmo com a operação sob baixa potência. Tal fato demonstra a conveniência do uso do regenerador, quando da operação do ciclo de absorção em regime transiente de potência.

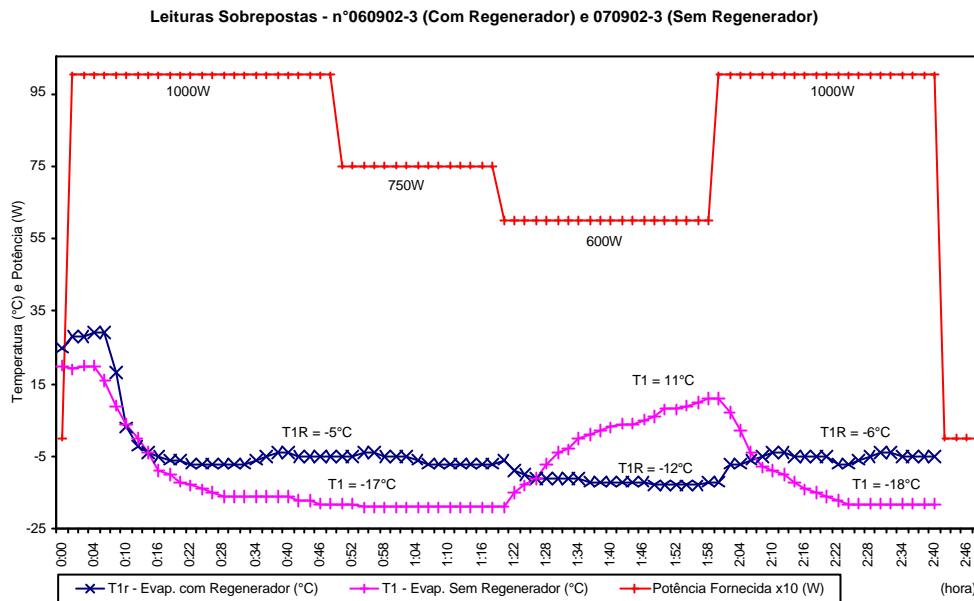


Figura 11. Variação da potência e da temperatura no evaporador para o padrão 1000W-750W-600W-1000W

6. CONCLUSÕES

A aplicação do ciclo de refrigeração por absorção em sistemas de condicionamento de ar automotivos mostra-se atraente, em virtude de o trabalho mecânico de compressor, subtraído do motor a combustão interna, poder ser substituído por uma fonte de calor de rejeito, oriunda dos gases de exaustão. Há dificuldades a serem superadas, a saber: (a) baixa eficiência térmica, levando a sistemas pesados e volumosos que atendam à alta carga térmica, (b) redução da eficiência volumétrica do motor, devido à instalação do recuperador-gerador na exaustão, (c) atendimento a períodos de alta demanda de frio quando o motor oferece o mínimo de potência térmica de rejeito e (d) sensibilidade do ciclo a variações na potência e temperatura da fonte de calor.

O presente trabalho, avaliando a operação de um sistema de absorção de pequena capacidade operando em regime transiente, a partir de um fluxo de ar quente atuando como fonte de calor, trouxe à luz alguns aspectos ainda não considerados na literatura. Conclui-se que a utilização de um regenerador estático, proposto por Lima et al. (2002), atenuou satisfatoriamente os efeitos negativos do transiente na fonte de calor. Sugere-se a continuidade destes estudos com sistemas de maior potência, atendendo à demanda real de condicionadores de ar automotivos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERJ e ao CNPq, pelo apoio financeiro a este trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- ASHRAE, Handbook, Refrigeration, 1994.
- Costa, H. L., “Cogeração em Sistemas Isolados: Estudo de caso em Embarcações Navais”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho / Guaratinguetá. – Engenharia Mecânica, 1997.
- Dossat, R. J., “Princípios de Refrigeração”, Editora Hemus, 1961.

- Falconi Filho, A., Análise Experimental de um Ciclo de Refrigeração Operando em Regime Transiente, Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, outubro de 2002.
- Gallego, A. G., “Sistemas de Refrigeração a partir da Cogeração – Análise e Simulação de propostas para o caso de cervejarias utilizando gás natural”, Dissertação de Mestrado, Universidade Metodista de Piracicaba – Engenharia de Produção. 1998
- Horuz, I., “Vapor Absorption Refrigeration In Road Transport Vehicles”, ASCE, Journal of Energy Engineering, Vol. 125, n° 2, August, 1999.
- Lima, D. B. P. L., Padilha, H., Mainardes, R. L. S. e Vargas, J. V. C., “Aproveitamento da energia de emissões quentes, de refinarias, automotivas e industriais para refrigeração e condicionamento de ar por sistemas de absorção”, MERCOFRIO 2002 Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do MERCOSUL, Florianópolis, 2002.
- Reis, J. A., Silveira, J. L., “Análise Exergética de um Sistema de Refrigeração por Absorção usando calor recuperado de um motor de combustão interna”, MERCOFRIO 2002 Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do MERCOSUL, Florianópolis, 2002.
- Siqueira, C.E.R., “Análise Teórica e Experimental de um ciclo de refrigeração a ar”, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica na PUC-Rio, 2000.
- Teixeira, F. N., “Seleção de Ciclos e Configuração de Sistemas de Cogeração”, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Itajubá – Engenharia Mecânica, 1997.
- Tyagi, K. P., “Cut-off Temperatures of Aqua-Amônia Absorption Refrigeration System”, Heat Recovery Systems & CHP, vol. 8, n°4, pp. 371-373, 1988.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF AN ABSORPTION REFRIGERATION CYCLE OPERATING IN TRANSIENT REGIME

Aldo Falconi Filho

Carlos Eduardo Reuther de Siqueira

Universidade Católica de Petrópolis, Rua Barão do Amazonas, 124 – Centro – Petrópolis – RJ, aldo.falconi@ucp.br

José Alberto dos Reis Parise

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea – Rio de Janeiro – RJ, parise@mec.puc-rio.br

Abstract. *The present work is related to an experimental analysis of an absorption refrigeration cycle operating in transient regime, leading to the study of the technical feasibility for the application of absorption refrigeration cycles in automotive air conditioning systems. In such system, waste heat from the exhaust or cooling systems acts as the heat source for the cycle. This heat source is typically variable in power and temperature. To cope with a varying power/heat source, the use of a static regenerator is studied, confirming the expectations of having temperature variations considerably attenuated.*

Keywords. *Absorption, experimental analysis, refrigeration cycle, automotive air conditioning, ammonia and water.*