

José Alberto Ávila

**AR CONDICIONADO AUTOMOTIVO:
CARACTERIZAÇÃO E AVANÇOS TECNOLÓGICOS**

Trabalho de final de curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Automotiva (Mestrado
Profissionalizante)

CONSULTA
FMP-1

São Paulo
2002

José Alberto Ávila

**AR CONDICIONADO AUTOMOTIVO:
CARACTERIZAÇÃO E AVANÇOS TECNOLÓGICOS**

Trabalho de final de curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Automotiva
(Mestrado Profissionalizante)

Orientador:
Arlindo Tribess

São Paulo
2002

Aos meus pais, Flora e Áulio (in memorium),
pelos valores morais transmitidos.
À minha esposa, Cássia, pelo incentivo e amor.
Às nossas filhas, Marcela e Júlia,
pela compreensão pelo que lhes foi roubado pelo estudo.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Prof. Dr. Arlindo Tribess, pela dedicação, desprendimento e paciência durante a orientação.

SUMÁRIO

Lista de Tabelas	
Lista de Figuras	
Lista de Símbolos	
Resumo	
"Abstract"	

1. INTRODUÇÃO	1
2. AR CONDICIONADO AUTOMOTIVO	9
2.1. Introdução	9
2.2. Conforto térmico	10
2.2.1. Desconforto térmico local	14
2.2.2. Avaliação das condições de conforto térmico	14
2.3. Carga térmica	15
2.3.1. Cargas térmicas em veículos automotivos	16
2.3.2. Determinação das cargas térmicas em veículos automotivos	17
2.3.3. Dados de projeto para o cálculo de carga térmica em veículos automotivos	27
2.3.4. Resultados de carga térmica em veículos automotivos	28
2.3.5. Análise dos resultados de carga térmica em veículos automotivos	30
2.4. Sistema de refrigeração	31
2.5. Sistema de distribuição de ar	31
2.6. Otimização dos sistemas	32
3. O SISTEMA DE AR CONDICIONADO AUTOMOTIVO	33
3.1. Introdução	33
3.2. Sistema de refrigeração	33
3.2.1. O ciclo de refrigeração por compressão de vapor	33
3.2.2. A eficiência energética do ciclo por compressão de vapor	35
3.2.3 O ciclo real de compressão de vapor	36
3.2.4 O ciclo de compressão de vapor automotivo	36
3.2.4.1 Compressores	37
3.2.4.2 Condensadores	42
3.2.4.3 Evaporadores	44
3.2.4.4 Dispositivos de expansão	45
3.2.4.5 Fluidos refrigerantes	50
3.3. Sistema de distribuição de ar	51
3.4. Sistema de controle	53

4. AVANÇOS TECNOLÓGICOS	58
4.1. Introdução	58
4.2. Habitáculo	58
4.2.1. Qualidade do ar	59
4.2.2. Controle de ruídos	64
4.2.3. Conforto térmico	67
4.2.3.1. Avaliação do conforto térmico	67
4.2.3.2. Distribuição de ar	70
4.2.3.3. A envoltória do veículo.....	72
4.3. Sistema de refrigeração	82
4.3.1. Compressores	82
4.3.1.1. Compressor caracol "Scroll"	82
4.3.2.3. Compressores lineares	82
4.3.2. Evaporadores	85
4.3.3. Válvula de orifício variável	87
4.3.4. Fluidos refrigerantes	89
5. CONCLUSÃO	94
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Escala de sensação térmica	11
Tabela 2.2	Determinação do voto médio estimado	12
Tabela 2.3	Absortividades para diferentes tipos de pintura e comprimentos de onda	20
Tabela 2.4	Valores de radiação solar (insolação) sobre uma superfície horizontal em condições atmosféricas médias	20
Tabela 2.5	Transmissão da radiação solar para os vidros planos	23
Tabela 2.6	Transmissão da radiação solar para os vidros refletivos metalizados a vácuo	23
Tabela 2.7	Transmissão da radiação solar para o vidro eletrocromico	23
Tabela 2.8	Transmissão da radiação solar para os policarbonatos	24
Tabela 2.9	Resultados de carga térmica para cabine de caminhão	29
Tabela 2.10	Resultados de carga térmica para cabine de ônibus	29
Tabela 2.11	Resultados de simulação de carga térmica em ônibus	30
Tabela 4.1	Propriedades de vidros utilizados em veículos	74
Tabela 4.2	Características de vidros utilizados em veículos	75
Tabela 4.3	Condutividade térmica de gases utilizados em painéis isolantes	79
Tabela 4.4	Quadro comparativo das características dimensionais de evaporadores	86
Tabela 4.5	Condições operacionais utilizadas na comparação de performance dos evaporadores	87
Tabela 4.6	Concentração e sintomas em consequência de inalação de CO ₂	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Construção refrigerado por gelo	2
Figura 2.1	Diagrama psicométrico com a indicação da zona de conforto segundo a norma Ansi/Ashrae 55a/95	13
Figura 2.2	Ganhos de calor em um veículo automotivo	17
Figura 2.3	Troca de valor em elementos opacos com incidência de radiação solar	18
Figura 2.4	Distribuição de energia solar incidente sobre uma superfície transparente	22
Figura 3.1	Disposição dos equipamentos no ciclo de compressão de vapor	34
Figura 3.2	Ciclo Termodinâmico	35
Figura 3.3	Ciclo real de compressão de vapor	37
Figura 3.4	Compressor do tipo "swashplate"	38
Figura 3.5	Compressor "woblleplate" com deslocamento fixo	39
Figura 3.6	Compressor "woblleplate" com deslocamento variável	39
Figura 3.7	Compressor rotativo de palhetas	40
Figura 3.8	Princípio de funcionamento do compressor rotativo de palhetas	40
Figura 3.9	Detalhe da montagem do eixo excêntrico com o pistão rotativo.	41
Figura 3.10	Desenho em detalhe de um compressor com polia acoplada	41
Figura 3.11	Componentes principais da embreagem eletromagnética	42
Figura 3.12	Condensadores de tubos e aletas	42
Figura 3.13	Condensadores de serpentina de tubos planos e aletas tipo "louver".	43
Figura 3.14	Tipos de evaporadores	44
Figura 3.15	Representação esquemática do tubo de orifício	46
Figura 3.16	Vista em corte de um tubo de orifício	47
Figura 3.17	Representação esquemática da válvula termostática	48
Figura 3.18	Vista de uma válvula termostática instalada	48
Figura 3.19	Separador de vapor	49
Figura 3.20	Acumulador de líquido	50
Figura 3.21	Sistema de distribuição de ar em veículo de passeio.	51
Figura 3.22	Sistema de mistura de ar externo e ar recirculado	52

Figura 3.23	Sistema de ventilação	53
Figura 3.24	Esquema do controle de temperatura interna	55
Figura 3.25	Sensor de irradiação solar e localização	56
Figura 3.26	Sensor de temperatura externa e localização	56
Figura 3.27	Controle da velocidade do ar	57
Figura 4.1	Filtro de ar de sistema automotivo	59
Figura 4.2	Filtro de ar posicionado no evaporador	60
Figura 4.3a	Microorganismos encontrados nos filtros de evaporadores	60
Figura 4.3b	Microorganismos encontrados nos filtros de evaporadores	61
Figura 4.4	Condições para o crescimento microbiano	61
Figura 4.5a	Modelo de elemento filtrante fotocatalítico	63
Figura 4.5b	Modelo de elemento filtrante fotocatalítico	64
Figura 4.6	Tipos de ventiladores	66
Figura 4.7	Modelo integrado de ar condicionado	66
Figura 4.8	Receptores de temperatura da pele	68
Figura 4.9	Manequim para a avaliação das condições de conforto térmico em regime transitório	69
Figura 4.10	Exemplo de distribuição do fluxo de ar	70
Figura 4.11	Peça de compósito para fluxo de ar frontal e traseiro	71
Figura 4.12	Ganhos de calor em um veículo	72
Figura 4.13	Transmitância de um vidro ideal	73
Figura 4.14	Comportamento de vidros reflexivos	74
Figura 4.15	Comportamento de vidros reflexivos	75
Figura 4.16	Transmissividade de vidros <i>sungate</i> e convencional	76
Figura 4.17	Composição do vidro <i>sungate</i>	76
Figura 4.18	Representação esquemática do vidro de núcleo gasoso	77
Figura 4.19	Vidros de núcleo gasoso	77
Figura 4.20	Vidro eletrocromico	78
Figura 4.21	Configuração interna de painéis	78
Figura 4.22a	Revestimento de porta	79
Figura 4.22b	Parte interna do painel	80
Figura 4.22c	Forro do teto	80
Figura 4.22d	Assoalho	80
Figura 4.23	Automóvel na linha de inspeção	81
Figura 4.24	Temperaturas em porta com revestimento comum e	81

	revestimento com painéis isolantes	
Figura 4.25	Compressor "scroll"	83
Figura 4.26	Compressor linear	83
Figura 4.27	Compressor linear com motor elétrico de corrente contínua	84
Figura 4.28	Compressor linear em desenvolvimento	84
Figura 4.29	Evaporador PFE	85
Figura 4.30	Comparação de performance de evaporador	86
Figura 4.31	Válvula de orifício variável	88
Figura 4.32	Detalhes da válvula de orifício variável	89
Figura 4.33	Ciclos de refrigeração com HFC 134a e CO ₂	90
Figura 4.34	Configuração do sistema com CO ₂	91
Figura 4.35	Circuitos de refrigeração instalados em automóveis	92
Figura 5.1	Consumo de energia nos acessórios em um automóvel	95

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área, m^2
a	Constante da Eq. 2.1
c_p	Calor específico a pressão constante, $kJ/kg \cdot ^\circ C$
COP	Coefficiente de performance, adimensional
CT	Carga térmica, W
h	Entalpia específica, kJ/kg
h_c	Coefficiente de transferência de valor por convecção, $W/m^2 \cdot ^\circ C$
I	Radiação direta, W
k	Condutividade térmica, $W/m \cdot ^\circ C$
L	Comprimento, m
M	Metabolismo, W/m^2
\dot{m}	Vazão mássica, kg/s
p	Pressão, kPa (bar)
Q	Vazão volumétrica, m^3/s
\dot{Q}_L	Calor trocado no evaporador, W
\dot{Q}_H	Calor trocado no condensador, W
s	Entropia específica, $kJ/kg \cdot ^\circ C$
T	Temperatura, $^\circ C$
T_a	Temperatura do ar, $^\circ C$
TBS	Temperatura de bulbo seco, $^\circ C$
TBU	Temperatura de bulbo úmido, $^\circ C$
T_H	Temperatura de condensação, $^\circ C$
T_L	Temperatura de evaporação, $^\circ C$
T_o	Temperatura operativa, $^\circ C$
\bar{T}_r	Temperatura média radiante, $^\circ C$
U	Coefficiente global de transferência de calor, $W/m^2 \cdot ^\circ C$
V	Velocidade, m/s
V_a	Velocidade do ar, m/s
\dot{W}	Trabalho de compressão, W
w	umidade absoluta, g/kg
Letras Gregas	
α	absortividade, adimensional

Δp	Diferença de pressão, kPa (bar)
ε	Emissividade, adimensional
ϕ	Umidade relativa (%); diâmetro (m)
η	rendimento, adimensional
ρ	Massa específica, (kg/m^3), refletividade (adimensional)
τ	Transmissividade, adimensional

RESUMO

Desde o momento em que o homem surgiu na Terra, a busca por conforto tem sido uma constante. Na atualidade a sociedade tem se tornado mais exigente em condições e qualidade de vida de forma generalizada. Neste contexto, insere-se a procura por um crescente aumento da utilização de ambientes com temperatura controlada. Assim, sistemas de ar condicionado são aplicados em casas, edifícios, aviões, trens, etc., e o mercado que apresenta forte potencial de demanda nesse particular, tanto pelas exigências dos consumidores, como pelo volume de fabricação, é o setor automobilístico.

Os automóveis de passeio, principalmente, combinam sistemas motorizados para acionamentos em geral, aplicação de condições ergonômicas, incorporação de itens de entretenimento como uma extensão da sala de estar, mostrando preocupação crescente com itens de conforto e aspectos agradáveis para a dirigibilidade e segurança. Neste contexto, o ar condicionado ocupa posição relevante, sendo item praticamente obrigatório em carros de médio e alto padrão e já se inserindo também, de forma notória, em carros de pequena potência como item opcional.

Embora a tecnologia de sistemas de ar condicionado automotivo tenha experimentado um grande avanço com melhoria nas condições de conforto dos usuários de diferentes tipos de veículos, as informações relativas a este setor da engenharia encontram-se bastante dispersas, sendo pequeno o número de profissionais que detém um entendimento mais completo do assunto.

O objetivo deste trabalho é o de reunir em uma única fonte estas informações, com uma abordagem geral de sistemas de ar condicionado automotivo e um enfoque particular em sistemas de ar condicionado do setor automobilístico.

No trabalho é apresentada uma caracterização de sistemas de ar condicionado automotivo, discutindo aspectos relacionados principalmente ao conforto térmico, sistema de refrigeração e sistema de distribuição de ar. Avanços tecnológicos, que tem melhorado o desempenho de sistemas de ar condicionado automotivo nos aspectos ambiental, de consumo de energia e conforto, complementam o trabalho.

ABSTRACT

Since man had appeared on Earth, there have been a constant search for comfort. Nowadays society has become more demanding for a good standard of living in many ways. In this context, the demand for temperature controlled environment is increasing. Thus, air-conditioning systems suit homes, buildings, aircrafts, trains, etc. The automobile market has a strong potential demand for air-conditioning, not only for the consumer demands, but also for the volume of production.

Vehicles mainly have automatic devices, ergonomic conditions, many entertainment items, as for instance, an extension of a living room. This shows an increasing concern about comfortable items, besides pleasant and safe features for driving. In this context, air-conditioning has a relevant place. It is a must for cars from midsize to luxury cars, and an option for low horsepower cars.

Although automobile air-conditioning system technology had experienced a great move forward where drivers have more comfort information about it is spread. Only few professionals hold a deep knowledge of this issue. The objective of this paper is to get such information together related to automobile air-conditioning sector.

This paper shows the features of automobile air-conditioning systems. There is also a discussion about thermal comfort, conditioning system, and air distribution system. Technological advances, that have improved the air-conditioning system performance in terms of environment, comfort, and energy expenses, are also given in this paper.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Ao longo de sua existência, o homem sempre procurou melhorar o seu bem-estar. Foi assim, em seus primórdios, com a busca por cavernas para o seu abrigo. Posteriormente, descobriu e dominou o fogo, sem o que a raça humana dificilmente chegaria a nossos dias. Há provas e descobrimentos arqueológicos que indicam o uso do fogo há mais de 100.000 anos atrás. Dele recebeu calor necessário, proteção contra feras e lhe permitiu também cozer alimentos, tornando estes mais fáceis de serem ingeridos. Desenvolve, nesse contexto primitivo, armas rudimentares para caçar e para a defesa de seu espaço, como apetrechos para a pesca e outras tantas formas de utensílios para facilitar o seu cotidiano. Constrói casas, como as de palafitas. Já se nota, na infância de sua aparição, o desejo latente por qualidade de vida.

O conforto térmico permaneceu, por longo tempo, restrito ao uso do fogo e da aplicação das condições existentes da natureza para encontrar temperaturas mais amenas para sobreviver. Desta forma, o uso de construções à sombra, edificadas, de tal sorte a permitir o aproveitamento das brisas, sempre foi utilizado como uma maneira de desfrutar de conforto. Na antiguidade, há casos de aplicação de tecnologias, destinadas ao bem-estar no dia-a-dia, como é o caso na civilização egípcia onde se tem evidências de utilização de jarros de barro, dotados de certa porosidade, permitindo que, a partir da evaporação da água em sua parte externa, se alcançasse diminuição da temperatura ambiente. Na civilização greco-romana, onde os meios de transporte ganharam grande desenvolvimento, novo impulso se fez notar na questão do conforto, buscando-se temperaturas mais amenas em seus espaços de convivência. Por essa época, os romanos e os gregos retiravam gelo, do cume de altas montanhas, transportando-o para cidades, onde, fragmentado, era armazenado em recipientes, tendo como isolantes madeira e palha. A partir daí, o produto era comercializado, nos diversos pontos de venda.

O imperador romano Varius Avitus ordenou que montanhas de neve fossem carregadas e formassem montes em seu jardim para que a brisa natural pudesse ser resfriada e atingisse os seus aposentos (NAGENGAST, 1999)

Esta situação de se utilizar gelo e neve, obviamente nunca produziu uma evidência arqueológica, embora esta situação tenha sido verificada a partir de relatos, gravuras, textos, etc., e foi considerada a única fonte de conforto térmico refrigerado até o século XIX.

Em 1825, Frederic Tudor começou o transporte de gelo em navios para o combate à epidemia de febre amarela, e em muitas regiões e cidades dos EUA eram mantidos estoques de gelo para uso médico. Mais tarde o uso do gelo para proporcionar conforto térmico foi estendido às construções. Um dos primeiros casos deste tipo foi uma escola em Scranton, EUA, em 1901, onde um auditório para 1.400 pessoas foi mantido com temperaturas mais amenas, circulando-se 85 milhões de litros de ar por hora sobre blocos de gelo. A configuração empregada é ilustrada na Fig. 1.1.

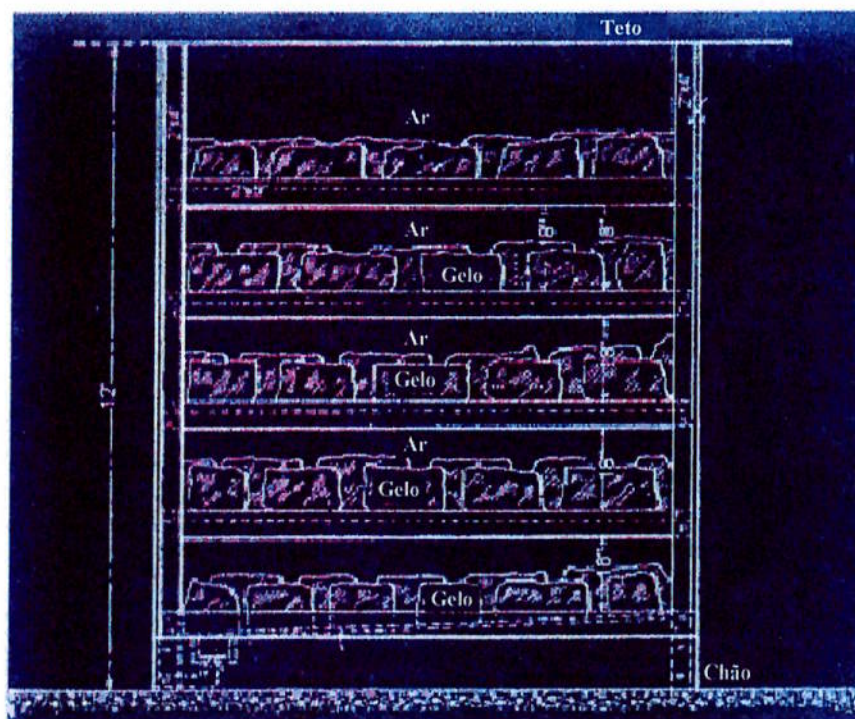


Figura 1.1 – Construção resfriada por gelo (NAGENGAST, 1999)

Com o uso de gelo foi possível manter uma diferença de temperatura interna em relação à externa de cerca de 9°C. E curiosamente, o gelo transportado nos navios, deu início à utilização da refrigeração para obtenção de conforto térmico em navios e construções.

A primeira máquina para a fabricação de gelo utilizando a compressão a vapor foi construída por Alexander Twinning, em 1856, nos EUA. Em 1859, Ferdinand Carre introduziu o uso da amônia em ciclos de absorção com bombeamento da solução para o trocador de calor. (SILVARES, 1966)

Logo após, Charles Tellie, na França em 1869, produzia ar seco para manter a levedura de cerveja a temperatura constante sem o uso de gelo, a partir de uma máquina de compressão a vapor. Importantes avanços ocorreram em 1870 com David Boyle, que desenvolveu uma máquina para produção de gelo, utilizando ciclo com amônia, e Raoul Pictet que desenvolveu uma outra com dióxido de enxofre como fluido refrigerante. Essas máquinas eram acionadas com turbinas a vapor. Por volta de 1890, com a disponibilização do motor elétrico, muitas máquinas de refrigeração puderam ser compactadas e utilizadas em aplicações comerciais, tais como mercado de carne e passaram a ser disponibilizadas em vários tamanhos e capacidades.

No século XX o impacto do ar condicionado se fez sentir em muitos aspectos da sociedade. Os teatros e cinemas, por exemplo, em grande parte permaneciam fechados durante os meses de verão e experimentaram um crescimento econômico vertiginoso com o advento do ar condicionado.

O uso do ar condicionado em residências ocorreu também com grande velocidade, mesmo tendo que superar problemas com os tipos de circuitos elétricos que até 1930 não permitiam a operação dos aparelhos de ar condicionado dentro das leis que vigoravam de limites máximos de amperagem em 110 V (PAUKEN,1999). Com a adoção de novos circuitos e 220 V, o ar condicionado teve um grande impulso na sua utilização e influenciou muito a arquitetura a partir dos anos de 1940. Até este período, as construções eram realizadas de maneira a aproveitar ao máximo o resfriamento natural, com varandas sombreadas, tetos altos e amplas janelas. O ar condicionado mudou estes aspectos da arquitetura que passou a fazer uso de tetos com 2,4 metros, as casas passaram a ser construídas com um único andar, e as varandas deixaram de ser funcionais para desempenhar um papel mais ornamental.

Outro ponto interessante corresponde às alterações demonstrativas ocorridas nos EUA com o advento do ar condicionado. Até 1940, oito dos dez estados americanos que mais cresciam estavam localizados em regiões com temperaturas externas mais amenas. O crescimento econômico e demográfico de regiões associadas às grandes cidades como Dallas, Miami, Houston, aconteceu após 1950, com a grande disseminação de equipamentos de ar condicionado a preços competitivos (PAUKEN, 1999).

Na atualidade, a sociedade tem se tornado mais exigente em condições e qualidade de vida de forma generalizada. Neste contexto, insere-se a procura por um crescente aumento da utilização de ambientes com temperatura controlada. Assim, sistemas de ar condicionado são aplicados em casas, edifícios, aviões, trens etc. e o mercado que apresenta forte potencial de demanda, nesse particular, tanto pelas exigências dos consumidores, como pelo volume de fabricação, é o setor automobilístico. (PONTICEL, 1996).

No início do século passado, quando nos primórdios da fabricação dos automóveis, e por um longo período de tempo, os motoristas e passageiros tinham que se adaptar às condições do veículo (LUDVIGGEN, 1995). Assim passaram-se muitos anos em que foram utilizados sistemas de partida a manivela, bancos que não permitiam ajustes - praticamente do tipo utilizado em carruagens com nenhuma espécie de amortecimento. Levou-se quase uma década para surgirem bancos com molas e assentos de tecido.

Por muitos anos, dirigir carros abertos em dias ensolarados, era marcante prazer que os carros proporcionavam a 15 km/h, apresentando, como único item de conforto, um pára-brisa, para proteger o motorista contra eventuais insetos ou elementos estranhos que pudessem vir com o vento. Mesmo assim, esse item trazia muitos problemas pela dificuldade em mantê-los limpos, além de freqüentes quebras devido a estilhaços de pedras das estradas da época. Posteriormente, os carros ganharam cabinas fechadas, com janelas laterais, dotando-os assim com essa única alternativa de abri-las para suavizar a temperatura interna, que nem sempre alcançava o esperado. Se o sol se encontrasse abrasador, de pouco ou nada adiantava. Contudo, essa ventilação tinha como efeito colateral a introdução inconveniente de poeira, insetos e odores para o interior do veículo. Tais inconvenientes decorriam do tipo de tecnologia empregada, onde o pára-brisa era basculante

e as janelas laterais se moviam para cima e para baixo a exemplo daquelas vigentes ainda em trens.

Por volta de 1930, a criação de janelas com quebra-ventos permitiu um salto na ventilação interna, com a fixação de pára-brisa, tornando esse interior menos vulnerável às intempéries externas. Em um segundo momento, os carros passaram a contar com um sistema de resfriamento adicional através de capôs com entrada de ar dirigida para a parte inferior do painel, próximo ao assoalho do veículo. Posteriormente, o conforto interno ganhou novo aliado com o aparecimento de sistemas de aquecimento, tendo como fonte de calor a água de refrigeração do motor que circulava em trocadores posicionados embaixo dos bancos dianteiros e traseiros.

A tecnologia utilizada por Willian Whiteley em 1884 para refrigeração de carruagens, serviu de inspiração criativa para os engenheiros automobilísticos dos anos 1930. Esta tecnologia consistia de ventiladores fixados aos eixos e de blocos de gelo colocados sob a carruagem, adotando os mesmos princípios de refrigeração de edifícios conforme anteriormente citados. No caso dos automóveis os engenheiros fixaram um balde de água na parte inferior do assoalho, próximo à entrada de ar, permitindo o efeito de redução da temperatura pelo ar passando sobre a água, que acabou sendo chamado de "all-weather eye".

Os sistemas de conforto do ambiente interno eram tidos como de muita importância pela indústria automobilística da época, porém a sua evolução era cerceada pelos aspectos construtivos em voga.

Até os anos 1920, utilizavam-se muitas estruturas de madeira ou mistas de madeira, aço ou telas de arame, cobertas com tecido. As construções eram complexas, chegando-se a ter em um carro 1.200 partes. Este período, marcado pela introdução do aço, trouxe muitos problemas como corrosão no fluir do tempo e ruído, exigindo como resposta técnica estruturas de amortecimento de som, que, em prejuízo do usuário, ocuparam espaços úteis, tornando-os exíguos nos automóveis.

A invenção de prensas para estampagem do aço, no final dessa década, permitiu melhorar a fabricação dos painéis necessários às montagens, reduzindo drasticamente o número de partes para alguma coisa em torno de 500. Contudo, essas primeiras prensas não mantinham o formato adequado

das peças, trazendo ainda muitas dificuldades para a montagem. Somente nos anos da década de 1930, surgiram as prensas do tipo macho-fêmea, representando uma substancial melhoria da reprodução de peças sempre da mesma forma e com pequenas tolerâncias dimensionais. O reflexo dessa tecnologia foi imediato, fazendo com que painéis mais complexos fossem produzidos, diminuindo o número de partes de 500 para aproximadamente 120. Mesmo com o advento da Segunda Guerra Mundial, representando uma ameaça à utilização dessa tecnologia nos automóveis em virtude de restrições do uso de metais na indústria geral, o sistema era tão promissor, que foi prontamente convertido para a utilização da recém descoberta da época, a fibra de vidro, à época utilizada em radares pela indústria militar. As matrizes, tipo macho-fêmea, foram colocadas para fabricar os primeiros painéis de fibra de vidro, permitindo, assim, que as concepções de painéis em aço pudessem ser mantidas, e em consequência os projetos que se beneficiaram do uso de painéis mais complexos em aço.

Um fato marcante surgiria com o projeto e desenvolvimento de pára-brisas na forma de "V", e posteriormente na forma curvilínea, facilitando a aerodinâmica e a colocação de ventiladores nesse local. Desta forma, novo salto foi alcançado com a possibilidade de se dosar o resfriamento ou o aquecimento interno, através de ajustes do sistema de ventilação e aquecimento. Somente no ano de 1940, veio a se desenvolver o primeiro ar condicionado automotivo, equipando um modelo Packard, sendo rapidamente seguida pela Cadillac em 1941.

Esse primeiro ar condicionado tinha um grande problema, não havia compressor com embreagem, havendo a necessidade do motorista parar o carro, descer, abrir o capô e remover a correia do ar condicionado. Entretanto, esse incômodo não obscureceu o grande salto para a época e muitos carros de luxo passaram a utilizar o sistema, tanto na Europa, quanto nos Estados Unidos, elegendo este equipamento como um item importante na distinção de carros de alto padrão, durante as décadas de 1940 e 1950 (LUDVIGGEN, 1995).

Durante esse período, o sistema de ar condicionado passaria por várias alterações, principalmente na quantidade e dimensionamento das saídas de ventilação internas, de modo a otimizar a admissão frontal e a exaustão de ar

na parte traseira do veículo. O estudo da aerodinâmica e da distribuição de pressão no exterior dos veículos permitira expressivo aumento da eficiência do sistema, tornando-se um período de muitos desafios para os desenhistas e engenheiros da indústria automotiva.

Um grande salto tecnológico aconteceria em 1964, quando a Cadillac criou como item opcional - um ar condicionado quente-frio - em que o motorista podia selecionar a temperatura interior, e o equipamento automaticamente fazia a manutenção das condições ambientais na cabina. A Cadillac, para isto, utilizou vários sistemas de dutos e sensores que eletronicamente executavam os ajustes necessários.

Na atualidade, os veículos têm passado por grandes transformações, e, mais recentemente, pode-se afirmar que os carros são adaptados, segundo desejos e necessidades do usuário, com uma ampla gama de modelos e opções disponíveis no mercado, ao contrário da fase inicial, quando a indústria se preocupava praticamente com a uniformização do modelo, sem outra preocupação para atender o mercado.

Nestes novos tempos os automóveis combinam sistemas motorizados para acionamentos em geral, aplicação de condições ergonômicas, incorporação de itens de entretenimento como uma extensão da sala de estar, mostrando preocupação crescente com itens de conforto e aspectos agradáveis para a dirigibilidade e segurança. Neste contexto, o ar condicionado ocupa posição relevante, sendo item praticamente obrigatório em carros de médio e alto padrão e já se inserindo também, de forma notória, em carros de pequena potência como item opcional. Para este tipo de aplicação, grandes desenvolvimentos têm sido alcançados para se chegar a equipamentos compactos e de baixo consumo, aspectos imperativos no segmento de veículos de pequeno porte.

Embora a tecnologia de sistemas de ar condicionado automotivo tenha experimentado um grande avanço com melhoria nas condições de conforto dos usuários de diferentes tipos de veículos, as informações relativas a este setor da engenharia encontram-se bastante dispersas, sendo pequeno o número de profissionais que detêm um entendimento mais completo do assunto.

O objetivo deste trabalho é o de reunir em uma única fonte estas informações, com uma abordagem geral de sistemas de ar condicionado automotivo e um enfoque particular em sistemas de ar condicionado do setor automobilístico.

Inicialmente, no Capítulo 2 são discutidos os passos a serem cumpridos no desenvolvimento do projeto de um sistema de ar condicionado automotivo, abordando: o conforto térmico, o cálculo de carga térmica, o sistema de refrigeração, o sistema de distribuição de ar, o sistema de controle associado e a otimização dos sistemas.

No Capítulo 3 é feito um detalhamento do sistema de ar condicionado automotivo utilizado na indústria automobilística, enfocando o ciclo de compressão de vapor, o sistema de distribuição de ar e o sistema de controle.

Finalmente, no Capítulo 4 são apresentados avanços tecnológicos que tem melhorado o desempenho de sistemas de ar condicionado automotivo nos aspectos ambiental, de consumo de energia e conforto.

AR CONDICIONADO AUTOMOTIVO

2.1 Introdução

O ar condicionado automotivo se diferencia das demais aplicações de climatização de ambientes em virtude das características operacionais aos quais os veículos são submetidos. Há grande variabilidade das condições impostas ao sistema, tais como temperatura do interior do veículo, vazão e temperatura do ar no condensador e evaporador, área envidraçada – que altera a quantidade de radiação solar conforme a posição do veículo –, grande alteração da distribuição interna do fluxo de ar – variável dependente do número de ocupantes e seu posicionamento, etc.

Estes fatores fazem com que o projeto de um sistema de ar condicionado automotivo seja objeto de relativa complexidade. Para a elaboração de um projeto adequado é necessário inicialmente estabelecer as condições que devem ser atendidas ao longo do desenvolvimento do projeto. Estas condições estão relacionadas com os passos a serem cumpridos no desenvolvimento do projeto, que são:

- *Conforto térmico*: Definição das condições do ambiente condicionado considerando condições de conforto térmico e salubridade;
- *Carga térmica*: Definição dos materiais e das dimensões da estrutura do ambiente condicionado, da ocupação, das cargas internas e das condições climáticas do ambiente externo, para o cálculo da carga térmica;
- *Sistema de refrigeração*: Escolha do sistema de refrigeração, definição da sua capacidade a partir da carga térmica e dimensionamento dos componentes do sistema e do seu controle;
- *Sistema de distribuição de ar*: Definição das vazões de ar de renovação e recirculação e dimensionamento dos componentes deste sistema e seu controle;

- *Otimização dos sistemas:* Definição de critério de otimização pelo qual será alterado o dimensionamento do sistema para atingir uma condição de máximo ou mínimo em relação a este critério.

2.2 Conforto térmico¹

A obtenção de condições que propiciem conforto térmico aos usuários em veículos automotivos não é tarefa fácil. O que torna esta tarefa mais difícil em relação aos ambientes condicionados de edificações está relacionado com:

- Assimetria de radiação, decorrente da incidência de energia solar sobre o veículo e os ocupantes, que varia conforme o trajeto;
- Temperaturas não homogêneas e uma grande variação no campo de velocidades, função do sistema de ventilação ou ar condicionado e dos espaços reduzidos;
- Espaço confinado em que a presença dos ocupantes modifica substancialmente a distribuição do ar, com a ocorrência de diferentes níveis de temperatura;
- Proximidade dos ocupantes de janelas e outras partes do veículo em um dos lados do corpo;
- O isolamento do corpo nas partes em contato com o assento; etc.

O resultado destas peculiaridades em veículos automotivos é uma dificuldade maior na avaliação e no controle das condições térmicas nestes veículos, acarretando a necessidade de estudos específicos para que se possa estabelecer condições que permitam melhorar o conforto térmico no seu interior.

Por outro lado, os usuários estão cada vez mais exigentes quanto aos aspectos de conforto. Além disto, em veículos pesados e equipamentos agrícolas o problema do conforto térmico é mais acentuado. Nestes veículos o calor trocado pela proximidade do motor de combustão interna, o pequeno espaço na cabine e a presença dos bancos e outros obstáculos a uma boa circulação do ar podem gerar condições de desconforto que podem levar os ocupantes ao "stress" térmico (ISO 7243, (1989) ; ISO 7933, (1989)).

¹ Conforto térmico é definido pela American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, norma ASHRAE 55a-95 (ASHRAE, 1995), como sendo "um estado de espírito que reflete satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa".

As condições de conforto térmico dependem da influência dos parâmetros de interação do indivíduo com o meio ambiente. Assim, a taxa de metabolismo e o nível de atividade física da pessoa (MET), o tipo de vestimenta (CLO), a temperatura do ar, T_a , a temperatura média radiante, \bar{T}_r , a velocidade do ar, V_a , e a umidade do ar, ω , exercem importante papel nas condições de conforto térmico. Fanger combinou estes parâmetros realizando um balanço térmico do corpo humano (1ª. lei da termodinâmica) e por meio de ensaios realizados com estudantes americanos concebeu um modelo baseado no voto médio estimado (PMV- *Predicted Mean Vote*), que varia do muito frio (-3) ao muito quente (+3). A Tab. 2.1 mostra o PMV com o respectivo nível de satisfação da população (PPD – *Predicted Percentage of Dissatisfied*) no estudo de Fanger (FANGER, 1972).

Tabela 2.1 – Escala de sensação térmica

<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%

Vê-se que no modelo de Fanger existem 5% de insatisfeitos mesmo na condição de neutralidade térmica (PMV igual a zero). O trabalho de Fanger (FANGER, 1972) é a base da norma ISO 7730 (ISO, 1994) de conforto térmico.

Uma vez que o cálculo do voto médio estimado é trabalhoso, FANGER (1972) e a ISO 7730 (ISO, 1994) apresentam tabelas, como aquela apresentada na Tab. 2.2, e uma rotina para utilização em microcomputador, que permitem determinar o PMV para diferentes atividades, tipos de vestimenta e condições ambientais.

A ANSI/ASHRAE 55a-95 (ASHRAE, 1995) também apresenta gráficos para a determinação das condições de conforto térmico em ambientes condicionados - as Cartas de Conforto da ASHRAE. A Fig. 2.1 mostra uma carta psicométrica com a zona de conforto representada pela área hachurada.

Tabela 2.2 - Determinação do voto médio estimado - PMV (ISO 7730, 1994)
 Atividade sedentária (MET=1.0) e umidade relativa do ar de 50%

Vestimenta		Temperatura Operativa °C	Velocidade Relativa do ar - m/s								
CLO	$\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$		< 0.10	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	1.00	
0	0	26	-1.62	-1.62	-1.96	-2.34					
		27	-1.00	-1.00	-1.36	-1.69					
		28	-0.39	-0.42	-0.76	-1.05					
		29	0.21	0.13	-0.15	-0.39					
		30	0.80	0.68	0.45	0.26					
		31	1.39	1.25	1.08	0.94					
		32	1.96	1.83	1.71	1.61					
		33	2.50	2.41	2.34	2.29					
0.25	0.039	24	-1.52	-1.52	-1.80	-2.06	-2.47				
		25	-1.05	-1.05	-1.33	-1.57	-1.94	-2.24	-2.48		
		26	-0.58	-0.61	-0.87	-1.08	-1.41	-1.67	-1.89	-2.66	
		27	-0.12	-0.17	-0.40	-0.58	-0.87	-1.10	-1.29	-1.97	-1.28
		28	0.34	0.27	0.07	-0.09	-0.34	-0.53	-0.70	-1.10	-0.58
		29	0.80	0.71	0.54	0.41	0.20	0.04	0.50	0.11	0.83
		30	1.25	1.15	1.02	0.91	0.74	0.61	1.12	1.12	1.12
		31	1.71	1.61	1.51	1.43	1.30	1.20	1.20	1.12	1.12
0.50	0.078	23	-1.10	-1.10	-1.33	-1.51	-1.78	-1.99	-2.16		
		24	-0.72	-0.74	-0.95	-1.11	-1.36	-1.55	-1.70	-2.22	
		25	-0.34	-0.38	-0.56	-0.71	-0.94	-1.11	-1.25	-1.71	-1.19
		26	0.04	-0.01	-0.18	-0.31	-0.51	-0.66	-0.79	-1.19	-0.68
		27	0.42	0.35	0.20	0.09	-0.08	-0.22	-0.33	-0.68	-0.17
		28	0.80	0.72	0.59	0.49	0.34	0.23	0.14	0.34	0.86
		29	1.17	1.08	0.98	0.90	0.77	0.68	1.06	1.06	1.06
		30	1.54	1.45	1.37	1.30	1.20	1.13	1.13	1.06	1.06
0.75	0.118	21	-1.11	-1.11	-1.30	-1.44	-1.66	-1.82	-1.95	-2.36	
		22	-0.79	-0.81	-0.96	-1.11	-1.31	-1.46	-1.58	-1.95	-1.55
		23	-0.47	-0.50	-0.66	-0.78	-0.96	-1.09	-1.20	-1.55	-1.14
		24	-0.15	-0.19	-0.33	-0.44	-0.61	-0.73	-0.83	-1.14	-0.74
		25	0.17	0.12	-0.01	-0.11	-0.28	-0.37	-0.46	-0.83	-0.33
		26	0.49	0.43	0.31	0.23	0.09	0.00	0.29	0.08	0.48
		27	0.81	0.74	0.64	0.56	0.45	0.36	0.67	0.67	0.67
		28	1.12	1.05	0.96	0.90	0.80	0.73	0.73	0.67	0.67
1.00	0.155	20	-0.85	-0.87	-1.02	-1.13	-1.29	-1.41	-1.51	-1.81	
		21	-0.57	-0.60	-0.74	-0.84	-0.99	-1.11	-1.19	-1.47	-1.13
		22	-0.30	-0.33	-0.46	-0.55	-0.69	-0.80	-0.88	-1.13	-0.79
		23	-0.02	-0.07	-0.18	-0.27	-0.39	-0.49	-0.56	-0.79	-0.46
		24	0.26	0.20	0.10	0.02	-0.09	-0.18	-0.25	-0.46	-0.12
		25	0.53	0.48	0.38	0.31	0.21	0.13	0.07	0.22	0.56
		26	0.81	0.75	0.66	0.60	0.51	0.44	0.39	0.22	0.56
		27	1.08	1.02	0.95	0.89	0.81	0.75	0.71	0.56	0.56
1.50	0.233	14	-1.36	-1.36	-1.48	-1.58	-1.72	-1.82	-1.89	-2.12	
		16	-0.94	-0.95	-1.07	-1.15	-1.27	-1.36	-1.43	-1.63	-1.14
		18	-0.52	-0.54	-0.64	-0.72	-0.82	-0.90	-0.96	-1.14	-0.65
		20	-0.09	-0.13	-0.22	-0.28	-0.37	-0.44	-0.49	-0.65	-0.14
		22	0.35	0.30	0.23	0.18	0.10	0.04	0.00	0.37	0.89
		24	0.79	0.74	0.68	0.63	0.57	0.52	0.49	0.37	0.89
		26	1.23	1.18	1.13	1.09	1.04	1.01	0.98	0.89	1.40
		28	1.67	1.62	1.56	1.56	1.52	1.48	1.47	1.40	1.40
2.00	0.310	10	-1.38	-1.39	-1.49	-1.56	-1.67	-1.74	-1.80	-1.96	
		12	-1.03	-1.05	-1.14	-1.21	-1.30	-1.37	-1.42	-1.57	-1.17
		14	-0.68	-0.70	-0.79	-0.85	-0.93	-0.99	-1.04	-1.17	-0.77
		16	-0.32	-0.35	-0.43	-0.48	-0.56	-0.61	-0.65	-0.77	-0.37
		18	0.03	-0.00	-0.07	-0.11	-0.18	-0.23	-0.26	-0.37	0.04
		20	0.40	0.36	0.30	0.26	0.20	0.16	0.13	0.04	0.45
		22	0.76	0.72	0.67	0.64	0.59	0.55	0.53	0.45	0.87
		24	1.13	1.09	1.05	1.02	0.98	0.95	0.93	0.87	0.87

OBS: 1) Valores de PMV em torno de zero indicam condições de conforto térmico.

2) Valores de CLO igual a 0,5 representam uma vestimenta leve de verão (calça comprida com camisa de mangas curtas), enquanto valores de CLO igual a 1,0 representam uma vestimenta pesada de inverno. Vestimentas usuais de escritórios no Brasil (calça comprida, camisa de manga comprida e gravata) representam um clo de 0,6 a 0,75, função da gramatura dos tecidos.

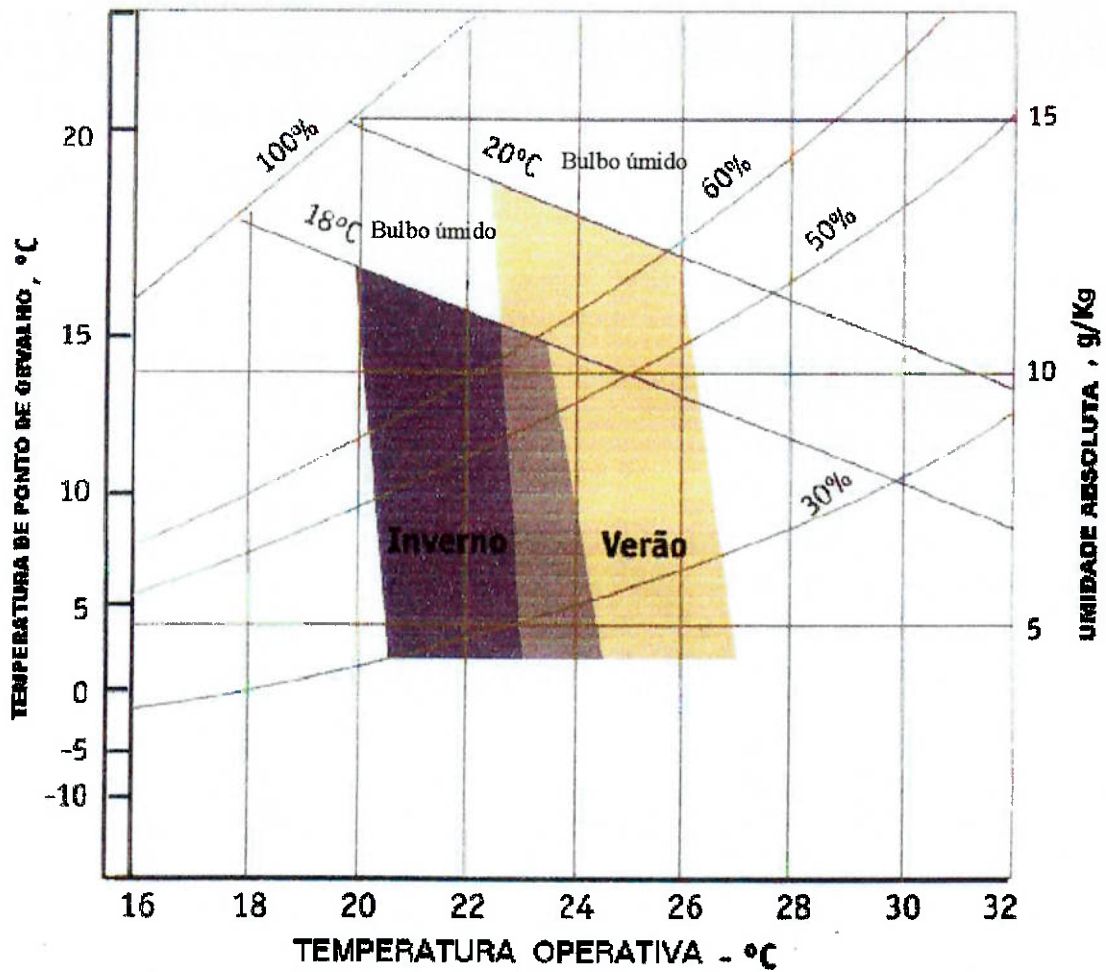


Figura 2.1 Diagrama psicrométrico com a indicação da zona de conforto segundo a Norma ANSI/ASHRAE 55a/95.

Verifica-se na Tab. 2.2 e na Fig. 2.1 que os resultados são apresentados em função da temperatura operativa, T_o , que é uma função da temperatura média radiante, \bar{T}_r , e da temperatura do ar, T_a , dado pela equação²:

$$T_o = a \cdot T_a + (1-a) \cdot \bar{T}_r \tag{2.1}$$

onde a constante a varia de acordo com a velocidade do ar (V_a):

V_a (m/s)	0 – 0,2	0,2 – 0,6	0,6 – 1,0
a	0,5	0,6	0,7

² ANSI/ASHRAE 55a/95 (ASHRAE,1995) e ISO 7730 (ISO,1994).

A norma ISO 7726 (ISO, 1984) apresenta procedimentos de medição e métodos para a obtenção das variáveis ambientais: velocidade média do ar, V_a , temperatura média radiante, \bar{T}_r , da temperatura do ar, T_a e umidade do ar: umidade absoluta, ω , e umidade relativa, ϕ .

2.2.1 Desconforto térmico local

Uma pessoa pode sentir neutralidade térmica para o corpo como um todo (PMV=0), mas pode não estar confortável se uma parte do corpo está “quente” e uma outra “fria”. Portanto, o conforto também requer que não haja desconforto local (quente ou frio) para qualquer parte do corpo.

Este desconforto local pode ser causado por:

- Assimetria de radiação;
- Diferença de temperatura do ar vertical entre os pés e a cabeça;
- Correntes de ar (“draft” ou “draught”).

Nas normas ANSI/ASHRAE 55a (ASHRAE,1995) e ISO 7730 (ISO,1994) são previstos limites máximos para cada uma das causas de desconforto acima. Estes limites foram obtidos em ensaios realizados em câmaras climatizadas. Ainda não existem dados normalizados especificamente para veículos automotivos.

2.2.2 Avaliação das condições de conforto térmico

Em um veículo automotivo somente a utilização de manequins aquecidos que simulam termicamente o corpo humano permite obter resultados adequados para uma avaliação experimental do conforto térmico (Madsen et al., 1986). Este manequim é aquecido de tal forma que cada seção do corpo mantenha exatamente a temperatura da superfície que, de acordo com a equação de conforto de Fanger (FANGER, 1972) proporcione condições de conforto térmico na situação real de perda de calor. Após a medição da energia consumida por cada uma das seções do corpo, a temperatura equivalente para cada parte do corpo pode ser encontrada. Ao se utilizar o calor total perdido pelo corpo todo, o valor do PMV pode ser determinado.

2.3 Carga Térmica

Para se atingir as condições de conforto térmico em ambientes condicionados o primeiro passo no processo de cálculo em um projeto de uma instalação de ar condicionado é a determinação da carga térmica.

Esta carga térmica é geralmente classificada em carga térmica do ambiente e carga térmica do equipamento, dependendo do local onde a carga é considerada (Yamane & Saito, 1986):

A. Carga térmica do ambiente , $CT_{ambiente}$

É a quantidade de calor a ser trocada pelo ar insuflado no ambiente pelo equipamento de condicionamento de ar, para manter a temperatura do ambiente nas condições desejadas. Esta carga pode se subdividida em:

- i) calor que entra no ambiente através dos elementos de vedação da envoltória (carga térmica perimetral), $CT_{envoltória}$;
- ii) calor gerado no interior do ambiente (carga térmica interna), $CT_{interna}$.

B. Carga térmica do equipamento, $CT_{equipamento}$

É a quantidade de calor processada no equipamento de ar condicionado para se obter o ar insuflado no ambiente em condições especificadas de temperatura e umidade. Esta carga térmica pode ser dividida em:

- i) Carga térmica do ambiente, $CT_{ambiente}$;
- ii) Carga térmica associada à entrada de ar de renovação, $CT_{renovação\ ar}$;
- iii) Carga térmica devido a ventiladores e outros componentes, $CT_{ventilador}$;

As cargas térmicas do ambiente e do equipamento são ainda divididas em:

Carga térmica sensível: que é a quantidade de calor que deverá ser trocada com o ar para se atingir uma temperatura pré-definida;

Carga térmica latente: corresponde ao calor de evaporação (condensação) da água e é igual ao produto da vazão de água contida no ar pela entalpia de evaporação (2451,4 kJ/kg a 20 °C).

Em veículos automotivos a taxa de transferência de calor para o ambiente ou gerada internamente pode ser considerada instantânea, isto é, pode ser considerada como um ganho de calor (ASHRAE, 1993). A natureza transitória da condução de calor normalmente é desprezível, pois a transmissão de calor se dá através de materiais metálicos e mesmo quando recobertos com algum isolante térmico a espessura é pequena. Quanto à inércia devido à troca por radiação no interior do ambiente condicionado esta por sua vez também não é tão significativa quanto à que ocorre em edificações, pois no caso de veículos automotivos as superfícies internas de troca de calor se encontram em temperaturas mais elevadas e a troca por radiação entre estas superfícies fica reduzida. Assim, para as estruturas convencionais de veículos automotivos praticamente não há atraso entre os picos de ganho de calor e de carga térmica.

O fato de não haver diferenças significativas entre os valores máximos de ganho de calor e de carga térmica, como as que ocorrem em edificações, simplifica bastante o cálculo da carga térmica em veículos automotivos, pois neste caso é possível se considerar o equacionamento das trocas de calor ocorrendo em **regime permanente**.

2.3.1 Cargas térmicas em veículos automotivos

Várias são os ganhos de calor que contribuem para a carga total em veículos automotivos:

- Condução de calor através de paredes, piso, teto e vidros;
- Condução de calor através do compartimento do motor;
- Radiação solar pelos vidros;
- Fontes internas: pessoas, equipamentos, iluminação, etc.;
- Infiltração e renovação de ar; Ventilador do “fan-coil”, etc.

Para melhor visualização, estes ganhos de calor são apresentadas na Fig. 2.2, em uma cabine de um caminhão.

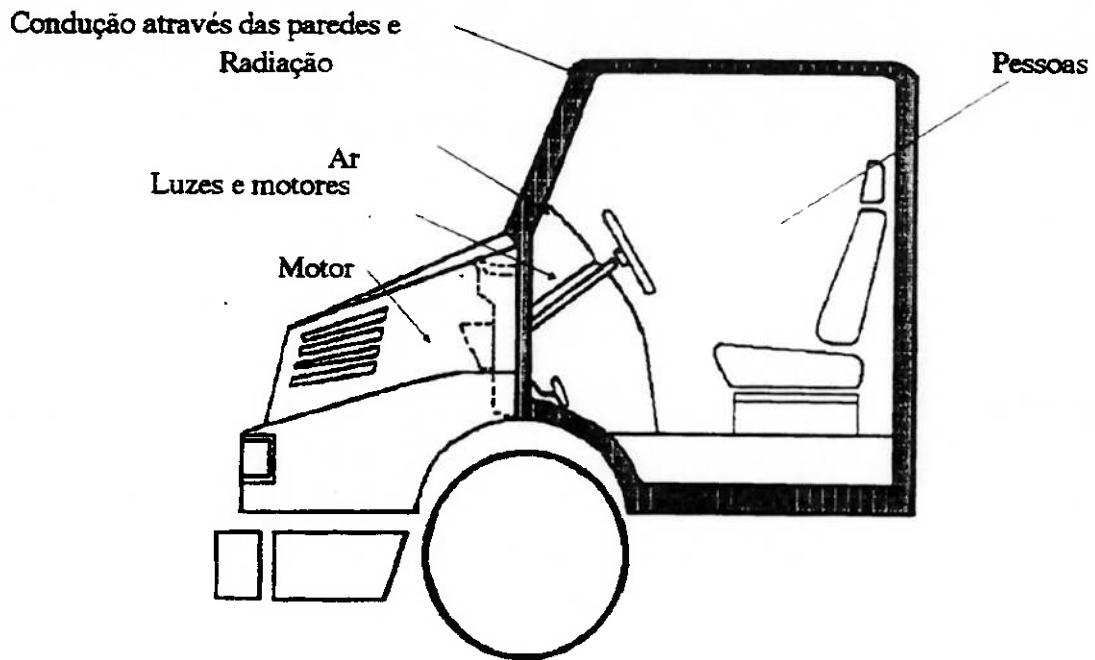


Figura 2.2 Ganhos de calor em um veículo automotivo (Stancato, 1992).

2.3.2 Determinação das cargas térmicas em veículos automotivos

Conforme visto anteriormente, a carga térmica do equipamento é a soma da carga térmica do ambiente, CT_{ambiente} , da carga térmica associada à entrada de ar de renovação, $CT_{\text{renovação ar}}$ e da carga térmica devido a ventiladores e outros componentes, $CT_{\text{ventilador}}$, isto é:

$$CT_{\text{equipamento}} = CT_{\text{ambiente}} + CT_{\text{renovação ar}} + CT_{\text{ventilador}} \quad (2.1)$$

onde a carga térmica do ambiente é a soma das cargas térmicas devido às trocas de calor através dos elementos de vedação da envoltória, $CT_{\text{envoltória}}$, e devido ao calor gerado no interior do ambiente, CT_{interna} , isto é:

$$CT_{\text{ambiente}} = CT_{\text{envoltória}} + CT_{\text{interna}} \quad (2.2)$$

Já a carga térmica devido às trocas de calor através dos elementos de vedação da envoltória, $CT_{\text{envoltória}}$, é devido à:

- i) condução de calor através dos elementos opacos (paredes, piso, teto, etc) e vidros (CT condução);
- ii) troca de calor com o compartimento do motor, CT_{motor} ;
- iii) radiação solar direta (CT solar);
- iv) infiltração de ar (CT infiltração).

isto é,

$$CT_{\text{envoltória}} = CT_{\text{condução}} + CT_{\text{motor}} + CT_{\text{solar}} + CT_{\text{infiltração}} \quad (2.3)$$

A. Determinação das cargas térmicas por condução, CT_{condução}

Na Fig.2.3 são apresentadas as trocas de calor que resultam na carga térmica por condução em elementos de vedação opacos, em que se verifica que os três mecanismos de troca de calor: condução, convecção e radiação estão envolvidos.

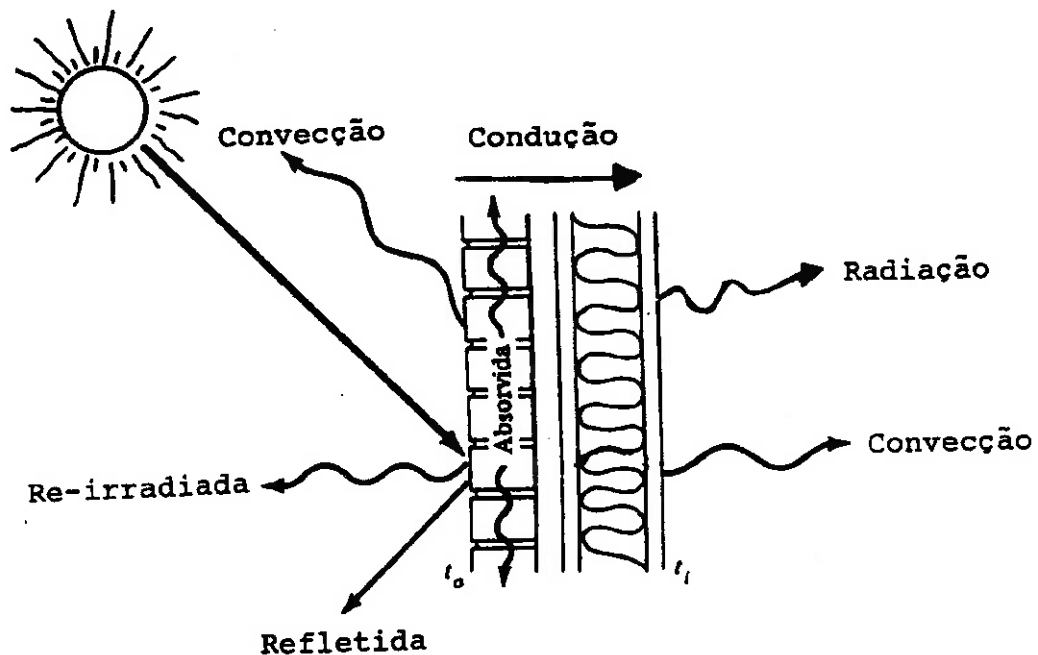


Figura 2.3 Troca de calor em elementos opacos com incidência de radiação solar

A carga térmica devido à transferência de calor por condução é o resultado da soma das trocas de calor por condução através dos diversos elementos i que compõem a envoltória de um veículo automotivo, calculada pela equação:

$$CT_{\text{condução}} = \sum_{i=1}^n U_i A_i (T_{\text{Ar-sol}} - T_{\text{interna}})_i \quad (2.4)$$

onde:

- U = coeficiente global de troca de calor entre o ambiente interno e o meio externo, dado por:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{interno}}} + \sum_{j=1}^m \frac{l_j}{k_j} + \frac{1}{h_{\text{externo}}}} \quad (2.5)$$

- h_{interno} = coeficiente de troca de calor por convecção interno (do ambiente condicionado)
- h_{externo} = coeficiente de troca de calor combinado convecção + radiação na face externa do elemento de vedação
- l = espessura da camada j do elemento de vedação
- k = condutividade térmica da camada j do elemento de vedação
- A = área do elemento de vedação;
- T_{interna} = temperatura de bulbo seco de projeto do ar interior;
- $T_{\text{Ar-sol}}$ = temperatura ar-sol. Temperatura fictícia determinada por:

$$T_{\text{Ar-Sol}} = T_{\text{externa}} + \frac{\alpha I}{h_{\text{externo}}} \quad (2.6)$$

com:

- T_{externa} = temperatura de bulbo seco de projeto do ar exterior;
- α = absorptância à radiação solar da face externa do elemento de vedação;
- I = radiação solar incidente no elemento.

A absorptância à radiação, α , depende do acabamento superficial da face do elemento de vedação considerado e do comprimento de onda da fonte emissora e alguns valores desta propriedade física são apresentados na Tab.2.3.

Tabela 2.3 Absortividades para diferentes tipos de pintura e comprimentos de onda. McJachlan, apud Stancato (1992) .

PINTURA	ABSORTIVIDADE , α	
	Radiação térmica à baixa temperatura (25°C)	Radiação Solar
Grafite	≈ 1	1
Branca brilhante	≈ 1	0,30
Preto	≈ 1	0,94
Cinza claro	≈ 1	0,65
Cinza escuro	≈ 1	0,8
Cinza metálico	≈ 1	0,65

A radiação solar, por sua vez depende do local (latitude, longitude), do céu(claro, encoberto, etc), das condições de poluição do ar e do ângulo de incidência sobre a superfície. Alguns valores de radiação solar são apresentados na Tab. 2.4.

Tabela 2.4 Valores de radiação solar (insolação) sobre uma superfície horizontal em condições atmosféricas médias (Holman, 1983).

Altitude solar , graus	Insolação total média (W/m ²)
5	41,9
10	112,8
15	200,0
20	290,7
25	381,4
30	472,1
35	554,6
40	636,0
45	710,4
50	781,4
60	901,1
70	991,8
80	1043,0
90	1063,0

OBSERVAÇÃO: Para elementos opacos que não sofrem incidência de radiação solar (parte das superfícies externas do veículo, assoalho, etc) e vidros, a temperatura T_{AR-SOL} da Eq. 2.6 pode ser assumida como sendo a temperatura de bulbo seco de projeto do ar exterior $T_{externa}$.

B. Determinação da carga térmica devido ao calor do compartimento do motor, CT_{motor}

Neste caso a temperatura T_{AR-SOL} da Eq. 2.6 é substituída pela temperatura do compartimento do motor, T_{comp} , e a equação fica:

$$CT_{motor} = UA(T_{comp} - T_i) \quad (2.7)$$

onde:

- U = coeficiente global de troca de calor entre o ambiente interno e o meio externo, dado por:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{interno}} + \sum_{j=1}^m \frac{l_j}{k_j} + \frac{1}{h_{externo}^*}} \quad (2.8)$$

- $h_{interno}$ = coeficiente de troca de calor por convecção interno (do ambiente condicionado);
- $h_{externo}^*$ = coeficiente de troca de calor por convecção na face externa do elemento de vedação (compartimento do motor);
- l = espessura da camada j do elemento de vedação;
- k = condutividade térmica da camada j do elemento de vedação;
- A = área do compartimento do motor em contato com o ambiente condicionado;
- $T_{interna}$ = temperatura de bulbo seco de projeto do ar interior;
- T_{comp} = temperatura do compartimento do motor

C. Determinação da carga térmica por radiação solar direta, CT_{solar}

Na Fig. 2.4 é apresentada a distribuição de energia solar incidente sobre uma superfície transparente.

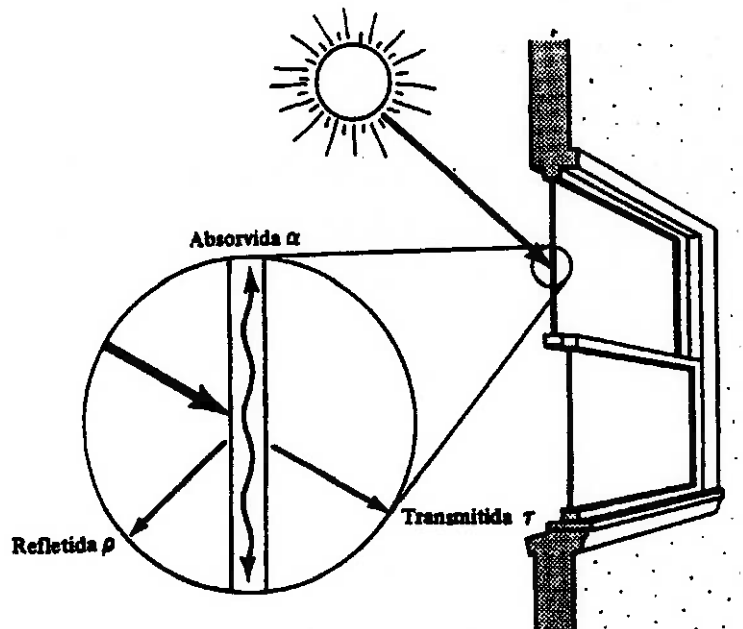


Figura 2.4 Distribuição da energia solar incidente sobre uma superfície transparente

Nesta figura é possível verificar que somente parte da energia solar incidente é transmitida diretamente para dentro do ambiente condicionado e é função da transmissividade do vidro ao comprimento de onda curto, τ_D , e a carga térmica pode ser obtida a partir da seguinte equação:

$$CT_{solar} = I_D \tau_D A_v \quad (2.9)$$

onde:

I_D = radiação direta incidente sobre o vidro (ver tab. 3.2)

τ_D = transmissividade do vidro à incidência solar direta (comprimento de onda curto). Nas Tabs. 2.5 a 2.8 são apresentados valores de transmissividade de alguns tipos de vidros à incidência solar

A_v = área do vidro sujeito à radiação solar direta.

Tabela 2.5 Transmissão da radiação solar para vidros planos (Caram, 1998).

Float	Espessura	Transmissão relativa ao intervalo característico (%)			Transmissão Total da Amostra (%)
		UltraVio.	Visível	InfraVer.	
Incolor	6 mm	38	86	70	72
Vidros Laminados	Espessura	Transmissão relativa ao intervalo característico (%)			Transmissão Total da Amostra (%)
		UltraVio.	Visível	InfraVer.	
Lam. Incolor	6 mm	2	85	67	65
Lam. Cinza	6 mm	1	45	57	51
Lam. Bronze Escuro	6 mm	1	31	41	38
Vidros refletivos	Espessura	Transmissão relativa ao intervalo característico (%)			Transmissão Total da Amostra (%)
		UltraVio.	Visível	InfraVer.	
Refletivo Incolor	6 mm	6	34	56	53
Refletivo Prata	6 mm	18	54	61	60
Refletivo Bronze	6mm	5	28	39	40

Tabela 2.6 - Transmissão da radiação solar para os vidros refletivos metalizados a vácuo (Caram, 1998).

Vidros Refletivos	Transmissão relativa ao intervalo característico (%)			Transmissão Total da Amostra (%)
	UltraVio.	Visível	InfraVer.	
Bronze *	8	15	12	12
Prata *	5	13	9	9
Azul *	9	29	19	20
Azul Intenso *	5	13	13	9
Clear (S.G.)	27	50	35	38

* Cool Lite - Fabricado pela Santa Marina; S.G.- Sun Guardian - Fabricado pela Sun Guardian.

Tabela 2.7 - Transmissão da radiação solar para o vidro eletrocromico (Caram, 1998).

Vidro Eletrocromico	Transmissão relativa ao intervalo característico (%)			Transmissão Total da Amostra (%)
	UltraVio.	Visível	InfraVer.	
Polarizada	13	33	15	18
Despolarizada	13	57	56	49

Tabela 2.8 - Transmissão da radiação solar para os policarbonatos (Caram, 1998).

Policarbonatos	Transmissão relativa ao intervalo característico (%)			Transmissão Total da Amostra (%)
	UltraVio.	Visível	InfraVer.	
Incolor	0	84	85	67
Bronze	0	49	66	51
Cinza	0	28	56	41

Em cálculos mais elaborados pode-se considerar além da incidência solar direta, I_D , a radiação difusa refletida, I_r , e a radiação difusa do céu, I_d . Neste caso a parcela adicional que atravessa o vidro é aquela relativa à transmissividade do vidro ao comprimento de onda longo, τ_D , resultando:

$$CT_{solar} = [I_D \tau_D + (I_d + I_r) \tau_d] A_v \quad (2.10)$$

D. Determinação da carga térmica por infiltração de ar, $CT_{infiltração}$

O veículo automotivo em movimento gera uma diferença de pressão entre o interior do veículo e o ar externo. Esta diferença de pressão força o ar para o interior do veículo através de qualquer fresta.

Segundo Ruth (1975), pode ser demonstrado que a velocidade do ar através das frestas é igual a velocidade do veículo e o calor adicionado ao interior do carro pelas frestas é dado por:

$$CT_{infiltração} = \rho V L W \Delta H = \dot{m} \Delta H \quad (2.11)$$

onde ρ é a massa específica do ar, V é a velocidade do veículo, L é o comprimento da fresta, W é a largura da fresta, ΔH é a diferença de entalpia entre o ar externo e o ar no interior do veículo e $\dot{m} = \rho V L W$ é a vazão mássica de ar externo que entra no ambiente condicionado através das frestas.

A diferença de entalpia é função das temperaturas e da umidades do ar, isto é, a $CT_{infiltração}$ é composta por uma parcela de calor sensível, $CT_{infiltração \text{ sensível}}$, e outra de calor latente, $CT_{infiltração \text{ latente}}$, isto é :

$$CT_{\text{inf iltração}} = CT_{\text{inf iltração sen sivel}} + CT_{\text{inf iltração latente}} \quad (2.12)$$

onde:

$$CT_{\text{inf iltração sen sivel}} = \rho V L W [c_p (T_{\text{externa}} - T_{\text{interna}})] = \dot{m} [c_p (T_{\text{externa}} - T_{\text{interna}})] \quad (2.13)$$

onde c_p é o calor específico do ar, T_{interna} é a temperatura de bulbo seco de projeto do ar interior e T_{externa} é a temperatura de bulbo seco de projeto do ar exterior.

$$CT_{\text{inf iltração latente}} = \rho V L W [h_{lv} (w_{\text{externa}} - w_{\text{interna}})] = \dot{m} [h_{lv} (w_{\text{externa}} - w_{\text{interna}})] \quad (2.14)$$

onde h_{lv} é a entalpia de vaporização (condensação) da água, w_{externa} é a umidade absoluta de projeto do ar externo e w_{interno} é a umidade absoluta de projeto do ar interno.

OBSERVAÇÃO: O aumento de pressão interna causado pela admissão de ar externo (renovação de ar) diminui bastante a infiltração de ar, e neste caso, a carga térmica de infiltração é pouco expressiva.

E. Determinação da carga térmica gerada internamente, CT_{interna}

A carga térmica gerada internamente é a soma direta das cargas térmicas devido às pessoas, equipamentos e iluminação.

$$CT_{\text{interna}} = CT_{\text{pessoas}} + CT_{\text{equipamentos}} + CT_{\text{iluminação}} \quad (2.15)$$

Em veículos de passeio estas são cargas menores. Em ônibus, contudo, a carga térmica devido às pessoas é uma das cargas mais importantes, pois uma pessoa em atividade sedentária libera algo em torno de 120 W. Para o cômputo das cargas térmicas de equipamentos e iluminação podem ser computados os valores nominais das potências dissipadas. Assim a Eq. 2.15, fica:

$$CT_{\text{interna}} = \sum_{i=1}^n M_{\text{pessoas}} + \sum_{j=1}^m \dot{W}_{\text{equipamentos}} + \sum_{k=1}^p \dot{W}_{\text{iluminação}} \quad (2.16)$$

onde:

M_{pessoas} = calor liberado pelo metabolismo das pessoas

$\dot{W}_{\text{equipamentos}}$ = potência dissipada pelos equipamentos

$\dot{W}_{\text{iluminação}}$ = potência dissipada pelas lâmpadas

F. Determinação da carga térmica devido à renovação de ar, $CT_{\text{renovação}}$

A renovação de ar em qualquer ambiente é necessária para que sejam garantidas condições de salubridade. Em veículos com condicionamento de ar a Norma ANSI/ASHRAE 62-1989 (ASHRAE, 1989) recomenda 8 l/s por pessoa de ar de renovação. Este ar, a exemplo do ar que entra no ambiente pelas frestas (que diminui bastante quando o ambiente é condicionado, conforme ressaltado anteriormente) carrega calor para dentro do ambiente condicionado. As equações para a determinação da carga térmica são as mesmas utilizadas no cálculo da carga térmica por infiltração, Eqs. 2.13 e 2.14, resultando:

$$CT_{\text{renov sensível}} = \dot{m}_{\text{ren}} [c_p (T_{\text{externa}} - T_{\text{interna}})] \quad (2.17)$$

$$CT_{\text{renov latente}} = \dot{m}_{\text{ren}} [h_{lv} (w_{\text{externa}} - w_{\text{interna}})] \quad (2.18)$$

onde \dot{m}_{ren} é a vazão mássica do ar de renovação, que é função do número de pessoas (conforme a norma ANSI/ASHRAE 62 - 1989).

G. Determinação da carga térmica devido ao ventilador, $CT_{\text{ventilador}}$

Corresponde à potência dissipada pelo ventilador, que é função da vazão volumétrica de ar insuflado, Q , da diferença de pressão, Δp , e do rendimento do ventilador, η , resultando:

$$CT_{\text{ventilador}} = \frac{Q \Delta p}{\eta} \quad (2.19)$$

2.3.3 Dados de projeto para o cálculo de carga térmica em veículos automotivos

Conforme visto, para o cálculo das cargas térmicas é necessário definir:

a) Condições internas do ambiente condicionado: são definidas pelas normas relativas ao Conforto Térmico: ANSI/ASHRAE 55a-95 e ISO 7730.

Para uma situação desfavorável ao conforto, considere-se uma pessoa vestindo uma roupa com CLO = 1.00 (terno pesado e gravata). Da Tab. 2.2 tem-se uma temperatura operativa do ar para conforto em torno de 23°C. Uma vez que a temperatura operativa, T_o , leva em conta o efeito da temperatura radiante média, \bar{T}_r , a temperatura de bulbo seco de conforto do ar, T_a , será menor que 23°C e o seu valor dependerá da diferença com relação à temperatura radiante média.

Segundo pesquisa financiada pela Nissan Motor Netherland BV e realizada pelo Departamento de Psicologia da Universidade de Amsterdam, as melhores temperaturas do ar para quem está dirigindo um automóvel vestido “normalmente” se situam entre $18,5^\circ\text{C} \leq T_a \leq 21,5^\circ\text{C}$. Nesta faixa de temperaturas, abaixo da condição de conforto, o motorista fica mais atento por estar sentindo um pouco de frio. Além disto, uma diferença de mais de 3 °C entre a cabeça e os pés ou excesso de umidade também tendem a prejudicar o desempenho dos motoristas. A conclusão dos autores deste estudo é que o ar condicionado é mais um item de segurança que uma questão de luxo.

b) Condições climáticas externas (temperatura de bulbo seco, TBS, temperatura de bulbo úmido, TBU e insolação): são função das condições climáticas mais desfavoráveis do local (região, país) onde o veículo irá trafegar. Em trabalhos científicos foram consideradas temperaturas de bulbo seco de 38°C (Coulson, 1966) e de 43°C (Johnson, 1982).

c) O tipo de veículo a ser analisado e a sua destinação.

2.3.4 Resultados de carga térmica em veículos automotivos

Ruth (1975) concluiu em seu trabalho que a carga térmica média de resfriamento para automóveis varia de 1 TR³ (3520W) para modelos “sub-compactos” e de 1 ½ TR (5280 W) para carros “standard”.

Além das cargas térmicas apresentadas acima, Ruth (1975) considerou também uma carga adicional para a situação de um automóvel parado no sol. Considerou que a temperatura no interior de um carro pode atingir 65°C. Segundo o autor, este calor armazenado no ar e no estofamento precisa ser tratado como uma CARGA TÉRMICA e esta carga térmica é dada por:

$$CT_{\text{resfriamento interno}} = (c_a m_a + c_e m_e) \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2.20)$$

onde c é o calor específico, m a massa, ΔT a diferença de temperatura, Δt o período para o resfriamento (“cool-down period”), a denota o ar e e o estofamento. Considerou um período de resfriamento de 30 minutos. A diferença de temperatura considerada foi aquela entre os 65°C e a temperatura de conforto de projeto considerada.

Johnson (1982) apresenta resultados de cálculos de carga térmica para um caminhão, apresentados na Tab. 2.9, em que foi considerada condição de conforto igual a 24 °C e temperatura externa de 43 °C. Nos resultados apresentados verifica-se que o autor não considerou infiltração de ar quando promove admissão externa porque, geralmente, a admissão de ar leva a um aumento na pressão interna, evitando a infiltração.

Stancato (1992) apresenta resultados de cálculos de carga térmica (e de valores medidos), apresentados na Tab.2.10, para cabine de ônibus. Verifica-se nesta tabela que também foi considerada a carga térmica adicional devido ao resfriamento interno. Não foi considerada renovação de ar.

³ TR – tonelada de refrigeração: energia necessária para que 1000 kg (1 tonelada) de água a 0 °C passem de água para gelo (calor latente de solidificação igual a 80 kcal/kg (595 kJ/kg)) em 24 horas, o que corresponde a 3520 W .

Tabela 2.9 - Resultados de carga térmica para cabine de caminhão (Johnson, 1982).

Fonte de carga térmica	Admissão total [W]	Recirculação total[W]
Condução	1014 (18,9%)	1014 (28,8%)
Radiação solar	1810 (33,5%)	1810 (51,3)
Admissão de ar externo	2160 (40,0%)	-
Infiltração	-	288 (8,2%)
Outros	412 (7,6%)	412 (11,7)
Total	5396 (100%)	3524

Tabela 2.10 - Resultados de carga térmica para cabine de ônibus (Stancato, 1992).

Fonte de carga térmica	Admissão total [W]
Condução através de paredes e vidros	1812 (23,7%)
Condução compartimento do motor	54 (0,7%)
Radiação solar	1348 (17,7%)
Pessoas	100 (1,3%)
Equipamentos	240 (3,1%)
Resfriamento interno	4076 (53,4%)
Total	7630 (100%)

Stancato (1992) também apresenta resultados de simulação de cálculo de carga térmica para o ônibus, apresentados na Tabela 2.11. Utilizou renovação de ar considerando 2,5 l/s por pessoa (valor bem abaixo do recomendado pela norma ANSI/ASHRAE 62 – 1989). Como era de se esperar, verifica-se nos resultados apresentados por Stancato (1992) como a influência de cada parcela de carga térmica é diferenciada, estando claramente ligada ao tipo de utilização do veículo.

Tabela 2.11 - Resultados de simulação de carga térmica em ônibus (Stancato, 1992).

Fonte de carga térmica	Admissão total [W]
Condução através de paredes	2296 (12%)
Condução através dos vidros	755 (4%)
Condução compartimento motor	54 (1%)
Radiação solar	5244 (28%)
Pessoas (52 passageiros + 1 motorista)	5575 (29%)
Admissão de ar externo	4147 (22%)
Motores de ventilação	720 (4%)
Total	18791 (100%)

2.3.5 Análise dos resultados de carga térmica em veículos automotivos

Em todos os resultados apresentados verifica-se que as parcelas mais importantes são a carga térmica de condução, da radiação solar e da taxa de renovação de ar, sendo que as duas últimas são maiores que a primeira:

- a) Quanto à condução de calor pode-se:
 - i) Atuar no isolamento do veículo. Um isolamento térmico indiscriminado do veículo pode, contudo, levar a aumentos de custo com pouco ou nenhum benefício adicional no que se refere à diminuição da carga térmica.
 - ii) Na composição e espessura dos vidros, diminuindo a sua absorvidade e condutividade térmica.
 - iii) A absorvidade dos demais materiais, que é uma variável importante para diminuir a influência da radiação solar sobre a condução em elementos opacos. Mas como a absorvidade depende da pintura, a escolha da cor é uma opção do consumidor.

- b) Quanto à radiação solar direta pode-se lançar mão de vidros que tenham menor transmissividade aos raios solares, o que adicionalmente melhoraria as condições de conforto com a diminuição da incidência de radiação solar diretamente sobre as pessoas. Uma outra variável é o ângulo de incidência solar nos vidros.
- c) Quanto à admissão de ar externo, tem-se que quanto maior for a sua vazão maior será o calor a ser retirado pelo sistema. Contudo, existe aí uma condição de salubridade que deve ser considerada com atenção, o que faz com que se tenha limites severos para a sua diminuição.

2.4 Sistema de refrigeração

Uma vez determinada a carga térmica do equipamento, a etapa seguinte é a definição do sistema de refrigeração que irá suprir a carga térmica para manter o ambiente na temperatura e umidade necessários para o estabelecimento das condições de conforto térmico e salubridade.

Existem diversas formas de se proceder ao condicionamento de um ambiente, sendo a principal delas por meio da utilização de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor, que será pormenorizado no Capítulo 3. Este ciclo é utilizado em sistemas de ar condicionado de automóveis, caminhões, trens, ônibus, etc. Em aviões é utilizado um ciclo de compressão a ar, que não é objeto de estudo neste trabalho. A utilização de ciclos de absorção e adsorção em veículos automotivos também é uma possibilidade, mas ainda não foi viabilizada tecnologicamente.

2.5 Sistema de distribuição de ar

O sistema de distribuição do ar ou sistema de ventilação tem dois objetivos: renovação do ar e distribuição do ar resfriado dentro do habitáculo, conforme detalhado no Capítulo 3.

De uma forma geral o sistema de distribuição de ar consiste dos seguintes componentes: ventiladores (ou sopradores), dutos, conexões, filtros e difusores.

Na definição da distribuição do ar os seguintes aspectos devem ser considerados:

- Determinação da perda de carga do ar em dutos, conexões, filtros e difusores;
- Projeto do sistema de dutos;
- Dimensionamento do ventilador (ou soprador);
- Balanceamento e distribuição do ar no ambiente condicionado.

Além disso, deve ser considerada uma otimização do sistema na qual um dos critérios pode ser o volume ocupado pelo sistema, o consumo de energia ou o custo para sua implantação.

2.6 Otimização dos sistemas

Em qualquer projeto de engenharia é necessário ter-se uma metodologia que norteará as decisões a serem tomadas para atingir os objetivos propostos de um determinado projeto.

No caso específico de sistemas de ar condicionado, procedimentos e passos visando permitir aos projetistas ferramentas para coordenar os esforços de si próprios ou de equipes de projeto podem ser encontrados em Stoecker (1989).

Capítulo 3

O SISTEMA DE AR CONDICIONADO AUTOMOTIVO

3.1 Introdução

O sistema de ar condicionado automotivo é composto de um sistema de refrigeração, do sistema de distribuição de ar e do sistema de controle associado.

3.2 Sistema de refrigeração

3.2.1 O ciclo de refrigeração por compressão de vapor

O ciclo de refrigeração por compressão de vapor é normalmente o ciclo utilizado em sistemas de refrigeração automotivos, notadamente na indústria automobilística. Nesse sistema utiliza-se um fluido refrigerante, capaz de ser condensado à alta temperatura e pressão, ser expandido para valores baixos de pressão, e ser evaporado à baixa temperatura. Estas características basicamente determinam quatro equipamentos para a operacionalização do sistema, a saber:

- Evaporador: onde o refrigerante à baixa pressão troca calor com o ar ambiente que é insuflado para o interior do veículo;
- Compressor: que eleva a pressão do vapor saturado ou superaquecido que saiu do evaporador e se destina ao condensador;
- Condensador: que alimentado com o vapor superaquecido do compressor condensa o mesmo, trocando calor com o meio ambiente;
- Dispositivo de expansão: onde o líquido saturado ou sub-resfriado do condensador é expandido para as baixas pressões do evaporador.

Na Fig. 3.1, é mostrada a disposição dos equipamentos para permitir o ciclo de refrigeração por compressão de vapor. O ciclo termodinâmico para este sistema pode ser visualizado na Fig. 3.2, onde um diagrama pressão-

entalpia e temperatura-entropia mostram as condições termodinâmicas de operação e os processos termodinâmicos envolvidos. Iniciando a descrição dos processos pelo estado termodinâmico 1, vapor de refrigerante é comprimido (processo 1-2), condensado (processo 2-3), tendo posteriormente sua pressão diminuída (processo 3-4) de modo que o fluido possa evaporar a baixa pressão (processo 4-1).

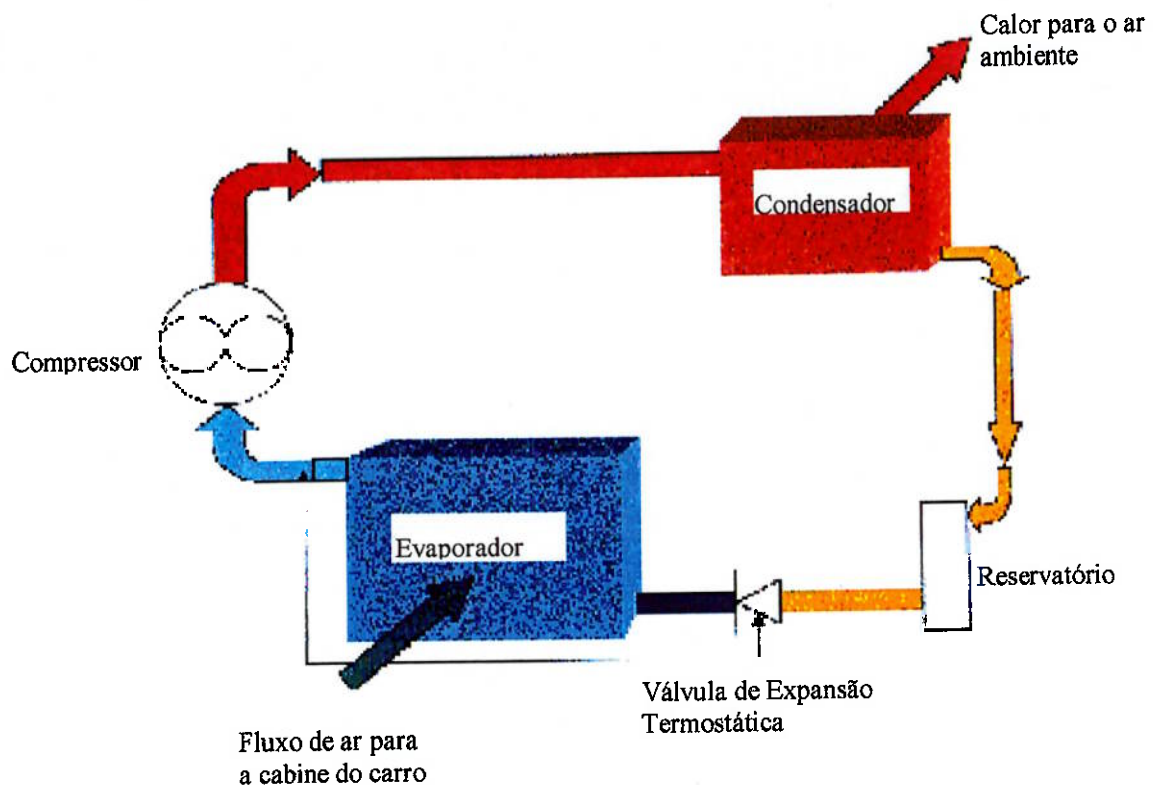


Figura 3.1 – Disposição dos equipamentos no ciclo de compressão de vapor

Nesse ciclo pode-se verificar a compressão isentrópica de vapor saturado até a pressão de condensação, que permanece constante durante a troca de calor com o meio ambiente no condensador, trazendo-o à forma líquida. O líquido que deixa o condensador à pressão de condensação sofre abaixamento de pressão isentálpica na válvula de expansão, chegando à pressão necessária para entrar no evaporador. Durante a vaporização, o refrigerante líquido é levado ao estado de vapor à pressão constante, retirando calor do meio a ser resfriado. Este ciclo é conhecido como ciclo ideal de compressão a vapor.

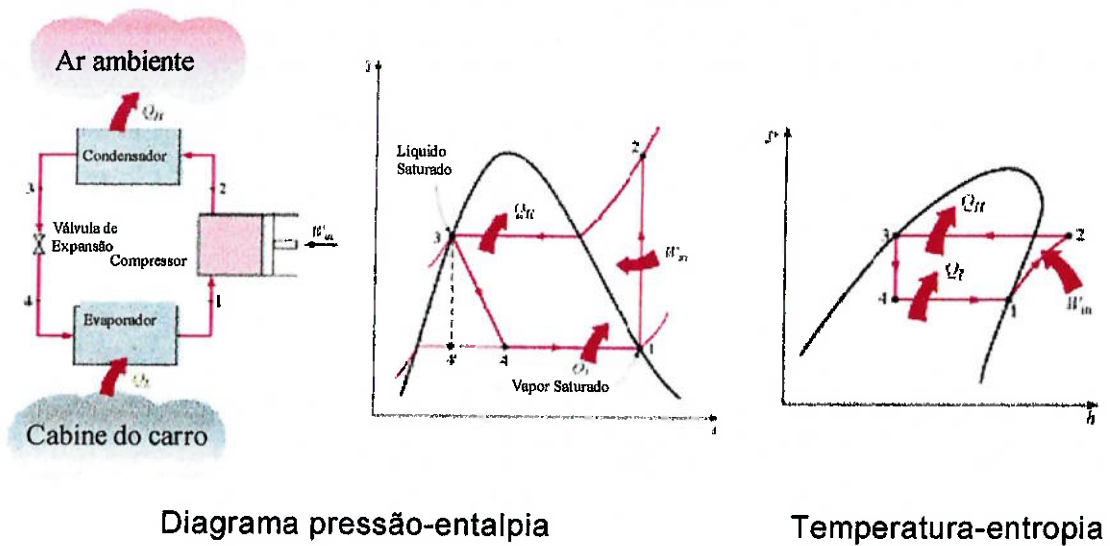


Diagrama pressão-entálpia

Temperatura-entropia

Figura 3.2 – Ciclo Termodinâmico

3.2.2 A eficiência energética do ciclo de compressão de vapor

A eficiência energética de um ciclo de refrigeração é dada pelo seu coeficiente de performance (COP), que é a relação entre o calor trocado no evaporador, \dot{Q}_L , (que corresponde à carga térmica do equipamento) e a energia gasta no compressor, \dot{W} , isto é:

$$COP = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} \quad (3.1)$$

Em um ciclo de compressão a vapor a maior eficiência energética, isto é, o maior coeficiente de performance (COP) seria obtido se todos os processos apresentados na Fig. 3.2 ocorressem sem perdas (irreversibilidades). Este ciclo com COP máximo é o Ciclo de Carnot. Neste caso o COP seria função somente das temperaturas de evaporação, T_L , e de condensação, T_H , relacionadas da forma abaixo:

$$COP = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} \quad (3.2)$$

com as temperaturas T_L e T_H dadas em Kelvin ($K = ^\circ C + 273,15$).

Verifica-se da Eq. 3.2 que o coeficiente de performance COP varia entre 0 e ∞ , isto é, $0 < \text{COP} < \infty$ e quanto mais próximos os valores de T_L e T_H maior o coeficiente de performance.

3.2.3 O ciclo real de compressão de vapor

O ciclo real de compressão a vapor difere do ideal em função das irreversibilidades existentes durante a compressão, além desta não ser isentrópica em consequência de trocas de calor com o meio. Outras considerações no ciclo real correspondem às perdas de carga nos condensadores e evaporadores que são função da velocidade do fluido refrigerante nos trocadores de calor desprezadas no ciclo ideal, havendo assim condensação e evaporação em pressões não constantes.

Outro aspecto importante no ciclo real diz respeito ao sub-resfriamento do refrigerante líquido quando deixa o condensador e o superaquecimento do vapor do refrigerante que sai do evaporador para o compressor. Com isso, garante-se que a válvula de expansão seja alimentada somente com líquido, o que melhora o desempenho na expansão do fluido refrigerante, e o compressor seja alimentado somente com vapor, uma vez que a entrada de líquido no compressor traria danos ao sistema.

O ciclo real de refrigeração por compressão de vapor resultante é apresentado na Fig. 3.3. O ar condicionado automotivo, em função da elevada variação de carga térmica, decorrente de uma variabilidade muito grande nas condições às quais os veículos estão expostos, trabalha com variações significativas na vazão do fluido refrigerante com grandes implicações no ciclo real de compressão de vapor.

3.2.4 O ciclo de compressão de vapor automotivo

A seguir são apresentados alguns detalhes dos equipamentos básicos que compõem um ciclo de refrigeração de compressão por vapor e do fluido de trabalho, o fluido refrigerante.

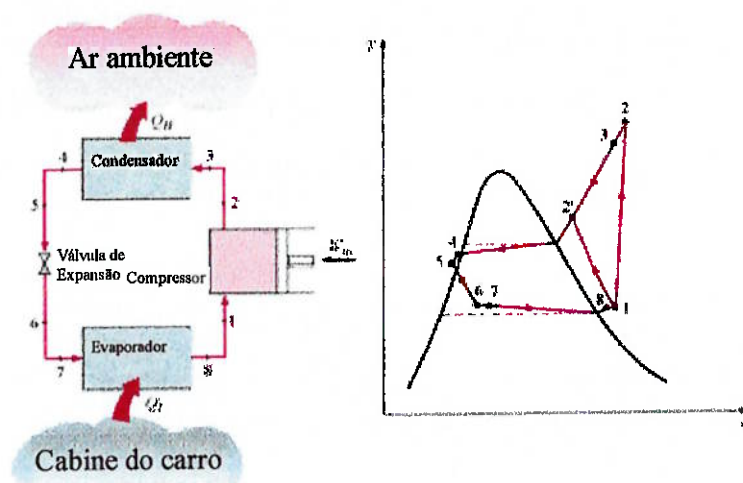


Figura 3.3 – Ciclo real de compressão de vapor

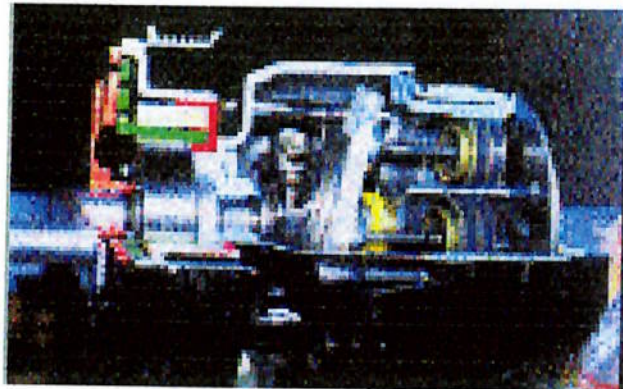
3.2.4.1 Compressores

A vazão do refrigerante pelo sistema é alcançada pela utilização de um compressor, que eleva a pressão de evaporação até a pressão de condensação. O acionamento do compressor é realizado a partir do motor do veículo consumindo parte da sua potência líquida.

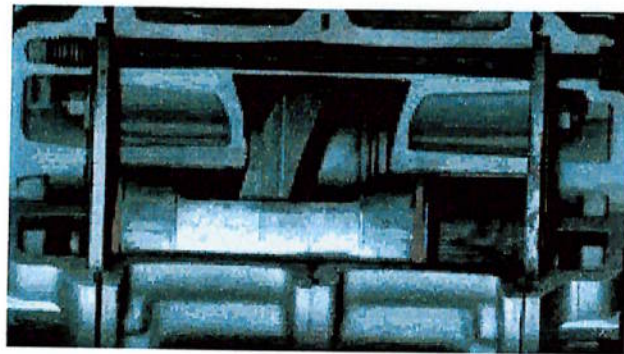
A necessidade de se consumir o mínimo combustível possível, pelo seu efeito ambiental e para aumentar o rendimento do veículo, e também privilegiar o item de conforto na redução no nível de ruídos e na dirigibilidade causada pela alteração de rotação na entrada e saída do compressor do sistema de acionamento, levou ao desenvolvimento de vários tipos de compressores, apresentados a seguir:

- a) **Compressor radial de pistões** — Neste tipo de compressor os cilindros estão colocados em posição radial em torno do eixo de transmissão de força. Foi introduzido no mercado na década de 70 e está praticamente em desuso;
- b) **Compressor tipo "Swashplate"** — Este compressor é configurado a partir de um disco "Swashplate", fixado de forma inclinada ao eixo do compressor, sendo que os pistões estão colocados axialmente com movimento paralelo ao eixo de potência, conforme mostrado nas Figs. 3.4(a) e 3.4(b). É um tipo bastante utilizado pela indústria

automotiva, podendo ser fabricado também com controle de deslocamento dos pistões;



(a)



(b)

Figura 3.4. Compressor do tipo "swashplate".

- c) **Compressor de pistões tipo "wobbleplate"** - O mecanismo de funcionamento deste tipo é muito semelhante ao do "swashplate", diferenciando-se pelo posicionamento apenas na parte superior. É um dos principais tipos de compressores produzidos, existindo dois tipos: o de deslocamento fixo e o de deslocamento variável, apresentados nas Figs. 3.5 e 3.6 respectivamente.
- d) **Compressor rotativo de palhetas** — O desenvolvimento desse compressor foi inicialmente preconizado pela Mitsubishi Electric Corporation e privilegia a redução do número de componentes para melhorar a sua performance. Este equipamento tem um pistão rotativo e palhetas com molas, que geram uma área de sucção e uma área de compressão.

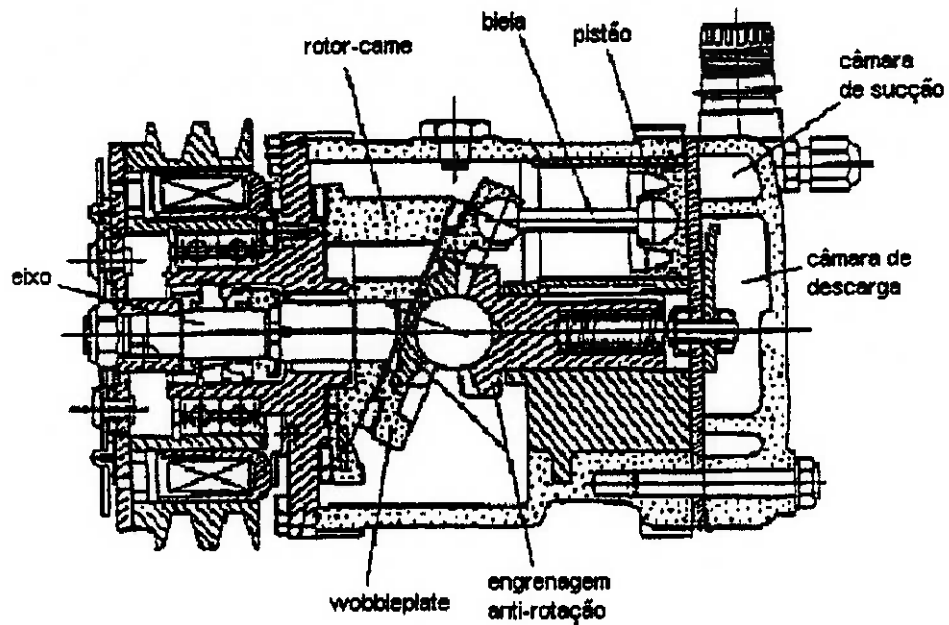


Figura 3.5. Compressor "wobbleplate" com deslocamento fixo.

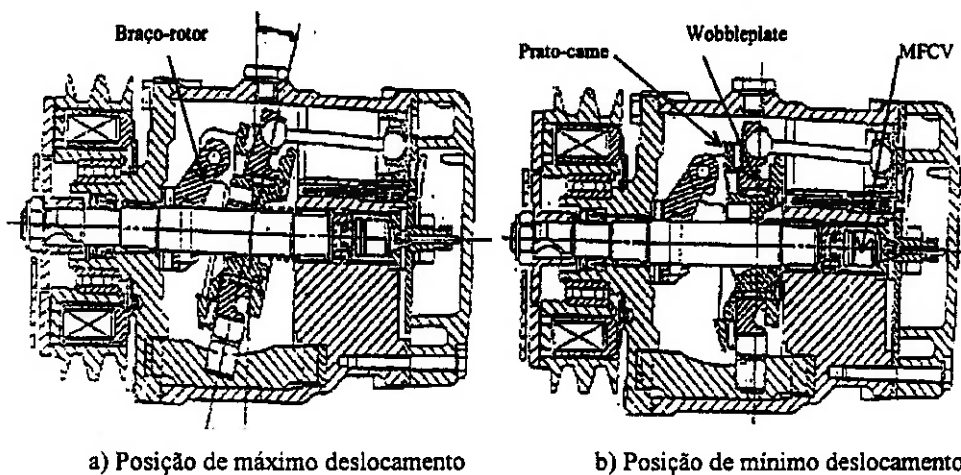


Figura 3.6. Compressor "wobbleplate" com deslocamento variável.

O pistão no compressor rotativo de palhetas é fixado a um eixo de forma excêntrica, girando em torno do mesmo. Com a entrada e saída da palheta forma-se uma camada de compressão e sucção. Uma vista deste tipo de compressor é apresentada na Fig. 3.7.

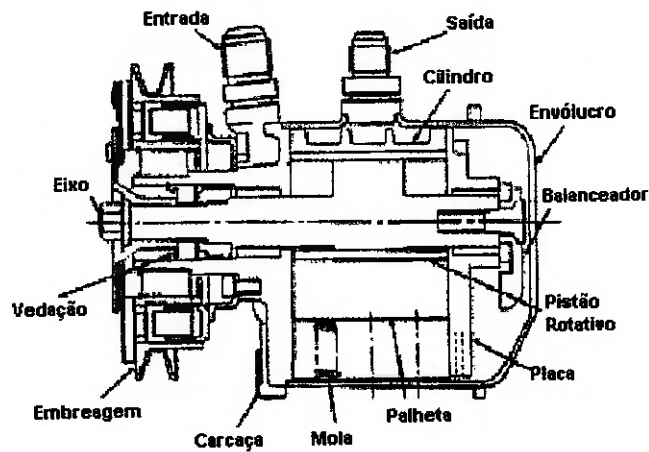


Figura 3.7 Compressor rotativo de palhetas (KODA et al., 1981)

O gás originado no evaporador entra pela porta de sucção entre a parede interna do cilindro e o pistão sem a necessidade de válvula de sucção. O volume interno do compressor fica dividido em duas camadas pelo pistão rotativo e a palheta. Com a revolução do pistão o volume de sucção é continuamente aumentado criando uma depressão que permite a sucção do gás, enquanto do outro lado há a diminuição do volume e o aumento de pressão até a abertura da válvula de descarga, conforme mostrado na Fig. 3.8.

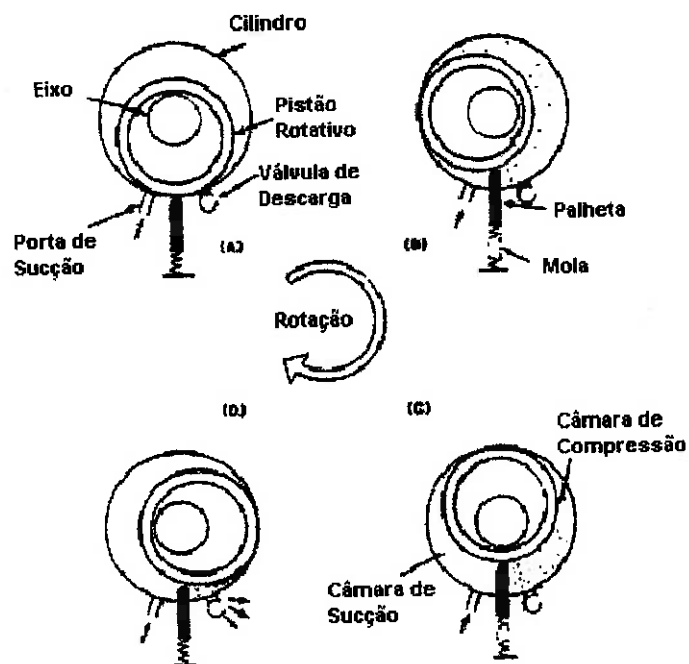


Figura 3.8 Princípio de funcionamento do compressor rotativo de palhetas

Uma vez que a rotação do pistão é menor que a do eixo, em virtude da folga existente entre a área interna do pistão e a superfície externa do eixo preenchida com óleo, ocorrem perdas pequenas por atrito neste tipo de compressor. Detalhe da montagem do eixo excêntrico com o pistão rotativo pode ser visualizado na Fig. 3.9.

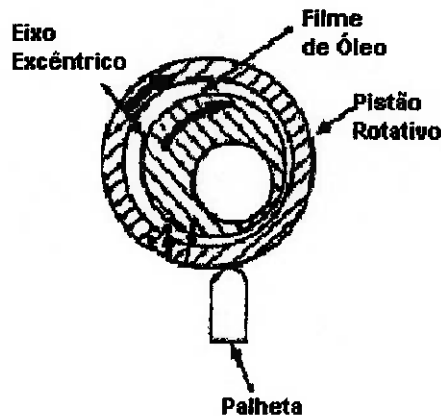


Figura 3.9 – Detalhe da montagem do eixo excêntrico com o pistão rotativo.

O acionamento do compressor, de um modo geral, é feito por meio de uma embreagem eletromagnética que é construída com uma polia acoplada, mostrada na Fig. 3.10. Esta embreagem é projetada para engatar a polia ao eixo do compressor quando o induzido é energizado (Fig. 3.11). Ao engatar-se, a embreagem transmite parte da potência do motor do veículo ao compressor. Com o compressor acionado e os ventiladores ligados, o sistema de refrigeração pode realizar o resfriamento do ar do habitáculo, para garantir o seu condicionamento.

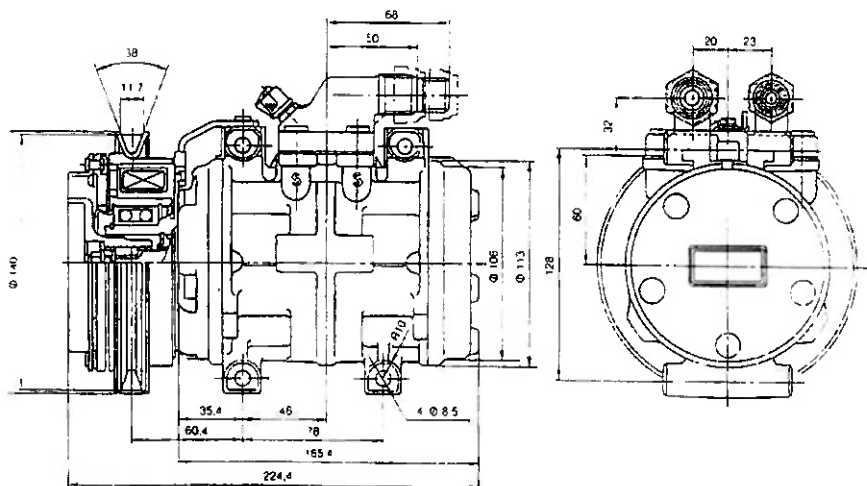


Figura 3.10. Desenho em detalhe de um compressor com polia acoplada.

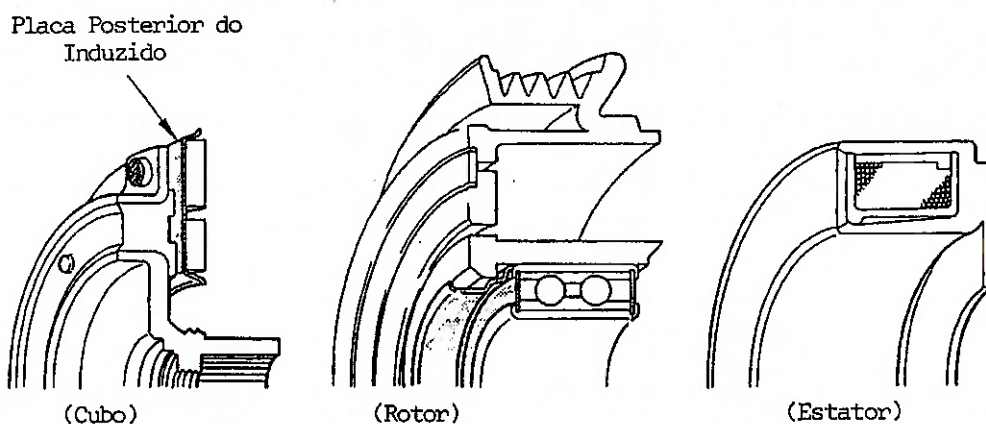


Figura 3.11. Componentes principais da embreagem eletromagnética.

3.2.4.2 Condensadores

No condensador os vapores do fluido refrigerante retornam ao estado líquido rejeitando calor ao meio ambiente. Quanto mais eficientemente o líquido é condensado, menor será o espaço ocupado pelo sistema.

Vários modelos de condensadores foram desenvolvidos ao longo dos anos. Os condensadores com tubos de seção circular e aletas de alumínio, representados na Fig. 3.12, já foram largamente utilizados; inicialmente com tubos de aço e posteriormente com tubos de cobre. Seus principais atrativos foram o baixo custo, alta confiabilidade e fácil fabricação, o que em parte compensava suas limitações de desempenho.

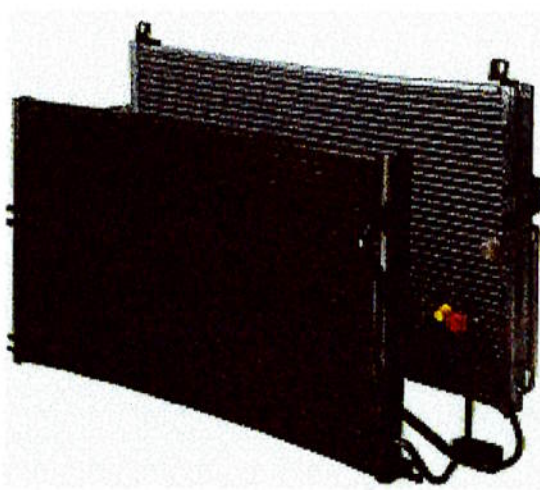


Figura 3.12. Condensadores de tubos e aletas.

Estes condensadores dominaram o mercado até que a indústria automobilística fosse pressionada pelas novas tendências de mercado com veículos menores e mais aerodinâmicos, em que cada vez mais o espaço disponível para os equipamentos de ar condicionado, bem como a vazão de ar através do radiador e do condensador, são menores. Isto exige condensadores com maior eficiência térmica.

Um primeiro passo foi dado com a utilização de tubos de diâmetros menores, permitindo que a área de troca térmica fosse aumentada, aliado a uma disposição do feixe tubular paralelo ao fluxo de ar com menor perda de carga e uma boa troca térmica.

O salto de eficiência, contudo, aconteceria com a introdução de tubos de alumínio planos de várias seções internas e aletas de alumínio tipo "louver" soldadas ao tubo, conforme mostrado na Fig. 3.13.

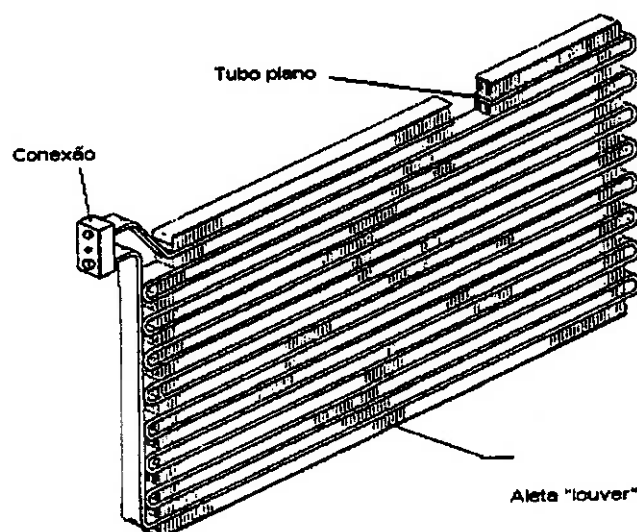


Figura 3.13 Condensadores de serpentina de tubos planos e aletas tipo "louver".

Um aspecto igualmente relevante em termos de condensadores diz respeito à necessidade de se diminuir a resistência ao fluxo de ar e otimizar a troca de calor. Este tem sido um desafio para os engenheiros do setor, principalmente com a crescente onda de projetos que vislumbram coeficientes aerodinâmicos cada vez menores. Este tipo de concepção restringe a área frontal onde normalmente é colocado o condensador para receber o ar mais frio.

3.2.4.3 Evaporadores

O evaporador é a fonte de ar frio a ser insuflado no interior do veículo. O refrigerante ao evaporar-se retira calor do ar que o atravessa. No setor automotivo existem, basicamente, três tipos de evaporadores, apresentados na Fig. 3.14.

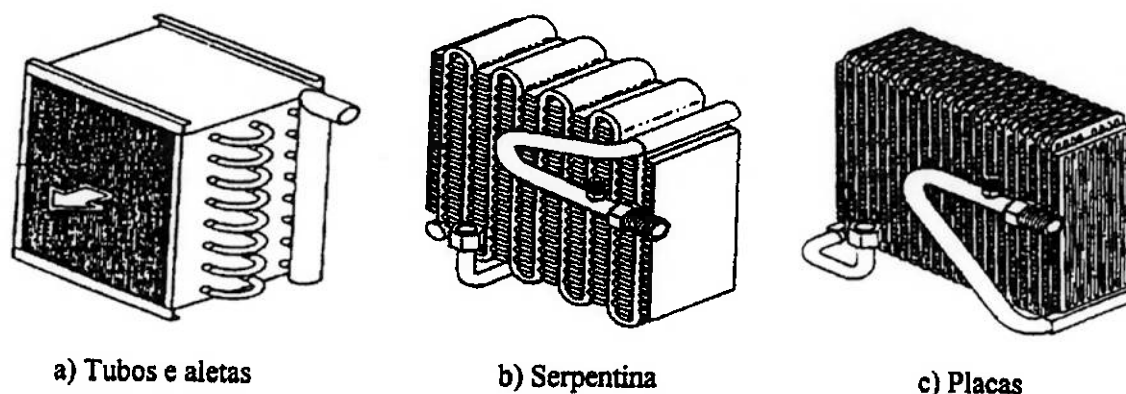


Figura 3.14. Tipos de evaporadores

O modelo mais simples é constituído de tubos de cobre ou de alumínio com aletas de alumínio (Fig 3.14a), que apresenta facilidade construtiva, porém a eficiência é baixa em relação à área ocupada. Os modelos de tubos de alumínio planos (Fig. 3.14b), com múltiplos canais conformados em serpentina e aletados em alumínio têm um desempenho melhor que o anterior. Um outro modelo que vem ganhando mercado é do tipo placas (Fig. 3.14c), que são dispostas formando canais para escoamento do refrigerante. Este modelo fornece um desempenho superior aos anteriores.

O desempenho dos evaporadores é importante tendo-se em mente que um aumento de vazão do líquido refrigerante pode alterar o funcionamento de todo o sistema com passagem de líquido para o lado de sucção do compressor. Um aumento de carga térmica exigirá um aumento de vazão no evaporador, e em conseqüência o seu projeto deverá levar em consideração as variações de parâmetros de operação a que estes estão sujeitos de modo a evitar a vaporização incompleta do refrigerante.

Algumas pesquisas foram conduzidas para determinar modelos que mostrem as variações operacionais de um evaporador com as variações de vazão de refrigerante, a temperatura e vazão do ar que passa pelo evaporador.

Muitos desses modelos também levam em consideração o fato que o refrigerante é contaminado pelo óleo de lubrificação do compressor, e tem suas propriedades de evaporação alteradas, pois o óleo faz diminuir a pressão de vaporização, fazendo com que a fase líquida percorra mais comprimento de troca de calor tendo um efeito similar ao aumento de vazão.

A performance dos evaporadores de tubos e aletas é muito baixa para as necessidades de espaço hoje encontradas na indústria automotiva, tornando esta aplicação praticamente inexistente, em função da sua baixa capacidade de resfriamento por volume instalado.

Os evaporadores de serpentina com tubos de alumínio planos de múltiplas passagens internas são mais eficientes que os de tubos e aletas, quer as aletas sejam na forma de chapas ou na forma corrugada tipo "louvers". O maior problema para este tipo de evaporador reside no limite mínimo de raio de dobramento dos tubos de alumínio limitando também a altura das aletas, influenciando o volume final para uma determinada capacidade de resfriamento.

Os evaporadores de placas também são confeccionados com aletas tipo chapas ou corrugadas tipo "louvers", mas pelo aspecto construtivo podem ter as alturas das aletas em até 50% das utilizadas nos evaporadores de serpentina. Isto faz uma grande diferença na capacidade de resfriamento em função do volume ocupado.

3.2.4.4 Dispositivos de expansão

O refrigerante é circulado no sistema de ar condicionado para promover as trocas de calor necessárias ao resfriamento do ar a ser insuflado no interior do veículo. Neste trajeto pelo sistema, o refrigerante passa por dois regimes de pressão e temperatura com mudança de estado. No evaporador ocorre um dos processos de troca de calor com mudança de estado. Para se ter este equipamento otimizado há necessidade de se promover a evaporação a baixas pressões, diminuindo-se com isso a temperatura de evaporação.

Basicamente em aplicações automotivas dois dispositivos são utilizados para fins de abaixamento de pressão no evaporador: são os tubos de orifício (regulagem fixa) e as válvulas de expansão termostática (regulagem variável).

A. Tubos de orifício

Este equipamento tem o comprimento fixo de 38,4 mm envolto por um suporte plástico com dois "o rings", para manter a vedação entre a entrada e a saída do tubo, e duas telas montadas uma em cada lado do conjunto. A tela de entrada tem a função de filtragem, impedindo que as partículas possam obstruir o tubo, enquanto que a tela de saída funciona como um abafador de ruído causado pelo fluxo de refrigerante no interior do tubo de orifício.

O efeito de queda da pressão necessária à alimentação do evaporador ocorre como consequência da perda de carga na passagem do fluxo de refrigeração em uma seção transversal pequena, ou seja, no tubo de pequeno diâmetro. Na Fig. 3.15 é apresentada uma representação esquemática do tubo de orifício, enquanto na Fig. 3.16 é apresentada uma vista em corte deste dispositivo de expansão.

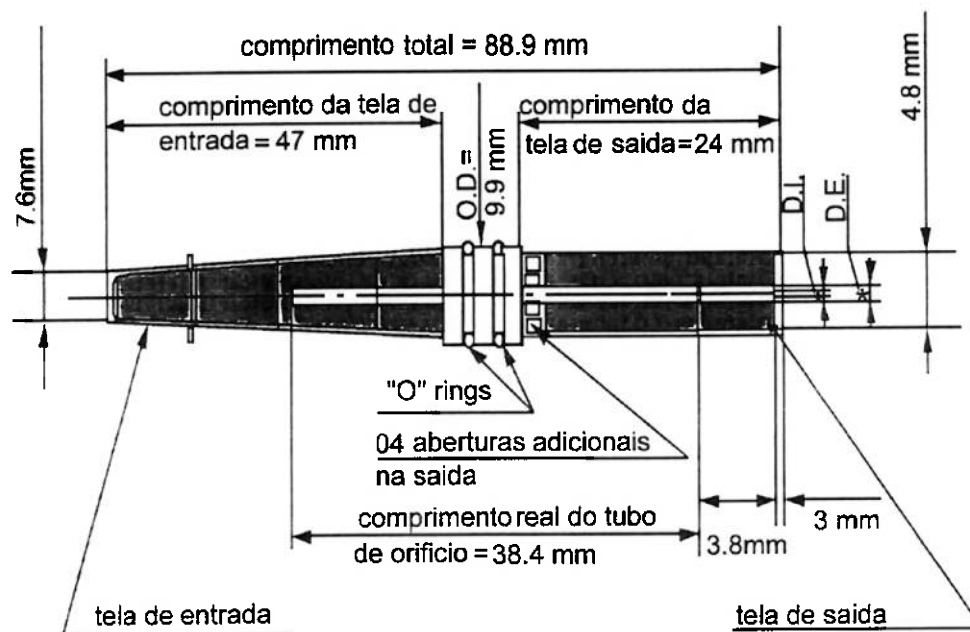


Figura 3.15. Representação esquemática do tubo de orifício

O tubo de orifício tem um custo de produção baixo e manutenção simples. Isto é de vital importância principalmente na indústria norte americana, onde o sistema de ar condicionado tornou-se um equipamento padrão em automóveis.

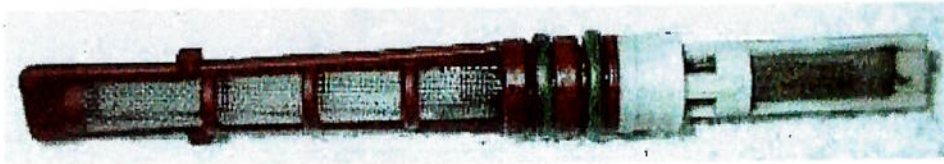


Figura 3.16. Vista em corte de um tubo de orifício

A desvantagem de um sistema de ar condicionado que trabalha com tubo de orifício diz respeito ao difícil controle do sistema quando as variações das condições de operação são impostas, fazendo-se necessário a atuação em outros equipamentos, principalmente o compressor, para um controle adequado do ciclo.

Para a otimização do ciclo busca-se o melhor diâmetro interno para se alcançar uma determinada vazão e queda de pressão por meio de softwares de simulação ou de curvas determinadas experimentalmente.

B. Válvula de expansão termostática

Este equipamento é responsável por equilibrar a vazão de fluido refrigerante no evaporador em função da carga térmica trocada neste. As aplicações automotivas são caracterizadas por altas perdas de carga e altas vazões de fluido refrigerante, com mudanças elevadas da carga térmica no evaporador. Este fato torna a válvula de expansão termostática mais eficiente que os tubos de orifício, promovendo controle de vazão do refrigerante baseado no superaquecimento do fluido.

Na Fig. 3.17 é apresentada uma representação esquemática da válvula termostática de aplicação automotiva, enquanto na Fig. 3.18 é apresentada uma vista em corte deste dispositivo de expansão. Este tipo de sistema de expansão é o mais utilizado na indústria automotiva nacional.

A válvula de expansão termostática altera a vazão do refrigerante a partir da "leitura" da temperatura do refrigerante na saída do evaporador, captada pelo bulbo que contém o mesmo fluido refrigerante da instalação, denominado fluido ativo. À medida em que a temperatura no evaporador aumenta a pressão do fluido ativo, que atua no diafragma superior do dispositivo, aumenta a abertura da válvula para que uma maior quantidade de fluido refrigerante atravesse o evaporador. Na diminuição da temperatura no evaporador ocorre processo inverso, realizando o controle fino da vazão.

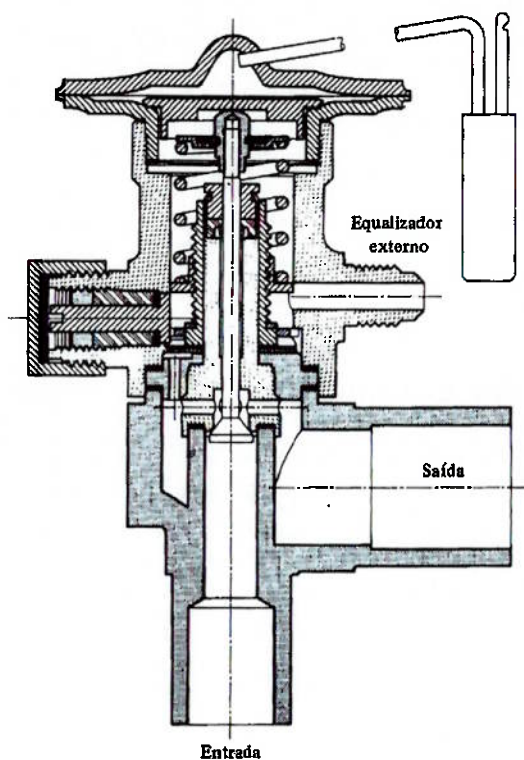


Figura 3.17. Representação esquemática da válvula termostática

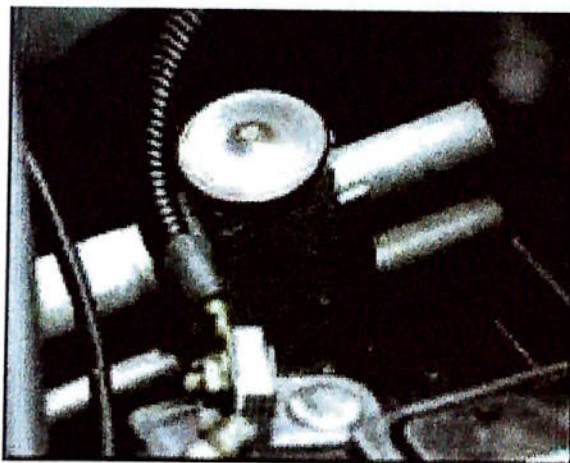


Figura 3.18. Vista de uma válvula termostática instalada

O equalizador externo, que consiste de um tubo de pequeno diâmetro ligando a linha de aspiração a uma pequena câmara na região inferior do diafragma, faz com o que a pressão da região de aspiração passe a agir sobre a superfície inferior do diafragma.

Sem o uso deste equalizador a pressão que agiria na região inferior do diafragma (a pressão no evaporador) seria maior que aquela reinante na

tubulação de aspiração na região de fixação do bulbo. Isto ocorreria devido à significativa perda de carga nos evaporadores de sistemas automotivos e o resultado seria a abertura da válvula somente com elevados níveis de superaquecimento no evaporador, comprometendo a sua efetividade.

C. Dispositivos auxiliares ao dispositivo de expansão

Existem dois dispositivos auxiliares ao dispositivo de expansão, visando um funcionamento adequado do ciclo. São eles o separador de vapor e o acumulador de líquido.

C1. Separador de vapor

O separador de vapor, apresentado na Fig. 3.19, é utilizado em sistemas que trabalham com válvula de expansão termostática, que requer refrigerante líquido na sua entrada. Para tal coloca-se este dispositivo na saída do condensador com a finalidade de separar o vapor e o líquido do fluido refrigerante e encaminhar apenas o líquido para a válvula de expansão. Além disto, um material dessecante é colocado no interior deste dispositivo para remover a umidade e um filtro é colocado na saída do líquido para reter impurezas que possam prejudicar o desempenho do sistema.

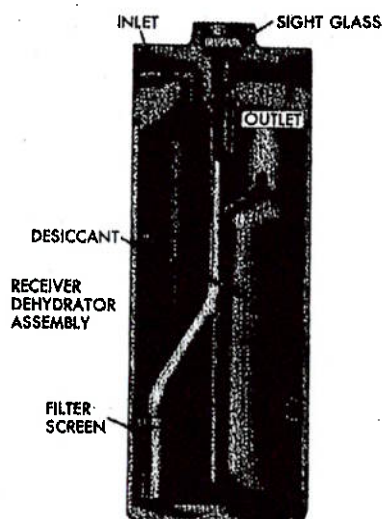


Figura 3.19. Separador de vapor

C1. Acumulador de líquido

O acumulador de líquido, apresentado na Fig. 3.20, é utilizado em sistemas que trabalham com tubos de orifício como dispositivo de expansão. Ele é montado na saída do evaporador. Ao acumular o excesso de líquido que deixa o evaporador, ele impede danos ao compressor, que seriam ocasionados pela presença de líquido na sua linha de sucção.

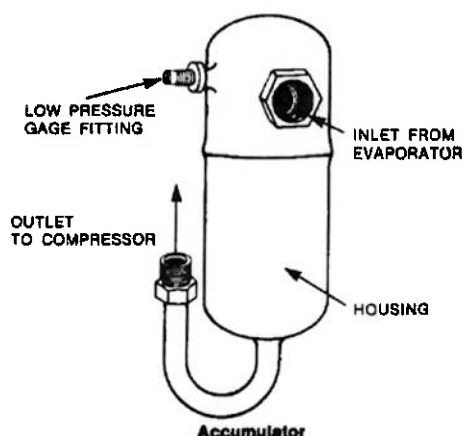


Figura 3.20. Acumulador de líquido

3.2.4.5 Fluidos refrigerantes

Inicialmente o fluido refrigerante utilizado em ciclos de compressão de vapor em sistemas automobilísticos foi o CFC-12. Devido à sua baixa toxicidade, estabilidade térmica, não inflamabilidade e miscibilidade com óleos lubrificantes, este fluido refrigerante foi largamente utilizado até a década de 1990.

Contudo, uma série de evidências que se acumularam na década de 1980, da relação entre os CFCs (clorofluorcarbonos) e a diminuição da camada de ozônio levaram ao desenvolvimento de pesquisas para a substituição dos CFCs. Como resultado destes estudos, o CFC-12 foi substituído pelo HFC-134a, um hidrofluorcarbono. Maiores detalhes podem ser encontrados em FIORELLI & HERNANDEZ NETO (1998),

Atualmente o HFC 134a é o fluido refrigerante utilizado nos sistemas automotivos, mas a sua utilização não deverá perdurar por muito tempo. É que os HFCs contribuem significativamente para agravar o problema do efeito

estufa. Por isso, mais recentemente houve um redirecionamento no sentido de se utilizar os hidrocarbonetos propano (em refrigeração chamado R-290), isobutano (R-600a), bem como o gás carbônico (CO₂, chamado R-744).

3.3 Sistema de distribuição de ar

Um dos problemas mais sérios enfrentados na obtenção de conforto térmico em veículos automotivos é a distribuição de ar. As maiores dificuldades estão relacionadas com:

- O pequeno espaço no interior do veículo, agravado pela presença dos bancos, o teto baixo e mais a presença dos ocupantes;
- Necessidade de retirada de fluxos de calor diferenciados em função da variação da incidência solar com o trajeto;
- Diferentes temperaturas de pele para o conforto das diversas partes do corpo, submetidas a diversas condições térmicas dentro do veículo.

Todas estas restrições levam a uma distribuição do ar localizado, mas que tem que atender a uma circulação geral sobre os ocupantes com um determinado nível de velocidades e temperaturas.

Em veículos de passeio, por exemplo, normalmente a distribuição de ar é provida por um sistema de distribuição frontal, apresentado na Fig. 3.21.

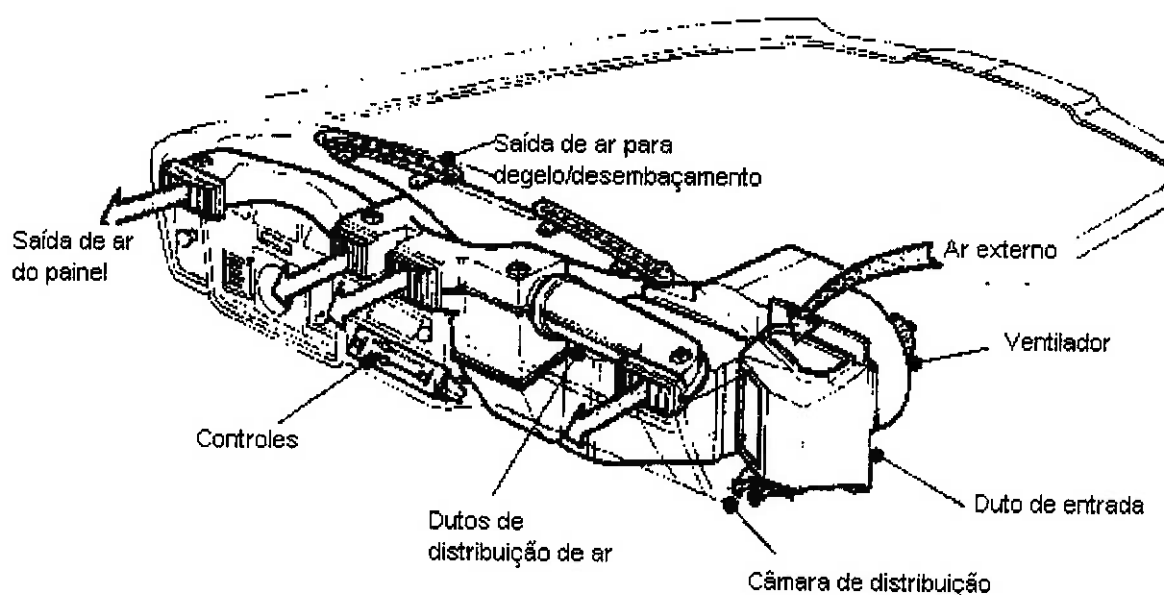


Figura 3.21 Sistema de distribuição de ar em veículo de passeio.

Este sistema de distribuição apresenta problemas, pois:

- a) Não conta com uma insuflação direta de ar frio na parte traseira, resultando em problemas de desconforto devido ao tempo maior para ser resfriada;
- b) Um fluxo maior de ar na parte dianteira para compensar a retirada de calor da parte traseira, causando desconforto em função da maior velocidade do jato.

Além disso, existe a necessidade da renovação de ar para que se mantenha níveis adequados de salubridade dentro do ambiente condicionado, conforme mostrado na Fig. 3.22; o que muitas vezes também não é realizado de forma adequada.

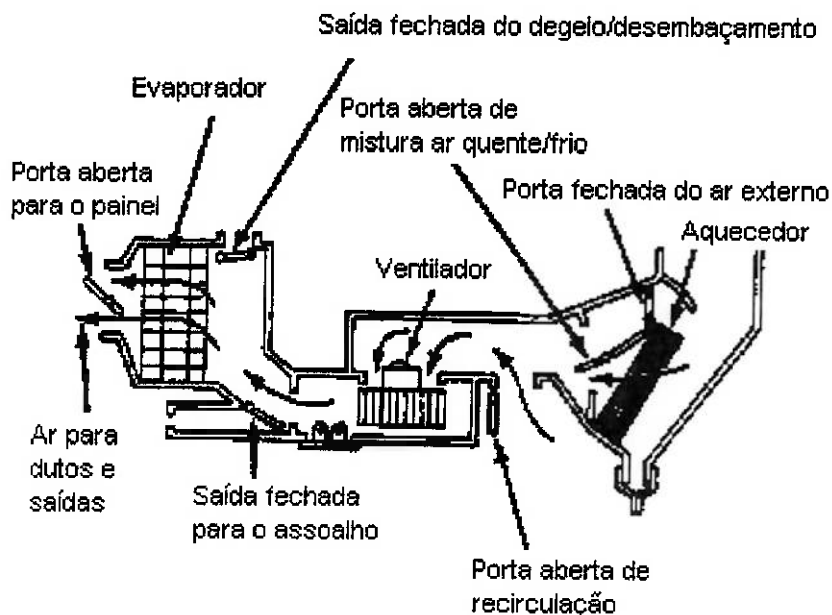


Figura 3.22. Sistema de mistura de ar externo e ar recirculado

Este sistema permite que seja controlada a quantidade de ar externo que entra para o habitáculo auxiliando na renovação de ar e também diminuindo a carga térmica total do sistema de refrigeração.

Em muitos casos, os ocupantes do veículo desejam apenas a entrada de ar externo sem resfriamento. Isto é possível através de uma modificação da regulagem no painel e da abertura e fechamento de determinadas portas de ventilação, apresentado na Fig. 3.23.

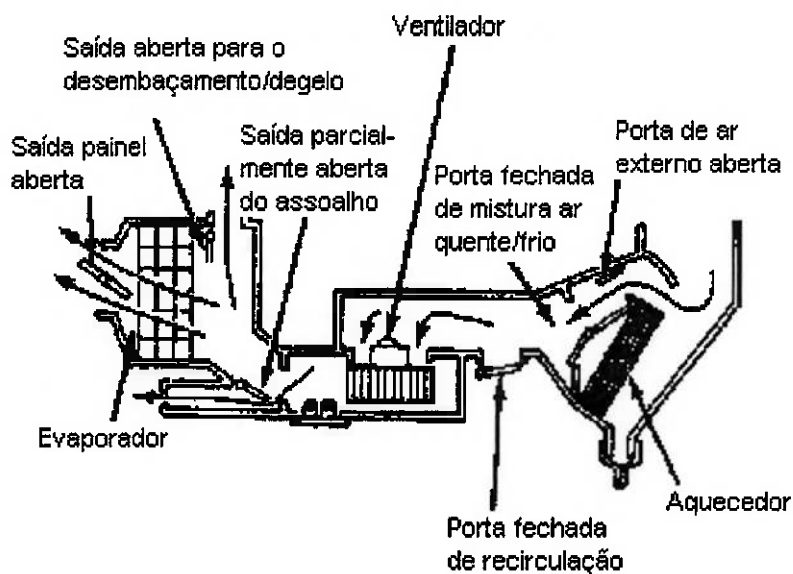


Figura 3.23. Sistema de ventilação

No caso de ônibus, o insuflamento deve ser feito com fluxo e direção controladas visando diminuir o desconforto, principalmente com relação a irradiação solar para os passageiros sentados próximos à janela. Normalmente esta distribuição não é bem feita provocando o aparecimento de "ilhas de calor" dentro do ônibus, prejudicando em muito o conforto térmico dos passageiros.

Um outro problema verificado em ônibus é a captação inadequada do ar de retorno (recirculação), normalmente com um único evaporador localizado no centro do ônibus, o que também causa desconforto devido ao excesso de calor nesta região.

Mesmo em aviões a distribuição de ar não tem sido realizada a contento e muitos dos problemas estão também relacionados com um sistema de controle inadequado.

3.4 Sistema de controle

O sistema de controle é parte essencial do sistema de condicionamento de ar pois regula o seu funcionamento baseado nas regulagens desejadas pelo usuário e as condições do ambiente externo.

Na análise do controle de qualquer sistema, deve-se verificar as variáveis que o afetam e então definir e dimensionar os sensores e as respectivas malhas de controle a serem implementadas.

No caso de sistema de ar condicionado automotivo, as seguintes variáveis devem ser controladas:

- Temperatura do ar no interior do habitáculo;
- Temperatura do ambiente externo;
- Vazão de ar para o habitáculo;
- Irradiação solar.

Este sistema pode se subdividir em dois:

- a) subsistema de controle de temperatura interna;
- b) subsistema de distribuição de ar.

Cada uma dessas variáveis pode ser controlada de diversas maneiras. Deve-se considerar inicialmente que o sistema de controle deverá atuar conforme regulado pelo seu usuário que pode modificar os níveis de temperatura e de fluxo de ar no interior do habitáculo.

Sendo assim, deve ser feita uma malha de controle fechada que avalia a regulação feita pelo usuário e aciona ou desliga os diversos componentes do sistema, atendendo a demanda feita pelo usuário. Portanto, para o usuário do sistema de ar condicionado automotivo, é permitida a regulação da temperatura e do fluxo de ar no interior do habitáculo. A influência desses dois parâmetros fornece a condição de conforto térmico dos ocupantes do veículo.

Além disso, o sistema de controle deve ser projetado para que o sistema de refrigeração funcione em condições ótimas de operação, em função das regulações feitas pelo usuário.

Um problema sério que é verificado é de controle da formação de gelo no evaporador. Este fenômeno ocorre devido à temperatura na superfície das paredes do tubo do evaporador atingir níveis próximos ao de congelamento da água. Isto implicará em uma diminuição da área de passagem de ar e, conseqüentemente, diminuindo o fluxo de ar para o interior do habitáculo e a capacidade de refrigeração do sistema.

Para evitar este problema, é posicionado um sensor para avaliar a temperatura na superfície do evaporador. Este sensor é acoplado a um

controlador que pode ligar e desligar o acionamento da embreagem magnética, regulando assim a operação do compressor. Ao desligar o compressor, o sistema de refrigeração atinge o equilíbrio de pressões. Como valores típicos de controle tem-se:

- a) Acionamento do compressor (ausência de gelo): $4,5 \pm 1^\circ\text{C}$;
- b) Desligamento do compressor (presença de gelo): $1 \pm 1^\circ\text{C}$.

No caso do controle da temperatura e pressão do fluido refrigerante no evaporador, ainda pode ser utilizado um pressostato que avalia a pressão na linha de alta pressão, normalmente posicionado na saída do filtro secador. Este componente pode controlar tanto o funcionamento do compressor como do ventilador do evaporador.

Do ponto de vista de controle da temperatura interna, um sensor é posicionado como mostrado na Fig. 3.24. A avaliação desta temperatura permite o acionamento do compressor pela embreagem eletromagnética, regulando a capacidade de refrigeração do sistema.

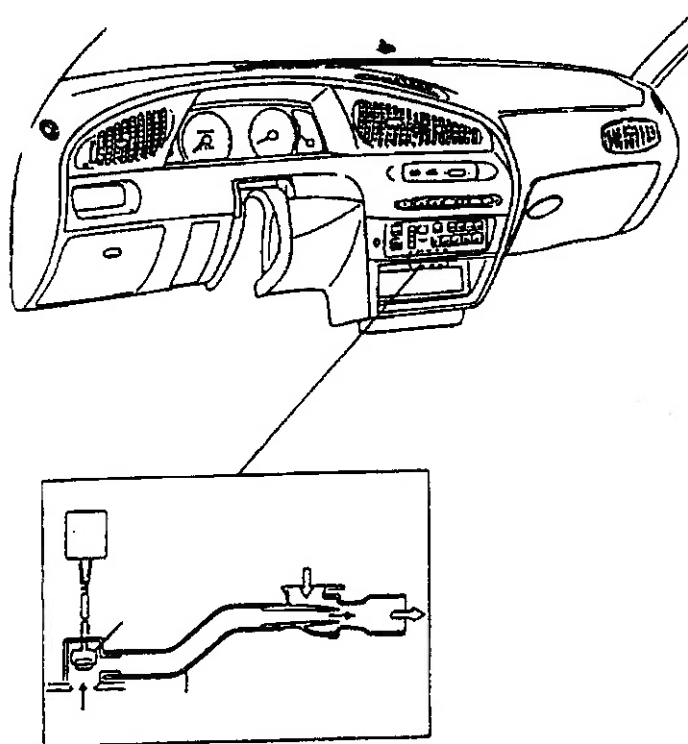


Figura 3.24. Esquema do controle de temperatura interna.

Outro sensor utilizado no controle das condições do habitáculo é o sensor de insolação, que permite avaliar a intensidade de radiação solar e serve como parâmetro para controlar o ciclo de operação do sistema de

refrigeração. Normalmente, este é posicionado no painel interno do veículo, como mostrado na Fig. 3.25.



Figura 3.25. Sensor de irradiação solar e localização.

Outro sensor muito utilizado é o da temperatura do ar externo, normalmente localizado junto ao condensador (vide Fig. 3.24). Com a avaliação deste parâmetro é possível verificar a necessidade de acionamento do sistema de refrigeração ou do sistema de aquecimento (quando houver), no caso de temperaturas externas muito baixas.

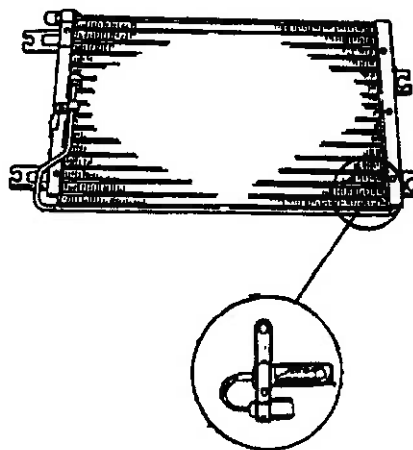


Figura 3.26. Sensor de temperatura externa e localização.

No caso do sub-sistema de distribuição de ar, este é controlado através das regulagens impostas pelo usuário. Nesse caso é permitida a variação do fluxo de ar através do controle de níveis de velocidade do ar, conforme apresentado na Fig. 3.27. Esta regulagem afeta a rotação do ventilador que insufla o ar para o interior do habitáculo.

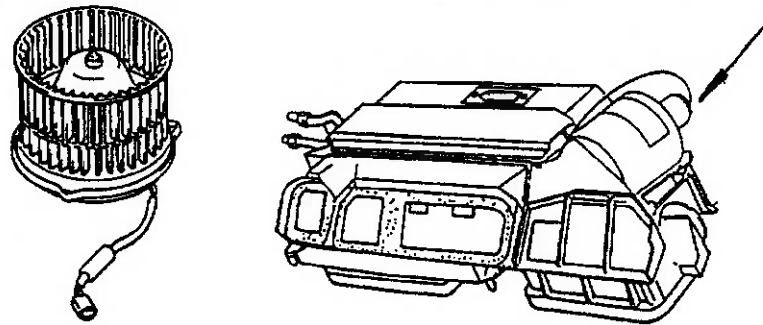


Figura 3.27. Controle da velocidade do ar.

Uma segunda regulagem do sistema de distribuição de ar está no direcionamento do fluxo de ar. Normalmente, este controle é feito por um servo motor que controla a região onde será insuflado o ar (face; pés, pára-brisa, face e pés, pés e pára-brisa).

Em muitos sistemas existe ainda a possibilidade de optar-se pelo aquecimento ou resfriamento do ar insuflado através da mudança da passagem do ar pelo evaporador do sistema de refrigeração ou pelo sistema de aquecimento (ou motor do veículo).

Capítulo 4

AVANÇOS TECNOLÓGICOS

4.1 Introdução

Os avanços tecnológicos, que tem melhorado o desempenho de sistemas de ar condicionado automotivo, têm se verificado na atuação direta no sistema de refrigeração e também na atuação sobre o habitáculo, quer seja no desenvolvimento de novos materiais (vidros, isolantes térmicos, plásticos, etc.), que diminuem o ganho de calor (carga térmica) e melhoram o conforto, quer seja na distribuição de ar, na qualidade do ar e no desenvolvimento de tecnologias para a avaliação adequada das condições de conforto térmico.

Novas tecnologias tem permitido melhorar o desempenho de sistemas de ar condicionado automotivo tanto no consumo de energia e condições de conforto, quanto no aspecto ambiental na diminuição de emissão de poluentes. Neste último aspecto pode-se destacar a possibilidade de eliminação de vazamento de fluido refrigerante, advinda do desenvolvimento de novos compressores, e a diminuição na produção de gases de combustão, decorrente da economia de combustível para acionar o sistema de ar condicionado.

A seguir, são apresentados os avanços tecnológicos que representam uma melhoria das condições de conforto e diminuição no consumo de energia, por meio de uma atuação no habitáculo, e os que representam uma melhoria no desempenho do sistema de ar condicionado pela atuação no sistema de refrigeração.

4.2 Habitáculo

Tem se verificado que, atualmente, a decisão de compra dos consumidores tem-se inclinado muito na direção dos itens de *design* do interior, o senso estético como componente do bem estar de dirigir e itens que possibilitem facilidade de condução do veículo e conforto.

Assim, além das tradicionais expectativas dos consumidores por redução de consumo de combustível e segurança, há um crescente incremento de critérios de conforto como percepção de valor no momento da compra, incorporando aspectos ergonômicos, facilidade de leitura de instrumentos e acionamento dos itens de controle do automóvel. Neste contexto, também se insere o ar condicionado que deve fornecer distribuição de temperaturas internas de conforto, com fluxo direcional adequado de ar, baixo nível de ruído e odores.

4.2.1 Qualidade do ar

Somado às características físicas (velocidade, temperatura e umidade do ar), as opções com as quais a indústria automotiva trabalha para melhorar a qualidade do ar no interior dos veículos são a utilização de filtros com unidades de carbono ativado, camadas de microfibras sintéticas e elementos filtrantes fotocatalíticos, utilizados isoladamente ou de maneira integrada, conforme o tipo de automóvel possa comportar.

Vários modelos de carros já adotam sistemas de ar condicionado com filtros que bloqueiam poluentes, bactérias, fungos, poeiras, pólen que são conhecidos agentes causadores de problemas respiratórios e alérgicos. Até recentemente os filtros eram voltados a reter material fino e poeira. A Fig. 4.1 mostra o filtro e a Fig. 4.2 mostra um filtro posicionado no evaporador.



Figura 4.1 Filtro de ar de sistema automotivo



Figura 4.2 Filtro de ar posicionado no evaporador

Porém, partículas de poeira, pólen e microrganismos ficam aderidos nos filtros e seus esporos são posteriormente levados pelo ar para o interior do veículo, podendo causar doenças, além de serem fontes responsáveis por odores indesejáveis.

Alguns estudos realizados com materiais que ficavam aderidos aos filtros do evaporador, apresentados em FARRINGTON et. al. (1998), levaram à constatação de forte crescimento de microrganismos nestes filtros, conforme mostrado nas Figs 4.3a e e 4.3b.



Figura 4.3a Microorganismos encontrados nos filtros de evaporadores

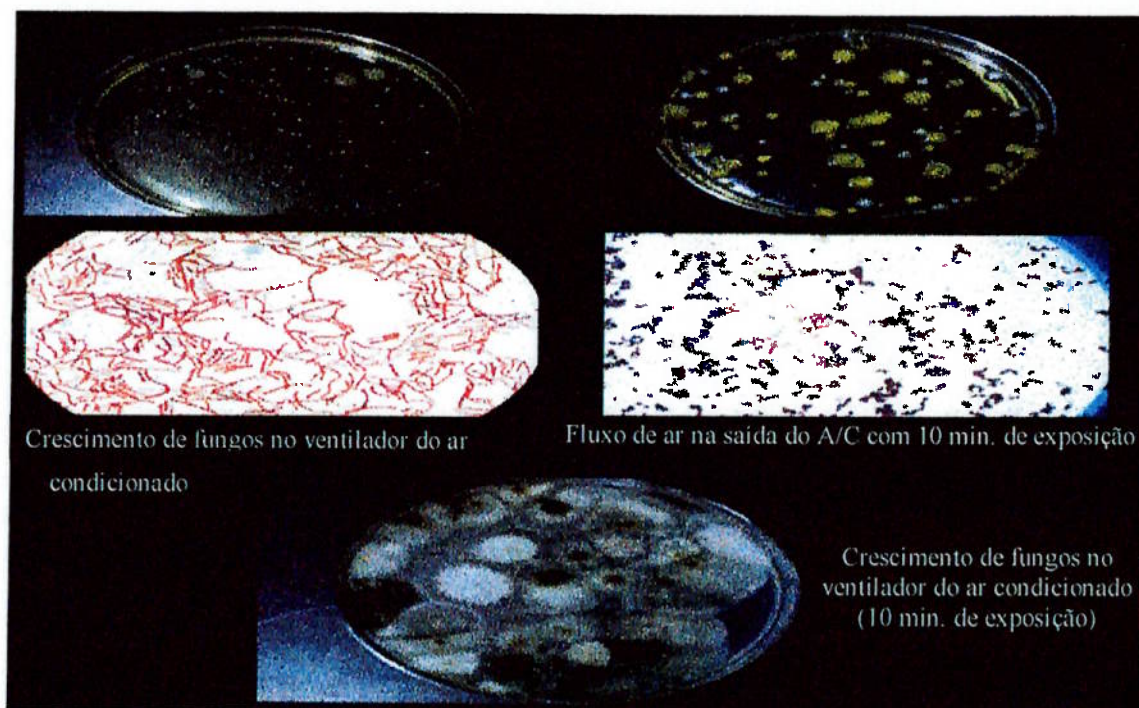


Figura 4.3b Microorganismos encontrados nos filtros de evaporadores

A Fig. 4.4 mostra as condições para haver crescimento de microorganismos:

- a umidade, com alguns microorganismos necessitando de quantidade bastante pequena de umidade para seu crescimento;
- a quantidade de material particulado capaz de fornecer nutrientes aos fungos e bactérias;
- o tipo de material do filtro que pode ser mais higroscópico ou não, além do seu substrato também ter habilidade para fornecer nutrientes.

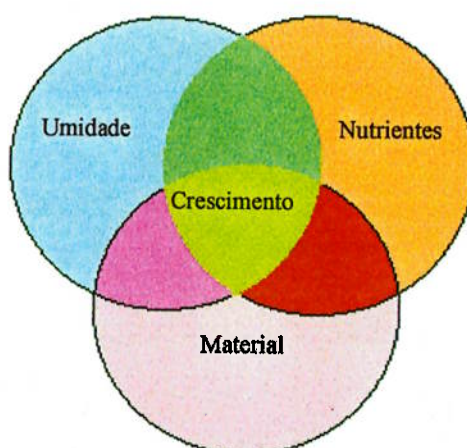


Figura 4.4 Condições para o crescimento microbiano.

No caso do crescimento de fungos e bactérias tem sido conduzido experimentos com agentes antimicrobianos no controle do desenvolvimento destes microrganismos (FOARDE et al., 2000).

Dentre os agentes antimicrobianos em estudo, tem-se a amina de éster fosfórico neutra, um composto de amônia quaternária e um composto a base de iodo, que são agentes liberados pelos órgãos de saúde pública quanto a sua segurança, no que concerne ao uso e o descarte dos filtros no meio ambiente.

Os primeiros resultados indicam que o material do filtro influencia de maneira decisiva o crescimento de microrganismos, não ficando totalmente comprovada a eficácia do uso de agentes antimicrobianos nos filtros. Este é um campo que está somente começando, havendo necessidade de se aprofundar esforços para um melhor resultado desta técnica para a qualidade do ar em sistemas de ar condicionado. (FOARDE et al., 2000).

Porém, com a necessidade de reter odores, os filtros já sofreram uma importante alteração tecnológica, recebendo carbono como elemento ativo para obter resultados desejáveis. O carbono como elemento filtrante de fase gasosa tem encontrado aplicação desde alguns anos em equipamentos industriais que liberam gases contaminantes (compostos orgânicos voláteis) para a atmosfera.

MOLHAVE et al. (1986) detectaram cerca de 22 compostos orgânicos voláteis diferentes presentes no ar. Estes compostos, em concentrações variando de 5 a 25 mg/m³, foram testados e comprovaram produzir irritações de nariz, olhos e garganta. Este estudo também comprovou a eficácia do uso de filtros com carbono granular ativado na redução destes contaminantes. A adsorção dos compostos orgânicos voláteis é função dos contaminantes, da competitividade dos contaminantes pelos pontos de adsorção, da temperatura, da umidade relativa do ar, do fluxo do ar pelo filtro e da espessura de carbono adsorvente. Portanto, trata-se de uma aplicação bastante complexa, em contínuo desenvolvimento para otimizar o desempenho em utilizações futuras. (VAN OS DELL et al., 1995).

Até o momento a recomendação é que o carbono ativo deve ser utilizado em conjunto com materiais filtrantes de poeiras e finos para sua melhor eficiência, pois o carbono tem menor atividade como filtro de material

particulado. Esses filtros devem ser trocados a cada um ano ou um ano e meio.

Um outro passo que contribuiu em fornecer mais um salto tecnológico de elementos filtrantes, foi a introdução de camadas de microfibras sintéticas, carregadas eletrostaticamente, capazes de reter partículas a partir de $3\mu\text{m}$ com 100% de eficiência. Esta característica permite melhorar e manter mais limpos os pára-brisas e painéis de instrumentos.

A qualidade do ar pode ser vir a ser drasticamente melhorada após a conclusão de desenvolvimentos que vem sendo implementados com elementos filtrantes fotocatalíticos (STEVENS et. al, 1998). Os equipamentos para fotocatalise normalmente são constituídos de uma fonte de luz ultravioleta e um recheio de TiO_2 (dióxido de Titânio). Resultados muito promissores tem sido alcançados com utilização desses equipamentos para destruir uma grande variedade de compostos orgânicos voláteis que compõem a atmosfera industrial, e a dos grandes centros urbanos. Estes compostos são adsorvidos no recheio de TiO_2 e oxidados. A chave de sucesso desses equipamentos é apresentar uma grande área de adsorção e uma baixa perda de carga para o fluxo de ar no seu interior, minimizando a potência necessária de insuflação. As primeiras avaliações mostram uma performance invejável, pois com equipamentos pequenos, cerca de 24 cm de comprimento e 13 cm de diâmetro, foi possível obter uma grande área adsorvente e uma queda de pressão muito baixa para o fluxo de ar. As Figs. 4.5a e 4.5b mostram modelos que estão em testes para esta aplicação.



Figura 4.5a Modelo de elemento filtrante fotocatalítico

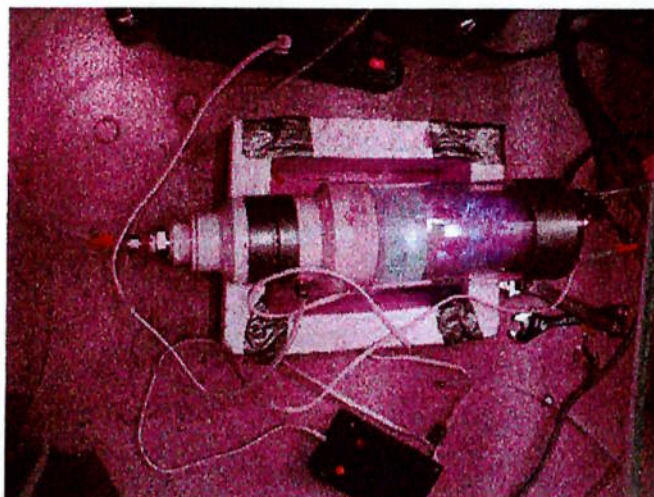


Figura 4.5b Modelo de elemento filtrante fotocatalítico

Tudo indica de que há grandes vantagens em se incluir um reator fotovoltaico de TiO_2 a um sistema de ar condicionado veicular, pois trata-se de uma unidade simples, dimensionalmente pequena, não requerendo mais que 10 W de consumo de energia, baixa manutenção e custo (cerca de U\$10), opera a temperatura ambiente e pode se transformar em uma excelente proposta para diminuir o ar externo de renovação.

Ainda com relação à introdução de filtros no sistema de ar condicionado, um ponto relevante diz respeito à necessidade de se projetar adequadamente os ventiladores, uma vez que os filtros impõem uma restrição importante no fluxo de ar. Nos sistemas de ar condicionado que não trabalham com filtros, os ventiladores são de baixa pressão, e se estes mesmos ventiladores são aplicados em sistemas com filtros, os resultados são pobres, pois somente filtros de baixa restrição são adequados, prejudicando a eficiência de filtragem.

4.2.2 Controle de ruídos

A busca por um ar condicionado que proporcione um ambiente de conforto não pode negligenciar o aspecto do ruído interno causado pelo fluxo de ar e vibrações originadas ao longo de todos os componentes do sistema, principalmente os causados pelos ventiladores, nos dutos e saídas do ar.

No caso de ar condicionado de veículos os componentes como compressor e condensador tem pouca influência na transmissão de vibração e ruído para o interior do veículo quando comparado ao evaporador, dutos

insufladores, ventiladores e saídas, com potencial muito maior para a produção de vibração e ruídos. Mesmo assim, alguns fabricantes têm procurado reduzir o ruído dos compressores através do desenvolvimento de lubrificantes projetados para reduzir ruídos. Também os botões de acionamento e controle de temperatura, no interior dos veículos, passam a ser do tipo rotativo em substituição às alavancas deslizantes que tem maior probabilidade de se tornarem pontos amplificadores de ruídos a partir de um pulso vibratório, pois sua extremidade livre apresenta grande potencial para irradiar vibrações e ruído.

Como pode ser verificado, a indústria automotiva tem procurado isolar e/ou diminuir toda fonte de ruído e vibração do sistema por menor que ele se apresente, mas obviamente tem dedicado mais esforços nos pontos mais críticos com maior potencial de diminuição no nível de ruídos:

- Até 1960 toda a área de painéis de instrumentos era fabricada em aço e montada por soldagem. Posteriormente, com o desenvolvimento dos plásticos, foi sendo gradativamente possível simplificar a fabricação e montagem de algumas estruturas do painel, incluindo os dutos de ar condicionado que passaram a ficar mais leves, com menor número de uniões, reduzindo assim, vibrações e ruídos.

Recentemente, a tecnologia de compósitos permitiu melhorar as propriedades estruturais e durabilidade dos componentes do painel, com a fabricação desse componente de forma integral, reduzindo peso, proporcionando dutos sem emendas, facilitando encapsular ventiladores de maior potência e evaporadores, sem aumentar a irradiação de vibrações e ruídos para os ocupantes. Esses painéis construídos em peça única, em alguns casos, chegam a pesar somente 5 kg com o console anexado.

- Até os anos 1980 os ventiladores eram do tipo axial, que são práticos na sua utilização, porém são muito ruidosos. O caminho encontrado pela indústria automobilística para reduzir o ruído deste equipamento foi passar a adotar os ventiladores do tipo radial. A Fig. 4.6 ilustra estes tipos de ventiladores para a aplicação em ar condicionado automotivo.

Atualmente, os fabricantes de automóveis que desejam o menor ruído interno, optam por dois ventiladores radiais de fluxo duplo com um único motor elétrico (HUCHO, 1998).

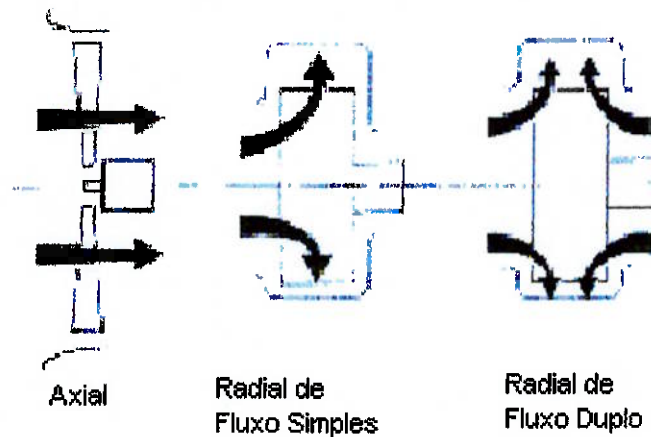


Figura 4.6 Tipos de ventiladores

➤ Mais recentemente estão surgindo modelos integrados de ar condicionado, no qual o evaporador deixa de ocupar um local separado e passa a ser montado logo após o ventilador em peça única, funcionando como um silenciador. Este tipo de arranjo é apresentado na Fig. 4.7.

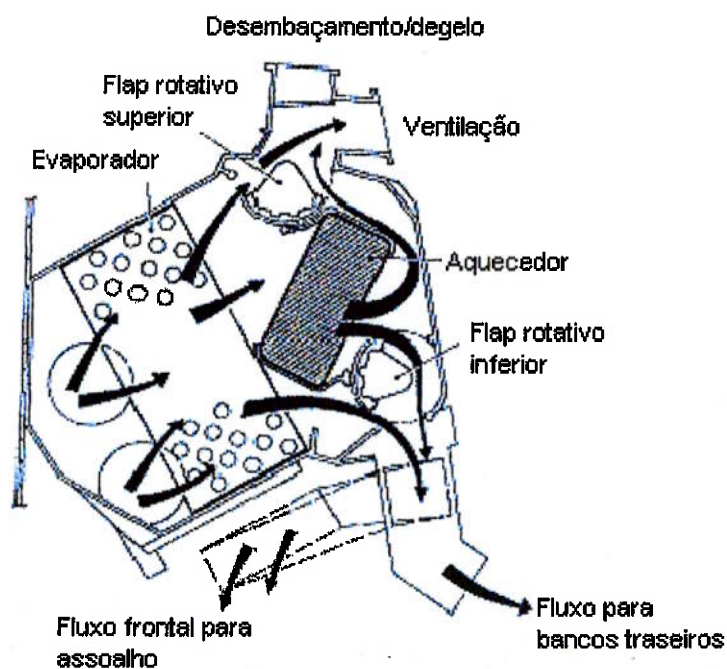


Figura 4.7 Modelo integrado de ar condicionado

4.2.3 Conforto térmico

Conforto visto no Capítulo 2, o conforto térmico em automóveis é questão relativamente complexa e requer estudos e soluções mais sofisticados que os preconizados para edificações.

4.2.3.1 Avaliação do conforto térmico

Madsen et al. (1986) realizaram testes de avaliação do conforto térmico em automóveis, em um túnel de vento com velocidades do ar de até 130 km/h e temperaturas do ar externo desde $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Basicamente três técnicas de medição foram utilizadas, tanto para o motorista como para um passageiro no banco da frente. A primeira técnica consistiu de termopares colocados nos pés e cabeças. A segunda técnica com sensores de conforto térmico (confortímetros) em pés, abdômen e cabeça, e a terceira técnica com manequim aquecido simulando o corpo humano, com sensores em dezesseis partes do corpo. A técnica que melhor permitiu a avaliação do conforto térmico em veículos foi a da utilização de manequim, podendo-se aplicar a equação de Fanger em cada uma das dezesseis regiões aquecidas e chegar-se a situação real de perda de calor total, obtendo-se o valor do PMV. Os testes com manequim foram realizados para condições de regime permanente.

Em função das limitações de se medir o conforto térmico em regime transitório com manequins aquecidos, novos desenvolvimentos tem sido buscados e novos modelos têm sido desenvolvidos.

A avaliação do conforto térmico engloba estudos bastante extensos com a compilação de experimentos de clínica médica, que visam estabelecer um modelo de resposta térmica e as características térmicas do corpo humano, podendo-se então conjugar a fisiologia térmica humana com o conforto térmico.

Nestes estudos verificou-se que a sensação térmica humana ao ambiente é realizada via receptores quente/frio distribuídos pelo corpo, conforme apresentado na Fig.4.8.

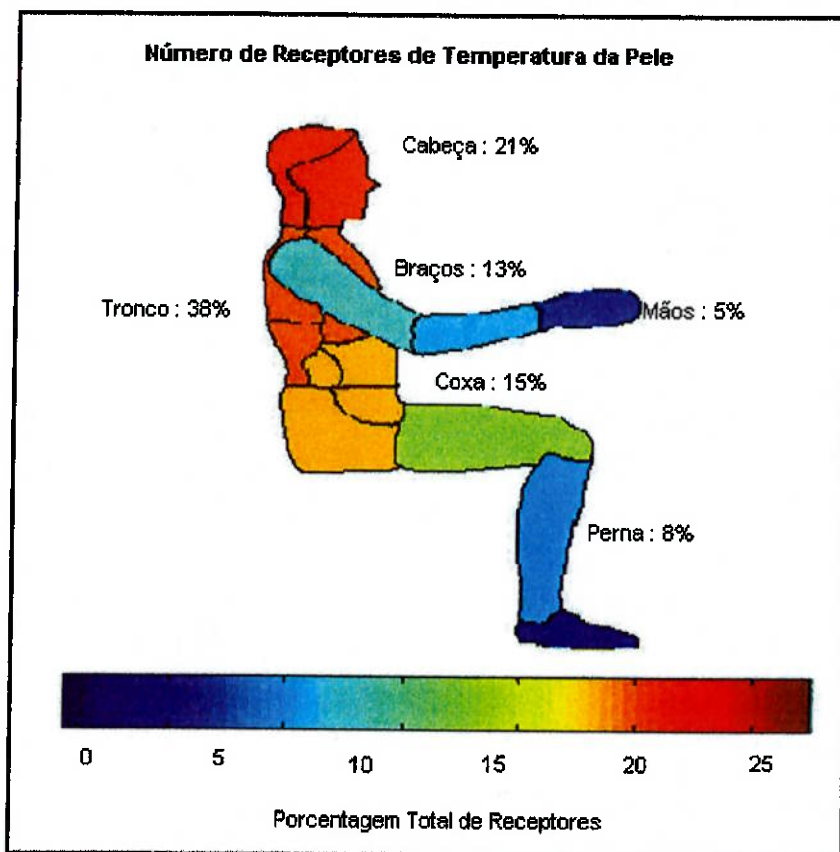


Figura 4.8 – Receptores de temperatura da pele (McGUFFIN, 2001).

Os sinais desses receptores são enviados ao hipotálamo que processa a informação e dirige impulsos para estabelecer a resposta fisiológica e a sensação psicológica do conforto térmico. Os estudos médicos mostram que o nível de resposta fisiológica e o nível de conforto térmico psicologicamente percebido são função do número de receptores térmicos que são ativados. Assim, o sistema de ar condicionado deveria dirigir o fluxo de ar às áreas de maior concentração de receptores térmicos.

Diversos modelos foram e estão sendo desenvolvidos para a modelagem das trocas de calor e atuação do sistema termorregulador do corpo humano e uma boa referência é o trabalho de Ferreira (2001).

Para os testes de modelos há a necessidade de manequins especiais, do tipo apresentado na Fig. 4.9, que respondam a condições ambientais transitórias e possibilitem a medição das trocas de calor por evaporação, convecção e radiação.

O sistema de sudorese do manequim é constituído de um sistema de fornecimento de água e materiais plásticos porosos montados em duas

camadas. A camada mais interior feita com material hidrofílico e a mais externa de material hidrofóbico. A água é injetada na camada externa em cada segmento do manequim, e é forçada para a camada hidrofóbica com uma pressão e vazão determinados pelo modelo térmico.

Thermal Manikin Technical Specifications

Anatomic Body Dimensions Based on Swedish Standard C80 (Height: 172 cm and Weight: 80 kg)

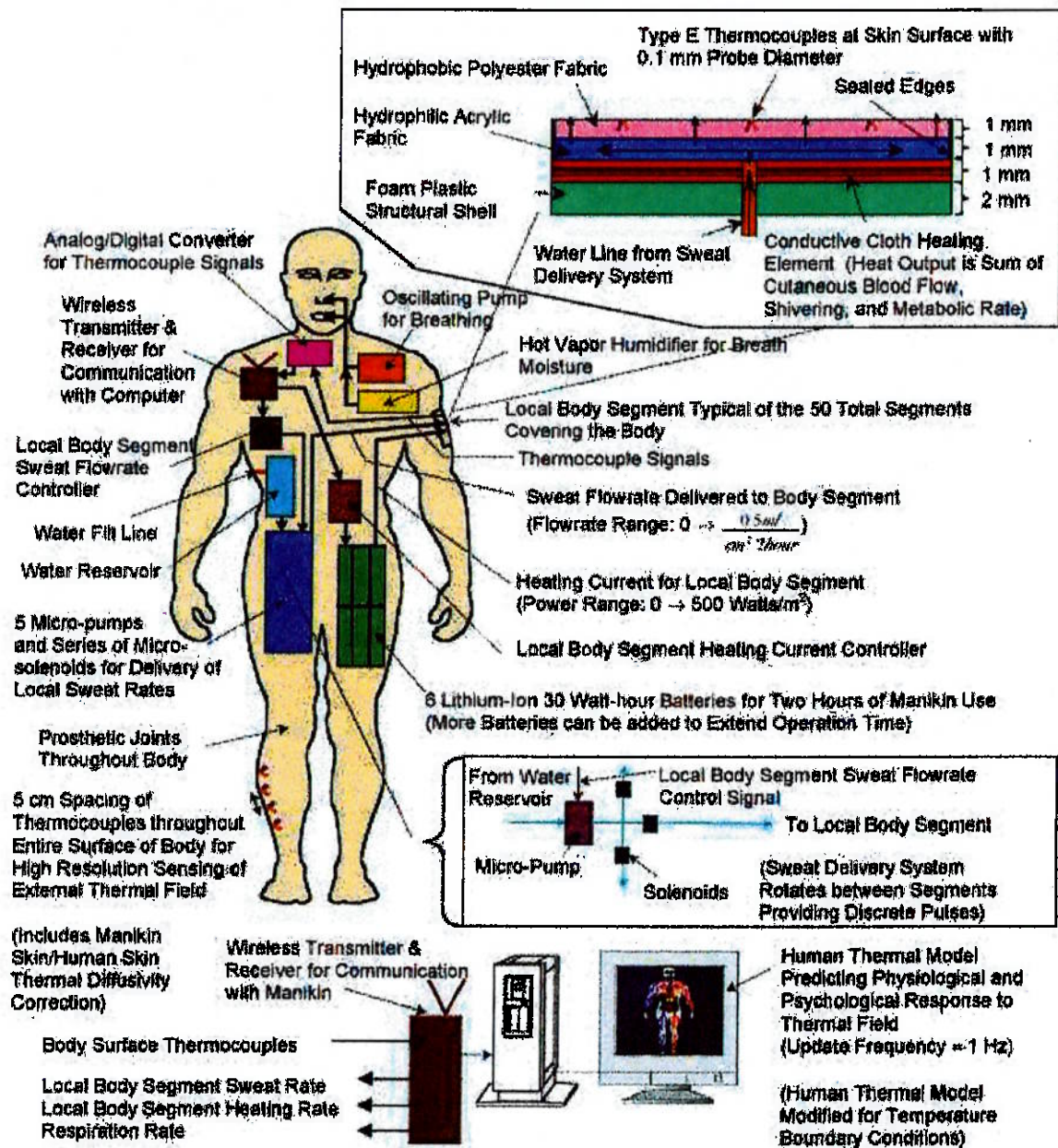


Figura 4.9 – Manequim para a avaliação das condições de conforto térmico em regime transitório (McGUFFIN, 2001).

A camada hidrofílica tem 1 mm de espessura construída de polietileno com poros de cerca de 50 μ . A camada hidrofóbica também tem 1 mm de espessura, fabricada com polietileno de alta densidade e poros de 10 μ . As camadas são seladas para manter a pressão e evitar vazamentos. O sistema de água é constituído de uma série de seringas eletromecânicas e um reservatório de água. As seringas permitem um fluxo lento e de direção precisa dirigido pelos sinais enviados pelo modelo.

Há ainda um sistema de geração interna de calor e um sistema de respiração para simular a entrada de ar e a saída de ar quente e úmido para o ambiente.

4.2.3.2 Distribuição de ar

Face às dimensões reduzidas dos habitáculos em veículos automotivos, a presença dos ocupantes modifica substancialmente a distribuição do ar, com a ocorrência de diferentes níveis de temperatura.

Muitos componentes, como as saídas de ar, ventiladores, filtros e dutos, podem contribuir para melhorar a distribuição do ar no interior do veículo. Normalmente, as verificações são realizadas em experimentos com túnel de vento e medidas de pressão, fluxo de massa, direção do fluxo de ar, etc. Mais recentemente, tem-se utilizado ferramentas computacionais para se estudar esta distribuição de ar no interior dos veículos.

A Fig. 4.10 ilustra uma situação de insuflação do fluxo de ar sobre o motorista, em que se verifica a incidência de um jato de forma muito localizada.



Figura 4.10 – Exemplo de distribuição do fluxo de ar

Uma alternativa melhor é a realização do insuflamento de ar tanto na parte dianteira quanto na parte traseira do veículo, utilizando peça de compósito conforme apresentado na Fig. 4.11.



Figura 4.11 – Peça de compósito para fluxo de ar frontal e traseiro

Com a tecnologia dos compósitos uma revolução na distribuição do ar condicionado está em andamento. Fazendo-se a incorporação de múltiplos canais de saída diretamente no forro do teto, praticamente elimina-se a necessidade de ventiladores soprando o ar em grande velocidade pelos dutos frontais ou traseiros. Desta forma, uma distribuição uniforme em todo o veículo torna-se possível climatizando-se o ambiente de forma rápida e controlada, com baixo nível de ruído.

Esta tecnologia, aliada a aspectos mais futuristas que já estão sendo preconizados, trarão maior nível de conforto e condições operacionais do sistema. Trata-se do surgimento de protótipos operando com ventiladores acionados por células solares dispostas no teto do veículo para a retirada do calor enquanto o veículo estiver estacionado sob radiação solar.

Experiências conduzidas com base em medidas de temperatura, velocidade e umidade do ar, assimetria de radiação, tipo de roupa e nível de atividade, forneceram resultados bastante promissores (POWERS, 1991).

As experiências foram conduzidas comparando-se mini-vans com ar insuflado por dutos frontais, veículos com ar insuflado por dutos frontais e traseiros, e veículos com insuflação de ar por dutos frontais e saídas de ar pelo teto.

Resultados dos testes comparativos mostraram que o tempo necessário para se alcançar condições de $PMV=0$ em posição central do veículo, partindo-se de uma situação de $PMV +3,0$, ou seja, em máxima condição de desconforto por alta temperatura foi de:

- 21 minutos em veículos com insuflação frontal;
- 9 minutos em veículos com insuflação frontal e traseira;
- 7 minutos em veículos com insuflação frontal e distribuição pelo teto.

Como pode ser facilmente verificado, o desenvolvimento de novos materiais e o uso de novas tecnologias tem permitido melhorar sensivelmente as condições de conforto térmico em veículos automotivos.

Nesta linha de desenvolvimento encontram-se também as tecnologias e materiais da envoltória do veículo, que serão discutidos a seguir.

4.2.3.3 A envoltória do veículo

Em veículos automotivos um outro aspecto muito importante para o conforto térmico é o ganho de calor através da envoltória do veículo pelos mecanismos da condução e radiação, conforme apresentado na Fig. 4.12. Quanto menores os ganhos de calor, menores serão as assimetrias de radiação e os gradientes de temperatura, e menor será a carga térmica a ser retirada pelo sistema de ar condicionado. Conseqüentemente, mais facilmente consegue-se atingir condições de conforto térmico.

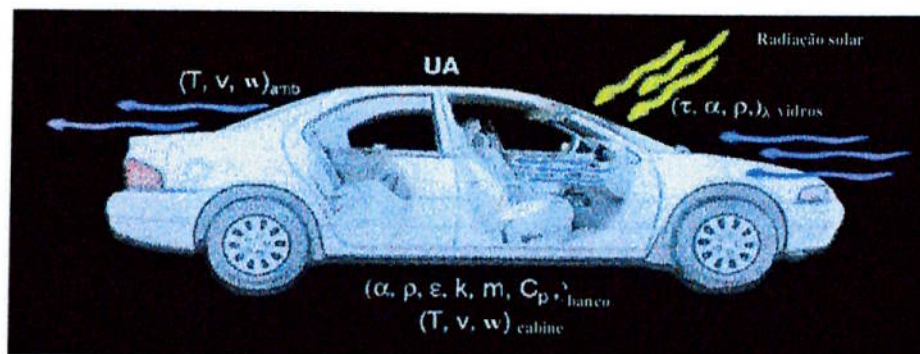


Figura 4.12 – Ganhos de calor em um veículo

A diminuição dos ganhos de calor por radiação solar direta é conseguida por meio de alterações nas propriedades dos vidros, principalmente a transmitância. Com relação à condução de calor pela envoltória pode-se

melhorar as propriedades do vidro quanto à absorvidade e condutividade térmica e, principalmente, melhorar o isolamento térmico do veículo.

A. Vidros

A performance de um vidro ideal no controle da radiação solar pode ser vista na Fig. 4.13.

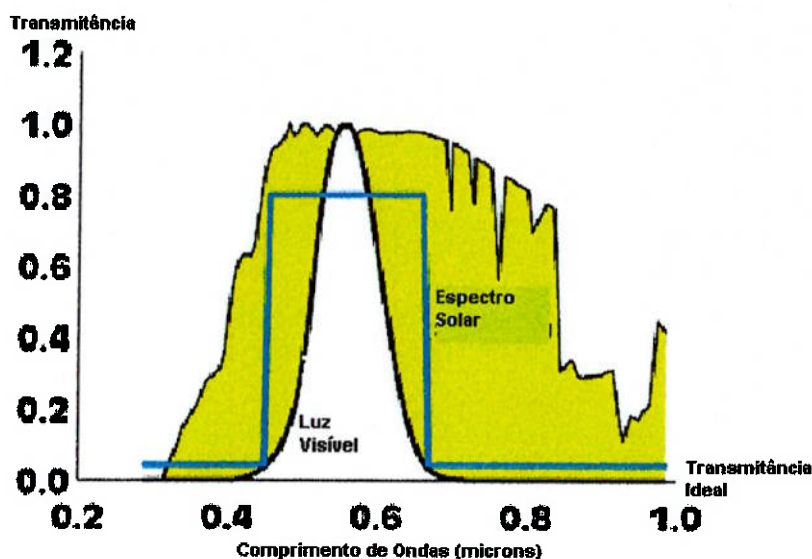


Figura 4.13 – Transmissão de um vidro ideal.

O vidro ideal seletivo seria o indicado pela linha azul da Fig. 4.13, que transmitiria a maioria da luz visível do espectro solar e faria a reflexão da luz ultravioleta e infravermelho.

A primeira forma de se reduzir o efeito da radiação solar foi a utilização de vidros coloridos, na maior parte em tons de verde, obtendo-se com isso redução de carga térmica de até 17,7% (HOPKINS, 1994) Os vidros coloridos podem ter um comportamento próximo à resposta espectral da Fig. 4.13, embora sejam vidros que mais absorvem a luz solar infravermelha do que possam promover a reflexão da luz. Estes tipos de vidros não apresentam uma boa performance de visibilidade, sendo, porém, duráveis e baratos.

Estudou-se também o efeito de inclinação dos vidros dianteiro e traseiro, que pode possibilitar redução de carga térmica em até 11,1% com a substituição vidro com inclinação de 20 a 30° por um de 60°. (RUTH, 1975).

Os vidros "privacy", utilizados em vans e limusines, também conferem maior conforto aos passageiros. Os materiais usados para a fabricação desses vidros permitem uma grande redução da transmitância solar para cerca de 14%, enquanto nos demais vidros encontram-se valores, normalmente, bem acima dos 40.

O desenvolvimento de uma nova geração de vidros introduziu um componente importante na redução do efeito solar para a carga térmica em automóveis. Existem basicamente quatro tipos de vidros utilizados em automóveis, conforme os critérios de absorção, transmitância e emitância. A Tab. 4.1 mostra as propriedades desses vidros.

Tabela 4.1 Propriedades de vidros utilizados em veículos (Goodman, 1991)

<i>Absorção, Transmissão e Emissão</i>				
	Vidro de base colorida (4 mm)	Vidro absorvente solar (4 mm)	Vidro de reflexão solar no pára-brisa (4 mm)	Vidro "privacy" (4 mm)
Absorção solar	35%	50%	30%	71%
Transmissão solar	59%	44%	40%	14%
Emissividade	0,84	0,84	0,84	0,67

Os vidros reflexivos bloqueiam a penetração da luz solar no interior dos veículos e são nitidamente claros, de alta visibilidade conforme especificado pelas leis sobre vidros automobilísticos. As Figs. 4.14 e 4.15 ilustram o comportamento dos vidros reflexivos.

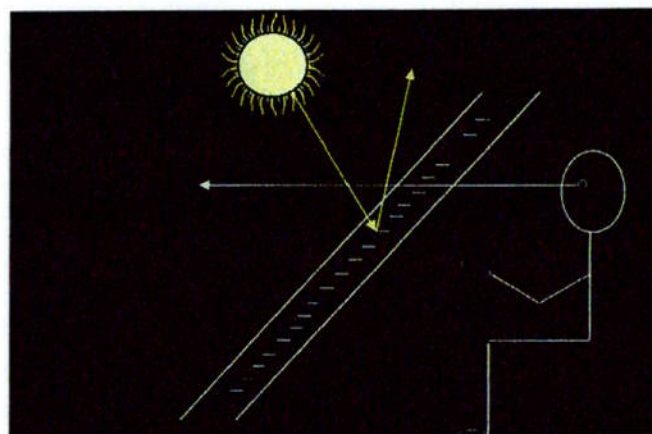


Figura 4.14 – Comportamento de vidros reflexivos.

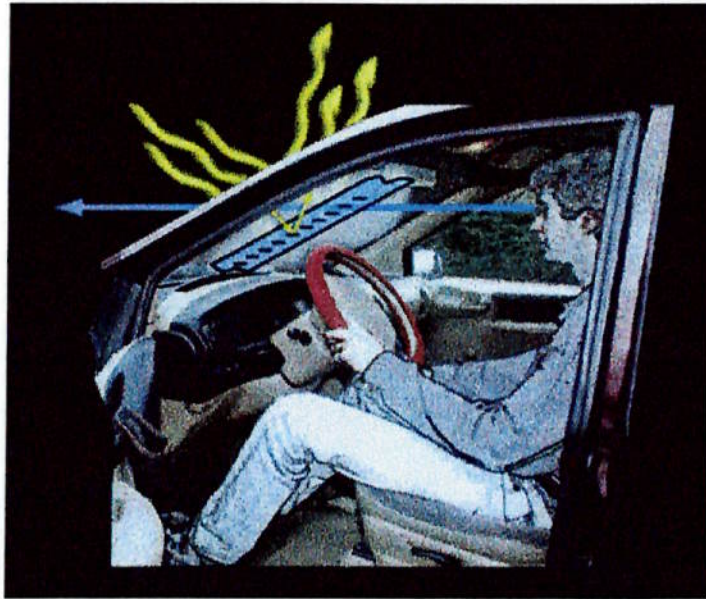


Figura 4.15 – Comportamento de vidros reflexivos.

Na fabricação dos vidros reflexivos é utilizado o polivinil-butiral, responsável pela absorção do espectro de UV. A Tab. 4.2 ilustra o comportamento na transmissão da radiação UV e visível dos vidros básicos na indústria automobilística e dos novos vidros desenvolvidos.

Tabela 4.2 Características de vidros utilizados em veículos

<i>UV e Transmissão Visível</i>		
Vidro	UV (%)	Visibilidade (%)
Base	57	73
Absorção Solar	33,5	61,5
Reflexo Solar	18	64,5
“Privacy”	11	19

Os vidros de nova tecnologia tais como o PPG *Sungate* (FARRINGTON et al., 1998) reduz drasticamente a transmissão de radiação UV e infravermelho para o interior do veículo, com visibilidade próxima a 70%. A Fig. 4.16 mostra a comparação de vidros *Sungate* com vidros convencionais.

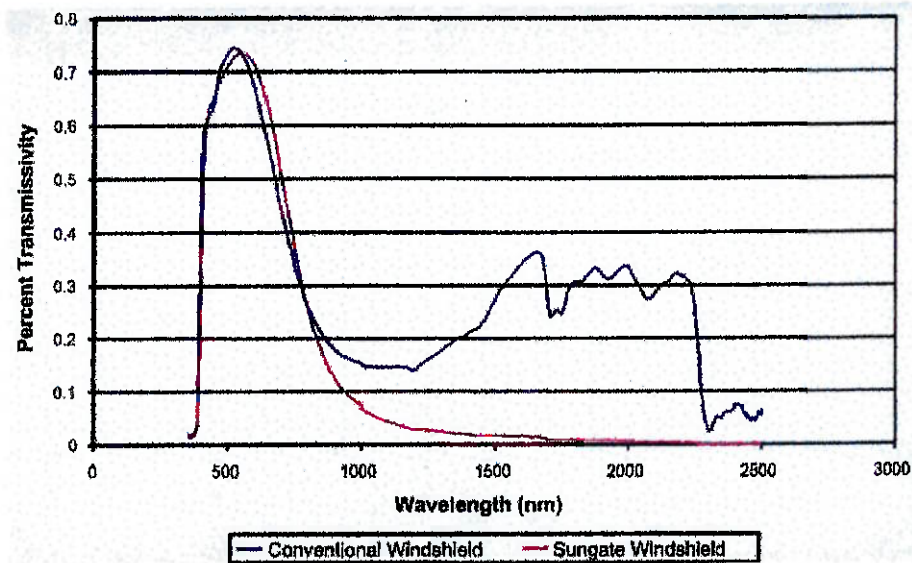


Figura 4.16 – Transmissividade de vidros *sungate* e convencional.

Os vidros *Sungate* usam recobrimento em várias camadas de filme de prata responsável por refletir a radiação infravermelha e polivinil-butiral depositadas entre as superfícies interna e externa do vidro. A Fig. 4.17 mostra a constituição deste tipo de vidro.

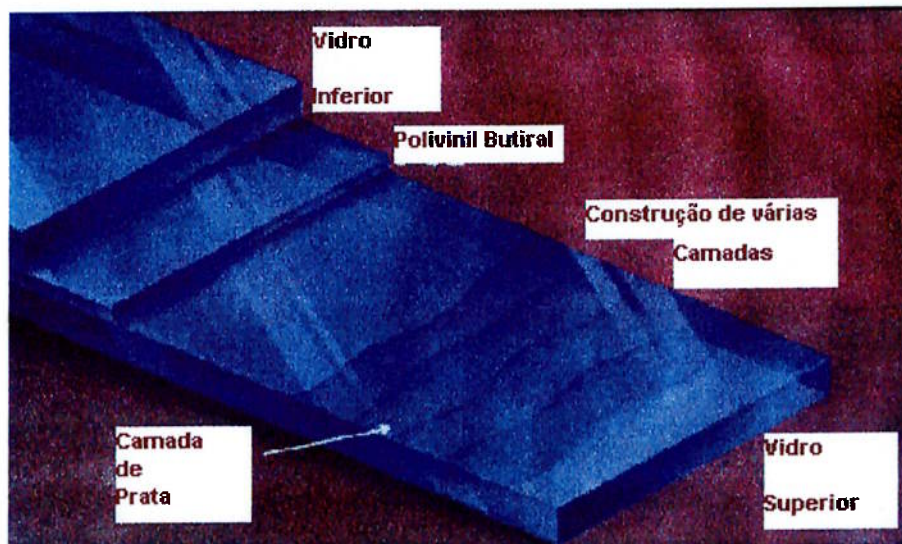


Figura 4.17 – Composição do vidro *sungate*

Resultados apresentados em GOODMAN (1991) mostram uma clara superioridade dos novos vidros sobre os comuns coloridos, com um leve ganho de desempenho para os vidros reflexivos com polivinil butiral.

Alguns outros novos vidros tem surgido aliando-se a tecnologia dos filmes reflexivos com o isolamento térmico dos painéis de núcleo gasoso de baixa condução de calor, conforme mostrado na Figs. 4.18.

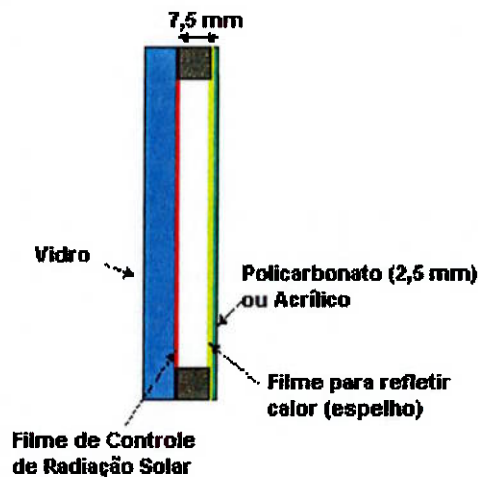


Figura 4.18 – Representação esquemática do vidro de núcleo gasoso

Este tipo de vidro, até o momento, foi desenvolvido para uso como vidro traseiro e lateral, não sendo possível ainda a fabricação de pára-brisas. A Fig. 4.19 apresenta dois destes vidros prontos para montagem.



Figura 4.19 Vidros de núcleo gasoso

A mais nova tecnologia de vidros está sendo desenvolvida para controlar dinamicamente a performance do vidro por aplicação de pequenas correntes elétricas. Um filme fino eletrocromico permite uma resposta ótica que pode ser ativada para mudar as propriedades do vidro. As propriedades óticas do vidro são alteradas conforme o nível de corrente aplicada, mantendo-se estáveis naquela condição. Na Fig. 4.20 é mostrado um vidro deste tipo.

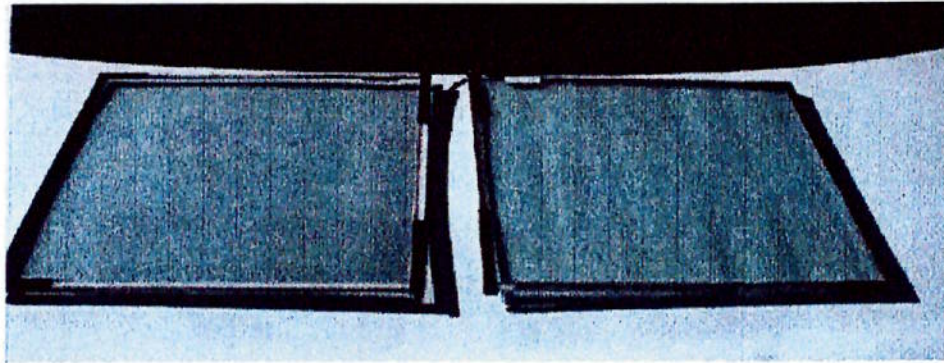
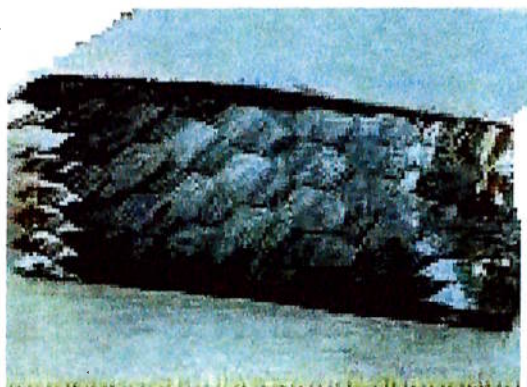


Figura 4.20 Vidro eletrocromico

B. Isolamento térmico

Uma tecnologia promissora para melhorar o isolamento térmico de veículos consiste em utilizar um isolamento com baixo peso, e ocupando espaço reduzido. Trata-se de uma tecnologia patenteada pela LBL que emprega painéis isolantes com gases de baixa condutividade em seu interior, proporcionando quatro vezes melhor isolamento térmico que a fibra de vidro, ou duas vezes mais que as espumas, convencionalmente utilizadas pela fábricas de automóveis. A constituição desses painéis compreende múltiplas camadas de polímeros, normalmente pode chegar a 11 camadas em 25 mm de espessura total do painel (HOPKINS et al., 1999).

A Fig. 4.21a mostra uma seção transversal de um painel e a Fig. 4.21b mostra uma fotografia da configuração interna do painel. Na Tab. 4.3 são apresentados os principais gases utilizados nos painéis e a respectiva condutividade térmica.



(a)



(b)

Figura 4.21 Configuração interna de painéis

Tabela 4.3 Condutividade térmica de gases utilizados em painéis isolantes

<i>Gases e sua condutividade térmica</i>		
Tipo de gás (Número de painéis)	Temperatura média (°C)	Condutividade térmica (W/m-K)
Xenônio (5)	23.9	0.0074
Kriptônio (11)	23.9	0.0116
Argônio (3)	23.9	0.0199
Ar (3)	23.9	0.0281

Procedimento de medição segundo norma ASTM C-518

Com cerca de dois a cinco centímetros de espessura, um painel projetado para uma porta de veículo, acrescentaria 120 gramas somente a esta parte do veículo.

Os painéis oferecem flexibilidade de produção em várias formas e dimensões, facilidade de manuseio e rapidez de montagem, pois podem ter desenho específico para setor do automóvel. As Figs. 4.22a, 4.22b, 4.22c e 4.22d, mostram algumas possibilidades de revestimentos do veículo. A Fig. 4.23 mostra um automóvel já na linha de inspeção.

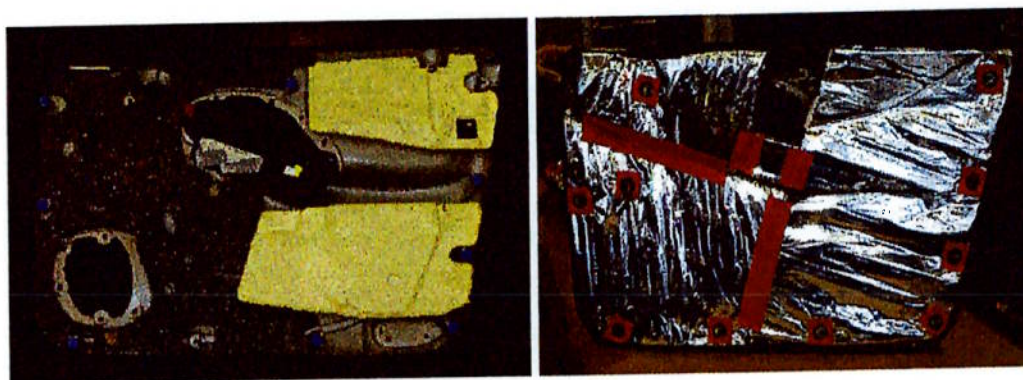
**Figura 4.22a** Revestimento de porta



Figura 4.22b Parte interna do painel

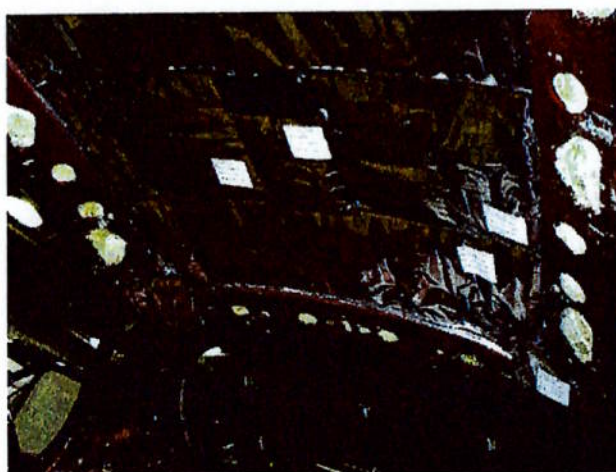


Figura 4.22c Forro do teto

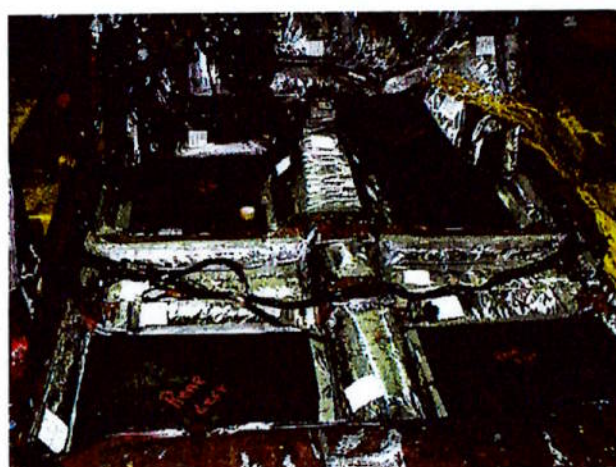


Figura 4.22d Assoalho



Figura 4.23 Automóvel na linha de inspeção

Na Fig. 4.24 são apresentadas variações de temperatura obtidas por termografia infravermelho para uma porta com revestimento comum e uma outra com revestimento de painéis isolantes. Nesta figura as temperaturas maiores indicam melhor condição de isolamento (HOPKINS et al., 1999).

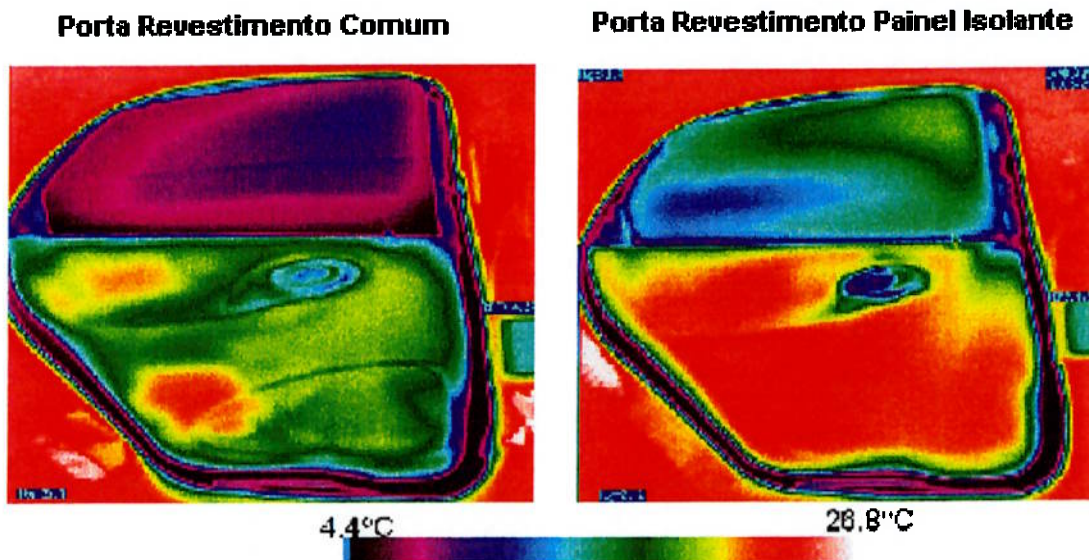


Figura 4.24 Temperaturas em porta com revestimento comum e revestimento com painéis isolantes

4.3 Sistema de refrigeração

A seguir são apresentadas inovações tecnológicas no sistema de refrigeração, abrangendo o desenvolvimento de novos tipos de compressores, evaporadores e sistema de expansão. O desenvolvimento de novas tecnologias para o uso de propano e CO₂ como fluidos refrigerantes em ciclos de compressão automotivos também é abordado.

4.3.1 Compressores

4.3.1.1 Compressor caracol “Scroll”

A construção deste tipo de compressor está alicerçada em dois discos espirais. Tais espirais são simétricas como em uma imagem de espelho, montadas em um cilindro. Uma espiral é fixa e a outra é móvel encaixadas entre si, defasadas de 180°. A espiral móvel é acionada por um eixo, fazendo com que ela execute uma órbita em torno da espiral fixa, promovendo um processo de compressão contínua, conforme mostrado na Fig. 4.25.

O projeto desse equipamento encontra em seu princípio de funcionamento o seu grande diferencial, com as suas partes móveis de pequena inércia, na sua reduzida quantidade de peças e na ausência de gaxetas, quando comparado aos outros tipos de compressores. Estas características conferem a este tipo de compressor um grande potencial de utilização nos sistemas automotivos, em virtude de aliar muitos benefícios como operação silenciosa e possibilidade de construção hermética com melhor eficiência. Esta última característica é de extrema importância por consumir menos combustível, permitir a utilização de um alternador de menor capacidade e eliminar vazamento de fluido refrigerante para a atmosfera.

4.3.1.2 Compressores lineares

Enquanto os fluidos refrigerantes CFCs e HCFCs exigem pressões baixas no ciclo de refrigeração, refrigerantes alternativos como propano e CO₂ requerem altas pressões de trabalho (ver item 4.3.4), o que limita muitos projetos em termos de manutenção desses compressores e espaço disponível principalmente na indústria automobilística.

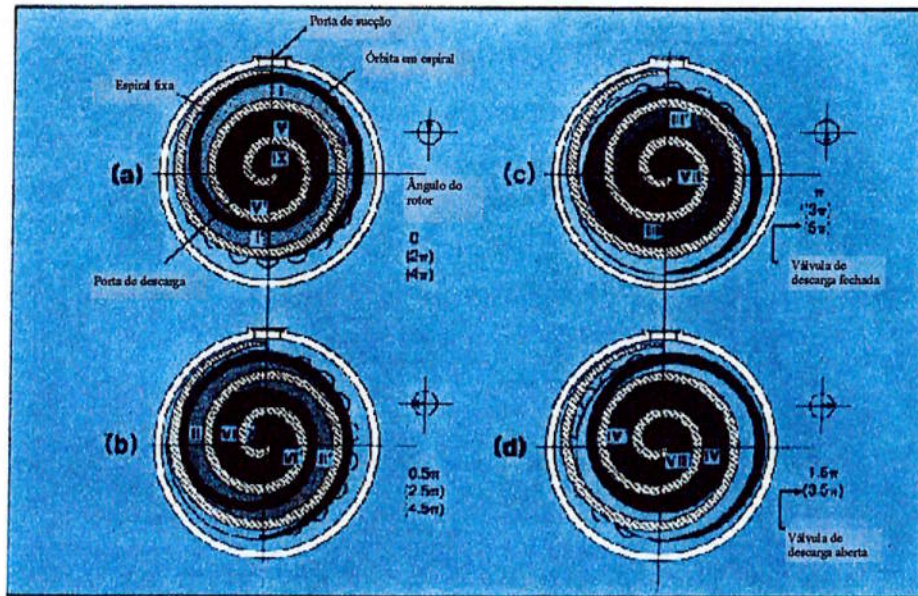


Figura 4.25 Compressor "scroll".

Tendo esta necessidade como base, foi iniciado o desenvolvimento de um compressor que trabalhasse em conjunto com um motor elétrico linear para melhorar a eficiência de compressão (ZHANG & DAY, 1999). Este compressor é constituído de um pistão permanentemente magnetizado movendo-se para frente e para trás entre dois eletroímãs energizados a 50 Hz, conforme mostrado na Fig.4.26.

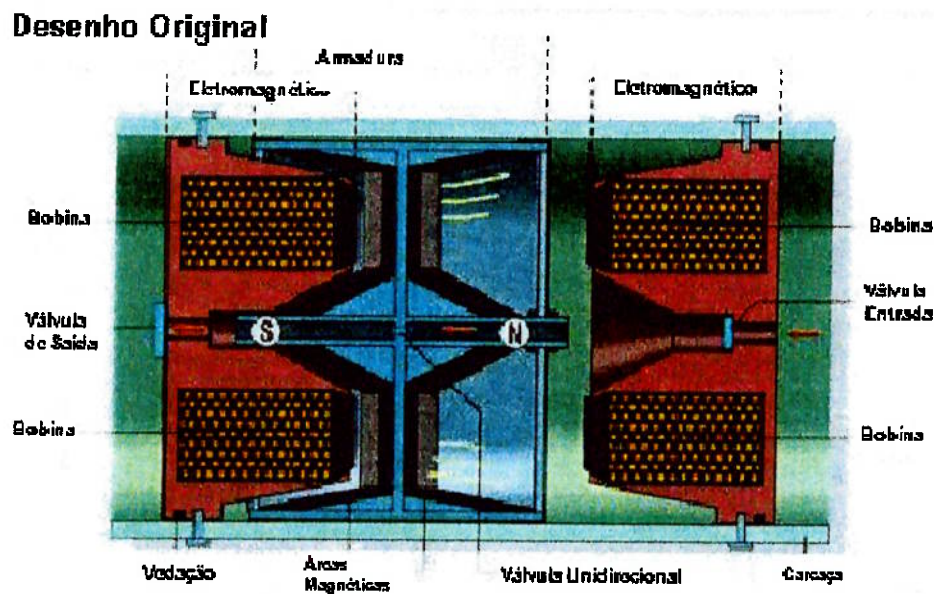


Figura 4.26 Compressor linear

O pistão, contudo, apresentava problemas de ressonância e vibração, tendo evoluído para o tipo mais adequado a aplicações veiculares, apresentado na Fig. 4.27. Neste caso o motor é de corrente contínua, com a armadura magnetizada nas extremidades, com pólo central e o pólo oposto em torno da superfície interna.

Último Desenho

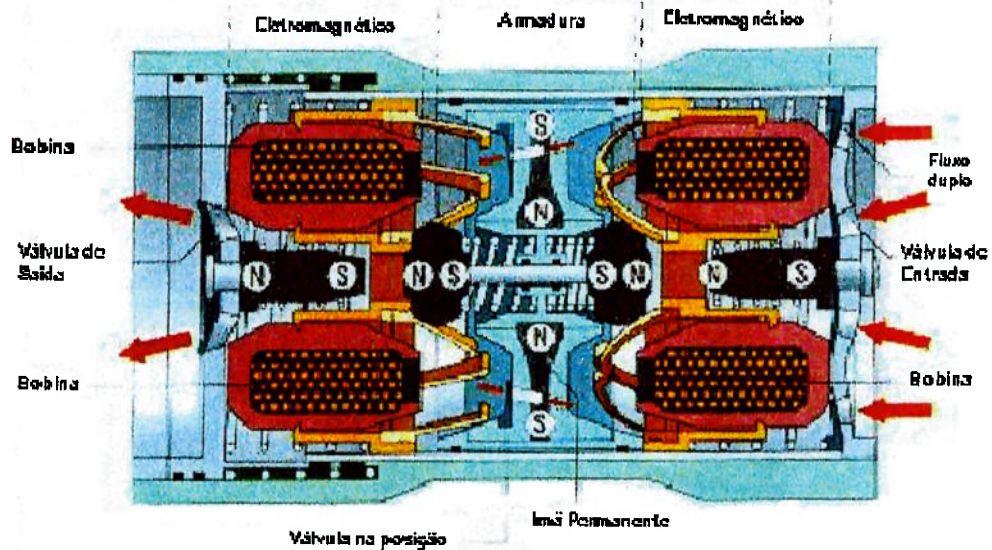


Figura 4.27 Compressor linear com motor elétrico de corrente contínua

Uma outra vantagem do compressor apresentado na Fig. 4.26 é trabalhar sem a necessidade de lubrificação. Este tipo de compressor está na fase de protótipos e arranjos de dois ou mais compressores em linha ou em paralelo, conforme mostrado na Fig. 4.28, estão sendo estudados.

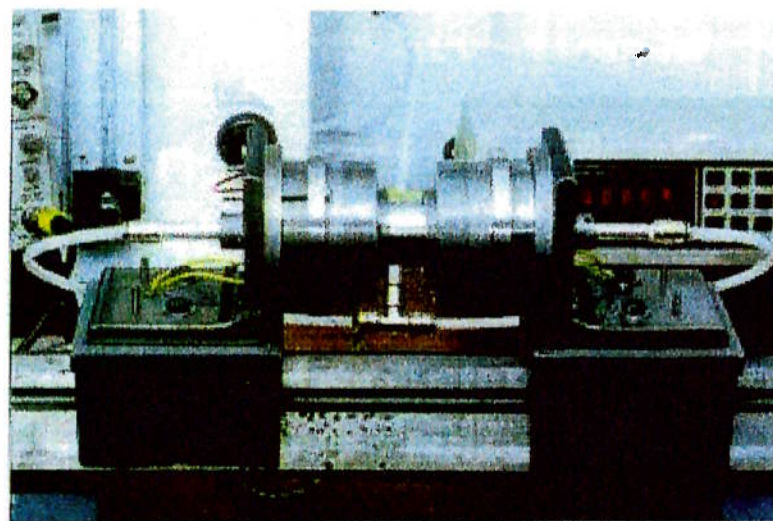


Figura 4.28 Compressor linear em desenvolvimento

4.3.2 Evaporadores

Além dos evaporadores de serpentina e dos evaporadores de placas atualmente utilizados, existe um terceiro tipo de evaporador desenvolvido pela Modine Manufacturing Company (TRAUGER & HUGHES, 1993) o PFE (*plate fin evaporator*), com tubos de alumínio planos de múltiplas passagens com serpentinas de chapas ou corrugadas, mas em uma construção que mantém as mesmas alturas de aleta dos evaporadores de placas. Este evaporador possui adicionalmente um tanque montado na parte inferior, que melhora a circulação pelos canais e um outro na parte superior, que controla o percurso do refrigerante, conforme mostrado na Fig. 4.29.

Na Tab. 4.4 é apresentado um quadro comparativo com as características dimensionais destes três tipos de evaporadores (Trauger & Hughes, 1993).

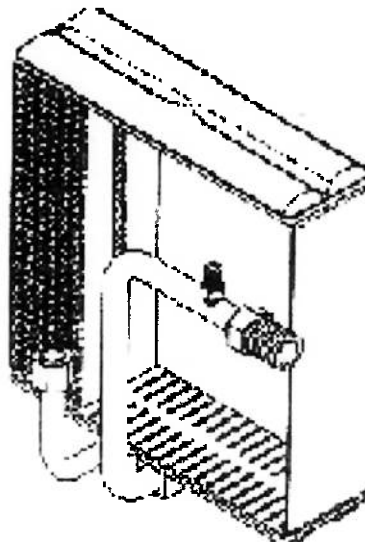


Figura 4.29. Evaporador PFE

Verifica-se da análise da Tab. 4.4 que as dimensões construtivas diferem muito pouco nas três configurações, com exceção da profundidade do núcleo em que o PFE mostra grande vantagem em relação aos demais, variando de 18 a 42%, entre o de placas e serpentina, respectivamente. Isto afeta diretamente o espaço utilizado e a capacidade de resfriamento pelo volume ocupado sendo o que melhor atende aos requisitos de restrição de peso e espaço, embora as três construções atendam à classificação de trocadores compactos que obedecem ao critério de razão de superfície/volume maior que $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Tabela 4.4 Quadro comparativo das características dimensionais de evaporadores.

<i>Comparação Dimensional dos Evaporadores</i>			
Construção	Placas (Drawn-cup)	Serpentina	PFE
Instalado na altura (mm)	235.7	245.0	245.0
Instalado na largura (mm)	222.7	227.0	235.8
Instalado na profundidade (mm)	75.0	90.0	69.9
Instalado no volume (cm ³)	3940	5010	4040
Centro da altura (mm)	202.1	209.9	216.4
Centro da largura (mm)	221.7	225.2	234.0
Centro da profundidade (mm)	75.0	90.0	63.3
Centro do volume (cm ³)	3360	4250	3210
Unidade de massa (kg) ^{a, b}	2.03	2.50	2.11
Parte central da área (m ²)	0.0448	0.0473	0.0506
Centro/instalado de parte da área	0.853	0.850	0.876
Lado quente da superfície área/instalado volume (m ² /m ³) ^b	719.5	758.5	892.4
Lado frio da superfície área/instalado volume (m ² /m ³) ^b	143.7	140.4	243.8

^a incluídas ferragens externas (tubos de ligação refrigerante, válvula de expansão, termômetro, etc.)
^b dados para evaporador PFE são baseados no lado de fora na asa distante de 1.81 mm.

OBS: O tipo de evaporador tubo e aleta não foi avaliado por estar fora de uso.

Na Fig. 4.30 é apresentada uma comparação de performance dos evaporadores realizada com dois critérios de construção para o PFE: um com espaçamento de aleta de 1,81 mm e outro com 2,12 mm no lado do ar (Trauger & Hughes, 1993). Os ensaios foram realizados em condições normais de temperatura (20 °C) e de pressão (101 KPa absoluta), com as demais condições operacionais indicadas na Tabela 4.5.

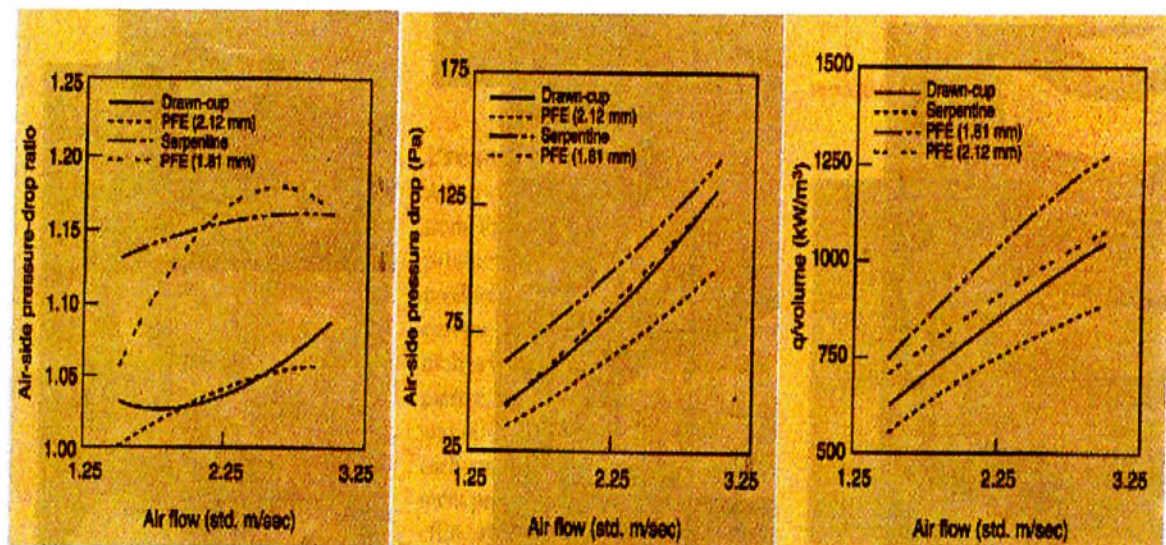


Figura 4.30 Comparação de performance de evaporadores.

Tabela 4.5 Condições operacionais utilizadas na comparação de performance dos evaporadores.

<i>Condições operacionais de ensaio</i>	
Refrigerante	CFC-12
Termômetro seco (°C)	25
Umidade relativa (%)	50
Pressão medida, antes da expansão da válvula (kPa)	1471
Temperatura, amena, antes da expansão da válvula(°C)	5
Pressão medida, linha de sucção (kPa)	196
Temperatura, linha de sucção (°C)	5

Verifica-se da análise da Fig. 4.30 que o PFE de 1,81 mm fornece de 22 a 40% mais capacidade de resfriamento por volume instalado que as demais configurações. Mesmo com o PFE de 2,12 mm os resultados mostram um ganho de 7 a 23% em relação aos outros tipos. A queda de pressão do lado do ar através da serpentina também tem resultados melhores para o PFE.

A retenção de água no lado do ar mostra a habilidade do evaporador para não reter água condensada. Estes resultados são fornecidos pela comparação da queda de pressão medida no lado do ar com a queda de pressão do lado do ar em condições isotérmicas (Δ úmido/ Δ seco). Um excesso de água retida aumenta a resistência térmica piorando a eficiência do trocador e aumentando a formação de gelo. Os valores mais próximos de 1,0 são desejáveis, porém até 1,20 são valores toleráveis.

Segundo Trauger & Hughes (1993) testes realizados com com HFC-134a mostraram resultados bastante similares para as características anteriores estudadas.

4.3.3 Válvula de orifício variável

Como visto no Capítulo 3, item 3.2.4.4, uma das principais limitações do sistema de tubos de orifício fixo corresponde à dificuldade do ajuste de vazão do sistema sob diferentes situações de operação. Entretanto, o sistema com tubos de orifício apresenta um forte apelo econômico, principalmente tendo-se em mente o crescente uso de equipamento de ar condicionado no segmento automotivo. Este fato torna-se ainda mais significativo quando se verifica o

crescimento do mercado de automóveis compactos e de baixa potência, com menor espaço para incorporar acessórios e itens de conforto.

Quando comparado à válvula termostática, o tubo de orifício tem um custo de produção significativamente menor. A válvula termostática custa U\$ 30.00/unidade, enquanto um tubo de orifício fixo tem custo de U\$ 2.00/unidade.

Quando da substituição do R-12 por R 134a, que demandou na utilização de compressores menores, a eficiência do sistema ficou ainda mais pobre. Os fabricantes norte-americanos perderam importantes fatias de mercado para veículos importados, que utilizam válvulas de expansão termostática, principalmente nas áreas mais quentes do país.

Finalmente, em meados de 1997, foi lançado no mercado norte-americano um tubo de orifício variável, que foi utilizado inicialmente no mercado de reposição de peças, substituindo os tubos de orifício fixos (KOZINSKI, 1998).

A válvula de orifício variável, apresentada na Fig. 4.31, permite adequar a performance do sistema com o veículo em baixa velocidade e em congestionamentos. Detalhes da válvula de orifício variável são apresentados na Fig. 4.32.

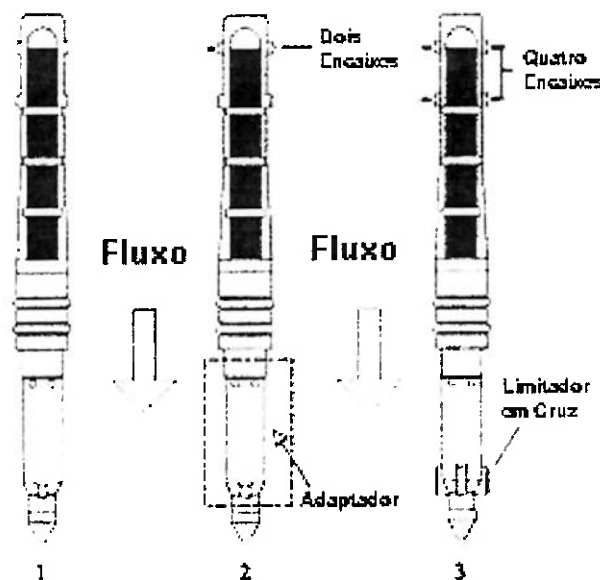


Figura 4.31 Válvula de orifício variável.

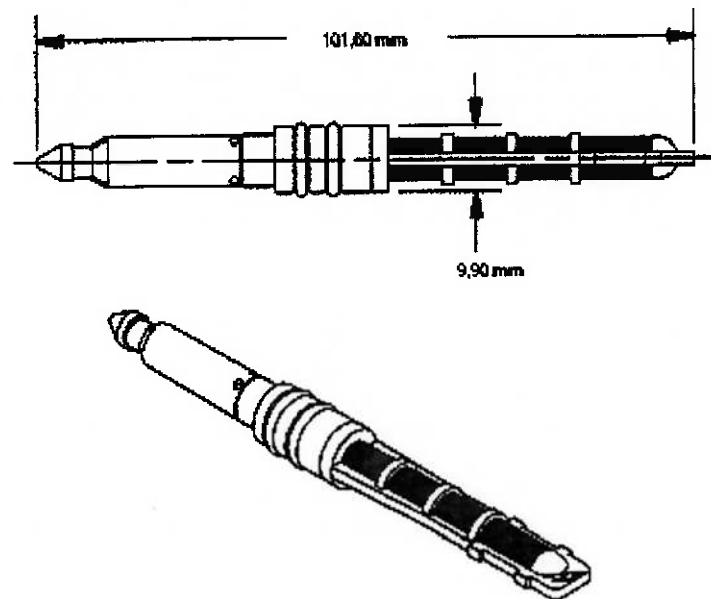


Figura 4.32 Detalhes da válvula de orifício variável.

4.3.4 Fluidos refrigerantes

Os esforços em se alcançar sistemas automotivos cada vez menos deletérios à camada de ozônio tem obtido grandes progressos. Os pesquisadores trabalham na direção de se utilizar fluidos refrigerantes naturais em substituição aos refrigerantes sintéticos. A indicação do CO_2 para o sistema de ar condicionado automotivo é bastante promissora.

Embora o CO_2 seja um gás reconhecidamente influente no efeito de aquecimento da Terra, os refrigerantes baseados em hidrofluorcarbonos são proporcionalmente cerca de 1.400 vezes mais prejudiciais. Outro fato importante é que não haveria necessidade adicional de produção de CO_2 , pois bastaria utilizar o rejeito de outros processos industriais.

O CO_2 foi utilizado até a década de 30 quando passou a ser substituído pelos refrigerantes sintéticos, os clorofluorcarbonos que apresentavam a vantagem de trabalharem a baixas pressões e permitirem unidades de refrigeração mais compactas.

Conforme pode ser verificado na Fig. 4. 33, o CO_2 exige pressões mais elevadas. Um sistema com CO_2 apresenta pressões de 7 a 10 vezes superiores às pressões com HFC 134a, necessitando-se, portanto, equipamentos e acessórios que suportem estas pressões de trabalho.

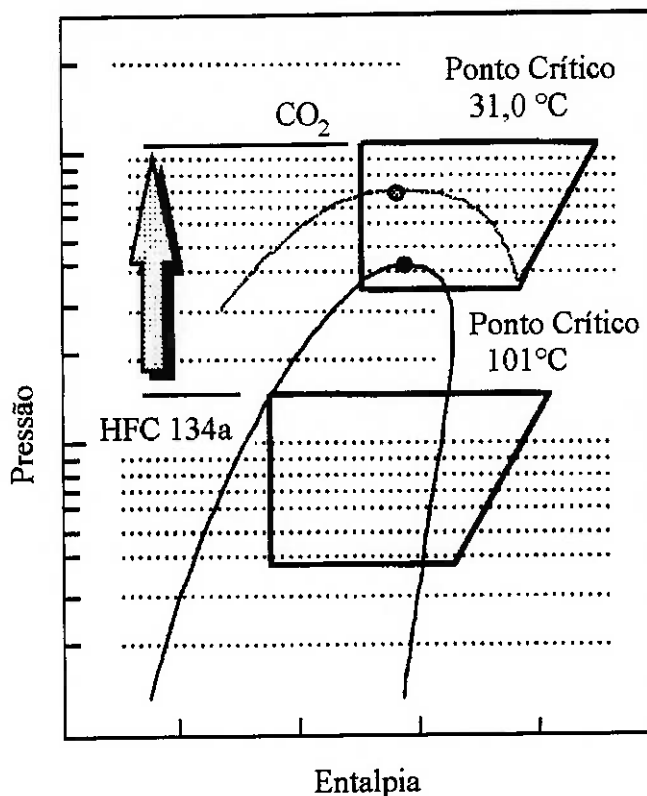


Figura 4.33 Ciclos de refrigeração com HFC 134a e CO₂.

Um sistema de ar condicionado com CO₂ difere daquele com HFC em alguns pontos, requerendo componentes também de outra concepção:

- Não há um condensador: o CO₂ tem sua temperatura reduzida em um resfriador de gás. O CO₂ não é condensado no resfriador de gás porque ultrapassa o ponto crítico no lado de alta pressão;
- Uma válvula de expansão condensa parte do refrigerante adiabaticamente. Um trocador de calor interno em conjunto com a válvula de expansão posicionado antes do resfriador de gás permite um novo abaixamento da temperatura, trocando calor com o refrigerante que flui do lado da baixa pressão do sistema;
- O acumulador é eliminado no lado de baixa pressão, pois pressões no lado de alta pressão chegam a 10 MPa ou maiores, muito acima daquelas encontradas nos sistemas convencionais. Assim o acumulador é integrado com o trocador de calor interno e a válvula de expansão, simplificando a sua utilização em veículos.

Outro ponto a ser modificado está relacionado ao tamanho das

moléculas do refrigerante que são menores que as moléculas dos refrigerantes sintéticos, podendo vazar nas mangueiras de borracha, aplicadas no sistema convencional corroborando neste aspecto também as altas pressões com CO₂.

A solução desse problema foi o desenvolvimento de mangueiras de aço inoxidável corrugado, soldadas a laser no local. Esta operação se faz necessária em virtude das altas pressões causarem pulsações durante a operação e afrouxar a união. A acomodação dessas pulsações é possível utilizando uma capa de aço trançado envolvendo o tubo interno. Para se minimizar o desgaste mecânico deste conjunto, tanto o tubo interno como a capa de aço recebe um revestimento de silício (PETERSEN, 1993).

Na Fig. 4.34 é mostrada a configuração do sistema com CO₂. Nesta figura se verifica que os ciclos de refrigeração com CO₂ podem trabalhar (dependendo das condições operacionais) próximo ou acima do ponto crítico. Quando isto ocorre, o consumo de potência no compressor aumenta significativamente, o que pode não tornar o ciclo economicamente competitivo.

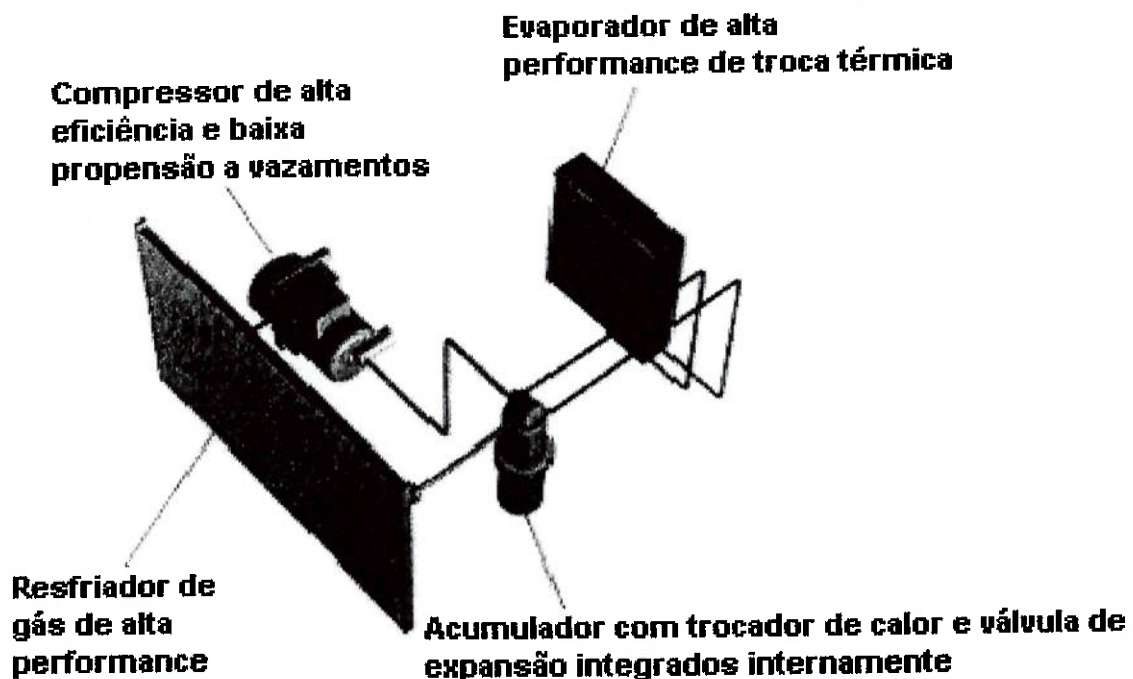


Figura 4.34 Configuração do sistema com CO₂. (KEVIN, 2002).

Alguns dos maiores fabricantes de sistemas de ar condicionado veicular,

como a Denso e a Modine, tem desenvolvido protótipos de sistemas de ar condicionado com CO₂, instalados em um Toyota e em um BMW 328i, respectivamente (GOETSCH, 2000). Segundo os fabricantes, os resultados são promissores, com performance análoga ao sistema com refrigerantes convencionais; o que deve possibilitar a comercialização do sistema a partir de 2004.

A Fig. 4.35 ilustra os circuitos de refrigeração, utilizando o CO₂ e fluidos refrigerantes convencionais, instalados em automóveis.

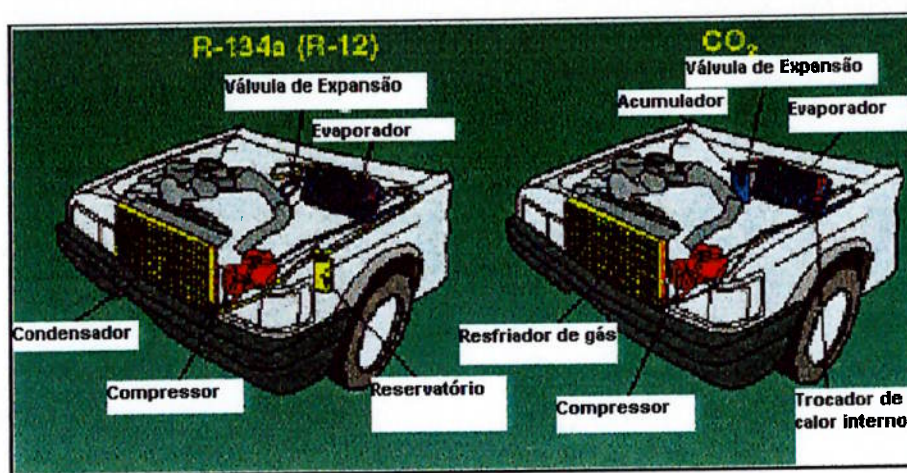


Figura 4.35 Circuitos de refrigeração instalados em automóveis.

Cuidados adicionais de segurança deverão ser tomados com o uso de CO₂ como fluido refrigerante (AMIN et al., 1998), principalmente no que se refere a:

- vazamentos em ambientes confinados como a cabine do automóvel e no momento de executar a manutenção no sistema de ar condicionado;
- rompimento de dutos quando da execução de reparos com o sistema pressurizado.

A principal preocupação está relacionada a um eventual vazamento do CO₂ para o interior da cabine. O CO₂ tem efeito narcótico em concentrações elevadas e efeitos no sistema respiratório em concentrações menores. Adicionalmente, sua característica acidificante pode levar a irritações locais, de nariz, garganta e olhos. A Tab. 4.6 traz os sintomas associados a inalação de CO₂.

Tabela 4.6 Concentração e sintomas em consequência de inalação de CO₂

<i>Concentração ■ Sintomas em consequência de inalação de CO₂</i>	
Concentração	Sintomas
2%	50% de aumento da taxa respiratória
3%	100% de aumento da taxa respiratória em 10 minutos
5%	300% de aumento da taxa respiratória, dor de cabeça, começo de sudorese após 1 hora de exposição
8 – 10%	Dor de cabeça, sonolência, zumbido no ouvido, aumento da pressão sanguínea, pulso rápido, náusea
10 – 18%	Em poucos minutos, complicações epiléticas, perda de consciência e choque, queda rápida de pressão sanguínea

Testes realizados mostraram que a liberação de até 600 g de CO₂ no interior da cabine de um automóvel eleva a concentração interna para cerca de 5%; o que implica na necessidade de uma carga máxima menor no sistema de ar condicionado de automóveis em desenvolvimento.

Capítulo 5

CONCLUSÃO

Desde o seu lançamento em 1940 pela Packard, o ar condicionado automotivo apresenta um crescimento expressivo, experimentando ano após ano uma importante procura pelos consumidores. Em 1940 foram fabricados 1.500 veículos com ar condicionado, chegando em 1953 a 29 mil carros com o sistema. Pouco mais de dez anos depois, em 1966, o número de automóveis que saíam das fábricas estava em 3.560.000 e 20 anos após, em 1987 eram fabricados 19.571.000 veículos com ar condicionado. Hoje têm-se uma realidade bastante interessante, pois 80% dos carros e veículos leves fabricados nos EUA saem das plantas automobilísticas equipados com esse acessório. No mundo têm-se 50 milhões de automóveis e veículos comerciais leves, sendo 50% com ar condicionado.

De acordo com pesquisa da Delphi Corporation, a previsão é de que em 2015 serão um bilhão de veículos rodando, e cerca de 85% deixariam as concessionárias com ar condicionado.

Esses números fornecem a dimensão desse sistema para o meio ambiente, para projetistas, para centros de pesquisa, universidades, indústria automobilística e da necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente tendo-se em mente que este é o acessório que mais consome energia no veículo, como mostrado na Fig. 5.1.

O gráfico apresentado na Fig. 5.1 apresenta os valores reais de cada equipamento, exceto pelo sistema de ar condicionado que alcança valores de até 3.000 W. Isto foi feito para não prejudicar a visualização dos consumos dos equipamentos com menor potência.

Por causar impacto ambiental significativo, quer seja na emissão de poluentes devido ao consumo de combustível, quer seja pelos fluidos refrigerantes, a busca por novas tecnologias no desenvolvimento de sistemas de ar condicionado têm se tornado uma constante.

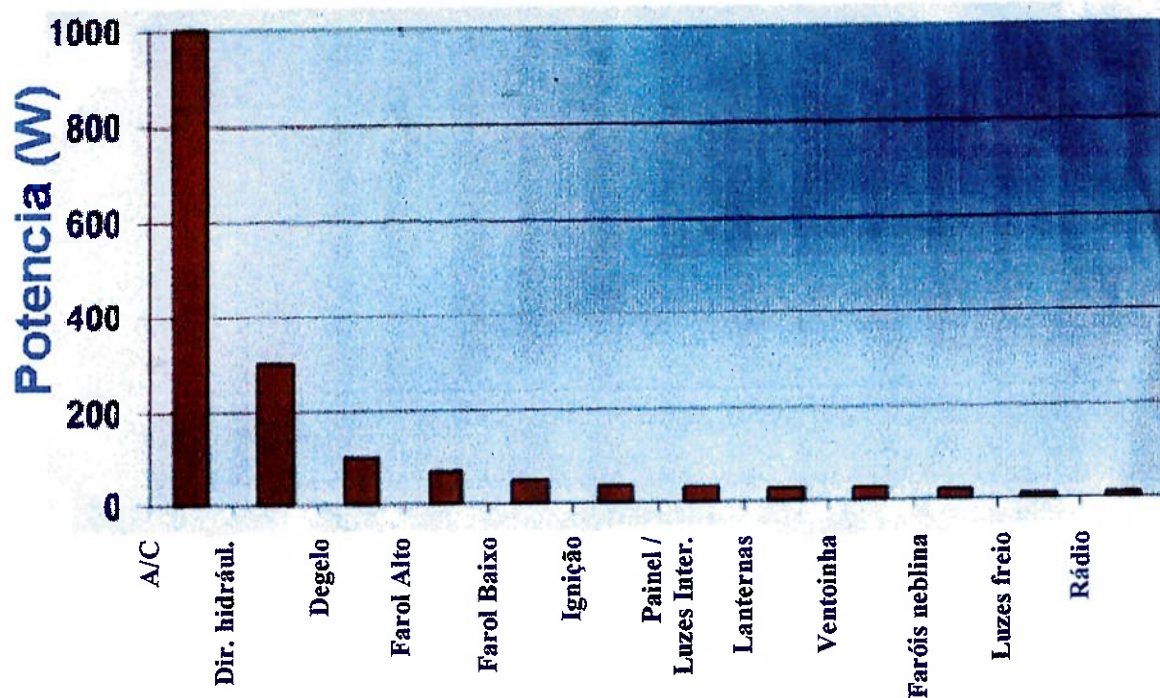


Figura 5.1 Consumo de energia dos acessórios em um automóvel.

Neste trabalho foi apresentada a caracterização do sistema de ar condicionado automotivo e foram abordados alguns avanços tecnológicos que têm permitido melhorar o desempenho global do sistema, enfocando principalmente aspectos que demandam menor consumo de energia e melhoria nas condições de conforto dos usuários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIN, J.; DIENHART, B.; WERTEN BACH, J. 1998. **Safety aspects of an A/C system with carbon dioxide as refrigerant.** Visteon/Ford. Safety tests and evaluation.
- ASHRAE, 1995. **Thermal environmental conditions for human occupancy,** (ANSI/ASHRAE 55a-95), American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, New York, 1995.
- ASHRAE 1989. **Ventilation for acceptable indoor air quality,** (ANSI/ASHRAE 62-1989), American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, New York.
- BEDEC. 2001. **Air conditioning systems.** Family Car's Magazine.
- BLAKE, D. 2001. **Cabin air cleaning.** National Renewable Energy Laboratory.
- BORG, M.; WEIMAR, L. 1998. **Transport of the future environmental concept bus and truck.** Volvo.
- BRAUN, J. 2000. **CO2 environmentally friendly for cooling purposes.** Gustav Lorentzen Conference.
- BRENCHLEY, D.; 2001. Compact heat pump for automotive air conditioning microcomponents sheet architecture. **US Patent 5611214.**
- Caram, R.M. 1998. **Caracterização ótica de materiais transparentes e sua relação com o conforto ambiental em edificações.** Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas.
- CHRIST, C.; FUSCO, D.; TOOSI, R.; 2001. **Adsorption air conditioning for containerships and vehicles.** Department of Transportation, California State University.

- Coulson, D., 1966. The air conditioning of motor vehicles. *I.H.V.*, 33, 337-347.
- CUMMINGS, R. W. 2001. **Behr climate systems**. Behr. September
- CURRIE, J; 1997. Numerical simulation of the flow in a passenger compartment and evaluation of the thermal comfort of the occupants. **SAE Paper 970529**.
- CURRIE, J.; HARPER, M.; ROSS, F.; HEID, T. 1998. Evaluation of the HVAC system of passenger cars and prediction of the micro-climate in the passenger compartment by application of numerical flow analysis. **SAE Paper 971788**.
- DAUVERGNE, J.; 1994. Electric vehicle climate control. **Automotive Engineering**, April, 55-57.
- DAVID A. F. R.; 1999. The evolution of modern office building and air conditioning. **ASHRAE Journal**, vol. 41, n.6, p. 40-54.
- DEKLEVA, T. W.; COLMERY, S. H.; BRESNAHAN, J. D.; YAMAMOTO, T; 1994. Retrofitting fleet A/Cs with HFC-134a refrigerant. **Automotive Engineering**, March, 49-51.
- FANGER, P. O., 1972. **Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering**, McGraw-Hill, New York, 245 p.
- FARRINGTON, R. B.; ANDERSON, R.; BLAKE, D. M.; BURCH, S. D.; CUDDY, M. R.; KEYSER, M. A.; RUSH, J. P.; 1998. Challenges and potential solutions for reducing climate control loads in conventional and hybrid electric vehicles. **National Renewable Energy Laboratory**.
- FERREIRA, M. S. 2001. **Um modelo do sistema térmico do corpo humano**. Tese de Doutorado. EPUSP. São Paulo, 166 p.
- FIORELLI, F.A.S.; HERNANDEZ NETO, A. 1998. Refrigerantes Alternativos. **Revista do Frio**, v. 95, São Paulo,.
- FORD. 2001. **Climate control**. Ford Scorpio Maintenance Manual.

- FOARDE, K; HANLEY, J. T.; VEECK, A. C. 2000. Efficacy of antimicrobial filter treatments. **ASHRAE Journal**, vol. 42, n. 12, p. 52-58.
- GOETSCH, C. M. 2000. Modine displays CO2 air conditioning system. **Automotive Alternative Refrigerant System Symposium**.
- GOODMAN, R. D. 1991. Cool Glass. **Automotive Engineering**, vol 99, n.8, pp 20-21.
- GSCHNEIDNER, K.; SHULL, R. ; ZIMM, Z. 2002. Magnetic materials keep fridges cool. **Science News**, vol. 161, n. 01.
- GUYONUARCH, G.; ALOUP, C.; PETIT, J. C.; SAVASSE, A. D. 2002. Electric heating and air conditioning. **Valeo climate control**.
- HAMNER, R. M.; February, 1981. A novel Approach to Air Conditioning. **SAE Paper 810504**.
- HENRIK, A.; JINGU, N.; KOMATU, S. 1994. Retrofitting CFC-12 A/C systems. **Automotive Engineering**, March, 45-47.
- HOLMAN, J.P. 1983. **Transferência de Calor**, São Paulo, McGraw-Hill.
- HOPKINS, D.; 1994. **Smart thermal skins for vehicles**. CBS News Letter.
- HOPKINS, D.; GOUDEY, H.; RIZZO, P.; 1999. **Labs. helps create first thermally insulated car**. Public Information Department, Berkely Laboratory.
- HUANG, Z.; MANESS, P. C.; BLAKE, D. M.; WOLFRUM, E.J.; SMOLINSKI, S.L.; 1999. Bactericidal mode of titanium dioxide photocatalysis. **Journal Photochem. Photobiolog. A. Chem**.
- HUCHO, W. 1998. **Aerodynamics of road vehicles**. Society of Automotive Engineers, 4a. ed.
- IANELLA, M. R. 1998. **Avaliação teórico-experimental de um sistema de ar condicionado automotivo**. (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos : Universidade de São Paulo.

- ISO, 1994. **Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions of thermal comfort**, (ISO 7730 - 1994). International Standardization Organization, Geneva.
- ISO, 1989. **Hot environments: Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT – index (wet bulb globe temperature)**, (ISO 7243, 1989). International Standardization Organization, Geneva.
- ISO, 1989. **Hot environments – Analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation on required sweat rate**. (ISO 7933, 1989). International Standardization Organization, Geneva.
- ISO, 1985. **Thermal environments - Instruments and methods for measuring physical quantities**. (ISO 7726, 1985). International Standardization Organization, 1985.
- JACOBY, W. A.; BLAKE, D. M.L; FENNELL, J. A.; BOULTER, J. E. VARGO, L. M.; GEORGE, M. C.; DOLBERG, S. K.. 1996. Heterogeneous photocatalysis for control of volatile organic compounds in indoor air. **Journal of the Air & Waste Management Association**; vol. 16.
- JOHNSON, T. J., 1982. Truck climate controls: Past, present and future climate controls for the truck cab, **SAE Tech. Paper** , Series 820971.
- KEVIN, J..2002. Denso looks to CO2 future. **Automotive Engineering**, April
- KODA, T.; SUSIHARA, M.; YOSHIDA, K; HOSHINO, Y.; 1981. Rotary A/C compressor Developed. **SAE Paper 810502**.
- KOZINSKI, R. 1998. The smart variable orifice valve. **Cool Profits Magazine**. Jan/Feb.
- LAND ROVER. 2000. **Manual de manutenção do ar condicionado**. Land Rover.
- LUDVIGSEN, K. E. 1995. A century of automobile body evolution. **Automotive Engineering**. November

- LUDVIGSEN, K. E. 1995. A century of automobile comfort and convenience. **Automotive Engineering**, December.
- MADSEN, T. L.; OLESEN, B. ; REID, K. 1986. New methods for evaluation of the thermal environment in automotive vehicles, **ASHRAE Trans.**, 92 part 1B, 38-54.
- McDONALD, B.; GOGINS, M; ROTHMAN, J.; SCOTT, J. 1997. Cabin Air Filter Media. **Automotive Engineering**. July
- McGUFFIN, R. 2001. **Thermal comfort strategies in vehicles**. National Renewable Energy Laboratory.
- MIKE PAUKEN, P. E.; 1999. Sleeping soundly on summer nights. **ASHRAE Journal**, vol. 41, n.5, p. 40-47.
- MOLHAVE et al. Human reactions to low concentrations of volatile organic compounds environment. Oxford. United Kingdom. **Pergamon Press LTD**. Vol. 12; 167:175.
- NAGENGAST, B., 1999. A history of comfort cooling using ice. **ASHRAE Journal**, vol. 41, n.2, p.49-57.
- PETTERSEN, J. 1993. Cool car climate with CO2. Gemni Magazine. December
- PONS, M.; 2000. Principles of adsorption cycles for refrigeration or heat pumping. **International Adsorption Society**.
- PONTICEL, P., 1996. The automobile experience: A living history. **Automotive Engineering**. September
- POWERS, J.D. 1991. Automotive interior trends for the 90s. **Automotive Engineering**. May
- RUTH, D. W., 1975. Simulation modeling of automotive comfort cooling requirements. **ASHRAE Journal**. May, 53-55.
- SILVARES, O. M. 1997. **Modelagem matemática e simulação numérica e**

- experimental de sistemas e componentes de refrigeração.** Livre Docência; EPUSP, São Paulo.
- STANCATO, F., 1992. **Fontes térmicas em cabines de veículos automotivos, sua avaliação e efeito no ambiente interior,** Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo.
- STEVENS, L.; ANDERSON, L.G.; JACOBY, W.A.; CHORNET, N. 1998. Investigation of the photo catalytic oxidation of low-level carbonyl compounds. **J. Air Waste Management Assoc.** , vol.48, n.10.
- STOECKER, W. F. 1989. **Design of thermal systems,** MacGraw-Hill, Inc.
- SUZUKI, T.; ISHII, K. 1996. Electric vehicle air conditioning. **Automotive Engineering.** September
- TERAUCHI, K.; TSUKAGOSAI, Y.; HIRAGA, M.; 1983. Spiral A/C compressor reduces power requirement. **Society of Automotive Engineers;** no. 830541.
- TRAUGER, P. E. & HUGHES, G. G. 1993. A/C evaporator construction and performance. **Automotive Engineering.** November
- UNGER, R., 2001. A home refrigerator with a sun power linear compressor. **Athens Fairgrounds Paper.** October
- VANOSDELL, D. W. & SPARKS, L. E., 1995. Carbon adsorption for indoor air cleaning. **ASHRAE Journal,** vol. 37, n2, p.34-40.
- VINTAGE. 2001. **Living the cool life.** Vintage Air.
- YAMANE, E.; SAITO, H., (1986). **Tecnologia do condicionamento de ar,** Edgard Blücher Ltda, São Paulo.
- ZHANG, W.; DAY, I., 1997. Shuttung magnet ensures efficient gas compression. **Eureka.** November.
- HEAT-GENERATED COOLING TECHNIQUES; 2001. www.ott.doe.gov.

HILTECH DEVELOPMENTS LTD; 2000. www.hiltech.developments.com

TRENDS DEVELOPMENTS & TOOLS; 2001. www.autofieldguide.com/articles/050204.html.