

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM CONDICIONADOR DE AR AUTOMOTIVO

Carlos Alexandre Borin Petroski

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curso de Engenharia Mecânica, Laboratório de Sistemas Térmicos, LST
carlospetroski@yahoo.com.br

Nathan Mendes

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curso de Engenharia Mecânica, Laboratório de Sistemas Térmicos, LST
nathan.mendes@pucpr.br

Luís Mauro Moura

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curso de Engenharia Mecânica, Laboratório de Sistemas Térmicos, LST
luis.moura@pucpr.br

Resumo. Apresenta-se neste trabalho uma bancada experimental que permite avaliar os principais parâmetros de um sistema de condicionamento de ar automotivo. As análises realizadas são as seguintes: influência da quantidade de fluido refrigerante, a taxa transferida de calor pelo evaporador medido em um calorímetro e o efeito causado pela temperatura do meio externo no sistema de refrigeração.

Palavras chave: Condicionador de ar automotivo, bancada experimental, sistema de climatização, fluido refrigerante.

1. Introdução

A indústria automobilística passa por uma constante evolução desde o seu surgimento. Pesquisas revelam que itens considerados luxuosos e de alto custo tornaram-se mais acessíveis ao consumidor. Uma evidência deste fato é o aumento de demanda de veículos com condicionadores de ar, segundo pesquisa realizada em São Paulo pelo departamento de tráfego.

Pode-se concluir que há uma mudança de perfil nos consumidores, o que gera maior interesse das indústrias em aumentar sua produção de unidades de climatização reduzindo o custo unitário do produto.

Não só a questão preço é abordada pelas indústrias, mas também, a evolução tecnológica do equipamento, que necessita acompanhar as tendências gerais do setor automotivo. Os departamentos de tecnologia constantemente desenvolvem componentes com menor massa para possibilitar a fabricação de veículos mais econômicos. Ao mesmo tempo buscam obter melhor eficiência energética, para além de minimizar a potência consumida pelo compressor, possibilitar a evolução do design do automóvel, que normalmente requer uma redução da entrada de ar frontal.

Um veículo que possui aproximadamente 3 m³ em seu interior requer aproximadamente 5 kW de potência de refrigeração, enquanto que em um ambiente residencial de 30 m³ seria necessária metade desta potência. Esta diferença se deve aos fatores que influenciam na carga térmica de um automóvel. Analisando o meio em que o automóvel se encontra, tem-se a influência da condução de calor pela carroceria e principalmente transferência de calor por radiação. Há também fontes de calor internas no automóvel, como por exemplo, o próprio motor, os componentes elétricos e os ocupantes.

Kaynakli e Horuz (2003) estudaram o comportamento de um sistema de climatização automotivo. Eles analisaram os fatores que influenciam a eficiência do sistema, dentre eles a temperatura do compressor e do evaporados e a variação da velocidade do compressor.

Jabardo *et al.* (2001) pesquisaram sobre um sistema de condicionamento de ar automotivo e desenvolveram um modelo para simulação computacional e uma bancada experimental para comparar os dados. Além da validação do modelo de simulação, foram analisados os efeitos causados pela variação da velocidade do compressor, pela quantidade de gás no sistema e pela temperatura do ar que passa no condensador e no evaporador.

Li *et al.* (2003) utilizaram uma válvula de expansão eletrônica para comparar um controlador PID convencional e um PID – Fuzzy, obtendo resultados significativos no controle do fluxo de gás refrigerante com este último método.

Apresenta-se a seguir uma bancada experimental desenvolvida para avaliar um sistema de condicionamento de ar automotivo. As análises realizadas são as seguintes: influência da quantidade de fluido refrigerante, a taxa transferida de calor pelo evaporador medido em um calorímetro e o efeito causado pela temperatura do meio externo no sistema de refrigeração.

2. Descrição do Experimento

Para simular condições reais de operação de um sistema de climatização automotivo é necessário que alguns parâmetros sejam controlados, podendo-se desta forma submeter o condicionador de ar a diversas situações. Primeiramente, para avaliar a influência da variação da rotação no compressor foi instalado um inversor de frequência que controla o motor elétrico, que fornece energia mecânica ao compressor. O motor elétrico é montado sob uma célula de carga para a determinação da potência mecânica entregue ao compressor. O circuito de refrigeração é instrumentado para a medição de temperatura com o uso de termopares tipo T e com transdutores de pressão. A Figura 1 mostra um esquema da instalação destes equipamentos e do sistema de climatização.

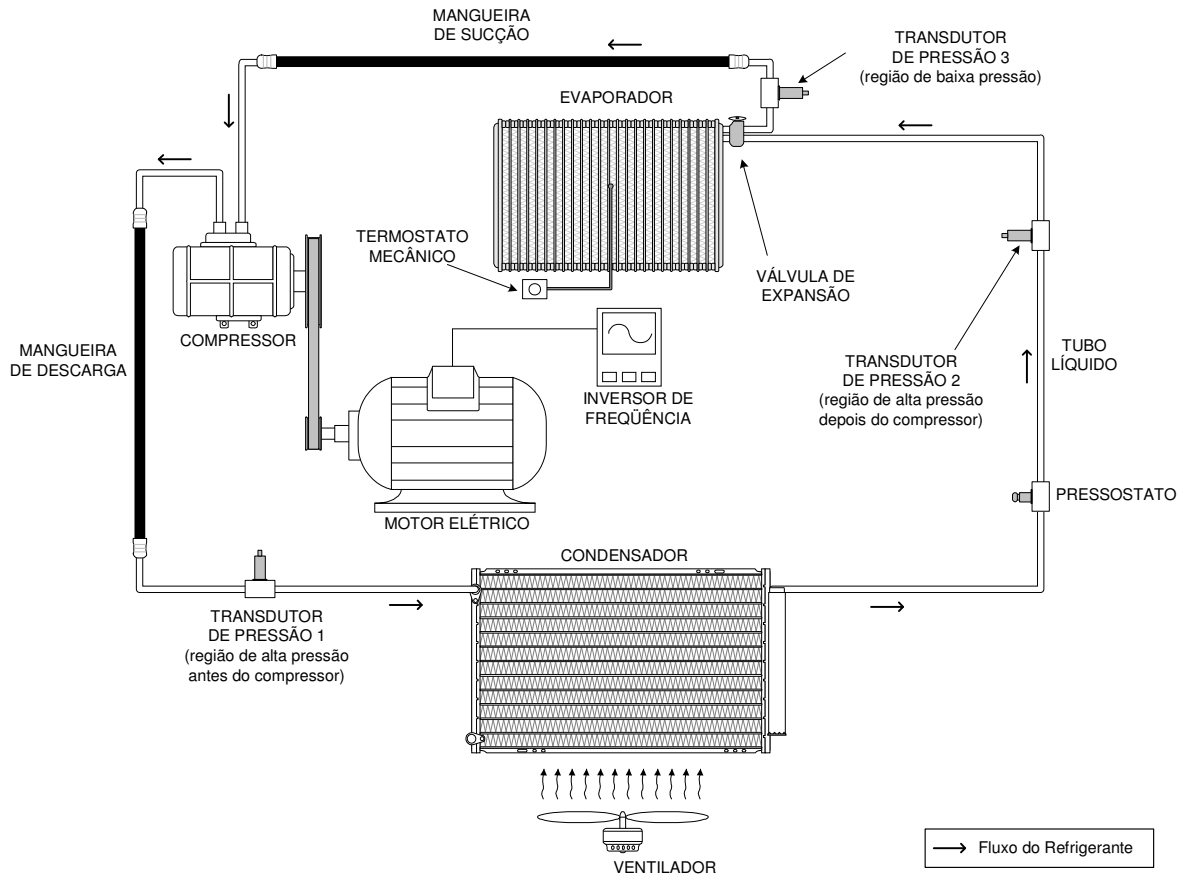


Figura 1. Montagem do sistema de refrigeração

Outro fator que influencia diretamente do desempenho do sistema é a temperatura de entrada no evaporador. Para controlar esta variável e para possibilitar a medição do calor trocado no evaporador utilizou-se um sistema isolado, mostrado na Figura 2 e adaptado a partir de um trabalho de Piske (2004). Este sistema foi montado com uma carcaça de freezer horizontal, onde uma placa isolante divide-o em dois ambientes diferentes, no inferior, há uma resistência elétrica controlada por um *varivolt*, que simula a carga térmica existente no automóvel. Na parte superior é posicionado o evaporador, que tem como função refrigerar o ar aquecido abaixo. Um ventilador centrífugo e um axial foram utilizados para circular o ar, além disso, uma tela foi construída e disposta antes do evaporador para retificar o fluxo de ar.

A montagem do sistema de refrigeração necessitou de tubulações mais longas que as originais para se adequar à montagem dos componentes e dos sensores de pressão. Isto pode influenciar levemente na eficiência do sistema por gerar maior perda de carga e maior troca de calor na tubulação.

A temperatura externa também interfere no funcionamento do sistema. Para controlar este parâmetro toda as medições foram realizadas com o dispositivo experimental dentro de uma câmara climatizada.

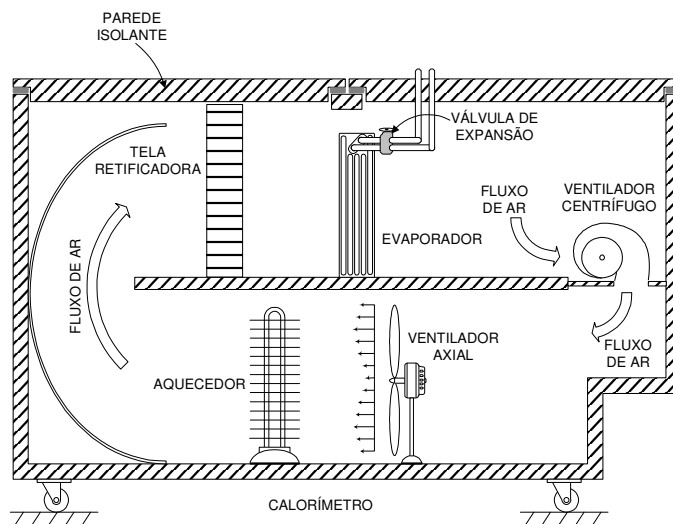


Figura 2. Dispositivo de medição do calor trocado no evaporador.

2.1. Descrição dos Componentes do Sistema de Climatização

2.1.1. Evaporador

A Figura 3 mostra uma foto do evaporador utilizado na bancada experimental. A montagem deste componente é feita com placas e aletas de alumínio unidas pelo processo de brasagem. Este modelo de evaporador é mais leve e mais eficiente que os anteriores, pois utiliza chapas de menor espessura, e fluido refrigerante realiza um percurso que favorece a troca térmica conforme demonstrado na Figura 3-b. Na montagem do sistema utiliza-se uma válvula de expansão que fica acoplada no evaporador. Apesar deste modelo de evaporador ser amplamente utilizado no mercado nacional, encontra-se um modelo ainda mais leve e eficiente no mercado internacional.

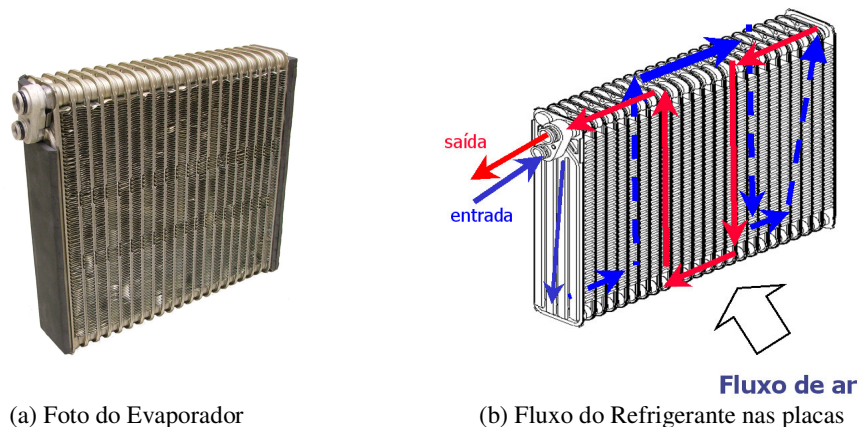


Figura 3. Foto do Evaporador da bancada, Denso (2005).

2.1.2. Condensador e Eletro-ventilador

O condensador utilizado na bancada tem como característica o fluxo paralelo do fluido refrigerante. Este modelo substituiu o antigo, que utiliza um sistema “serpentina”. Este trocador de calor encontra-se na parte frontal do veículo, que quando não está em movimento utiliza o eletro-ventilador, que proporciona o fluxo de ar para manter o sistema funcionando normalmente.

Na Figura 4-a observa-se a montagem de condensador e eletro-ventilador utilizados no experimento.

Outra função encontrada neste componente é o sistema de sub-resfriamento, que, desde que a quantidade de refrigerante esteja corretamente dimensionada, garante que em sua saída o fluido refrigerante esteja no estado líquido sub-resfriado. Este sistema é ilustrado na Figura 4-b.

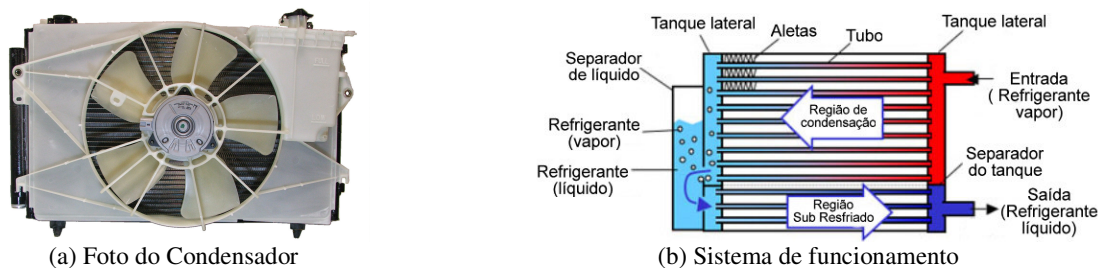


Figura 4. Condensador de Fluxo paralelo, Denso (2005).

2.1.3. Compressor

O compressor automotivo apresenta um elevado nível de tecnologia, pois deve garantir um bom funcionamento do sistema sob as adversidades a que um automóvel está submetido. O compressor da Fig. 5-a representa um modelo que foi bastante difundido na década de 80 e ainda é utilizado nos automóveis nacionais. A Fig. 5-b mostra uma vista em corte do compressor possibilitando visualizar sua montagem interna, Denso (2005).

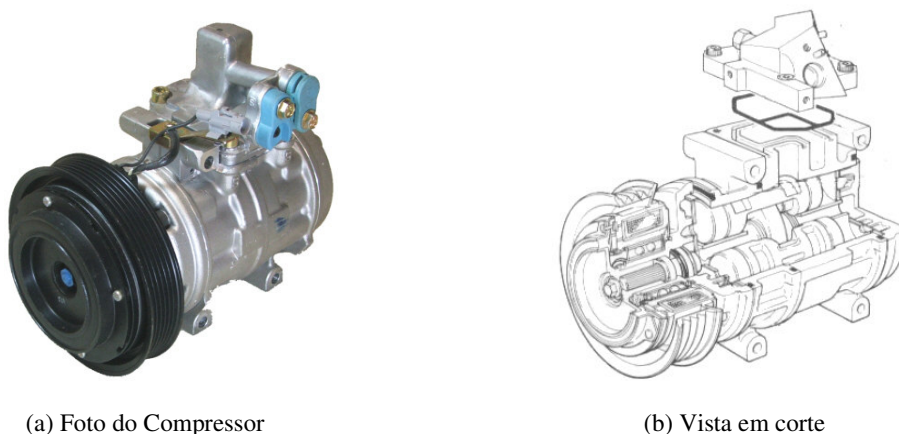


Fig. 5. Compressor com placa oscilante, Denso (2005).

O mecanismo que movimenta os pistões é chamado de placa oscilante, do inglês “Swash Plate”. Fica acoplado ao eixo e conectado por duas sapatas aos pistões. Esta montagem é detalhada na Fig. 6. O bloco do compressor possui uma construção com canais internos e um sistema de válvulas que associados ao formato do pistão permitem o funcionamento do sistema de dupla ação. Ao mesmo tempo em que o pistão comprime em um lado do outro ele faz a sucção do fluido refrigerante, conforme indicado na Figura 6.

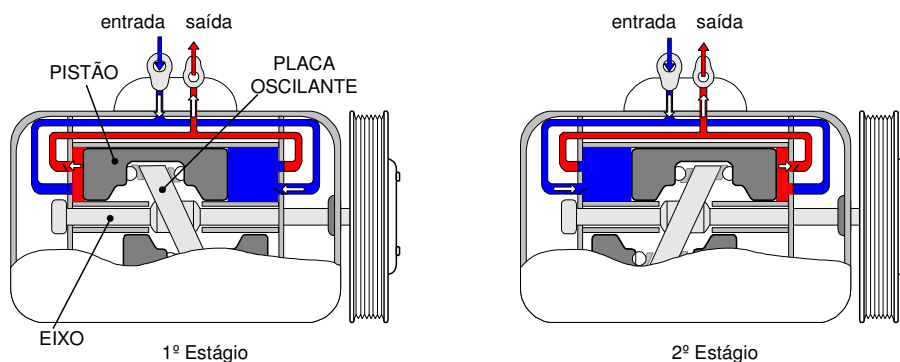


Figura 6. Funcionamento do compressor com placa oscilante, Denso (2005).

2.2 Instrumentação da Bancada

Para possibilitar a análise das variáveis do sistema foram utilizados sensores de temperatura (termopar tipo T), sensores de pressão, transdutores de potência e uma célula de carga.

A

Figura ilustra os pontos de medição de temperatura e de onde foram instalados os sensores de temperatura de pressão. Os transdutores de potência foram instalados para media a potência consumida pelos equipamentos no interior do sistema isolado.

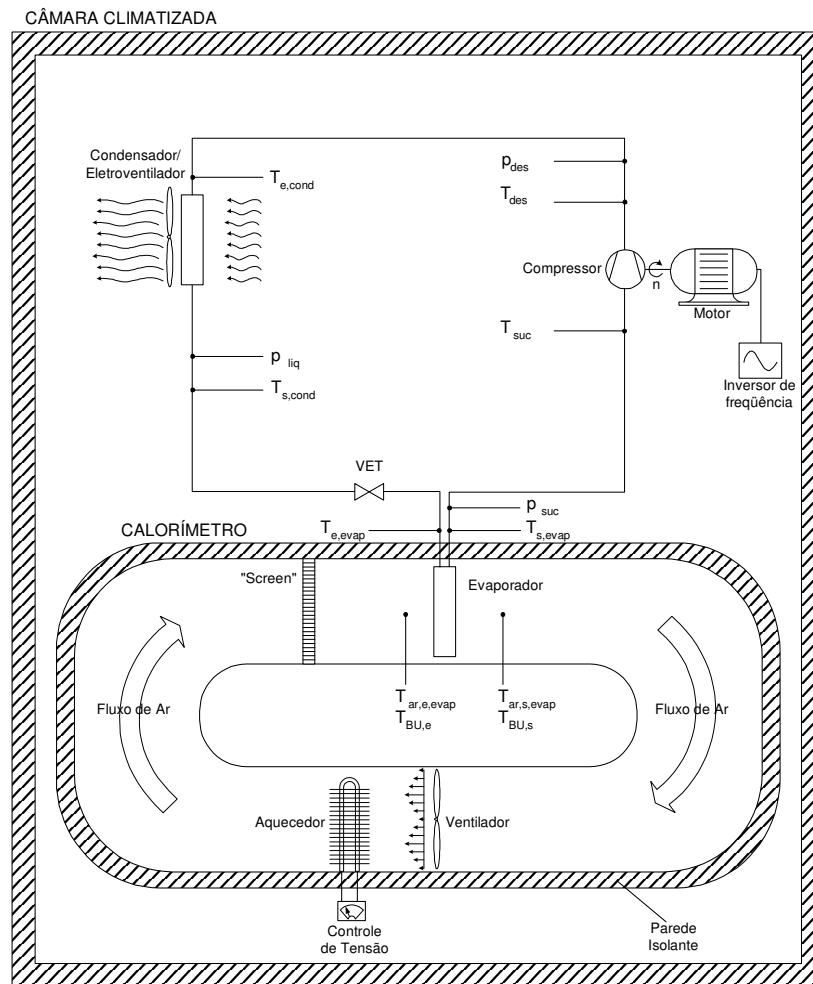


Figura 7. Instrumentação da bancada Experimental

Uma forma de se obter a potência do compressor é medindo a energia gasta pelo motor considerando seu rendimento e a diferença de polias.

Com o intuito de reduzir as incertezas desta medição foi utilizada a célula de carga e um suporte específico. O método consiste em prolongar o eixo interno do compressor e apoiá-lo em dois mancais, Figura . Deste modo o compressor ficaria livre para girar, mas isto é impedido pela fixação da haste transversal a uma célula de carga.

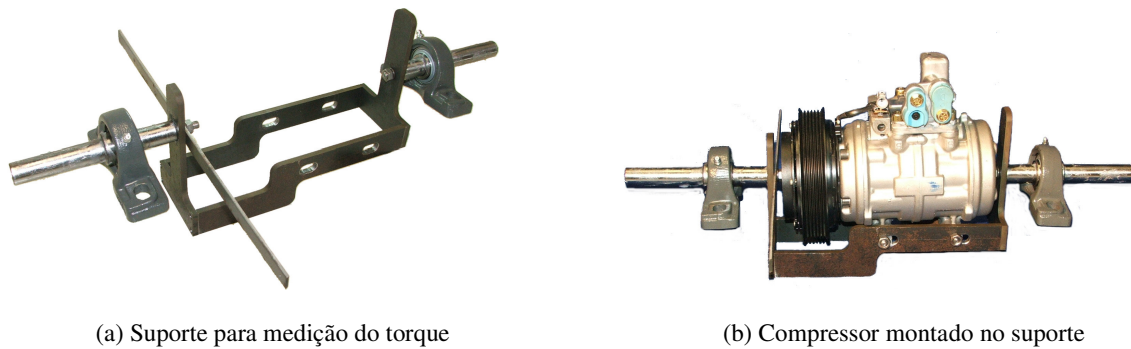


Figura 8. Suporte para medição de torque

3. Método

3.1 Procedimento Experimental

3.1.1. Definição da carga de gás

Os ensaios feitos na bancada do sistema A/C foram feitos variando-se a quantidade de carga de gás no sistema, pois isso afeta diretamente a capacidade de refrigeração. Ajustando o compressor com uma rotação de 1000 rpm e fornecendo uma carga inicial de fluido refrigerante de 300g realizou-se o primeiro ensaio. Repetindo este procedimento com um incremento de 50g a cada ensaio chegou-se ao resultado que determina a quantidade ideal de fluido refrigerante.

3.1.2. Variação da Temperatura do Ar Externo (Condensador)

O funcionamento do sistema de condicionamento de ar é influenciado pela temperatura do ar externo, pois determina a condição de operação do condensador. Para analisar este parâmetro foi utilizado uma câmara climatizada.

3.1.3. Variação da Temperatura do Ar de Entrada no Evaporador

A temperatura do ar a ser refrigerado, que entra no evaporador depende além das condições climáticas do calor gerado pelo próprio veículo e seus ocupantes. Utilizando um *varivolt* foi possível ajustar a potência da resistência elétrica controlando assim a temperatura de entrada no evaporador.

3.2. Cálculo da Potência consumida pelo Compressor

O sistema de montagem do suporte do compressor está representado na Fig. 9 com os parâmetros envolvidos no cálculo da potência consumida para refrigerar o ar aquecido.

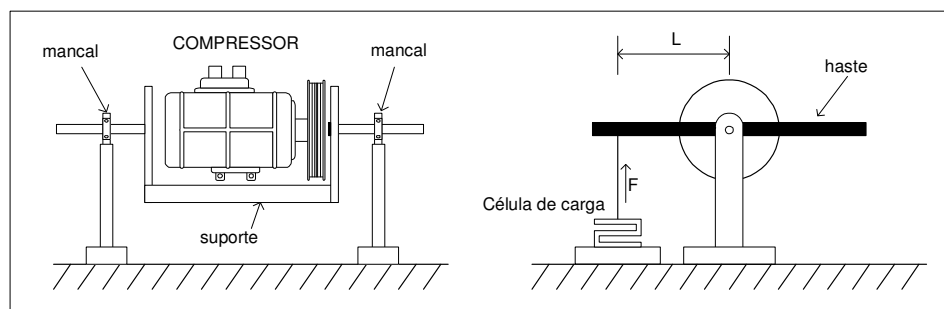


Figura 9. Esquema do dispositivo para medição de torque

Multiplicando-se a força F lida pela célula de carga pela distância L tem-se o torque no compressor conforme equação (1)

$$\tau = F \cdot L \quad (1)$$

A Eq. (2) fornece a potência consumida pelo compressor utilizando o valor do torque e a rotação do compressor.

$$W_{comp} = \tau \frac{n\pi}{30} \quad (2)$$

4. Resultados

As análises experimentais foram realizadas em regime permanente e sem que a embreagem magnética do compressor seja desativada, que ocorre quando o termostato detecta uma temperatura próxima de 0 °C na superfície do evaporador, portanto foi necessário

4.1. Análise da Quantidade de Fluido Refrigerante

Inicialmente foram utilizadas as seguintes condições de temperatura: $T_{amb,cond} = 40$ °C, $T_{ar,e,evap} = 35$ °C e 1019 rpm, que foram suficientes para os ensaios de 300 e 350 g de gás. A partir de 400 g o termostato interrompeu o funcionamento contínuo do compressor, fazendo-se necessário aumentar a temperatura de entrada no evaporador ($T_{ar,e,evap}$) para 50 °C.

Ao fim dos ensaios foram obtidos os gráficos da Figura 70, que permitem avaliar qual a quantidade ideal de fluido refrigerante para o sistema obter melhor desempenho.

A Figura 70-a mostra a temperatura do ar na saída do evaporador, onde uma grande diferença de temperatura é observada de 300g para 350g indicando a fase inicial da carga de gás. Depois disso, esta temperatura permanece em aproximadamente 7°C.

Analisando o grau de sub-resfriamento na Figura 70-b observa-se que entre 400 e 605 g o parâmetro em questão apresenta uma pequena variação e após este intervalo sobe gradativamente com o aumento da carga de gás.

Através da análise de um diagrama pressão-entalpia é natural concluir que quanto maior o grau de sub-resfriamento, maior é o efeito de refrigeração, entretanto, se a quantidade de gás for muito alta o sistema perde eficiência, pois há uma elevação da pressão de descarga no compressor, conforme observado na Figura 70-c. A partir de 651 g de refrigerante a pressão de descarga tende à uma elevação progressiva, indicando que a carga ideal de gás já foi ultrapassada. Nota-se também que na faixa de 400 a 605 g a pressão após o compressor varia muito pouco, coincidindo com o intervalo de estabilização do grau de sub-resfriamento.

A Figura 70-d mostra que a variação da potência consumida pelo compressor é condizente com a variação de pressão de descarga, confirmando que o intervalo de análise está entre 400 e 605g de fluido refrigerante.

Quando a pressão de descarga se torna muito alta a eficiência do sistema é reduzida, portanto a carga ideal é a de 554g, que ao mesmo tempo em que apresenta uma baixa temperatura na saída no evaporador e um bom grau de sub-resfriamento sua pressão de descarga encontra-se em um valor adequado. O valor de 605g também apresenta uma pressão de descarga relativamente baixa, mas por questão de segurança utiliza-se o valor anterior.

4.2. Análise da Influência da Temperatura do Ar Externo

Os resultados apresentados mostram a influência da temperatura do meio ambiente em relação ao funcionamento do sistema de climatização.

A Figura 1-a mostra que a variação da taxa transferida de calor pelo evaporador aumentou com o acréscimo da temperatura ambiente no condensador. O gráfico também mostra que o compressor consome uma potência maior para possibilitar uma maior troca térmica no evaporador, considerando que a temperatura do ar de entrada no evaporador permanece em 20 °C. A Figura 1-b mostra a diminuição da eficiência do condicionador de ar com o aumento da temperatura ambiente do condensador. Uma consequência prática deste fato é que em dias quentes a potência consumida pelo compressor é maior, portanto o consumo de combustível deve aumentar.

Considerando que as condições adversas em que opera um sistema de climatização automotivo, é importante analisar as pressões do sistema. A Figura 1-c mostra que a uma temperatura de 40 °C a pressão de descarga não atinge 16 bar, enquanto que as condições normais de operação do sistema é de até 20 bar, conforme informado pelo fabricante. A pressão de sucção permanece praticamente constante, o que comprova o funcionamento da válvula de expansão, que através de um dispositivo mecânico regula a vazão de fluido refrigerante na entrada do evaporador.

As tubulações do sistema e o compressor se encontram no mesmo ambiente, portanto a temperatura do gás nos pontos de sucção e descarga sofre um aumento, conforme mostrado na Figura 1-d.

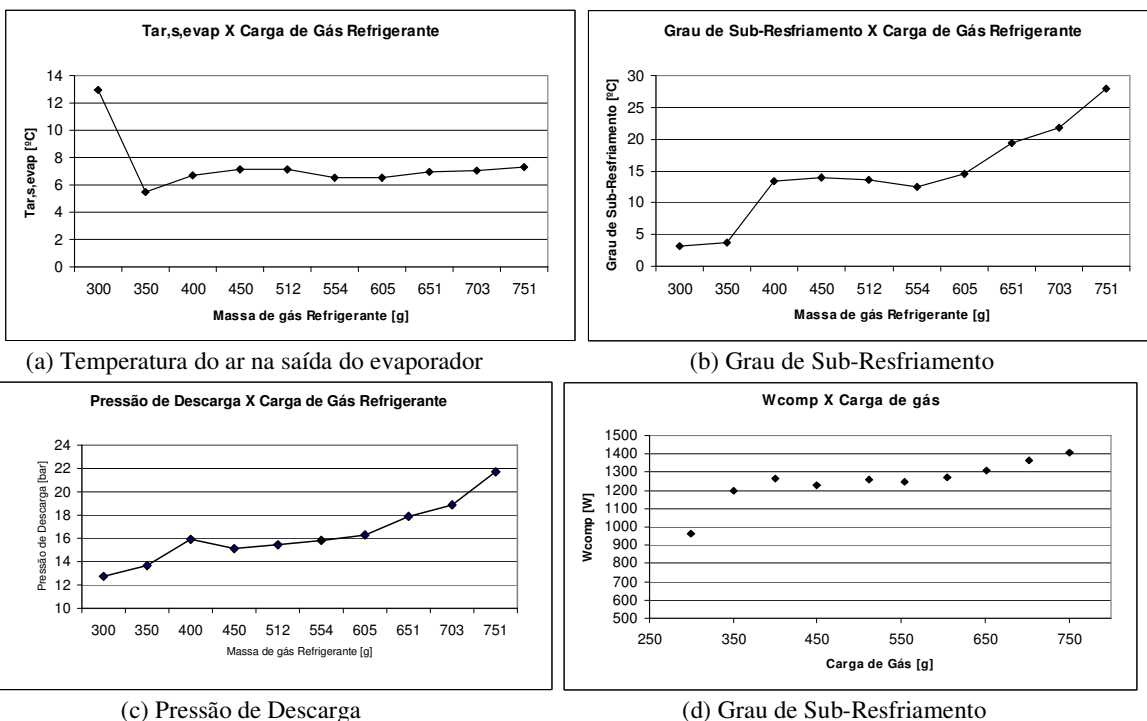


Figura 70. Gráficos de análise dos parâmetros em função da Variação de carga de fluido refrigerante ($T_{ar,cond}=40^{\circ}C$, $rot=1019$ rpm, $T_{ar,e,evap}=50^{\circ}C$)

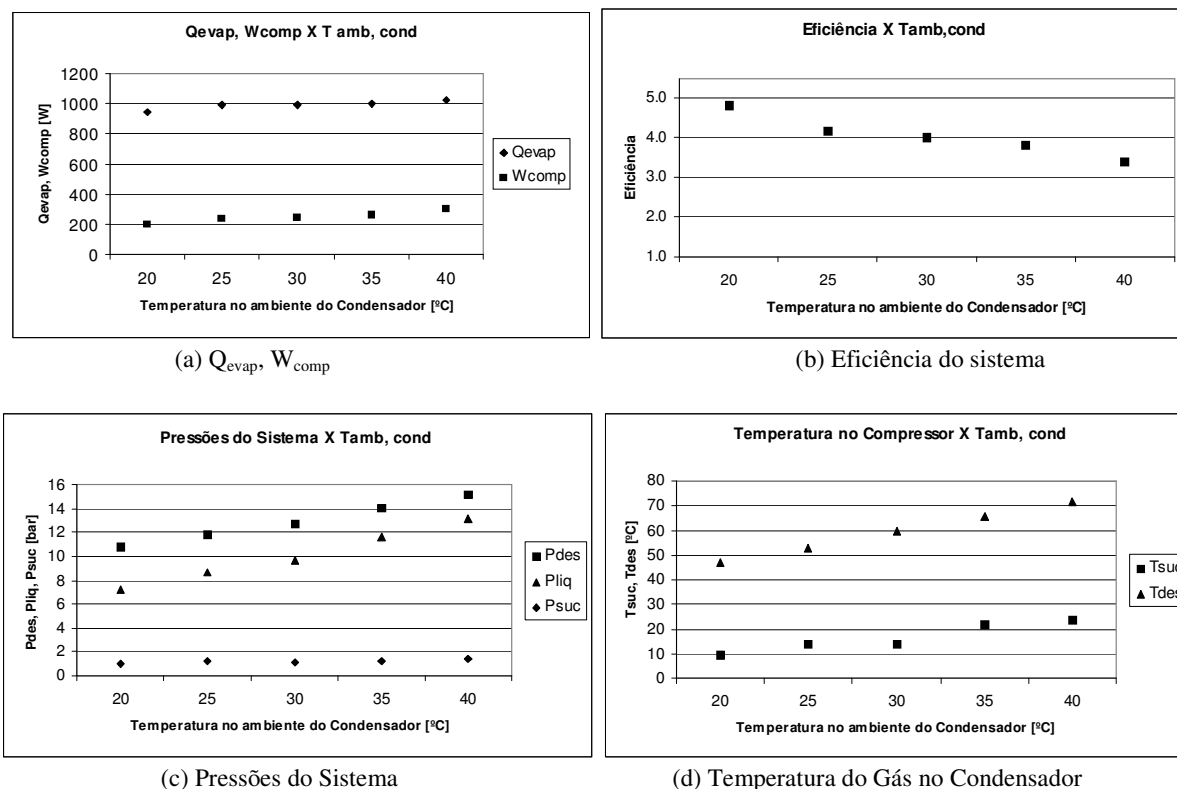


Figura 11. Resultados dos ensaios de Variação da Temperatura do Ar Externo ($T_{ar,e,evap}=20^{\circ}C$, 2021 rpm)

4.3. Influência da Temperatura do Ar de Entrada do Evaporador.

A temperatura do ar que entra no veículo é a principal fonte de calor que atua no sistema de climatização, o controle com o regulador de tensão ligado na resistência elétrica permite a avaliação deste parâmetro.

Ao aumentar a potência da resistência para variar a temperatura do ar e da superfície do evaporador, isso implica em um aumento de calor trocado no evaporador, conforme Figura 2-a. Nesta mesma figura pode ser observado a medição do trabalho no compressor, que aumenta em menor proporção quando comparado ao calor trocado no evaporador, resultando em um pequeno aumento da eficiência do sistema, conforme Figura 2-b.

A Figura 2-c mostra o aumento de pressão de descarga e na tubulação de líquido, enquanto que a pressão de sucção permanece praticamente constante devido à atuação da válvula de expansão auto ajustável.

A elevação da temperatura de descarga, mostrada na Figura 2-d, é resultado do acréscimo do trabalho no compressor, enquanto a queda da temperatura de sucção é resultado do aumento do calor trocado no evaporador.

O aumento de pressão e temperatura de descarga, obviamente fornece gás refrigerante com maior temperatura na entrada do condensador (Figura 2-e), entretanto este componente com sistema de sub-resfriamento se mostra bastante eficiente ao manter a temperatura de saída praticamente constante.

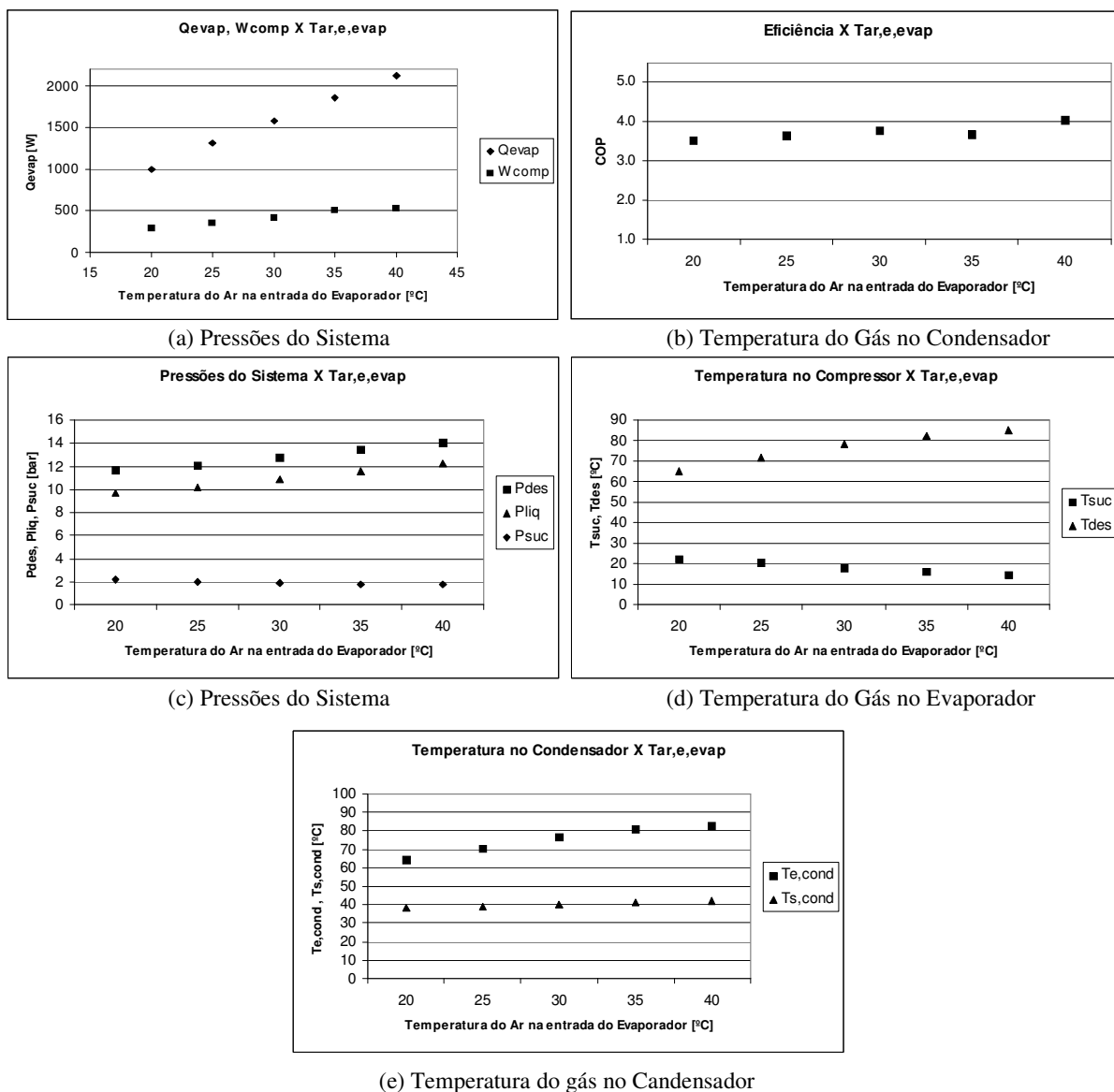


Figura 12. Variação da Temperatura de entrada no Evaporador ($T_{amb,cond}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2021 rpm)

5. Considerações Finais

Em relação aos parâmetros controlados durante os ensaios, a análise da quantidade de fluido refrigerante apresenta-se como fundamental para o bom funcionamento do condicionador de ar, devendo atingir os melhores requisitos de refrigeração sem que a pressão ultrapasse os níveis de segurança.

Quando à carga térmica e a variação da temperatura externa observa-se a importância da válvula de expansão termostática, que garante a climatização nos níveis desejados.

O sistema de medição de torque desenvolvido mostrou-se inovador, por medir o trabalho gasto diretamente no compressor.

De modo geral, os resultados obtidos através dos experimentos possibilitam uma comparação bastante coerente com a realidade em um automóvel. O que proporciona avaliar implementações de melhorias no sistema, tais como, alterar os trocadores de calor, utilizar um compressor variável, diminuir o comprimento das tubulações ou qualquer outra proposta de interesse industrial ou acadêmico.

6. Agradecimentos

A Capes pela concessão de uma bolsa de mestrado ao primeiro autor e a Denso do Brasil que gentilmente doou equipamentos de climatização automotiva para a montagem da bancada.

7. Referências

- Denso. Tlp. In: Figuras. Disponível em: <<http://www.denso.com.sg>>. Acesso em 12 de setembro 2005.
- Global Denso. In: Gás Refrigerante. Disponível em: <<http://www.globaldenso.com.br>>. Acesso em 10 de agosto 2005.
- Jabardo, J.M.S.; Mamani, W. G.; Ianella; M.R., 2001, "Modeling and experimental evaluation of an automotive air conditioning system with a variable capacity compressor". In: International Journal of Refrigeration. January.
- Kaynakli, O; Horus, I., 2003, "An experimental analysis of automotive air conditioning system". Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 30, n 2, USA: Elsevier Science.
- Li, X.; Chen J.; Chen Z.; Liu W.; Hu W.; Liu X., 2003, "A new method for controlling refrigerant flow in automobile air conditioning". In: Applied Thermal Engineering November.
- Piske, A.C., 2004, "Desenvolvimento de um calorímetro para avaliação de evaporadores". Dissertação (Mestrado). Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba.

AN EXPERIMENTAL APPARATUS TO EVALUATE THE AUTOMOTIVE AIR CONDITIONING

Carlos Alexandre Borin Petroski

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curso de Engenharia Mecânica, Laboratório de Sistemas Térmicos, LST
carlospetroski@yahoo.com.br

Nathan Mendes

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curso de Engenharia Mecânica, Laboratório de Sistemas Térmicos, LST
nathan.mendes@pucpr.br

Luís Mauro Moura

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curso de Engenharia Mecânica, Laboratório de Sistemas Térmicos, LST
luis.moura@pucpr.br

Abstract. *An experimental bench was developed to evaluate the main automotive air conditioning parameters. The physical parameters taking in account are: amount of refrigerant gas, the evaporation capacity and the influence of the environment temperature.*

Keywords: automotive air conditioning, air conditioning systems, refrigerant.