



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Doutorado - Mestrado

**MÉTODO PARA DETECÇÃO DE ADULTERAÇÃO DO ETANOL NA
GASOLINA AUTOMOTIVA DO TIPO “C” EM TEMPO REAL ATRAVÉS
DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO POR SENSORES PIEZOELÉTRICOS**

por

Vinícius Antônio Abrantes da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do grau de Mestre.

João Pessoa – Paraíba

agosto,2024

VINÍCIUS ANTÔNIO ABRANTES DA SILVA

**MÉTODO PARA DETECÇÃO DE ADULTERAÇÃO DO ETANOL NA
GASOLINA AUTOMOTIVA DO TIPO “C” EM TEMPO REAL ATRAVÉS
DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO POR SENSORES PIEZOELÉTRICOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586m Silva, Vinícius Antônio Abrantes da.

Método para detecção de adulteração do etanol na gasolina automotiva do tipo "C" em tempo real através da análise de vibração por sensores piezoelétricos / Vinícius Antônio Abrantes da Silva. - João Pessoa, 2024.

69 f. : il.

Orientação: Abel Cavalcante Lima Filho.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia mecânica - Combustível. 2. Adulteração de combustível. 3. Sensor piezoelétrico. 4. Comportamento caótico. I. Lima Filho, Abel Cavalcante. II. Título.

UFPB/BC

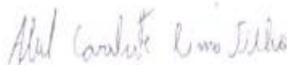
CDU 621(043)

**MÉTODO PARA DETECÇÃO DE ADULTERAÇÃO DO
ETANOL NA GASOLINA AUTOMOTIVA DO TIPO “C” EM
TEMPO REAL ATRAVÉS DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO POR
SENSORES PIEZOELÉTRICOS**

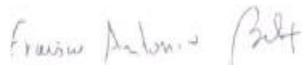
por

VINICIUS ANTONIO ABRANTES DA SILVA

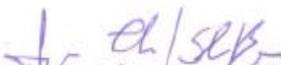
Dissertação aprovada em 30 de agosto de 2024



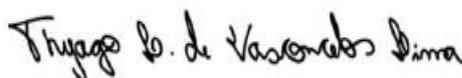
Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho
Orientador – UFPB



Prof. Dr. Francisco Antonio Belo
Examinador Interno – UFPB



Prof. Dr. Jacques Cousteau da Silva Borges
Examinador Externo – IFRN



Prof. Dr. Thyago Leite de Vasconcelos Lima
Examinador Externo – IFPB

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação representa o fim de uma importante etapa da minha vida, e não teria sido possível sem o apoio de muitas pessoas, às quais sou profundamente grato.

Em primeiro lugar, agradeço à minha mãe, pelo amor incondicional, apoio constante e por ser a minha maior fonte de inspiração. Obrigado por sempre acreditar em mim e estar ao meu lado em todos os momentos desta jornada.

À minha namorada, Andressa, meu profundo agradecimento pelo carinho, paciência e suporte emocional ao longo de todo o processo. Você esteve ao meu lado nos momentos mais desafiadores, sempre me incentivando e oferecendo força e compreensão.

Ao meu orientador, professor Abel, deixo meu sincero agradecimento pela orientação, paciência e sabedoria durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua confiança e orientação foram fundamentais para o crescimento acadêmico e pessoal que adquiri ao longo desta trajetória.

Agradeço também a todos os professores que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa, em especial ao professor Cícero e ao Laboratório Lasea, pela valiosa ajuda na condução dos experimentos relacionados às características dos sensores piezoelétricos. Suas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento técnico deste trabalho.

Aos meus colegas de mestrado, que compartilharam comigo os desafios e conquistas dessa jornada, deixo meu mais sincero agradecimento. Em especial, aos amigos Anselmo e Júlio, que estiveram ao meu lado nos momentos mais decisivos, sempre oferecendo apoio e parceria.

A todos, meu muito obrigado!

MÉTODO PARA DETECÇÃO DE ADULTERAÇÃO DO ETANOL NA GASOLINA AUTOMOTIVA DO TIPO “C” EM TEMPO REAL ATRAVÉS DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO POR SENSORES PIEZOELÉTRICOS

RESUMO

Sabe-se que veículos automotivos não possuem dispositivo de segurança capaz de informar sobre a adulteração de combustível, neste trabalho é abordado o desenvolvimento de um meio para que o consumidor tenha ciência sobre a fraude, que implicará em impactos positivos, como: redução de custos de manutenção com o automóvel, ao evitar a deterioração de peças internas; na diminuição dos danos ambientais, pela não alteração da concentração dos gases poluentes produzidos na combustão; além da possibilidade do próprio consumidor avaliar a qualidade do combustível, permitindo a seleção de postos de abastecimento idôneos, que ao terem a qualidade avaliada tão facilmente, espera-se uma diminuição da prática fraudulenta, possibilitando também o combate ao crime de sonegação fiscal tão recorrente. Portanto, o presente estudo desenvolve um método para determinação em tempo real e de forma não invasiva, da adulteração do etanol na gasolina do tipo “C”. O sistema é baseado em um sensor piezoelétrico que adquire o sinal de vibração emitido pelo motor de um veículo em funcionamento, e o sinal é então processado utilizando a técnica de Transformada Rápida de Fourier – FFT. Dessa forma, foi adicionado etanol anidro nas amostras e seu o percentual de etanol na gasolina do tipo “C” teve uma variação de 29% a 45% em 10 amostras para caracterização do comportamento adulterante. Conseqüentemente, foi apresentada uma comprovação de tendência entre a variável de frequência de picos e o percentual de etanol na gasolina do tipo “C”, com coeficiente de correlação de 0,94718.

Palavras chaves – Adulteração de combustível, sensor piezoelétrico, comportamento caótico.

**METHOD FOR DETECTING ETHANOL ADULTERATION IN
AUTOMOTIVE GASOLINE TYPE "C" IN REAL TIME THROUGH
VIBRATION ANALYSIS BY PIEZOELECTRIC SENSORS**

ABSTRACT

It is known that automotive vehicles do not have a safety device capable of informing about fuel adulteration, in this work it is addressed the development of a means for the consumer to be aware of fraud in real time, which implies positive impacts, such as: reduction of maintenance costs with the car, by avoiding the deterioration of internal parts; in the reduction of environmental damage, for the non-alteration of the concentration of polluting gases produced in combustion; In addition to the possibility for the consumer himself to evaluate the quality of the fuel, allowing the selection of suitable filling stations, which by having the quality evaluated so easily, it is expected a reduction in the fraudulent practice, also enabling the fight against the crime of tax evasion so recurrent. The present study develops a method for real-time and non-invasive determination of ethanol adulteration in type "C" gasoline. The system is based on a piezoelectric sensor that acquires the vibration signal emitted by the engine of a running vehicle, and the signal is then processed using the Fast Fourier Transform (FFT) technique. The percentage of ethanol in type "C" gasoline varied from 29% to 45% in 10 samples to characterize the chaotic behavior. Thus, a polynomial trend was demonstrated between the frequency variable and the percentage of ethanol in type "C" gasoline, with a correlation coefficient of 0.93168.

Keywords – Fuel tampering, piezoelectric sensor, chaotic behavior.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
1.1.	OBJETIVOS.....	13
1.1.1.	OBJETIVO GERAL.....	13
1.1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2.	ESTADO DA ARTE	14
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1.	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	18
3.1.1.	VIBRAÇÃO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	22
3.1.2.	INFLUÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS PARA UM MCI.....	24
3.2.	TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT).....	26
4.	METODOLOGIA.....	30
4.1.	INSTRUMENTAÇÃO DO VEÍCULO E EQUIPAMENTOS	31
4.2.	REALIZAÇÃO DAS AQUISIÇÕES DE SINAIS.....	33
4.3.	ANÁLISES DAS AMOSTRAS COLETADAS	35
4.4.	PROCESSAMENTO DE SINAIS DE VIBRAÇÕES	42
4.5.	CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR PIEZOELÉTRICO	42
5.	RESULTADOS	47
6.	CONCLUSÃO.....	60
7.	REFERÊNCIAS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - a) Sistema biela-manivela. b) Pontos mortos do motor. (MARTINS, 2016)	18
Figura 2 – Tempo de admissão.....	20
Figura 3 – Tempo de compressão.....	20
Figura 4 – Tempo de expansão.....	21
Figura 5 – Tempo de escape.	21
Figura 6 - Correlação entre sinal no domínio do tempo e da frequência. (PINTO, 2018) ..	27
Figura 7 – Fluxograma da metodologia utilizada.....	30
Figura 8 – Transdutor piezoelétrico de modelo 7BB-27-4.....	32
Figura 9 – Posicionamento do Sensor Piezoelétrico no Motor.	32
Figura 10 – Veículo instrumentado com equipamento para aquisição de dados.....	34
Figura 11 – Procedimento de leitura do volume da fase aquosa.	36
Figura 12 – Volume final do líquido aquoso presente na amostra 4.	37
Figura 13 – Identificação das amostras pelo método ABNT NBR 13992:15	37
Figura 14 - Sensor flex fuel utilizado para avaliação do combustível.....	38
Figura 15 - Sinal de saída da amostra 10 visto pelo Osciloscópio.	39
Figura 16 – Curva do percentual de etanol vs frequência de saída do sensor flex flue.....	39
Figura 17 – Curva do percentual de etanol vs ordem de aquisições.....	40
Figura 18 – Erro entre a norma ABNT e o sensor Flex Flue.	41
Figura 19 – Esquema da Caracterização do Sensor Piezoelétrico.....	43
Figura 20 – Shaker com “garra” acoplando o sensor piezoelétrico.....	44
Figura 21 – Equipamentos utilizados para caracterização: Shaker, Notebook e Coletor de dados.....	44
Figura 22 – Equipamentos utilizados para caracterização: Fonte, Gerador e Amplificador.	45
Figura 23 – Curva de resposta do sensor piezoelétrico.	46
Figura 24 - Sinais de vibração com longo e curto intervalos adquiridos para diferentes percentuais de álcool para as três amostras.	47

Figura 25 - Sinais de vibração no domínio da frequência para diferentes percentuais de álcool para as três amostras.	51
Figura 26 - Sinais de vibração no domínio da frequência para diferentes percentuais de álcool na faixa de frequência de 0 a 5000 Hz.	54
Figura 27 - Sinais de vibração no domínio da frequência para diferentes percentuais de álcool na faixa de frequência de 900 a 1000 Hz.	55
Figura 28 – Percentual de Etanol versus Frequência.	55
Figura 29 – Curva de regressão linear.	56
Figura 30 – Regressão polinomial de Grau 2.	57
Figura 31 – Curva de regressão de Fourier.	57
Figura 32 - Variação de erro entre experimento e curva de Fourier.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhamento das amostras propostas.....	12
Tabela 2 – Especificações do veículo: Renault Logan 1.6 2017/18.....	31
Tabela 3 – Materiais utilizados para aquisição do sinal de vibração mecânica.	33
Tabela 4 – Materiais utilizados para análise do percentual de etanol na gasolina.	35
Tabela 5 – Tabela resumo com percentuais de etanol com diferentes metodologias.....	41
Tabela 6 – Materiais utilizados para caracterização do sensor piezoelétrico.	43
Tabela 7 – Tabela resumo com erro entre o percentual de etanol do experimento e a curva de regressão de Fourier.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AEAC	Álcool Etanol Anidro Combustível
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CEAR	Centro de Energias Alternativas e Renováveis
DC	Corrente Contínua
EAC	Etanol Anidro Combustível
EHC	Etanol Hidratado Combustível
FFT	Transformada Rápida de Fourier
GPICEEMA	Grupo de Instrumentação e Controle em Estudo de Energia e Meio Ambiente
LPG	Gás Liquefeito de Petróleo
MCI	Motor de Combustão Interna
PMI	Ponto Morto Inferior
PMQC	Programa de Monitoramento de Qualidade dos Combustíveis
PMS	Ponto Morto Superior
<i>Rot</i>	Rotação do Virabrequim
f_{ex}	Frequência de Vibração
n	Número de Cilindros
t	Tempo
τ	Período de Excitação
ω	Frequência Natural

1. INTRODUÇÃO

A gasolina é uma mistura de hidrocarbonetos saturados, olefinicos e aromáticos com moléculas de cinco a treze átomos de carbono e faixa de destilação entre 35°C e 220°C podendo ainda estar combinada a outros compostos (Borsato, 2009). No Brasil, de acordo com aplicação, vários tipos de gasolina são oferecidos aos consumidores, entretanto, os dois tipos mais comuns são a gasolina do tipo “A”, isenta de álcool, e a gasolina do tipo “C”, composta pela gasolina “A” combinada a um percentual de Álcool Etílico Anidro Carburante (AEAC). A gasolina “A” não é vendida diretamente aos consumidores, mas entregue pelas refinarias às distribuidoras que efetuam misturas para formar a gasolina “C”, que por sua vez, as distribuidoras fornecem a gasolina “C” aos postos que comercializam o combustível para utilização em qualquer motor ciclo Otto (BR DISTRIBUIDORA, 2013).

A qualidade dos combustíveis no Brasil é um dos assuntos comentados pela mídia devido a mudanças constantes no preço de mercado internacional e no valor do dólar americano, que coincide também com o aumento das adulterações a fim de se lucrar mesmo em crises econômicas e pandêmicas (SENA, 2022). A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é a instituição responsável por “proteger os interesses dos consumidores quanto a preço, qualidade e oferta de produtos, bem como especificar a qualidade dos derivados de petróleo, gás natural e seus derivados e dos biocombustíveis”, e mantém programas de controle de qualidade de combustíveis líquidos e lubrificantes atuantes em todo território nacional e regulamenta as características destes produtos comercializados no Brasil (ANP, 2015).

Atualmente, as especificações da gasolina comercializada são regulamentadas na Resolução ANP N° 807, de janeiro de 2020, estabelece as características de 4 tipos de gasolinas: gasolinas comum e premium, tipos A e C, parte apresentadas na Tabela 1 (ANP, 2020).

Tabela 1 – Tipos de Gasolina Combustíveis.

Característica	Unidade	Limite				Método de Análise NBR
		Comum		Premium		
		A	C	A	C	
Teor de Etanol Anidro Combustível (EAC)	% volume	<1	27±1	<1	25±1	13992
Massa Específica a 20°C, mín.	kg/m ³	688,9	715	691,5	715	7148/14065
Teor de Enxofre, máx.	mg/kg	-	50	-	50	-
Teor de Metanol, máx.	% volume	0,5	-	-	-	16041

Fonte: ANP 2020.

Segundo o painel dinâmico do Programa de Monitoramento de Qualidade dos Combustíveis (PMQC), foram registrados esse cerca de 1 a 3% de não-conformidades em amostras de gasolina em 2020, sendo que a principal característica não-conforme é o teor de Etanol Anidro Combustível (EAC). Essa não-conformidade pode ocorrer pela adição de solventes (TAKESHIDA, 2008), de tráfico de gasolinas importadas (GODOY, 2013) e adição de Etanol Hidratado Combustível (EHC) (MENDES, 2013). A água também é adicionada como forma de adulterar o combustível, uma vez que apresenta preço baixo e não provoca variação de cor (VELLO, 2017).

Para identificação dessas desproporcionalidades de características dos combustíveis comercializados, os métodos tradicionais para detecção do combustível adulterado requerem análise das amostras em laboratório, sendo todas invasivas, ou seja, utilizam amostras do combustível para realizar análises. Então, a detecção de falhas por análise de vibração parte do princípio de que alguns componentes presentes no motor de veículos automotivos apresentam um funcionamento cíclico, ou seja, se repetem dentro de um determinado intervalo de tempo, liberam energia em forma de vibração e quando peças presentes nesses componentes apresentam defeito, esta energia apresenta outra característica, e para diferentes falhas, diferentes intensidades de vibração são emitidas. E por se apresentarem de forma cíclica, as oscilações produzidas pela peça defeituosa possuem uma frequência predominante, que quando analisados no domínio da frequência, diferem da frequência predominante padrão do funcionamento normal.

Diante disso, o presente trabalho consiste no desenvolvimento de um método para determinação em tempo real e de forma totalmente não invasiva de adulteração de etanol na gasolina. Através de um sistema baseado em um sensor piezoelétrico, em que é adquirido o sinal de vibração emitido pelo motor de um veículo em funcionamento, e o sinal é então processado, e utilizando uma técnica chamada Transformada Rápida de Fourier, pode-se detectar a adulteração da gasolina do tipo “C”.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem objetivo do desenvolvimento de um método para diagnóstico de etanol adulterado na gasolina do tipo “C”, em motor de combustão interna através de metodologia não-invasiva capaz de correlacionar, em tempo real, o comportamento do motor em operação com a composição do combustível.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolvimento de algoritmo computacional para detecção e identificação de características de vibração da queima de etanol nos motores de veículos automotivos baseado na Transformada Rápida de Fourier;
- Validação dos resultados a partir de metodologia experimental.

2. ESTADO DA ARTE

A adulteração de combustíveis (adição de substâncias estranhas ou substâncias permitidas acima das quantidades pré-estabelecidas) é uma prática comum no Brasil. O combate a esse crime contra o consumidor e aos cofres públicos é dificultado pela grande extensão do território nacional. Este procedimento é frequente, apesar do crescente número de operações especiais efetuadas pela Receita Federal e órgãos especializados no combate a esse crime de sonegação fiscal (JANUÁRIO,2011).

Em Chagas (2006) o tema adulteração do etanol foi abordado, sendo desenvolvido um fotômetro NIR portátil para determinar o teor de água em álcool combustível hidratado combustível (AEHC) e o teor de etanol (Álcool etílico anidro carburante) em gasolina. Para a determinação do teor alcoólico em álcool combustível, a resposta é linear na faixa de concentração de 88 a 98% m/m, com um erro médio de 3,6 % para um total de 30 amostras analisadas, quando comparada ao seu respectivo método de referência. Na análise de amostras de gasolina foi obtida uma resposta linear para o teor de etanol entre 20 % e 30 %, com um erro médio de 3,0% para um total de 40 amostras analisadas. A ANP considera até 4% de erro médio e desta forma o instrumento classifica corretamente 100 % das amostras.

Carneiro et al (2008) propôs a utilização de modelos de mínimos quadrados parciais (PLS) baseados em medidas do infravermelho médio por Transformada de Fourier (FT-MIR) e no infravermelho próximo por Transformada de Fourier (FT-NIR) como um método rápido e preciso para avaliar a qualidade do álcool etílico hidratado combustível, bem como para detectar sua adulteração com metanol. Foram preparados oitenta padrões da mistura etanol/metanol/água. Sessenta desses padrões foram usados para a calibração e vinte para validação dos modelos. As amostras de validação também foram analisadas por cromatografia gasosa por detector por ionização de chama (CG-FID) para determinar a quantidade de etanol e metanol. Os resultados mostram que dentre as técnicas espectroscópicas investigadas, o modelo PLS/FT-NIR apresentou o melhor desempenho para a detecção de metanol com um erro quadrado médio aleatório de predição (RMSEP, % m/m) de 0,15 comparado com 0,54 obtido pelo modelo PLS/FT-MIR, enquanto os resultados do CG-FID apresentaram um RMSEP de 0,52 (% m/m). A concentração mínima de metanol detectada com o modelo PLS/FT-NIR foi de 0,51 (% m/m).

Opekar et al (2011) desenvolveu e testou uma sonda de impedância sem contato com uma célula de detecção plana ou tubular, para determinação rápida do teor de etanol na gasolina. As concentrações de etanol obtidas com a sonda de impedância concordam, dentro do intervalo de confiabilidade, com aquelas obtidas por medições GC-MS e caem dentro dos limites recomendados pelo Padrão Europeu apropriado.

Figueiredo et al (2013) utilizou atenuação ultrassônica e velocidade de propagação para detecção de adulterações no etanol e biocombustíveis. Para validar a metodologia, um combustível de etanol comercial foi testado usando o método proposto, bem como o método analítico de cromatografia gasosa (padrão ouro). O resultado foi estatisticamente idêntico para a velocidade de propagação quando comparado ao padrão ouro.

Silva et al (2012) propôs um método analítico para detectar a adulteração de combustível de álcool etílico hidratado com base em espectroscopias no infravermelho próximo (NIR) e no infravermelho médio (MIR) associadas a métodos supervisionados de reconhecimento de padrões.

Pereira et al (2013) fez a determinação simultânea de etanol e metanol em etanol combustível usando voltametria cíclica (VC) em um eletrodo de ouro. O trabalho resultou as seguintes características: custo reduzido, etapas simples de pré-tratamento das amostras (somente diluição ou extração seguida de diluição) e necessidade de usar somente um reagente na análise (NaOH 0,5 mol L⁻¹). Logo, as análises das amostras foram concordantes com os resultados obtidos empregando-se um método comparativo. No entanto, o método proposto é mais simples, rápido e utiliza instrumentação de custo inferior.

Silva et al (2013) propôs um método eletroanalítico simples e de baixo custo para identificar adulteração em amostras de álcool etílico hidratado (HEAF) usando análises multivariadas. A metodologia foi validada em um estudo de caso com amostras de HEAF divididas em duas categorias: (1) não adulteradas e (2) adulteradas com metanol em diferentes níveis de concentração (1,0–13% mm⁻¹). A voltametria foi a técnica eletroquímica empregada. Voltamogramas foram registrados com um eletrodo de cobre em uma solução alcalina. Quatro métodos diferentes de reconhecimento de padrões foram avaliados para classificação dos voltamogramas resultantes: análise discriminante de mínimos quadrados parciais (PLS-DA); análise discriminante linear (LDA) com seleção de variáveis pelo algoritmo de projeções sucessivas (LDA/SPA), algoritmo genético

(LDA/SPA) e uma formulação passo a passo (LDA/SW). Os melhores resultados foram obtidos com os modelos LDA/GA e LDA/SW, nos quais todas as amostras de predição foram classificadas corretamente.

Arik et al (2013) investigou as propriedades dielétricas das misturas etanol / gasolina na região espectral terahertz, para determinação do teor de etanol na gasolina. Os resultados sugerem que não há forte interação entre o etanol e as moléculas na gasolina. Concluimos que esta nova abordagem oferece um método simples e útil para determinar a concentração de etanol na gasolina com erro máximo de 3% (por volume).

Quiroga et al (2016) avaliou o comportamento térmico e da cinética de misturas etanol / gasolina, por análise termogravimétrica, a fim de determinar o teor de etanol na gasolina. Na análise dos dados verificou-se que existe sinergismo nas misturas com teor de etanol entre 5% e 30%. Estas misturas também foram as que apresentaram os melhores resultados na potência, para taxas de compressão entre 6:1 a 7:1. Os resultados da análise térmica mostram que as misturas com baixo conteúdo de etanol (até 30%) apresentam maior volatilidade e, possivelmente, esta é característica que melhora a combustão nos motores de ciclo Otto.

Silva et al (2019) considerou que a gasolina padrão é uma mistura líquida dielétrica com cerca de 30 hidrocarbonetos diferentes, e propôs um método não invasivo aplicado à medição da qualidade da gasolina, baseado na variação dos parâmetros elétricos da mistura, utilizando como sensor um ressonador de micro-ondas, uma vez que parâmetros dielétricos variáveis alteram a transmissão de potência em estruturas específicas. O resultado mostrou a viabilidade de construção de um protótipo, com funcionalidade caracterizada e possibilidade de ajuste finos, uma vez que as técnicas para medir a qualidade da gasolina dependerão da resposta e calibração das curvas obtidas do ressonador.

Souza et al (2022) desenvolveu um método para determinação em tempo real e de forma não invasiva, da adulteração de etanol. Um sistema baseado em Arduíno adquire o sinal de vibração emitido pelo motor de um veículo em funcionamento, e o sinal é então processado utilizando uma técnica para extração de características de sinais caóticos denominada densidade de máximos. Observou-se a função de autocorrelação a longo prazo para sinais de vibração obtidos com o motor funcionando a partir de combustível com diferentes percentuais de etanol, que revelou um decaimento a longo prazo que evidencia o

comportamento caótico do sinal. Demonstrou-se uma tendência linear entre a variável caótica SAC-DM e o percentual de etanol na mistura com coeficiente de correlação de 0,96.

Logo, os trabalhos citados descrevem diversas pesquisas e métodos desenvolvidos para detectar adulteração em combustíveis, especialmente no etanol e na gasolina. Os métodos variam desde técnicas de espectroscopia no infravermelho e análise eletroquímica até o uso de sensores portáteis e sistemas de processamento de sinais em tempo real. As técnicas mencionadas incluem fotometria NIR, voltametria cíclica, impedância sem contato, cromatografia líquida, sensores nanoestruturados, e métodos baseados em análise multivariada e reconhecimento de padrões.

As vantagens dos trabalhos citados oferecem alta precisão na detecção de adulterantes, permitindo também uma avaliação rápida da qualidade do combustível e o desenvolvimento de novas funções para sensores existentes relacionando a aquisição de sinais caóticos, mostra um avanço tecnológico significativo na detecção de adulteração.

Todavia, os estudos podem ser caros e exigir equipamentos especializados, bem como, algumas técnicas requerem um alto nível de especialização para serem operadas e interpretadas corretamente, o que pode limitar seu uso em ambientes de campo e requerem condições controladas podendo ser difíceis de implementar em locais remotos ou sob condições adversas.

No presente trabalho, sua principal vantagem é a detecção de adulteração por um método não invasivo que tem possibilidade da determinação em tempo real, com alta precisão, podendo ser implementado em condições normais de ambiente.

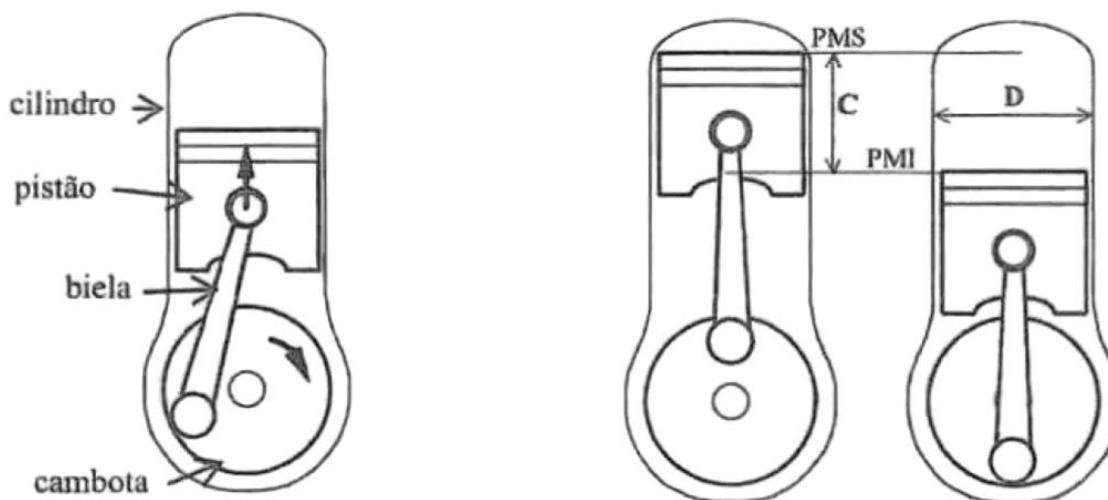
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

O motor de combustão interna (MCI) aproveita o aumento de pressão resultante da combustão da mistura ar-combustível para imprimir um movimento de rotação ao eixo motor. O motor é constituído por cilindros, dentro dos quais deslizam pistões ligados a uma manivela (eixo motor, aqui denominado cambota) pelas bielas, mostrado pela Figura 1 - a). Se fizermos rodar a cambota, os pistões sobem e descem nos diversos cilindros. Inversamente, o pistão submetido a elevadas pressões, faz rodar a cambota. Para que o motor não pare submetido a elevadas pressões, faz rodar a cambota. Para que o motor não pare quando um pistão estiver comprimindo ar num cilindro, ou para que não tenha um andamento muito irregular, uma extremidade da cambota é munida de um volante de inércia, que acumula energia cinética.

O ponto mais alto que o pistão pode atingir dentro do cilindro denomina-se ponto morto superior ou PMS. Ao ponto mais baixo chama-se ponto morto inferior ou PMI. A distância percorrida pelo pistão entre os dois pontos é definida por curso (C). O raio de manivela é igual a metade do curso. A Figura 1 – b) abaixo mostra todas as definições citadas. (MARTINS, 2016)

Figura 1 - a) Sistema biela-manivela. b) Pontos mortos do motor.



Fonte: MARTINS, 2016.

O motor de combustão interna mais comum é o motor a gasolina, que se denomina motor de ignição comandada ou de ignição por faísca, pois a sua combustão inicia-se por uma descarga elétrica elevada tensão dentro da câmara de combustão.

Existem diversos tipos de MCI, estes podem ser classificados de várias formas, entre essas (HEYWOOD, 2018) cita:

Ciclo de trabalho: Motores quatro-tempos - Naturalmente aspirados (admissão de ar sob pressão atmosférica), sobrecarregados (admissão de ar pré-comprimido) e turbo carregados (admissão de ar comprimido através de um compressor movido por turbina de exaustão). Motores dois-tempos - cárter eliminado, sobrecarregados e turbo-carregados.

Combustível: Gasolina, diesel, gás natural, gás liquefeito de petróleo (LPG), álcool (metanol e etanol), hidrogênio, biocombustível.

Método de ignição: Ignição por centelha em motores onde a mistura ar-combustível dentro do cilindro é uniforme e em motores de carga estratificada onde a mistura é não uniforme e ignição por compressão, onde a mistura ar-combustível é comprimida localmente em motores do ciclo Diesel.

Uma vez que o objetivo desse trabalho está relacionado à análise de um motor quatro-tempos de ignição por centelha que opera sob o chamado ciclo Otto, faz-se necessário restringir o escopo do estudo a esse motor em questão. O ciclo fundamental de um motor quatro-tempos é definido através das seguintes etapas:

- **Admissão:** O pistão, no seu movimento descendente, provoca uma depressão no interior do cilindro, o que induz a mistura vinda do sistema de alimentação para dentro do cilindro. Assim se dá o enchimento do cilindro, como o pistão movimentando-se de PMS e PMI. A Figura 2 abaixo, exemplifica o pistão efetuando um curso descendente.

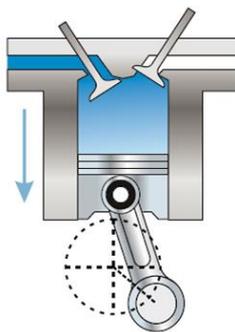


Figura 2 – Tempo de admissão.

- **Compressão:** Com ambas as válvulas fechadas, o pistão sobe do PMI ao PMS, comprimindo os gases que foram admitidos durante a admissão. Esta compressão eleva a temperatura e a turbulência da mistura, vaporizando alguma gasolina que está no estado líquido e homogeneizando a mistura. A combustão será, nestas condições, mais completa, libertando mais calor e uma menor quantidade de produtos não queimados, altamente poluentes. No entanto, a temperatura no final da compressão deverá ficar bastante abaixo da temperatura de autoignição da mistura.

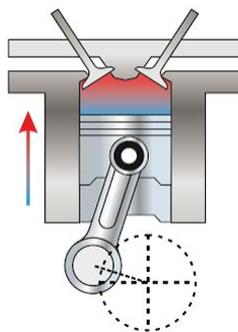


Figura 3 – Tempo de compressão.

- **Expansão:** No momento em que o pistão chega ao fim do curso de compressão (PMS), uma faísca elétrica é lançada entre os eletrodos da vela, na câmara de combustão. A mistura, já aquecida e comprimida, queima rapidamente (explosão). A pressão obtida é muito elevada, o que ocasiona a que o pistão seja empurrado violentamente até o PMI. É esta descida do pistão

que impulsiona o eixo motor, sendo a única altura em que o motor fornece trabalho.

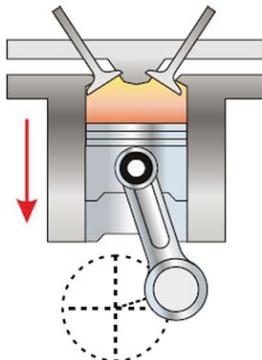


Figura 4 – Tempo de expansão.

- **Escape:** A válvula de escape abre-se no final do tempo motor e os gases queimados escoam-se por ela a grande velocidade. O pistão, no seu movimento ascendente, vai limpar o interior do cilindro dos gases queimados, sendo a válvula de escape fechada com a chegada do pistão ao topo do cilindro (PMS). Depois que evoluírem no sistema de escape, onde as suas ondas sonoras são amortecidas, os gases queimados são descarregados na atmosfera.

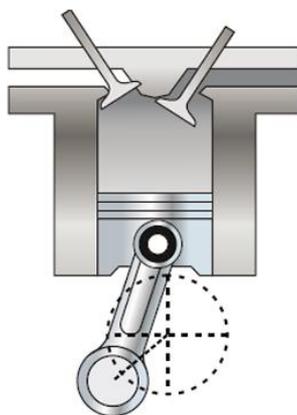


Figura 5 – Tempo de escape.

O ciclo é o conjunto destas quatro fases: admissão, compressão, expansão e escape. Neste tipo de motores, as quatro fases realizam-se em 4 tempos, ou seja, em 4 cursos de pistão, ou 2 rotações. Note-se que em um motor a 4 tempos apenas há um tempo motor, o que ocasiona que um motor monocilíndrico necessite de um grande volante de inércia, capaz de arrastar a cambota durante 3 tempos (1,5 rotações) sem baixar demasiadamente a sua velocidade.

3.1.1. VIBRAÇÃO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Supondo que a vibração do motor é inerente ao trabalho produzido por ele através do giro do eixo de manivelas, pode-se afirmar que, para o motor de 4 tempos, ocorre um ciclo (explosão de todos os cilindros) a cada duas voltas do eixo. Portanto, para obter-se a relação entre a frequência de vibração e a de rotação utiliza-se a Equação 1 (Firmino, 2018).

$$f_{ex} = \frac{Rot}{2 \times 60} n \quad (1)$$

Onde, *Rot* é a rotação do virabrequim em rotações por minuto, *n* é o número de cilindros e *f* a frequência de vibração do motor em Hertz. Outras frequências, além da frequência fundamental do motor (giro do virabrequim), podem ser detectadas devido ao desbalanceamento do conjunto das partes móveis (pistões, bielas, virabrequim etc.) e pode haver frequências harmônicas dependendo da fixação do motor ao chassi do automóvel.

Monteiro (2013) afirma que o motor é a principal fonte de vibração do veículo. A partir do motor, as vibrações são transmitidas para o chassi e, conseqüentemente, sentidas pelos ocupantes do automóvel. As vibrações totais provenientes do motor podem ser divididas, basicamente, em vibração devido ao processo de combustão e vibração devido às forças mecânicas.

- **Vibrações Devido ao Processo de Combustão:** Nesse caso, a vibração é gerada devido à reação de explosão da mistura ar combustível sob altas temperatura e pressão no interior da câmara de combustão. O tipo de

combustível utilizado tem influência direta estabelecendo características particulares para esse tipo de vibração (Monteiro, 2013).

- **Vibração Devido às Forças Mecânicas:** Essas vibrações são causadas, principalmente, pelo impacto dos pistões nas paredes dos cilindros e pelo contato metálico entre as válvulas e as áreas de vedação, no entanto, essas vibrações exercem uma menor influência sobre o sistema que as vibrações causadas pelo processo de combustão (Monteiro 2013).

A análise da vibração do motor pode ser medida pela expansão da série de Fourier, pois é uma função periódica no tempo. Se $x(t)$ é uma função periódica, sua representação por série de Fourier será dada pela Equação 2 (RAO, 2009).

$$X(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(\omega t) + a_2 \cos(2t) + b_1 \text{sen}(\omega t) + b_2 \text{sen}(2\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \text{sen}(n\omega t)) \quad (2)$$

Onde, ω é a frequência fundamental, a_0 , a_1 , a_2 , a_n , b_1 , b_2 e b_n são coeficientes constantes de comprimento e são encontrados de acordo com as Equações 3, 4 e 5.

$$a_0 = \frac{2}{\tau} + \int_0^{\tau} x(t) dt \quad (3)$$

$$a_n = \frac{2}{\tau} + \int_0^{\tau} x(t) \cos(n\omega t) dt \quad (4)$$

$$b_n = \frac{2}{\tau} + \int_0^{\tau} x(t) \text{sen}(n\omega t) dt \quad (5)$$

Onde τ é o período ao qual a excitação se repete.

A Equação 2 determina a resposta harmônica no domínio do tempo, porém, para uma análise mais detalhada e ampla, é necessário obter a resposta do sistema no domínio da frequência.

Há diversas vantagens na realização de análises no domínio da frequência de um sinal, as que se destacam são a facilidade com que a resposta em frequência de um sistema pode ser obtida, a possibilidade de verificar a frequência natural do sistema e fazer o acompanhamento dos esforços ao qual a máquina está sendo submetida.

Ponci (2013) afirma que os sinais variáveis no tempo que excitam os sistemas, como uma perturbação em um sistema, podem ser considerados como um somatório de componentes de frequência. Cada componente de frequência é um sinal senoidal tendo uma certa amplitude e uma certa frequência. A Transformada Rápida de Fourier (FFT) pode ser usada para expressar esses componentes de frequência quantitativamente.

No presente trabalho, as demais fontes de vibração são ignoradas, uma vez que o motor analisado está sendo operado sob circunstâncias estritamente semelhantes, exceto pela variação do percentual de etanol no combustível.

3.1.2. INFLUÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS PARA UM MCI

O tema de combustíveis para um MCI tem sido estudado desde a existência dos motores (GUPTA, 2013). Uma vez que o desempenho do motor depende das propriedades do combustível consumido, é de suma importância estudar as características dos diferentes tipos de combustíveis para compreender o fenômeno da combustão. A natureza do combustível utilizado pode ter uma influência considerável no design, no rendimento, na eficiência, no consumo de combustível, a poluição do ar e, em muitos casos, na confiabilidade e durabilidade do motor. (GUPTA, 2013)

Santana (2013) afirma que o tipo de combustível utilizado tem influência direta estabelecendo características especiais para este tipo de vibração. Normalmente em motores diesel, devido à alta taxa de compressão, as vibrações são mais intensas em comparação com os motores do ciclo Otto.

São diversos os tipos de combustíveis utilizados em motores de combustão interna, porém, tendo em vista os objetivos apresentados anteriormente, o presente trabalho restringiu-se a abordar apenas as características da gasolina e do etanol.

3.1.2.1. A GASOLINA COMBUSTÍVEL

A gasolina é uma mistura complexa que contém mais de uma centena de compostos químicos diferentes. A depender das condições de refino e do tipo de petróleo originário, sua fórmula química varia, apresentando uma composição que pode ser extremamente variável. No mundo inteiro, o padrão para a caracterização das gasolinas são as suas octanagens. As octanagens das gasolinas comercializadas no Brasil estão dentro dos padrões internacionais. A gasolina comum brasileira é equivalente à gasolina “regular” americana e europeia. Da mesma forma, a gasolina “premium” brasileira, tem o mesmo nível de octanagem das gasolinas norte-americana e europeia (FERREIRA, 2003)

Desde os anos setenta que o governo brasileiro começou a adotar a utilização de misturas de etanol na gasolina pura brasileira, tendo como principal fator motivador dessa mudança a crise do petróleo de 1973 (ANFAVEA, 2011). Atualmente a gasolina comercializada no Brasil apresenta uma composição que varia em torno de 27% de etanol anidro e 73% de gasolina pura (tipo A). Dessa forma, a gasolina é caracterizada como gasolina tipo C, ou, também chamada de gasolina comum brasileira. Esse percentual de mistura pode variar de acordo com determinações governamentais, onde os principais fatores determinantes são as ofertas e demandas de cada um dos combustíveis, assim como o controle de preço nas distribuidoras e postos de combustíveis.

3.1.2.2. O ÁLCOOL COMBUSTÍVEL

O etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), ou álcool etílico, pode ser obtido a partir do processamento e fermentação de cana de açúcar, milho, beterraba e batata, entre outros. Na indústria sucroalcooleira brasileira, a cana é a matéria-prima mais utilizada.

O etanol combustível pode ser hidratado (96% v/v) ou anidro (99,6% v/v). O primeiro é comercializado como combustível enquanto o segundo é adicionado à gasolina tipo A, na proporção de 27%, para formação da gasolina tipo C. Em 2015, o Brasil, produziu 16,3 bilhões de litros de etanol hidratado – consumiu 14,8 bilhões e exportou 1,5 bilhão – e 12 bilhões de litros de etanol anidro (UNICA, 2016). A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), órgão regulador de autarquia federal tem como finalidade regular, contratar e fiscalizar as atividades que integram a indústria do petróleo e gás natural e a dos biocombustíveis no país (BRASIL, 2016).

O Brasil se destaca no cenário global como sendo o país com tecnologia mais avançada na fabricação de etanol. A produção mundial desse combustível é da ordem de 40 bilhões de litros – o Brasil é responsável pela fabricação de 15 bilhões de litros, o que o torna o segundo maior produtor mundial (CERQUEIRA, 2020).

Atualmente, de acordo com informações da Petrobrás Biocombustíveis (2016), o etanol brasileiro gerado a partir da cana de açúcar tem o menor custo de produção comparado a produção nos Estados Unidos (EUA) e o maior rendimento em litros por hectare do produto. Todos os seus subprodutos são aproveitados; da fabricação do etanol temos: a vinhaça e a torta de filtro, utilizadas como fertilizantes e com a queima do bagaço da cana de açúcar há a cogeração de energia (HOECKEL, 2018)

3.2. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

A transformada rápida de Fourier decompõe o sinal no domínio da frequência para que sejam determinados componentes com amplitude considerável que estão ligados às características principais que permitem diferenciar um sinal. Isto é feito separando todas as frequências que aparecem no sinal no domínio do tempo e medindo suas intensidades. Após isso, tem-se um espectro que contém maiores pulsos nas frequências mais representativas no domínio do tempo.

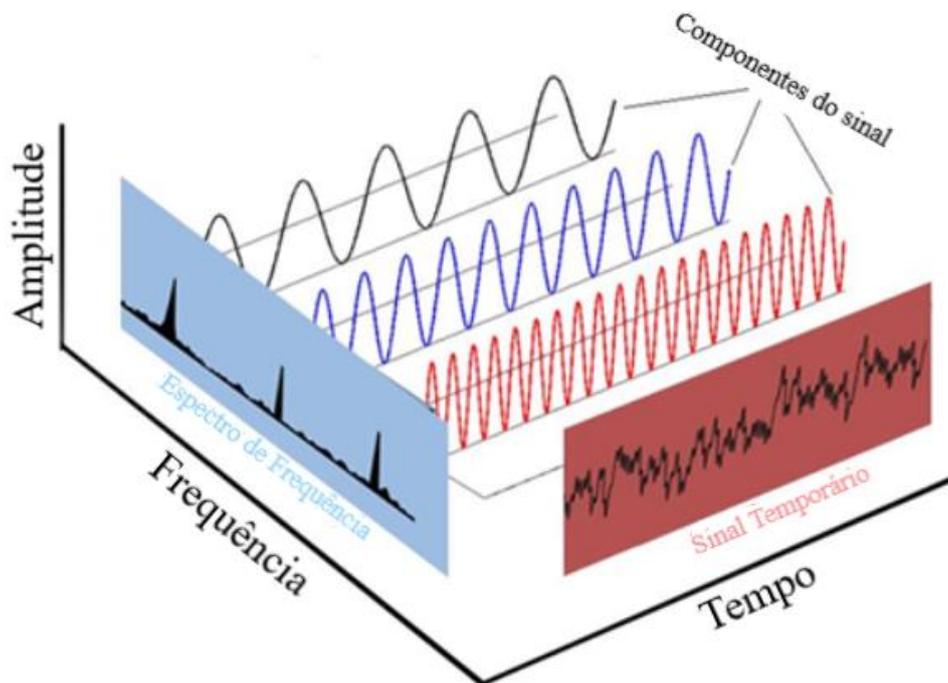


Figura 6 - Correlação entre sinal no domínio do tempo e da frequência. (PINTO, 2018)

De acordo com Smith (1997), a Transformada de Fourier para sinais contínuos é dividida em duas formas. Para sinais contínuos e periódicos no tempo, utiliza-se a Série de Fourier e para sinais contínuos, porém aperiódicos no tempo, é usada a forma da Transformada de Fourier simplesmente chamada de Transformada de Fourier.

A forma trigonométrica da Série de Fourier para um sinal periódico pode ser expressa segundo a Equação 6 (LATHI, 2005), também conhecida como equação de síntese da forma trigonométrica da Série de Fourier:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t)] \quad (6)$$

onde $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ e a_0 , a_k e b_k , os coeficientes de Fourier são expressos de acordo com as Equações 7, 8 e 9, respectivamente.

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) dt \quad (7)$$

$$a_k = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) \cos(k\omega_0 t) dt \quad (8)$$

$$b_k = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) \sin(k\omega_0 t) dt \quad (9)$$

A Série de Fourier em sua forma exponencial é a representação mais utilizada, apresentada na Equação 10, por meio da qual um sinal periódico pode ser representado como uma soma de exponenciais complexas.

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_k e^{jk\omega_0 t} \quad (10)$$

Onde X_k é chamado coeficiente espectral e pode ser obtido pela Equação 11. A série exponencial de Fourier é apenas outra forma da série trigonométrica de Fourier, onde cada senoide de frequência ω pode ser expresso por uma soma de duas exponenciais complexas: $e^{jk\omega_0 t}$ e $e^{-jk\omega_0 t}$.

$$X_k = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) e^{jk\omega_0 t} dt \quad (11)$$

Um sinal aperiódico pode ser expresso como uma soma contínua de exponenciais, aplicando um processo de limitação, ao determinar o período desse sinal como $T_0 \rightarrow \infty$, o mesmo irá se repetir sempre que intervalos infinitos de tempo, assim sua frequência fundamental será $\omega_0 \rightarrow 0$ e o espectral do sinal se tornará contínuo. A soma contínua de exponenciais se torna integral chamada Integral de Fourier, sendo a Integral Direta de Fourier expressa na Equação 12 e a Integral Inversa de Fourier expressa na Equação 13 (LATHI, 2005).

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (12)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (13)$$

Logo, a transformada rápida de Fourier (FFT) é intensivamente utilizada no estudo de problemas que envolvem vibrações aleatórias e seus respectivos parâmetros (Inman, 2008). Bonaldi et al. (2014) mostra, experimentalmente, a inviabilidade da detecção de uma falha em máquinas elétricas rotativas utilizando apenas um sinal no domínio do tempo, sendo bastante complicada a percepção do defeito. Para tanto, realiza-se a Transformada Rápida de Fourier desse sinal e é notório a praticidade de identificar defeitos, devido ao aumento da energia de vibração com o surgimento do defeito em algumas faixas de frequência.

4. METODOLOGIA

Para se ter uma noção mais clara da abordagem da proposta neste trabalho, apresenta-se a Figura 7. Primeiro, foram realizadas a instrumentação do veículo e equipamentos utilizados na realização dos experimentos. Após cada sinal adquirido, realizou-se a análise das amostras de combustíveis para identificação do percentual de etanol em cada aquisição, e por fim, foi realizado o processamento de sinais de vibrações através do software MATLAB.

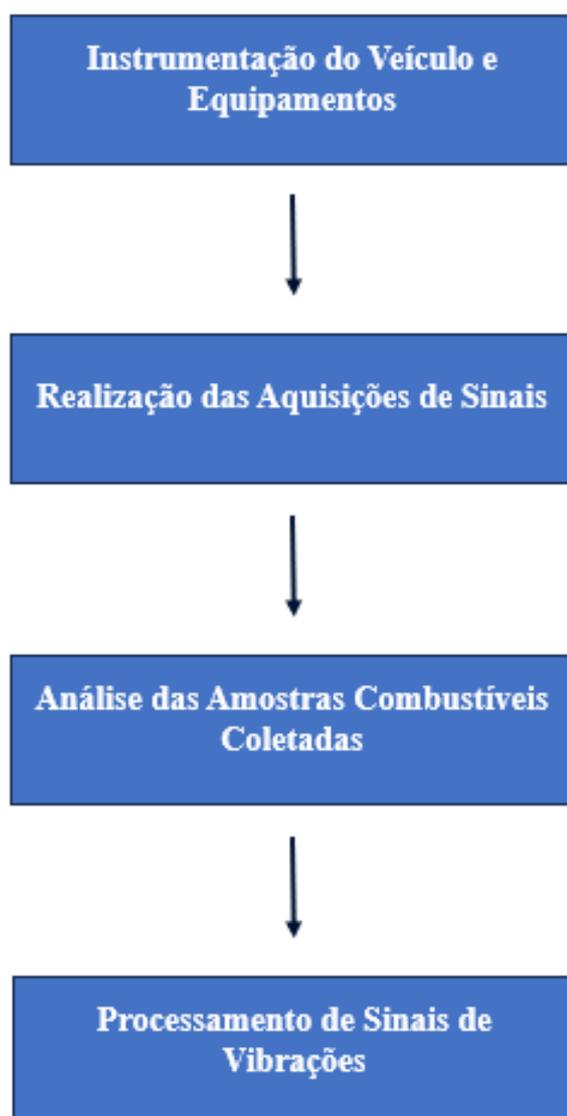


Figura 7 – Fluxograma da metodologia utilizada.

4.1. INSTRUMENTAÇÃO DO VEÍCULO E EQUIPAMENTOS

A primeira etapa do neste estudo foi a parametrização do veículo e equipamentos que foram utilizados. O veículo utilizado para o experimento foi o modelo “Renault Logan 1.6 – 2017/18, e suas especificações técnicas estão descritas na tabela abaixo:

Tabela 2 – Especificações do veículo: Renault Logan 1.6 2017/18.

Versão	1.6 16V Flex Manual de 5 velocidades
Tipo do motor	H4M
Admissão de ar	Aspiração natural
Quantidade de cilindros	4 unidades em linha
Tipo de combustível	Sistema FLEXFLUEL
Cilindrada (cm ³)	1.598
Diâmetro do cilindro (mm)	78
Curso do pistão (mm)	83,6
Toque máximo (kg.m ↔ rpm) gasolina	16 ↔ 4.000
Toque máximo (kg.m ↔ rpm) etanol	16 ↔ 4.000
Potência máxima (cv ↔ rpm) gasolina	115 ↔ 5.500
Potência máxima (cv ↔ rpm) etanol	118 ↔ 5.500
Velocidade angular do motor em marcha lenta (rpm)	750 ±50

O sensor utilizado para a aquisição dos sinais foi um transdutor piezoelétrico de modelo 7BB-27-4 do fabricante Murata (Figura 8), e seu posicionamento no motor do veículo está sendo apresentada na Figura 9.



Figura 8 – Transdutor piezoelétrico de modelo 7BB-27-4.



Figura 9 – Posicionamento do Sensor Piezoelétrico no Motor.

4.2. REALIZAÇÃO DAS AQUISIÇÕES DE SINAIS

A aquisição de sinais de vibração mecânica do motor foi realizada no dia 01 de maio de 2024, na área externa do laboratório do Grupo de Instrumentação e Controle em Estudo de Energia e Meio Ambiente (GPICEEMA), localizado no Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) da UFPB.

Para obtenção de dados procedentes de aquisições de sinais do veículo automotivo, foi definido a aquisição de 10 amostras, começando pela primeira aquisição que corresponde ao combustível presente no tanque, sem adulteração por etanol em laboratório. Da segunda a nona aquisição foram adicionados 500 ml de álcool etílico absoluto e na décima foi adicionado 1000 ml, resultando em 5000 ml de etanol no abastecimento original do tanque.

Após essa definição, realizou-se 3 obtenções de sinais de vibração mecânica a uma frequência de amostragem de 30 kHz pelo período de 1 minuto para cada amostra, variando assim, o percentual de etanol na gasolina do tipo “C”. Para tal atividade, os materiais utilizados estão descritos na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Materiais utilizados para aquisição do sinal de vibração mecânica.

Código	Descrição	Quantidade
14	Sensor Piezoelétrico	1 unidade
15	Computador com software Labview	1 unidade
16	Dispositivo de Aquisição USB-6215	1 unidade
06	Fonte de alimentação DC	1 unidade

Então, o procedimento para as aquisições foi realizado com os seguintes passos:

- 1) O primeiro passo foi a partida do motor, acelerando-o em marcha lenta a fim de promover a alimentação do sistema de injeção com nova mistura de combustível;
- 2) Após alguns segundos, o veículo foi desligado para que a aquisição dos dados fosse retomada desde a partida do motor, dessa vez com o combustível atual;

- 3) Após aguardar a estabilização da temperatura do motor e verificar as condições de todos os sensores, a partida foi reiniciada;
- 4) Após esse período, o motor foi desligado e uma amostra do combustível foi retirada para análise do seu percentual de etanol (tópico abordado na seção 4.3);
- 5) Em seguida, 500 ml de EHC foram adicionados diretamente ao tanque de combustível, aumentando o percentual de etanol na mistura. Com exceção da última rodada de aquisições, onde foram adicionados 1000 ml de EHC, buscando alcançar maiores percentuais de etanol;
- 6) Feito isso, o carro foi chacoalhado por alguns segundos, buscando promover uma mistura mais homogênea entre o etanol e a gasolina, dentro do tanque de combustível;
- 7) Nessas condições, o veículo estava apto a iniciar uma nova rodada de experimentos, desde o item 1.



Figura 10 – Veículo instrumentado com equipamento para aquisição de dados.

4.3. ANÁLISES DAS AMOSTRAS COLETADAS

Após a etapa do capítulo anterior, foram coletadas 10 amostras que faz referência a adição de EHC, aumentando o percentual de etanol na gasolina. As provas passaram por dois tipos de análise de concentração de etanol: Norma da ABNT 13992 (Gasolina automotiva – Determinação de etanol anidro combustível (EAC) e através do sensor flex fuel da Continental.

As análises foram feitas em até dois dias, a fim de evitar degradação do combustível. Para tal ensaio, os materiais utilizados estão descritos na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 – Materiais utilizados para análise do percentual de etanol na gasolina.

Código	Descrição	Quantidade
01	Álcool Etílico Absoluto P.A.	10 Litros
02	Água destilada	1 Litro
03	Solução aquosa de cloreto de sódio	10% m/v (1 L)
04	Proveta de vidro de 100 ml	3 unidades
05	Sensor Flex Fluel	1 unidade
06	Fonte de alimentação DC	1 unidade
07	Estufa	1 unidade
08	Seringa de vidro	10 ml
09	Funil	2 unidades
10	Recipientes de 1 L para armazenar combustível	10 unidades
11	Pipeta Graduada	2 unidades
12	Béquer de vidro	1 unidade

Então para a determinação de percentual de etanol, realizou-se primeiro a análise pela norma ABNT NBR 13992:2015, onde foi retirado 50 ml de cada amostra e colocado na proveta para adição da solução de cloreto de sódio até completar o volume de 100 mL.

Portanto, houve o tamponamento da proveta e ocorreu a inversão por 10 vezes para extrair o etanol da gasolina. Logo, após o fluido estar em repouso por 10 minutos em uma

superfície plana e nivelada, é possível realizar a leitura da fase aquosa observando a base inferior do menisco formado na interface entre a fase aquosa e a gasolina, com os olhos posicionados na mesma altura da linha de interface, conforme mostrada na Figura 11 abaixo.

Desse modo, através da leitura da fase aquosa foi possível determinar o teor de EAC (Etanol Anidro Combustível) presente na amostra utilizando a seguinte equação:

$$\% \text{ em volume de EAC} = [(A - 50) \times 2] + 1 \quad (14)$$

Onde: A é o volume final da fase aquosa expresso em mililitro (mL).

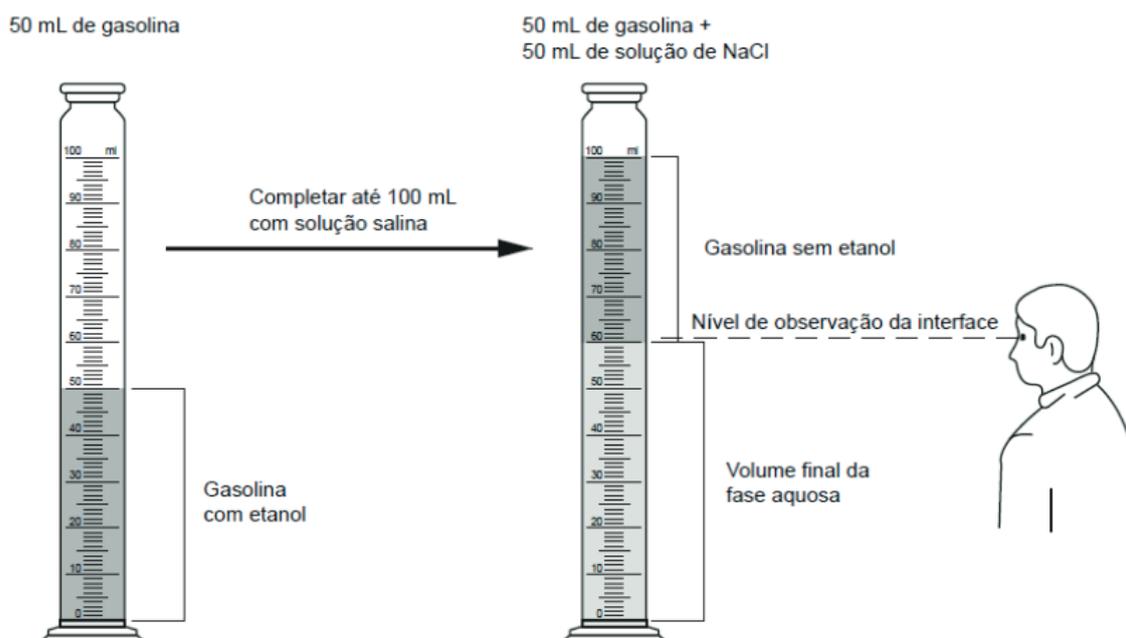


Figura 11 – Procedimento de leitura do volume da fase aquosa.

Conseqüentemente, esse método se repetiu para todas as 10 amostras e como exemplo: para a amostra 4, a leitura observada para o volume final da fase aquosa foi de aproximadamente 67 mL, de acordo com a Figura 12 abaixo. Por conseqüência através da Equação 14, determinou-se o teor de EAC presente na amostra totalizando 35%.



Figura 12 – Volume final do líquido aquoso presente na amostra 4.

Através da Figura 13 abaixo, podemos ver o resultado do ensaio realizado, onde o eixo “Y” representa o percentual de etanol na gasolina pelo método da ABNT NBR 13992:15 e o eixo “X” representa a amostra coletada.

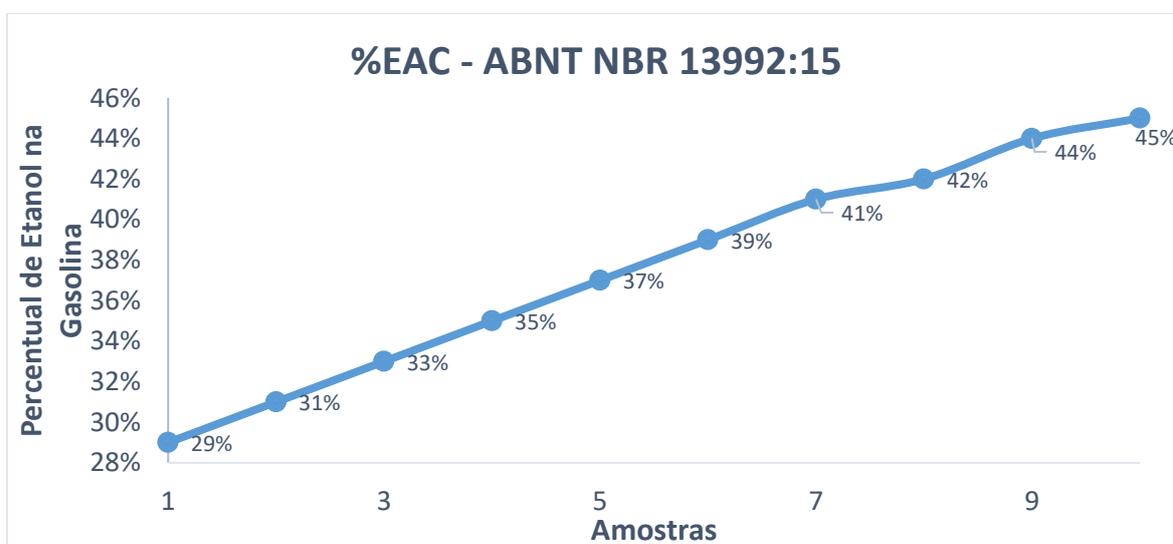


Figura 13 – Identificação das amostras pelo método ABNT NBR 13992:15

Em sequência, o método do sensor flex fuel da Continental foi utilizado para análise do combustível. Seu conceito consiste em um dispositivo que faz captação de um sinal que retorna com uma determinada frequência, em Hertz, através da amostra adicionada e assim é determinada o percentual de etanol na mistura. Na Figura 14 abaixo, é possível notar todos os componentes utilizados para esse método que foram descritos na Tabela 4. Para exemplificar, na Figura 15 o osciloscópio indica uma frequência média de 93,54 Hz referente a amostra 10, e para converter essa frequência de saída e calcular o valor de EAC da prova, foi utilizada a equação de reta determinada através do gráfico fornecido pelo fabricante do sensor flex flue, conforme mostrado na Figura 16.

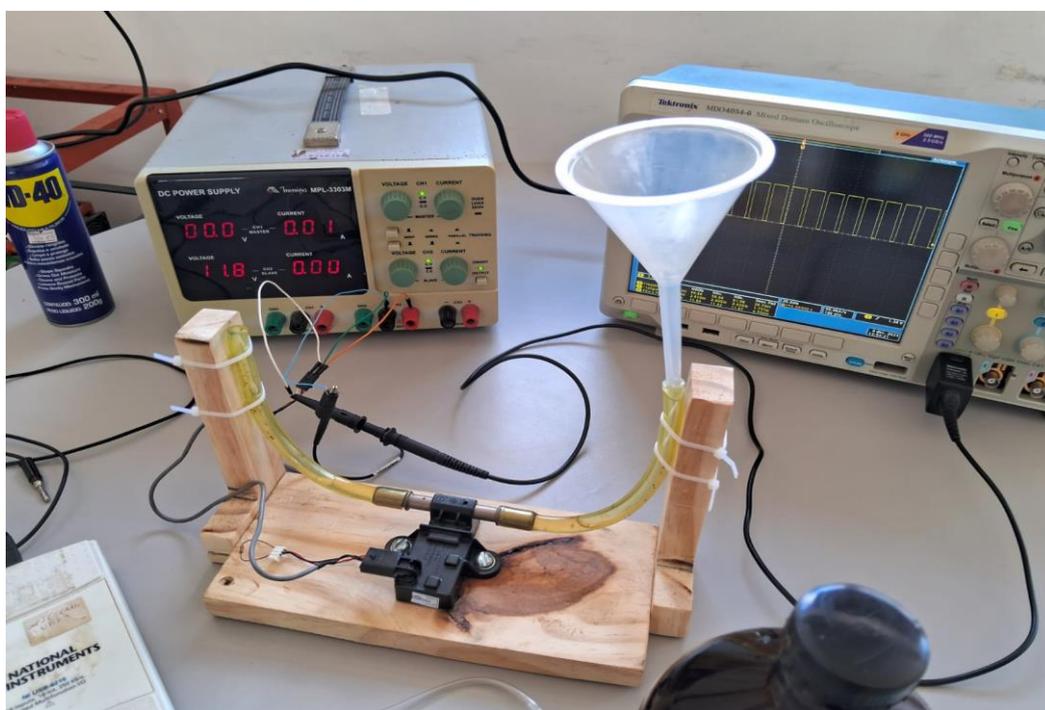


Figura 14 - Sensor flex fuel utilizado para avaliação do combustível.

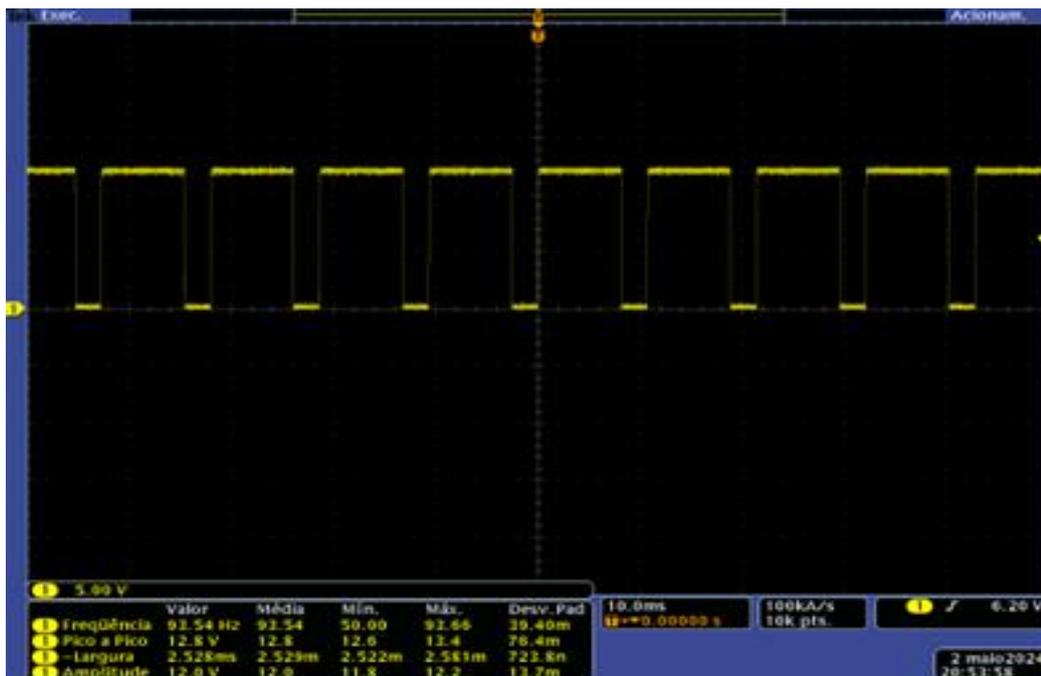


Figura 15 - Sinal de saída da amostra 10 visto pelo Osciloscópio.

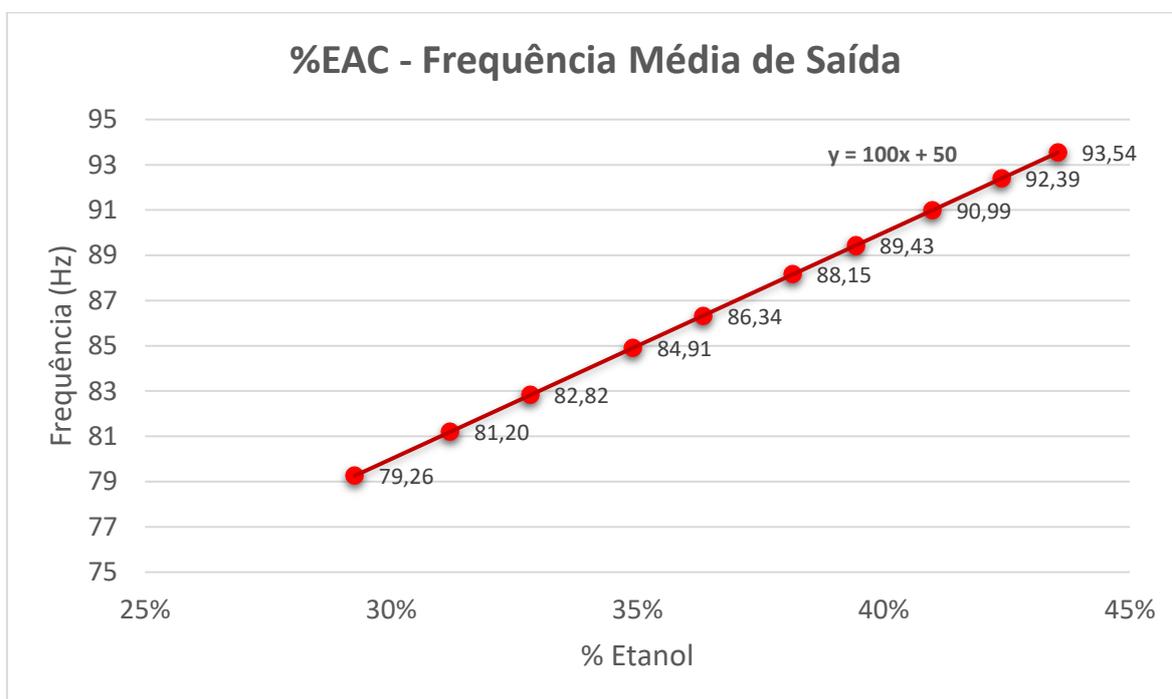


Figura 16 – Curva do percentual de etanol vs frequência de saída do sensor flex flue.

Através da Figura 17 abaixo, podemos ver o resultado do ensaio realizado, onde o eixo “Y” representa o percentual de etanol na gasolina pelo método do sensor Flue Flex e o eixo “X” representa a amostra coletada.

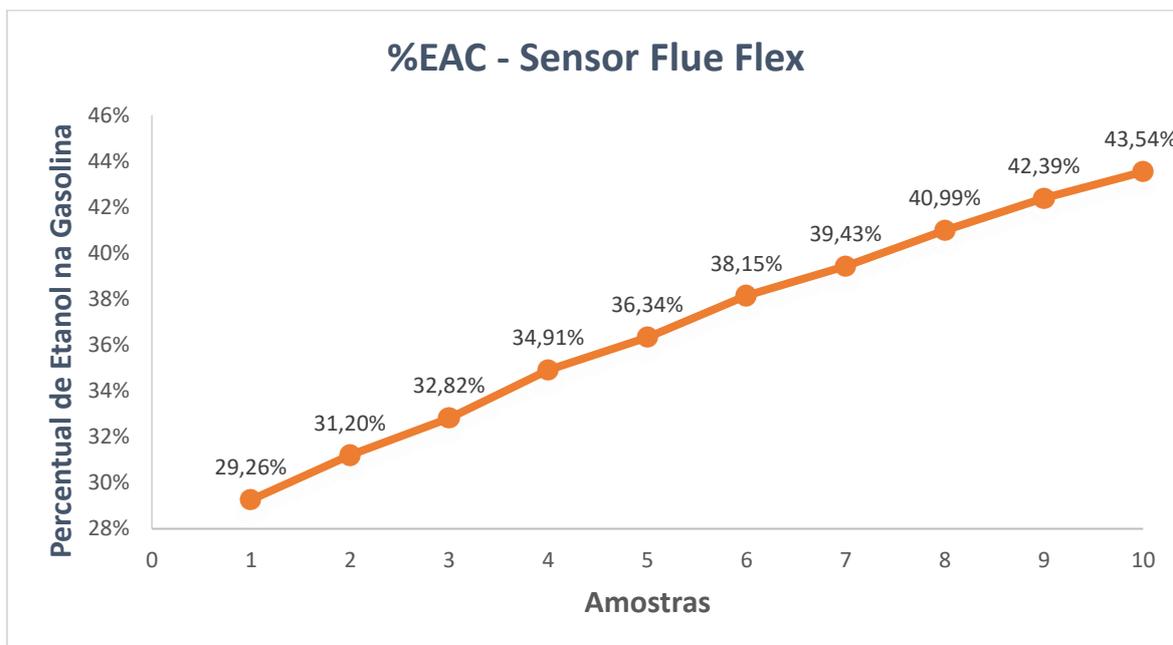


Figura 17 – Curva do percentual de etanol vs ordem de aquisições.

A Tabela 5 apresenta os dados obtidos através dos dois métodos: ABNT NBR 13992:15 e sensor Flue Flex, incluindo o erro entre as duas metodologias.

Tabela 5 – Tabela resumo com percentuais de etanol com diferentes metodologias.

Amostra	%EAC – ABNT NBR 13992	Frequência (Hz)	%EAC – Sensor Flue Flex	Erro
1	29%	79,26	29,26%	-0,26%
2	31%	81,20	31,20%	-0,20%
3	33%	82,82	32,82%	0,18%
4	35%	84,91	34,91%	0,09%
5	37%	86,34	36,34%	0,66%
6	39%	88,15	38,15%	0,85%
7	41%	89,43	39,43%	1,57%
8	42%	90,99	40,99%	1,01%
9	44%	92,39	42,39%	1,61%
10	45%	93,54	43,54%	1,46%

Desse modo, a Figura 18 mostra as informações relativas ao erro entre as metodologias.

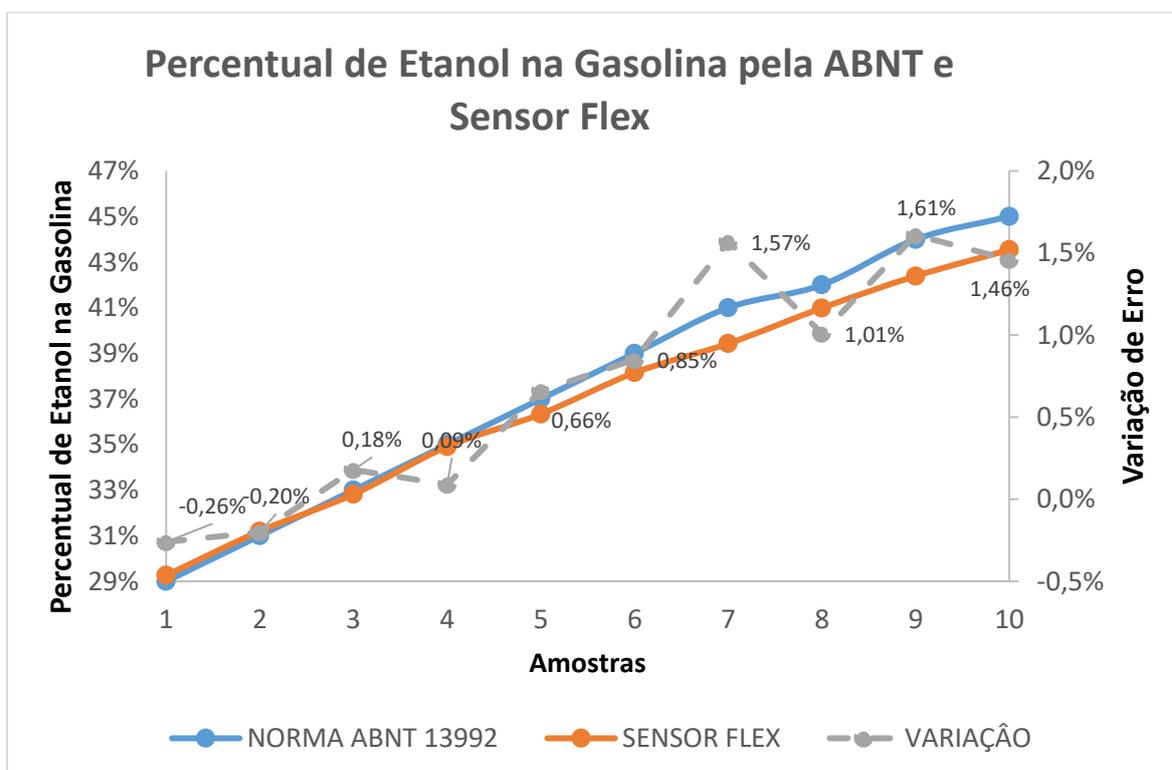


Figura 18 – Erro entre a norma ABNT e o sensor Flex Flue.

Notou-se uma tendência de aumento do erro entre as duas abordagens, conforme o %EAC aumentava. Contudo, como o erro encontrado é menor que 3%, considerou-se que o uso da norma ABNT NBR 13992:15 garante confiabilidade quanto ao percentual de etanol na mistura, e, portanto, aos resultados do presente estudo.

4.4. PROCESSAMENTO DE SINAIS DE VIBRAÇÕES

Após a realização dos experimentos, os dados adquiridos de vibração foram depositados em uma pasta do serviço de armazenamento em nuvem *GoogleDrive* em formato de arquivo de texto, isso permitiu a leitura desses arquivos através do software MATLAB, do qual o autor possui uma licença para uso acadêmico.

Todo o processamento dos dados foi realizado através desse software, desde a leitura e filtragem dos sinais até a geração de gráficos.

Buscando facilitar o entendimento do presente estudo, a seguinte nomenclatura foi adotada para nomear cada sinal aquisitado:

$$EPn$$

Onde E representa "Etanol", P representa o número do percentual de etanol presente na respectiva mistura e n representa o número do teste realizado, lembrando que foram realizados três testes para cada amostra.

Dessa forma, $E45_2$ representa o sinal do segundo teste com a amostra de 45% de etanol na mistura.

4.5. CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR PIEZOELÉTRICO

Para validação dos resultados, foi realizado a caracterização do sensor piezoelétrico utilizado na captação de vibração. A Figura 19 abaixo, mostra o esquema que foi utilizado e a Tabela 6 mostra os equipamentos com seus respectivos modelos.

Na Figura 20, é mostrado como a pastilha do sensor piezoelétrico foi acoplada ao Shaker, onde foi fabricado uma “garra” para simular a mesma situação que o sensor foi posicionado no experimento com o veículo.

Nas Figuras 21 e 22, é mostrado os equipamentos utilizados no laboratório LaSEA localizado na Universidade Federal da Paraíba.

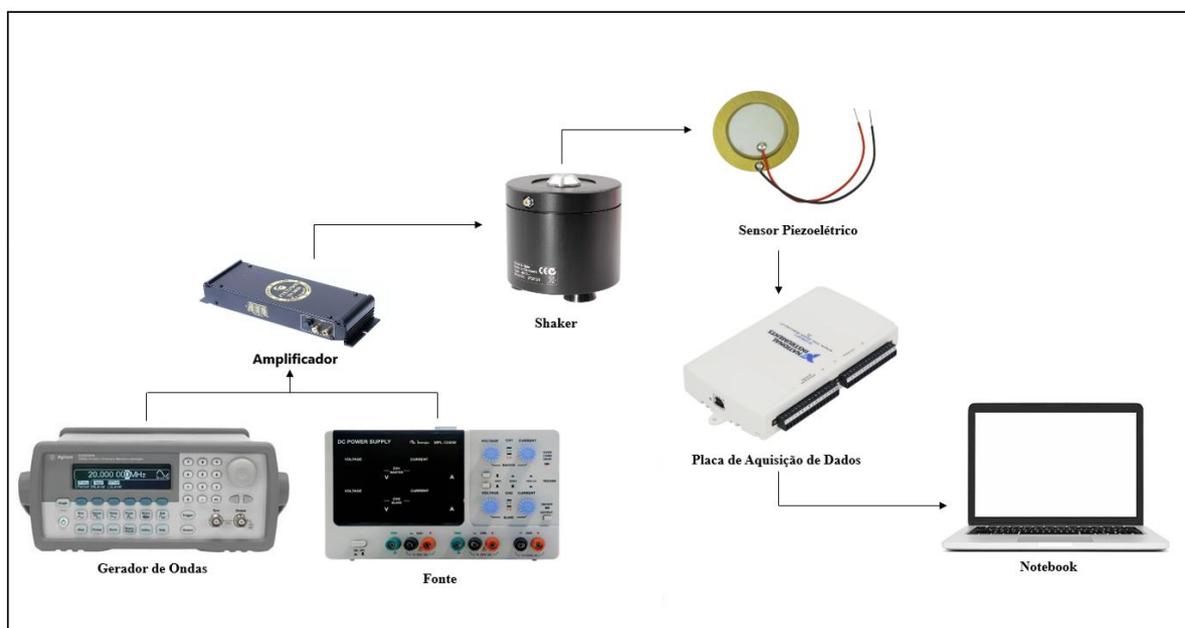


Figura 19 – Esquema da Caracterização do Sensor Piezoelétrico.

Tabela 6 – Materiais utilizados para caracterização do sensor piezoelétrico.

Código	Descrição	Quantidade
06	Fonte de alimentação DC – MPL-3303M	1 Unidade
17	Gerador de Ondas – 33220 ^a	1 Unidade
18	Amplificador – TH2030	1 Unidade
19	Mini Shaker – DK-2850	1 Unidade
15	Computador com software Labview	1 Unidade
16	Dispositivo de Aquisição NI - USB-6215	1 Unidade
14	Sensor Piezoelétrico	1 Unidade

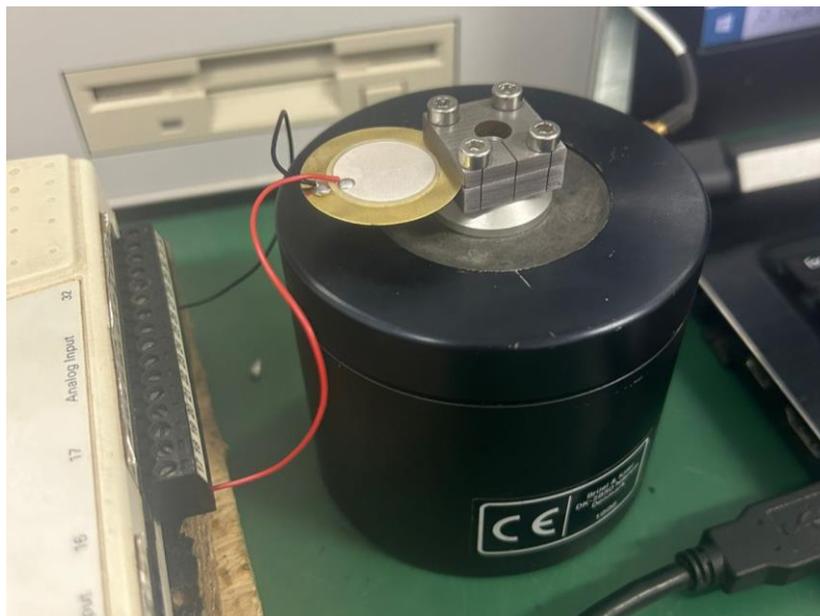


Figura 20 – Shaker com “garra” acoplado o sensor piezoelétrico.



Figura 21 – Equipamentos utilizados para caracterização: Shaker, Notebook e Coletor de dados.

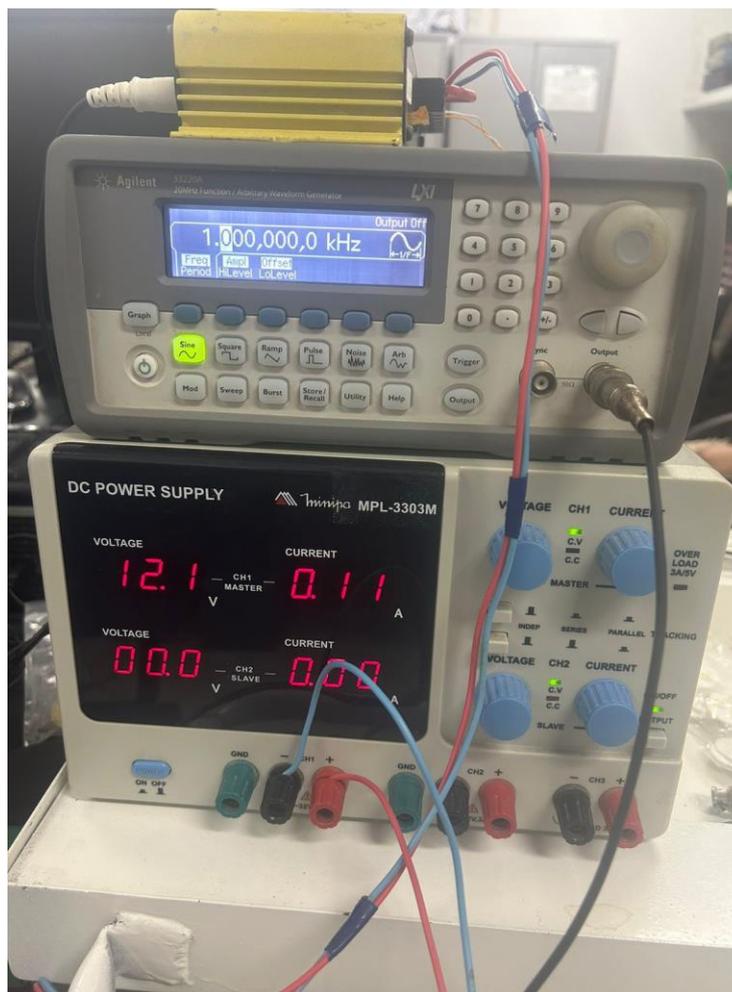


Figura 22 – Equipamentos utilizados para caracterização: Fonte, Gerador e Amplificador.

Para caracterização do sensor, o gerador de ondas foi configurado para causar vibrações de 20 a 2020 Hz, intercalando em 50 Hz. Essa metodologia foi utilizada em 4 pastilhas piezoelétricas diferentes.

Na Figura 23, é apresentada a curva de resposta do sensor piezoelétrico, e é possível ver a região de uso, parte mais linear do gráfico. É nessa parte linear de resposta que se garante uma razão fixa entre sinal de saída do sensor ao estímulo imposto ao sensor (GEVAERD, 2019).

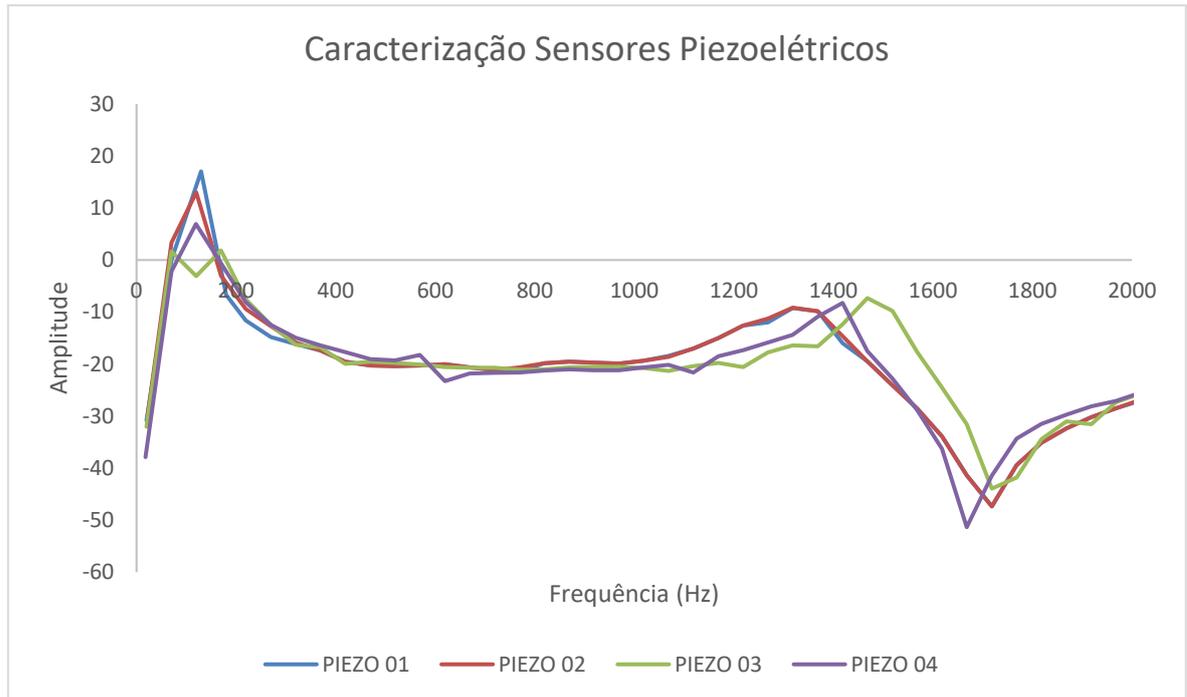
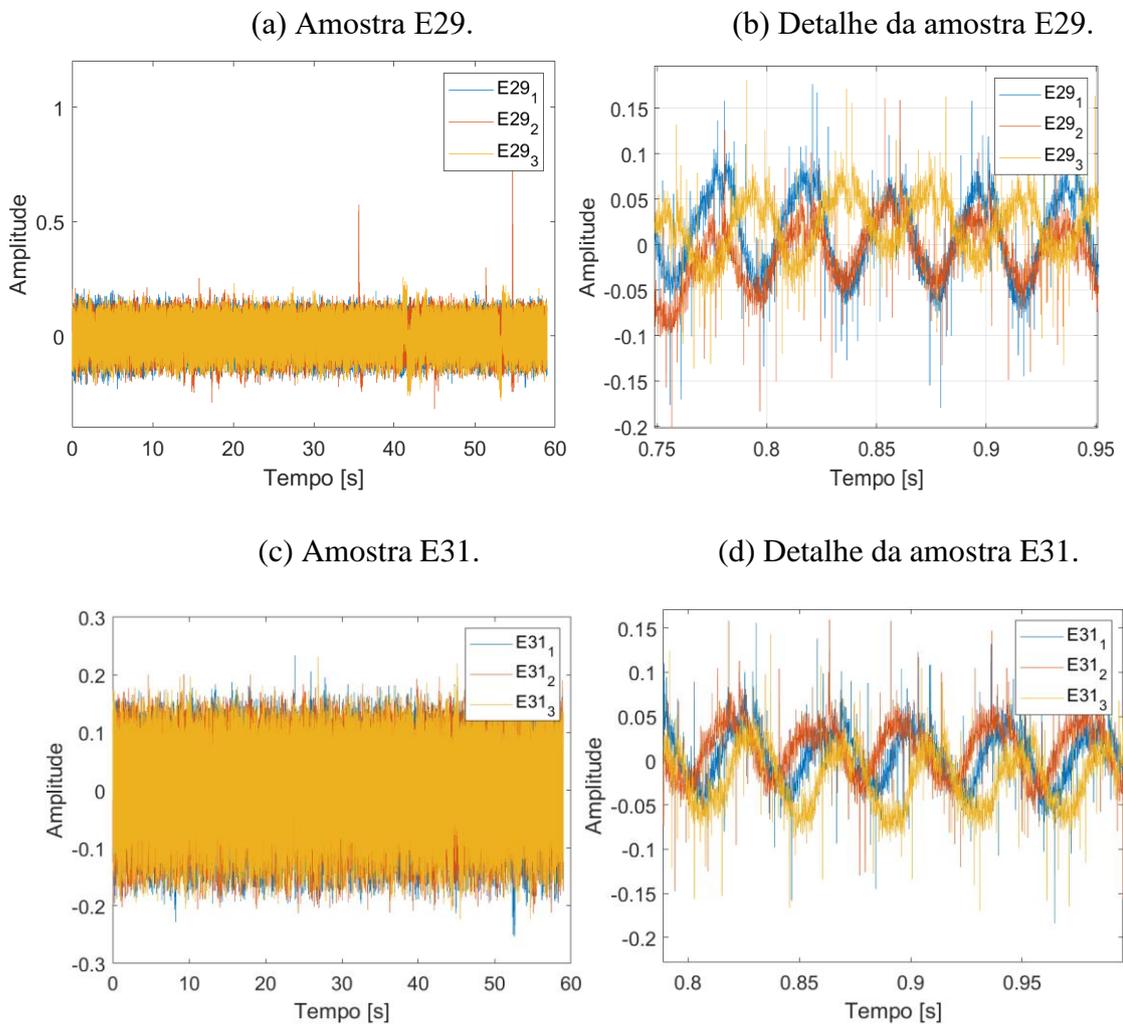


Figura 23 – Curva de resposta do sensor piezoelétrico.

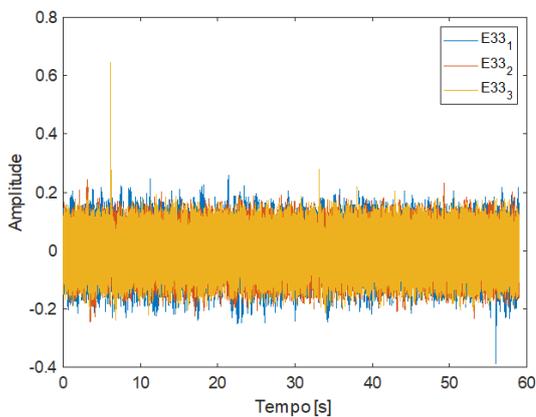
5. RESULTADOS

Inicialmente, os sinais de vibrações foram analisados no domínio do tempo, buscando um entendimento mais simples e rápido sobre as características dos sinais para cada percentual de etanol com as três amostras correspondente. Os resultados dessa análise estão apresentados na figura abaixo.

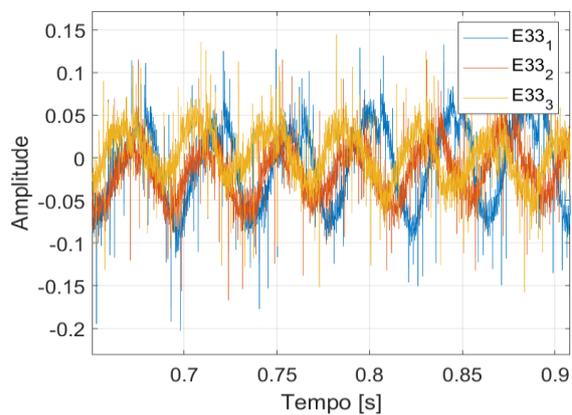
Figura 24 - Sinais de vibração com longo e curto intervalos adquiridos para diferentes percentuais de álcool para as três amostras.



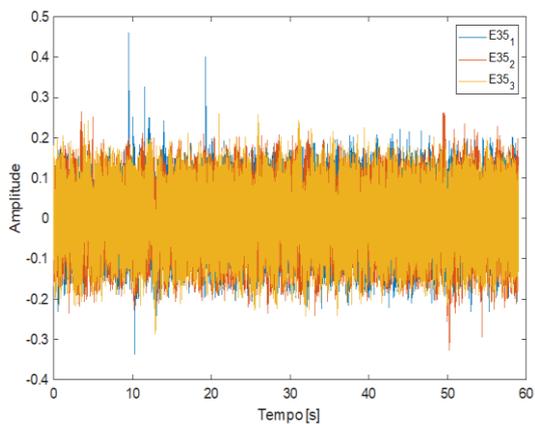
(e) Amostra E33.



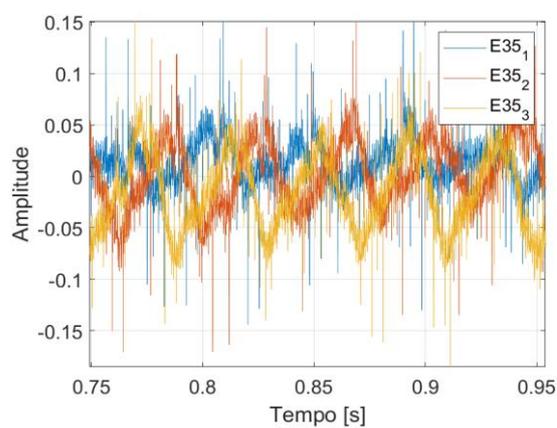
(f) Detalhe da amostra E33.



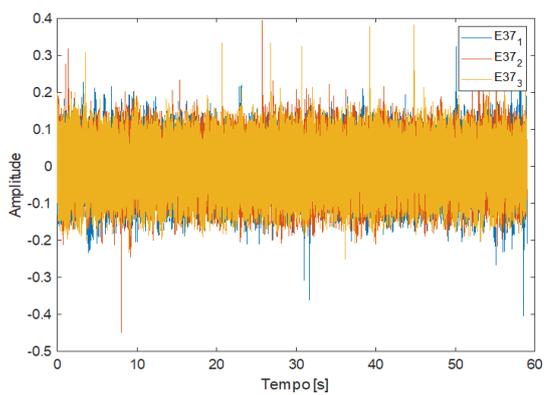
(g) Amostra E35.



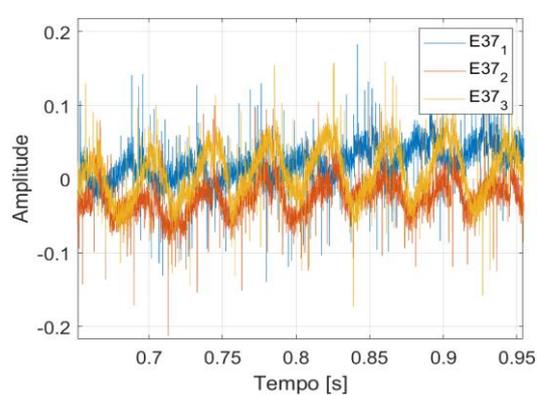
(h) Detalhe da amostra E35.



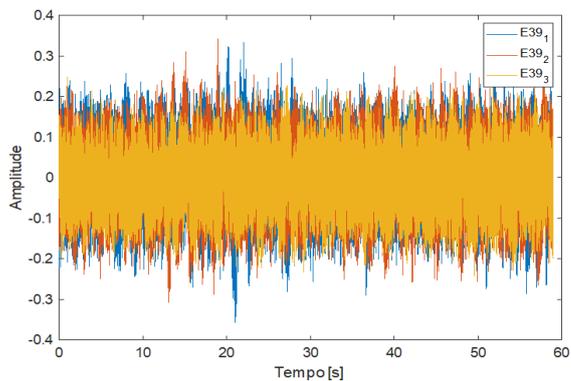
(i) Amostra E37.



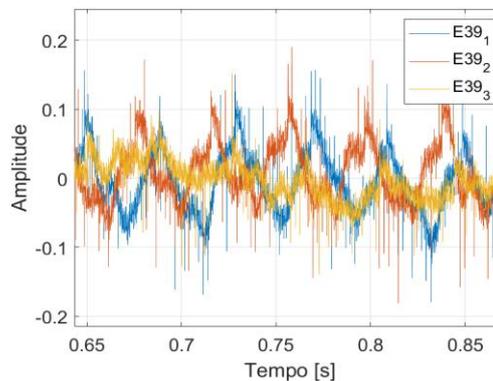
(j) Detalhe da Amostra E37.



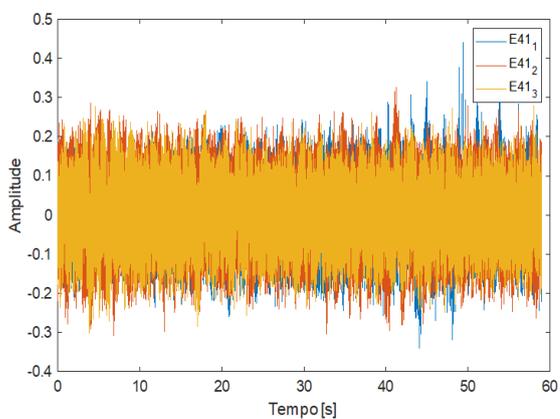
(l) Amostra E39.



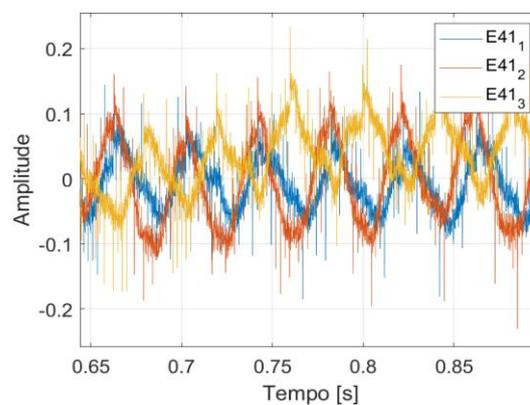
(m) Detalhe da Amostra E39.



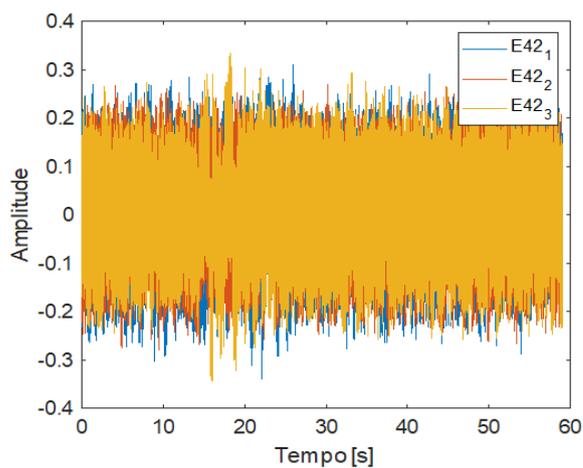
(n) Amostra E41.



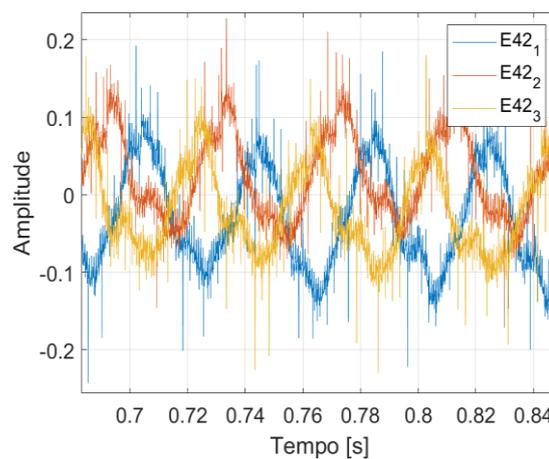
(o) Detalhe da Amostra E41.



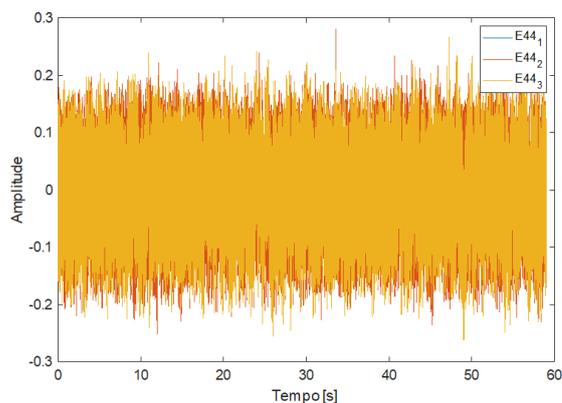
(p) Amostra E42.



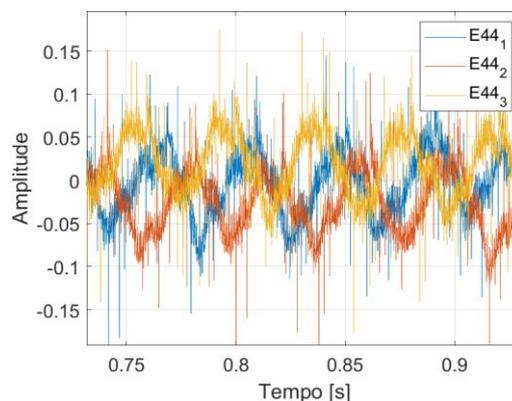
(q) Detalhe da Amostra E42.



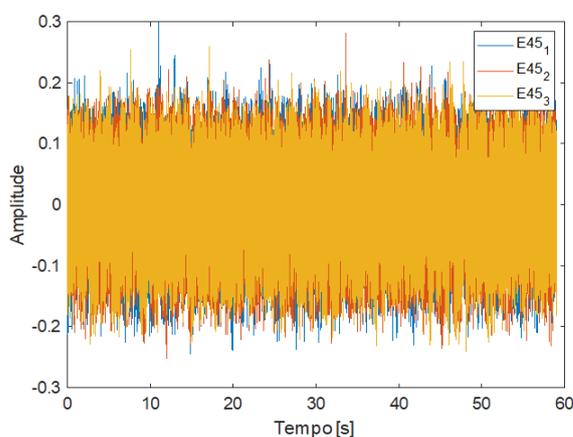
(r) Amostra E44.



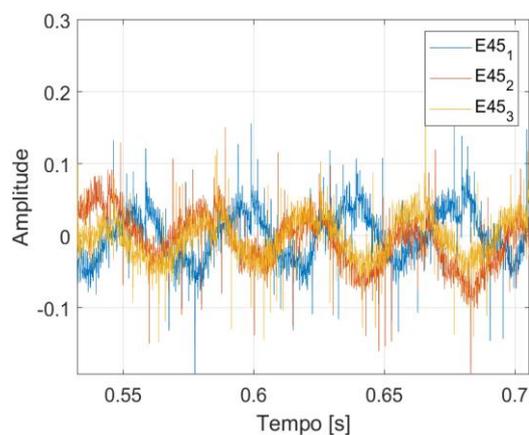
(s) Detalhe da Amostra E44.



(t) Amostra E45.



(u) Detalhe da Amostra E45.



A Figura 24 apresenta, individualmente, a análise no domínio do tempo de cada amostra estudada. Através dela é possível observar a presença de amplitudes homogêneas de vibração por todo tempo apresentado. Essa estabilização das amplitudes de vibração ao longo do tempo foi semelhante nas três amostras de cada percentual de etanol e isso é explicado devido ao fato que as aquisições foram realizadas após consolidação de todos os parâmetros necessários para as capturas dos sinais de vibração do motor. Contudo, é possível notar a detecção de picos aleatoriamente dispersos ao longo do sinal, nas mais diversas amplitudes.

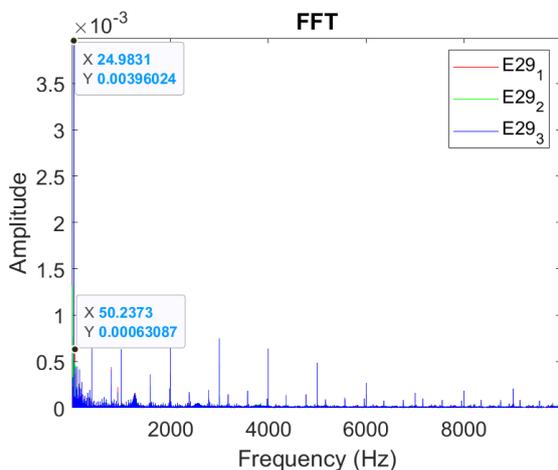
Na perspectiva detalhada, observa-se o comportamento senoidal do sinal de vibração, confirmando o sinal de vibração do motor que naturalmente possui características senoidal devido à periodicidade do processo de combustão interna. Por definição, um MCI opera em

marcha lenta com velocidade de rotação aproximadamente constante, que para o estudo em questão, o veículo tem uma velocidade de rotação aproximadamente 750 ± 50 RPM, conforme a Tabela 2. Isso significa que temos aproximadamente $750/60 = 12,5$ rotações por segundo, ou uma frequência de rotação de aproximadamente 12,5 Hz. Como trata-se de um motor de 4 cilindros que opera sob o ciclo Otto, são necessárias duas explosões em cada cilindro para cada rotação do eixo. Portanto, a frequência de explosão é de aproximadamente 25 Hz.

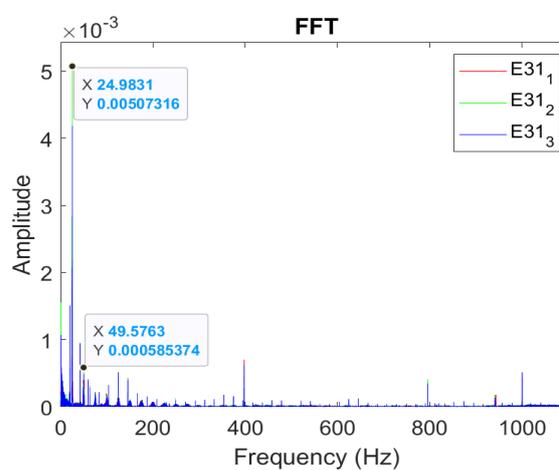
A Figura 25 abaixo representa a análise de vibração no domínio da frequência das 3 amostras de cada percentual de etanol na gasolina do tipo “C”, com objetivo de identificar as principais frequência no espectro.

Figura 25 - Sinais de vibração no domínio da frequência para diferentes percentuais de álcool para as três amostras.

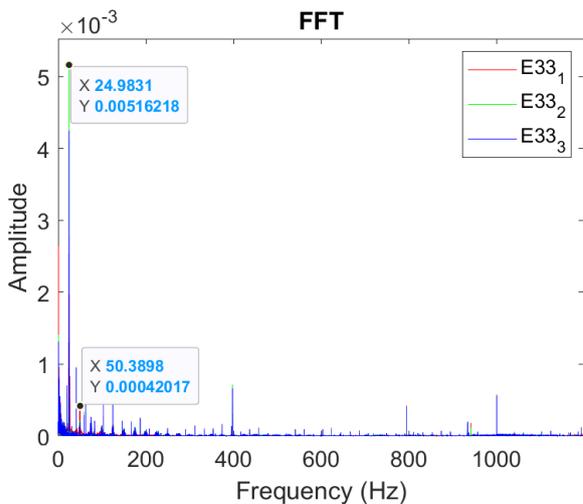
(a) FFT da amostra E29.



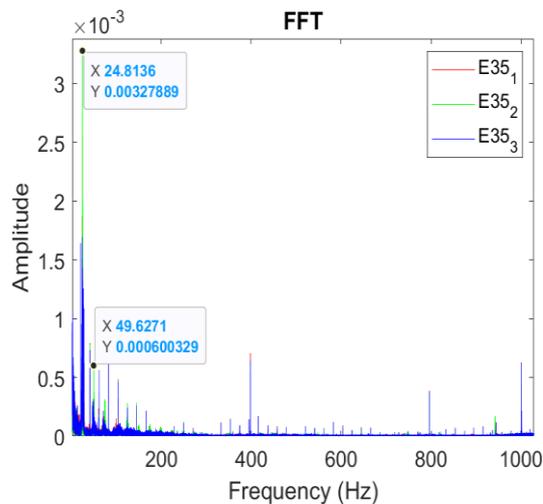
(b) FFT da amostra E31.



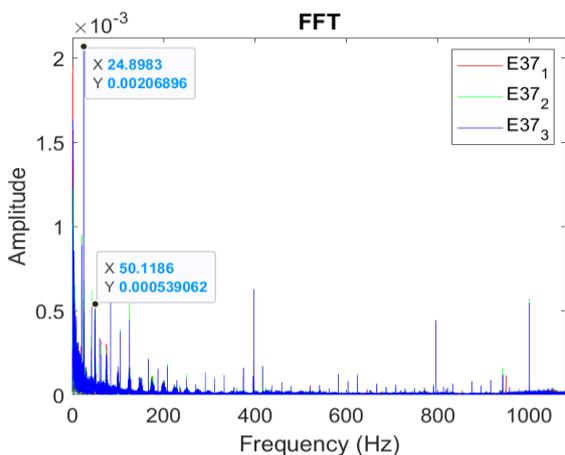
(c) FFT da amostra E33.



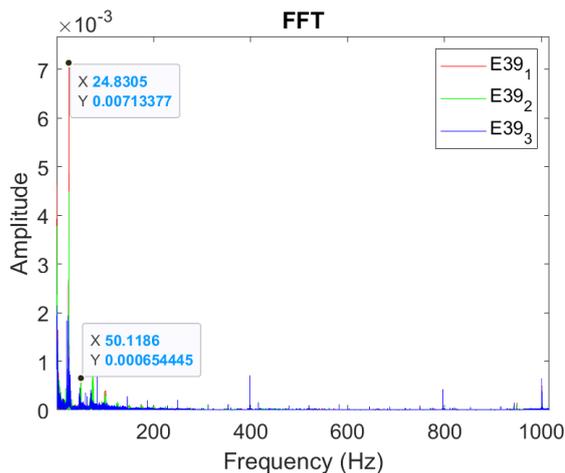
(d) FFT da amostra E35.



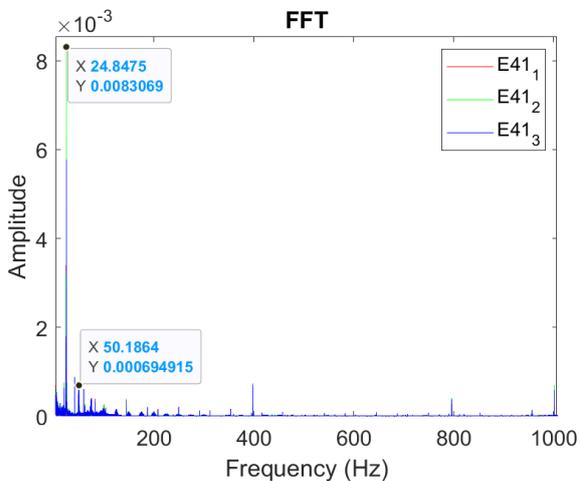
(e) FFT da amostra E37.



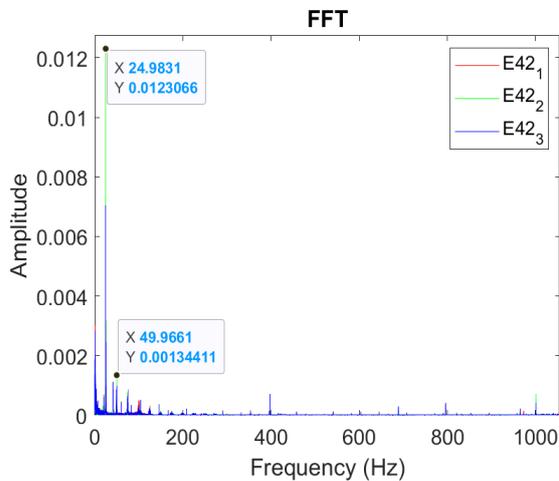
(f) FFT da amostra E39.



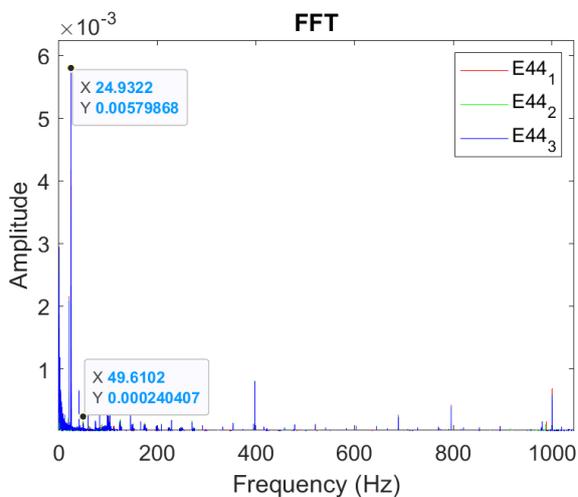
(g) FFT da amostra E41.



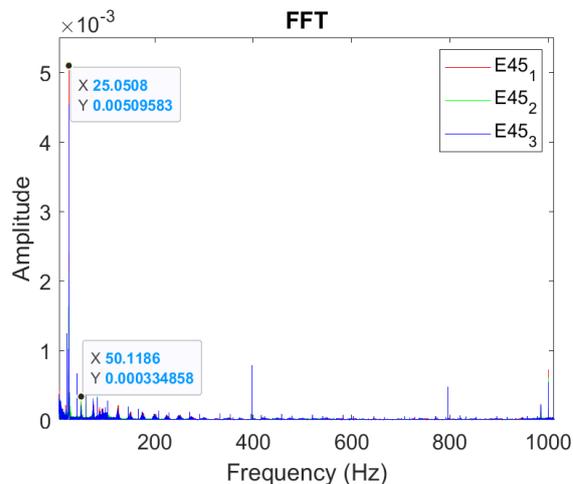
(h) FFT da amostra E42.



(i) FFT da amostra E44.



(j) FFT da amostra E45.



O modelo do sensor utilizado nos experimentos possui uma frequência máxima de resposta igual a 20kHz. Analisando todas as amostras de vibração no domínio da frequência, podemos afirmar que a presença do maior pico em torno de 25 Hz, como já seria esperado, uma vez que essa é aproximadamente a frequência de explosão do motor em marcha lenta.

A Figura 26 abaixo mostra a análise de vibração no domínio da frequência de todos os percentuais de etanol na gasolina do tipo “C”, com objetivo de identificar as principais frequência no espectro, e foi possível observar a presença de picos a cada 1000 Hz aproximadamente.

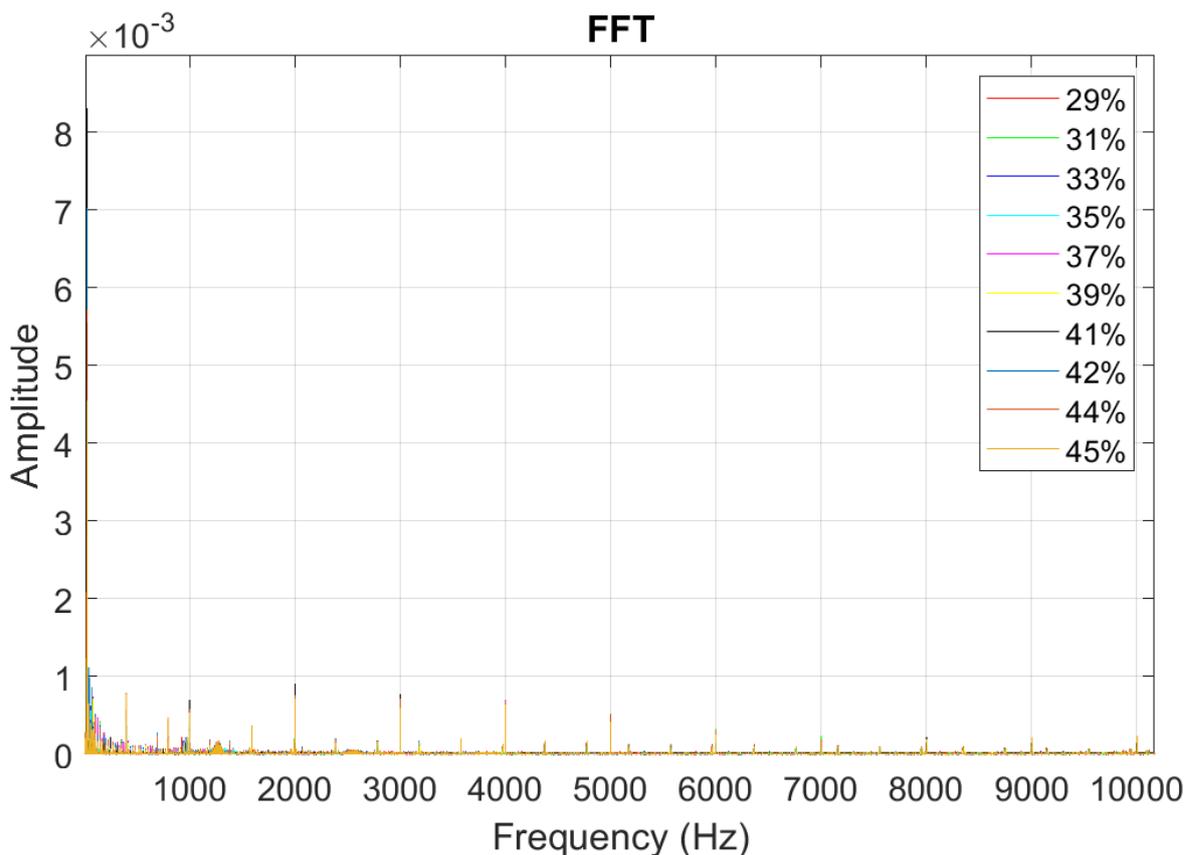


Figura 26 - Sinais de vibração no domínio da frequência para diferentes percentuais de álcool na faixa de frequência de 0 a 5000 Hz.

A Figura 27 abaixo ilustra a análise de vibração no domínio da frequência da faixa de todos os percentuais de etanol na gasolina do tipo “C” na faixa de frequência de 900 a 1000 Hz, e foi possível identificar um comportamento padrão entre o aumento de frequência relacionado com o aumento do percentual de etanol. Vale ressaltar, que essa faixa está na “região de uso” do sensor piezoelétrico.

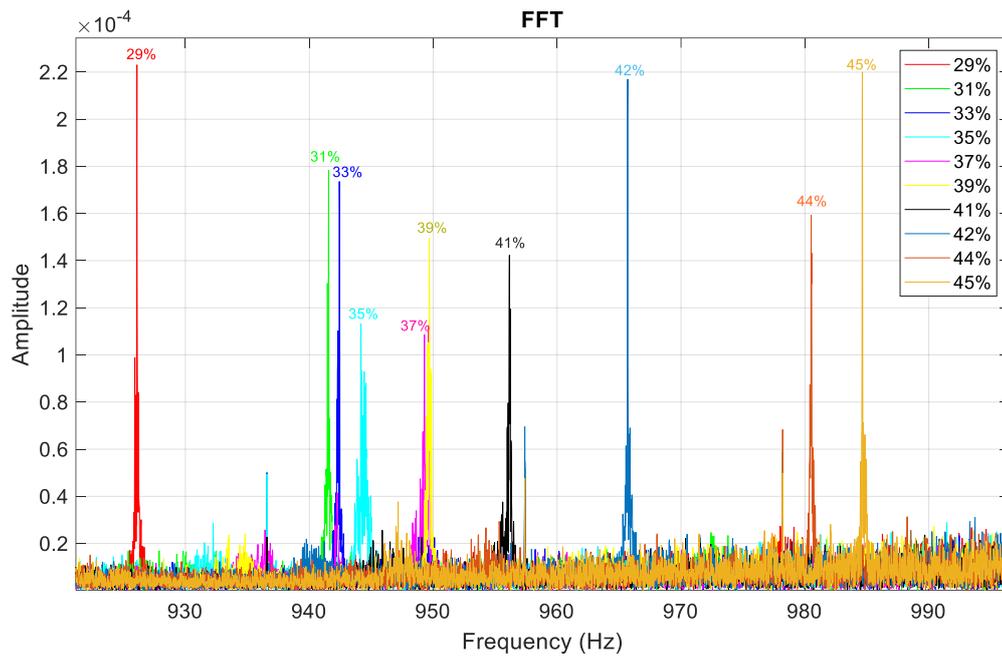


Figura 27 - Sinais de vibração no domínio da frequência para diferentes percentuais de álcool na faixa de frequência de 900 a 1000 Hz.

A Figura 28 abaixo demonstra a correlação entre duas variáveis importantes no estudo: de percentual de etanol na gasolina do tipo “C” versus frequência.

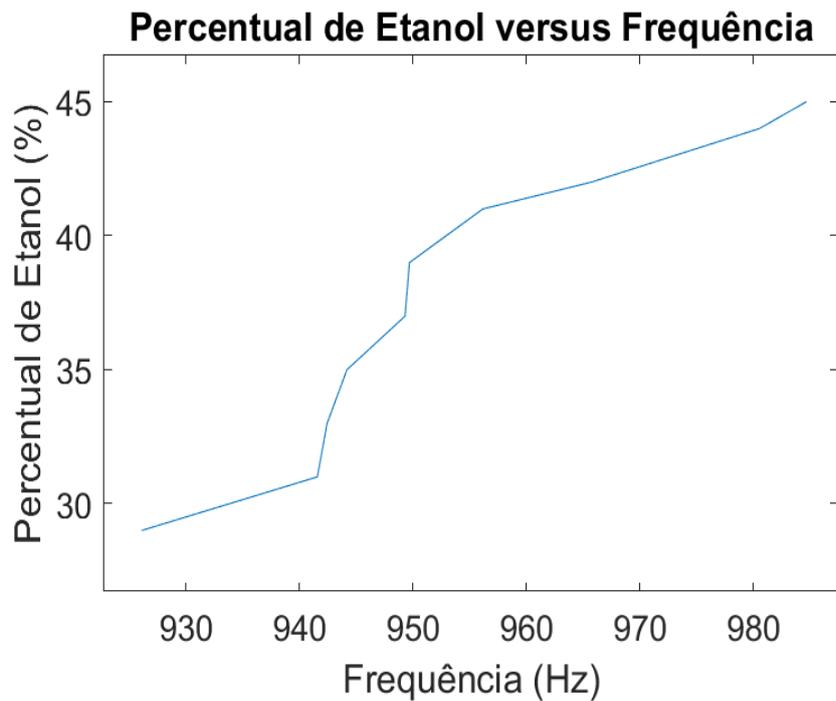


Figura 28 – Percentual de Etanol versus Frequência.

As Figuras 29, 30 e 31 abaixo mostra a realização de regressões: linear, polinomial de grau 2 e de Fourier na qual é gerada uma função de calibração que pode ser utilizada para se determinar o percentual de etanol a partir da frequência. Para a curva de regressão linear foi obtido um coeficiente de correlação de 0,8871. Já na Figura 30, para regressão polinomial foi atingido um coeficiente de correlação de 0,93168.

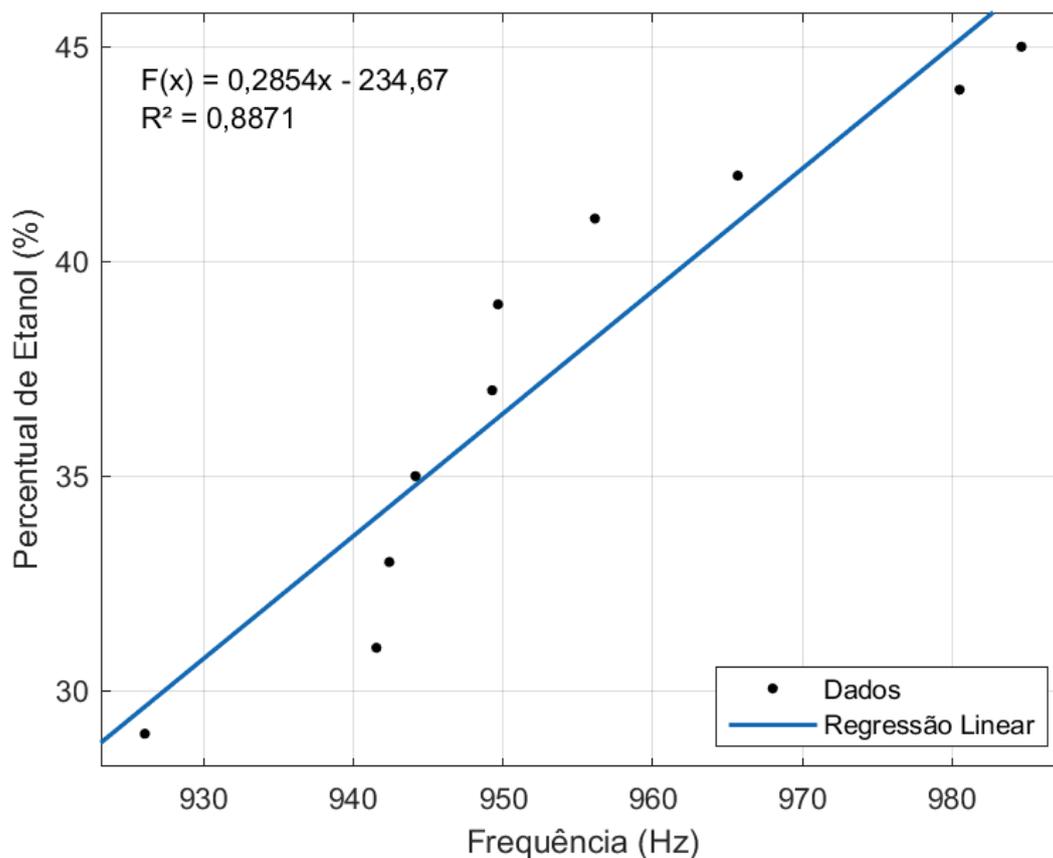


Figura 29 – Curva de regressão linear.

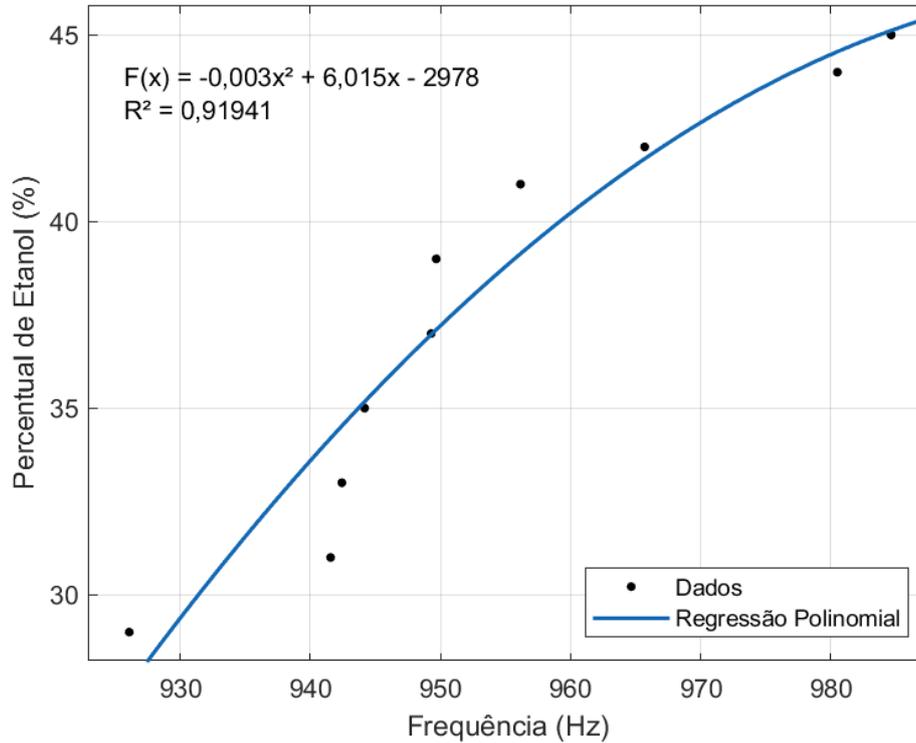


Figura 30 – Regressão polinomial de Grau 2.

Para a curva de regressão de Fourier foi obtido um coeficiente de correlação de 0,94718, próximo do valor ideal (1), evidenciando uma tendência entre a variação de percentual do etanol na gasolina do tipo “C” e a frequência.

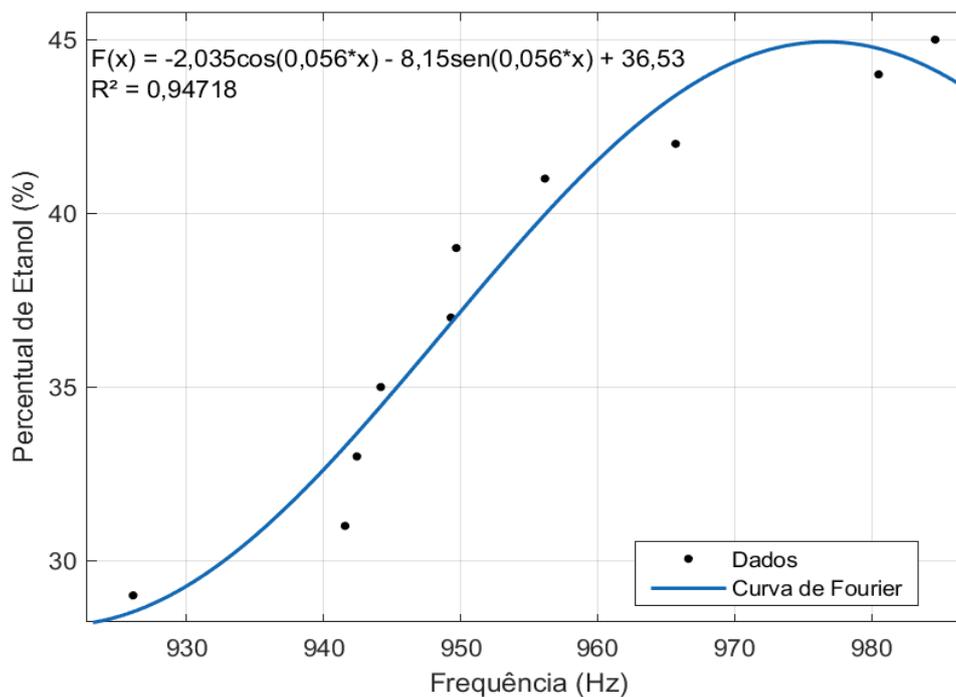


Figura 31 – Curva de regressão de Fourier.

Através da identificação mostrada pelas equações de reta nas figuras anteriores, a Figura 32 apresenta o erro entre os dados de percentual de etanol do experimento e a curva de regressão de Fourier, determinada pela equação geral da curva. A Tabela 7 apresenta o resumo do cálculo do erro encontrado, sendo menor que 3%, garantindo confiabilidade quanto ao percentual de etanol na mistura, e, portanto, aos resultados do presente estudo.

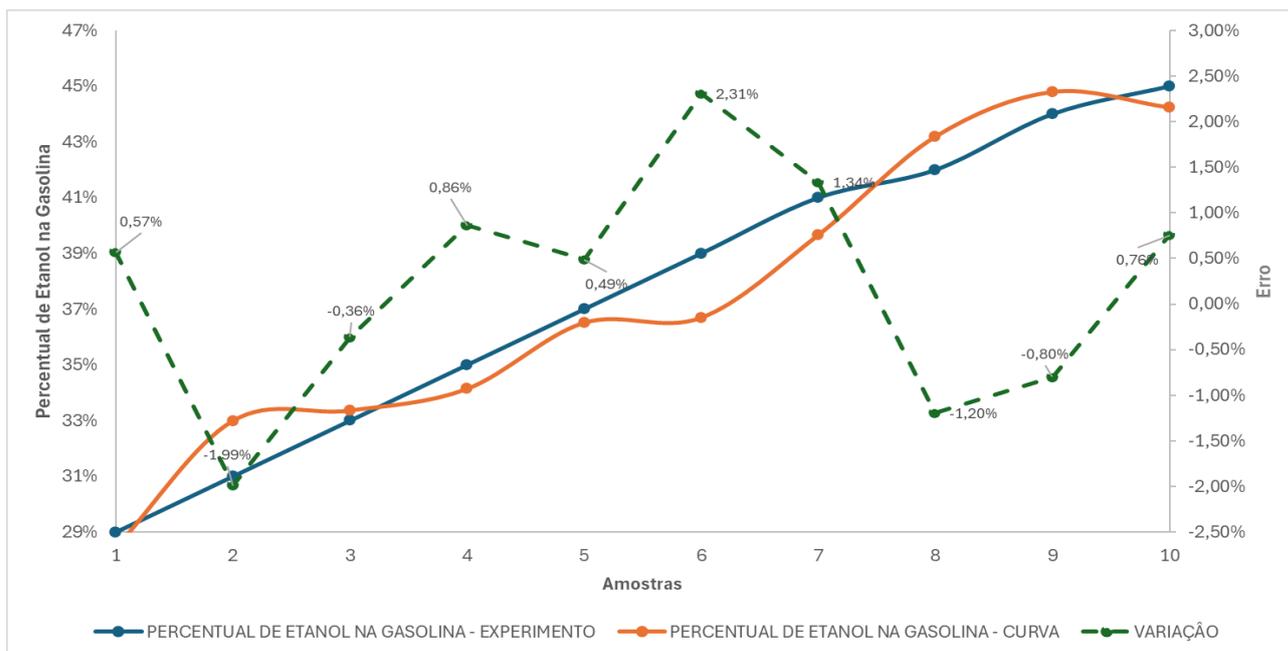


Figura 32 - Variação de erro entre experimento e curva de Fourier.

Tabela 7 – Tabela resumo com erro entre o percentual de etanol do experimento e a curva de regressão de Fourier.

Amostra	%EAC – ABNT NBR 13992	%EAC – Curva de Fourier	Erro
1	29%	28,43%	0,57%
2	31%	32,99%	-1,99%
3	33%	33,36%	-0,36%
4	35%	34,14%	0,86%
5	37%	36,51%	0,49%
6	39%	36,69%	2,31%
7	41%	39,66%	1,34%
8	42%	43,20%	-1,20%
9	44%	44,80%	-0,80%
10	45%	44,24%	0,76%

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho desenvolveu um método inovador para detectar, em tempo real e de forma não invasiva, a adulteração de etanol na gasolina automotiva do tipo “C” utilizando sensores piezoelétricos para análise de vibrações do motor. Este estudo propõe uma alternativa eficiente e acessível em relação aos métodos tradicionais, que são majoritariamente invasivos e exigem coleta de amostras para análises laboratoriais. O uso de sensores piezoelétricos, em conjunto com a técnica de Transformada Rápida de Fourier (FFT), mostrou-se eficaz ao correlacionar as frequências de vibração geradas durante o funcionamento do motor com o percentual de etanol adulterado presente no combustível.

Com a crescente preocupação com a qualidade dos combustíveis e a prática comum de adulteração no Brasil, este estudo se posiciona como uma ferramenta importante para combater fraudes, melhorar a performance dos veículos e reduzir os impactos ambientais causados pela queima inadequada de combustíveis adulterados. A implementação desta tecnologia poderá beneficiar tanto consumidores quanto órgãos reguladores, promovendo maior transparência e segurança no uso de combustíveis.

Os experimentos realizados demonstraram uma clara tendência de aumento nas frequências de vibração do motor à medida que o percentual de etanol na gasolina aumentava. A técnica mostrou alta precisão, com coeficientes de correlação significativos (0.94718 para a regressão de Fourier), evidenciando a robustez do método. Além disso, os erros de detecção, menores que 3%, reforçam a confiabilidade do sistema desenvolvido.

Ao longo deste estudo, foi possível validar o uso de sensores piezoelétricos como uma solução viável para a caracterização de adulteração de combustíveis, e os resultados sugerem que o método pode ser adaptado para outras misturas de combustíveis. A detecção em tempo real permite um monitoramento contínuo, oferecendo uma vantagem considerável em relação aos métodos que dependem de análises posteriores em laboratório.

Além de sua relevância técnica, o trabalho também contribui para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes e econômicos, que podem ser facilmente implementados em veículos já em operação, o que facilita sua aplicação em grande escala. Isso é particularmente importante em um contexto de constantes variações nos preços de combustíveis e no aumento das adulterações, motivadas por crises econômicas.

Futuramente, o estudo pode ser aprimorado com a incorporação de algoritmos mais sofisticados de análise de dados para aumentar ainda mais a precisão na detecção de adulterações. O método aqui proposto também pode ser estendido para novas abordagens, como o monitoramento de combustíveis por meio de sinais sonoros ou pela análise de diferentes frequências de vibração em outros componentes do motor.

Conclui-se, portanto, que este trabalho atende plenamente aos seus objetivos, oferecendo uma solução promissora para a detecção de adulteração de combustíveis. Ele abre um campo de pesquisa com vastas possibilidades de melhorias e adaptações, contribuindo de forma significativa para o avanço da engenharia automotiva e para a promoção de práticas mais justas e seguras no mercado de combustíveis.

7. REFERÊNCIAS

- ABREU, ROMÁRIO E. L.; PAZ, JOSÉ E. M.; SILVA, ADENILTON C.; PONTES, MÁRCIO J. C.; LEMOS, SHERLAN G. *Adulteração de etanol combustível com metanol avaliado por voltametria cíclica e calibração multivariada*. *Combustível*, ScienceDirect, n.156, p.20-25, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. *RESOLUÇÃO ANP Nº19, DE 15.04.2015 – DOU 16.04.2015*. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-19-2015?origin=instituicao&q=RANP&2019&202015>, acessado em setembro de 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. *RESOLUÇÃO ANP Nº807, DE 23.01.2020 – DOU 24.01.2020 – RETIFICADA DOU 20.01.2020*. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-807-2020-estabelece-a-especificacao-da-asolina-de-uso-automotivo-e-as-obrigacoes-quanto-ao-controle-da-qualidade-se-serem-tentidades-pelos-agentes-economicos-que-comercializarem-oproduto-em-todo-territorio-acional?origin=instituicao&q=Resolu%C3%A7%C3%A3o%20807%202020>, acessada em setembro de 2022.
- ANFAVEA, *Anuário da Indústria Automobilística Brasileira*. 2011.
- ARIK, ENIS. 2013. “*Dielectric Properties of Fuel Oils and Their Ethanol Mixtures Investigated by Terahertz Time-Domain Spectroscopy*.” M.S. - Master of Science, Middle East Technical University.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR:13992: gasolina automotiva: determinação do teor de etanol*, Rio de Janeiro, 2015.
- ÁVILA, G.; ARAÚJO, L. C. L. de. 2012. *Cálculo: ilustrado, prático e descomplicado*. 1ª Edição: LTC.
- ÁVILE, LORENA MORINE; SANTOS, AMANDA P. F. DOS; MATTOS, DANIELLE I. M. DE; SOUZA, CRISTIANE GINENES DE; ANDRADE, DÉBORA FRANÇA DE; D’ÁVILA, LUIZ ANTONIO. *Determinação de etanol na gasolina por cromatografia líquida de alta eficiência*. *Combustível*, ScienceDirect, n.212, p.236-39, 2018.

- BABUA, V.; KRISHNAB, R.; MANIC, N. *Revisão sobre a detecção de adulteração em combustíveis através de técnicas computacionais*. Materials Today, ScienceDirect, n.4, p.1723-1729, 2017.
- BAZEIA, D.; PEREIRA, M. B. P. N.; BRITO, A. V.; OLIVEIRA, B. F.; RAMOS, J. G. G. S. *A novel procedure for the identification of chaos in complex biological systems*. Scientific reports, v. 7, p. 44900, 2017.
- BONALDI, E. L. et al., *Aplicação de FFT para a Detecção de Defeitos em Máquinas Elétricas.*, Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria, 2014.
- BORSATO, D.; GALÃO, O. F.; MOREIRA, I. *Combustíveis fósseis: carvão e petróleo*. Londrina: Editora Eduel, 2009.
- BR DISTRIBUIDORA, Petrobrás Distribuidora S.A. *Gasolina: 2013*. Disponível em: <http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/automotivos/gasolina>. Acesso em: 21 nov. 2022.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 8, de 23.2.2016, DOU 24 de dezembro de 2016. Diário Oficial, Brasília, DF, 24 dez. 2016. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-8-2016>>. Data de acesso: 07/07/2024.
- BROEK, J. VAN DEN; ABEGG, S.; PRATSINIS, S.E.; GÜNTNER, A.T. *Highly selective detection of methanol over ethanol by a handheld gas sensor*. Nature Communications, 2019.
- CARNEIRO, Helena S. P. et al. *Determination of ethanol fuel adulteration by methanol using partial least-squares models bases on Fourier transform techniques*. Energy & Fuels, v. 22, n. 4, p. 2767-2770, 2008.
- CHAGAS, ISMAEL PEREIRA. *Desenvolvimento de um Fotômetro Portátil NIR para determinação do teor de água no álcool combustível e do teor de etanol na gasolina*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. 2006.
- FERREIRA, S. M. *Relação entre a espessura real e aparente da gasolina pura em colunas de laboratório*. São Paulo, 2003. 107 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Programa de PósGraduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia.

- FIGUEIREDO, M. K.-K., COSTA-FELIX, R. P.B., MAGGI L. E., ALVARENGA, A. V., ROMEIRO, G. A., *Biofuel ethanol adulteration detection using an ultrasonic measurement method*, Fuel, Volume 91, Issue 1, 2012, Pages 209-212.
- GEVAERD, B. D. M. *Caracterização do uso de um sensor acelerômetro na avaliação da dinâmica de um veículo em movimento*. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. 2019.
- GODOY, L. A. F. de; PEDROSO, M. P.; HANTAO, L. W.; AUGUSTO, F.; POPPI, R.J.J.Braz. *Chem.Soc.* 2013,24,645.
- GUPTA, H. N. *Fundamentals of Internal Combustion Engines*. 2ª edição. ed. [S.l.]: PHI Learning, 2013.
- HEYWOOD, J. B. "Internal combustion engine fundamentals". McGraw- Hill. Nova York: Estados Unidos. 2018.
- HOECKEL, P. H. D. O. (2018). *Implicações da oferta e da demanda de etanol: comportamento de preços, interações com os mercados agrícolas e mudanças no comércio*. Tese de Doutorado. Pontífca Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
- INMAN, D. J., *Engineering Vibration*, 3a Edição. New Jersey – NY: Editora Pearson Prentice Hall, 2008.
- JANUÁRIO, ELIANE RIBEIRO. *Aplicação de um marcador luminescente contendo o íon Tb³⁺ para detecção de possíveis adulterações em etanol combustível*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2011.
- KARATEPE, AYŞEGÜL; AKGOL, OĞUZHAN; ABDULKARIM, YADGAR L.; DALGAC, ŞEKIP; MUHAMMADSHARIF, FAHMI F.; AWL, HALGURD N.; DENG, LIANWEN; UNAL, EMIN; KARAASLAN, MUHARREM; HENG, LUO; HUANG, SHENGXIANG. *Multipurpose chemical liquid sensing applications by microwave approach*. PLoS ONE, 2020.
- LUCENA-JUNIOR, J. A., LIMA, T. L. V., BRUNO, G. P., BRITO, A. V., RAMOS, J. G. G. S., BELO, F. A., LIMA-FILHO, A. C. 2020, *Chaos theory using density of*

maxima applied to the diagnosis of three-phase induction motor bearings failure by sound analysis, Computers in Industry, Volume 123,103304.

MARTINS, JORGE. *Motores de Combustão Interna* - 4ª edição Revista e Aumentada. 2006.

MEDEIROS, R. L. V., FILHO, A. C. L., RAMOS, J. G. G. S., NASCIMENTO, T. P. AND BRITO, A. V., 2019, *A Novel Approach for Speed and Failure Detection in Brushless DC Motors Based on Chaos*, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 11, pp. 8751-8759.

MENDES, G.; BARBEIRA, P. J. S. *Fuel* 2013, 112, 163.

MONTEIRO, L. F., *Análise Comparativa da Energia Vibracional em Motor Diesel Utilizando Diesel e Biodiesel.*, Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia), Universidade Federal de São João Del-Rei., São João Del-Rei – RJ. 2013.

OPEKAR, F., ČABALA, R., & KADLECOVA, T. (2011). *A simple contactless impedance probe for determination of ethanol in gasoline*. Analytica chimica acta, 694(1–2), 57–60.

PEREIRA, POLYANA F.; SOUSA, RAQUEL MF; MUNOZ, RODRIGO AA; RICHTER, EDUARDO M. *Determinação simultânea de etanol e metanol em etanol combustível usando voltametria cíclica*. Combustível, ScienceDirect, n.103, p.725-729, 2013.

PINTO, A. A. *Processamento de Sinais Sonoros para Identificação de Notas Musicais Utilizando o Raspberry Pi*. CEFET-MG, Divinópolis, 2018.

PONCI, L., *Desmistificando a Análise de Vibrações.*, 12ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, 2013.

QUIROGA, R. L. C. *Avaliação da relação entre a energia de ativação e a energia útil para diferentes misturas de etanol e gasolina aplicados a motores de ignição por centelha*. Tese de doutorado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. 2016.

RAO, S., *Vibrações Mecânicas.*, 4ª Edição. São Paulo – SP: Editora Pearson Prentice Hall, 2009.

SANTANA, C. M.; MAUTONE, J.; ALMEIDA, H. *Analysis of vibration and noise of an internal combustion engine by application of test and experimental analysis of the*

- frequency spectrum*. International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), 2013.
- SENA, Sthefany dos S.; FERREIRA, Ernesto C. *Avaliação analítica de analisador de combustível comercial no controle de qualidade de etanol e gasolina comum*. Química Nova, v. 45, p. 218-222, 2022.
- SILVA, A. C., PAZ, J. E. M., PONTES, L. F. B. L., LEMOS, S. G., PONTES, M. J. C., 2013, *An electroanalytical method to detect adulteration of ethanol fuel by using multivariate analysis*, Electrochimica Acta, Volume 111, Pages 160-164.
- SILVA, ADENILTON CAMILO; PONTES, LILIANA F. B. L.; PIMENTEL, MARIA FERNANDA; PONTES, MÁRCIO JOSÉ COELHO. *Detecção de adulteração em combustível de álcool etílico hidratado usando métodos de espectroscopia no infravermelho e reconhecimento supervisionado de padrões*. Talanta, ScienceDirect, n.93, p.129-134, 2012.
- SILVA, C. C. P. *Método não-invasivo utilizando a frequência de micro-ondas para verificação da concentração de etanol em gasolina*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Campina Grande. 2019.
- SOUZA, T. V. *Método para diagnóstico de etanol adulterado em motor de combustão interna em funcionamento através da vibração*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. 2022.
- TAKESHITA, E.V.; REZENDE, R.V. de P.; SOUZA, S. G.; SOUZA, A. A. U. de. *Fuel*, 2008,87,2168.
- ÚNICA. *Detalhamento das exportações mensais de etanol pelo Brasil*. São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=74>. 2016. Data de acesso: 10/12/2021.
- VELLO, TATIANA P. et al. *A simple capacitive method to evaluate ethanol fuel samples*. Scientific reports, v. 7, n. 1, p 1-7, 2017.
- FIRMINO, JOÃO V. L. C. *Identificação de defeitos em um motor de combustão interna ciclo Otto a partir da análise de vibrações*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Paraíba. 2018.