



FACULDADES
DOM BOSCO

LUAN FELBINGER DE MAGALHÃES
VITOR RIBEIRO ANAYA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A APLICAÇÃO DE COMPRESSORES DE
DESLOCAMENTO VARIÁVEL COM CONTROLE INTERNO E COMPRESSORES
DE DESLOCAMENTO FIXO EM SISTEMAS AUTOMOTIVOS**

Resende - RJ
2023

**ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL DOM BOSCO
FACULDADE DE ENGENHARIA DE RESENDE**

**Luan Felbinger de Magalhães
Vitor Ribeiro Anaya**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A APLICAÇÃO DE COMPRESSORES DE
DESLOCAMENTO VARIÁVEL COM CONTROLE INTERNO E COMPRESSORES
DE DESLOCAMENTO FIXO EM SISTEMAS AUTOMOTIVOS**

Trabalho de Graduação apresentado à
Associação Educacional Dom Bosco,
Faculdade de Engenharia de Resende ,
Administrativas e da Computação Dom Bosco
Curso de Engenharia Mecânica , como requisito
parcial para obtenção do diploma de Bacharel
em Engenharia Mecânica

Resende - RJ
2023

Catálogo na fonte
Biblioteca Central da Associação Educacional Dom Bosco – Resende-RJ

M189	<p>Magalhães, Luan Felbinger de Estudo comparativo entre a aplicação de compressores de deslocamento variável com controle interno e compressores de deslocamento fixo em sistemas automotivos / Luan Felbinger de Magalhães; Vitor Ribeiro Anaya - 2023. 55f.</p> <p>Orientador: Juliano Carvalho da Silva Filho Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à finalização do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Resende da Associação Educacional Dom Bosco.</p> <p>1. Engenharia mecânica. 2. Climatização veicular. 3. Compressores. 4. Ar condicionado. I. Anaya, Vitor Ribeiro. II. Silva Filho, Juliano Carvalho da. III. Faculdade de Engenharia de Resende. IV. Associação Educacional Dom Bosco. V. Título.</p> <p>CDU 621.51(043)</p>
------	--



FACULDADES
DOM BOSCO

**LUAN FELBINGER DE MAGALHÃES
VITOR RIBEIRO ANAYA**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHARIA MECÂNICA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

BANCA EXAMINADORA:

Me.: JULIANO CARVALHO DA SILVA FILHO

Orientador

Me.: DINIZ FELIX DOS SANTOS FILHO

Membro da banca

Prof.: DIEGO DA SILVA CARVALHO

Membro da banca

Novembro, 2023

Dedico este trabalho

aos meus pais, Manoel e Rosângela que me ensinaram sempre a persistir naquilo que se acredita cegamente em ser o correto independente da situação ou momento. A recompensa de um retorno positivo é sempre garantida.

À minha futura esposa Carla que de maneira única sempre me deu forças para seguir em frente. Sinônimo de mulher guerreira que nunca deixou de acreditar em mim em nenhum momento.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecemos a Deus, por nos ter dado a oportunidade de chegarmos até o presente momento, agradecendo pela nossa vida, força, família e aos grandes amigos; aos nosso orientador e coorientador, *Prof. Juliano Carvalho da Silva Filho e Prof. Diniz Félix dos Santos Filho* que nos incentivaram desde o início. Sem a sua orientação, conhecimento e persistência, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

À Faculdade Dom Bosco por todo acolhimento, suporte e atenção que nos foi dedicado nesse período.

“A coragem é a primeira das qualidades humanas, porque é a qualidade que garante as demais.”

Churchill

RESUMO

Nos últimos anos, com o avanço da tecnologia automotiva, os sistemas de climatização veicular têm se tornado cada vez mais sofisticados e eficientes. Os motoristas e passageiros agora têm a capacidade de ajustar a temperatura do veículo de acordo com suas preferências individuais, independentemente das condições climáticas externas. No presente trabalho abordaremos sobre os sistemas de climatização veicular equipados com dois tipos de compressores, o compressor com deslocamento fixo e o compressor com deslocamento variável de controle interno, duas opções comumente encontradas no mercado brasileiro. Vamos compará-los em termos de desempenho, eficiência e benefícios, destacando suas principais características de funcionamento, onde será possível correlacionarmos qual tipo trabalha em condições mais estáveis em nível de sistema, o que por consequência acarretará em uma melhor eficiência energética do veículo quando ambos estiverem trabalhando em condições severas de temperatura externa. Através de testes em câmara climática será possível identificar de maneira visual que conjuntos que aplicam compressor variável trabalham de maneira mais estabilizada, permitindo que o sistema ajuste a demanda de performance através da informação recebida pela linha de sucção, diferente de sistemas que aplicam compressor fixo, fazendo com que o componente trabalhe sempre na máxima eficiência demandando um controle que o proteja do ponto de congelamento, o qual gera picos de temperatura que afetam de maneira geral a avaliação, ilustrando que apesar do compressor estar utilizando sua capacidade máxima, a cabine como um todo não é refrigerada de maneira mais eficiente podendo gerar reclamações desde falta de performance do sistema de refrigeração até a percepção do aumento do consumo de combustível em situações onde o sistema seja mais requisitado.

PALAVRAS-CHAVE: Conforto térmico. Ar-condicionado. Eficiência. Variável. Fixo.

ABSTRACT

In recent years, with the advancement of automotive technology, vehicle air conditioning systems have become increasingly sophisticated and efficient. Drivers and passengers now have the ability to adjust the vehicle's temperature to their individual preferences, regardless of outside weather conditions. In the present work, we will approach vehicle air conditioning systems equipped with two types of compressors, the compressor with fixed displacement and the compressor with variable displacement with internal control, two options commonly found in the Brazilian market. We will compare them in terms of performance, efficiency and benefits, highlighting their main operating characteristics, where it will be possible to correlate which type works in more stable conditions at the system level, which will consequently result in a better energy efficiency of the vehicle when both are working in severe external temperature conditions. Through tests in a climate chamber, it will be possible to visually identify which system that apply a variable compressor work with more stabilized way, allowing the system to adjust the performance demand through the information received by the suction line, unlike systems that apply a fixed compressor. ensuring that the component always works at maximum efficiency, requiring a control that protects it from the freezing point, which generates temperature peaks that generally affect the evaluation, illustrating that despite the compressor using its maximum capacity, the cabin is not refrigerated more efficiently and can generate complaints since from lack of performance of the refrigeration system until the perception of increased fuel consumption in situations where the system is most required.

KEYWORDS: Thermal comfort. Air conditioning. Efficiency. Variable. Fix

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Ciclo de refrigeração por compressão de vapor	19
Figura 2. Ciclo teórico de refrigeração	21
Figura 3. Ciclo real x ciclo teórico de refrigeração	22
Figura 4. Esquema do sistema de climatização com todos os seus componentes	23
Figura 5. Comportamento do fluido no compressor de deslocamento fixo tipo “Scroll”	24
Figura 6. Componentes do compressor de cilindrada variável com controle interno	25
Figura 7. Exemplo de condensador do tipo aletas com filtro integrado.....	26
Figura 8. Evaporador - 47 mm “Rectangular Cup” do tipo tubo e aleta	26
Figura 9. Válvula de expansão	28
Figura 10. Curva de saturação da válvula de expansão Nissens do tipo “Cross charged”	29
Figura 11. Mangueiras de alta e baixa pressão	30
Figura 12. Exemplo de comando do ar-condicionado, pressostato e termostato para proteção do congelamento	31
Figura 13. Veículo instrumentado em uma câmara climática com dinamômetro	33
Figura 14. Pontos de termopares para mapeamento da temperatura da cabine	33
Figura 15. Fluxograma de atividades.....	34
Gráfico 1. Comportamento térmico durante todo ciclo do veículo com compressor variável de controle interno	39
Gráfico 2. Comportamento térmico do sistema durante o ciclo com compressor variável de controle interno	39
Figura 16. Válvula de controle da variação do deslocamento	40
Gráfico 3. Variação das pressões nas linhas de alta e baixa ao longo do ciclo com compressor variável	41
Gráfico 4. Comportamento térmico durante todo ciclo do veículo com compressor fixo	43
Gráfico 5. Comportamento térmico do sistema durante o ciclo com compressor fixo	44
Gráfico 6. Variação das pressões nas linhas de alta e baixa ao longo do ciclo com compressor fixo	45
Gráfico 7. Comportamento térmico durante cinco primeiros minutos do ciclo do veículo com compressor variável de controle interno	47
Gráfico 8. Estabilidade do RPM com compressor variável controle interno.....	48
Gráfico 9. Oscilação do RPM devido acionamento e desligamento do compressor fixo	49
Gráfico 10. Comparativo da variação do rpm no sistema com compressor variável e fixo.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores médios para dimensionamento de um sistema de climatização	35
Tabela 2. Escala de sensação térmica PMV e PPD	36
Tabela 3. Temperaturas médias das cabeças e difusores em diferentes momentos de tempo sistema compressor variável	42
Tabela 4. Temperaturas médias das cabeças e difusores em diferentes momentos de tempo sistema compressor fixo	46
Tabela 5. Comparativo dos resultados de performance dos dois compressores	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TXV	Thermal Expansion Valve
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
CT	Central
ECU	Electronic Control Unit

LISTA DE SÍMBOLOS

P	pressão
H	entalpia
T_0	temperatura ar externo
φ_0	umidade relativa do ambiente externo
T_E	temperatura do ar na saída do evaporador
φ_E	umidade relativa no evaporador
\dot{m}_a	vazão mássica de ar
s	segundos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS E OBJETO DE ESTUDO	16
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	18
2.2	CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR	18
2.2.1	CICLO TEÓRICO DE REFRIGERAÇÃO	20
2.2.2	CICLO REAL DE REFRIGERAÇÃO	21
2.3	COMPONENTES DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO	22
2.3.1	COMPRESSOR	22
2.3.2	CONDENSADOR	25
2.3.3	EVAPORADOR	25
2.3.4	FLUIDO REFRIGERANTE	26
2.3.5	VÁLVULA DE EXPANSÃO	27
2.3.6	MANGUEIRAS E DUTOS	29
2.3.7	DISPOSITIVOS DE CONTROLE E PROTEÇÃO DO SISTEMA	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO	33
3.2	PARÂMETROS DE OPERAÇÃO	34
3.3	CONFORTO TÉRMICO	35
4	AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE EM CÂMARA CLIMÁTICA	37
4.1	RESULTADO PERFORMANCE COMPRESSOR VARIÁVEL	37
4.2	RESULTADO PERFORMANCE COMPRESSOR FIXO	41
4.3	COMPARATIVO DAS PERFORMANCES	45
5	CONCLUSÃO	49
6	INDICAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

A diversidade de modelos e marcas de automóveis em todo o globo é incontestável, porém apesar de existirem diferenças entre os designs, motores, volumes, entre outros, existe um sistema que é comum entre todos eles e que atualmente se torna fundamental a sua presença. Esse sistema é o de climatização que tem como principal objetivo manter o bem-estar dos ocupantes ao longo dos diferentes tipos de trajetos, que podem ser desde um caminho curto apenas para chegar ao trabalho ou seguir uma longa viagem durante várias horas.

Apesar da comodidade, para atingirmos o conforto térmico na cabine com agilidade é necessário pagar um preço, e esse custo será descontado em sua totalidade no processo de combustão do motor, onde parte da energia gerada para movimentar as rodas será deslocada para o funcionamento da correia de acessórios que por consequência fará com que o automóvel consuma mais combustível dentro de um mesmo trajeto comparado a um veículo sem ar-condicionado.

Segundo Hinrichs (2014), se os países industrializados fossem submetidos a alguma restrição significativa de acesso a essas fontes de petróleo, como a redução das jazidas ou grandes aumentos dos preços, com certeza suas economias sofreriam danos consideráveis. E isso remete a um cenário cada vez mais real, onde as reservas globais de combustíveis não renováveis se esgotam a cada dia. Essa questão energética é muito importante tendo em vista que devido ao aumento exponencial mundial da demanda de combustíveis, obrigatoriamente temos que encontrar todas as reduções possíveis, onde o sistema de climatização se torna um dos protagonistas, já que através da melhor estratégia é possível atingir o conforto térmico dentro do tempo considerado normal em condições extremas, e não aumentar o consumo para que tal tarefa seja possível. Hinrichs (2014) ainda afirma que a demanda global triplicou de 50 anos para cá, e que há uma expectativa de que triplique daqui para frente num período menor, por volta de 30 anos.

Iremos restringir o estudo em um veículo de produção em massa, do segmento hatch compacto, onde se faz necessário uma redução considerável nos custos de produção que impactam diretamente na capacidade de refrigeração do sistema, e ao mesmo tempo deve ser econômico com relação ao consumo de combustível, fazendo com que tenhamos que encontrar o melhor acordo entre performance de refrigeração da cabine e aproveitamento do combustível. As máquinas reais, nas quais os processos que formam o ciclo da máquina não são reversíveis,

têm uma eficiência menor. Se um carro fosse movido por uma máquina de Carnot, a eficiência seria de aproximadamente 55%, mas na prática a eficiência é por volta dos 25% (HALLIDAY, 2012).

Temos um caminho plausível através das escolhas corretas dos diferentes componentes que formam o sistema de climatização, entre eles o evaporador, condensador, linhas de sucção e descarga e principalmente o compressor que será o foco do estudo proposto. Segundo Wirz (2012), o "coração" do sistema de refrigeração automotivo é o compressor, que por sua vez é responsável por "bombear" o líquido refrigerante através dos demais componentes do sistema.

Entre as principais escolhas possíveis destacamos os dois tipos de compressor que podem ser aplicados a um sistema de refrigeração automotivo, o compressor de deslocamento fixo e o compressor de deslocamento variável com controle interno. O grande diferencial entre os dois componentes é justamente a estratégia abordada visto que o primeiro irá sempre prezar o conforto térmico no menor tempo possível, e o segundo trabalhará de acordo com a necessidade de refrigeração da cabine. Além é claro de considerar todo o processo real de refrigeração, levando em conta as perdas por não se tratar de um refrigerador ideal, e sim de um caso prático.

Será possível identificar através dos resultados que serão apresentados posteriormente que o compressor variável com controle interno trabalha de maneira mais inteligente e de maneira mais autônoma, permitindo que em situações dinâmicas o sistema tenha a melhor resposta perante as condições ambientais naquele determinado momento, diferentemente do compressor fixo, que de maneira binária, trabalhará sempre com seu máximo deslocamento. Variações de rpm, picos de temperatura e oscilação da pressão serão adversidades que comumente o sistema com compressor fixo terá que enfrentar devido seu comportamento característico, em contrapartida, o compressor variável de controle interno evitará de trabalhar com pontos extremos preferindo a consistência ao longo de todo ciclo avaliativo.

1.1 OBJETIVOS E OBJETO DE ESTUDO

O principal objetivo e foco deste trabalho será a análise comparativa das diferentes estratégias aplicadas no compressor de deslocamento fixo e no compressor de deslocamento variável com controle interno, que geram diferentes comportamentos térmicos dentro de uma mesma cabine ou de um mesmo volume, que podem acarretar desde uma possível sensação de falta de performance do ar-condicionado até em um maior consumo de combustível num mesmo percurso com condições ambientais similares.

Os objetos de estudo no presente trabalho são dois sistemas de refrigeração, onde a maior diferença entre eles consiste na aplicação dos dois tipos de compressores citados anteriormente em um mesmo veículo do segmento hatch compacto com quatro portas e fabricação nacional, submetido a dois testes de performance de refrigeração do sistema em câmara climática onde em ambas provas foram realizadas com as mesmas condições estabilizadas como temperatura ambiente, umidade, incidência solar, velocidade e tempo de cada fase da prova.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Iniciando a definição de sistema de refrigeração no capítulo 2, será apresentado com mais detalhes o ciclo real de refrigeração por compressão de vapor, as características do fluido refrigerante aplicado nos dois veículos e os principais componentes do sistema apresentando suas particularidades.

O capítulo 3 ficará restrito aos resultados obtidos durante os testes propostos, sendo possível comparar os resultados de performance de refrigeração obtidos em câmara climática com condições externas controladas e também alguns resultados de consumo de combustível em condição estabilizada, sendo possível identificar os valores com o sistema ligado e desligado em ambas as aplicações.

O capítulo 4 será reservado para análise comparativa detalhada dos resultados de performance do sistema de climatização obtidos, onde será possível identificar a real eficácia e diferencial do sistema variável com controle interno, através do comparativo com os valores exatos obtidos de temperatura e pressão ao longo dos ciclos pelo sistema com compressor fixo, concluindo todo o estudo proposto neste trabalho no capítulo seguinte.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura que será apresentada está dividida em duas partes principais: Definição de sistema de refrigeração, que engloba os principais conceitos e curvas do ciclo de refrigeração por compressão a vapor podendo ser subdividido em ciclo teórico e real, junto com as principais características de cada componente que compõem o sistema de refrigeração automotivo. A segunda parte será dedicada a introdução do conceito de conforto térmico e apresentação dos resultados de performance obtidos em câmara climática onde será possível identificar graficamente a diferença no comportamento de um mesmo sistema, diferindo apenas no tipo do compressor aplicado, possibilitando identificar as melhores estratégias associadas a fim de aumentar a eficiência na refrigeração de uma mesma cabine ou volume, gerando ganhos positivos principalmente no consumo de combustível.

2.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Podemos definir resumidamente como sistema de refrigeração um conjunto de componentes e processos projetados para remover o calor de um espaço, substância ou sistema, a fim de reduzir sua temperatura e manter um ambiente mais frio. Funcionam com base nos princípios da transferência de calor, utilizando fluidos refrigerantes para absorver o calor de um ambiente e dissipá-lo em outro lugar.

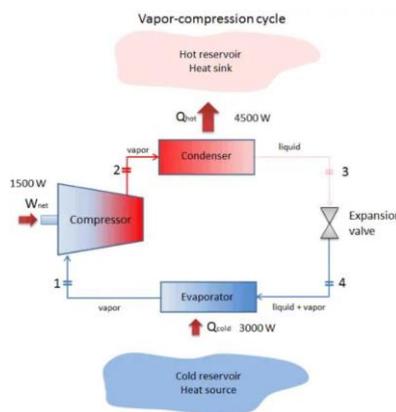
Contudo, a cada ano que passa, o sistema de climatização vai adquirindo um papel cada vez mais protagonista, se tornando fundamental na condução e conforto do condutor e dos passageiros durante todo o percurso. Em um mundo onde a mobilidade é fundamental, a capacidade de manter um ambiente interno agradável e controlado termicamente em veículos, sejam eles de grande ou pequeno porte, é de extrema importância.

Devido às novas demandas energéticas se torna quase que obrigatório a busca por inovações tecnológicas, seja ela através de novos sistemas de controles avançados ou novos componentes com tecnologias inovadoras. Nesse caso será abordado a aplicação do compressor variável com controle interno como um possível ganho, já que a busca por sistemas mais eficientes se tornou uma obrigação no setor automotivo que tem que equilibrar o conforto do usuário com a responsabilidade ambiental.

2.2 CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

A compressão de vapor usa um fluido refrigerante líquido circulante como meio que absorve e remove o calor do espaço a ser resfriado e, por consequência, o rejeita em outro local. A figura mostra um sistema típico de compressão de vapor de estágio único. O sistema típico de compressão de vapor consiste basicamente no compressor, condensador, válvula de expansão (também chamada de válvula do acelerador) e o evaporador.

Figura 1 - Ciclo de refrigeração por compressão de vapor



Fonte: Thermal engineering (2023)

Para um ciclo ideal de compressão de vapor, pode-se considerar que o sistema passa por uma sequência de quatro processos que serão descritos na sequência conforme apresentado em Moran e Shapiro (2004).

- a) O primeiro deles, uma compressão isentrópica, onde o refrigerante em circulação entra no compressor como vapor de baixa pressão, ou um pouco abaixo da temperatura no interior do refrigerador. O meio gasoso é comprimido adiabaticamente do estado 1 ao estado 2 pelo compressor de pistão (ou por bombas centrífugas) a uma pressão e temperatura relativamente altas. O ambiente trabalha com o gás, aumentando sua energia interna (temperatura) e comprimindo-o (aumentando sua pressão). Por outro lado, a entropia permanece inalterada.
- b) Após, no condensador, ocorre a rejeição de calor isobárica, onde o vapor superaquecido viaja sob pressão através de bobinas ou tubos que compõem o condensador. Nesta fase, o refrigerante passa pelo condensador onde o refrigerante condensa e há transferência de calor do refrigerante para o ambiente mais frio. Quando o refrigerante sai do condensador ele ainda está sob pressão, mas agora está apenas ligeiramente acima da temperatura ambiente.

- c) Logo após, através da válvula de expansão, ocorre o processo isentálpico, onde o refrigerante no estado 3 entra na válvula de expansão e se expande para a pressão do evaporador. Esse processo geralmente é modelado como um processo de limitação para o qual a entalpia permanece constante. A diminuição repentina da pressão resulta na evaporação do flash do tipo explosivo de uma porção (normalmente cerca de metade) do líquido. O calor latente absorvido por essa evaporação é extraído principalmente do refrigerante líquido ainda adjacente, um fenômeno conhecido como auto refrigeração.
- d) Por fim, através do evaporador, ocorre a adição de calor isobárico, em que o refrigerante frio e parcialmente vaporizado continua através das bobinas ou tubos da unidade do evaporador. Nesta fase (entre o estado 4 e o estado 1), há uma transferência de calor de pressão constante para o meio líquido a partir de uma fonte externa, uma vez que a câmara está aberta para fluir para dentro e para fora. À medida que o refrigerante passa pelo evaporador, a transferência de calor do espaço refrigerado resulta na vaporização do refrigerante.

2.2.1 CICLO TEÓRICO DE REFRIGERAÇÃO

O ciclo teórico de refrigeração é uma representação idealizada e em teoria simplificada que assume condições ideais, comumente utilizado para cálculos teóricos de eficiência e desempenho. Pode ser considerado como um modelo simples que assume que o processo de refrigeração seguirá as leis da termodinâmica de maneira ideal, não refletindo as complexidades do mundo real como por exemplo a dinâmica dos fluidos, influência do ambiente e eficiência dos componentes do sistema.

A figura 2 ilustra o ciclo básico de refrigeração automotiva, onde o refrigerante circula continuamente pelo sistema, absorvendo calor do interior do veículo e dissipando-o para o ambiente externo. Isso resulta em um ambiente mais fresco e confortável dentro do carro. A eficiência do sistema depende de vários fatores, incluindo a qualidade do equipamento e a manutenção adequada do sistema.

Figura 2 - Ciclo teórico de refrigeração

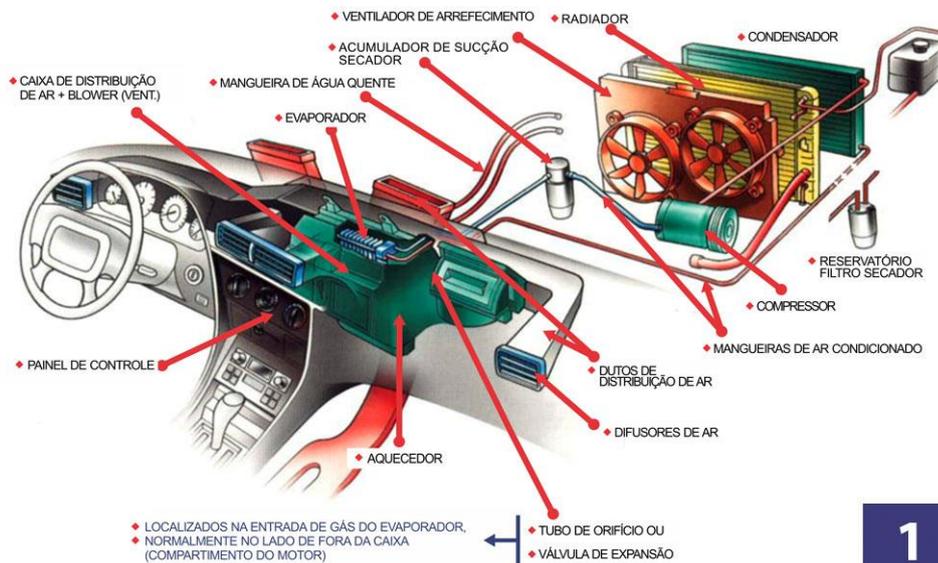
Fonte: Acervo digital UFPR (2023)

2.3 COMPONENTES DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO

Os sistemas de climatização automotiva desempenham um papel fundamental em proporcionar conforto aos ocupantes de veículos, regulando a temperatura, umidade e qualidade do ar no interior do carro, criando um ambiente agradável, independentemente das condições climáticas externas. Esses sistemas têm evoluído ao longo das décadas e se tornaram parte essencial de veículos modernos, virando critério fundamental no momento da escolha do modelo do veículo.

Os principais componentes de um sistema de refrigeração automotiva incluem o compressor, condensador, evaporador, válvula de expansão, controles do painel, sensores entre outros, onde cada componente desempenha uma função específica nesse ciclo. Neste contexto, será explorado em detalhes esses componentes e como eles interagem para proporcionar o conforto térmico dentro do veículo, analisando suas funções, operação e interdependência para fornecer uma compreensão abrangente dos sistemas de climatização automotiva.

Figura 4 - Esquema do sistema de climatização com todos os seus componentes



1

Fonte: DELPHI AUTOMOTIVE (2005)

2.3.1 COMPRESSOR

O compressor automotivo é responsável por comprimir o fluido refrigerante aumentando sua pressão e temperatura. Seu funcionamento ocorre por meio de polias e correias acopladas ao motor do veículo.

Pelo fato de o compressor estar sempre acoplado, para que não haja funcionamento desnecessário é imprescindível o uso de um sistema capaz de mantê-lo em repouso quando não utilizado, aqui aplica-se a embreagem magnética. O mecanismo é composto por uma bomba indutora e um prato de acionamento, que uma vez acionado, permite a passagem de corrente elétrica pela bobina e conseqüente atração dela ao prato de acionamento, permitindo a transferência de energia mecânica do motor para o eixo do compressor, através das polias.

É fundamental que o compressor esteja apto a trabalhar em diversas faixas de rotação e vazão, a fim de garantir seu bom funcionamento em várias ocasiões. De acordo com suas características, quando tratamos de compressores para ar-condicionado automotivos, podemos classificar de acordo com o seu mecanismo, capacidade volumétrica e acionamento, são eles:

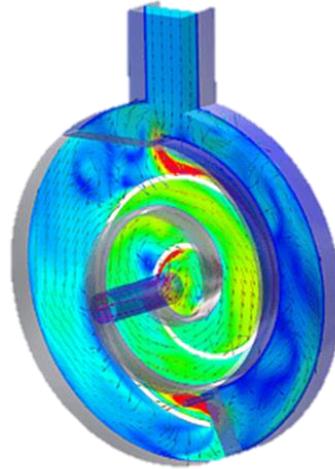
- Conceito do mecanismo interno
 - Alternativos: Pistão *Wobble Plate* e *Swashplate*.
 - Rotativo: *Scroll* (Espiral) e *Rotary vane* (Palheta).
- Capacidade volumétrica
 - Deslocamento Fixo.
 - Deslocamento variável.
- Acionamento
 - Através de embreagem eletromagnética.
 - *Clutchless* (Sem embreagem).

Para o trabalho proposto limitaremos as comparações em apenas dois tipos de compressores, o primeiro é um compressor rotativo do tipo *scroll*, deslocamento fixo com acionamento através de embreagem. E o segundo, um compressor alternativo do tipo *Wobble Plate*, deslocamento variável com acionamento através de embreagem. Cada compressor será aplicado em um sistema dos veículos que serão analisados posteriormente.

- Compressor fixo rotativo *scroll* com embreagem: esse tipo é o mais comum dentre os encontrados nos automóveis atualmente, pois em termos de valor, podemos considerá-lo mais acessível quando comparado ao variável. Opera em uma única velocidade ou taxa de compressão, isto é, ou encontra-se ligado funcionando a 100% da capacidade,

ou desligado, sem apresentar meios termos ou limitar sua capacidade. Em casos em que a necessidade de resfriamento é menor, a carga térmica é menor, e acaba resultando no uso em excesso da energia disponível no sistema.

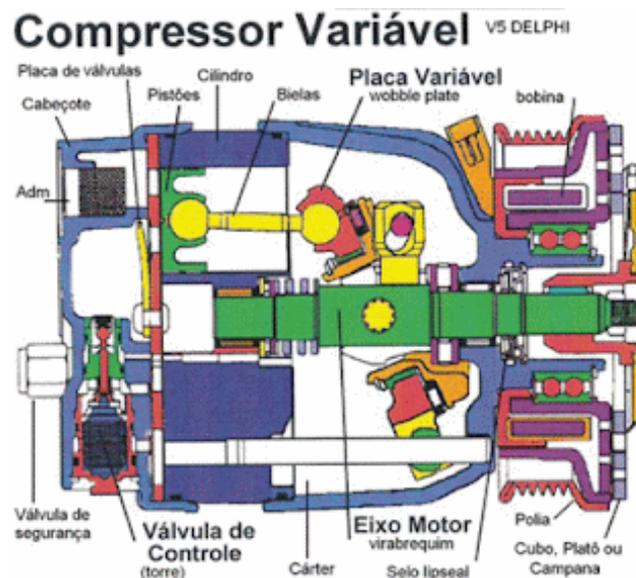
Figura 5 - Comportamento do fluido no compressor de deslocamento fixo tipo “Scroll”



Fonte: TwinMesh - Compressor fluid dynamics (2023)

- Compressor alternativo variável *wobble plate* com embreagem: projetado para atender a demanda real do resfriamento, como o próprio nome nos diz, possuem velocidade variável de operação comprimindo o refrigerante de acordo com a necessidade do sistema, desde desligado até o 100% de sua capacidade. De forma geral apresenta uma eficiência superior ao fixo, além de reduzir o desgaste do sistema, ao custo de um produto mais oneroso.

Figura 6 - Componentes do compressor de cilindrada variável com controle interno



Fonte: Science Direct - A mathematical model of variable displacement wobble plate compressor for automotive air conditioning system (2023)

2.3.2 CONDENSADOR

Dentro do sistema de refrigeração automotiva, o condensador desempenha papel fundamental para o funcionamento do sistema. Atua diretamente na dissipação de calor, recebendo em forma gasosa o fluido refrigerante do compressor, sob alta pressão. O fluido é então condensado de volta a sua forma líquida após realizar a troca térmica nessa etapa do processo, liberando calor no sistema.

A fim de otimizar as trocas de calor com o meio externo, os condensadores são posicionados estrategicamente na parte frontal dos veículos, normalmente entre a grade e o radiador. Segundo Tribess (2004), eles são fabricados de forma preferencial utilizando o alumínio, em tubos dispostos paralelamente e interligados por aletas que permitem uma ampla troca de calor entre o fluido e o meio externo.

Figura 7 - Exemplo de condensador do tipo aletas com filtro integrado



Fonte: Genebra autopeças (2023)

2.3.3 EVAPORADOR

Outro trocador de calor presente no sistema de refrigeração automotiva, o evaporador fica responsável pela remoção do calor no interior do veículo através da evaporação do líquido refrigerante. Quando o ar quente da cabine passa através das aletas do evaporador, o fluido refrigerante que circula dentro do evaporador começa a evaporar, reduzindo a temperatura interna do veículo e desumidificando o ar, proporcionando conforto térmico a todos os ocupantes.

Para aplicação dentro da automobilística os evaporadores do tipo tubo e aleta são os mais recomendados e estão presentes no mercado há muitos anos. Utilizam esse tipo de conceito para maximizar a superfície de contato entre o ar da cabine e o fluido refrigerante que circula nas aletas, permitindo que o calor seja transferido da maneira mais eficaz possível.

Figura 8 - Evaporador - 47 mm “Rectangular Cup” do tipo tubo e aleta



Fonte: Valeo service (2023)

2.3.4 FLUIDO REFRIGERANTE

Um composto químico utilizado para transferir energia de um meio ao outro, essencial no funcionamento de sistemas de refrigeração. Normalmente em seu ciclo normal de trabalho é constantemente submetido a compressão, condensação, expansão e evaporação. Segundo Tribess (2004), existem algumas propriedades fundamentais das quais o fluido precisa ter, tais como:

- Não inflamável e tóxico;
- Estabilidade química e térmica;
- Alta miscibilidade com lubrificantes;
- Possibilidade de produção em grande escala;
- Entalpia de vaporização elevada;
- Baixa temperatura de saturação à pressão atmosférica;
- Pressões de saturação não muito elevadas;
- Temperatura crítica elevada.

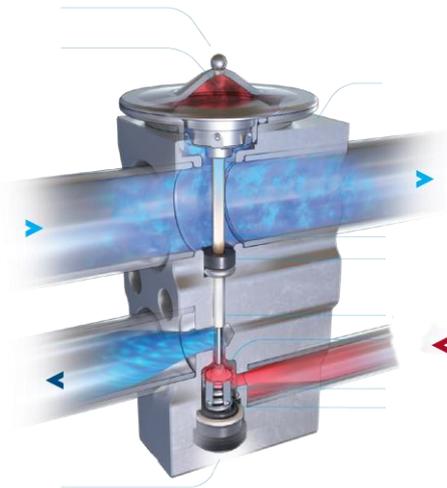
Embora possamos identificar inúmeros fluidos refrigerantes que possam se encaixar nessas condições, uma parte desses que continham em sua composição clorofluorcarbonetos

(CFCs) e hidroclorofluorcarbonos (HCFC) foram impedidos de serem utilizados em meados da década de 70 por acordos mundiais devido a estudos em prol da camada de ozônio. Com isso, fluídos comumente utilizados como o R-12 e R-502, este primeiro muito utilizado em ar-condicionado automotivos, tiveram seu uso proibido. Para suprir a essa demanda de mercado foi implementado o uso de R-134a (1,1,1,2 Tetrafluoroetano), o que o tornou o mais utilizado atualmente em diversos sistemas de refrigeração incluindo o ar-condicionado automotivo.

2.3.5 VÁLVULA DE EXPANSÃO

A válvula de expansão também conhecida como válvula TXV (Thermostatic Expansion Valve) é um componente de muita importância para um ciclo de refrigeração estável. Entre as suas principais responsabilidades estão a regulação do fluxo de refrigerante que vai para o evaporador, expandindo o líquido que entra através dela promovendo assim a queda de pressão entre a linha de alta e baixa pressão conforme a figura 9.

Figura 9 - Válvula de expansão



Fonte: Nissens expansion valve (2023)

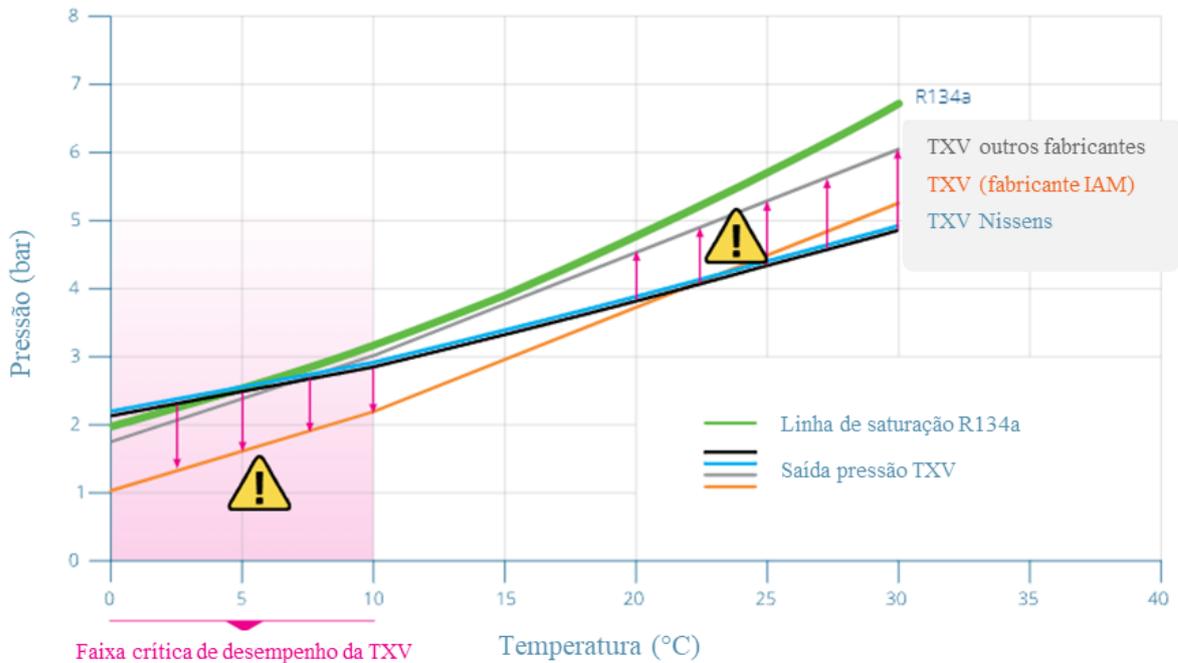
Pode ser dividida em dois tipos:

- Válvula *Non-Cross Charged (Parallel)*: Dentro de seu êmbolo vai carregado com o mesmo tipo de gás aplicado no sistema, nesse caso o R134a. Sua curva de saturação se

assemelha muito à curva de saturação do fluido refrigerante e mantém o *superheating* constante em toda a operação. Sempre associada a compressores de cilindrada fixa para que sempre tenha refrigerante no estado gasoso na linha de sucção, baixando assim a circulação de óleo em fluxos menores.

- Válvula *Cross- Charged*: Possui uma mistura de gases em seu êmbolo, incluindo o R134a aplicado também no sistema. Seu comportamento possui uma inclinação diferente da curva de saturação do fluido R134a não tendo o *superheating* em baixas cargas. Possui uma maior capacidade de circulação de óleo em baixos fluxos dando uma maior estabilidade no sistema durante seu funcionamento. Aplicado comumente em sistemas que possuem compressores de deslocamento variável.

Figura 10 - Curva de saturação da válvula de expansão Nissens do tipo “Cross charged”



Fonte: Nissens expansion valve (2023)

É possível observar na figura 10 que quanto maior o desvio com relação ao padrão correto, maior a redução da eficiência do sistema, podendo provocar diversas falhas no sistema que variam desde a notável perda de performance pelo usuário até a quebra dos componentes devido o fluido não estar no estado físico correto.

A capacidade da válvula TXV de manter uma temperatura constante e equilibrada no interior do veículo contribui para o conforto dos ocupantes evitando variações de temperatura e garantindo que o ar que sai dos dutos de ventilação seja agradável de acordo com o

selecionado pelo usuário. Ao realizarmos tal otimização desse processo, automaticamente temos uma redução do consumo de combustível do veículo e aumentamos a eficiência energética do sistema contribuindo para um desempenho eficaz em uma ampla variedade de condições operacionais.

2.3.6 MANGUEIRAS E DUTOS

Para que seja possível o transporte do fluido para todo sistema utilizamos as mangueiras de alta e baixa pressão que farão as ligações entre todos os componentes. Possuem características específicas de diâmetro e resistência já que devem ser dimensionadas adequadamente de acordo com a velocidade mínima de arraste de óleo, e não gerar perdas elevadas de carga ao longo das linhas, podendo trabalhar com pressões elevadas chegando até 30 bar dependendo da limitação de cada sistema.

Além de possuir a responsabilidade de transportar o fluido, também possui função primordial no amortecimento das vibrações geradas pelo compressor entre as partes não solidárias, ou seja, que possuem movimentos relativos em sentidos diferentes. Isso só é possível através da integração dos tubos metálicos e os tubos de borracha juntamente com a mufla, atenuando também os ruídos provenientes de pulsos de pressão.

Figura 11 - Mangueiras de alta e baixa pressão



Fonte: Centtravel (2023)

2.3.7 DISPOSITIVOS DE CONTROLE E PROTEÇÃO DO SISTEMA

Por último, os dispositivos de controle e proteção do sistema fazem toda a gestão para que o bom funcionamento, de acordo com os inputs inseridos pelo usuário, condições externas

de temperatura, e condições estáticas ou dinâmicas do veículo sejam todas consideradas e respeitadas.

São considerados dispositivos de controle e proteção do sistema:

- Liga/ desliga A/C;
- Recirculação/ ar externo;
- Velocidade do ventilador;
- Temperatura;
- Pressostato na linha de alta pressão;
- Termostato para proteção do congelamento do evaporador.

Figura 12 - Exemplo de comando do ar-condicionado, pressostato e termostato para proteção do congelamento



Fonte: Genebra autopeças (2023)

O tipo de compressor aplicado demandará controles específicos do sistema. Compressores de deslocamento fixo por exemplo demandam obrigatoriamente um controle de temperatura do evaporador para que não congele o mesmo, já que trabalham de maneira binária conforme citado anteriormente. Já compressores de deslocamento variável poderão ou não utilizar tal dispositivo devido o próprio componente realizar a gestão do fluxo. Ficará evidente as diferenças entre as gestões e seus impactos na apresentação das curvas obtidas em câmara climática com condições climáticas e veiculares controladas a seguir.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme dito por Tribess (2004), um compressor presente em um ar-condicionado veicular consiste num dispositivo que promove a movimentação do fluido refrigerante num circuito fechado. O movimento deste fluido através dos componentes promove diversas variações de pressão e temperatura.

O compressor de deslocamento fixo, por sua vez, trabalha de maneira binária em zero ou cem por cento do seu deslocamento de acordo com as condições ambientais externas, gerando picos que acarretarão em um maior consumo de combustível a partir de um certo tempo de estabilização.

Já o compressor de deslocamento variável, como seu próprio nome diz, trabalhará variando seu deslocamento de acordo com a pressão do sistema que está ligada diretamente a temperatura interna do habitáculo, que por consequência em momentos mais estáveis permite que o compressor trabalhe menos, comparado ao compressor fixo, gerando o mínimo de trabalho possível, logo, um menor consumo da energia gerada pelo motor, para manter a temperatura pré-selecionada pelo usuário.

Conforme dito por Wirz (2012), a ação de ligar e desligar o compressor pode ser prejudicial para sua manutenção no decorrer do tempo, uma vez que o controle de capacidade pode estender o tempo de funcionamento, proteger o compressor de danos sob condições de carga baixa e reduzir a demanda de energia, assim como aumentar a eficiência.

Para que fosse possível realizar a avaliação comparativa da aplicação de compressores variáveis com controle interno, em um mesmo sistema que utiliza compressor de deslocamento fixo, foi necessário realizar as avaliações em um ambiente controlado, semelhante ao ilustrado na figura 13, e em condições estabilizadas igualmente para que variáveis externas fossem

eliminadas e que o foco do estudo se restringisse somente ao tipo de compressor aplicado nos dois sistemas.

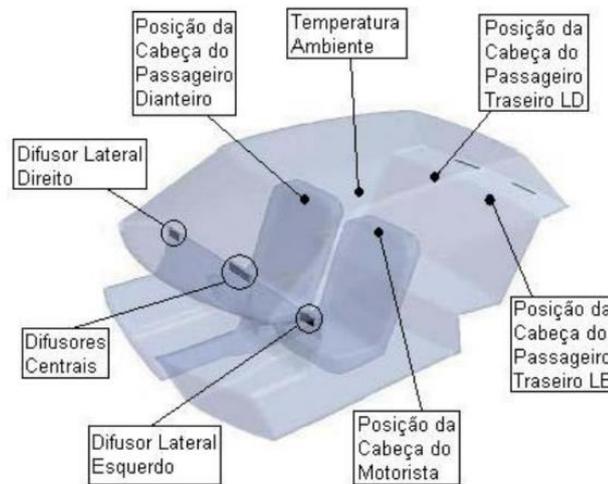
Figura 13 – Veículo instrumentado em uma câmara climática com dinamômetro



Fonte: Museu da imprensa automotiva (2023)

Após a definição dos carros e feito o mapeamento prévio dos sistemas de refrigeração, seguiu-se para a aquisição de dados de performance de sistema em ambiente controlado. Para que tal atividade fosse concluída, foram utilizados dados oriundos de câmara climática e dados obtidos através de termopares instalados dentro dos dois veículos, em pontos estratégicos conforme ilustrado na figura 14, exatamente nas mesmas posições, assim tornando a comparação válida.

Figura 14 – Pontos de termopares para mapeamento da temperatura da cabine

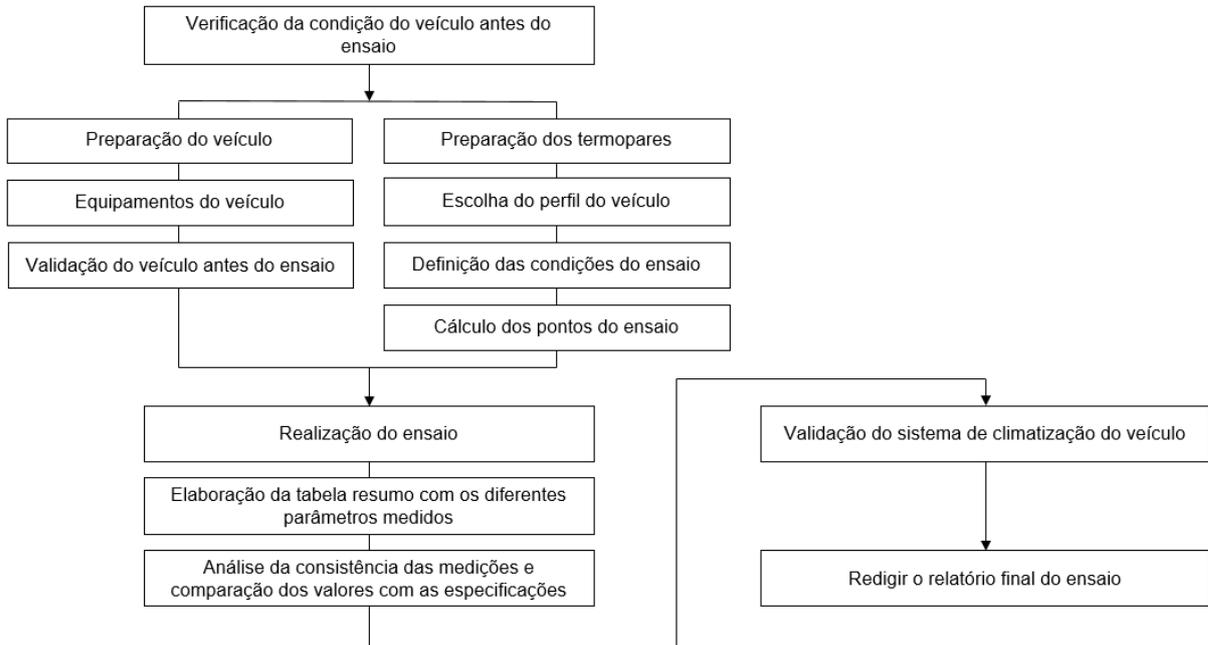


Fonte: MOURA, Marcelo Blanco Bolsonaro de. Aprimoramentos em sistema de climatização veicular para melhoria de condições ambientais de cabine e redução no consumo de combustível (2007)

É importante citar que ambos tiveram o mesmo tempo de avaliação, foram avaliados nas mesmas faixas de velocidades estabilizadas e foram expostos às mesmas condições de temperatura externa, umidade e radiação solar. A configuração do sistema de refrigeração realizada dentro do veículo é exatamente igual, utilizando a mesma velocidade do ventilador, temperatura exigida pelo usuário e direcionando o fluxo 100% para os difusores a fim de avaliar a performance máxima do sistema em um caso extremamente crítico para quem vai utilizar.

A última parte fica restrito a análise dos dados obtidos, mas antes de seguir para a comparação entre os sistemas, é feita uma avaliação prévia das condições de contorno para que seja garantido que ambos rodaram exatamente nas mesmas condições dentro do mesmo período de tempo sem interferência de qualquer fator externo, seja ele de origem do meio estudado ou da própria câmara climática. Na figura 15 é possível identificar o fluxo de atividades de maneira resumida que foram realizadas ao longo das duas avaliações em câmara climática até o momento que os dados foram validados.

Figura 15 – Fluxograma de atividades



Fonte: Autor (2023)

3.1 PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO

Ao longo de todas as avaliações realizadas algumas precauções foram necessárias para que a análise se restringisse ao máximo somente na diferença do tipo de compressor aplicado entre os dois veículos, eliminando assim fatores externos que inviabilizaram tal comparativo. ASHRAE (1999) cita que três efeitos solares aumentam a carga de resfriamento, o primeiro sendo um efeito vertical onde a intensidade máxima ocorre ao meio-dia ou próximo a ele, visto isso a radiação solar utilizada simula exatamente essa condição. A radiação horizontal e refletida é significativamente menor, mas a área do vidro é grande o suficiente para merecer consideração, logo como foi avaliado exatamente o mesmo modelo de veículo esse parâmetro entende-se que foi suprimido. E por último aquecimento de superfície onde a temperatura trabalha em função da energia solar absorvida, as temperaturas do interior, ambiente e a velocidade do automóvel foram todas controladas exatamente iguais nas duas avaliações.

A partir dos dados obtidos nas aquisições realizadas em condições ambientais e veiculares estabilizadas e já com todas as condições de contorno validadas, foi possível construir as curvas que caracterizam os dois tipos de compressores aqui estudados. Foram escolhidos quatro intervalos de tempo para que a visualização das temperaturas momentâneas seja de fácil acesso a fim de facilitar sua comparação.

3.2 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO

De acordo com FORREST & BHATTI (2002) para o dimensionamento do sistema de climatização alguns valores médios devem ser adotados a fim de definirmos uma referência para os diferentes projetos, porém os valores ilustrados na tabela 1 são considerados apenas como referência podendo ter alguma variação quando comparado a valores obtidos através de método experimental ou quando adotam-se objetivos mais agressivos, como por exemplo aplicação de um sistema de refrigeração em países com climas desérticos ou em países extremamente frios, mas em sua grande maioria onde o projeto não possui particularidades esses valores são amplamente aplicados.

Tabela 1 - Valores médios para dimensionamento de um sistema de climatização

Parâmetro	UN	Valor de referência
Temperatura do ar externo	T_o [°C]	38
Umidade relativa do ambiente externo	ϕ_o [%]	40
Temperatura do ar na saída do evaporador	T_E [°C]	10
Umidade relativa no evaporador	ϕ_E [%]	100
Vazão mássica de ar	\dot{m}_a [kg/s]	0,1285

Fonte: FORREST & BHATTI (2002)

Outros parâmetros também devem ser levados em consideração para o bom dimensionamento e por consequência um bom desempenho. ASHRAE (1999) cita que Sistemas de ar-condicionado com reaquecimento são avaliados de 4 a 43°C embora em algumas regiões a temperatura ambiente fique acima de 52°C durante alguns momentos.

ASHRAE (1999) também cita a importância de ter bem mapeado o comportamento térmico do veículo, já que o sistema de refrigeração é parte integrante e os efeitos do calor gerado pela rejeição térmica do motor e por consequente aquecimento do local devem ser considerados.

3.3 CONFORTO TÉRMICO

O conforto térmico pode ser considerado como a condição em que o indivíduo está satisfeito com a temperatura do ambiente onde ele se encontra, seja em um escritório, cômodo de uma casa ou até mesmo dentro de um veículo, de modo que ele não sinta calor nem tenha sensação de que o local está frio. Essa sensação térmica é extremamente subjetiva e envolve

diretamente outros fatores como por exemplo a umidade relativa, velocidade do vento, tipos de vestimenta e a própria temperatura do ambiente.

ASHRAE 55:2004 cita que conforto térmico é “a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico e é avaliada de maneira subjetiva”, e justamente por ser avaliado dessa maneira pelo indivíduo, uma parte desse grupo não terá a mesma percepção gerando um pequeno percentual de insatisfeitos. Para que fosse possível mensurar esse nível de satisfação, Fanger (1972) através de estudos desenvolveu um modelo baseado no voto das pessoas a respeito da sensação térmica de que se encontravam, através do voto médio estimado (PMV) podendo variar dentro de uma escala que vai de muito frio (-3) até muito quente (+3).

Tabela 2 - Escala de sensação térmica PMV e PPD

<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%

Fonte: Fanger (1972)

O maior desafio em automóveis no quesito conforto térmico é proporcionar o equilíbrio térmico no corpo como um todo, não tendo grandes variações de temperatura entre as extremidades, sendo o ideal que a cabeça tenha uma temperatura muito próxima da temperatura dos pés por exemplo, proporcionando assim uma sensação próximo da escala neutra que é o objetivo do sistema de refrigeração automotivo. Devido o espaço dentro da cabine não ser homogêneo se torna um desafio árduo a busca por esse equilíbrio como um todo, além desse fato os veículos hoje possuem painéis com texturas e outros tipos de materiais, bancos de couro, teto solar, entre outros opcionais que mudam completamente a dinâmica dentro de um mesmo volume.

Com base nessas definições e considerações juntamente com os dados obtidos experimentalmente em câmara climática, se torna mais fácil identificar o comportamento térmico do sistema e definir valores objetivos para que dentro de um intervalo de tempo possamos determinar previamente se o usuário tenderá a ter uma leve sensação de frio ou de calor ou até mesmo alcançar o conforto térmico esperado, atingindo assim uma sensação de neutralidade dentro desse ambiente.

4. AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE EM CÂMARA CLIMÁTICA

Definido o conceito de conforto térmico junto com os dados obtidos em câmara climática que serão apresentados na sequência, ficará mais claro o comportamento de cada sistema e suas particularidades que em alguns instantes, durante a avaliação, serão decisivos para que o usuário fique mais próxima da sensação de neutralidade, conseguindo assim um maior nível de aprovação comparado a outro sistema que oscila ficando sempre entre uma leve sensação de frio e uma leve sensação de calor, gerando um maior nível de reprovação desse sistema.

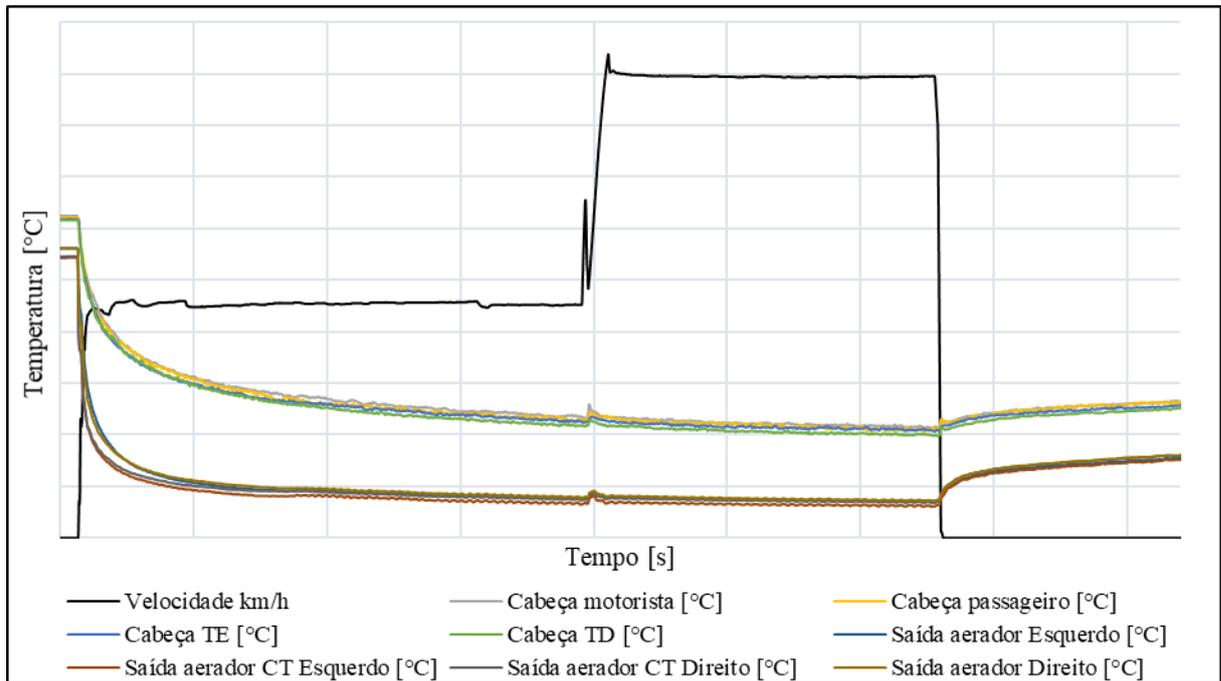
A seguir serão apresentados separadamente os resultados de performance dos dois compressores em questão, o compressor de deslocamento fixo variável com controle interno e compressor de deslocamento fixo, impacto no comportamento dos componentes periféricos e temperaturas obtidas dentro da cabine. Por fim, será possível comparar de maneira objetiva os dois resultados e o impacto no veículo de maneira geral das diferentes estratégias aplicadas para controle do sistema de refrigeração do veículo.

4.1 RESULTADO PERFORMANCE COMPRESSOR VARIÁVEL CONTROLE INTERNO

Sistemas que aplicam compressores com deslocamento variável de controle interno tendem a ter um comportamento mais estável e é justamente esse comportamento que permite um ganho na performance de refrigeração e consumo de combustível, já que o sistema não oscilará através dos desligamentos constantes que o compressor fixo gera para proteção do congelamento do evaporador.

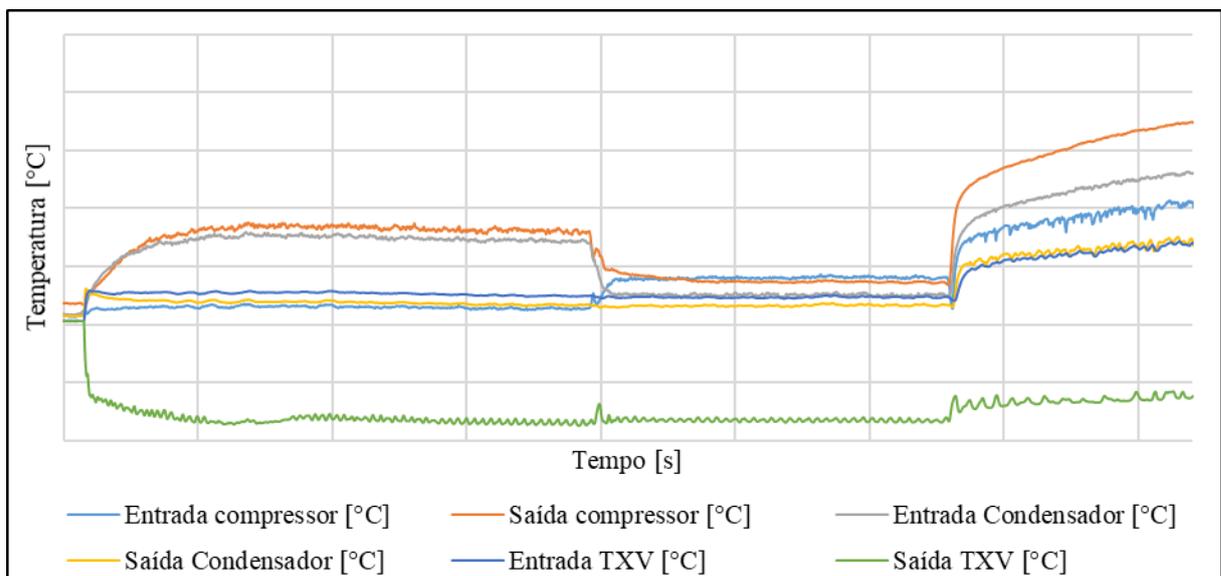
É possível identificar no gráfico 1 o comportamento dentro da cabine que apesar de ter tido variação de velocidade nas diferentes fases da avaliação, o comportamento das temperaturas das cabeças e do difusor seguem de maneira quase linear, resultado da adaptação do compressor as diferentes demandas, sejam elas externas ou da própria cabine, que demandarão mais ou menos performance do componente de acordo com o que foi selecionado pelo usuário, que nesse caso específico está sendo solicitado performance máxima do sistema em todos os instantes da prova.

Gráfico 1 – Comportamento térmico durante todo ciclo do veículo com compressor variável de controle interno



Iniciado o processo de estabilização da temperatura da cabine, que se localiza entre os 5 primeiros minutos e os 30 minutos de teste, o compressor de deslocamento variável já possui a vantagem de ter chegado próximo a temperatura de congelamento do evaporador, porém sem a necessidade de cortes, e como o sistema não necessita mais de seu deslocamento máximo, o mesmo se auto regula através da mensagem enviada pela baixa pressão na válvula do compressor que reduz seu deslocamento.

Gráfico 2 – Comportamento térmico do sistema durante o ciclo com compressor variável de controle interno



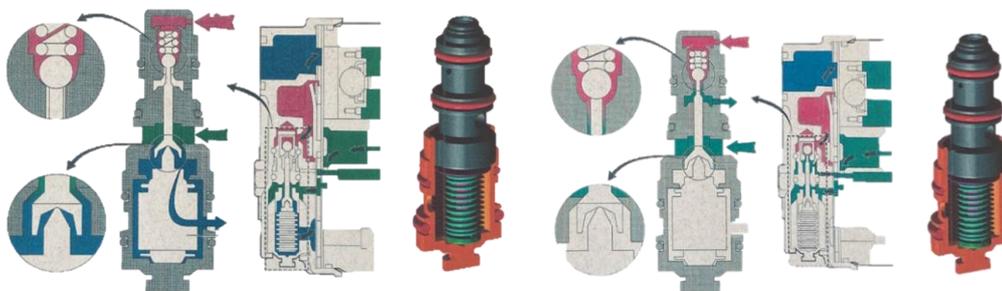
Devido a essa regulagem, é possível notar no gráfico 2 que o sistema trabalhará com temperaturas de entrada mais baixas, comparado ao sistema com compressor fixo. Somente teremos aumento considerável das temperaturas de trabalho dos componentes na parte final da avaliação, onde a velocidade do veículo cai para zero, se mantendo apenas em marcha neutra, fazendo com que o sistema sature, comparado às outras fases da prova, exigindo novamente do compressor o seu deslocamento máximo. Através da informação da linha de baixa pressão o compressor entende que houve um aumento de temperatura do evaporador, e caso seu deslocamento não aumente, não será possível manter a temperatura da cabine nas condições que o usuário necessita.

O grande diferencial entre os dois tipos de compressores é a válvula que permite a variação do deslocamento de acordo com a informação da linha de baixa pressão que é uma consequência da temperatura do evaporador naquele momento.

Quando o ar que passa no evaporador está mais quente o sistema demandará mais performance fazendo com que o compressor aumente seu deslocamento para comprimir mais fluido refrigerante, diminuindo a pressão interna no corpo da válvula, gerando o comportamento ilustrado na figura 16.

Ao contrário desse momento descrito, quando a temperatura do ar que está passando pelo evaporador está baixa o sistema já não necessita da máxima performance fazendo com que a pressão interna no corpo da válvula aumente, que por consequência diminuirá o deslocamento dos pistões do compressor fazendo com que o sistema se ajuste somente ao necessário para manter tal temperatura.

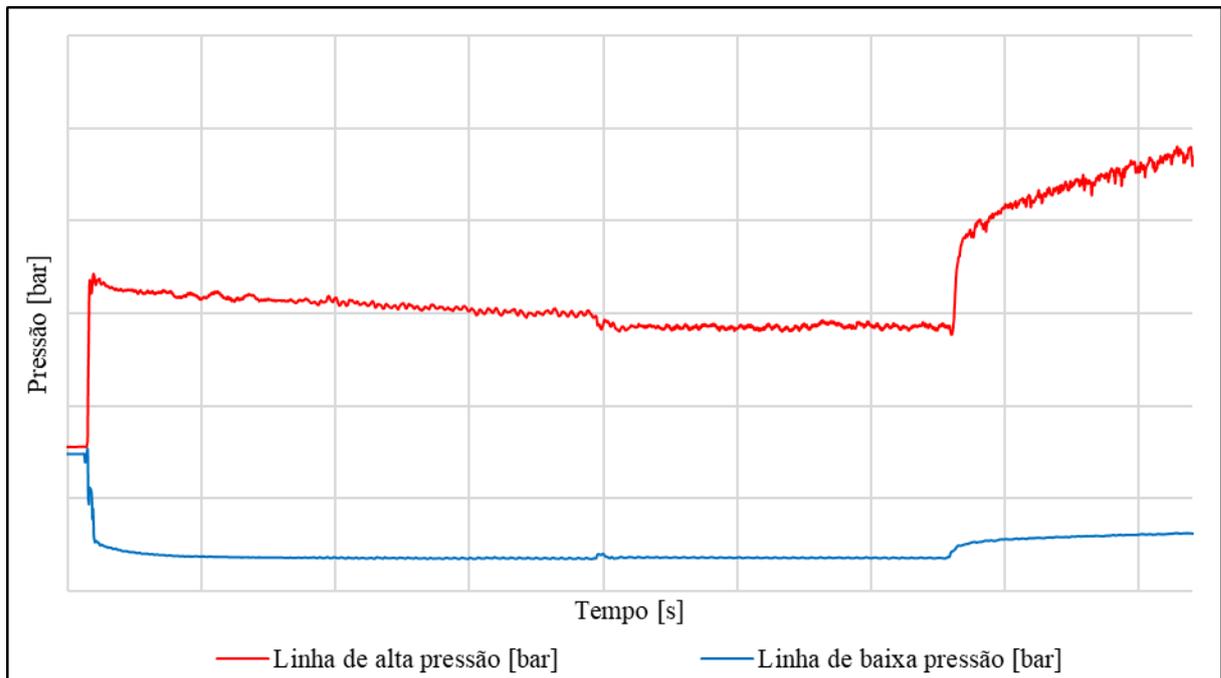
Figura 16 – Válvula de controle da variação do deslocamento



Fonte: DELPHI AUTOMOTIVE (2005)

Conforme citado anteriormente a informação da baixa pressão é extremamente importante para o compressor variável de controle interno, já que será a partir dela que a válvula aumentará ou diminuirá o deslocamento dos pistões afetando diretamente a performance de refrigeração da cabine. No gráfico 3 é possível identificar que na parte final da avaliação, onde o sistema demanda mais performance de refrigeração, temos um aumento da pressão na linha de baixa pressão ou linha de sucção, efeito da diminuição da velocidade do veículo, porém mantendo todas as condições ambientais definidas no começo da prova.

Gráfico 3 – Variação das pressões nas linhas de alta e baixa ao longo do ciclo com compressor variável



Fonte: Autor (2023)

Para o bom funcionamento da válvula essa pressão de trabalho na linha de sucção não deve superar os 3,5 bar e não deve ficar abaixo de 1,2 bar já que elas são os indicativos direto para o compressor que o sistema solicita mais ou menos performance. Esses limites de pressão são para proteção do sistema já que pressões muito acima de 3,5 bar na linha de sucção são indicativos de que o sistema mesmo na máxima performance não está conseguindo diminuir a temperatura do evaporador, e no caso contrário, quando temos pressões abaixo de 1,2 bar significa que o evaporador já atingiu temperaturas muito baixas podendo estar próximo ou abaixo da temperatura de congelamento. Nessa condição o compressor poderá ser desligado para proteção através da ECU para que evite a ida de fluido refrigerante em estado de mistura onde uma parte será líquida gerando um calço hidráulico no componente.

Na tabela 3 temos um resumo das temperaturas obtidas nos principais pontos da avaliação em câmara climática focando nas temperaturas médias dos difusores, média das cabeças dianteiras e cabeças traseiras. Temos também o cálculo de degradação em marcha lenta que consiste na diferença de temperatura dos difusores entre o final dos 65 minutos de avaliação e o final dos 50 minutos da mesma avaliação.

Tabela 3 – Temperaturas médias das cabeças e difusores em diferentes momentos de tempo sistema compressor variável

RESULTADO DE PERFORMANCE - COMPRESSOR VARIÁVEL CONTROLE INTERNO					
		5 min	30 min	50 min	65 min
Temperatura média de cabeça					
1ª fileira	[°C]	33,4	23,2	21,0	26,4
2ª fileira	[°C]	32,3	22,2	20,5	25,4
Tempratura média dos difusores					
1ª fileira	[°C]	11,6	7,3	6,8	15,6
2ª fileira	[°C]	-	-	-	-
Degradação do ar em marcha lenta					
R134a	[°C]	8,8			

Fonte: Autor (2023)

Vale lembrar que no caso do veículo estudado, por ser um veículo de produção em massa ele não possui difusores traseiros a fim de otimizar os custos de produção.

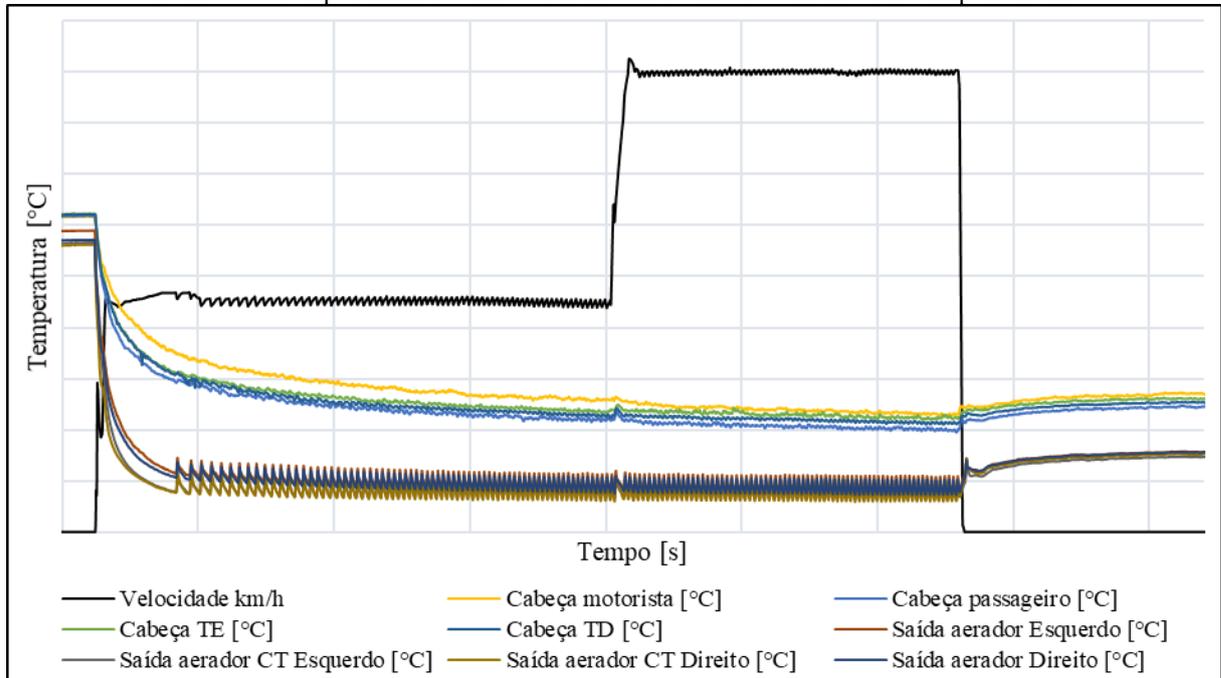
4.2 RESULTADO PERFORMANCE COMPRESSOR FIXO

É possível notar que em um sistema com compressor fixo tanto as temperaturas dos aeradores quanto a velocidade do carro oscilam, gerando uma imagem semelhante a “dentes de serrate” conforme o gráfico 4. Essa oscilação ocorre justamente nos momentos de desligamento e religamento do compressor fixo, pilotado pela sonda evaporadora, onde o rpm do motor e a temperatura do evaporador tendem a seguir esse comportamento que gera picos e vales ao longo de toda avaliação.

Essa estratégia visa principalmente a proteção do sistema contra o congelamento do evaporador já que o compressor fixo, conforme explicado anteriormente, trabalha de maneira binária e sempre em sua máxima capacidade, fazendo com que a temperatura do sistema tenha que ser controlada de maneira externa através do termostato do evaporador. É extremamente importante que a estratégia de corte e retorno esteja bem definida para que o compressor não seja desligado tardiamente, fazendo com que o evaporador trabalhe com temperaturas abaixo de 0°C podendo congelar o mesmo, ou que não seja desligado de maneira muito antecipada,

forçando o evaporador a trabalhar com temperaturas acima de 10°C gerando uma leve sensação de calor dentro da cabine aumentando o nível de insatisfação do usuário.

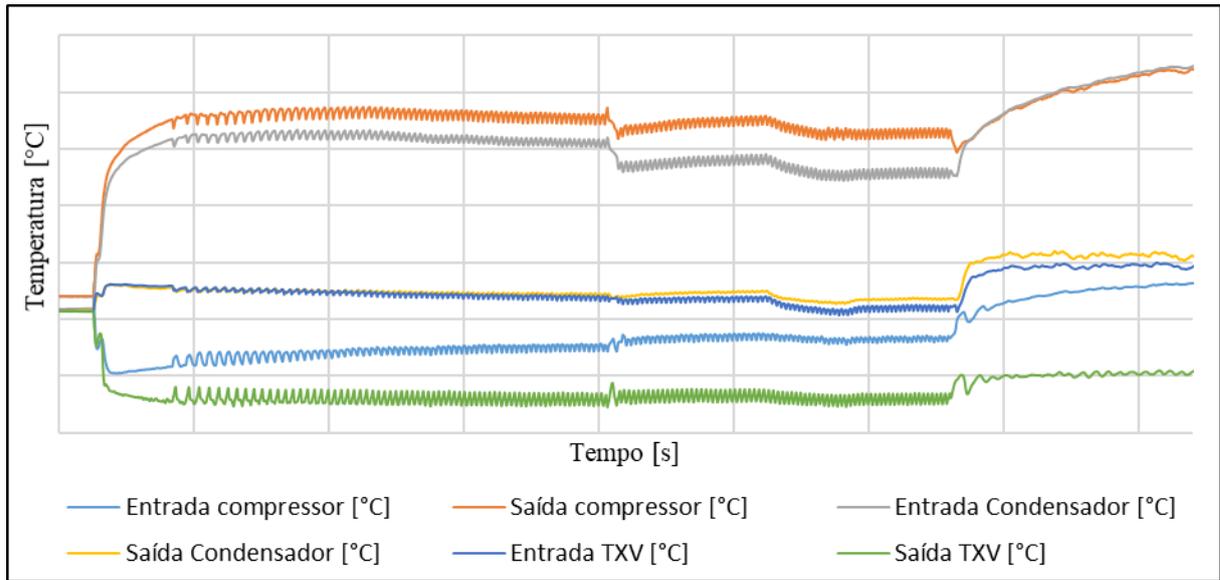
Gráfico 4 – Comportamento térmico durante todo ciclo do veículo com compressor fixo



A grande vantagem desse tipo de sistema é a agilidade em diminuir a temperatura dos difusores com relação a temperatura deles no início da avaliação. Por ser um componente que trabalha apenas em sua máxima performance, a reação é mais rápida comparado ao compressor variável de controle interno, que durante esse mesmo período já estará variando seu deslocamento evitando temperaturas muito baixas no evaporador.

Após os primeiros 5 minutos já é possível notar o comportamento característico do compressor fixo na temperatura dos difusores, na velocidade do veículo e na temperatura do sistema como um todo. Através do gráfico 5 podemos observar que não somente o compressor, mas todos os componentes oscilam de acordo com os cortes e retornos. Outro ponto importante é a temperatura de saída do compressor, que comparado ao compressor variável trabalha com temperaturas mais elevadas, enviando fluido refrigerante mais aquecido ao condensador, que por consequência, deverá trocar mais calor com o ambiente para que a temperatura do fluido esteja correta no momento que chegar na entrada da TXV.

Gráfico 5 – Comportamento térmico do sistema durante o ciclo com compressor fixo

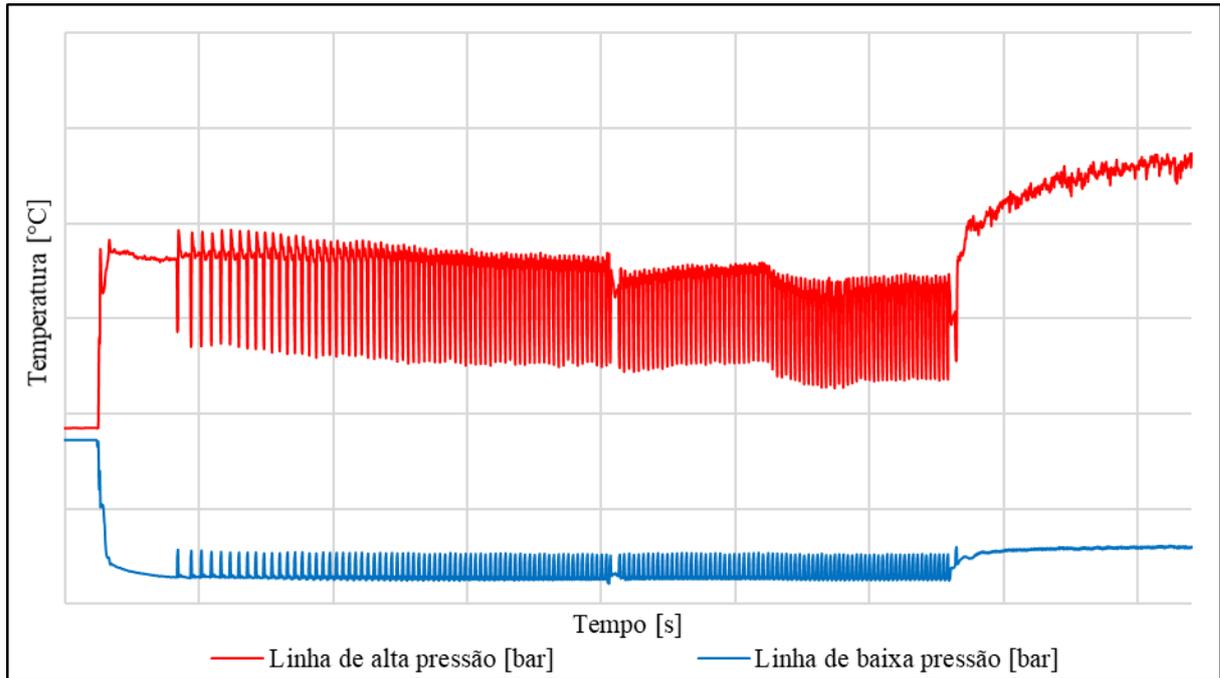


Fonte: Autor (2023)

Neste caso o tipo de válvula TXV aplicada é *Non-Cross Charged* que manterá o *superheating* constante em toda a operação. Esse tipo de válvula sempre estará associada a compressores de cilindrada fixa para que sempre tenha refrigerante no estado gasoso na linha de sucção, baixando assim a circulação de óleo em fluxos menores. Ao final da avaliação podemos identificar esse comportamento através da escalada de temperatura principalmente da saída do compressor, já que devido o veículo ter diminuído sua velocidade a zero e por consequência a rotação do motor, temos uma redução também no fluxo de óleo do sistema, consequência da redução também da rotação do compressor, aumentando sua temperatura de trabalho.

Com relação ao comportamento das pressões nas linhas de descarga e sucção, alta e baixa pressão respectivamente, fica mais evidente através do gráfico 6 as oscilações que podem chegar a um valor de 7 bar dependendo do tempo que o compressor retornará ao status *ON*.

Gráfico 6 – Variação das pressões nas linhas de alta e baixa ao longo do ciclo com compressor fixo



Fonte: Autor (2023)

Para o sistema com compressor fixo a variação da alta ou baixa pressão não é uma informação tão preciosa quanto para o compressor variável, tendo que somente se atentar a respeitar um valor máximo de 30 bar, podendo em alguns casos também trabalhar a 35 bar dependendo do pressostato aplicado. Neste caso em específico ambos os veículos foram aplicados do mesmo tipo e fornecedor de pressostato de 30 bar que é a pressão máxima que os dois sistemas resistirão sem avarias.

Através da tabela 4 obtivemos os valores de temperatura dos difusores, das cabeças dianteiras e traseiras nos principais instantes da avaliação, junto com o cálculo de degradação da temperatura do difusor entre a fase de marcha lenta e a fase de velocidade.

Tabela 4 – Temperaturas médias das cabeças e difusores em diferentes momentos de tempo sistema

RESULTADO DE PERFORMANCE - COMPRESSOR FIXO					
		5 min	30 min	50 min	65 min
Temperatura média de cabeça					
1ª fileira	[°C]	32,2	23,9	21,5	25,9
2ª fileira	[°C]	30,9	23,3	22,9	25,8
Tempratura média dos difusores					
1ª fileira	[°C]	9,5	8,3	7,9	15,4
2ª fileira	[°C]	-	-	-	-
Degradação do ar em marcha lenta					
R134a	[°C]	7,5			

Fonte: Autor (2023)

4.3 COMPARATIVO DAS PERFORMANCES

É possível notar na tabela 4 que na 1ª fase, no final dos 5 primeiros minutos de avaliação, o sistema que possui o compressor fixo aplicado obteve temperaturas mais baixas nos difusores, nas cabeças dianteiras e traseiras, isso se deve por conta da estratégia aplicada que faz com que o compressor fixo trabalhe na sua máxima eficiência enquanto o compressor variável de controle interno já começa a variar seu deslocamento para que tenha o melhor *trade-off* entre performance de refrigeração e outras performances do veículo como consumo por exemplo.

Tabela 5 – Comparativo dos resultados de performance dos dois compressores

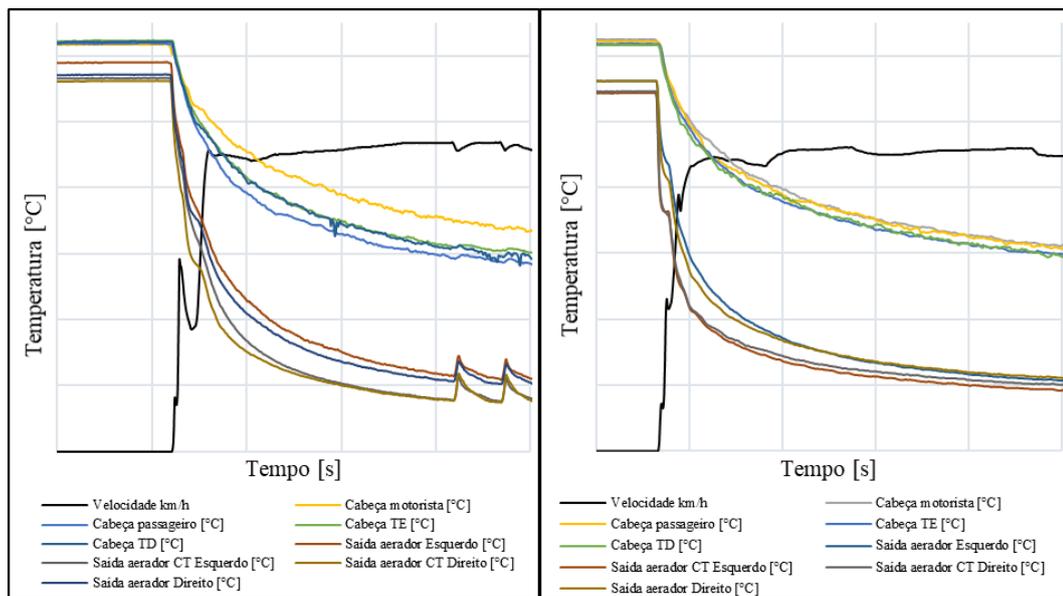
Comparativo de performance de refrigeração					
Fase da avaliação	Tempo (min)	Posição	Resultado compressor variável (°C)	Resultado compressor fixo (°C)	Diferença temperatura (°C)
1ª fase	5	Média difusores	11,6	9,5	+2,1
		Média cabeças dianteiras	33,4	32,2	+1,2
		Média cabeças traseiras	32,3	30,9	+1,4
2ª fase	30	Média difusores	7,3	8,3	-1,0
		Média cabeças dianteiras	23,2	23,9	-0,7
		Média cabeças traseiras	22,2	23,3	-1,1
3ª fase	20	Média difusores	6,8	7,9	-1,1
		Média cabeças dianteiras	21,0	21,5	-0,5
		Média cabeças traseiras	20,5	22,9	-2,4
4ª fase	15	Média difusores	15,6	15,4	+0,2
		Média cabeças dianteiras	26,4	25,9	+0,5
		Média cabeças traseiras	25,4	25,8	+0,4

Fonte: Autor (2023)

Dando um *zoom* nos cinco primeiros minutos da avaliação através do gráfico 7, podemos notar que o sistema com compressor fixo já possui duas oscilações, reflexo da proteção contra

congelamento, enquanto o compressor variável trabalha de maneira contínua alcançando mais rapidamente o equilíbrio térmico da cabine. É possível notar também que as curvas de temperatura de cabeça no sistema com compressor fixo, apesar de ter obtido valores de difusores mais baixas nesse instante comparado ao sistema com compressor variável, estão mais dispersas, logo mostra que o ambiente está menos homogêneo nesse caso.

Gráfico 7 – Comportamento térmico durante cinco primeiros minutos do ciclo do veículo com compressor variável de controle interno

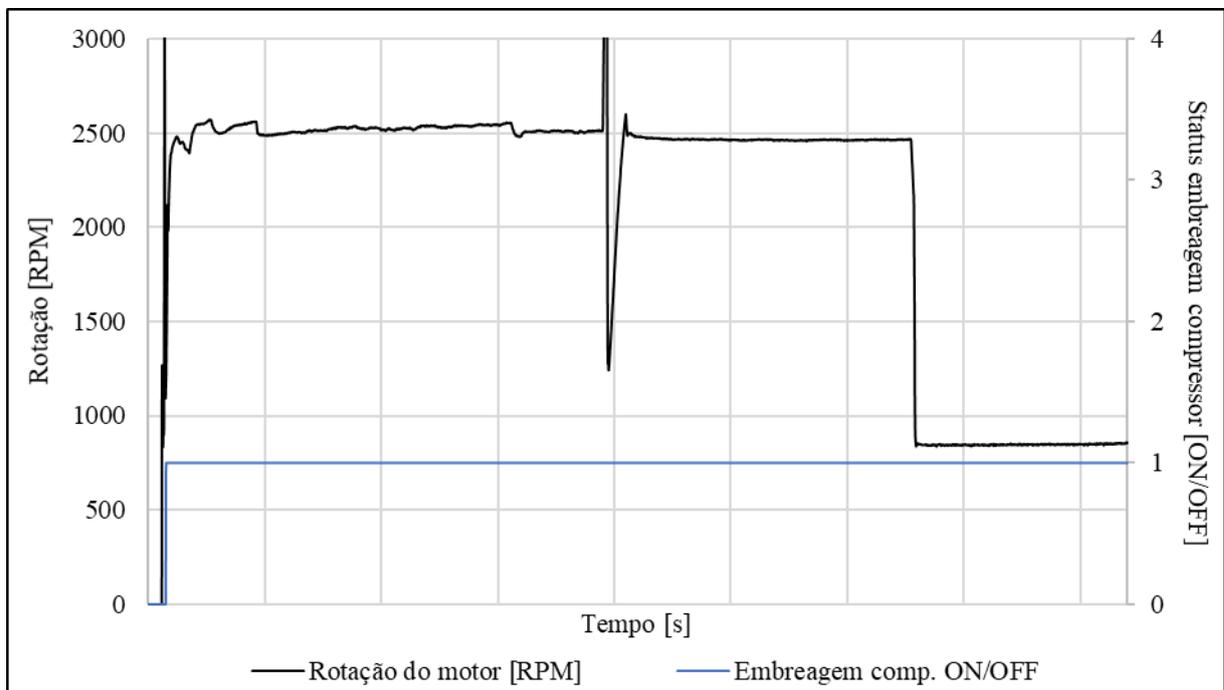


Fonte: Autor (2023)

Apesar do compressor fixo ter tido uma melhor performance no início da avaliação, ao longo da segunda e terceira etapa, onde o sistema já encontrou um certo equilíbrio, o conjunto que tem aplicado o compressor variável apresentou melhores resultados em todas as posições, indicando que não necessariamente o deslocamento máximo é sinônimo de eficiência máxima. Isso ocorre principalmente pelo fato dos inúmeros desligamentos e acionamentos da embreagem do compressor fixo para proteção do congelamento do sistema ao longo de todas as etapas, gerando picos e vales de temperatura que em alguns casos chega a ser perceptível pelo usuário. Já o sistema com compressor variável, neste momento trabalha com o deslocamento necessário para apenas manter a cabine refrigerada de acordo com os *inputs* que o usuário já selecionou juntamente com as condições ambientais como temperatura externa, umidade e radiação solar, evitando os cortes para proteção de congelamento do evaporador, mantendo um comportamento mais estável tanto do sistema de refrigeração como um todo quanto da rotação do motor durante o funcionamento do ar-condicionado.

No gráfico 8 é possível identificar as três faixas de rpm que compõem o ciclo de avaliação, temos no início um breve momento para estabilizar a velocidade do veículo e após esse instante temos o rpm praticamente constante, respeitando uma variação máxima aceitável, de acordo com o esperado para cada etapa. É notório também que o compressor se mantém acionado durante toda prova sempre estando com valor 1 desde o momento que o veículo liga já com o sistema de refrigeração acionado. Vale lembrar que a variável “Status embreagem compressor [ON/OFF]” funciona de maneira binária, sendo o valor 0 igual a compressor desligado e o valor 1 como compressor ligado.

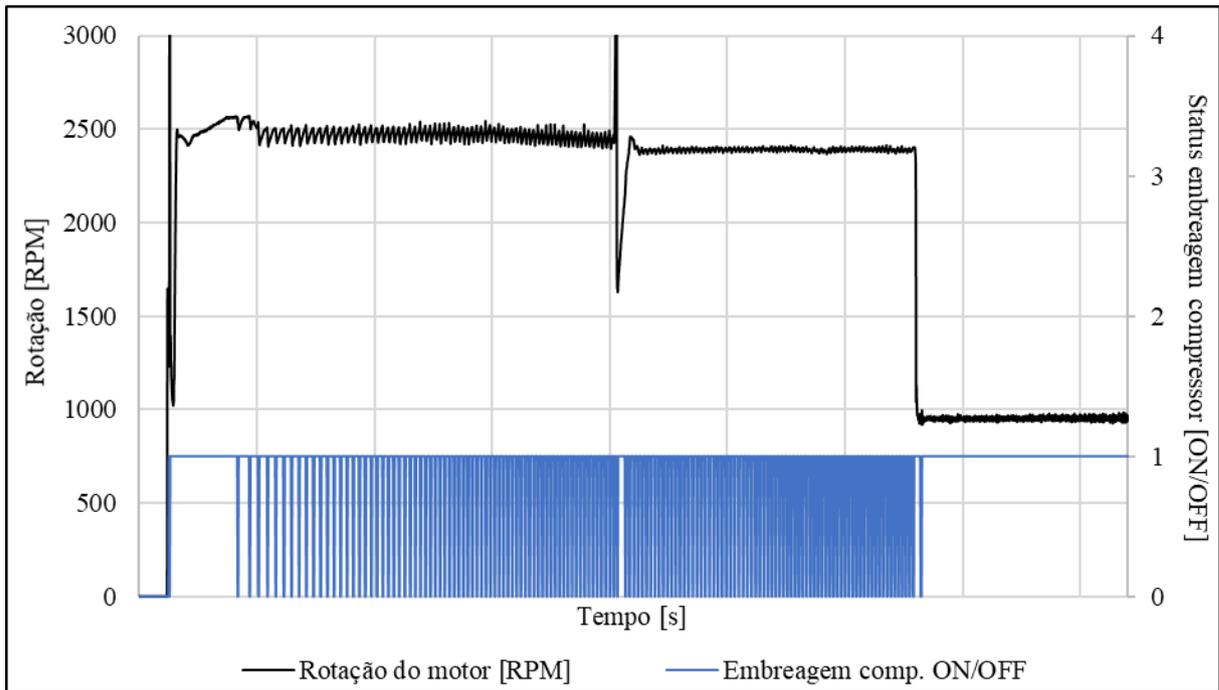
Gráfico 8 – Estabilidade do RPM com compressor variável controle interno



Fonte: Autor (2023)

Já no caso do compressor fixo fica evidente uma oscilação mais intensa da rotação do motor, podendo chegar em torno de 100 rpm entre um vale e um pico. É possível notar no gráfico 9 os inúmeros acionamentos e desligamentos do compressor que gera essa variação na rotação, podendo trazer alguns efeitos indesejados, visto isso, é necessário um tipo de calibração motor específica para que seja possível prever esse tipo de comportamento.

Gráfico 9 – Oscilação do RPM devido acionamento e desligamento do compressor fixo



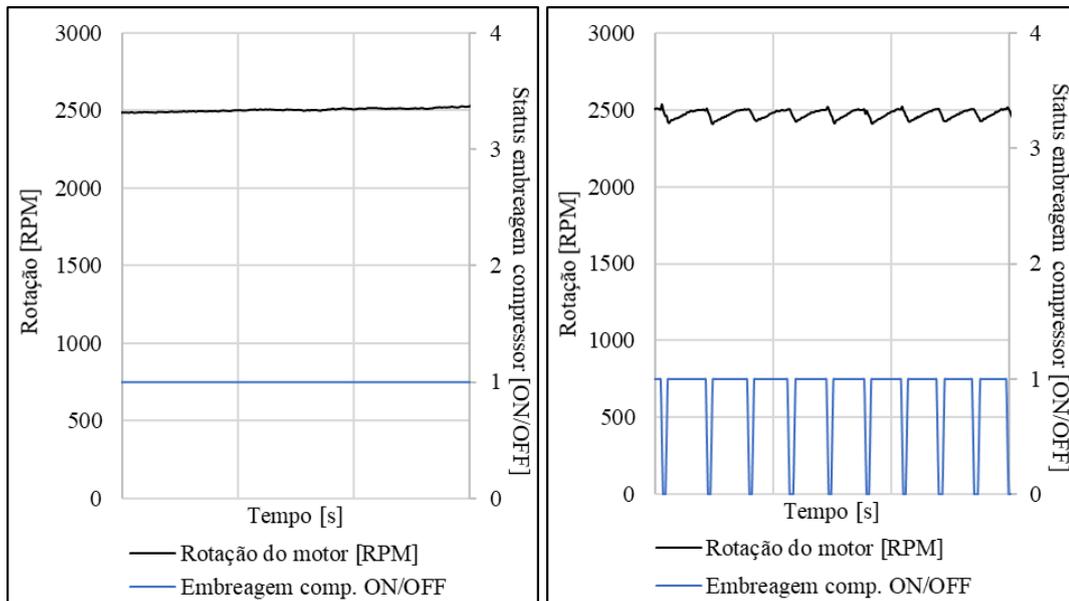
Fonte: Autor (2023)

Sem esse recurso para minimizar os efeitos colaterais do corte e retorno do compressor facilmente identificaríamos problemas em campo, como por exemplo o aumento considerável das reclamações de perda de potência, já que se o compressor retornar ao status 1 em um mesmo momento em que o usuário necessita realizar uma ultrapassagem ou sair da inércia o veículo não teria torque disponível suficiente levando a uma ideia de motor “fraco”.

Outra grande vantagem é que o sistema não terá que superar picos de temperatura devido o desligamento do compressor mantendo a temperatura agora da cabine estabilizada e possíveis aumentos de rpm não serão mais necessários fazendo com que o veículo consuma menos combustível nesse período.

Através do gráfico 10 é possível notar a oscilação do rpm em função do desligamento e religamento do compressor fixo, que ao contrário do compressor variável de controle interno mantém estabilizado o giro do motor nas diferentes fases da avaliação decorrente do constante acionamento da embreagem. O momento ilustrado ocorre logo após o período de estabilização, no início do teste, com uma duração de 5 minutos, e já é possível identificar 9 cortes com posteriores religamentos do compressor fixo e uma variação média de 70 rpm durante esses momentos.

Gráfico 10 – Comparativo da variação do rpm no sistema com compressor variável e fixo



Fonte: Autor (2023)

Alguns tipos de reclamação que podem surgir devido esse comportamento seriam de rpm instável e excesso de vibrações e ruídos, todas provenientes dos constantes desligamentos e acionamentos do compressor fixo, que neste caso, mesmo sendo do tipo *scroll*, conhecido por ser mais eficiente comparado a outros modelos de compressor fixo e por gerar menos carga no motor, seriam inevitáveis gerando altos níveis de insatisfação a ponto do consumidor considerar a compra de outro modelo ou de outro fabricante futuramente.

5. CONCLUSÃO

Antes considerado como opcional de luxo em automóveis, nos últimos 10 anos o sistema de climatização ganhou espaço e se tornou praticamente obrigatório em 100% de toda frota produzida. Junto com esse aumento é possível identificar vários avanços tecnológicos que vão desde o tipo de fluido aplicado até a modificação do conceito dos principais componentes a fim de aumentar sua eficiência energética, ponto fundamental nos dias atuais para redução principalmente do consumo de combustível.

O estudo comparativo entre a aplicação de compressores de deslocamento fixo do tipo “*scroll*” e compressores de deslocamento variável com controle interno, possibilitou ilustrar o comportamento do sistema e suas particularidades. Devido a diferença entre esses dois tipos de tecnologia é possível definir algumas estratégias para o veículo, sendo possível decidir qual componente que está mais alinhado com as diretrizes da empresa, seja ela a redução de custo daquele produto ou atingir a máxima performance do sistema no menor tempo possível.

Através de testes em câmara climática, onde é possível realizar os mesmos em condições estabilizadas com temperatura, radiação e umidade do ambiente controlada, fica evidente que a aplicação de compressores de deslocamento variável com controle interno permitem que o sistema tenha um comportamento mais linear quando comparado ao sistema que possui compressor fixo, em outras palavras isso quer dizer que ao longo de toda avaliação o primeiro teve uma maior eficiência no processo de refrigeração, reduzindo os impactos negativos do desligamento e religamento constante do compressor fixo, que trabalha sempre de maneira binária, a fim de evitar o processo de congelamento do evaporador, que caso ocorra, perderá completamente sua eficiência podendo inclusive gerar sérias avarias no sistema.

A variação do comportamento e por consequência das temperaturas ficaram evidentes em todo o sistema que acaba gerando um efeito cascata entre os componentes. A lógica é bem simples, aumentando a temperatura do fluido na entrada dos trocadores de calor ou compressor, a tendência é que aumente a temperatura de saída desse mesmo componente, e consequentemente impactará negativamente na temperatura de entrada do componente seguinte. Em caso de saturação dos trocadores de calor é possível que tenhamos falhas, externalizando ao usuário uma falta de performance ou aumentando o consumo para que o sistema consiga trocar mais calor, porém agora numa situação diferente estando mais aquecido do que anteriormente.

O compressor variável se mostrou mais eficaz mantendo o sistema estabilizado e alcançando temperaturas consideradas agradáveis pelo usuário. A falta de performance do sistema que é aplicado o compressor fixo poderá se manifestar diretamente através de temperaturas mais altas nas cabeças de todos os passageiros e nos difusores, gerando desde uma leve sensação de calor até uma sensação de que o ambiente está quente em casos extremos, isso acarretará no aumento do consumo significativamente. Reclamações do tipo falta de performance, variação anormal do rpm e excesso de vibrações poderão aparecer caso o sistema não esteja bem dimensionado e as estratégias aplicadas não estejam sendo eficazes devido a quantidade de desligamentos e acionamentos que a central do veículo deverá prever para o bom funcionamento do compressor de cilindrada fixa, diferente do sistema que aplica compressor variável de controle interno, permitindo que o sistema seja parcialmente autônomo exigindo máxima performance ou no caso exigindo seu máximo deslocamento somente em situações específicas que for demandada pelo usuário.

6. INDICAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho aqui apresentado deixa em aberto diversos possíveis estudos para otimização do ciclo de refrigeração, seja ele através da aplicação de outros conceitos de compressores, principalmente provenientes de veículos híbridos, ou estudos relacionados a ganhos envolvendo outros componentes do sistema de climatização como por exemplo evaporadores mais eficientes, novas tecnologias de condensadores e ganhos provenientes das tubulações que aplicam o IHX (*internal heat exchanger*), que por consequência também teriam impactos positivos tanto no tempo de convergência da temperatura na cabine quanto no consumo final de combustível do veículo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI/ASHRAE 55. Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, New York, 2004.

ASHRAE HANDBOOK: HVAC APPLICATIONS. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, 1999.

DELPHI AUTOMOTIVE SYSTEMS, COMFORT & CONVENIENCE. Disponível em: <<http://delphi.com/products/auto/confort>>. Acesso em: 01/09/2023.

FANGER, P. O. Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering, McGraw-Hill, New York, 245 p, 1972.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física - Gravitação, Ondas e Termodinâmica - Volume 2. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2023.

HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, Merlin. Energia e meio ambiente. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2014.

KAYNAKLI, O.; HORUZ, I. An experimental analysis of Automotive Air Conditioning System. International Community of Heat and Mass Transfer, Vol. 30, N.2, p. 273-284, 2003.

MORAN, M.; SHAPIRO, H. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 5. Ed. Hoboken: John Wiley & Sons inc, 2004, 874p.

MOURA, Marcelo Blanco Bolsonaro de. Aprimoramentos em sistema de climatização veicular para melhoria de condições ambientais de cabine e redução no consumo de combustível. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Acesso em: 2023-10-28.

TRIBESS, A. Conforto térmico em Veículos Automotivos. Apostila do curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva. São Paulo: EPUSP, 2004.

WIRZ, Dick. Refrigeração Comercial - Para técnicos em ar-condicionado - Tradução da 2ª edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2012.