

GABRIEL GOMES DE CASTRO

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS DISPOSITIVOS DE
CONTROLE TÉRMICO APLICADOS EM VEÍCULOS
ELÉTRICOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2021

GABRIEL GOMES DE CASTRO

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS DISPOSITIVOS DE CONTROLE
TÉRMICO APLICADOS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Heleno Pontes Antunes

UBERLÂNDIA - MG

2021

RESUMO

O crescente aumento de veículos movidos por meios de propulsão alternativos à combustão, na busca da redução global de emissões, traz consigo novos empecilhos não só para a indústria automotiva como para todo o setor energético. Um ponto relevante para a viabilidade completa de veículos elétricos é a adaptação dos sistemas de controle de temperatura, tanto da cabine quanto dos elementos de propulsão, pois são responsáveis por grande consumo energético, limitando ainda mais a restrição imposta pelas baterias. Além disso, no desenvolvimento global de veículos, os sistemas desenvolvidos muitas vezes perdem eficiência quando utilizados em climas mais quentes como o tropical brasileiro, isso é amplificado pela maior quantidade de pesquisas sobre a eficiência destes sistemas em baixas temperaturas, com trabalhos focados na Europa e China. Neste panorama, foi realizada uma revisão de bibliografia a fim de analisar o estado da arte sobre sistemas de ar condicionado, aquecimento e controle térmico de bateria, avaliando sua aplicabilidade nos diferentes tipos de veículos elétricos e comparando com os sistemas comerciais presentes nos veículos a combustão. Posteriormente foi realizada uma análise matemática destes sistemas, com base em formulações matemáticas e empíricas já presentes na literatura, assim como utilização do software EES para uma comparação quantitativa, nos sistemas mais complexos, apenas a análise qualitativa foi realizada. Nos resultados obtidos é possível observar que ainda há muito espaço para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes em relação ao que é utilizado atualmente, podendo melhorar desempenho, conforto e vida útil para veículos elétricos, além disso, alguns estudos complementares foram propostos para investigação futura.

Palavras – chave: Ar condicionado, refrigeração, veículo elétrico, aquecimento

ABSTRACT

The rising in vehicle propelled by non-combustible sources, in the search for reduced global emissions, brings hardships not only to the automotive industry and power sectors. Another relevant issue on the complete viability of electric vehicles is the adaptation of thermal control systems, both for the cabin as well as powertrain elements, since those are high energy consuming, limiting even more the restriction imposed by the battery resources. Additionally, with global vehicle development policies, the designed systems often lose efficiency when operating in hotter climates, such as Brazilian tropical climate, this is amplified by the amount of papers on the efficiency of these systems when in lower temperatures, with many studies focusing on Europe or China. In this scenario, a review was done to analyze the state on air conditioning, heating and battery temperature control, evaluating applicability in the different types of electric vehicles and comparing it to the standard system currently present in internal combustion vehicles. A mathematical analysis of those systems was done, with basis on mathematical and empirical formulations present in the literature, as well as using software EES for a quantitative comparison, for the more complex systems only a qualitative analysis was made. With the obtained results, it is possible to observe that there still is much to develop and improve current solutions, allowing for better comfort, efficiency and lifetime to electric vehicle, furthermore, additional studies were proposed for better understanding.

SUMÁRIO

Sumário

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II – VEÍCULOS DE PROPULSÃO ALTERNATIVA.....	5
CAPÍTULO III – SISTEMAS DE CONTROLE TÉRMICO VEICULAR	9
CAPÍTULO IV– ANÁLISE NUMÉRICA E MATEMÁTICA	19
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES.....	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29
ANEXOS	31

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Alguns pontos essenciais na escolha de um veículo são o conforto e economia, um item que está diretamente ligado com ambos estes critérios é o sistema de condicionamento de ar. Teve sua aplicação inicial como sistema de aquecimento do habitáculo para veículos de transporte de carga em regiões de clima severo, a competitividade e inovação do setor automotivo introduziu a aplicação de sistemas de climatização também nos veículos de passeio.

Congestionamentos crescentes, fazendo com que as pessoas passem cada vez mais tempo no interior de seus veículos, acompanhados de avanços tecnológicos causaram um grande aumento na popularidade do ar condicionado em veículos no Brasil. Segundo estudo de Daanen et. al, 2003, o conforto térmico proporcionado pelo sistema permite que o corpo humano se comporte melhor, com concentração e capacidade de reação melhoradas. Além disso, ao evitar o embaçamento dos vidros em dias frios ou chuvosos, o sistema de condicionamento de ar pode trazer ganhos à segurança dos passageiros. Os sistemas mais completos oferecem aquecimento, resfriamento, filtragem e desumidificação de ar, degelo e desembaçamento.

Atualmente o sistema de ar condicionado veicular comum funciona por meio do ciclo de compressão de vapor, operando através de um compressor acoplado ao motor de combustão interna, atuando como uma carga extra no trem de força do veículo. Existe então uma grande quantidade de emissões de gases poluentes e de efeito estufa gerados pelo uso do sistema de condicionamento do ar em um veículo a combustão.

Tanto a indústria automotiva quanto de refrigeração tem o comprometimento de reduzir os efeitos ambientais expressos principalmente através das diretivas Nações Unidas Euro VI para emissões e veiculares e o protocolo de Montreal para eliminação de fluidos refrigerantes nocivos ao meio-ambiente. No Brasil estes programas são expressos pelo PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) e do PBH (Programa Brasileiro de Eliminação de HFCs).

Neste panorama, empresas investem cada vez mais em veículos elétricos e tecnologias alternativas na busca de eliminar a dependência dos combustíveis fósseis. Surge então a responsabilidade de adaptar sistemas de refrigeração embarcados aos novos meios

de propulsão, pois a utilização destes sistemas pode reduzir em até 40% o alcance em uma carga do veículo, dificultando a aplicação em longas viagens ou utilização contínua de ônibus urbanos.

Os veículos pesados equipados de sistemas dedicados de refrigeração, como ônibus rodoviários e caminhões de transporte de congelados são fontes significativas de poluentes, dado que estes possuem motores de combustão ciclo Diesel utilizados unicamente para fornecer potência ao compressor do sistema. O alto custo das baterias de lítio e a necessidade de cruzar longas distâncias traz uma complexidade ainda maior na eletrificação destes sistemas, no entanto outras soluções estão disponíveis, como as células de combustível a hidrogênio ou combustíveis renováveis, a exemplo do HVO. Trabalhos existentes, como o de Hames, 2018, fazem análise energética de veículos limpos de emissões e ignoram o funcionamento do ar condicionado.

Outro problema a ser solucionado é que veículos a combustão têm a sua disposição o calor excedente do motor que pode ser utilizado na aplicação de aquecedor, o calor gerado por motores e baterias elétricos é muito inferior, inviabilizando esta opção. Assim, torna-se necessário encontrar uma solução que opere de forma eficiente em aplicações tanto de refrigeração quanto de aquecimento.

Além disso, a grande maioria dos estudos de desempenho de sistemas térmicos em veículos elétricos se encontra em trabalhos europeus e chineses, sendo assim não avaliam em profundidade o funcionamento em temperaturas tropicais, existindo espaço para melhorias neste âmbito.

O presente trabalho apresentará uma introdução teórica sobre ciclos termodinâmicos de refrigeração, analisará os sistemas de uso comercial e suas alternativas, então estudará sua compatibilidade com os diferentes tipos de propulsão alternativa. Espera-se elencar tecnologias sugeridas e tópicos a serem estudados para aplicação efetiva de veículos elétricos no Brasil.

1.1 Objetivos

O estudo será conduzido em diferentes partes, analisando primeiramente a referência bibliográfica sobre as atuais tecnologias de eletrificação veicular, suas diferenças e peculiaridades a fim de entender as origens da necessidade de adaptação dos sistemas.

Em seguida, será feita uma análise sobre os diferentes sistemas de condicionamento térmico, iniciando pelo sistema tradicionalmente aplicado em veículos a combustão interna e utilizando como parâmetro de comparação. Adicionalmente, sistemas já aplicados em veículos elétricos serão analisados, assim como tecnologias para controle de temperatura do conjunto bateria além do habitáculo.

Para obtenção de dados comparativos de gasto energético e funcionamento em diferentes condições de operação, o aplicativo Engineering Equation Solver (EES) será utilizado, em conjunto com modelos matemáticos e empíricos encontrados na literatura.

CAPÍTULO II

VEÍCULOS DE PROPULSÃO ALTERNATIVA

Lukic et. al classificaram o nível de eletrificação de veículos híbridos através do fator de hibridização, valor que é nulo quando se trata de um veículo a combustão interna tradicional e tem valor unitário para veículos puramente elétricos. Pode ser calculado de acordo com a equação 1:

$$HF = \frac{P_{el}}{(P_{el} + P_{comb})} \quad (1)$$

Diferentes tecnologias de hibridização se adequam a faixas distintas de fator de hibridização, Lukic et. al definiram ainda o conceito de conexões em série ou paralelo dos sistemas de potência elétrico e mecânico. Sendo um sistema em paralelo aquele que pode ativar tanto por meios de energia mecânica quanto elétrica o trem de força do veículo. Em contrapartida, um sistema em série utiliza um motor a combustão para alimentar uma bateria que acionará um motor elétrico. Os principais sistemas aplicados atualmente em veículos híbridos fogem a esta classificação pois podem atuar de forma ora em série, ora em paralelo.

Segundo Hannan et. al., uma das principais dificuldades de implementação dos veículos elétricos é balancear densidade de energia [J/kg] e densidade de potência [W/kg], características que possuem grande variação entre diferentes equipamentos, como baterias, capacitores, discos de inércia e células de combustível. Este equilíbrio se torna ainda mais difícil ao se considerar problemas a nível de usuário, como dificuldade ou demora na recarga e custo do veículo.

2.1 MHEV - Veículos levemente híbridos (Mild Hybrid Electric Vehicle)

São assim designados os veículos com fator de hibridização inferior a 25%, empregam motores elétricos com potências de 7 a 12kW (Tie, 2013) que atuam junto do motor principal a combustão. No entanto, o motor elétrico por si só não é suficiente para propulsionar o veículo e isto é considerado na estrutura do trem de força.

Como explicado por Zeng (2018), o sistema elétrico regenerativo empregado nestes veículos acumula energia quando o veículo perde velocidade e/ou freia e permite controle inteligente dessa energia, como em ciclos urbanos altamente transientes e funções como o

start/stop. Este sistema possibilita uma redução do motor a combustão interna empregado no veículo e o melhor controle da energia elétrica gera ganhos significativos de eficiência total do sistema, reduzindo níveis de consumo e emissões. Além disso, a tecnologia é de fácil implementação e vem atuando como ponto de transição de várias montadoras.

2.2 PHEV – Veículo elétrico plug-in (Plug-in hybrid electric vehicle)

Os veículos híbridos do tipo plug-in são assim chamados pois funcionam com um motor a combustão que atua em paralelo com um motor elétrico alimentado por bateria, que é recarregada por meio de tomadas e estações de recarga. Neste caso o veículo pode atuar em modo puramente elétrico por curtas distâncias, possibilitando uso cotidiano sem consumo de combustíveis fósseis.

A recarga de combustível é necessária somente para funcionamento pleno e a longas distâncias, assim como nos MHEVs emprega sistemas regenerativos na frenagem e ponto neutro.

Comparativamente aos veículos de menor fator de hibridização, este já possui uma bateria de maior tamanho, adicionando o custo e gerando a necessidade de controle térmico desta, que deve permanecer na faixa de 25 a 30°C (Krüger, 2012) para evitar envelhecimento precoce e perda de capacidade.

Diferentes sistemas térmicos são propostos para realizar controle simultâneo da temperatura ambiente do veículo e da bateria, em decorrência disso, em situações de altas temperaturas alguns sistemas necessitam ser ativados mesmo sem intenção do usuário. O equipamento de controle de temperatura deve prever estas situações e funcionar de acordo, diferentes sistemas serão avaliados e comparados posteriormente

2.3 FEV – Veículos Puramente Elétricos (Full electric vehicle)

Veículo que já não utilizam combustíveis fósseis, contando apenas com motores elétricos para sua propulsão são denominados elétricos puros, no mercado são representados principalmente por duas frentes: aqueles que armazenam a energia em baterias elétricas e aqueles que possuem um combustível limpo para geração de energia elétrica através de uma célula de combustível.

2.4 BEV – Veículos Elétricos a Bateria (Battery Electric Vehicle)

Representando o tipo padrão de veículos elétricos, utiliza uma bateria como meio principal de armazenamento de energia, e diferentemente do PHEV abandona o motor a

combustão, tendo utilização exclusivamente a partir de um motor elétrico. Esta mudança requer diversas adaptações dos sistemas não só do veículo, mas também da rede energética, que deve prever cargas para velocidades de carregamento satisfatórias e fornecimento suficiente, que é amenizado pois os veículos são em maior parte recarregados durante a noite, fora dos horários de pico.

Por parte do veículo preocupações recorrentes são em relação ao tipo de bateria, que deve possuir longevidade, condições de funcionamento compatíveis com a do veículo, boa densidade de carga [kWh/kg] e boa densidade de potência [kW/kg]. A solução aplicada atualmente são as baterias do tipo íon-lítio que além de excelentes características técnicas não empregam metais ou outras substâncias tóxicas, por outro lado tem elevado custo de produção.

Para garantir um melhor desempenho do veículo, adotam-se meios auxiliares de armazenamento de energia nestes veículos, como ultracapacitores ou discos de inércia. Estes dispositivos armazenam energia regenerada dos veículos ou da bateria para auxiliar em situações em que se faz necessária uma maior potência no veículo, como partidas, ultrapassagens e acclives. Ultracapacitores são dispositivos de armazenamento de energia que trazem altíssimas densidades de potência com energia total muito inferior à das baterias, segundo Tie, 2003 operam em todas as faixas de temperatura e sem necessidade de manutenção, já os discos de inércia são dispositivos mecânicos capazes de armazenar a energia restaurada dos freios com até o dobro de eficiência que na conversão em eletricidade.

Baterias de íon lítio operam em uma faixa de temperatura muito próxima a do conforto térmico humano, entre 15 a 30°C e por isso requerem dispositivos de arrefecimento ou aquecimento. De acordo com Xia et. al. (2017) modelar matematicamente a geração de calor que ocorre nas células da bateria é uma tarefa muito complexa, que deve levar em consideração diversos fatores como carga atual, demanda de potência, desgaste, aquecimentos localizados e formato das células, que varia muito entre os modelos de veículo, visto que uma estratégia comum é distribuir a bateria ao longo do assoalho do veículo.

2.5 FCEV - Veículo elétrico a célula de combustível (fuel cell electric vehicle)

São assim chamados os veículos que empregam uma célula de combustível como sistema principal de energia, geralmente acompanhados de uma bateria e capacitores auxiliares. A célula é composta por dois eletrodos de difusão gasosa com um material eletrolítico em seu meio, o sistema utiliza de um combustível gasoso em contato com o ânodo, enquanto oxigênio flui junto ao eletrodo oposto, causando uma reação de oxidação do combustível chamada de combustão eletroquímica que fornece uma corrente contínua de energia elétrica.

O principal combustível empregado nesta aplicação é o hidrogênio, que em seu processo de combustão libera apenas água como subproduto, sem emissão dos óxidos de carbono que ocorre na utilização de hidrocarbonetos. A reação do hidrogênio e um esquema do sistema podem ser observados na figura 1.

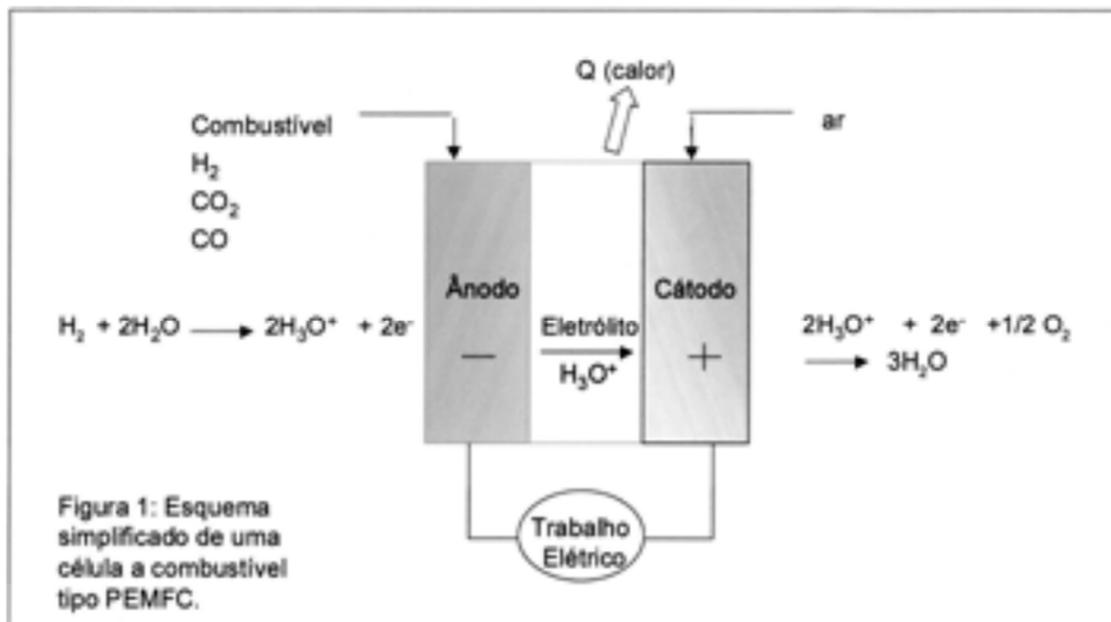


Figura 1 - Esquema de funcionamento da célula de energia, adaptado de Linardi(1999)

Conforme descrito por Hoffman o hidrogênio é um combustível limpo que pode ser obtido pelo processo de eletrólise da água, desde que a energia elétrica utilizada neste processo seja de uma fonte limpa. Ainda, descreve vantagens do hidrogênio como capacidade de transporte de energia indefinidamente, sem perdas tão significativas como nas redes elétricas e pode ser facilmente injetado em veículos assim como combustíveis fósseis.

CAPÍTULO III

SISTEMAS DE CONTROLE TÉRMICO VEICULAR

3.1 O ciclo de refrigeração por compressão de vapor

Assim como vários outros sistemas térmicos, o ciclo de refrigeração tem suas bases no ciclo térmico de Carnot, representado na Figura 2 e que pode ser descrito em quatro etapas principais:

- Compressão adiabática reversível: inicialmente o fluido de trabalho em estado de alto título e temperatura T_L passa por um processo de compressão adiabática, isto é, que não troca calor até um estado de alta pressão na temperatura de alta do ciclo T_h .
- Expansão isotérmica reversível: em um trocador de calor com uma fonte de temperatura superior a T_h , o gás ou mistura de alto título proveniente da etapa anterior se resfria isotermicamente, ou seja, troca apenas calor latente enquanto se condensa.
- Expansão adiabática reversível: em seguida, através de uma turbina adiabática, o fluido é resfriado à temperatura T_L . Nesse processo o fluido adquire um estado de baixa pressão e baixo título enquanto gera trabalho no eixo da turbina.
- Compressão isotérmica reversível: em um evaporador que troca calor com uma fonte fria à T_L , a mistura do ciclo se evapora de forma isotérmica até o estado inicial do ciclo.

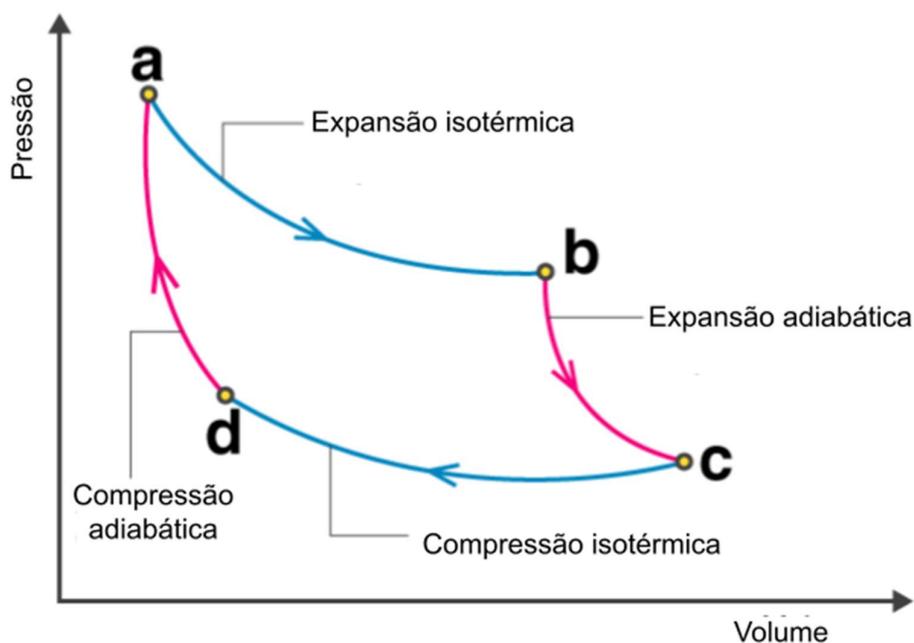


Figura 2. Diagrama Pressão x Volume do Ciclo de Carnot

Devido a suas inúmeras hipóteses de irreversibilidade, o ciclo de Carnot não é aplicável na realidade, além disso outros problemas enfrentados em uma aplicação real são a necessidade de comprimir uma mistura líquido-gasosa e as temperaturas finitas das fontes térmicas. Outro problema derivado das irreversibilidades no ciclo é a baixa eficiência real da turbina, que na maioria das aplicações comerciais de refrigeração gera um trabalho quase nulo.

O golpe de líquido no compressor pode ser evitado com a introdução de um superaquecimento no evaporador, garantido estado de vapor saturado ao início do processo de compressão, naturalmente esta solução inviabiliza uma troca de calor isotérmica. A turbina é substituída por um dispositivo de expansão que não gera trabalho e mantém a entalpia constante, por consequência o fluido adentra o evaporador em um estado de maior energia permitindo que mais calor seja trocado, o que aumenta o potencial de refrigeração.

Estas adaptações formam o ciclo de refrigeração por compressão de vapor, que tem seu diagrama de energia representado na figura 3 a seguir. Diferente do ciclo tradicional de Carnot que é regido por duas linhas de temperatura distintas, neste caso tem-se as linhas de alta e baixa pressão.

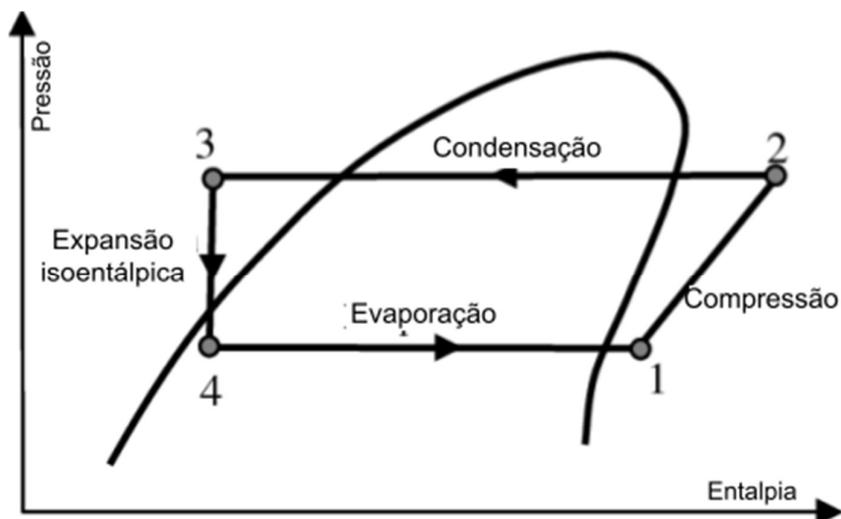


Figura 3. Diagrama pressão x entalpia do ciclo de vapor aplicado em refrigeração

3.2 Sistemas por compressão de vapor comerciais

O sistema de ar condicionado mais comum em veículos a combustão interna é o ciclo de compressão de vapor para a refrigeração, adicionado de um circuito auxiliar destinado ao aquecimento da cabine, como representado na figura 4. A potência destes sistemas é proveniente do motor a combustão, que através de acionamento por correias, fornece o trabalho necessário ao compressor, gerando uma relação entre a potência destes componentes.

O ciclo de refrigeração é composto pelo compressor acoplado à unidade de potência do veículo onde o fluido refrigerante é comprimido e então levado a um condensador, localizado na parte frontal do veículo junto ao radiador. O fluido resfriado passa então por um dispositivo de expansão, tipicamente uma válvula eletrônica de expansão, responsável por baixar a pressão da linha e conseqüentemente a temperatura do fluido, que entra no evaporador localizado no sistema de ventilação da cabine, reduzindo a temperatura interior do veículo enquanto evapora e retorna ao compressor.

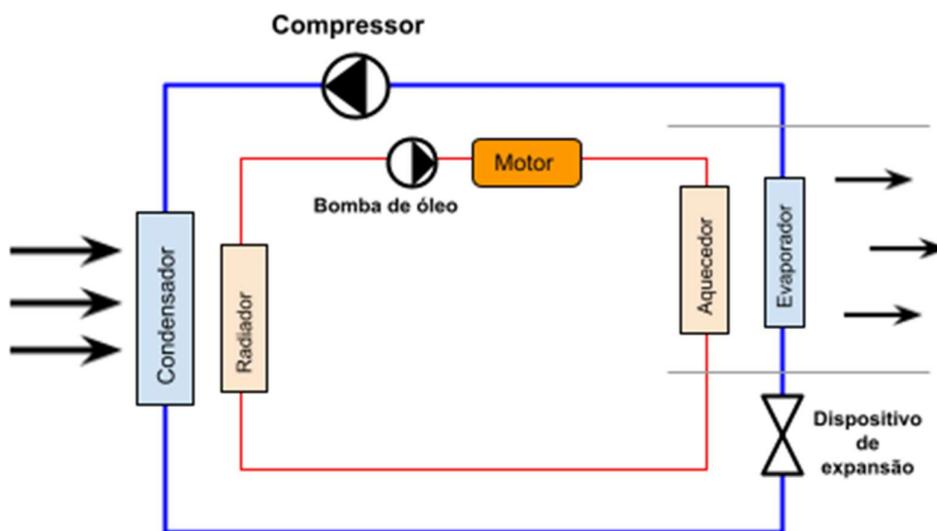


Figura 4. Desenho esquemático do sistema de controle térmico aplicado em veículos comerciais

Na aplicação de aquecedor o sistema aproveita a energia térmica residual do motor, isto é, a porção da energia que não é transformada em trabalho mecânico e se dissipa como calor durante a combustão, a maior parte desta energia é liberada através dos sistemas de exaustão e de arrefecimento através do radiador. Quando o aquecimento é acionado, o ciclo de arrefecimento se altera e antes de se resfriar no radiador, o fluido de arrefecimento em alta temperatura proveniente do motor em funcionamento passa por um trocador de calor localizado no sistema de ventilação. Deste modo é possível aquecer a cabine sem cargas adicionais ao motor. Alguns veículos modernos possuem tamanha eficiência que esta energia não é o suficiente para a aplicação em climas mais frios, nestes casos utilizam-se aquecedores elétricos adicionais.

Por se tratar do sistema mais difundido atualmente, é esperado certa tendência do mercado em continuar com esta tecnologia com a migração para veículos elétricos, as principais diferenças da aplicação deste sistema em um VE são a possibilidade de operar o compressor independentemente da velocidade de rotação do motor, permitindo maior controle principalmente quando em marcha lenta e altas velocidades, mas em contrapartida o calor gerado nos motores e baterias é insuficiente para atuar como aquecedor do habitáculo, sendo necessário a utilização de aquecedores elétricos.

O desempenho de um ciclo de refrigeração ou aquecimento pode ser mensurado pelo coeficiente de performance (COP), que é calculado segundo a equação 2, é a razão da energia térmica útil movimentada e a energia fornecida para o compressor.

$$COP = \frac{Q_{util}}{W_{comp}} \quad (2)$$

3.2.1 Compressor

Componente motor do ciclo de refrigeração tradicional, responsável pela execução de trabalho no sistema, que através de sequenciais transformações termodinâmicas possibilitará a movimentação de energia térmica forçada de um meio frio para um meio quente. Tradicionalmente, utilizam-se compressores alternativos herméticos, porém alguns veículos modernos possuem compressores do tipo Scroll, compactos e menos ruidosos.

Em aplicações veiculares o compressor é acionado por meio de uma correia acoplada ao motor, a função liga/desliga é comandada por meio de uma embreagem eletromagnética, que quando acionada conecta o eixo do compressor a polia e inicia a transmissão de energia.

Este tipo de acionamento traz um sério problema do ponto de vista de eficiência energética: a velocidade do compressor, e por consequência o desempenho do sistema de refrigeração, é dependente da velocidade do motor e do veículo, fazendo com que muitas vezes o sistema de ar condicionado trabalhe de em um nível subótimo.

Experimentos, como os descritos por Kainkl e Horuz(2003) mostram que o consumo do compressor varia de 1 a 2 kW conforme operação do veículo, porém o coeficiente de performance do sistema diminui com o aumento desta potência.

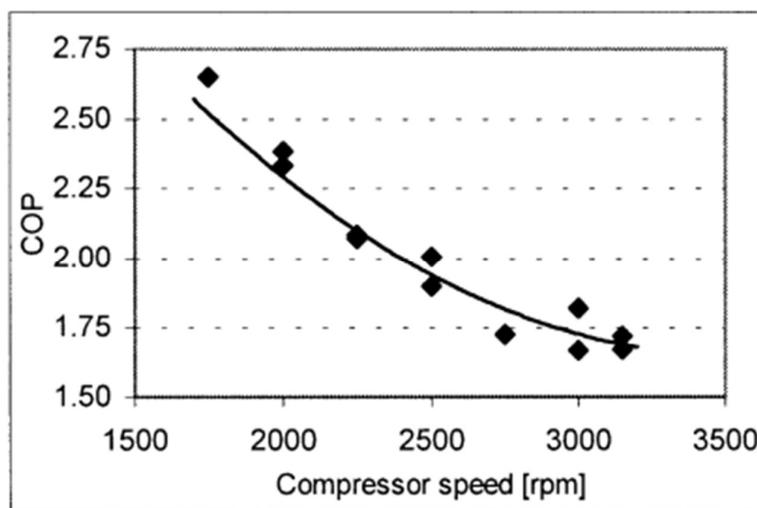


Figura 5. Relação de COP com velocidade de rotação do compressor na análise experimental de Kainkl e Horuz, 2003.

Nos veículos de propulsão elétrica, o controle de velocidade do compressor é feito separadamente do motor principal, por meio de inversores de frequência, o que possibilita um melhor ajuste com relação a carga térmica do sistema.

3.2.2 Condensador

Condensador é o nome dado ao trocador de calor em que o fluido superaquecido troca calor com o meio externo até a condição de líquido subresfriado. O modelo mais comum é o tipo tubos aletados em alumínio. Para melhorar a capacidade de troca do equipamento, é posicionado na parte frontal do veículo, entre a grade dianteira e outro trocador de calor utilizado para resfriamento de óleo do motor.

3.2.3 Dispositivo de expansão

Como o objetivo principal do sistema é o transporte de energia térmica do interior do veículo para seu exterior, e pelas temperaturas de operação do sistema, não existe vantagem na inclusão de uma turbina no sistema. Os dispositivos de expansão utilizados comercialmente são válvulas de expansão termostáticas ou válvulas de expansão eletrônicas, que permitem a expansão quase isentalpica do fluido refrigerante e regulam a operação do sistema por meio de sensores posicionados na saída do evaporador.

3.2.4 Evaporador

Dispositivo em que o fluido refrigerante troca calor com o ambiente interno e evapora ao absorver energia, voltando ao estado inicial de entrada no compressor. Na aplicação veicular é comum a utilização de trocadores de placa que resfriam ar insuflado forçadamente para o interior do veículo.

Alguns veículos elétricos ou híbridos empregam outro evaporador, e outro dispositivo de expansão, com aplicação dedicada ao resfriamento da bateria. Alguns projetos de bateria, devido a sua ampla área de contato, tornam viável a instalação de resfriadores evaporativos.

3.3 Sistemas de refrigeração alternativos

Fica evidente que este sistema foi desenvolvido ao longo de anos e aprimorado para melhor funcionamento e custo junto de um motor a combustão interna, dadas as diferenças com os veículos híbridos e elétricos, é de se esperar que existam soluções mais adequadas às necessidades de controle de temperatura destes veículos. É de nosso interesse estudar e

comparar estas tecnologias na busca daquela que melhor se adequa às características do mercado brasileiro.

Soluções já aplicadas no mercado mantêm o ciclo de refrigeração semelhante ao utilizado nos carros movidos a combustíveis fósseis enquanto substituem o calor do motor por aquecedores elétricos. Aplicações mais recentes incluem sistemas mais complexos capazes de operar tanto quanto ar condicionado quanto bombas de calor.

Outro ponto de atenção é o controle térmico da bateria, Bufalo et. al. compararam desde sistemas básicos como o resfriamento a ar a sistemas robustos de resfriamento líquido combinado com o sistema de ar condicionado.

3.3.1 Compressão de vapor com aquecimento elétrico

Ao se considerar a perda da energia térmica excedente disponibilizada pelo motor é preciso encontrar uma nova fonte de energia para suprir a demanda de aquecimento. Dada a facilidade de utilização da energia elétrica uma possível solução é a utilização de resistores de coeficiente de temperatura positivo (PTC).

O sistema proposto por Umezu e Noyama, aplicado ao veículo puramente elétrico Mitsubishi i-MiEV, utiliza um compressor elétrico e um ciclo de compressão de vapor tradicional para resfriamento e mantém um ciclo de líquido de arrefecimento que é aquecido por um grupo de aquecedores PTC e então troca calor com o ar ventilado na cabine. Os resultados mostram que a aplicação como ar condicionado possui melhor desempenho que a versão a combustão do mesmo veículo, porém a utilização como aquecedor é altamente demandante do ponto de vista energético e pode reduzir o alcance de dirigibilidade em até 50%.

Segundo Zhang et al. (2017) a viabilidade do sistema é dependente do clima local e das características e hábitos de utilização local, tornando-se viável em cidades que apresentam clima quente e trajetos reduzidos.

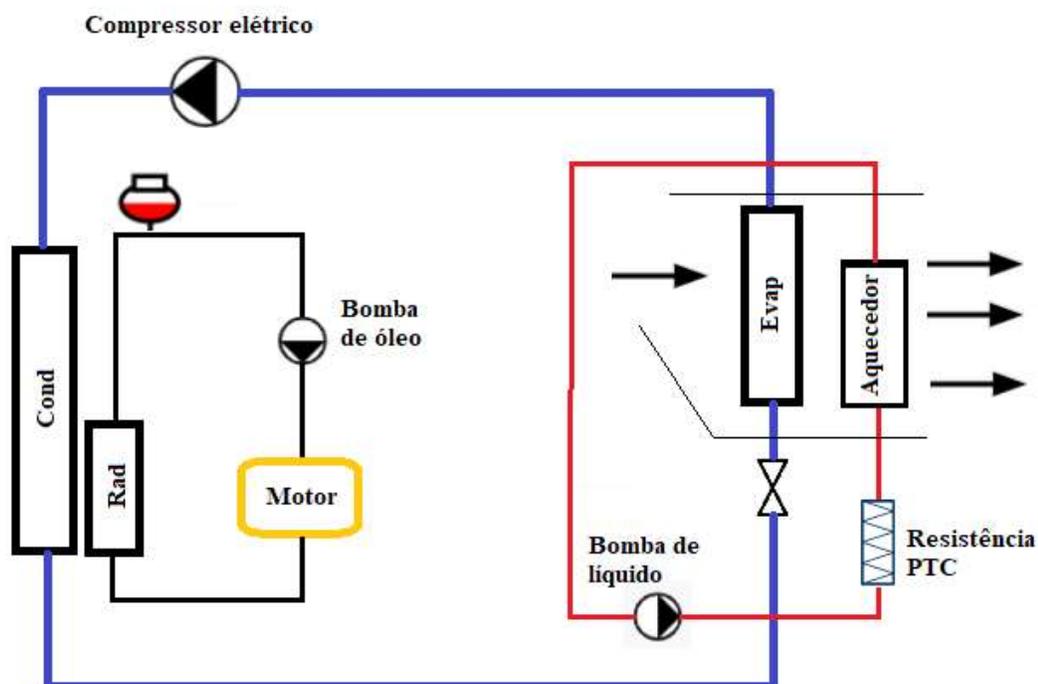


Figura 6 - Sistema proposto por Umezu e Noyama. (adaptado)

3.3.2 Sistema de compressão de vapor reversível

O sistema de controle térmico veicular por compressão de vapor reversível é um sistema que com o emprego de válvulas multi direcionais permite a utilização do mesmo sistema para realizar ciclos térmicos de refrigeração e aquecimento, ou seja, pode funcionar como ar condicionado ou bomba de calor. Pelas características do sistema, que se beneficia das irreversibilidades presentes no processo de compressão bombas de calor possuem COP superior a 1.0.

Vários modelos deste sistema foram propostos e aplicados, com diversos níveis de complexidade, desde o mais simples com uma válvula de 4 vias que inverte a direção do fluxo e a função dos trocadores de calor, a sistemas com 4 trocadores específicos, até sistemas com linhas de pressão intermediária.

Adicionalmente este sistema pode empregar linhas auxiliares para controle térmico direto ou indireto da temperatura da bateria. Em contrapartida este ciclo tem dificuldades em executar as funções de desembaçamento dos vidros e desumidificação do ar, para melhor desempenho ainda é possível suplementar o aquecimento com resistências PTC.

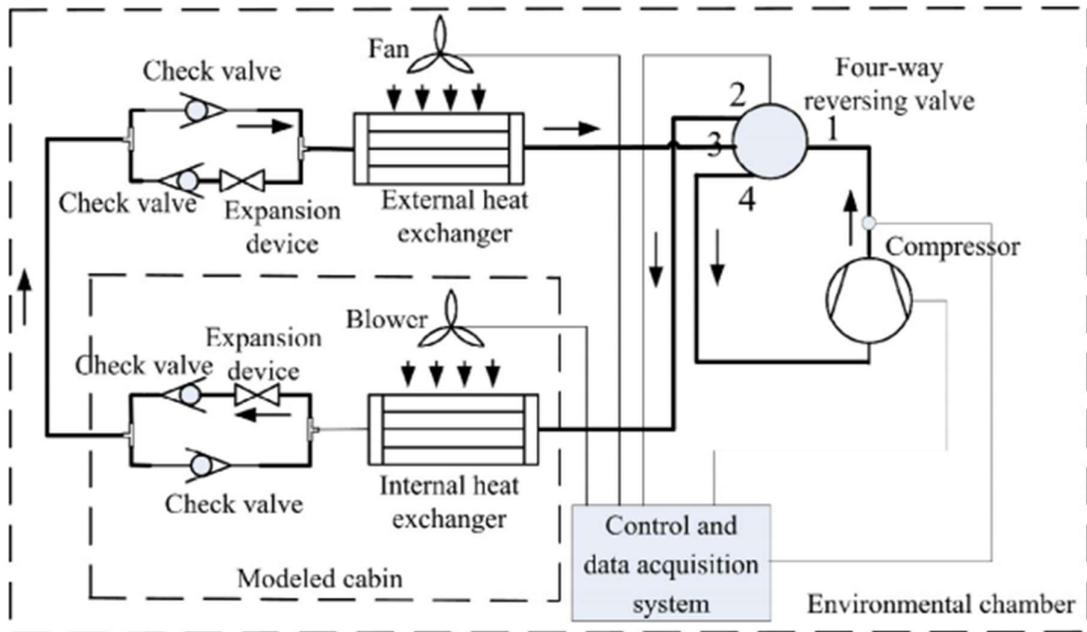


Figura 7. - Sistema reversível com válvula de 4 vias e dois trocadores.

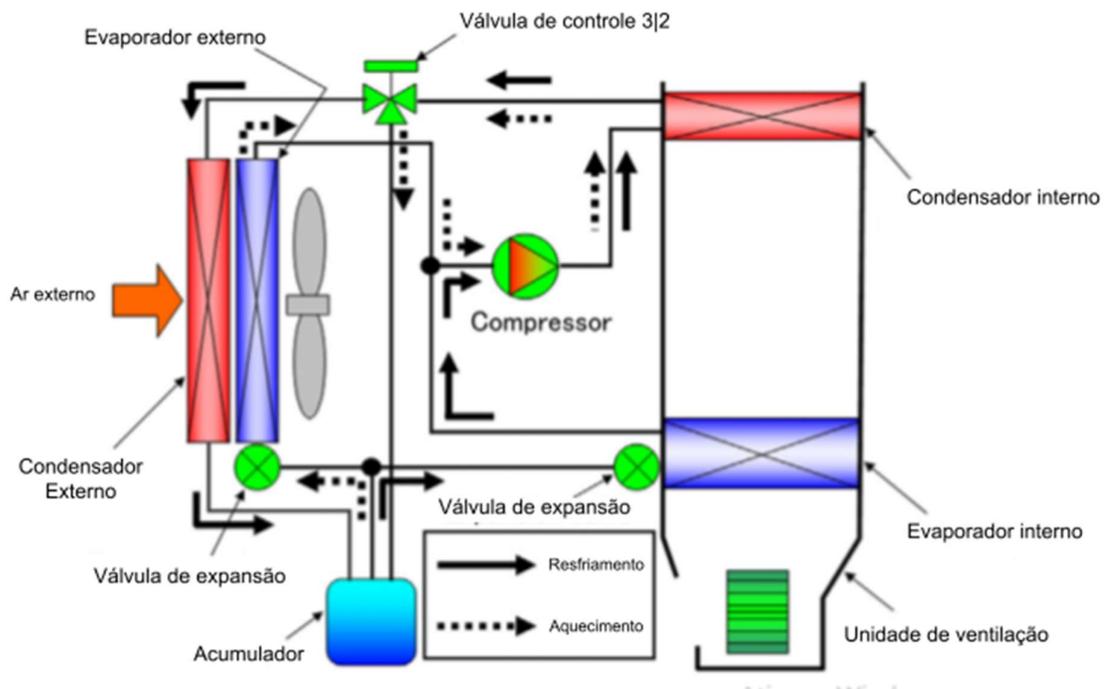


Figura 8. Sistema reversível com válvula 3 vias e 4 trocadores utilizado em um veículo Mitsubishi, adaptado de Zhang et. al. (2018)

3.3.3 Refrigeração termoelétrica

Também conhecido como refrigeração de Peltier, é um sistema de refrigeração que utiliza energia elétrica diretamente para realizar o transporte da energia térmica, sem a necessidade de um compressor ou outros componentes móveis introduzindo trabalho no sistema.

Utilizando dois eletrodos metálicos e materiais termoelétricos, é possível gerar um gradiente de temperatura ao introduzir uma diferença de tensão nos materiais. Controlando esta tensão, tem-se um gradiente de temperatura constante, que pode ser utilizado como bomba de calor ou sistema de arrefecimento.

Infelizmente a vantagem de operar diretamente de energia elétrica não é suficiente para viabilizar o sistema para instalações de climatização em veículos elétricos ou híbridos, visto que sua eficiência energética é muito inferior à do ciclo de compressão de vapor. Este sistema é empregado quando a ausência de partes móveis ou fluido refrigerante é mais importante que sua eficiência.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE NUMÉRICA E MATEMÁTICA

Para fins de análise comparativa, dados de diferentes sistemas de refrigeração veicular foram obtidos da literatura. Por meio do software “Engineering Equation Solver” diferentes condições foram simuladas matematicamente para estudar o funcionamento dos sistemas, focando nas variações com rotação e temperatura de condensação, reflexos dos pontos de estudo deste trabalho: o melhor controle disponível em veículos elétricos e desempenho em temperaturas mais altas, típicas de países tropicais.

4.1 Análise do compressor

O primeiro sistema simulado representa um ciclo de compressão de vapor movido a compressor a pistão de deslocamento volumétrico fixo. Valores foram baseados no trabalho de Jabardo et. al.(2002), que disponibiliza modelos empíricos para eficiência volumétrica e isentrópica do compressor em função da razão de compressão e rotação, dispostas nas equações 3 e 4, respectivamente.

$$\eta_{vol} = \left\{ 1 - \varepsilon_{cv} \left[\left(\frac{p_d}{p_s} \right)^{1/np} - 1 \right] \right\} \quad (3)$$

$$\eta_s = A_0 - A_1 n \quad (4)$$

A eficiência volumétrica varia com o volume morto do cilindro, a razão de compressão e o coeficiente politrópico do fluido utilizado, já a eficiência isentrópica varia somente com a rotação, de forma linear, sendo os demais termos constantes e obtidos empiricamente.

Assim como no trabalho de referência, o sistema opera com fluido refrigerante R134a e temperatura de evaporação constante em -5°C por meio de regulagem na válvula de expansão. Para esta simulação não foi considerado subresfriamento, condição de pior desempenho, no condensador e superaquecimento de 15K no evaporador. Os demais parâmetros estão dispostos na Tabela 1 e gráficos de desempenho nas figuras 9 e 10.

É possível perceber a redução do desempenho do sistema com o aumento da rotação, em veículos a combustão, a velocidade de rotação do compressor é diretamente ligada com a velocidade do motor, sendo assim, não é possível aplicar controles diretos neste parâmetro. Os ganhos em eficiência energética com redução da temperatura de condensação também

são limitados, pois quanto mais próxima é da temperatura externa, mais prejudicada é a troca de calor no condensador, porém pode ser aplicado quando o veículo está em altas velocidades, pois haverá aumento da velocidade do ar externo, possibilitando a devida condensação do fluido.

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo
T_{evap} [°C]	-5	-5
T_{cond} [°C]	40	50
n [rpm]	1550	5250

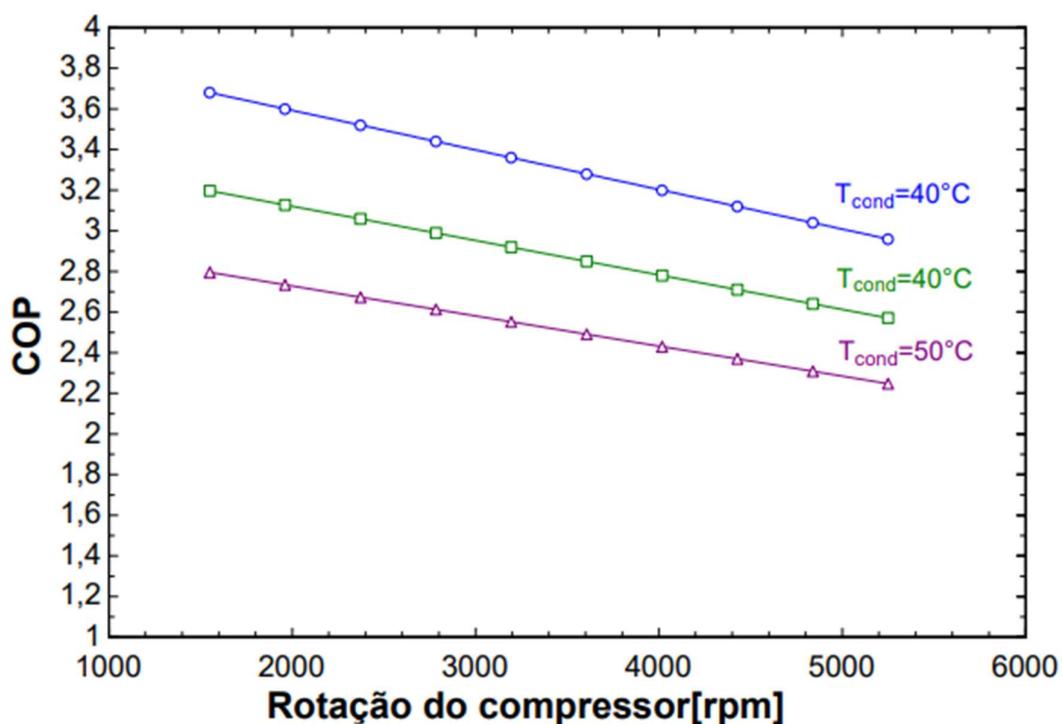


Figura 9. Variação do COP para variação na velocidade de rotação do compressor

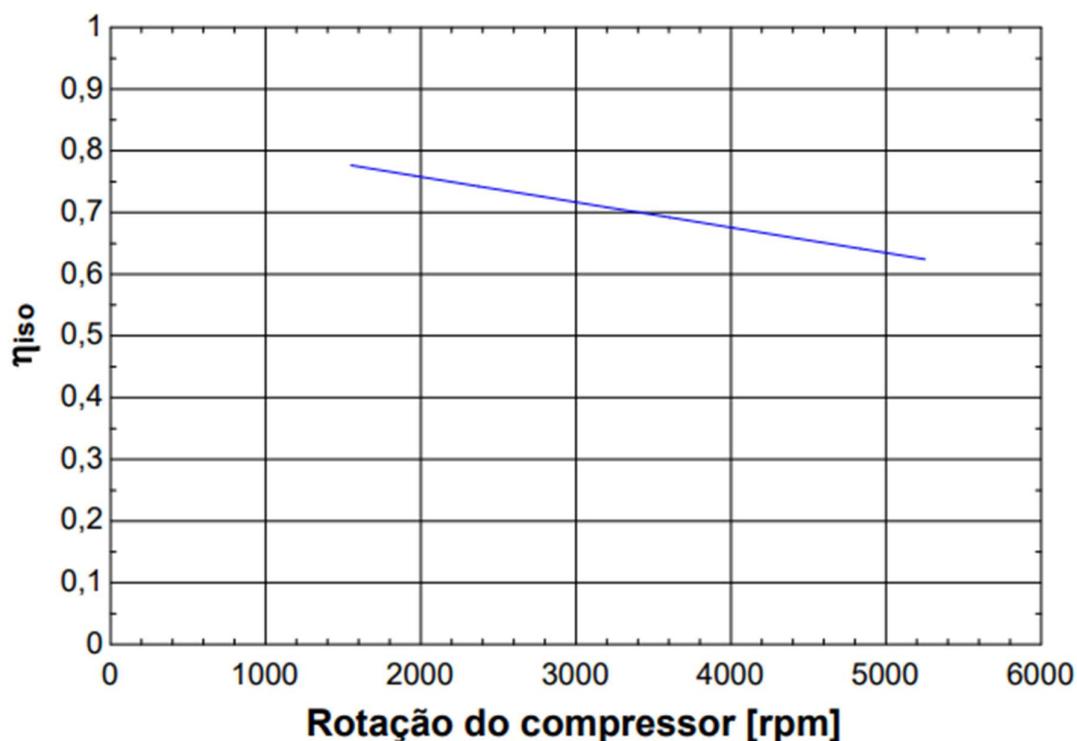


Figura 10. Variação da eficiência isentrópica para variação na velocidade de rotação do compressor

O sistema de compressor de vapor tradicional se adapta bem ao veículo elétrico sem problemas no funcionamento, o empecilho surge apenas da grande quantidade de energia necessária, o que pode comprometer as reservas limitadas de um veículo elétrico. Logo a busca por um sistema mais eficiente é cada vez mais importante, meios viáveis para encontrar melhorias são componentes melhores e mais complexos, assim como sistemas de controle aprimorados.

Em seu trabalho, que consiste de modelo matemático junto de validação experimental, Jabardo aplica um compressor do tipo prato oscilante com deslocamento volumétrico variável, este componente junto de ajustes no sistema de controle permite uma operação com capacidade de refrigeração e vazão mássica quase constante com a variação da velocidade de rotação, sendo regida pela carga térmica no evaporador. Esta configuração possibilita maior controle mesmo em veículos a combustão.

No caso dos veículos elétricos é possível utilizar compressores mais eficientes, compactos e silenciosos como o do tipo scroll movido diretamente a energia elétrica. Nesta configuração, mesmo com um deslocamento volumétrico fixo é possível fazer o controle de capacidade do sistema de refrigeração através do uso de um inversor de frequência, que

modula rotação do compressor e por consequência vazão mássica e capacidade de refrigeração do sistema.

Selecionando um compressor de capacidade semelhante ao do alternativo simulado anteriormente, uma nova análise matemática do ciclo foi realizada. Adicionalmente, o fluido R1234yf, alternativa ao R134a de menor potencial de aquecimento global que vê uso crescente em mercados como Europa e Japão, foi testado em utilização drop-in no mesmo sistema. Por motivo de comparação foram utilizados os mesmos parâmetros de operação, o gráfico disposto na figura 11 mostra a variação do coeficiente de performance com a variação da temperatura de condensação.

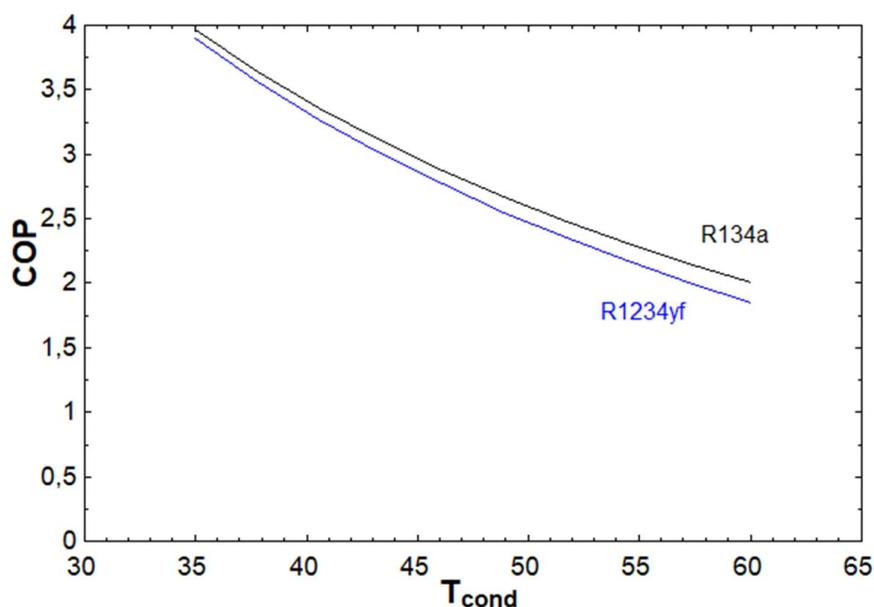


Figura 11. Influência da temperatura de condensação no desempenho do sistema, para fluidos R134a e R1234yf

4.2 Controle térmico da unidade de bateria

Em seu estudo Bufalo et al. descrevem que o calor gerado pelas irreversibilidades na bateria de um veículo elétrico é inversamente proporcional à temperatura da bateria, que deve ser mantida entre 20 e 40°C para bom desempenho de potência, capacidade e vida útil não comprometida.

Diversas estruturas podem ser utilizadas no controle térmico da bateria, com grande variabilidade no nível de performance, custo e consumo energético. A forma mais básica é o resfriamento direto com ar atmosférico, podendo ser suplementado por ação ativa dos trocadores de calor já presentes no veículo.

Para mensurar estas configurações, novamente utilizamos o software Engineering Equation Solver para analisar matematicamente a convecção de ar forçada sobre a bateria. Dois casos foram analisados: resfriamento passivo, em que foi considerado a temperatura do ar externo constante em 32°C e resfriamento ativo, utilizando o próprio evaporador do sistema de ar condicionado para controlar a temperatura do ar.

Para fins de simplificação o modelo considera fluxo de ar sobre uma placa plana horizontal, no entanto sabemos que as baterias e componentes que necessitam de controle de temperatura possuem diversas formas complexas e acumulam calor de forma desigual.

O gráfico na figura 12 mostra a variação do coeficiente de convecção ar com a variação da velocidade do ar u , que varia em função da velocidade do veículo e dos ventiladores do sistema, já a figura 13 demonstra a variação no calor removido por unidade de área com a variação da temperatura do ar para analisar o impacto do controle ativo no sistema.

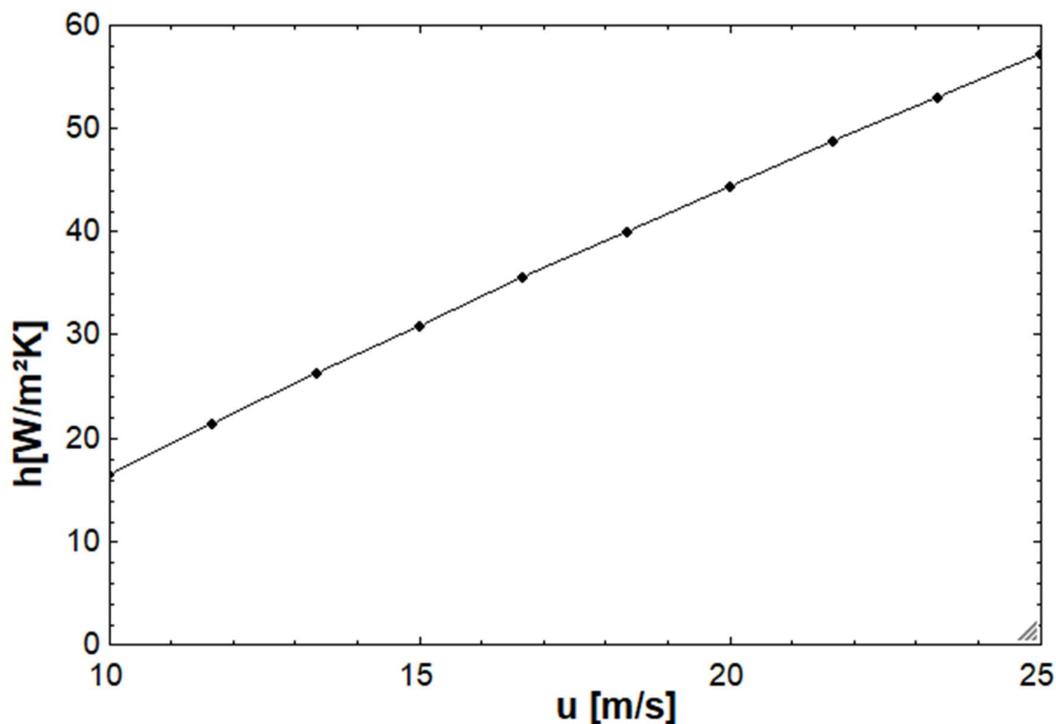
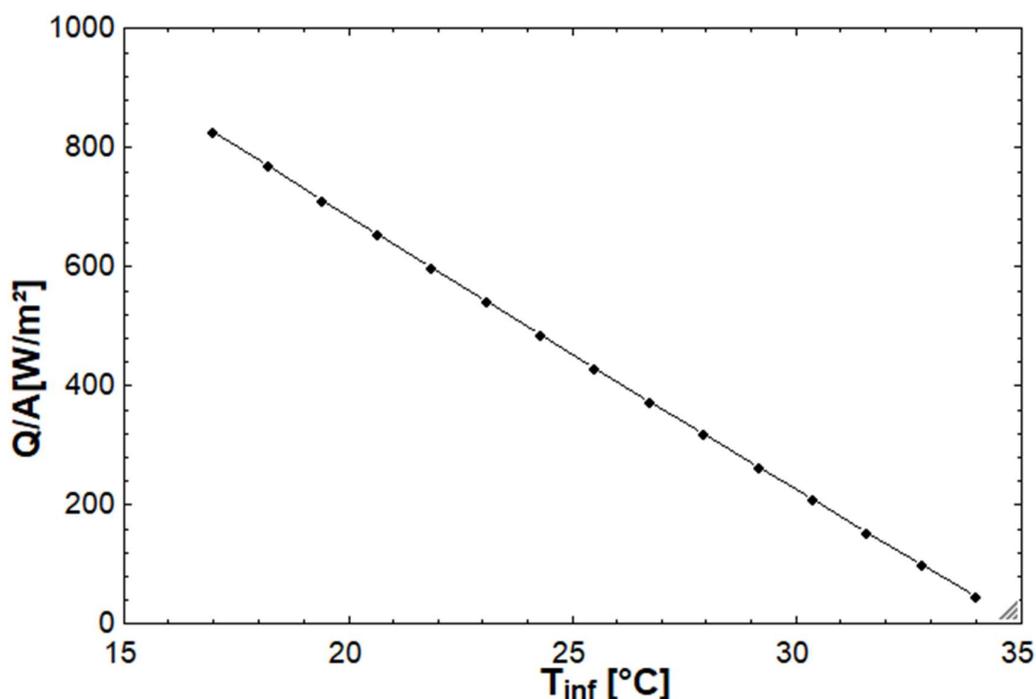


Figura 12. Variação no coeficiente de convecção com variação da velocidade do ar de resfriamento ($T_{\text{bat}}=35^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{inf}}=32^{\circ}\text{C}$)



**Figura 13. Calor removido por unidade de área em função da temperatura do ar
($T_{bat}=35^{\circ}\text{C}$; $u=20\text{m/s}$)**

Embora aparenta ser uma solução atrativa por sua simplicidade e baixo custo, o resfriamento a ar pode muitas vezes ser insuficiente em climas tropicais. Pois se a temperatura do ar externo excede a da bateria ou se a diferença for pequena a potência de resfriamento é nula, inviabilizando o sistema como solução única para regiões onde temperaturas superiores a 40° Celsius são registradas

O resfriamento líquido passivo, que utiliza líquido refrigerante e radiador para gerenciamento térmico do sistema, não foi analisado, pois tem grandes variações dependendo dos fluidos e trocadores utilizados. Assim como nos sistemas a ar tem problemas de operação em altas temperaturas ambientes, a solução é viável para resfriamento de motores a combustão pois estes possuem operação ótima a temperaturas muito superiores às do ambiente.

Outra alternativa são os sistemas de resfriamento líquido indireto e refrigerante direto. O primeiro, representado na figura 14, é caracterizado por um ciclo de líquido refrigerante condicionado pelos mesmos dispositivos que controlam a temperatura da cabine, ou seja, o evaporador do sistema de ar condicionado e o dispositivo de aquecimento do veículo e então troca calor com o sistema da bateria.

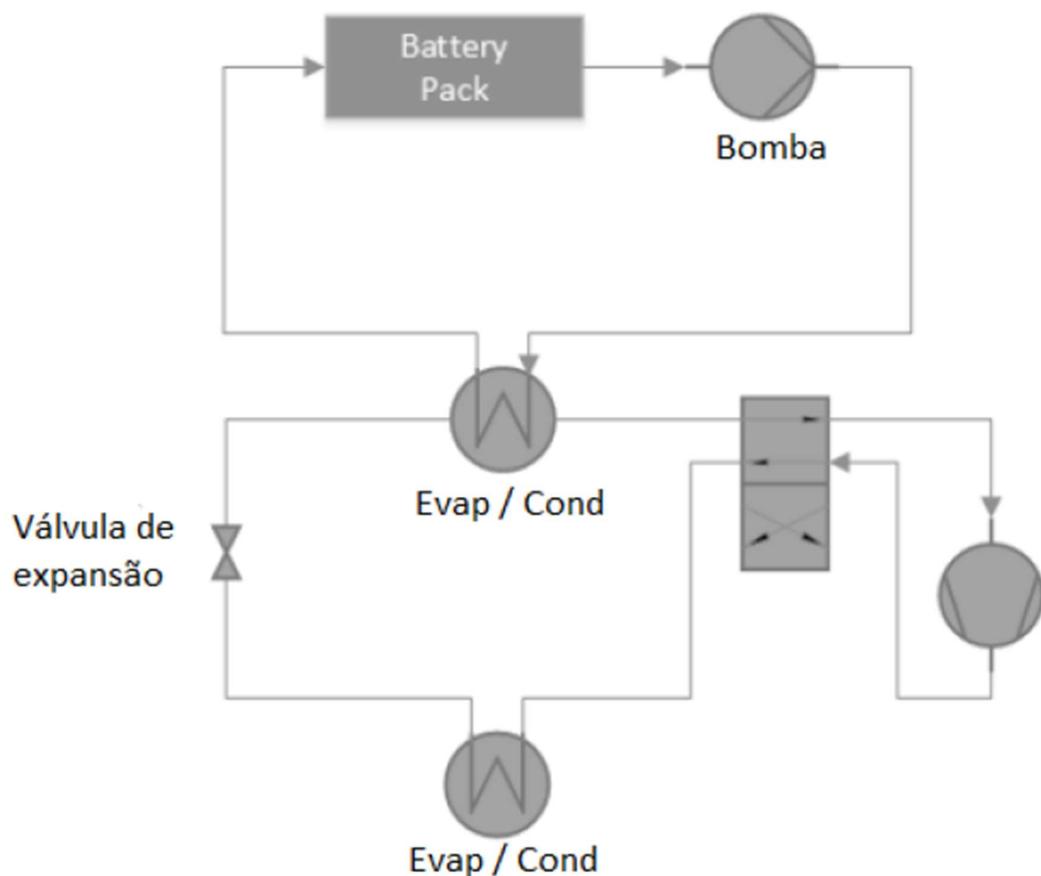


Figura 14. Resfriamento da bateria por sistema líquido ativo

O segundo sistema de controle direto por refrigerante funciona através de um ciclo de compressão de vapor tradicional, utilizando o trocador de calor na bateria como condensador ou evaporador nas aplicações de aquecimento ou resfriamento. Pode utilizar um sistema inteiramente dedicado ou funcionar junto do ar condicionado principal do veículo através de uma linha de pressão baixa adicional, esta configuração permite a utilização de injetores para ganho de eficiência no processo de expansão.

Existe ainda o sistema líquido combinado, que utiliza uma válvula de controle 3/2 para alterar a passagem do fluido de arrefecimento da bateria entre um radiador frontal ou em um trocador intermediário que aquece ou resfria o líquido pareado a um grupo de aquecedores elétricos para aquecimento adicional do conjunto, caso necessário. É um sistema de maior complexidade, porém com mais opções de controle de temperatura tanto da bateria quanto da cabine.

Para estes casos é comum a utilização de placas de resfriamento acopladas à bateria do veículo, que cumprem a função de homogeneizar a temperatura do conjunto e amplificar a troca de calor por meio de geometria mais favorável e maior área de contato. Como o calor gerado na bateria é dependente de diversas condições, como geometria, estado de desgaste,

temperatura ambiente e potência de utilização e não é o objeto de estudo deste trabalho, sendo assim, para estes sistemas foi feita uma análise apenas qualitativa dos sistemas. Disposta na tabela comparativa abaixo.

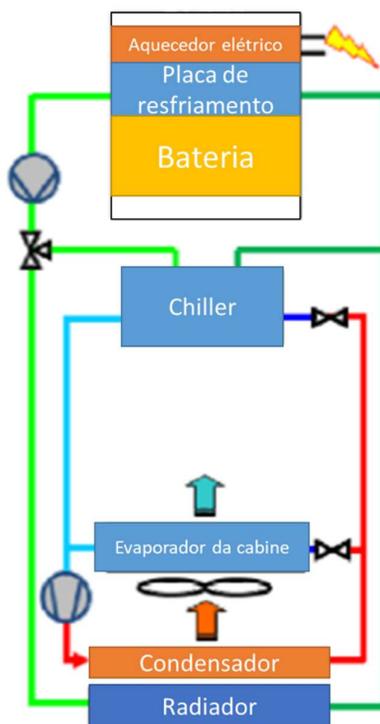


Figura 15. Diagrama do sistema líquido combinado, adaptado de Bufalo et. al.

	Consumo energético	Custo	Complexidade	Performance	Refrigeração e Aquecimento independentes?
Sistema de ar forçado passivo	Nulo	Baixo	Baixa	Insuficiente	Não
Sistema de ar forçado ativo	Baixo	Baixo	Baixa	Insuficiente	Não
Sistema líquido passivo	Baixo	Baixo	Baixa	Baixa	Não
Sistema líquido ativo	Médio	Médio	Média	Alta	Não
Sistema Líquido Combinado	Alto	Alto	Alta	Alta	Sim
Resfriamento direto por refrigerante	Alto	Médio	Alta	Alta	Sim

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Foi realizado o estudo sobre os possíveis sistemas de refrigeração e aquecimento a serem aplicados em veículos embarcados para controle térmico da cabine e do sistema de potência dentro da óptica de utilização em locais de clima tropical. A partir disso é possível compará-los para escolher sistemas que ofereçam melhor desempenho, maior simplicidade e melhor custo-benefício para satisfazer desejos de montadoras e clientes.

De acordo com a literatura estudada e os casos calculados, a crescente hibridização e eletrificação de veículos pode trazer ganhos significativos nos sistemas de ar condicionado embarcados. Ganhos explicados principalmente pela maior disposição de energia elétrica no veículo, o que justifica compressores e componentes adicionais do ciclo de compressão de vapor de acionamento puramente elétrico, permitindo controle mais preciso e não vinculado ao funcionamento do motor de propulsão do veículo, o que não é o caso para máquinas de combustão interna.

Como visualizado nas simulações de resfriamento por compressão de vapor, o sistema se adapta bem ao tipo de veículo e ainda possui amplo espaço para melhoria em sistemas de controle inteligente, porém tem como maior empecilho a redução de alcance e duração da bateria do veículo. Deste modo a busca por compressores e componentes mais eficientes é essencial para a difusão da eletrificação veicular. O sistema também não apresenta problemas quando avaliado em funcionamento com novos fluidos refrigerantes cada vez menos poluentes.

Na questão de controle térmico do conjunto de bateria a análise não pôde ser tão aprofundada, visto que o calor gerado internamente varia grandemente com os parâmetros de construção e utilização que estão presentes na bibliografia apenas na forma de complexas simulações numéricas, e por não ser ponto focal de estudo deste trabalho. Em contrapartida, uma comparação em termos qualitativos e de capacidade, em forma simplificada, foi realizada.

Os resultados apontam que sistemas demasiado simplificados como o resfriamento a ar, tanto passivo quanto ativo, não satisfazem as demandas existentes nas grandes variações de temperatura, principalmente em temperaturas mais elevadas. Já os ciclos de fluido se mostram mais adaptáveis às diferentes situações, com destaque para a combinação de ciclo de vapor para resfriamento com utilização de resistências para aquecimento, configuração que permite aquecimento da cabine junto de resfriamento da bateria ou vice-versa.

De forma geral, os resultados obtidos estão alinhados com o encontrado na literatura, evidenciando que existem amplas oportunidades de melhoria dos sistemas de controle térmico com a migração para arquiteturas elétricas e que as soluções disponíveis atualmente podem ser otimizadas para um melhor funcionamento na realidade e clima brasileiros.

Os estudos aqui realizados podem ser aprofundados através de bancos de prova experimentais para simulações ainda mais realistas. Para futuros trabalhos, recomenda-se a simulação de uma cabine veicular para análises transientes e de conforto dos ocupantes, assim como o uso de uma carga térmica variável, que gera calor de acordo com dados experimentais de uma bateria veicular em diferentes ciclos de direção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

G. Xia, L. Cao, G. Bi, A review on battery thermal management in electric vehicle application. **Journal of Power Sources**, 367 ed., p. 90-105, 2017.

LUKIC, S. et al., **Energy Storage Systems for Automotive Applications**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 55, p. 2258-2267, 2008.

WANG, Zhixing; WEI, Mingsham; GUO, Chong; ZHAO, Meng. Enhance the heating performance of an electric vehicle AC/HP system under low temperature. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 105, p. 2384-2389, 2017.

JABARDO, J.; MAMANI, W.; IANELLA, M.; Modeling and experimental evaluation of an automotive air conditioning system with a variable capacity compressor. **International Journal of Refrigeration**, v. 25, p. 1157-1172, 2002.

BUFALO, Luis Alfredo; GONELLI, Gabriel Morales; BAUMGARTNER, Luis F.; **Gerenciamento térmico da bateria em veículos elétricos: o sistema líquido combinado**, p. 435-447 . In: . São Paulo: Blucher, 2017.

CUEVAS, Cristian; LEBRUN, Jean; **Testing and modelling of a variable speed scroll compressor**, Applied Thermal Engineering, v, 29, p. 469-478, 2009.

UMEZU, Kohei; NOYAMA, Hideto. **Air-Conditioning system for Electric Vehicles (i-MiEV)**.: Sae Automotive Refrigerant & System Efficiency Symposium, 2010. 20 slides, color.

TIE, Siang Fui; TAN, Chee Wei; **A review of energy sources and energy management system in electric vehicles**, Renewable & Sustainable Energy Reviews. v. 20, p. 82-102, 2013.

Torregrosa-Jaime, B., Payá, J., Corberan, J., **Design of Efficient Air-Conditioning Systems for Electric Vehicles** *SAE Int. J. Alt. Power.*: p. 291-303, 2013.

LINARDI, Marcelo; WENDT, Harmut; GÖTZ, Michael; **TECNOLOGIA DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL**, Química Nova, 23(4), p. 538-546, 2000.

ZHANG, Z. et al. **The solution to electric vehicle air conditioning systems: A review**. Renewable & Sustainable Energy Reviews. v. 91, p. 443-463, 2018.

Z. Zhang, C. Liu, X. Chen, C. Zhang, J. Chen, **Annual Energy Consumption of Electric Vehicle Air Conditioning in China**, Applied Thermal Engineering, 2017.

BRODIE, Bradley; TAKANO, Yoshiaki; GOCHO, Mika; **Evaporator with Integrated Ejector for Automotive Cabin Cooling**, SAE 2012 World Congress & Exhibition, 2012.

ANEXOS

ANEXO I – Simulação do compressor alternativo

```

"Parâmetros"
"compressor N varia de 1550 a 5250"
"volume deslocado varia de 49,2 a 98,4 cc"
T_evap=-5
T_cond[1]=40
T_cond[2]=45
T_cond[3]=50
Sh=15
dv=119,025-0,0133*n
"n=3000"

"Modelo compressor alternativo"
E_cv=0,05
np=1,15 "para R134a"
A_0=0,84
A_1=4,11/100000 "1/rpm"
Eta_iso=A_0-n*A_1
Eta_vol[1]=1-E_cv*((P_cond[1]/P_evap)^(1/np)-1)
Eta_vol[2]=1-E_cv*((P_cond[2]/P_evap)^(1/np)-1)
Eta_vol[3]=1-E_cv*((P_cond[3]/P_evap)^(1/np)-1)

P_cond[1]=Pressure(R134a;T=T_cond[1];x=0)
P_cond[2]=Pressure(R134a;T=T_cond[2];x=0)
P_cond[3]=Pressure(R134a;T=T_cond[3];x=0)
P_evap=Pressure(R134a;T=T_evap;x=1)

"Ponto 1 - Saída do evaporador, sucção compressor"
T1[1]=T_evap+Sh
P1[1]=P_evap
h1[1]=Enthalpy(R134a;P=P1[1];T=T1[1])
s1[1]=Entropy(R134a;P=P1[1];T=T1[1])

T1[2]=T_evap+Sh
P1[2]=P_evap
h1[2]=Enthalpy(R134a;P=P1[2];T=T1[2])
s1[2]=Entropy(R134a;P=P1[2];T=T1[2])

T1[3]=T_evap+Sh
P1[3]=P_evap
h1[3]=Enthalpy(R134a;P=P1[3];T=T1[3])
s1[3]=Entropy(R134a;P=P1[3];T=T1[3])

"Ponto 2 - Descarga do compressor"
P2[1]=P_cond[1]
h2_iso[1]=Enthalpy(R134a;P=P2[1];s=s1[1])
h2[1]=h1[1]+((h2_iso[1]-h1[1])/Eta_iso)
T2[1]=Temperature(R134a;P=P2[1];h=h2[1])

```

$P2[2]=P_cond[2]$
 $h2_iso[2]=Enthalpy(R134a;P=P2[2];s=s1[2])$
 $h2[2]=h1[2]+((h2_iso[2]-h1[2])/Eta_iso)$
 $T2[2]=Temperature(R134a;P=P2[2];h=h2[2])$

$P2[3]=P_cond[3]$
 $h2_iso[3]=Enthalpy(R134a;P=P2[3];s=s1[3])$
 $h2[3]=h1[3]+((h2_iso[3]-h1[3])/Eta_iso)$
 $T2[3]=Temperature(R134a;P=P2[3];h=h2[3])$

"Ponto 3 - Saída do condensador - Entrada da VX"

"Considerando sem subsresfriamento"

$P3[1]=P_cond[1]$
 $T3[1]=T_cond[1]$
 $h3[1]=Enthalpy(R134a;P=P3[1];x=0)$

$P3[2]=P_cond[2]$
 $T3[2]=T_cond[2]$
 $h3[2]=Enthalpy(R134a;P=P3[2];x=0)$

$P3[3]=P_cond[3]$
 $T3[3]=T_cond[3]$
 $h3[3]=Enthalpy(R134a;P=P3[3];x=0)$

"Ponto 4 - Entrada do evaporador"

$P4[1]=P_evap$
 $h4[1]=h3[1]$
 $T4[1]=Temperature(R134a;P=P4[1];h=h4[1])$

$P4[2]=P_evap$
 $h4[2]=h3[2]$
 $T4[2]=Temperature(R134a;P=P4[2];h=h4[2])$

$P4[3]=P_evap$
 $h4[3]=h3[3]$
 $T4[3]=Temperature(R134a;P=P4[3];h=h4[3])$

$RC[1]=P_cond[1]/P_evap$
 $RC[2]=P_cond[2]/P_evap$
 $RC[3]=P_cond[3]/P_evap$

"Calculo da vazão mássica"

$\rho_suc=Density(R134a;P=P1[1];T=T1[1])$
 $m_dot[1]=dv/1000000*n/60*\rho_suc*Eta_vol[1]$
 $m_dot[2]=dv/1000000*n/60*\rho_suc*Eta_vol[2]$
 $m_dot[3]=dv/1000000*n/60*\rho_suc*Eta_vol[3]$

$W_c[1]=m_dot[1]*(h2[1]-h1[1])$
 $Q_evap[1]=m_dot[1]*(h1[1]-h4[1])$
 $COP[1]=Q_evap[1]/W_c[1]$

$W_c[2]=m_dot[2]*(h2[2]-h1[2])$
 $Q_evap[2]=m_dot[2]*(h1[2]-h4[2])$

$$\text{COP}[2]=Q_{\text{evap}}[2]/W_{\text{c}}[2]$$

$$W_{\text{c}}[3]=m_{\text{dot}}[3]*(h2[3]-h1[3])$$

$$Q_{\text{evap}}[3]=m_{\text{dot}}[3]*(h1[3]-h4[3])$$

$$\text{COP}[3]=Q_{\text{evap}}[3]/W_{\text{c}}[3]$$

ANEXO II – Simulação do compressor Scroll

"Parametros de funcionamento"

T_evap=-5

dv = 9,44 "m³/h"

n=2900 "rpm@50hz"

A1=-0,03658

A0=1,03487

Eta_vol[1]=A0 + (P_cond[1]/P_evap[1])*A1

Eta_vol[2]=A0 + (P_cond[2]/P_evap[2])*A1

"Sh=15"

Eta_iso=0,72

T_cond=40

"Ponto 1 - Sucção compressor"

P_evap[1]=Pressure(R134a;T=T_evap;x=0)

P_evap[2]=Pressure(R1234yf;T=T_evap;x=0)

T1[1]=T_evap+Sh

h1[1]=Enthalpy(R134a;T=T1[1];P=P_evap[1])

s1[1]=Entropy(R134a;T=T1[1];P=P_evap[1])

T1[2]=T_evap+Sh

h1[2]=Enthalpy(R1234yf;T=T1[2];P=P_evap[2])

s1[2]=Entropy(R1234yf;T=T1[2];P=P_evap[2])

"Ponto 2 - Exaustão comp, entrada cond"

P_cond[1]=Pressure(R134a;T=T_cond;x=1)

h2iso[1]=Enthalpy(R134a;P=P_cond[1];s=s1[1])

h2[1]=h1[1]+(h2iso[1]-h1[1])/Eta_iso

P_cond[2]=Pressure(R1234yf;T=T_cond;x=1)

h2iso[2]=Enthalpy(R1234yf;P=P_cond[2];s=s1[2])

h2[2]=h1[2]+(h2iso[2]-h1[2])/Eta_iso

"Ponto 3 - Saida do cond, entrada VX"

P3[1]=P_cond[1]

h3[1]=Enthalpy(R134a;P=P_cond[1];x=0)

P3[2]=P_cond[2]

h3[2]=Enthalpy(R1234yf;P=P_cond[2];x=0)

"Ponto 4 - Entrada do evap"

h4[1]=h3[1]

P4[1]=P_evap[1]

h4[2]=h3[2]

$$P4[2]=P_evap[2]$$

"Cálculos"

$$m_dot[1]=rho[1] * Eta_vol[1] * dv / 3600$$

$$m_dot[2]=rho[2] * Eta_vol[2] * dv / 3600$$

$$rho[1]=Density(R134a;P=P_evap[1];T=T1[1])$$

$$rho[2]=Density(R1234yf;P=P_evap[2];T=T1[2])$$

$$Q_evap[1]=m_dot[1]*(h1[1]-h4[1])$$

$$Q_evap[2]=m_dot[2]*(h1[2]-h4[2])$$

$$W_comp[1]=m_dot[1]*(h2[1]-h1[1])$$

$$W_comp[2]=m_dot[2]*(h2[2]-h1[2])$$

$$COP[1]=Q_evap[1]/W_comp[1]$$

$$COP[2]=Q_evap[2]/W_comp[2]$$