

APRIMORAMENTOS EM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO VEICULAR PARA MELHORIA DE CONDIÇÕES AMBIENTAIS DE CABINE E REDUÇÃO NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Marcelo Blanco Bolsonaro de Moura

Ford Motor Co.
Rodovia SP 127, km 124
18270-000 – Tatuí - SP
E-mail: mmoura9@ford.com

Prof. Dr. Arlindo Tribess

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária
05508-900 – São Paulo - SP
E-mail: atribess@usp.br

Abstract

More and more the world automotive industry looks for new technologies to improve the passengers' life inside vehicles, to optimize the consumption of fuel and to minimize the emission of pollutant. In the present study enhancements in the vehicle acclimatization system to improve cabin environmental conditions and to reduce fuel consumption were accomplished. The study included enhancements in the air chamber and in the refrigeration cycle and was accomplished in a off-road vehicle model, with a bi-fuel engine of 1600 cm³, endowed with an acclimatization system with capacity of 1 TR (usual in this type of automobile). The tests of the acclimatization system performance were executed initially with the conventional system of air conditioning, without any modification (reference system). Along the development of the work modifications were introduced for the determination of the impact of these modifications in the system performance. The results showed that the enhancements made possible improve the environmental conditions in the vehicle cabin, reaching environmental conditions stipulated by the OEM - the OEM requirements. Besides, the use of a compressor with pistons with variable displacement presented reduction of fuel consumption around 5% in relation to the compressor with pistons with fixed displacement.

Key-words: Vehicular acclimatization system, air conditioning, refrigeration cycle, thermal comfort.

Resumo.

Cada vez mais a indústria automotiva mundial busca novas tecnologias para melhorar a vida dos passageiros nos veículos, otimizar o consumo de combustível e minimizar a emissão de poluentes. No presente trabalho foi realizado estudo de aprimoramentos em sistema de climatização veicular para melhoria de condições ambientais de cabine e redução do consumo de combustível. O estudo abrangeu aprimoramentos tanto na caixa de ar quanto no ciclo de refrigeração e foi realizado em um modelo de veículo classificado como uma perua off-road, com motor bi-combustível de 1600 cm³, dotado de sistema de climatização com capacidade de 1 TR (usual neste tipo de automóvel). Os testes de desempenho do sistema de climatização foram executados inicialmente com o sistema convencional de ar condicionado, sem nenhuma modificação (sistema de referência). Ao longo do desenvolvimento do trabalho algumas modificações foram introduzidas para que se pudesse determinar o impacto que estas modificações teriam no desempenho do sistema. Os resultados mostraram que os aprimoramentos possibilitaram melhorar as condições na cabine do veículo, atingindo-se as condições ambientais estipuladas pela montadora – os requerimentos da montadora. Além disto, a utilização de compressor com pistões de deslocamento variável apresentou redução de consumo de combustível em torno de 5% em relação ao compressor com pistões de deslocamento fixo.

Palavras- chave: Sistema de climatização veicular, ar condicionado, ciclo de refrigeração, conforto térmico.

Artigo extraído do trabalho de conclusão de curso: “Aprimoramentos em sistema de climatização veicular para melhoria de condições ambientais de cabine e redução no consumo de combustível”, de Marcelo Blanco Bolsonaro de Moura, apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Automotiva (Mestrado Profissionalizante) sob a orientação do Prof. Dr. Arlindo Tribess.

1. INTRODUÇÃO

No início do século XX, quando Henry Ford lançou os primeiros veículos fabricados em uma linha de produção em massa, os desejos e as necessidades dos consumidores daquela época eram muito diferentes das necessidades atuais. Os veículos tinham como principal função transportar as pessoas de uma forma mais rápida do que os meios de transporte disponíveis. Alguns itens de conforto e segurança, que estão disponíveis hoje, não eram nem conhecidos e, mesmo características como consumo de combustível ou emissões de poluentes, não eram considerados pela indústria automobilística da época. Com o passar dos anos as necessidades dos consumidores foram mudando. Os antigos projetos dos veículos já não mais atendiam a essas necessidades e novos itens de conforto foram sendo introduzidos nos veículos.

No caso de sistemas de climatização o primeiro sistema desenvolvido para automóveis surgiu no início dos anos de 1930 nos Estados Unidos, e foi adaptado em um Cadillac pela C&C Kelvinator Co. no Estado do Texas, EUA. Tratava-se de um sistema independente que possuía uma capacidade de refrigeração de 0,37 kW sendo alimentado por um motor de combustão interna movido a gasolina com 1,1 kW de potência. Os sistemas por compressão de vapor começaram a ser desenvolvidos pela General Motors em 1933 e utilizavam como fluido refrigerante o R12. O primeiro sistema de climatização automotiva original de fábrica foi lançado pela Packard Motor Car, que possuía além do sistema de refrigeração também um sistema de aquecimento. Somente em 1941 a General Motors introduziu o sistema de climatização original de fábrica na sua linha de veículos Cadillac (Bhatti, 1999).

A partir da década de 1970 a destruição da camada de ozônio foi atribuída em grande parte aos compostos clorofluorcarbonados (CFC), como o R12, culminando com a assinatura do protocolo de Montreal em 1981, determinando o banimento progressivo da produção de refrigerantes que continham CFC (Bhatti, 1997).

Devido a essa exigência a indústria automotiva mundial teve que buscar novas soluções para os seus sistemas de climatização e foi a partir dos anos de 1990 que se iniciou a substituição dos sistemas de climatização com R12 pelos sistemas com R134a, que é utilizado até os dias de hoje. Devido a algumas incompatibilidades de lubrificantes e vedações, algumas mudanças foram feitas para evitar a contaminação do sistema pelo uso do fluido refrigerante incorreto, especialmente nas áreas de serviços e conversão de sistemas, causando a necessidade da criação de algumas normas específicas para esse setor como, por exemplo, a SAE-J2197 (SAE, 1997), SAE-J1732 (SAE, 1998), SAE-J639 (SAE, 1999a), SAE-J2210 (SAE, 1999b).

Atualmente as discussões concentram-se no efeito estufa dos fluidos refrigerantes. Tendo em vista que o potencial de aquecimento global do R134a não é nulo, existem diversos estudos de qual seria o melhor substituto para este fluido refrigerante e se a sua substituição é realmente necessária.

Paralelamente, a redução do consumo de combustível encontra grande interesse não só em função dos custos do petróleo estarem aumentando a cada ano que passa e de ser um combustível finito, mas também porque atua diretamente na diminuição da emissão de poluentes.

Com o desenvolvimento do presente trabalho foi realizado estudo de aprimoramentos em sistema de climatização para melhoria de condições ambientais de cabine e redução do consumo de combustível. O estudo abrangeu aprimoramentos tanto na caixa de ar quanto no ciclo de refrigeração e foi realizado em um modelo de veículo classificado como uma perua off-road, com um motor bi-combustível de 1600 cm³, dotado de sistema de climatização com capacidade de 1 TR (usual neste tipo de automóvel).

O principal fator na escolha deste veículo na realização do presente trabalho é o fato de ser o veículo mais importante em termos de vendas e lucro para a montadora na qual o autor trabalha e que, ainda, utiliza sistema de climatização com compressor de deslocamento fixo. Além disto, o sistema de climatização dessa perua é idêntico ao de um outro veículo de menor categoria, o que possibilita que os aprimoramentos realizados na perua possam ser implementados neste outro veículo com algumas pequenas adaptações.

Para a avaliação do impacto dos aprimoramentos foram realizados testes de desempenho do sistema de climatização com o veículo em câmara climatizada, na obtenção de condições ambientais de cabine estipuladas pela montadora, e de redução no consumo de combustível.

2. CONFORTO TÉRMICO EM AUTOMÓVEIS

Durante a evolução da raça humana os ambientes nos quais vivemos vem sendo constantemente modificados. Essas modificações buscam adaptar os ambientes às necessidades dos que ali vivem. A busca por uma melhor qualidade de vida vem sendo caracterizada pelo desenvolvimento e otimização de sistemas para torna-los mais eficientes, de menor custo e menos poluidores, se possível.

Atualmente, aspectos de segurança e conforto têm se tornado critérios tão importantes na escolha e compra de um veículo quanto aqueles relacionados ao custo e desempenho do veículo (Gameiro da Silva, 2002). Este fato tem contribuído em muito para aumentar o interesse na avaliação de condições de conforto de passageiros em veículos automotivos impondo às montadoras a utilização de métodos de avaliação de conforto que traduzam o mais próximo possível a sensação dos ocupantes.

Segundo a definição apresentada na norma ASHRAE 55:2004, conforto térmico é “um estado de espírito que reflete satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa”. Ou seja, muitas vezes mesmo estando em uma condição termicamente neutra, algumas pessoas ainda não estarão confortáveis termicamente, como pode se visto na tabela 2.1 de escala de sensação térmica; onde o voto médio estimado (PMV - predicted mean vote) igual a zero significa neutralidade térmica, mas mesmo assim o percentual de insatisfeitos (PPD - predicted percentage of dissatisfied) é de 5%.

A tabela 2.1 surgiu a partir de estudos feitos por Fanger (1972) nos quais, além de obter uma equação de conforto térmico baseado no balanço térmico do corpo humano, também foi obtido um modelo baseado no voto das pessoas com relação ao ambiente térmico em que se encontravam; com o voto médio estimado (PMV) variando de muito frio (-3) até muito quente (+3).

Tabela 2.1 - Sensação térmica, PMV e PPD (Fanger, 1972).

<i>Escala de sensação térmica</i>							
	-3	-2	-1	0	1	2	3
PMV	muito frio	frio	leve sensação de frio	neutro	leve sensação de calor	quente	muito quente
PPD	100%	78%	26%	5%	26%	78%	100%

A partir dos resultados de Fanger (1972) e como uma forma mais simples de se checar se uma pessoa pode estar termicamente confortável em um determinado ambiente, a norma ISO 7730:1994 apresenta tabelas, correlacionando o tipo de vestimenta, diferentes atividades e condições ambientais.

Quando se está falando de conforto térmico não se pode deixar de observar que para uma pessoa estar confortável termicamente é necessário que ela esteja em conforto para o corpo como um todo e também nas diferentes partes do corpo, sem grandes variações de temperatura entre os pés e a cabeça, por exemplo (ASHRAE, 2005).

Um grande problema encontrado quando o assunto é conforto térmico em automóveis é que a maioria dos estudos e avaliações foram feitos para ambientes homogêneos ou para ambientes com variações nas condições ambientais, mas que ainda possam ser considerados homogêneos. Este fato dificulta e até mesmo impossibilita a utilização destes estudos e avaliações para determinar o conforto térmico dentro de um veículo automotivo. Esta dificuldade decorre do fato dos ambientes em veículos automotivos (automóveis, ônibus, trens, aviões, etc.) serem fortemente não homogêneos.

Dentro de um automóvel ocorrem gradientes de temperatura e velocidade do ar significativos, com grandes assimetrias de temperatura e transientes durante o processo de resfriamento e aquecimento. Em um automóvel as saídas de ar geralmente são pequenas e o espaço confinado prejudica a circulação do ar. Além disso, há uma grande incidência solar e uma isolamento adicional devido aos bancos. Por essas razões, o uso dos índices PMV (ISO 7730:1994) ou de cartas da ASHRAE (ASHRAE 55:2004) não são os mais apropriados (Madsen et al, 1986; Hosni et al, 2003a; Nilsson, 2004).

2.1 Avaliação de conforto térmico em automóveis

Para avaliação de conforto térmico em ambientes não homogêneos, onde diferentes partes do corpo experimentam diferentes condições térmicas, o conceito mais amplamente utilizado (Nilsson, 2004) é o de temperatura equivalente, definida como “a temperatura uniforme de um ambiente imaginário com velocidade do ar igual a zero, no qual a pessoa troca a mesma quantidade de calor sensível, por radiação e convecção, que no ambiente real”.

A temperatura equivalente também é o índice de conforto térmico mais utilizado pela indústria automobilística (Gameiro da Silva, 2002; Martinho et al., 2004; Nilsson, 2004) e a norma ISO 14505-2:2006 prevê a sua utilização. Em alguns trabalhos da literatura aparecem algumas variações com relação à denominação da temperatura equivalente: ELT – equivalent living-room temperature (temperatura equivalente do “ambiente”) e EHT – equivalent homogeneous temperature (temperatura equivalente homogênea), mas o conceito é o mesmo.

Para se fazer avaliação de conforto térmico em automóveis, e aplicar o conceito de temperatura equivalente, são utilizados manequins térmicos ou manequins com sensores aquecidos (ISO 14505-2:2006); que possibilitam checar o desempenho do sistema de climatização em conjunto com o ambiente do automóvel e verificar se existem regiões onde se poderá ter problemas de resfriamento ou aquecimento em excesso.

É importante destacar que a melhor e mais confiável maneira de se avaliar o desempenho do sistema de climatização em conjunto com o ambiente do automóvel seria utilizar a resposta subjetiva de grupos de pessoas submetidas às condições térmicas no interior deste veículo (Nilsson, 2004). Mas este tipo de avaliação é muito cara, consome muito tempo além, também, da necessidade de se construir um protótipo do sistema a ser analisado.

2.2 Avaliação de conforto térmico realizado pelas montadoras

Algumas montadoras tratam o sistema de climatização como uma caixa preta isolada e passam a responsabilidade pelo projeto e avaliação do desempenho do sistema para um parceiro, que muitas vezes faz o projeto sem ter grande conhecimento dos outros subsistemas que interagirão com este sistema. Outro ponto importante a ser destacado é que as especificações passadas pelas empresas montadoras de veículos nem sempre deixam muita liberdade para o projeto do sistema de climatização. Limitações como potência máxima consumida pelo sistema de climatização, limitações de peso e espaço para dutos resultam em desempenhos abaixo do esperado ao final do projeto. Esta multiplicidade de técnicas de projeto e avaliação de conforto térmico resulta em um sem número de padrões e critérios utilizados; o que traz problemas para os fornecedores de sistemas de climatização veicular.

Tentativas de uniformizar critérios de avaliação de conforto em automóveis foram realizadas por pesquisadores da Visteon em conjunto com a Universidade do Kansas, no desenvolvimento de métodos quantitativos para avaliação de conforto térmico em condições transitórias (Hosni, et al., 2003a e 2003b), e pela Delphi, no desenvolvimento de um método baseado na temperatura equivalente homogênea (EHT) e em um modelo fisiológico do corpo humano (Han e Huang, 2004).

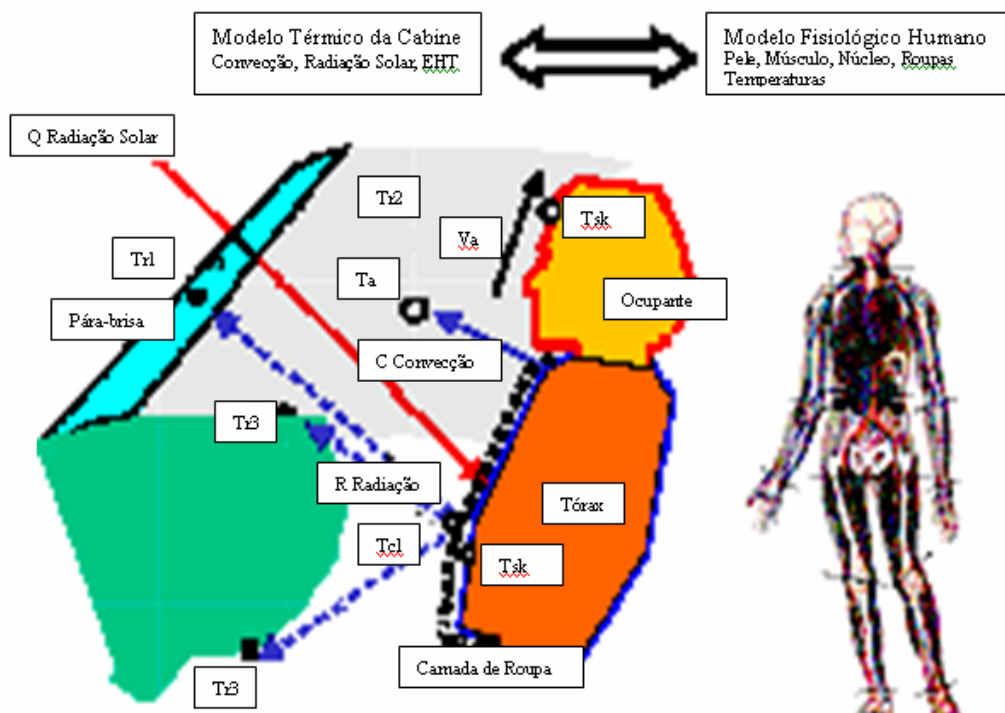


Figura 2.1 – Representação esquemática do problema analisado (Han e Huang, 2004).

Os resultados do modelo para EHT foram comparados com dados de testes subjetivos em ensaios realizados pelas montadoras com 16 pessoas (qualificadas) e em 16 diferentes veículos. Embora os autores Han e Huang (2004) afirmem que o modelo para EHT tenha produzido excelente concordância com os dados dos testes subjetivos (tanto para condições de inverno quanto de verão), os mesmos autores também dizem que o índice EHT ainda não é aceito totalmente pelas montadoras norte-americanas (para as quais a aplicação do índice se destinava).

Assim, cada montadora acaba desenvolvendo e/ou utilizando seus próprios métodos de avaliação de condições ambientais de cabine que possam propiciar condições de conforto térmico. No Brasil não poderia ser diferente. Para a avaliação do conjunto veículo e sistema de climatização são utilizados valores de temperaturas pré-estabelecidas que devem ser atingidas nos difusores e no interior do veículo climatizado em condições padronizadas de teste – os “requisitos da montadora”.

3. SISTEMA DE REFERÊNCIA

Na figura 3.1 é apresentado o sistema de climatização original montado no veículo, isto é, o sistema de referência utilizado na realização dos testes para avaliação dos aprimoramentos no sistema de climatização para melhoria das condições ambientais na cabine e redução do consumo de combustível.

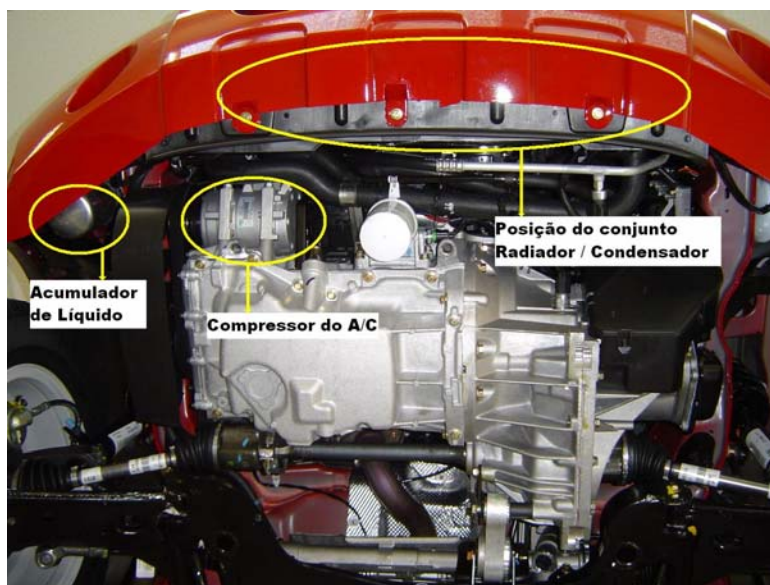


Figura 3.1 – Sistema de referência utilizado nos testes.

3.1 O veículo utilizado nos testes

O veículo utilizado nos testes é um veículo caracterizado como um perua off-road que possui um desing inspirado nas SUV's (Sport Utility Vehicle) norte americanas. Esse tipo de veículo tem um grande apelo perante os consumidores e é o principal veículo da montadora. O público alvo para esse tipo de veículo vai desde o jovem, que gosta de aventura, até um executivo que preza pelo conforto, pois existem versões de menor preço, 1.6L Flex Fuel 4x2 com transmissão manual, versões intermediárias, 2.0L Gasolina 4x4 com transmissão manual, até as versões top de linha, 2.0L Gasolina 4x2 com transmissão automática.

3.2 O sistema de climatização

A seguir são apresentados os componentes do sistema de climatização veicular de 1 TR utilizado nos testes: o ciclo de refrigeração, o sistema de aquecimento, o sistema de distribuição de ar e o sistema de controle.

- Ciclo de refrigeração

O ciclo de refrigeração trabalha com um compressor swashplate de 10 pistões fixos, exemplificado na figura 3.3, com 154cm³ de volume interno, acionado por uma embreagem magnética com polia de 145mm. O condensador é de alumínio, de fluxo paralelo com tubos planos e aletas tipo “louver”, exemplificado na figura 3.9. As dimensões do condensador são 580mm x 328mm x 10mm. Esse condensador possui somente uma ventoinha montada atrás do conjunto condensador/radiador denominada pela indústria automotiva como

pusher fan. O evaporador é do tipo de placas planas e aletas tipo louver, constituído de pares de placas de alumínio estampadas de maneira a formar os canais por onde circula o fluido refrigerante, com fileiras de aletas finas de alumínio soldadas entre os pares de placas por um processo de brasagem, exemplificado na figura 3.12c. As dimensões são 220mm x 210mm x 58mm. O sistema de referência trabalha com um tubo de orifício e por esse motivo o sistema possui também um acumulador de líquido. O fluido refrigerante é o R-134a e o sistema precisa de 570g de fluido refrigerante para operar corretamente.

- Sistema de aquecimento

O sistema de aquecimento é composto basicamente pelo *heater core*, que é de alumínio brasado, com as seguintes dimensões: 150mm x 230mm x 42mm.

- Sistema de distribuição de ar

O sistema de distribuição de ar é o mais simples dentre todos os sistemas disponíveis no mercado. Possui quatro difusores localizados no painel, sendo dois centrais e dois laterais, com demisters posicionados logo acima dos difusores laterais, com duas saídas de ar para o assoalho dianteiro, uma para o lado esquerdo e a outra para o lado direito e uma saída de ar para o pára-brisa. O botão de ajuste de distribuição de ar possibilita direcionar o ar para mais de uma saída. Por exemplo, o ar pode sair pelos difusores do painel e para o assoalho simultaneamente, possibilitando melhorar a distribuição de ar no interior da cabine. Nesse sistema todos os acionamentos são feitos por meio de cabo, o que muitas vezes pode comprometer o bom funcionamento do sistema, pois caso algum cabo seja montado fora do seu roteiro padrão, isso acarretará um aumento de esforço significativo para a operação do mesmo, sem contar que dependendo do cabo que foi montado incorretamente poderá até comprometer o bom funcionamento daquela operação. Por exemplo, caso o cabo do recirculador seja montado de forma incorreta, provavelmente a vedação da portinhola que veda a entrada do ar externo será comprometida.

- Sistema de controle

Como o dispositivo de expansão do sistema de referência é o tubo de orifício, os controles têm que ser feitos por meio das pressões de trabalho e, por esse motivo, o sistema trabalha com dois pressostatos: um pressostato de alta, localizado na linha de alta pressão, e um pressostato de baixa, localizado na linha de baixa pressão. Isso se faz necessário, pois, quando o sistema está trabalhando em um local com temperatura ambiente muito elevada, estará trabalhando com carga máxima, fazendo com que as pressões internas sejam altíssimas e para não comprometer nenhum dos componentes do sistema o pressostato de alta desliga o compressor. O oposto também pode acontecer, pois, quando a temperatura ambiente não é tão elevada e o sistema está ligado, as pressões internas do sistema ficam bem baixas e, caso atinjam uma pressão pré-determinada, o pressostato de baixa desligará o compressor para proteger os componentes do sistema.

4. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Os testes de desempenho do sistema de climatização veicular e de consumo de combustível foram realizados em uma câmara climatizada, apresentada na figura 4.1; que é o procedimento comumente utilizado na indústria automotiva. As características da câmara climatizada são: dimensões: 6.0 x 12.0 x 3.0 (m); controle de temperatura de 15°C até 50°C; dinamômetro com potência máxima de até 150 HP; velocidade máxima de 160 km/h; ventilador frontal com um fluxo de ar capaz de simular uma velocidade de 100 km/h; sem controle de umidade; sem carga solar.



Figura 4.1 Veículo instrumentado em uma câmara climatizada com dinamômetro

No caso dos testes de desempenho do sistema de ar condicionado existem valores pré-determinados de temperatura apresentados na Tabela 4.1, que foram obtidos por meio de uma média calculada de ensaios feitos com vários tipos de veículos de várias montadoras e de várias categorias. Esses valores são parâmetros (requisitos) da empresa para testes em sistemas de climatização e não são valores compartilhados por todas as montadoras.

Tabela 4.1 Temperaturas padrão da montadora para avaliação do desempenho de sistema de ar condicionado (A/C)

Desempenho de sistema de ar condicionado (A/C)			
Velocidade (km/h)	Tempo (min.)	Posição	Temperatura (°C)
50	10	Média dos difusores	15
	30	Altura da cabeça (Dianteiro)	23
	30	Altura da cabeça (Traseiro)	24
100	30	Média dos difusores	6
		Altura da cabeça (Dianteiro)	18
		Altura da cabeça (Traseiro)	19
Marcha lenta	10	Média dos difusores	14
		Altura da cabeça (Dianteiro)	24
		Altura da cabeça (Traseiro)	25

Foram realizados testes a 100 km/h, 50 km/h e em marcha lenta, por 30 minutos em cada condição respectivamente, sendo que para se ter uma maior confiabilidade nos resultados dos testes cada condição de teste foi repetida três vezes e os valores que foram considerados são a média dos valores obtidos nos três ensaios. O equipamento utilizado para aquisição dos dados do interior da cabine foi um data logger de 20 canais e capacidade de aquisição de dados de 1 Hz. Os termopares utilizados foram do tipo T, com incerteza de medição de $\pm 0,5$ °C.

Os testes de consumo de combustível foram realizados em um dinamômetro simulando três condições de teste: condição de tráfego em cidade, condição de estrada a 80km/h e em velocidade estabilizada a 120km/h. As medições foram feitas de acordo com a norma brasileira NBR 7024:1989

5. TESTES REALIZADOS

O primeiro passo no desenvolvimento do trabalho foi avaliar o desempenho do sistema de referência para que se pudesse identificar problemas no sistema de climatização que estivessem comprometendo o seu desempenho.

5.1 Testes preliminares

O ponto de partida para se avaliar o sistema de climatização é medir o fluxo de ar que o ventilador é capaz de fornecer em todas as condições possíveis e verificar o funcionamento dos extratores da carroceria medindo a pressão dentro da cabine durante todas as condições de testes de desempenho do sistema. Os testes realizados mostraram que o ventilador estava operando normalmente.

5.2 Teste de desempenho com o sistema de referência

A tabela 5.1 apresenta a média dos valores obtidos nos três ensaios executados utilizando o sistema de referência. Analisando-se a tabela 5.1, verifica-se que o sistema está apresentando valores de temperaturas cerca de 3,5 °C acima do que é requerido, necessitando de intervenções que propiciem uma menor temperatura nos difusores, para poder atender os valores pré-determinados.

5.3 Intervenções no sistema de referência e resultados de testes de desempenho

A. Intervenções na distribuição de ar

Por se tratar de solução mais simples, inicialmente procurou-se resolver os problemas relacionados à mistura do ar e de isolamento dos dutos de distribuição até os difusores:

- a) a primeira proposta consistiu em isolar os dutos, que distribuem o ar para todos os difusores, com uma manta térmica.
- b) a segunda proposta, um pouco mais trabalhosa, consistiu em melhorar a vedação da válvula que faz a separação entre o *heater core* e o evaporador.

Tabela 5.1 Resultados dos testes de desempenho do sistema de referência.

Ponto de Medição	Condição do teste	Requerimento (Tabela 4.1)	Resultado dos Testes	Diferença
Temperatura no difusor (°C)	10 minutos @ 50 km/h	15	18,3	3,3
	30 minutos @ 100 km/h	6	10,0	4,0
	10 minutos em Marcha Lenta	14	17,8	3,8
Temperatura na altura da cabeça dianteiro (°C)	30 minutos @ 50 km/h	23	26,4	3,4
	30 minutos @ 100 km/h	18	21,7	3,7
	10 minutos em Marcha Lenta	24	26,8	2,8

Os resultados dos testes com as propostas acima são apresentados na tabela 5.2, onde pode ser observada uma melhoria de desempenho, porém não o suficiente para atender ao requerido. Embora houvesse troca de calor nos dutos e problema de recirculação de ar quente na caixa de ar, não eram estas as únicas causas para o sistema de climatização apresentar condições fora do determinado pelo requerimento.

Tabela 5.2 Resultados de temperaturas na saída dos difusores após modificações na mistura do ar e nos dutos de distribuição até os difusores.

Condição de Teste	Requerimento (°C)	Temperaturas Obtidas (°C)
Veículo sem modificações		
10 minutos @ 50 km/h	15	18,3
30 minutos @ 100 km/h	6	10,0
10 minutos em Marcha Lenta	14	17,8
Veículo com os dutos Isolados (Fig.6.1)		
10 minutos @ 50 km/h	15	18.0
30 minutos @ 100 km/h	6	8.9
10 minutos em Marcha Lenta	14	16.1
Veículo com a vedação na válvula (Fig. 6.2)		
10 minutos @ 50 km/h	15	17.1
30 minutos @ 100 km/h	6	7.6
10 minutos em Marcha Lenta	14	15.1

B. Intervenções no ciclo de refrigeração

Um dos pontos levantados como um ponto falho no sistema foi o fato do evaporador ser pequeno para a categoria de veículo no qual foi utilizado. Assim, duas propostas de evaporador foram testadas nesse trabalho. Para facilitar a identificação de cada uma das propostas, estas foram consideradas como “ALTA PERFORMANCE” e “MÉDIA PERFORMANCE”, diferenciando-se pelas dimensões do evaporador e, conseqüentemente, pela capacidade de troca de calor. As dimensões das duas propostas são apresentadas na Figura 5.1

Adicionalmente, resolveu-se testar também alterações em componentes do ciclo de refrigeração:

- a) A primeira foi a mudança do dispositivo de expansão do tubo de orifício por uma válvula de expansão termostática ou válvula TXV (Thermostatic Expansion Valve), como também é conhecida. Um ponto importante a ser considerado é que a migração de um tubo de orifício para uma válvula TXV exigiu

algumas mudanças nas linhas de pressão do sistema, na quantidade de fluido refrigerante, retirada do acumulador de líquido e inclusão do separador de vapor.

- b) A segunda proposta foi a de trocar o compressor do tipo “swashplate”, com pistões de deslocamento fixo, do sistema de referência, por um compressor também “swashplate”, mas com pistões com deslocamento variável, de 136cc³.

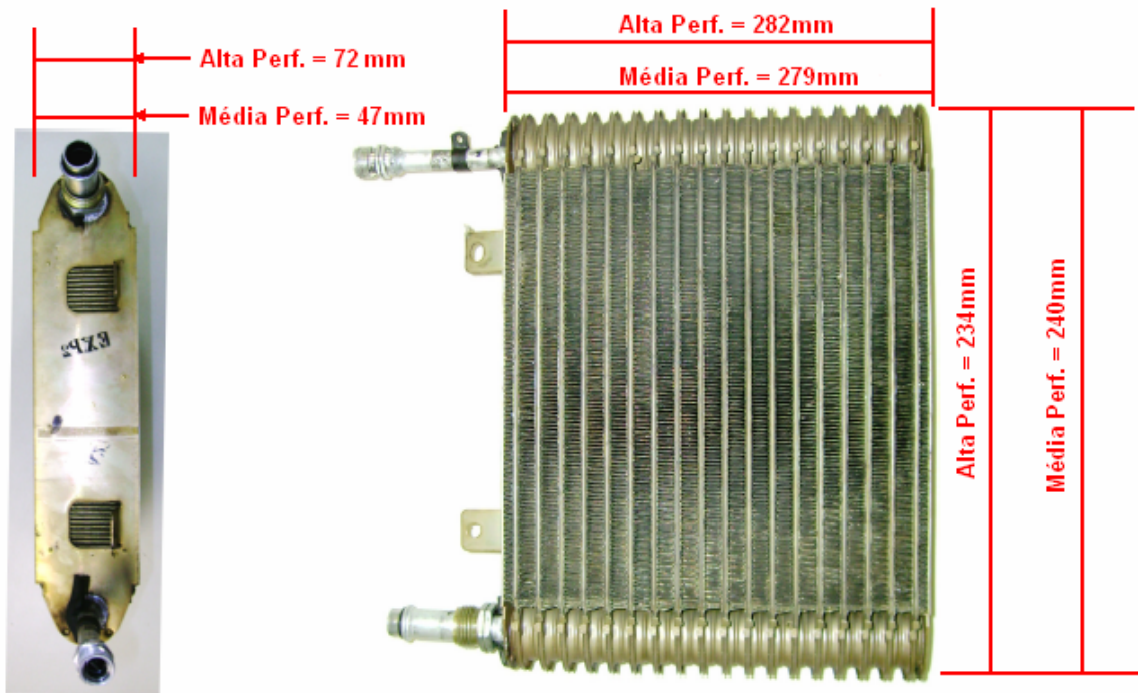


Figura 5.1 Dimensões dos evaporadores testados.

A tabela 5.2 traz um resumo dos resultados de todas as propostas que foram testadas, sendo que o que está descrito como “NORMAL DE PRODUÇÃO” foi mantido do sistema de referência e o que está descrito como “NOVO” ou “MUDAR PARA” foi modificado por outro componente, conforme descrito anteriormente.

Tabela 5.2 Propostas de alterações no ciclo de refrigeração.

Proposta	Evaporador	Válvula de Expansão	Compressor
A	Normal de Produção	Mudar para TXV	Normal de Produção
B	Novo - Alta Performance	Normal de Produção	Normal de Produção
C	Novo - Alta Performance	Mudar para TXV	Normal de Produção
D	Novo - Alta Performance	Mudar para TXV	Novo - Pistão Variável
E	Novo - Média Performance	Mudar para TXV	Normal de Produção
F	Novo - Média Performance	Mudar para TXV	Novo - Pistão Variável

Uma vez definidas as propostas, os testes foram realizados de acordo com o procedimento descrito no item 4 e os resultados dos testes são apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 Resultados dos testes com modificações no ciclo de refrigeração

Condição de Teste e "Local da Medição"	Resultados dos Testes					
	A	B	C	D	E	F
10 minutos @ 50 km/h - "1"	16,7	16,0	14,2	12,7	17,1	16,8
30 minutos @ 100 km/h - "1"	9,0	6,5	5,0	6,4	9,2	10,0
10 minutos em Marcha Lenta - "1"	17,1	15,1	12,4	10,8	16,0	14,7
30 minutos @ 50 km/h - "3"	25,4	24,9	22,9	23,1	25,9	25,0
30 minutos @ 50 km/h - "4"	27,1	25,9	24,4	23,9	26,9	26,6
30 minutos @ 100 km/h - "3"	20,8	19,9	18,0	18,8	20,7	21,0
30 minutos @ 100 km/h - "4"	23,1	20,9	19,6	20,7	22,6	22,9
10 minutos em Marcha Lenta - "3"	26,6	25,5	23,6	22,6	25,7	25,0
10 minutos em Marcha Lenta - "4"	28,2	26,4	24,6	23,6	27,3	26,1

Como pode ser observado na tabela 5.3, os melhores resultados foram obtidos com as propostas C e D, que apresentam temperaturas que atendem ao requerimento da montadora na maioria dos pontos pré-determinados. O grande problema é que ambas as propostas necessitam de grandes modificações no sistema, conforme descrito anteriormente. O fato da proposta C ter apresentado um desempenho um pouco melhor que a proposta D se dá pelo fato do veículo estar calibrado para trabalhar com o compressor “NORMAL DE PRODUÇÃO”, fazendo com que o desempenho do compressor com deslocamento variável fosse um pouco comprometido em algumas situações.

5.3 Resultados de testes de consumo de combustível

Os testes de consumo de combustível foram realizados para comparar os resultados utilizando compressor de pistões com deslocamento fixo e com deslocamento variável. A tabela 5.4 traz os valores dos testes de consumo, que mostram que em todas as situações de teste o compressor com deslocamento variável fez com que o consumo de combustível fosse menor.

Tabela 5.4 Resultados dos testes de consumo de combustível (km/litro).

Configuração do teste	Tráfego em Cidade			Tráfego em Estrada			Consumo Combinado		
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Veículo Normal de Produção com o A/C Desligado	11,157	11,071	11,114	15,689	15,768	15,729	13,196	13,184	13,19
Veículo Normal de Produção com o A/C Ligado	9,581	9,633	9,607	14,278	14,152	14,215	11,695	11,667	11,681
Veículo com o Compressor Variável	10,184	10,114	10,149	14,870	14,637	14,757	12,293	12,150	12,222
Melhoria			5,34%			3,65%			4,42%

6. CONCLUSÕES

Nas propostas testadas pode-se verificar que a proposta que teve o melhor desempenho foi a proposta D, com alterações realizadas no evaporador, no dispositivo de expansão e no compressor. Sem dúvida, esta é uma proposta que, se forem comparados os valores individuais dos componentes, será mais cara do que o sistema de referência. Porém, é necessário verificar que, com as mudanças propostas, será preciso uma quantidade menor de fluido refrigerante (R-134a), que é algo bastante caro, possivelmente será possível eliminar os pressostatos, pois os controles serão feitos pela temperatura e a própria TXV consegue controlar o fluxo de fluido que está indo para o evaporador, sem contar os benefícios que os clientes terão em termos de desempenho do sistema, dirigibilidade e consumo de combustível.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT/NBR 7024. Veículos rodoviários automotores leves: medição do consumo de combustível. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1989.
2. ANSI/ASHRAE 55. Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, New York, 2004.
3. ASHRAE, Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc, New York, 2005.
4. Bhatti, M. S. A critical look at R-744 and R-134a mobile air conditioning systems. SAE paper number 970527, Society of Automotive Engineers, 1997.
5. Bhatti, M. S. Riding in Comfort: Part II. ASHRAE Journal, September, p.p. 44-50, 1999.
6. Fanger, P. O. Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering, McGraw-Hill, New York, 245 p, 1972.
7. Gameiro da Silva, M. C. Measurements of Comfort in Vehicles. Meas. Sci. Technol. 13 (2002) R41 – R60 PII: S095-0233(02)27461-5, 2002.
8. Han, T.; Huang, L. A Model for Relating a Thermal Comfort Scale to EHT Comfort Index. SAE Technical Paper Series 2004-01-0919, Detroit, 2004.
9. Hosni, M. H., Guan, Y., Jones, B. W.; Giolda, T. P. Investigation of Human Thermal Comfort Under Highly Transient Conditions for Automotive Applications – Part 1: Experimental Design and Human Subject Testing Implementation. ASHRAE Transactions KC-03-13-1. 2003a

10. Hosni, M.H., Guan, Y., Jones, B. W.; Giolda, T. P. Investigation of Human Thermal Comfort Under Highly Transient Conditions for Automotive Applications – Part 2: Thermal Sensation Modeling. ASHRAE Transactions KC-03-13-1. 2003b
11. ISO 7730 Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions of thermal comfort, (ISO 7730 - 1994). International Organization for Standardization, Geneva, 1994.
12. ISO 14505-2. Ergonomics of the thermal environment – Evaluation of thermal environment in vehicle – Part2: Determination of equivalent temperature. International Organization for Standardization, Geneva, 2006.
13. Madsen, T. L.; Olesen, B.; Reid, K. New methods for evaluation of the thermal environment in automotive vehicles, ASHRAE Transactions 92 part 1B, 38-54. 1986.
14. Martinho, N. A. G.; Silva, M. C. G.; Ramos, J. A. E. Evaluation of thermal comfort in a vehicle cabin. Proc. Instn Mech. Engrs. J. Automobile Engineering. Vol. 218 Part D, 2004.
15. Nilsson, H.O. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation modes. Stockholm. Tese (Doutorado) – Department of Technology and Built Environment – University of Gävle, Sweden. 202p, 2004.
16. SAE-J2197, HFC-134a (R134a) Service Hose Fittings for Automotive Air-conditioning Service Equipment. Society of Automotive Engineers, 1997.
17. SAE-J639, Safety and Containment of Refrigerant for Mechanical Vapor Compression Systems Used for Mobile Air-conditioning Systems. Society of Automotive Engineers, 1999a.
18. SAE-J2210, HFC-134a (R134a) Recovery/Recycling Equipment for Mobile Air Conditioning Systems. Society of Automotive Engineers, 1999b.
19. SAE-J1732, HFC-134a (R134a) Refrigerant Recovery Equipment for Mobile Air Conditioning Systems. Society of Automotive Engineers, 1998.