

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULO SERGIO MOREIRA

RUÍDO DE COMPRESSOR EM VEÍCULOS DE PASSEIO

CURITIBA/PR

2025

PAULO SERGIO MOREIRA

RUÍDO DE COMPRESSOR EM VEÍCULOS DE PASSEIO

Artigo apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de Pós-graduação em Engenharia automotiva, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Bruno Franca de Paula

CURITIBA/PR

2025

RUÍDO DE COMPRESSOR EM VEÍCULOS DE PASSEIO

Paulo Sergio Moreira, Prof. Bruno Franca de Paula

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar um problema real de ruído proveniente do compressor em um veículo de passeio. A pesquisa, de caráter experimental, foi realizada com base em dados coletados na empresa A, contemplando duas condições operacionais: a configuração original do sistema e a situação com afrouxamento de meia volta na válvula de expansão termostática (TXV). As medições foram realizadas com o veículo em marcha lenta, utilizando sensores de temperatura, microfones B&K e sistema de aquisição LMS SCADAS. Os resultados indicaram que o afrouxamento da válvula não provocou calço hidráulico e favoreceu a redução da frequência de ciclagem do compressor, contribuindo para a diminuição dos níveis de ruído transmitidos à cabine. Além disso, observou-se maior estabilidade térmica, ampliando o conforto dos ocupantes. A análise evidencia que pequenas intervenções no sistema de climatização podem gerar melhorias significativas em desempenho acústico e eficiência energética. Como continuidade, sugere-se a adoção de válvulas de expansão eletrônicas, que oferecem maior precisão no controle do fluxo de refrigerante e podem contribuir para a evolução dos sistemas HVAC voltados ao conforto térmico e à percepção de qualidade no ambiente automotivo.

Palavras-chave: NVH; Ar-condicionado; Compressor; TXV.

ABSTRACT

This study aims to evaluate a real-world compressor noise issue identified in a passenger vehicle. The experimental research was conducted based on data collected at Company A, considering two operating conditions: the original system configuration and the scenario with a half-turn loosening of the thermostatic expansion valve (TXV). Measurements were carried out with the vehicle idling, using temperature sensors, B&K microphones, and an LMS SCADAS data acquisition system. The results indicated that loosening the valve did not cause liquid slugging and helped reduce the compressor cycling frequency, contributing to a decrease in the noise levels perceived inside the cabin. Additionally, improved thermal stability was observed, enhancing occupant comfort. The analysis shows that small interventions in the air conditioning system can lead to significant improvements in acoustic performance and energy efficiency. As a recommendation for future developments, the use of electronic expansion valves is suggested, as they offer greater precision in refrigerant flow control and may contribute to the advancement of HVAC systems focused on thermal comfort and perceived quality in the automotive environment.

Keywords: NVH; Air conditioning, Compressor; TXV.

1 INTRODUÇÃO

Na maioria dos casos, o desconforto dos ocupantes de um automóvel está associado aos ruídos e vibrações transmitidos para o interior do veículo [1]. A NVH (Noise, Vibration and Harshness) tem como objetivo reduzir e controlar esses fenômenos, promovendo veículos mais silenciosos e com menor nível de vibração, a fim de proporcionar uma experiência de condução mais confortável [2,3,4].

Os ruídos podem ser originados por diversos componentes, como motor, sistema de escapamento, sistema de refrigeração e sistema de frenagem. Em veículos motorizados, as principais fontes de ruído incluem o motor, a transmissão e seus acessórios (NVH do trem de força), além das excitações provenientes da interação estrada-pneu, vento-estrutura, suspensão e sistema de freios [5,6,7].

No ambiente interno do veículo, o ruído é especialmente crítico, pois afeta diretamente o conforto dos ocupantes. Uma das principais fontes de ruído percebido na cabine é o sistema de climatização automotiva, conhecido como HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning). Esse sistema é responsável por garantir o conforto térmico por meio da circulação e tratamento do ar, englobando funções de aquecimento, ventilação e resfriamento [8].

Os principais componentes do sistema de ar-condicionado (AC) incluem o compressor, condensador, válvula de expansão termostática (TXV), evaporador, secador ou acumulador, sensores de pressão e temperatura, mangueiras e o blower [9,10].

O funcionamento desses elementos influencia diretamente o desempenho térmico e acústico do habitáculo. Em determinadas condições, o fluxo de refrigerante pode gerar ruídos sibilantes, afetando a percepção de qualidade e o conforto dos passageiros [9,10].

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar os dados fornecidos pela empresa A sobre um problema de ruído no compressor identificado na condição original de projeto, e avaliar os efeitos da intervenção realizada por meio do afrouxamento de meia volta na válvula de expansão termostática (TXV).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 NVH

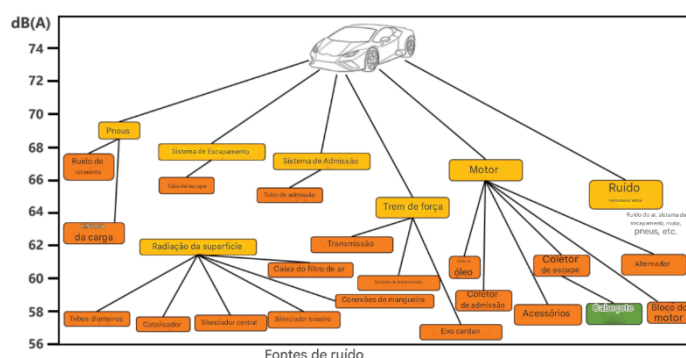
O campo de NVH (*Noise, Vibration and Harshness*) representa uma área fundamental da engenharia automotiva, dedicada ao estudo da percepção de ruído, vibração e aspereza pelos ocupantes do veículo [1,2]. Essa disciplina visa compreender e mitigar os efeitos acústicos e vibracionais que impactam diretamente o conforto, a qualidade percebida e, em alguns casos, a segurança durante a condução [1,2.]

O ruído é definido como qualquer som indesejado, gerado por múltiplas fontes e propagado pelo ar até o sistema auditivo humano [11]. Sua escala é em decibéis (dB), enquanto sua frequência (número de ciclos por segundo) é expressa em Hertz (Hz) [11].

No contexto veicular, os ruídos podem ser classificados em duas grandes categorias: os chamados ruídos aéreos, que se propagam pelo ar, e os ruídos estruturais, que têm origem nas vibrações transmitidas pela estrutura do veículo [3,5,6]. Os primeiros incluem, por exemplo, o ruído do vento, oriundo do escoamento aerodinâmico sobre a carroceria, bem como os sons provenientes do compartimento do motor. Já os ruídos estruturais têm sua origem nas vibrações geradas por componentes como pneus, suspensão e motor, as quais se propagam pelas superfícies metálicas do veículo e são eventualmente irradiadas para o interior da cabine, sendo percebidas pelos ocupantes como sons indesejáveis [3,5,6].

A Figura 1 apresenta a classificação das principais fontes de ruído em um veículo, conforme os critérios utilizados nos ensaios de pass-by noise, que avaliam a emissão sonora durante a passagem do automóvel em condições controladas [12].

FIGURA 1 – Classificação da fonte de ruído de um veículo, durante o teste pass-by noise



FONTE : J. Masri et al (2024)

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), os níveis máximos de ruído considerados seguros para a saúde humana são de 70 dB(A) para exposições contínuas de até 24 horas e 85 dB(A) para exposições pontuais de até 1 hora, sem efeitos adversos à audição ou ao bem-estar [11]. No contexto urbano, emissões sonoras inferiores a 55 dB(A) provenientes de veículos motorizados são consideradas aceitáveis durante os períodos diurno, vespertino e noturno, conforme diretrizes internacionais de conforto acústico [11].

A vibração é definida como um movimento oscilatório de um corpo ou sistema em torno de uma posição de equilíbrio. No âmbito automotivo, essas vibrações são percebidas pelos ocupantes como tremores, sacudidas ou desconforto físico, sendo mensuradas em termos de aceleração (m/s^2), velocidade (m/s) ou deslocamento (mm) [3,5,6].

Um tipo frequente é a vibração das rodas e da suspensão, causada principalmente pelo desbalanceamento dos pneus, irregularidades no pavimento ou degradação de amortecedores e buchas [16]. Também há a vibração aerodinâmica, que decorre da ação do escoamento do ar sobre a carroceria em velocidades elevadas, provocando oscilações sutis em painéis ou estruturas expostas ao fluxo de ar [3,5].

A aspereza (*harshness*) refere-se à combinação de ruído e vibração de alta frequência, percebida pelos ocupantes como impactos secos ou desconforto abrupto. Esse fenômeno está geralmente associado a eventos transitórios, como a passagem por discontinuidades no pavimento (buracos, juntas de dilatação) ou variações bruscas de aceleração e carga dinâmica [1,3].

2.1.1 Fontes de NVH em um veículo

As principais fontes de ruído em veículos automotivos podem ser agrupadas em cinco categorias fundamentais: interior da cabine, powertrain (motor e transmissão), interação entre pneus e pavimento, sistema de suspensão e sistema de freios. Cada uma dessas fontes contribui de maneira distinta para o perfil acústico percebido pelos ocupantes e pelo ambiente externo [4].

Os ruídos internos de um veículo são considerados os mais relevantes sob a ótica do conforto acústico, pois impactam diretamente a experiência dos ocupantes. Entre os sistemas que mais contribuem para esse tipo de emissão sonora está o sistema HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*). Esse sistema gera ruídos devido à alta vazão de ar admitido na cabine, ao funcionamento harmônico do motor elétrico de ventilação e ao ruído transitório resultante da desaceleração ou desligamento do motor do HVAC [10,17].

Já o conjunto denominado powertrain, que compreende todos os componentes responsáveis pela geração e transmissão de potência para as rodas, também produz ruídos perceptíveis. Esses sons podem ser classificados em duas categorias distintas. Os ruídos aceitáveis são aqueles esperados durante acelerações, mudanças de marcha ou funcionamento rotineiro do sistema. Em contrapartida, os ruídos inaceitáveis são aqueles que indicam falhas ou desgaste anormal, como batidas de pistão, folgas excessivas em correntes e ruídos provocados por correias desgastadas ou mal tensionadas, os quais comprometem a percepção de qualidade do veículo [13,14,15].

Um dos elementos mais significativos no perfil acústico automotivo está na interação entre os pneus e o pavimento [16]. O contato constante da banda de rodagem com o solo gera ruídos decorrentes de processos complexos que podem ser classificados em duas categorias: os ruídos estruturais, provocados pelo impacto direto dos pneus no asfalto, e os ruídos aerodinâmicos, associados ao escoamento de ar entre os sulcos dos pneus durante o movimento veicular [18,19].

A suspensão também desempenha papel relevante na geração de ruído estrutural, especialmente quando o veículo trafega por superfícies irregulares. Embora os amortecedores tenham como função principal assegurar o conforto e a estabilidade da condução, esses componentes podem transmitir vibrações indesejáveis à cabine [20,21]. Esse tipo de ruído (conhecido como *rattling noise*) manifesta-se em

frequências entre 200 Hz e 800 Hz, conforme relatado por estudos técnicos realizados pela montadora Peugeot-Citroën [20,21,22].

Por fim, o sistema de frenagem constitui outra fonte importante de emissão sonora, especialmente durante os ciclos de acionamento e liberação dos freios. Ruídos característicos como chiados e grunhidos afetam não apenas o conforto acústico, mas também geram preocupações quanto à segurança e à percepção de durabilidade do sistema. Dentre os fenômenos mais comuns, destacam-se: o DTV (*Disc Thickness Variation*), em que o desgaste desigual do disco provoca oscilações e vibrações perceptíveis; o squeal, ruído agudo originado por micro oscilações entre disco e pastilha, com frequências que variam entre 4 kHz e 10 kHz; o groan, observado durante a liberação gradual dos freios com torque residual nas rodas; e o moan, que surge durante desacelerações suaves com pressão constante no pedal [23,24,25].

2.1.2 Técnicas de medição de NVH

Para a realização de medições acústicas e vibracionais em veículos automotivos, são empregados diversos instrumentos especializados, cada um com funções específicas voltadas à caracterização do comportamento dinâmico e sonoro dos sistemas veiculares [3,6].

Os microfones são utilizados para a quantificação da pressão sonora em diferentes pontos do veículo, tanto no ambiente interno quanto no externo. Esses sensores captam variações de pressão acústica e permitem a análise espectral dos ruídos emitidos por componentes como o motor, sistema HVAC e pneus [3,6].

Os acelerômetros, por sua vez, são empregados na medição da aceleração vibracional em estruturas como carroceria, motor e suspensão. Esses dispositivos convertem os movimentos oscilatórios em sinais elétricos proporcionais à aceleração, possibilitando a avaliação da intensidade e frequência das vibrações transmitidas [3,6].

Os medidores de força têm como finalidade a quantificação das forças dinâmicas transmitidas entre componentes estruturais, como suportes de motor, fixações de suspensão e pontos de acoplamento do sistema de transmissão. Essa medição é essencial para compreender os caminhos de propagação de vibração e ruído estrutural [3,6].

Por fim, as câmeras acústicas representam uma tecnologia avançada que permite mapear visualmente as fontes de ruído. Utilizando arranjos de microfones, esses sistemas geram imagens que indicam a distribuição espacial da pressão sonora, facilitando a identificação precisa das regiões emissoras de ruído [3,6].

2.2 HVAC

O sistema HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) é responsável pelo controle térmico e pela qualidade do ar no interior dos veículos automotivos. Trata-se de um conjunto integrado de subsistemas que atuam de forma coordenada para garantir conforto ambiental aos ocupantes, independentemente das condições externas [26,27].

Esse sistema é composto por três funções principais. O sistema de aquecimento utiliza o calor gerado pelo motor a combustão para elevar a temperatura do ar admitido na cabine, promovendo aquecimento eficiente em climas frios. O sistema de ventilação é responsável pela renovação e circulação do ar interno, permitindo a troca com o ambiente externo ou a recirculação conforme a configuração desejada. Já o sistema de ar-condicionado (AC) realiza o resfriamento do ar e a remoção da umidade, contribuindo para o conforto térmico e a desembaçamento dos vidros [26,27].

Nos veículos modernos, o sistema HVAC pode apresentar funcionalidades automáticas e multizona, permitindo o ajuste independente de temperatura e fluxo de ar para diferentes áreas da cabine. Sensores de temperatura, umidade e qualidade do ar atuam em conjunto com unidades de controle eletrônico para realizar ajustes dinâmicos e precisos [26,27].

2.2.1 Sistema de Ar-condicionado

O sistema de ar-condicionado automotivo é projetado para promover o controle térmico e higrométrico do ar no interior da cabine veicular, assegurando conforto ambiental aos ocupantes. Tal sistema pode operar com base nos ciclos termodinâmicos de Brayton ou Rankine, dependendo da arquitetura e da aplicação específica, sendo ambos fundamentados na transferência de calor e na variação de estado do fluido refrigerante [28,29].

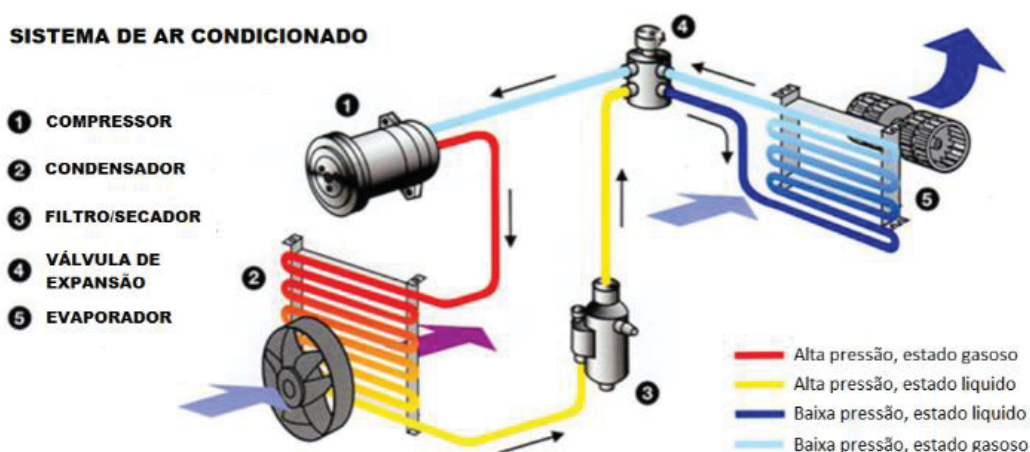
O sistema de ar-condicionado automotivo é composto por três subsistemas fundamentais que atuam de forma coordenada para assegurar o controle térmico e a qualidade do ar no interior da cabine. O primeiro deles é o sistema de refrigeração, cuja função é promover o resfriamento do ar por meio da troca térmica entre o fluido refrigerante e o ambiente interno. Este subsistema é composto por dispositivos essenciais como o compressor, o condensador, a válvula de expansão e o evaporador, os quais operam em ciclo fechado com o objetivo de extrair calor da cabine e dissipá-lo externamente [28,29].

O segundo subsistema é o sistema de circulação e distribuição de ar, responsável por conduzir e direcionar o ar climatizado para as diversas áreas internas do veículo. Esse processo é realizado por meio de ventiladores, difusores, dutos de condução e filtros, que garantem uma distribuição homogênea e segura do fluxo de ar, bem como sua renovação ou recirculação conforme as necessidades dos ocupantes [28,29].

Por fim, o sistema conta com um subsistema de controle, formado por sensores e atuadores eletrônicos que monitoram parâmetros como temperatura, umidade e qualidade do ar. Esses componentes estão integrados a uma unidade de controle eletrônico (ECU), que ajusta dinamicamente o desempenho dos demais subsistemas de acordo com a demanda térmica, promovendo maior eficiência e conforto [28,29].

A Figura 2 apresenta um esquema simplificado do circuito de refrigeração automotivo, destacando os principais componentes e o fluxo do fluido refrigerante ao longo do ciclo [30].

FIGURA 2 – Circuito de refrigeração automotivo



FONTE: LD Auto (2025)

O compressor tem como função principal comprimir o fluido refrigerante, que chega ao componente em estado gasoso e sob baixa pressão. Após a compressão, o refrigerante é enviado ao condensador em condição de alta pressão e temperatura. O acionamento do compressor é realizado por meio de uma correia conectada ao motor do veículo, sendo este responsável por fornecer a energia mecânica necessária para o funcionamento do sistema [28,29,30].

O condensador, localizado geralmente à frente do radiador, atua como um trocador de calor cuja função é promover a condensação do fluido refrigerante. Nesse estágio, o gás superaquecido oriundo do compressor sofre uma redução de temperatura por meio da convecção forçada, proporcionada pelo ventilador do sistema. Durante esse processo, o refrigerante se transforma em líquido e sai pela parte inferior do condensador em estado líquido e sob alta pressão, pronto para ser direcionado à válvula de expansão [28,29,30].

A válvula de expansão termostática (TXV) é responsável por reduzir a pressão do fluido refrigerante antes de sua entrada no evaporador. Essa queda de pressão é essencial para que o refrigerante possa se expandir e evaporar adequadamente, absorvendo calor do ambiente interno do veículo [28,29,30].

O evaporador, por sua vez, é um componente que apresenta características funcionais semelhantes às de um trocador de calor. Localizado atrás das saídas de ar no painel do automóvel, ele está diretamente integrado ao conjunto de ventilação do sistema HVAC. Sua principal função é remover o calor do habitáculo, processo que ocorre por meio da evaporação do fluido refrigerante líquido, proveniente da válvula de expansão. Ao se transformar em vapor, o refrigerante absorve o calor do ar interno, promovendo o resfriamento da cabine. O ar climatizado é então distribuído aos ocupantes por meio da atuação dos ventiladores. Além da função térmica, o evaporador também exerce um papel relevante na desumidificação do ar [28,29,30].

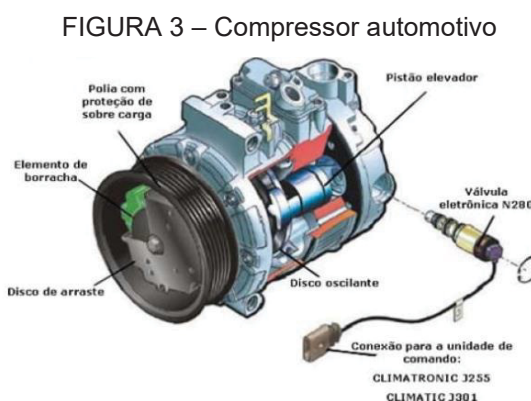
2.3 COMPRESSORES

O compressor automotivo é o componente central do sistema de climatização veicular, sendo responsável por comprimir e promover a circulação do vapor superaquecido do fluido refrigerante em um circuito fechado. Sua operação exige condições específicas, uma vez que a presença de impurezas ou de refrigerante em

estado líquido pode ocasionar falhas mecânicas severas, como calço hidráulico, desgaste prematuro ou quebra de componentes internos [29].

Do ponto de vista construtivo, os compressores apresentam variações significativas quanto ao projeto, dimensões físicas, massa, velocidade de rotação, sentido de giro e capacidade volumétrica. O acionamento pode ocorrer de forma mecânica, por meio de correias conectadas ao motor de combustão interna, ou de forma elétrica, especialmente em veículos híbridos e elétricos, nos quais o sistema de climatização pode operar independentemente do funcionamento do motor principal [29]. Na Figura 3, é apresentado um modelo de compressor automotivo [39].

Quanto à capacidade de deslocamento volumétrico, os compressores classificam-se em deslocamento fixo e deslocamento variável [29].



FONTE: LD Auto (2025)

2.3.1 Deslocamento fixo

O compressor de deslocamento fixo representa uma das tecnologias mais tradicionais empregadas em sistemas de ar-condicionado automotivo. Seu princípio de funcionamento baseia-se na compressão constante do fluido refrigerante, ou seja, o volume de gás comprimido por ciclo permanece inalterado, independentemente da demanda térmica do veículo. Essa característica confere ao sistema uma operação cíclica uniforme, porém menos adaptativa às variações de carga térmica [30,31].

A arquitetura interna desse tipo de compressor inclui um prato cíclico com ângulo fixo, responsável por movimentar os pistões de forma sincronizada. A compressão do gás ocorre de maneira contínua, com deslocamento volumétrico constante, e o controle da temperatura interna é realizado por meio do acionamento

intermitente da embreagem eletromagnética, que acopla ou desacopla o compressor ao motor do veículo conforme a necessidade de refrigeração [30,31].

Entre as principais vantagens desse modelo destacam-se o projeto simples e confiável, o baixo custo de fabricação e manutenção, e a boa durabilidade em condições operacionais estáveis. No entanto, o sistema apresenta limitações importantes, como a menor eficiência energética, a ocorrência de oscilações térmicas perceptíveis devido ao funcionamento intermitente, e o menor conforto em veículos equipados com sistemas de climatização automática ou multizona [30,31].

2.3.2 Deslocamento variável

O compressor de deslocamento variável representa uma evolução significativa em relação aos modelos tradicionais de deslocamento fixo utilizados em sistemas de climatização automotiva. Diferentemente dos compressores convencionais, que operam com capacidade volumétrica constante, os compressores variáveis são capazes de ajustar automaticamente o volume de compressão conforme a demanda térmica do veículo, proporcionando maior eficiência energética, estabilidade térmica e conforto acústico aos ocupantes [30,31].

O princípio de funcionamento baseia-se na utilização de um prato oscilante com ângulo variável, o qual altera o curso dos pistões de compressão. Em situações de alta carga térmica o sistema aumenta o ângulo do prato, elevando o deslocamento volumétrico e, conseqüentemente, a capacidade de refrigeração. Em contrapartida, quando a demanda térmica é reduzida, o ângulo diminui, limitando o curso dos pistões e reduzindo o consumo de energia [30,31].

Uma das principais vantagens desse tipo de compressor é a eliminação dos ciclos perceptíveis de liga/desliga, comuns nos modelos de deslocamento fixo. Essa característica permite uma operação contínua e modulada, evitando oscilações abruptas de temperatura na cabine e contribuindo para uma climatização mais estável e silenciosa [30,31].

2.3.3 Calço hidráulico em compressores

O calço hidráulico em compressores automotivos consiste em uma falha grave ocasionada pela entrada de substâncias líquidas não compressíveis (como

refrigerante líquido, óleo lubrificante ou água) na câmara de compressão do sistema. Essa condição impede o deslocamento adequado dos pistões ou rotores, gerando um impacto súbito que pode comprometer seriamente a integridade mecânica do equipamento. Como os líquidos não podem ser comprimidos, a tentativa de compressão resulta em forças internas excessivas, capazes de danificar componentes críticos como pistões, bielas e válvulas, além de provocar o travamento completo do sistema [33,34,35].

Entre os fatores que favorecem a ocorrência dessa falha, destacam-se: o retorno de refrigerante líquido ao compressor, causado por falhas no sistema de expansão ou pela insuficiência de superaquecimento; o acúmulo de óleo nas linhas de sucção ou no evaporador; a obstrução de drenos, que permite o refluxo de condensado; o excesso de carga de fluido refrigerante, que compromete o equilíbrio termodinâmico do sistema; e falhas no separador de líquido, especialmente em aplicações industriais de alta capacidade [33,34,35].

A prevenção do calço hidráulico requer medidas específicas durante a instalação e manutenção do sistema. É imprescindível garantir um superaquecimento adequado na linha de sucção, assegurando que apenas vapor refrigerante entre no compressor. Além disso, é necessário realizar a verificação e limpeza periódica de drenos e filtros, evitando acúmulos indesejáveis de líquido. A utilização de válvulas de expansão corretamente calibradas também contribui para a dosagem precisa do refrigerante, mantendo a estabilidade operacional e prolongando a vida útil do sistema [33,34,35].

2.3.4 Ruído em compressor

O compressor do sistema de ar-condicionado automotivo, geralmente acionado por meio de uma correia conectada ao motor de combustão interna, atua como uma fonte significativa de vibração durante o funcionamento do sistema. Essa vibração é decorrente das variações internas de pressão, também conhecidas como pulsações, que ocorrem no interior do compressor à medida que o fluido refrigerante é comprimido e deslocado [10].

As vibrações geradas são transmitidas mecanicamente através das tubulações do sistema de ar-condicionado e de seus respectivos suportes de fixação, alcançando a estrutura da carroceria do veículo. Esse fenômeno resulta na

propagação de vibrações estruturais, que são percebidas pelos ocupantes como ruído e desconforto vibracional no interior da cabine, afetando diretamente o conforto acústico [10].

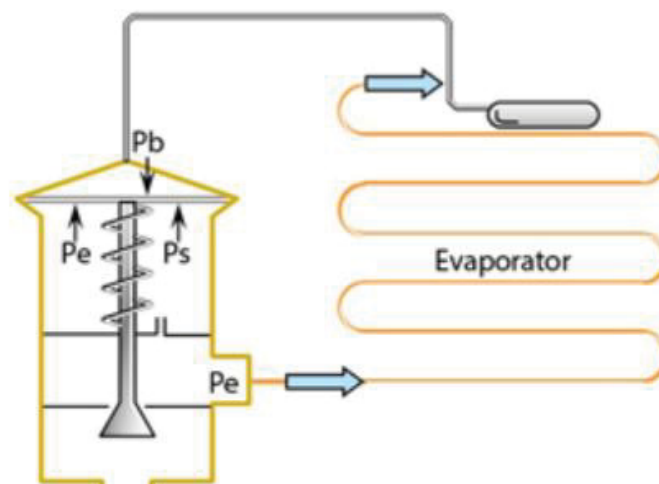
Além disso, o compressor também atua como uma fonte sonora direta, emitindo ruídos que se propagam pelo ar e atingem o ambiente interno do veículo. Esses ruídos podem ser percebidos tanto em regime de marcha lenta quanto durante a aceleração do motor, sendo frequentemente confundidos com o ruído característico do motor a combustão, especialmente em veículos com baixa isolamento acústica ou em situações de carga térmica elevada [10].

2.4 TXV

A válvula de expansão termostática (TXV) é um componente fundamental nos sistemas de refrigeração e climatização automotiva, cuja principal função é regular o fluxo de refrigerante líquido que ingressa no evaporador. Essa regulação é essencial para manter o superaquecimento dentro de limites seguros, assegurando que apenas vapor refrigerante chegue ao compressor, evitando danos mecânicos por retorno de líquido [36, 37].

Na Figura 4, está ilustrado um esquema básico de uma válvula TXV [36].

FIGURA 4 – Válvula TXV.



FONTE: Danfoss (2017)

O funcionamento da TXV baseia-se no equilíbrio entre três forças simultâneas. A primeira é a força de abertura (P_b), gerada pela pressão do gás contido no bulbo termostático, que está posicionado na saída do evaporador e mede a temperatura do vapor refrigerante. A segunda é a força de fechamento (P_e), proveniente da pressão de equalização, normalmente captada na saída do evaporador. A terceira é a força de fechamento adicional (P_s), exercida por uma mola interna cuja tensão pode ser ajustada por meio de um parafuso [36, 37].

O parafuso de ajuste da TXV atua diretamente sobre a mola interna (P_s), influenciando o grau de superaquecimento. Quando girado no sentido horário (condição de aperto), a tensão da mola aumenta, o que eleva o superaquecimento e reduz o fluxo de refrigerante para o evaporador. Por outro lado, ao girar no sentido anti-horário (condição de afrouxamento), a tensão da mola diminui, resultando em redução do superaquecimento e aumento do fluxo de refrigerante [36, 37].

É importante ressaltar que os ajustes devem ser realizados com cautela. Recomenda-se não exceder meia volta por intervenção, e após cada ajuste, é necessário aguardar um período mínimo de 15 minutos para que o sistema atinja estabilidade e permita uma nova leitura confiável dos parâmetros operacionais [36, 37].

2.5 GÁS R-134A

O gás refrigerante R-134a, também denominado tetrafluoretano, é amplamente utilizado em sistemas de climatização automotiva, bem como em aplicações comerciais, industriais e residenciais. Esse fluido foi desenvolvido como substituto direto do R-12, cuja utilização foi descontinuada em razão de seu elevado potencial de destruição da camada de ozônio. O R-134a pertence à classe dos hidrofluorocarbonos (HFCs) e destaca-se por apresentar baixa toxicidade, não inflamabilidade e elevada eficiência térmica, características que o tornam seguro e eficaz para uso em diversos sistemas de refrigeração [38].

Dentre suas principais aplicações, o R-134a é empregado em sistemas de ar-condicionado automotivo, tanto em veículos leves quanto pesados. Também está presente em equipamentos de refrigeração doméstica, como geladeiras e freezers, além de sistemas de refrigeração comercial e industrial, incluindo chillers e câmaras frigoríficas. Outra aplicação relevante inclui o controle térmico de equipamentos

eletrônicos sensíveis, como data centers e dispositivos embarcados, onde a estabilidade térmica é crítica para o desempenho [38].

3 METODOLOGIA

Toda a coleta de dados foi realizada nas instalações da empresa A, durante a fase de desenvolvimento do projeto XY. Ressalta-se que todas as informações referentes ao projeto e à organização foram tratadas com confidencialidade, respeitando os princípios de sigilo institucional.

Para este estudo, foram consideradas duas configurações experimentais com o objetivo de avaliar os efeitos do ajuste da válvula de expansão termostática (TXV) no comportamento acústico do compressor:

1. Condição original de projeto, sem ajustes;
2. Condição modificada, com o afrouxamento da TXV em meia volta.

Os testes foram conduzidos com base nas normas internas da empresa A para avaliação de desempenho acústico veicular em regimes de aceleração/desaceleração e sob funcionamento do sistema HVAC. Todos os ensaios ocorreram em condições controladas, com pista seca e o veículo operando em marcha lenta (idle). A pressão dos pneus foi mantida nos valores nominais: 33 psi nas rodas dianteiras e 32 psi nas rodas traseiras.

As medições foram realizadas com o uso dos seguintes instrumentos:

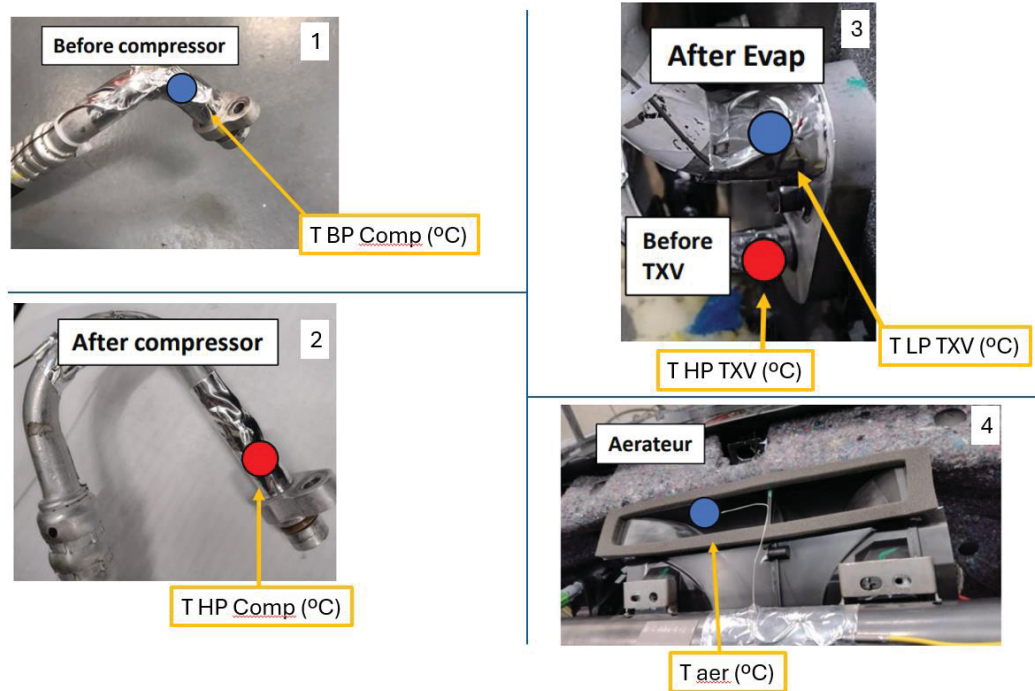
- Sensores de temperatura tipo K;
- Microfones B&K (Brüel & Kjær), adequados para análise de ruído de campo próximo;
- Sistema de aquisição LMS SCADAS (Siemens), utilizado para o registro sincronizado dos sinais acústicos e térmicos.

Os sensores de temperatura foram instalados conforme a Figura 5, nos seguintes pontos do sistema:

1. Tubo de baixa pressão (antes da entrada no compressor);
2. Tubo de alta pressão (após a saída do compressor);
3. Tubo de alta pressão (antes da entrada na TXV);

4. Tubo de baixa pressão (após a saída do evaporador);
5. Saída de ar no aerador.

FIGURA 5 – Posições dos sensores de temperatura

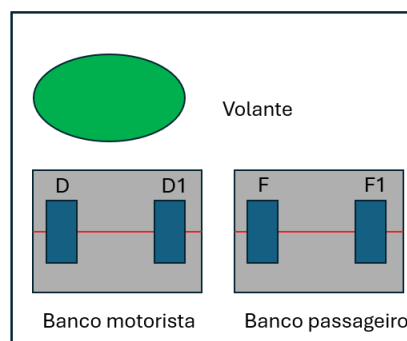


FONTE: O autor (2025)

Os microfones foram posicionados no interior da cabine veicular, conforme apresentado na Figura 6, respeitando a seguinte nomenclatura:

- D: lado esquerdo do motorista;
- D1: lado direito do motorista;
- F: lado esquerdo do passageiro dianteiro;
- F1: lado direito do passageiro dianteiro.

FIGURA 6 – Posições dos microfones



FONTE: O autor (2025)

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nas medições de temperatura estão apresentados no Quadro 1:

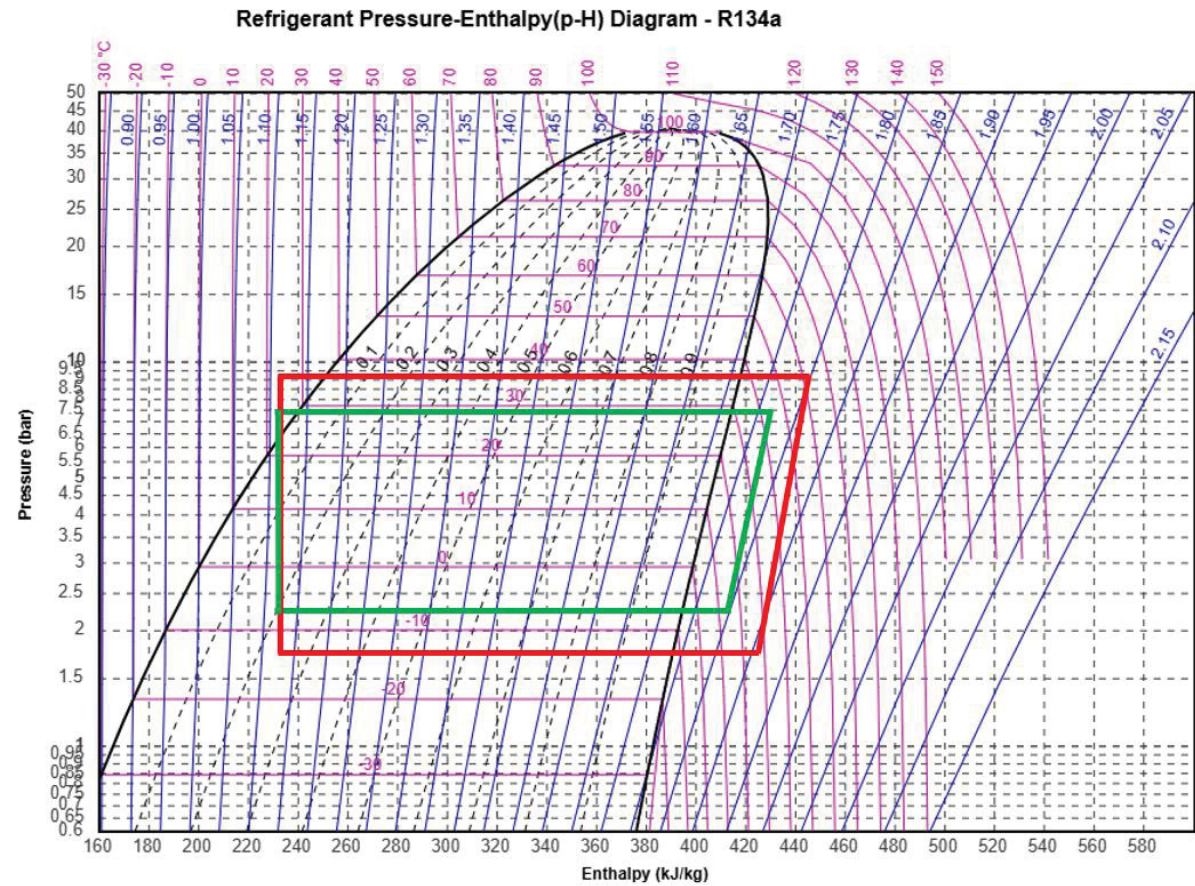
QUADRO 1 – Medições de temperatura e pressão

CONFIGURAÇÃO	HP (bar)	LP (bar)	T BP Comp (°C)	T HP Comp (°C)	T HP TXV (°C)	T LP TXV (°C)	T aer (°C)	Sup TXV	Sup Com
Original (Comp ON)	9,1	1,8	28,8	60,8	21,7	7,6	9,4	8,7	29,9
0,5 turn TXV	7,5	2,3	16	42,7	21,3	8,8	10,4	5,3	12,5

FONTE: O autor (2025)

Os dados obtidos foram plotados no diagrama pressão-entropia (P-h) representado na Figura 7. Observa-se, nesse diagrama, que mesmo com o afrouxamento de meia volta na válvula de expansão termostática (TXV), o fluido refrigerante chega ao compressor totalmente na fase gasosa, evitando assim a ocorrência de calço hidráulico.

FIGURA 7 – Diagrama p-h (as linhas vermelhas indicam a condição original e as verdes representam a condição com a TXV afrouxada em meia volta)



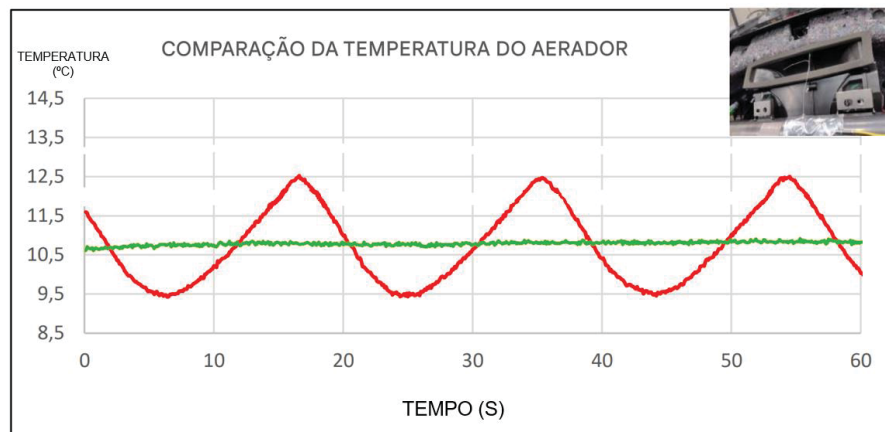
FONTE: O autor (2025)

Com a abertura da válvula de expansão termostática (TXV), observa-se um aumento no fluxo de fluido refrigerante para o evaporador, o que justifica a elevação da pressão nessa região do sistema. No lado do condensador, por sua vez, a pressão tende a apresentar uma leve redução, resultado da diminuição no superaquecimento — uma vez que o compressor passa a comprimir um gás com entalpia mais baixa.

Ainda com base no diagrama da Figura 7, para que o fluido refrigerante atinja condições que possibilitem o ingresso de líquido no compressor (situação que pode causar calço hidráulico), seria necessário que a temperatura caísse até aproximadamente $-6,57\text{ °C}$ na pressão de 2,3 bar. Isso implicaria em uma redução térmica superior a 140%, evidenciando que, nas condições testadas, o fluido permanece integralmente na fase gasosa ao chegar ao compressor.

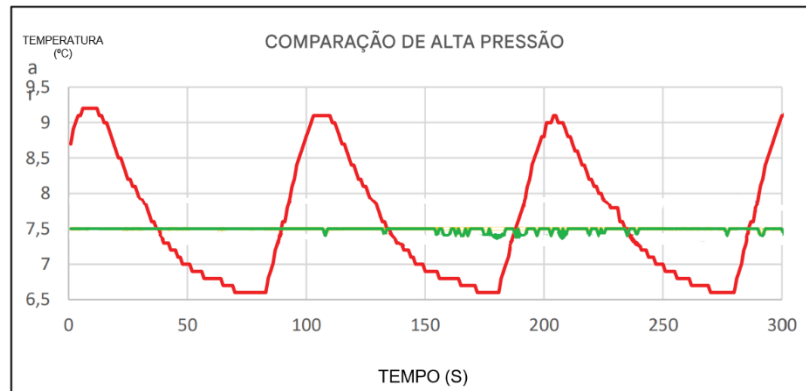
As Figuras 8 a 13 apresentam as medições de temperatura em função do tempo, comparando a condição original do sistema com a situação em que a TXV foi afrouxada em meia volta.

FIGURA 8 – Comparação da temperatura no aerador (as linhas vermelhas indicam a condição original e as verdes representam a condição com a TXV afrouxada em meia volta)



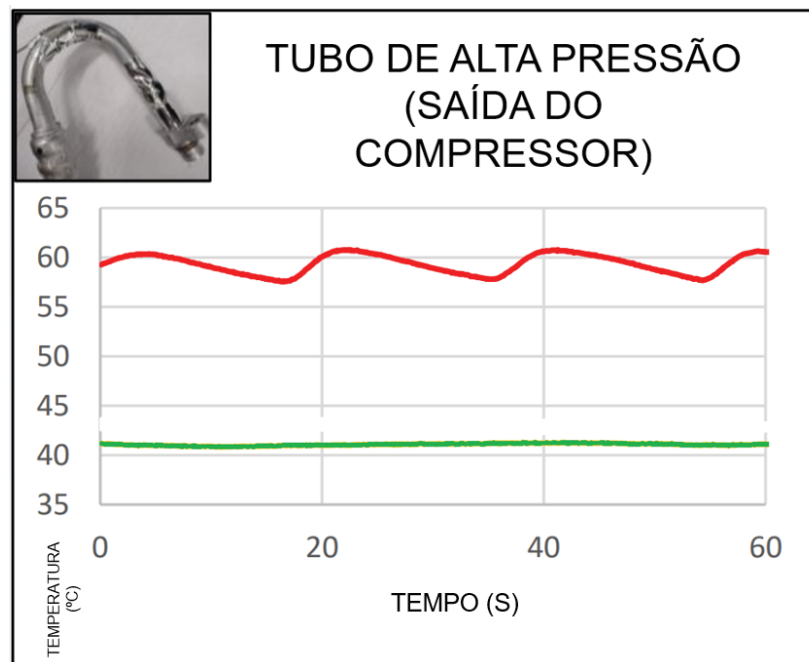
FONTE: O autor (2025)

FIGURA 9 – Comparação da temperatura da alta pressão (as linhas vermelhas indicam a condição original e as verdes representam a condição com a TXV afrouxada em meia volta)



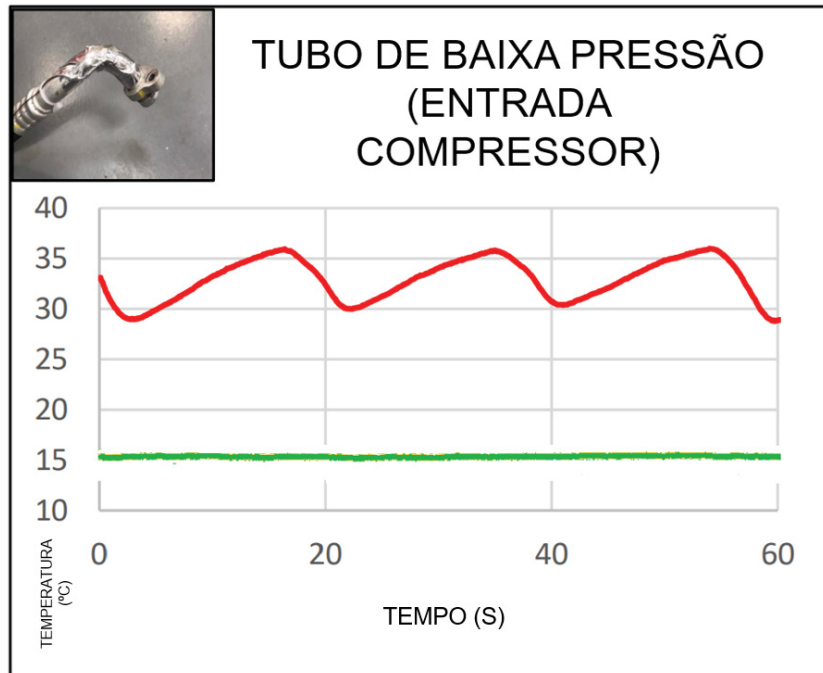
FONTE: O autor (2025)

FIGURA 10 – Comparação da temperatura do tubo de alta pressão (as linhas vermelhas indicam a condição original e as verdes representam a condição com a TXV afrouxada em meia volta)



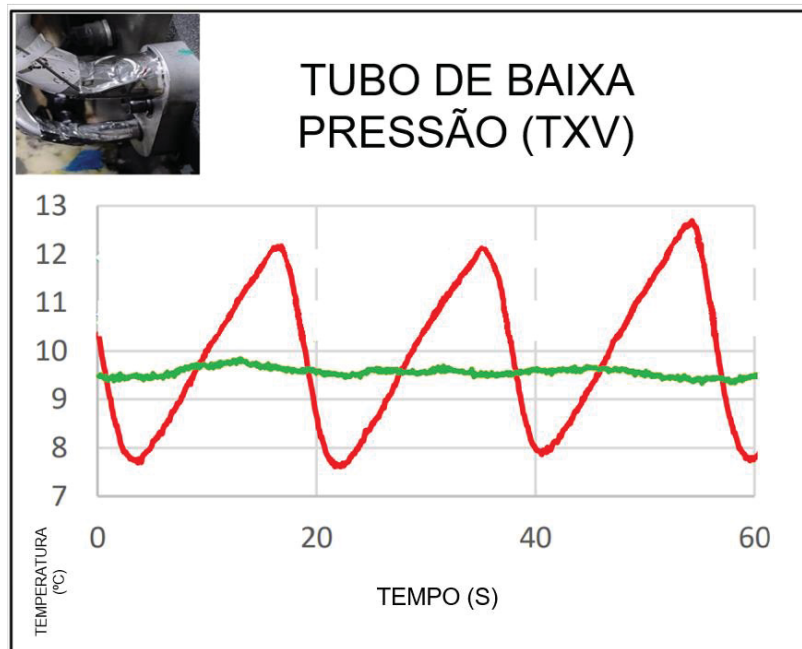
FONTE: O autor (2025)

FIGURA 11 – Comparação da temperatura do tubo de baixa pressão (as linhas vermelhas indicam a condição original e as verdes representam a condição com a TXV afrouxada em meia volta)



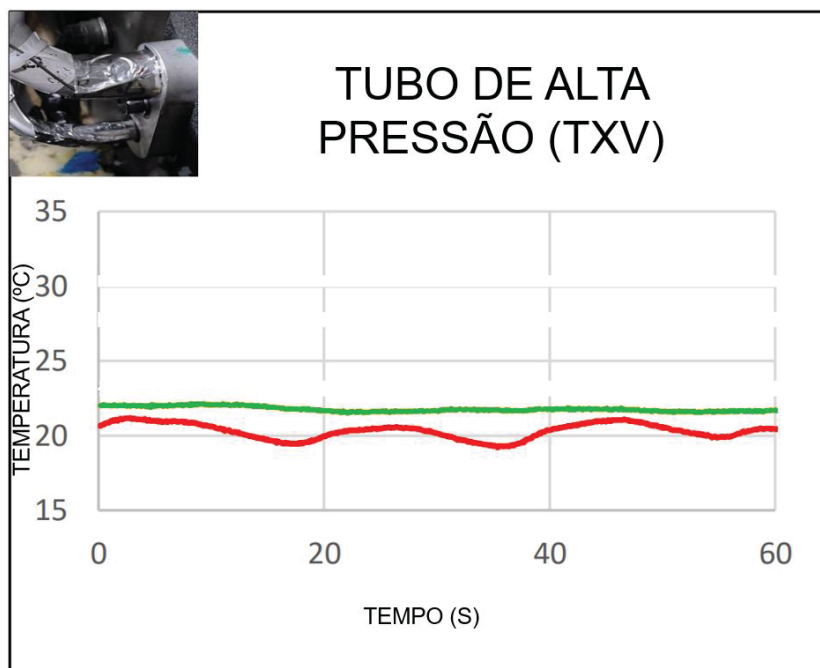
FONTE: O autor (2025)

FIGURA 12 – Comparação da temperatura do tubo de baixa pressão na TXV (as linhas vermelhas indicam a condição original e as verdes representam a condição com a TXV afrouxada em meia volta)



FONTE: O autor (2025)

FIGURA 13 – Comparação da temperatura do tubo de baixa alta na TXV (as linhas vermelhas indicam a condição original e as verdes representam a condição com a TXV afrouxada em meia volta)



FONTE: O autor (2025)

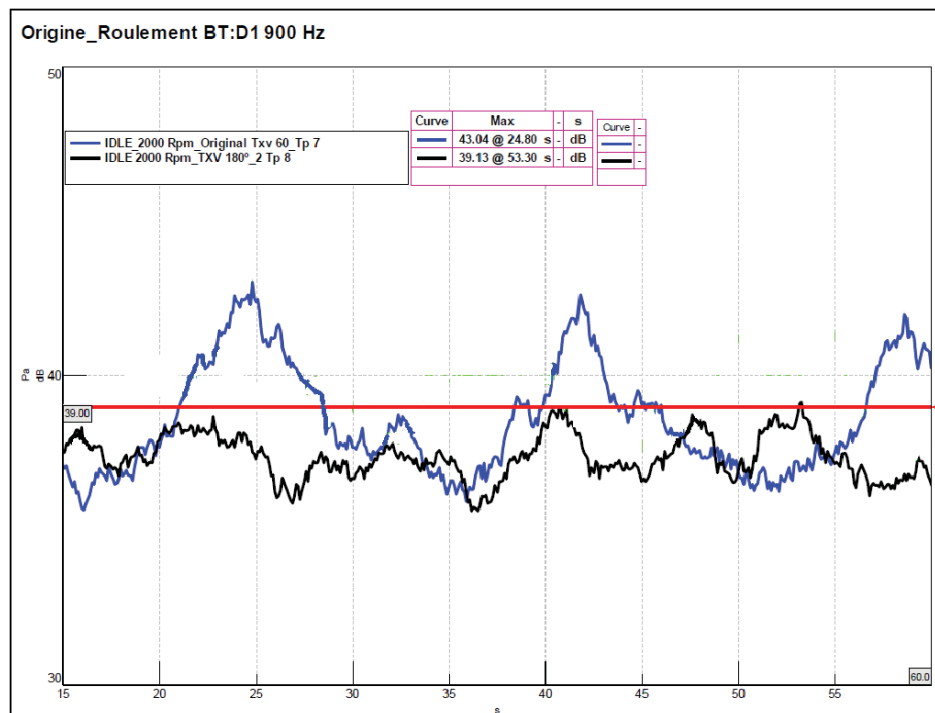
Com base nas Figuras 8 a 13, observa-se que, no sistema original, o compressor apresenta ciclos de operação com intervalo de aproximadamente 20 segundos. Esse comportamento indica um possível superdimensionamento do sistema, uma vez que compressores de velocidade variável são projetados para operar de forma contínua e modulada, sem a necessidade de desligamentos frequentes — justamente para manter a temperatura interna estável.

Essa ciclagem curta e frequente compromete diretamente o conforto térmico dos ocupantes, provocando variações perceptíveis de temperatura no interior do veículo. Conforme mostrado na Figura 8, a temperatura do ar no aerador oscila entre 12 °C e 9,5 °C, o que pode resultar em sensações de frio excessivo ou desconforto intermitente para os passageiros.

Além do impacto térmico, o acionamento repetitivo do compressor gera efeitos mecânicos e acústicos indesejáveis, como vibrações na partida e ruído de alívio de pressão no desligamento. Quando essa frequência de ciclos é elevada, os ruídos tornam-se constantes, comprometendo o conforto acústico da cabine.

A Figura 14 ilustra esse fenômeno, apresentando os níveis de ruído registrados por microfones instalados nas posições D1 do veículo, durante o funcionamento do veículo em idle.

FIGURA 14 – Comparação do ruído na cabine. A linha azul indica a condição original representam a condição com a TXV afrouxada em meia volta)



FONTE: O autor (2025).

A partir da Figura 8 a 14, observa-se que, nos intervalos de 20 segundos em que o compressor realiza ciclos de acionamento e desligamento, o nível de ruído percebido pelos ocupantes no ponto máximo na condição original é 43.04 dB e após o ajuste da TXV cai para a 39.13 dB. Esse comportamento evidencia uma correlação direta entre a frequência de ciclagem do compressor e os níveis sonoros registrados no interior do veículo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos estudos realizados e nos dados disponibilizados pela empresa A, conclui-se que a interação entre o comportamento da válvula de expansão termostática (TXV) e o ciclo de operação do compressor exerce papel fundamental no desempenho acústico e no conforto térmico do sistema de climatização automotiva.

Verificou-se que, na configuração original, o sistema encontra-se possivelmente superdimensionado, uma vez que o compressor variável apresenta ciclagem frequente. Esse comportamento impacta diretamente no aumento dos níveis de ruído percebidos no habitáculo, além de comprometer a estabilidade da temperatura interna.

A oscilação provocada pelos constantes ligas e desligas do compressor contribui para a sensação de desconforto térmico dos ocupantes, podendo resultar em insatisfação quanto ao desempenho do sistema.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se a adoção de válvulas de expansão eletrônicas, as quais possuem maior capacidade de resposta e precisão no controle do fluxo de refrigerante. Tal solução pode minimizar os efeitos de sobredimensionamentos e promover ganhos significativos em eficiência energética, conforto térmico e desempenho acústico do sistema de climatização.

REFERÊNCIAS

- [1] Priede T. Origins of automotive vehicle noise. *J Sound Vib* 1971;15(1):61–73.
- [2] Rahnejat, H.; “Tribology and dynamics of engine and powertrain: fundamentals, applications and future trends,” Elsevier (Ed.) 2010, 2010.
- [3] Panza MA. A review of experimental techniques for NVH analysis on a commercial vehicle. *Energy Proc* 2015;82:1017–23.
- [4] Xue H, Previati G, Gobbi M, Mastinu G. Research and development on noise, vibration, and harshness of road vehicles using driving simulators—a review. *SAE Int J Vehicle Dyn Stab NVH* 2023;7(4).
- [5] Priede T. Noise and vibration problems in commercial vehicles. *J Occup Environ Med* 1967;9(12):640.
- [6] Panza MA. “A review of experimental techniques for NVH analysis on a commercial vehicle. *Energy Procedia*” 2015;82:1017–23.
- [7] Amer M. A novel bionic impeller for laptop cooling fan system. *Results in Engineering*. 2023;1(20):101558.
- [8] Amer M. An innovative noise reduction blower fan housing design used in electronics cooling. *Measurement. Energy*. 2024;1(1):100002.
- [9] Bennouna, S., Matharan, T., and Cheriaux, O., “Automotive HVAC Noise Reduction,” SAE Technical Paper 2018-01-1519, 2018, doi:10.4271/2018-01-1519.

- [10] Sameh M. Metwally, Mohamed I. Khalil, Shawki A. Abouel-seoud "Noise evaluation of automotive A/C compressor" International Journal of Energy and Environment, Volume 2, Issue 3, 2011 pp.505-514.
- [11] Danilevicius A, Karpenko M, Krivanek V. Research on the noise pollution from different vehicle categories in the urban area. *Transport* 2023;38(1):1–11.
- [12] Masri J., Amer M. "A survey of modern vehicle noise, vibration, and harshness: A state-of-the-art", *Ain Shams Engineering Journal* 15 (2024) 102957.
- [13] Wang X, Ren H. Vehicle power-train noise refinement using the Taguchi method. *Int J Veh Noise Vib* 2007;3(3):286–301.
- [14] Calvo JA, Diaz V, San Roman JL. Controlling combustion noise in direct injection diesel engine through mechanical vibration measurement. *Int J Veh Noise Vib* 2005;1(3–4):328–40.
- [15] Yu Y, Yang J. Vibration diagnosis of main journal bearings for diesel engines. *Int J Veh Noise Vib* 2005;1(3–4):265–86.
- [16] Braun ME, et al. Noise source characteristics in the ISO 362 vehicle pass-by noise test: Literature review. *Appl Acoust* 2013;74(11):1241–65.
- [17] Leite RP, Paul S, Gerges SN. A sound quality-based investigation of the HVAC system noise of an automobile model. *Appl Acoust* 2009;70(4):636–45.
- [18] Perisse J. A study of radial vibrations of a rolling tyre for tyre–road noise characterization. *Mech Syst Sig Process* 2002;16(6):1043–58.
- [19] Ling S, et al. A comprehensive review of tire-pavement noise: Generation mechanism, measurement methods, and quiet asphalt pavement. *J Clean Prod* 2021;287:125056.
- [20] Huang HB, et al. Rig test for identifying abnormal noise of suspension shock absorber. *J Vib Shock* 2015;34:191–6.
- [21] Benaziz M, Nacivet S, Thouverez F. A shock absorber model for structure-borne noise analyses. *J Sound Vib* 2015;349:177–94.
- [22] Bogema, D.; Goodes, P.; Apelian, C.; Csakan, M.; "Noise Path Analysis Process Evaluation of Automotive Shock Absorber Transient Noise," SAE International, 2009-01-2091, 2009.
- [23] Qatu MS. Recent research on vehicle noise and vibration. *Int J Veh Noise Vib* 2012;8(4):289–301.
- [24] Crolla DA, Lang AM. Paper VII (i) brake noise and vibration-The state of the art. *Tribology Series* 1991;18:165–74.

- [25] Vadari V, Albright M, Edgar D. An introduction to brake noise engineering. *SV Sound and Vibration* 2001;35(7):14–20
- [26] Bennouna, S., Matharan, T., and Cheriaux, O., “Automotive HVAC Noise Reduction,” SAE Technical Paper 2018-01-1519, 2018, doi:10.4271/2018-01-1519.
- [27] Sameh M. Metwally, Mohamed I. Khalil, Shawki A. Abouel-seoud “Noise evaluation of automotive A/C compressor” *International Journal of Energy and Environment*, Volume 2, Issue 3, 2011 pp.505-514.
- [28] Hammad, N. "Influence of Air Condition Characteristics on Vehicle Interior Noise" Accepted to be published in *International Journal of Vehicle Structures & Systems IJVSS*, 2010.
- [29] Anderson, G. and Hall, T., "Unstructured CFD Reduces Design Cycle for Automotive Air Conditioning and Heating Systems at the Climate Control Division of Ford" *J Journal of Article By Fluent Software Users*, JA006, 1999.
- [30] Tudo sobre Ar Condicionado Automotivo. *Mecanie*, 2024. Disponível em: <<https://mecanie.com.br/artigos/ar-condicionado-automotivo/>> Acesso em: 25 jun. 2025.
- [31] Diferença de compressor deslocamento positivo e compressor dinâmico, 2023. Disponível em: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/wiki/compressed-air-articles/displacement-and-dynamic-compression>. Acesso em: 01 jul.2025
- [32] tecnologia de compressores CVC, 2024. Disponível em: <https://www.delphiautoparts.com/pt-br/centro-de-recursos/artigo/uma-olhada-em-nossa-tecnologia-de-compressores-cvc>. Acesso em: 01 jul.2025
- [33] EMBRACO. O que é calço hidráulico e como evitar. *Blog Técnico Embraco*, 2022. Disponível em: <<https://www.embraco.com/br/blog-tecnico/calco-hidraulico/>>. Acesso em: 04 jul. 2025.
- [34] OLIVEIRA, J. M.; SOUZA, R. F. *Sistemas de refrigeração automotiva: fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2020.
- [35] SILVA, A. C.; MOURA, L. P. Análise de falhas em compressores automotivos: estudo sobre calço hidráulico. *Revista Brasileira de Engenharia Automotiva*, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 45–58, abr./jun. 2021.
- [36] Danfoss. How thermostatic expansion valves work. Disponível em: < https://www-danfoss-com.translate.goog/en-us/service-and-support/case-stories/dcs/how-thermostatic-expansion-valves-work/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc >. Acesso em: 02 jul. 2025.
- [37] OLIVEIRA, Lucas Henrique. Análise do controle do grau de superaquecimento de uma válvula de expansão termostática em sistemas de refrigeração e aquecimento. 2023. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

[38] WEBARCONDICIONADO. Gás refrigerante R-134a: características, aplicações e cuidados. *WebArCondicionado*, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.webarcondicionado.com.br/gas-refrigerante-r134a>>. Acesso em: 04 jul. 2025.

[39] CANAL DA PEÇA. Como funciona o compressor do ar-condicionado?. *Canal da Peça*, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.canaldapeca.com.br/blog/como-funciona-compressor-do-ar-condicionado/>>. Acesso em: 04 jul. 2025.