



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCOS RAMON BEZERRA DOS SANTOS

## **Análise de gasolina adulterada por etanol através do método vibracional e FFT**

João Pessoa, Paraíba

2024

Marcos Ramon Bezerra dos Santos

## **Análise de gasolina adulterada por etanol através do método vibracional e FFT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho

João Pessoa

2024

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S237a Santos, Marcos Ramon Bezerra Dos.

Análise de gasolina adulterada por etanol através do método vibracional e FFT / Marcos Ramon Bezerra Dos Santos. - João Pessoa, 2024.

65 f. : il.

Orientação: Abel Cavalcante Lima Filho.

TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Motor de combustão interna. 2. Vibrações mecânicas. 3. Processamento de sinais. 4. Transformada rápida de Fourier. I. Filho, Abel Cavalcante Lima. II. Título.

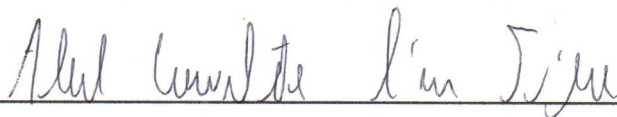
UFPB/CT/BSCT

CDU 621(043.2)

MARCOS RAMON BEZERRA DOS SANTOS

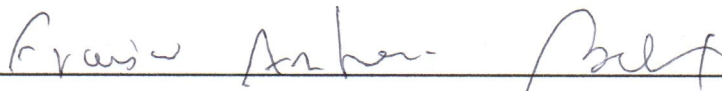
**ANÁLISE DE GASOLINA ADULTERADA POR ETANOL ATRAVÉS DO MÉTODO  
VIBRACIONAL E FFT**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação do Curso de Engenharia de Mecânica da UFPB, apresentado em sessão de defesa pública realizada em 03/05/2024, obtendo o conceito 10,0 (dez), sob avaliação da banca examinadora a seguir:



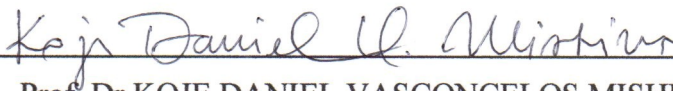
Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA

Orientador - DEM/CT/UFPB



Prof. DR. FRANCISCO ANTÔNIO BELO

Examinador -DEM/CT/UFPB



Prof. Dr.KOJE DANIEL VASCONCELOS MISHINA

Examinador -DEM/CT/UFPB

**João Pessoa (PB)**

**Maio/2024**

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus, pelo dom da vida e pelo dom da dúvida.

Aos meus pais, Marlene Bezerra e Reginaldo Santos, por serem meus baluartes diante de tantos os percalços e por nunca medir esforços para me auxiliar, acreditando no meu potencial para com os estudos.

Às minhas irmãs, Mayara Santos e Márcia Santos, que com seu amor incondicional me apoiam diariamente desde meus primeiros suspiros de vida.

Aos meus fiéis amigos, que para minha sorte são muitos, por estarem do meu lado especialmente nos momentos difíceis.

Em especial, aos companheiros de trajetória na UFPB; Cezar Compagnon, que com sua luz foi sempre um porto seguro em momentos de incerteza, assim como Thiago Rodrigues, um verdadeiro irmão a quem tenho um absoluto apreço.

Ao meu orientador, professor Abel Cavalcante Lima Filho, por sua generosa disponibilidade e paciência para orientação; por todos os ensinamentos compartilhados e por ter me incentivado durante todo o percurso.

Aos professores Francisco Antônio Belo e Koje Daniel Vasconcelos Mishina, pelo aceite e disponibilidade para a avaliação e contribuição com esse trabalho.

Aos alunos do PPGEM da UFPB e membros do GPICEEMA, José Anselmo e Júlio Cesar, pela sincera solicitude para sanar meus questionamentos e pela fundamental participação no desenvolvimento desse trabalho.

*“O correr da vida embrulha tudo,  
a vida é assim: aperta e daí afrouxa,  
sossega e depois desinquieta.  
O que ela quer da gente é coragem.”*

(João Guimarães Rosa, Grande Sertão: Veredas, página 293)

# Resumo

O crescente cenário da produção de automóveis impulsiona a busca por soluções que minimizem os impactos do uso de motores de combustão interna no meio ambiente. Nesse contexto, a Agência Nacional de Petróleo Gás e Biocombustíveis (ANP) promove a regulamentação e fiscalização do percentual de etanol na gasolina, buscando manter os níveis de emissões de gases nocivos à natureza dentro dos limites estipulados por lei. Entretanto, não são raros os casos de adulteração da composição do combustível utilizando meios imperceptíveis a olho nu, gerando aumento da margem de lucro para o vendedor. Além disso, a adulteração do combustível pode provocar uma perda de performance e danos severos à integridade estrutural do motor, resultando em um alto custo de reparo das peças afetadas. Os automóveis não possuem um dispositivo que possa indicar se o combustível em utilização está adulterado ou não, sendo esse diagnóstico atualmente realizado pela ANP em testes laboratoriais. Diante dessa circunstância, surge a necessidade de um método de diagnóstico em tempo real e não invasivo capaz de determinar se o combustível atende às resoluções da ANP. O presente trabalho busca estudar a correlação entre o modo de vibração do motor em operação e o percentual de etanol na mistura. Assim, foram realizados testes experimentais utilizando dez amostras com diferentes composições a partir dos quais foi possível coletar o sinal de vibração do motor. Esse sinal foi então processado e utilizado para cálculo de três métricas estatísticas: *kurtosis*, *root mean square* (RMS) e *shape factor*, que, posteriormente, foram usadas para o cálculo do coeficiente de correlação com o percentual de etanol, obtendo respectivamente os seguintes resultados: 0.6054, 0.7082 e 0.7967, indicando que a métrica *shape factor* pode ser potencialmente mais eficaz no diagnóstico de adulteração do combustível em comparação com as demais métricas estatísticas. Além disso, foi realizado o cálculo da transformada rápida de Fourier (FFT) de cada sinal, onde observou-se, para todas as amostras, um pico de frequências por volta de 1088 Hz que possui uma correlação de 0.9922 com o percentual de etanol na mistura. Indicando uma possível nova metodologia para diagnose do combustível adulterado.

**Palavras-chave:** motor de combustão interna; vibrações mecânicas; processamento de sinais; transformada rápida de Fourier.

# Abstract

The increasing scenario of automobile production drives the search for solutions that minimize the impacts of internal combustion engines on the environment. In this context, the National Agency of Petroleum, Natural Gas, and Biofuels (ANP) promotes the regulation and monitoring of the ethanol percentage in gasoline, aiming to maintain emissions levels of harmful gases into nature within limits established by law. However, cases of fuel composition adulteration using imperceptible means to the naked eye are not uncommon, leading to increased profit margins for sellers. Additionally, fuel adulteration can cause performance loss and severe damage to the structural integrity of the engine, resulting in high repair costs for affected parts. Automobiles lack a device that can indicate whether the fuel being used is adulterated or not, with this diagnosis being currently performed by the ANP through laboratory tests. Given this circumstance, there is a need for a real-time, non-invasive diagnostic method capable of determining whether the fuel meets ANP resolutions. This study aims to investigate the correlation between the vibration mode of the operating engine and the percentage of ethanol in the blend. Experimental tests were conducted using ten samples with different compositions, from which the engine vibration signal was collected. This signal was then processed and used to calculate three statistical metrics: kurtosis, root mean square (RMS), and shape factor, which were subsequently used to calculate the correlation coefficient with the ethanol percentage, yielding the following results: 0.6054, 0.7082, and 0.7967, respectively. These results indicate that the shape factor metric may potentially be more effective in diagnosing fuel adulteration compared to the other statistical metrics. Additionally, the Fast Fourier Transform (FFT) was computed for each signal, revealing a peak frequency around 1088 Hz for all samples, correlating at 0.9922 with the ethanol percentage in the blend. Indicating a possible new methodology for adulterated fuel diagnosis.

**Keywords:** internal combustion engine; mechanical vibrations; signal processing; fast Fourier transform.

# Lista de ilustrações

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Quantidade de veículos e automóveis em circulação no Brasil. . . . .                               | 13 |
| Figura 2 – Análise sobre a composição de emissões de gases de efeito estufa no Brasil                         | 14 |
| Figura 3 – Desenvolvimento do motor de combustão interna . . . . .                                            | 18 |
| Figura 4 – Vista em corte de um motor quatro-tempos de ignição por centelha. . .                              | 20 |
| Figura 5 – Etapas do ciclo Otto . . . . .                                                                     | 22 |
| Figura 6 – Forças atuantes no pistão e biela durante o ciclo de expansão. . . . .                             | 23 |
| Figura 7 – Variação da pressão interna do cilindro e torque transmitido durante<br>uma revolução. . . . .     | 24 |
| Figura 8 – Função senoidal em versão analógica, discreta e digital. . . . .                                   | 28 |
| Figura 9 – Representação de um sinal periódico . . . . .                                                      | 29 |
| Figura 10 – Influência do parâmetro $\alpha$ no filtro de <i>Notch</i> . . . . .                              | 33 |
| Figura 11 – Instrumentação do veículo. . . . .                                                                | 38 |
| Figura 12 – Análise da amostra de combustível após aquisição de dados via norma<br>ABNT. . . . .              | 39 |
| Figura 13 – Percentual de etanol em cada amostra. . . . .                                                     | 40 |
| Figura 14 – Sensor <i>flex fuel</i> utilizado para avaliação do combustível. . . . .                          | 40 |
| Figura 15 – Sinal de saída do sensor flex visto pelo osciloscópio. . . . .                                    | 41 |
| Figura 16 – Curva do percentual de etanol vs frequência (Hz) de saída do sensor<br><i>flex fuel</i> . . . . . | 42 |
| Figura 17 – Erro relativo entre a norma ABNT e o sensor <i>flex fuel</i> . . . . .                            | 43 |
| Figura 18 – Sinais de vibração de cada amostra no domínio do tempo. . . . .                                   | 44 |
| Figura 19 – Sinais de vibração de cada amostra no domínio da frequência. . . . .                              | 48 |
| Figura 20 – Filtro de Notch aplicado sobre os sinais. . . . .                                                 | 51 |
| Figura 21 – Resultado da aplicação do filtro de Notch para amostra $E29_1$ . . . . .                          | 52 |
| Figura 22 – Sinais de vibração no domínio do tempo após filtragem. . . . .                                    | 52 |
| Figura 23 – Resultado do filtro sobre a FFT para amostra $E29_1$ . . . . .                                    | 56 |
| Figura 24 – Kurtosis de cada amostra do teste. . . . .                                                        | 58 |
| Figura 25 – Regressão polinomial: Kurtosis médio x (%) de etanol . . . . .                                    | 58 |
| Figura 26 – Regressão polinomial: RMS médio x (%) de etanol . . . . .                                         | 59 |
| Figura 27 – Regressão polinomial: Shape Factor médio x (%) de etanol . . . . .                                | 59 |
| Figura 28 – Diagnose através do Shape Factor médio x (%) de etanol . . . . .                                  | 60 |
| Figura 29 – Destaque do pico de frequência em torno de 1088 Hz. . . . .                                       | 61 |
| Figura 30 – Média do pico em torno de 1088 Hz para cada amostra . . . . .                                     | 63 |

# Lista de tabelas

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Resumo de trabalhos relacionados . . . . .                             | 16 |
| Tabela 2 – Evolução histórica do motor de combustão interna . . . . .             | 19 |
| Tabela 3 – Comparação entre as propriedades do etanol, gasolina e misturas. . . . | 27 |
| Tabela 4 – Características do veículo Logan 1.6 - 2017/2018 . . . . .             | 36 |
| Tabela 5 – Especificação técnica do acelerômetro HS-100 . . . . .                 | 36 |
| Tabela 6 – Percentual de etanol em cada mistura via sensor flex fuel. . . . .     | 42 |
| Tabela 7 – Resultados de kurtosis, RMS e Shape Factor para cada teste. . . . .    | 57 |

# Lista de abreviaturas e siglas

|          |                                                                         |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|
| AFAVEA   | Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores             |
| ANP      | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis             |
| CEAR     | Centro de Energias Alternativas e Renováveis                            |
| CO       | Monóxido de Carbono                                                     |
| CT       | Centro de Tecnologia                                                    |
| DEM      | Departamento de Engenharia Mecânica                                     |
| EHC      | Etanol Hidratado Combustível                                            |
| GPICEEMA | Grupo de Instrumentação e Controle em Estudo de Energia e Meio Ambiente |
| HP       | <i>Horse Power</i>                                                      |
| IBGE     | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                         |
| IEMA     | Instituto de Energia e Meio Ambiente                                    |
| LES      | Laboratório de Energia Solar                                            |
| LPG      | <i>Liquid Petroleum Gas</i>                                             |
| MCI      | Motor de Combustão Interna                                              |
| MIR      | <i>Medium Infrared</i>                                                  |
| NIR      | <i>Near Infrared</i>                                                    |
| NOx      | Óxidos de Nitrogênio                                                    |
| PMI      | Ponto Morto Inferior                                                    |
| PMS      | Ponto Morto Superior                                                    |
| RON      | <i>Research Octane Number</i>                                           |
| RMS      | <i>Root Mean Square</i>                                                 |
| RPM      | <i>Rotations per Minute</i>                                             |
| UFPB     | Universidade Federal da Paraíba                                         |

# Sumário

|            |                                                         |           |
|------------|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>                                       | <b>13</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Justificativa</b>                                    | <b>13</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivos</b>                                        | <b>17</b> |
| 1.2.1      | Objetivos Geral                                         | 17        |
| 1.2.2      | Objetivos Específicos                                   | 17        |
| <b>2</b>   | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                            | <b>18</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Motores de Combustão Interna</b>                     | <b>18</b> |
| 2.1.1      | Uma breve revisão histórica                             | 18        |
| 2.1.2      | Fundamentos de um MCI                                   | 20        |
| 2.1.3      | Causas fundamentais da vibração em um MCI               | 23        |
| 2.1.4      | Combustíveis para um MCI                                | 24        |
| <b>2.2</b> | <b>Processamento de Sinais</b>                          | <b>28</b> |
| 2.2.1      | Introdução                                              | 28        |
| 2.2.2      | Transformada de Fourier                                 | 29        |
| 2.2.3      | Amostragem do sinal                                     | 30        |
| 2.2.4      | Janelamento de Hamming                                  | 31        |
| 2.2.5      | Filtro de Notch                                         | 32        |
| 2.2.6      | Kurtosis, <i>Root Mean Square</i> e <i>Shape Factor</i> | 34        |
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA</b>                                      | <b>35</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Introdução</b>                                       | <b>35</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Instrumentação do veículo</b>                        | <b>35</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Realização dos experimentos</b>                      | <b>36</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Análise do combustível</b>                           | <b>39</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Pós-processamento dos dados</b>                      | <b>43</b> |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                          | <b>44</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>                             | <b>64</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS</b>                                      | <b>65</b> |

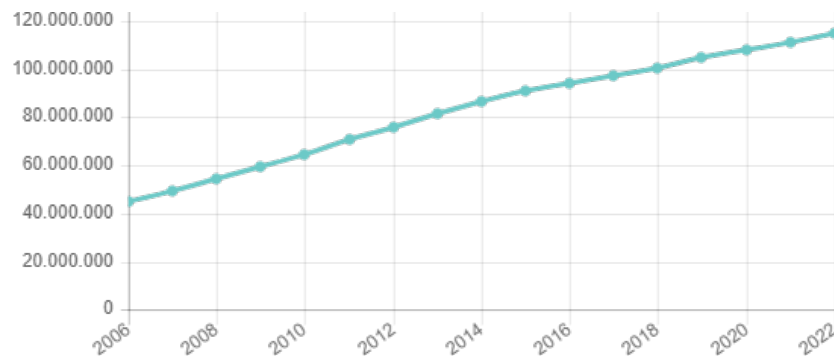
# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Justificativa

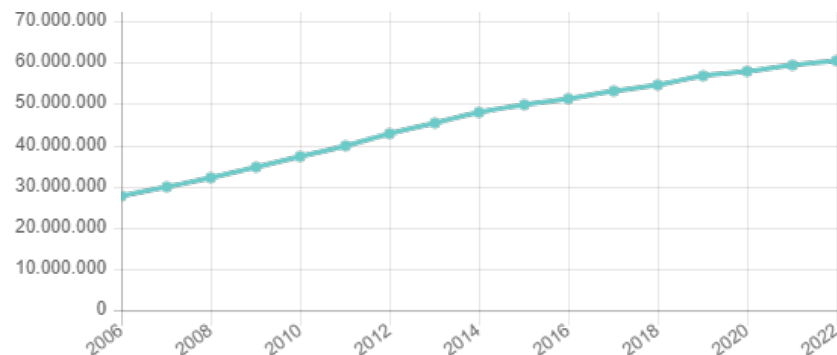
Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, o número de veículos, incluindo automóveis, motocicletas, ônibus, caminhões, maquinário pesado etc., chegou à incrível marca de 115 milhões de unidades em solo brasileiro no ano de 2022. Destes, cerca de 60 milhões (52%) são automóveis.

Figura 1 – Quantidade de veículos e automóveis em circulação no Brasil.

(a) Número de veículos em circulação no Brasil de 2006 à 2022.



(b) Número de automóveis em circulação no Brasil de 2006 à 2022.



Fonte: ([IBGE, 2023](#))

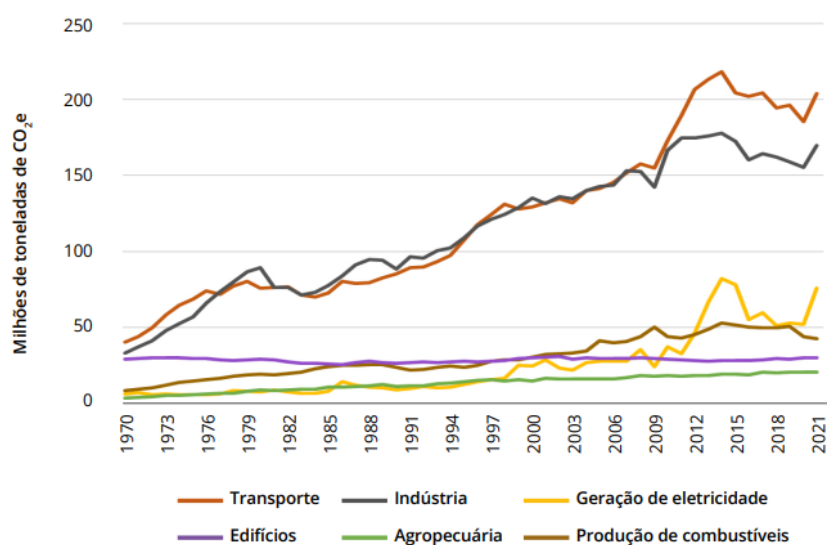
Ao observar a Figura 1(a), torna-se evidente a tendência de constante crescimento do número de veículos no país, muito em parte pelo crescimento do número de automóveis. O relatório anual da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - AFAVEA de 2023 aponta uma capacidade instalada de produção de 4.5 milhões de veículos por ano através das 57 unidades industriais espalhadas pelo país, tornando o Brasil o 8º maior produtor de veículos do mundo. Ainda segundo ([AFAVEA,](#)

2023), a produção acumulada de veículos entre 1957 e 2022 é de 91 milhões de unidades.

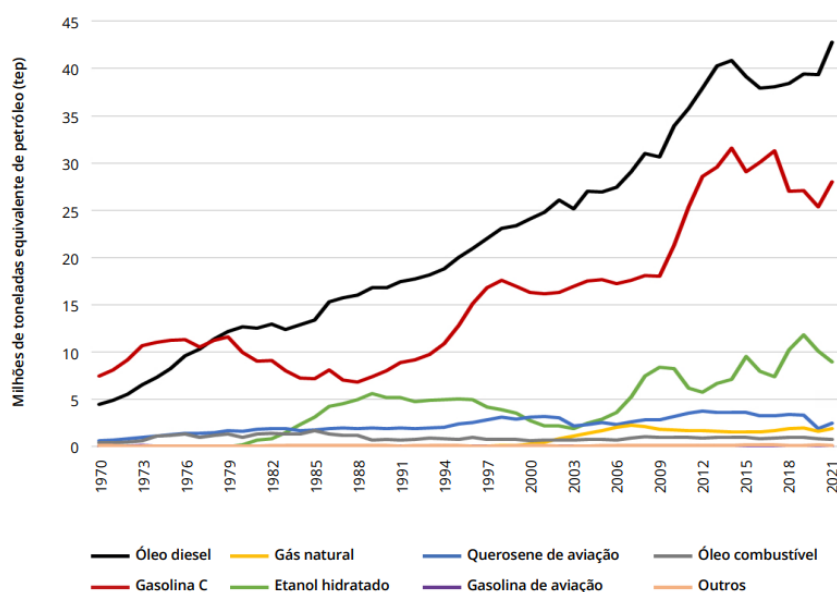
É de conhecimento comum que os veículos correspondem à boa parte do número de emissões dos gases causadores do efeito estufa. Principalmente veículos como caminhões, tratores e demais consumidores de óleo diesel. Segundo relatório do Instituto de Energia e Meio Ambiente - IEMA, o setor de energia, onde os veículos majoritariamente participam, corresponde à 18% das emissões de efeito estufa. Nesse setor, destacam-se como maiores emissoras as atividades de transporte e indústria, conforme Figura 2(a).

Figura 2 – Análise sobre a composição de emissões de gases de efeito estufa no Brasil

(a) Emissões de gases de efeito estufa nas atividades dos setores de energia



(b) Consumo de combustíveis na atividade de transporte



Fonte: (IEMA, 2023)

Também em (IEMA, 2023), encontra-se exposto o consumo de combustíveis dentro da atividade de transportes, onde óleo diesel e gasolina são consideravelmente os combustíveis mais consumidos, respectivamente. Os demais combustíveis obtiveram quantidades de consumo muito inferiores, em tendência contrária ao diesel e gasolina que obtiveram um salto significativo no consumo durante os últimos três anos da série histórica, como pode ser observado na Figura 2(b).

Apesar de possuir uma extensa frota de veículos *flex* perfeitamente capaz de operar utilizando etanol, o mesmo está longe de competir com a gasolina no momento de decisão do consumidor. Diversos fatores podem ser citados na tentativa de interpretar o comportamento do consumo de etanol no Brasil. Contudo, um dos principais agentes sem dúvida é a relação custo x benefício intrínseca de tal produto. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, o preço médio nacional da gasolina registrou a marca de R\$ 6,110, representando uma alta de 5,7% em relação ao ano anterior. Entre 2022 e 2018 a alta acumulada é de 38,6%; no mesmo período, o preço médio do etanol registrou alta acumulada em 53%, chegando à R\$ 4,420 no ano de 2022, um aumento de 2% em relação ao ano anterior. (ANP, 2023).

O custo dos combustíveis alternativos por unidade de energia entregue pode ser maior que o da gasolina ou óleo diesel, uma vez que a densidade energética dos combustíveis alternativos em volume é menor em ambos os casos. Uma menor densidade volumétrica de energia requer maiores volumes de armazenamento de combustível para obter a mesma autonomia dos veículos movidos a gasolina. (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2015)

Além dos fatos expostos, uma prática infelizmente comum no cenário nacional é adulteração de combustíveis em prol do aumento da margem de lucro. De acordo com a resolução N° 807 da ANP (ANP, 2020), todo distribuidor, transportador, ou revendedor-retalhista deve apresentar um boletim de conformidade de acordo com a legislação vigente, no presente momento estabelecida em (MAPA, 2015), onde define-se o teor de etanol anidro hidratado adicionado à gasolina premium e comum como 25% e 27% respectivamente. Dessa forma, entende-se como gasolina adulterada qualquer amostra fora dessa especificação.

O uso de combustível adulterado pode acelerar o processo de corrosão de partes do motor, causando um severo prejuízo financeiro ao proprietário do veículo. Além disso, a performance do motor é prejudicada, aumentando o consumo e o nível de emissões de gases nocivos ao meio ambiente. Em face dessa problemática, diversos métodos foram desenvolvidos em prol da detecção de não-conformidades no combustível, como mostra a Tabela 1. Em sua grande parte, são métodos de experimentação laboratorial com extração de amostra do combustível, dificultando uma aplicação prática no cotidiano.

Tabela 1 – Resumo de trabalhos relacionados

| Autor                              | Descrição                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (FIGUEIREDO et al., 2012)          | Utilização de atenuação ultrassônica e velocidade de propagação para detecção de adulterações no etanol e biocombustíveis.                                                         |
| (SILVA et al., 2012)               | Método eletroanalítico simples de baixo custo para identificação de adulteração em amostras de EHC usando análises multivariadas.                                                  |
| (PEREIRA et al., 2013)             | Determinação simultânea de etanol e metanol em EHC utilizando voltametria cíclica em um eletrodo de ouro.                                                                          |
| (ALTAN; ARIK; ESENTURK, 2014)      | Investigação das propriedades dielétricas da mistura etanol/gasolina na região espectral terahertz para determinação do teor de etanol na gasolina.                                |
| (ABREU et al., 2015)               | Detecção da adulteração de etanol por metanol através de voltametria cíclica e calibração multivariada.                                                                            |
| (VELLO et al., 2017)               | Desenvolvimento de uma plataforma simples, rápida e precisa, baseada em sensores nanoestruturados que operam através de medições de capacitância, para avaliar amostras de etanol. |
| (AVILA; BALESTIERI; QUIROGA, 2017) | Avaliação do comportamento térmico e cinético de misturas etanol/gasolina por análise termogravimétrica a fim de determinar o teor de etanol na gasolina.                          |
| (BABUA; KRISHNAB; MANIC, 2017)     | Detecção da adulteração de combustíveis através de técnicas computacionais.                                                                                                        |
| (AVILE et al., 2018)               | Cromatografia líquida de alta eficiência com detecção de índice de refração para quantificar o teor de etanol na gasolina.                                                         |

Fonte: (Autor, 2023)

O desenvolvimento de uma metodologia não-invasiva para diagnóstico de adulteração de etanol em motor de combustão interna foi estudado primeiramente por (SOUZA et al., 2022). Nesse trabalho, foram realizados diversos experimentos onde em cada caso o veículo foi abastecido com uma concentração distinta de etanol, buscando adquirir o sinal de vibração correspondente. Posteriormente, os dados de vibração do motor foram processados utilizando a técnica conhecida como *Signal Analysis based on Chaos using Density of Maxima* - SAC-DM em busca de correlação entre a variável caótica e o percentual de etanol da mistura.

Considerando a tendência de aumento do número de veículos em circulação, o atual cenário de consumo de combustíveis no país, o aumento dos preços de combustíveis e os prejuízos que a adulteração destes provoca, torna-se substancial desenvolver uma metodologia não-invasiva alternativa e robusta para detectar essa atividade de forma ágil e precisa, almejando a consolidação desse nicho de estratégias dentre o cenário técnico-científico atuante no mercado de combustíveis no Brasil.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivos Geral

O presente trabalho de conclusão de curso busca estudar uma técnica para diagnóstico de gasolina adulterada em motor de combustão interna através de metodologia não-invasiva capaz de correlacionar o comportamento do motor em operação com a composição do combustível utilizado.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Manipulação da gasolina buscando criar amostras com diferentes percentuais de composição.
- Realização de testes para aquisição de dados do motor sob operação com amostras adulteradas.
- Desenvolvimento de um algoritmo capaz de realizar o processamento dos sinais adquiridos, cálculo da transformada rápida de Fourier e cálculo de métricas estatísticas a respeito dos sinais.
- Validação da metodologia através de análise estatística.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Motores de Combustão Interna

#### 2.1.1 Uma breve revisão histórica

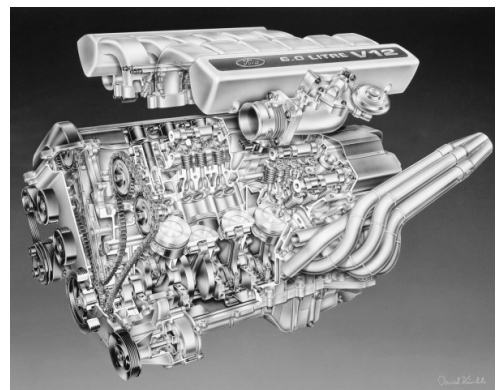
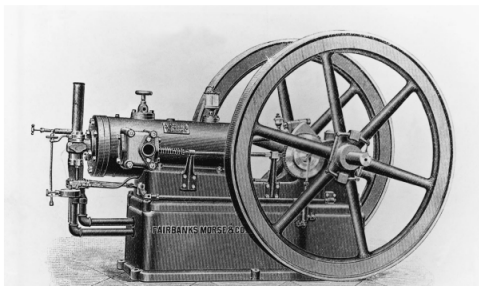
Nos primórdios, todo trabalho realizado pela nossa espécie exigia a própria força muscular. Posteriormente, animais foram adestrados e treinados para diminuir o enorme dispêndio de energia com tarefas brutas até que o mundo, enfim, foi iluminado pela arte da conversão de energia, sendo essa certamente uma das habilidades particulares do ser humano que mais evoluiu ao passo dos avanços tecnológicos. A máquina que faz esse trabalho de conversão de energia é chamada de *motor*.

Uma máquina que converte energia térmica em trabalho mecânico é chamada de máquina térmica ([GANESAN, 2012](#)). Nesse estudo, a máquina térmica em questão é o motor de combustão interna - MCI, onde inicialmente ocorre transformação da energia química do combustível em energia térmica através do processo de combustão e em seguida a conversão da energia térmica em energia mecânica diante do movimento do pistão. Muitos cientistas trabalharam por décadas no desenvolvimento dessa tecnologia, a Tabela 2 expõe fatos marcantes dessa trajetória em ordem cronológica.

Figura 3 – Desenvolvimento do motor de combustão interna

(b) Vista em corte do motor de quatro-tempos Ford V12, de 1990.

(a) Motor Charter fabricado em 1893.



Fonte: ([PULKRABEK, 2014](#))

Tabela 2 – Evolução histórica do motor de combustão interna

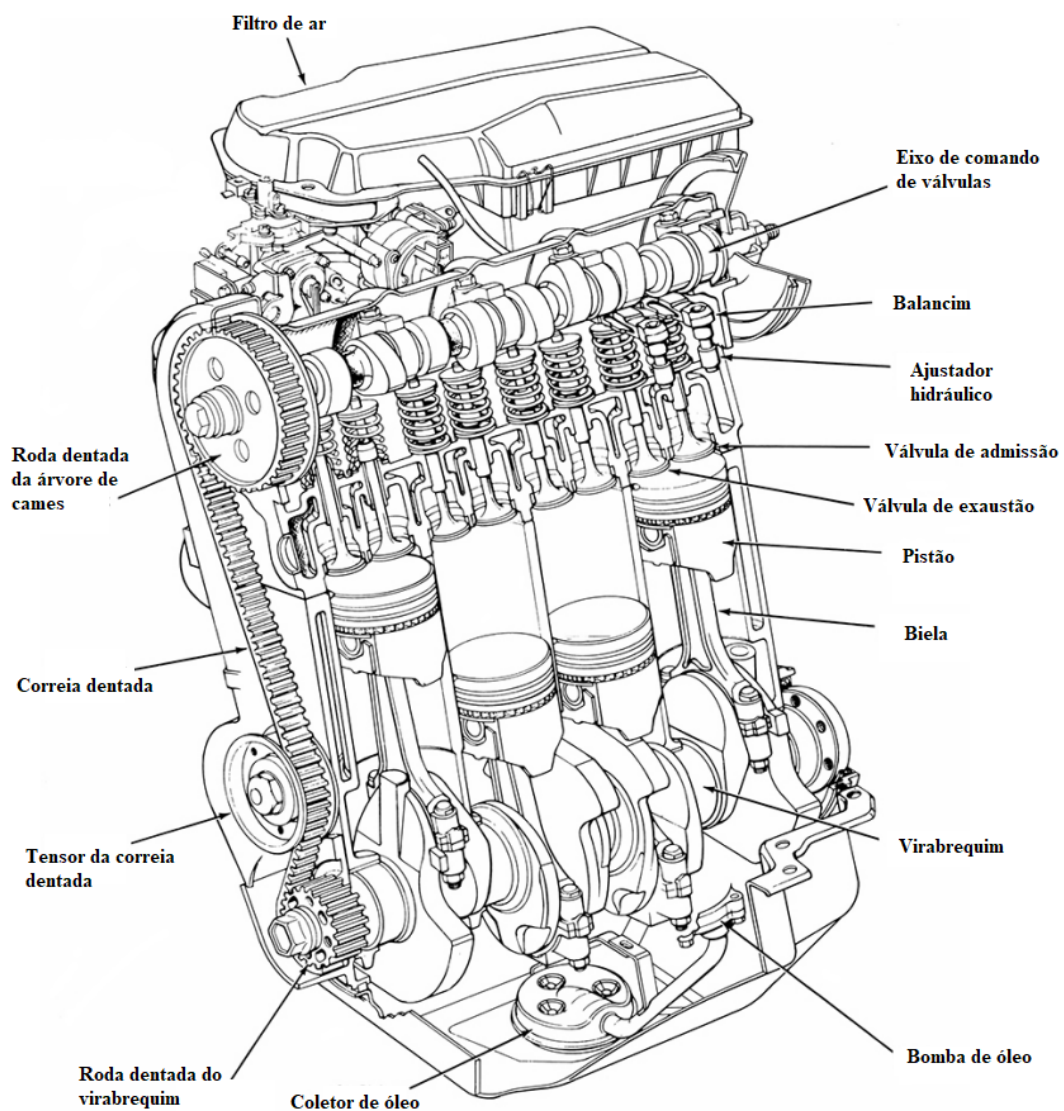
|                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1858 - J. Lenior<br/>(1822-1900)</b>  | Desenvolvimento de um motor dois-tempos que produzia 6 HP de potência com uma eficiência de aproximadamente 5%. Durante o curso de admissão, uma mistura gás-ar sob pressão atmosférica era atraída para dentro do motor e inflamada por uma faísca, causando um aumento de pressão no interior do cilindro e consequentemente a geração de trabalho.                                  |
| <b>1872 - G. Brayton<br/>(1830-1892)</b> | Desenvolvimento de um motor que usava dois cilindros alternativos acionados por pistão, um cilindro de compressão e um cilindro de expansão. A ignição da mistura gás-ar era feita através de uma chama, queimada sob pressão constante enquanto era bombeada do cilindro de compressão para o cilindro de expansão.                                                                   |
| <b>1876 - N. Otto<br/>(1832-1891)</b>    | Criação do primeiro motor quatro-cilindros prático com compressão dentro do cilindro. Possuindo uma razão de compressão de 2,5, o motor produzia 2 HP a 160 RPM. Otto é considerado o inventor do conceito moderno de motor de combustão interna.                                                                                                                                      |
| <b>1880</b>                              | Refinarias de petróleo bruto passam a produzir gasolina e querosene em quantidades suficientes para integrar o mercado de combustíveis para o MCI.                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>1883 - G. Daimler<br/>(1834-1900)</b> | Desenvolvimento de um motor a gasolina de quatro tempos de alta velocidade. O combustível líquido era vaporizado e misturado com o ar de admissão em um carburador antes de ser aspirado para a câmara de combustão onde a era incendiada por uma chama.                                                                                                                               |
| <b>1897 - R. Diesel<br/>(1858-1913)</b>  | Criação do primeiro motor quatro-tempos prático a usar injeção direta de um combustível líquido na câmara de combustão. A alta taxa de compressão levava a mistura à autoignição sem necessidade de uma chama. O motor operava em velocidade de 170 RPM produzindo 18 HP com eficiência de 27%, muito acima da eficiência de máquinas à vapor ou até de motores de ignição por faísca. |

Fonte: (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2015) (Adaptado)

### 2.1.2 Fundamentos de um MCI

**Definição:** O motor de combustão interna é uma máquina térmica que converte energia química contida no combustível em energia mecânica, geralmente disponível através de um eixo em rotação. A energia química do combustível é primeiramente convertida em energia térmica pela combustão ou oxidação do combustível. A energia térmica gera um aumento de pressão e temperatura no interior da câmara de combustão e os gases em alta pressão se expandem contra os mecanismos mecânicos do motor. Essa expansão é então convertida para um eixo virabrequim rotativo através de lincagens mecânicas. (PULKRABEK, 2014)

Figura 4 – Vista em corte de um motor quatro-tempos de ignição por centelha.



Fonte: (HEYWOOD, 2018) (Adaptado)

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*, como o exemplo mostrado na Figura 4, faz-se necessário restringir o escopo do estudo à esse motor em questão. O ciclo fundamental de um motor quatro-tempos é definido através das seguintes etapas:

**Admissão:** Ocorre o movimento do pistão do ponto morto superior - PMS <sup>1</sup> em direção ao ponto morto inferior - PMI <sup>2</sup> mantendo a válvula de admissão aberta. Isso produz um aumento do volume interno da câmara de combustão, criando uma diferença de pressão entre o ar atmosférico e o sistema de admissão, causando a sucção do ar externo para o interior do cilindro. Simultaneamente, combustível é vaporizado dentro do sistema de injeção, dando origem à mistura ar-combustível que é admitida no interior do cilindro.

**Compressão:** Ao atingir o PMI, a válvula de admissão é fechada e o pistão inicia o deslocamento vertical em direção ao PMS novamente, comprimindo a mistura ar-combustível, o que leva a um aumento de pressão e temperatura no interior do cilindro. A vela de ignição é acionada imediatamente antes do fim do ciclo de compressão, dando início ao processo de combustão.

**Expansão:** O processo de combustão ocorre quase instantaneamente e com volume constante, gerando uma enorme pressão que afasta o pistão do PMS enquanto as

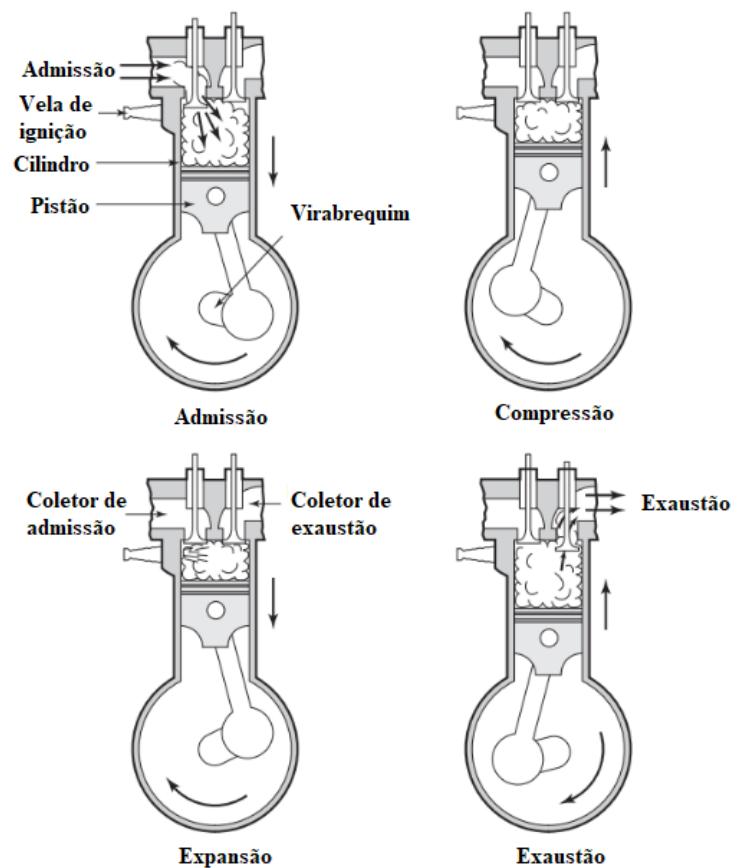
<sup>1</sup> Posição onde o pistão atinge seu deslocamento máximo com relação ao virabrequim.

<sup>2</sup> Posição onde o pistão encontra-se mais próximo do virabrequim.

válvulas de admissão e exaustão mantêm-se fechadas. Através da biela, ocorre a conversão do movimento linear do pistão em movimento circular do virabrequim. É durante a etapa de expansão que o motor efetivamente produz trabalho.

**Exaustão:** Imediatamente antes do pistão atingir o PMI, a válvula de exaustão é aberta para que os gases provenientes da combustão possam ser exauridos do interior do cilindro. O pistão então direciona-se ao PMS, expulsando os gases do interior da câmara de combustão em direção ao coletor de exaustão, até atingir o PMS. É importante notar que uma parte dos gases de exaustão continuam no interior do cilindro, confinados no volume entre o pistão em PMS e as válvulas. Para realizar uma limpeza completa dos gases no interior da câmara, a válvula de admissão é aberta imediatamente antes do pistão atingir o PMS, nesse momento, ambas as válvulas estão abertas, fato conhecido como *valve overlap* ou sobreposição de válvulas. Em sequência, a válvula de exaustão é fechada até que o pistão finalmente atinge o PMS, dando início a um novo ciclo.

Figura 5 – Etapas do ciclo Otto



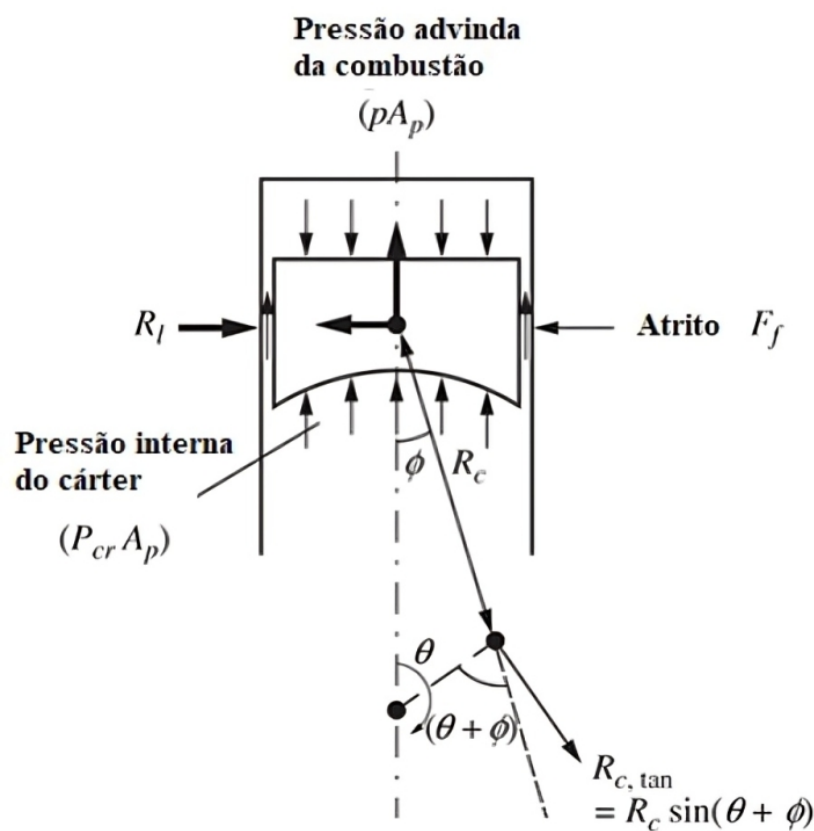
(FERGUSON; KIRKPATRICK, 2015) (Adaptado)

### 2.1.3 Causas fundamentais da vibração em um MCI

Ao analisar vibrações em motores de combustão interna, percebe-se que as maiores fontes de vibrações são geradas pela combustão e por forças mecânicas. Essas forças ocorrem em uma ampla faixa de frequência e são transmitidas à superfície externa do motor de diversas maneiras, como através do mecanismo do pistão, biela, virabrequim e bloco do motor. Como resultado da ação dessas forças, as superfícies externas do motor ficam sujeitas a vibrações de diversas amplitudes. (SANTANA; MAUTONE; ALMEIDA, 2019).

A Figura 6 exemplifica as forças atuantes no sistema biela-pistão durante o ciclo de expansão do processo de combustão. A explosão da mistura ar-combustível produz uma pressão contra a área superior do pistão, gerando uma força sobre o conjunto biela-pistão no sentido para baixo, enquanto a pressão interna do bloco do motor produz uma força na superfície inferior, gerando uma força no sentido contrário. Somada à essa força de resistência está a força de atrito, gerado pela fricção da superfície do cilindro com o pistão. A resultante dessas forças é transmitida ao eixo virabrequim em forma de torque.

Figura 6 – Forças atuantes no pistão e biela durante o ciclo de expansão.

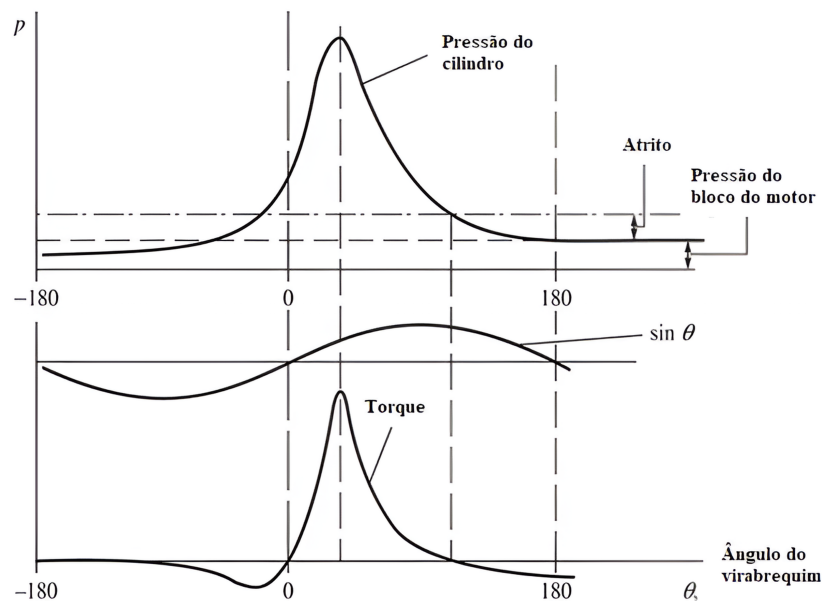


(HEYWOOD, 2018) (Adaptado)

O caráter impulsivo da força gerada pela combustão é fator determinante para

a complexidade do balanceamento de forças sob o eixo virabrequim. O aumento do número de cilindros resulta em torque mais frequente e menores pulsos e, portanto, uma operação mais suave do motor. Uma desvantagem importante é que as forças variantes no tempo e a dinâmica dos movimentos dos vários pistões-bielas não necessariamente se equilibram totalmente, resultando em oscilação das forças nos componentes do motor que podem causar vibrações na sua estrutura (HEYWOOD, 2018).

Figura 7 – Variação da pressão interna do cilindro e torque transmitido durante uma revolução.



(HEYWOOD, 2018) (Adaptado)

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 (SANTANA; MAUTONE; ALMEIDA, 2013). No presente trabalho, as demais fontes de vibração são menosprezadas, uma vez que o motor analisado está sendo operado sob circunstâncias estritamente semelhantes, exceto pela variação do percentual de etanol no combustível.

#### 2.1.4 Combustíveis para um MCI

O tema de combustíveis para um MCI tem sido estudado desde a existência dos motores. 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, na poluição do ar e, em muitos casos, na confiabilidade e durabilidade do motor. (GUPTA, 2013)

As características de um combustível devem ser tais que os seguintes objetivos sejam alcançados:

1. O combustível deve ser efetivamente atomizado, vaporizado e bem misturado com o ar.
2. O processo de combustão deve ser rápido.
3. A partida do motor deve ser rápida e confiável em qualquer condição ambiental.
4. A superfície da câmara de combustão deve permanecer livre de carbono e outras partículas.
5. A superfície do cilindro, pistão e anéis do pistão não devem ser submetidas à desgaste e corrosão excessiva.
6. Os elementos básicos do motor devem permanecer livres de tensão térmica causada por gradiente de temperatura desenvolvido durante a combustão.

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.

A gasolina é o combustível dominante para uso no motor de ignição por centelha. É uma mistura de hidrocarbonetos leves destilados tais como parafinas, naftenos, olefinas, e aromáticos. Como todos os hidrocarbonetos líquidos, tem uma densidade de energia química muito alta - energia por unidade de massa ou volume. Esta energia química é armazenada no carbono-hidrogênio e em ligações carbono-carbono, sendo liberada como energia térmica quando estes elementos são oxidados pela queima do combustível com ar. (HEYWOOD, 2018)

Ainda segundo (HEYWOOD, 2018), em termos de operação de um motor que opera sob ciclo *Otto*, as propriedades mais críticas da gasolina são sua volatilidade e sua resistência à autoignição (*knock* ou detonação) durante a última parte do processo de combustão. A volatilidade da gasolina é caracterizada pela sua curva de destilação: Fração volumétrica evaporada à pressão atmosférica em função da temperatura. Normalmente, 10% da gasolina vaporiza abaixo de cerca de 50°C (T 10), 50% vaporiza abaixo de 100°C (T 50) e 90% abaixo de 170°C (T 90). O combustível deve conter componentes altamente voláteis suficientes para garantir uma partida à frio rápida e de baixa emissão em poluentes.

O etanol ( $C_2H_5OH$ ) é um combustível alcoólico formado através da fermentação de carboidratos obtidos principalmente através de matéria-prima renovável como a cana

de açúcar ou milho. A densidade de energia por volume do etanol é relativamente elevada para um combustível alternativo - não derivado do petróleo, sendo cerca de dois terços da energia volumétrica da gasolina. A octanagem do etanol de 111 RON (*research octane number*) garante uma característica de anti-knock que permite o seu uso em uma taxa de compressão superior. A presença do oxigênio na estrutura molecular do etanol garante uma melhor queima dos hidrocarbonetos durante o processo de combustão, reduzindo a temperatura dos gases de exaustão e as emissões de CO (monóxido de carbono) e NOx (óxidos de nitrogênio). (GUPTA, 2013)

De acordo com (PULKRABEK, 2014), as vantagens do uso de etanol como um combustível incluem:

1. Produção via múltiplas fontes, naturais e sintéticas.
2. Sua característica de alta octanagem e anti-knock garante a possibilidade de uso em altas taxas de compressão, aumentando a eficiência de combustão.
3. De forma geral, emite menores níveis de gases nocivos ao ambiente, se comparado à gasolina.
4. Quando queimado, forma mais moles de exaustão, o que proporciona maior pressão e mais potência no curso de expansão.
5. Possui alto resfriamento evaporativo que resulta em um processo de admissão e curso de compressão mais frios. Isto aumenta a eficiência volumétrica do motor e reduz o trabalho necessário no curso de compressão.
6. Baixo teor de enxofre no combustível.

Do contrário, as desvantagens abrangem:

1. Baixo teor energético do combustível. Em outros termos, quase duas vezes mais álcool do que gasolina deve ser queimado para entregar a mesma energia para o motor. Com eficiência térmica igual e motor semelhante, seria necessário comprar o dobro de combustível e a distância que poderia ser conduzido com um determinado volume do tanque de combustível seria reduzida pela metade.
2. Mais aldeídos nos gases de exaustão. Se fosse consumido tanto álcool quanto gasolina, as emissões de aldeídos seriam um sério problema de poluição por gases de escape.
3. Muito mais corrosivo que a gasolina em cobre, latão, alumínio, borracha e muitos plásticos. Isso impõe algumas restrições ao projeto e fabricação de motores para a utilização com esse combustível.

- 4. Características de partida à frio ruim devido à baixa pressão de vapor e evaporação. Os motores movidos a álcool geralmente têm dificuldade de partida em temperaturas abaixo de 10°C.
- 5. Baixas temperaturas de chama, resultando em menos NOx. Contudo, as temperaturas de escape mais baixas levam mais tempo para aquecer o conversor catalítico a uma temperatura operacional eficiente.

Tabela 3 – Comparação entre as propriedades do etanol, gasolina e misturas.

| Combustível | Fórmula                  | Peso molecular | Calor de vaporização (kJ/kg) | RON   | MON   |
|-------------|--------------------------|----------------|------------------------------|-------|-------|
| Etanol      | $C_2H_5OH$               | 46.07          | 900                          | 109   | 90    |
| Gasolina    | $C_nH_{1.87n}$           | aprox. 100     | 350                          | 91-99 | 82-89 |
| E10         | $C_nH_{1.94n}O_{0.043n}$ | aprox. 100     | 400                          | 96    | 85    |

Fonte: Adaptado de (HEYWOOD, 2018)

A tabela Tabela 3 mostra as principais propriedades físico-químicas do etanol, gasolina e da mistura E10 (10% de etanol). O calor de vaporização indica a quantidade de energia necessária para converter uma determinada quantidade de massa em estado líquido para o estado gasoso. Os índices RON e MON (*motor octane number*) indicam a resistência de detonação do combustível, propriedade conhecida como octanagem. A média aritmética desses dois índices é conhecida como índice antidetonante, informação essa geralmente disponibilizada nas bombas de abastecimento em postos de combustível.

É importante encontrar um ponto de equilíbrio entre essas propriedades, uma vez que um alto calor de vaporização dificulta a partida à frio do motor, enquanto um baixo índice antidetonante diminui a entrega de torque disponível. A adição de etanol à gasolina é uma prática comum no mercado de combustíveis, buscando alinhar as boas características de ambos como: A alta densidade de energia volumétrica, e melhor combustão em partida à frio da gasolina, com a alta octanagem e alto calor de vaporização do etanol. Permitindo assim, uma maior taxa de compressão e consequentemente uma maior entrega de torque sem risco de *knock*. No Brasil, o combustível padrão é a gasolina comum do tipo C, também conhecida como E27 (27% de etanol). No momento existe um projeto de lei aprovado pela câmara dos deputados e sob análise do senado cuja proposta é aumentar esse percentual para até 35%. (GOV-BR, 2024)

## 2.2 Processamento de Sinais

### 2.2.1 Introdução

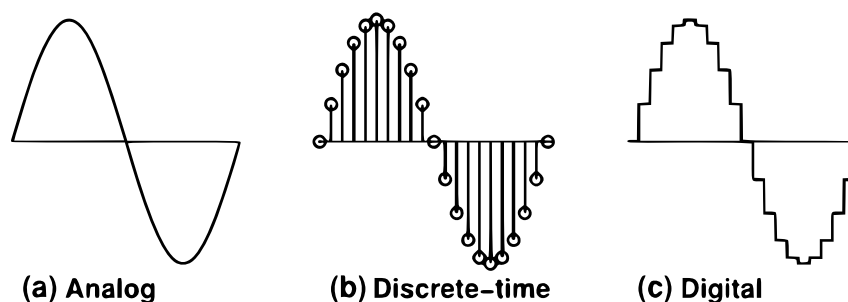
Um sinal é uma parcela de informação (natural ou sintética) expressa em função de tempo e talvez outras variáveis, como as dimensões  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Esta informação pode ser transmitida de várias maneiras, por ex. por uma sequência de valores de amplitude correspondendo a intervalos de tempo regularmente espaçados. (HUSSAIN; SADIK; O'SHEA, 2011)

Sinais podem ser classificados de diversas formas, como:

- Sinal analógico, discreto ou digital.
- Sinal real ou complexo.
- Sinal periódico ou não periódico.
- Sinal determinístico ou randômico
- Sinal de canal único ou multi-canais.
- Sinal de potência ou energia.
- Sinal mono-componente ou multi-componente.

A vibração do motor de combustão interna é um movimento físico acelerado, que pode ser estudado através do uso de um acelerômetro: Equipamento que converte a aceleração do movimento em tensão elétrica onde a intensidade da tensão é equivalente à aceleração do sistema. Naturalmente, o sinal gerado pela vibração do motor é um sinal analógico; isso é, um sinal representado através de uma função contínua no tempo. Contudo, devido à limitação da velocidade de leitura das informações contidas no sinal analógico, esse passa por um conversor A/D convertendo-o para um sinal digital, discretizado em relação ao tempo e quantificado em diferentes níveis.

Figura 8 – Função senoidal em versão analógica, discreta e digital.



Fonte: (HUSSAIN; SADIK; O'SHEA, 2011)

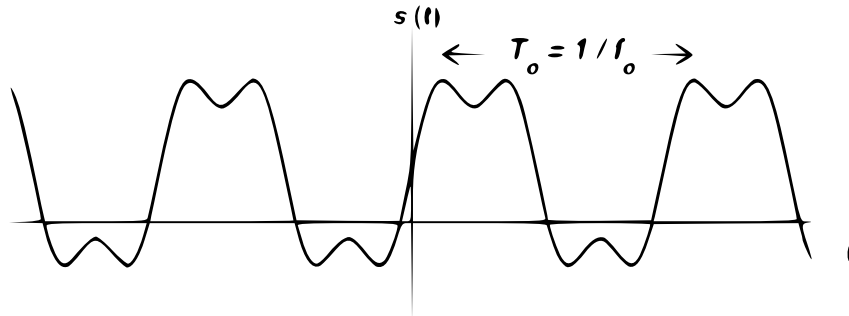
### 2.2.2 Transformada de Fourier

Existem duas principais abordagens para análise de um sinal: O domínio do tempo e o domínio da frequência. No domínio do tempo, o sinal é representado simplesmente definindo o seu valor para cada instante do tempo através de uma função  $y = x(t)$ . Por outro lado, o domínio da frequência representa o sinal através de uma função  $y = X(f)$ , revelando características a respeito da natureza do sinal que não são evidentes no domínio do tempo. Ambas são equivalentes, sendo interligadas através da transformada de Fourier.

Para explorar tais características, é necessário primeiramente revisar a famosa série de Fourier.

Um sinal  $x(t)$  é dito periódico com período  $T$  quando a cada  $T$  segundos é observado o mesmo valor no sinal. Como exemplifica a Figura 9.

Figura 9 – Representação de um sinal periódico



Fonte: (HUSSAIN; SADIK; O'SHEA, 2011)

Se  $x(t)$  é um sinal contínuo e periódico com período  $T$ , pode-se representá-lo através da série de Fourier:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(\omega_o t) + b_n \sin(\omega_o t)] \quad (2.1)$$

Onde:  $\omega_o = \frac{2\pi}{T}$  e:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega_o t) dt \quad (2.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega_o t) dt \quad (2.4)$$

são os coeficientes da série de Fourier.

Desse modo, pode-se aproximar de forma satisfatória uma função periódica como a soma de diversas funções de senos e cossenos, cada qual sob uma diferente frequência e amplitude. Vale salientar que a série de Fourier é aplicável somente para uma função periódica e diferentemente da transformada de Fourier, a série continua representando a função no domínio do tempo ( $t$ ). A transformada de Fourier permite analisar sinais não periódicos fazendo  $T \rightarrow \infty$ , nesse caso:

$$X(f) = \mathcal{F}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi ft} dt \quad (2.5)$$

Dessa forma, a transformada  $X(f)$  da função  $x(t)$  permite analisar o espectro das frequências que compõem o sinal, identificando as frequências dominantes.

O equacionamento iniciado na Equação 2.1 até a Equação 2.5 é válido para uma função contínua no tempo, como o caso do sinal analógico. Contudo, para um sinal digital, discreto no tempo, a transformada de Fourier é dada por:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{\frac{-i2\pi kn}{N}}, \text{ para } 0 \leq k < N, \quad (2.6)$$

É importante observar a necessidade da ordem de  $O(N^2)$  operações aritméticas para calcular a transformada de Fourier através da Equação 2.6, o que demanda um alto custo computacional. A FFT (*Fast Fourier Transform*) nada mais é do que um algoritmo capaz de realizar esse cálculo de forma muito mais eficiente, uma vez que a ordem de operações necessárias cai para  $O(N \log(N))$ . Por exemplo, se  $N = 1024$ , a FFT torna-se aproximadamente 102 vezes mais rápida que a transformada discreta.

### 2.2.3 Amostragem do sinal

É importante observar que, para obter uma aproximação razoável do sinal real, é necessário ter uma quantidade  $N$  de pontos que seja suficientemente grande para traduzir a informação através da transformada de Fourier. A quantidade de pontos está diretamente relacionada com a taxa de amostragem e com o tempo de aquisição do sinal. Por sua vez, a taxa de amostragem representa o número de aferições feitas em determinado intervalo de tempo (geralmente adota-se o segundo), e é condicionada pelas propriedades do equipamento de medição do sinal. Por essa razão a taxa de aquisição possui unidade em termos de frequência, *Hertz* (Hz).

Sendo  $F_a$  a taxa de aquisição. O **teorema de Nyquist–Shannon** afirma que, para extrair todas as principais características de um sinal cuja a frequência máxima de interesse conhecida é  $f_i$ , então, é suficiente que:

$$F_a > 2f_i \quad (2.7)$$

A escolha do valor da taxa de aquisição, entretanto, não limita-se somente à observação da frequência máxima de interesse, uma vez que outras frequências, maiores ou menores, podem apresentar relevância dentro do espectro do sinal. Uma baixa taxa de aquisição garante uma melhor resolução da amostragem, evidenciando a evolução temporal do sinal e sendo dessa forma indicada para análise de baixas frequências. Por outro lado, uma maior taxa de aquisição garante um maior nível de refino da amostragem, sendo possível detectar fenômenos de curta duração que ocorrem em altas frequências.

### 2.2.4 Janelamento de Hamming

Como visto anteriormente, a transformada de Fourier pode ser aplicada, inclusive, para sinais não periódicos e discretos no tempo. Contudo, essa discretização do sinal, em janelas retangulares de tempo, pode causar um fenômeno conhecido como *vazamento espectral*. Esse fenômeno ocorre pois a FFT assume que o sinal real é periódico, sendo essa consideração razoável no intervalo da janela de tempo exceto pelas "bordas", onde essa aproximação pode não ser razoável, uma vez que ocorre um encerramento abrupto do sinal. Dessa forma, o janelamento torna-se uma prática comum durante o processamento de sinais, especialmente tratando-se de sinais não periódicos, a fim de evitar ou reduzir ao máximo a influência desse fenômeno nas análises.

O Janelamento de Hamming é um método que atua suavizando as bordas da janela temporal através da seguinte correção:

$$w(n) = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) = w(t) \quad (2.8)$$

- Onde  $n$  é o índice do intervalo da amostra ( $n = 0, 1, \dots, N-1$ );
- $N$  é o tamanho da amostra de pontos do sinal.

Dessa forma, como para cada instante  $t$  existe um índice  $n$  da amostra, pode-se escrever:

$$x_w(t) = x(t) \times w(n) \quad (2.9)$$

Onde  $x_w(n)$  é o sinal janelado.

### 2.2.5 Filtro de Notch

No presente trabalho, o filtro de *Notch* aplicado é um filtro do tipo FIR (*finite impulse response*) ou filtros de resposta finita ao impulso. Tal denominação deve-se ao modo pelo qual o filtro afeta um sinal. Uma função impulso constitui uma entrada interessante em que o sinal é 0 para todos os pontos, exceto naquele onde possui o valor 1. Uma resposta do filtro FIR para essa entrada possui duração finita e, portanto, recebe o nome de filtro de "resposta finita ao impulso" (WEEKS, 2012).

Os filtros FIR permitem a passagem ou bloqueio de uma certa frequência ou faixa de frequências do espectro do sinal. São os filtros: passa-baixa (*lowpass*), passa-alta (*highpass*), passa-banda (*bandpass*), bloqueia-banda (*bandstop*) ou *Notch*. Este último, é um filtro utilizado para remover uma certa frequência do espectro original.

A aplicação de um filtro FIR acontece da seguinte maneira:

$$Y(z) = X(z) \times H(z) \quad (2.10)$$

Onde,  $X(z)$  é a transformada- $z$  do sinal de entrada  $x(n)$ , uma função polinomial da seguinte forma:

$$X(z) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \times z^{-n} \quad (2.11)$$

onde  $n$  representa o índice na amostra do sinal de tamanho  $N$ .  $Y(z)$  pode ser representada de maneira análoga.

Adiante,  $H(z)$  representa a função de transferência do filtro. Onde:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} \quad (2.12)$$

Dessa forma,  $H(z)$  é a razão de dois polinômios  $X(z)$  e  $Y(z)$ , e portanto, para encontrar a solução  $H(z)$  deve-se encontrar as raízes dos polinômios. Vale notar que, se  $X(z) = 0$  então  $H(z)$  passa a ter uma resposta infinita, esses valores de  $z$  são chamados de *polos*. No caso onde  $Y(z) = 0$  temos  $H(z) = 0$  e os respectivos valores de  $z$  são chamados *zeros*. Polos e zeros são tipicamente determinados na forma de um par conjugado.

Para uma função de transferência de segunda ordem, tem-se:

$$H(z) = \frac{(z - z_{zero1})(z - z_{zero2})}{(z - z_{polo1})(z - z_{polo2})} \quad (2.13)$$

A seguinte expressão determina os polos:

$$\begin{aligned} z_{polo1} &= \alpha \exp(j\omega_c) \\ z_{polo2} &= \alpha \exp(-j\omega_c) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Enquanto os zeros são expressados como:

$$\begin{aligned} z_{zero1} &= \exp(j\omega_c) \\ z_{zero2} &= \exp(-j\omega_c) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Onde  $\omega_c$  é a frequência central normalizada, em rad/amostra, dada por:

$$\omega_c = 2\pi \frac{f_c}{f_s} \quad (2.16)$$

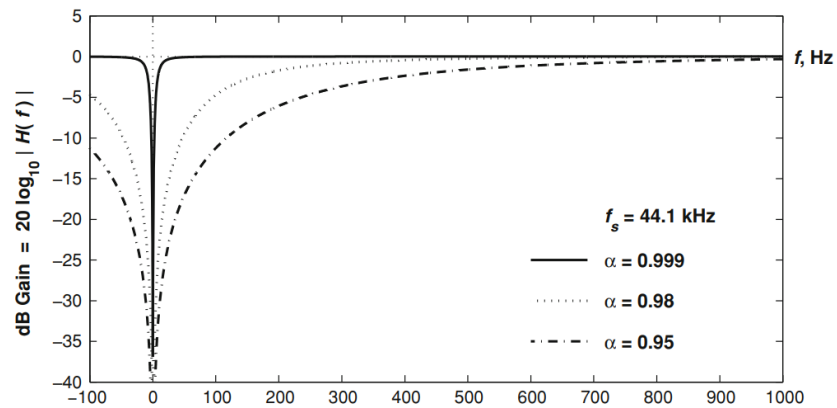
Sendo  $f_c$  a frequência que deseja-se remover do espectro e  $f_s$  a frequência de amostragem do sinal.

Para  $\alpha$  têm-se:

$$\alpha = \frac{1}{2\omega_c BW^{-1}} \quad (2.17)$$

Sendo  $BW$  o termo correspondente à *band width*, ou seja, qual a largura da banda de frequências em torno de  $f_c$  deve ser removida. Como usualmente busca-se por uma baixa largura, o valor de  $\alpha$  tende à 1, em caso onde  $f_s \gg f_c$ .

Figura 10 – Influência do parâmetro  $\alpha$  no filtro de *Notch*.



Fonte: (HUSSAIN; SADIK; O'SHEA, 2011)

$f_c = 0 \text{ Hz}$  no exemplo ilustrado na Figura 10. Todas as frequências cuja magnitude (dB) for diferente de 0 são removidas do sinal, logo a determinação do parâmetro  $\alpha$  para o filtro de *Notch* é de extrema relevância.

### 2.2.6 Kurtosis, Root Mean Square e Shape Factor

*Kurtosis* ou curtosis, *Root Mean Square*, raiz quadrada média ou simplesmente RMS e *Shape Factor* ou fator de forma, são métricas estatísticas amplamente utilizadas na análise e processamento de sinais. Tais ferramentas elucidam características inerentes à natureza do sinal que vão além da análise nos domínios tempo-frequência.

O RMS e *kurtosis* são duas ferramentas estatísticas frequentemente adotadas no diagnóstico de falha de máquinas rotativas para avaliar energia, pico (nitidez) e impulsividade dos sinais de vibração. Embora o RMS dependa fortemente das amplitudes de aceleração e da velocidade do motor de um sistema, *kurtosis* é tremendamente sensível ao ruído e pode ser notadamente afetada pela mistura de combustível e pelas técnicas de processamento de sinal. (MAHDISOOZANI et al., 2019)

*Kurtosis* é definida como:

$$X_{kurt} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - \mu)^4}{\left( \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - \mu)^2 \right)^2} \quad (2.18)$$

Onde,  $\mu$  é a média aritmética do sinal,  $n$  é o índice na amostra e  $N$  é o tamanho do sinal.

A RMS de um sinal é calculada por:

$$X_{RMS} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)^2 \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

O fator de forma é um índice utilizado para avaliar quão cheia de picos ou quão aplanada é a forma do sinal. Quanto maior o fator de forma acima de 1, maior a quantidade de picos enquanto um fator de forma mais baixo, menor que 1, indica um sinal mais plano. Um fator de forma igual a 1 indica um sinal perfeitamente senoidal.

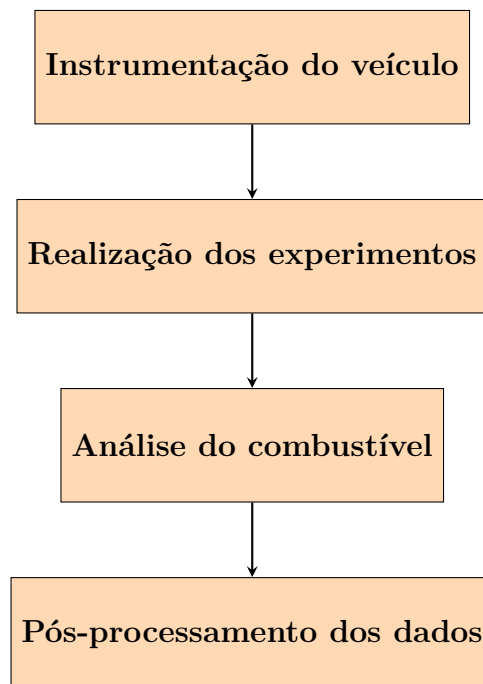
O fator de forma é definido como a razão entre o RMS e o valor absoluto da média aritmética:

$$X_{SF} = \frac{X_{rms}}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|} \quad (2.20)$$

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Introdução

Para cumprir com os objetivos propostos, realizaram-se experimentos buscando adquirir dados de vibração do bloco do motor para posterior processamento e análise. O fluxograma abaixo ilustra a metodologia adotada.



### 3.2 Instrumentação do veículo

O veículo usado durante a aquisição dos dados foi o modelo **Logan 1.6 - 2017/2018**, cujas principais características são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características do veículo Logan 1.6 - 2017/2018

| Versão                                            | 1.6 16V Flex Manual |
|---------------------------------------------------|---------------------|
| Tipo do motor                                     | H4M                 |
| Cilindrada [cm <sup>3</sup> ]                     | 1598                |
| Diâmetro x Curso [mm x mm]                        | 78,0 x 83,6         |
| Torque máximo [kgf.m @ RPM] gasolina              | 16 @ 4000           |
| Torque máximo [kgf.m @ RPM] etanol                | 16 @ 4000           |
| Potência máxima [cv @ RPM] gasolina               | 115 @ 5500          |
| Potência máxima [cv @ RPM] etanol                 | 118 @ 5500          |
| Velocidade angular do motor em marcha lenta [RPM] | 750 ± 50            |

Fonte: ([RENAULT, 2017](#))

Para obter os dados de vibração do motor, utilizou-se um *acelerômetro piezoelétrico* de modelo *HS-100 Series Vibration Sensor* da *Hansford sensors*, exemplificado na Figura 11(b). Tal sensor retorna uma corrente elétrica de tensão equivalente à aceleração do acelerômetro, que nesse caso, está sob um movimento acelerado devido à vibração da superfície do motor onde está posicionado. A Tabela 5 apresenta as principais características de interesse para esse estudo.

Tabela 5 – Especificação técnica do acelerômetro HS-100

|                                  |                                     |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| Sensitividade                    | 100 mV/g ± 10% Nominal 80Hz à 22 °C |
| Frequência de resposta           | 0.8 Hz até 15 kHz ± 3 dB            |
| Faixa de aquisição               | ± 80 g                              |
| Faixa de corrente                | 0.5 mA até 8 mA                     |
| Faixa de temperatura de operação | -55 até 140 °C                      |

Fonte: ([SENSORS, 2024](#))

### 3.3 Realização dos experimentos

A aquisição dos dados de vibração do motor foi realizada no dia 12 de dezembro de 2023, em área externa ao 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. Anteriormente, o veículo fora abastecido com gasolina do tipo C, em posto de abastecimento local.

O procedimento para as aquisições deu-se da seguinte forma:

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. As aquisições de dados duraram cerca de **66 segundos**, sob uma taxa de amostragem de **30000 Hertz**.
5. O processo de aquisições (passo 2 à 4) foi repetido 3 vezes para cada percentual de etanol analisado.
6. Após esse período, o motor foi desligado e uma amostra do combustível foi retirada para análise (tópico abordado na seção 3.4)
7. 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.
8. 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.
9. Nessas condições, o veículo estava apto a iniciar uma nova rodada de experimentos, desde o passo 1.

Todo esse procedimento foi repetido dez vezes, uma vez para cada percentual de etanol analisado nesse estudo. A seção 3.4 apresenta os dados da mistura de combustível em cada rodada de experimentos.

Figura 11 – Instrumentação do veículo.

(a) Detalhe sobre o motor do veículo.



(b) Acelerômetro HS-100 Series Vibration Sensor.

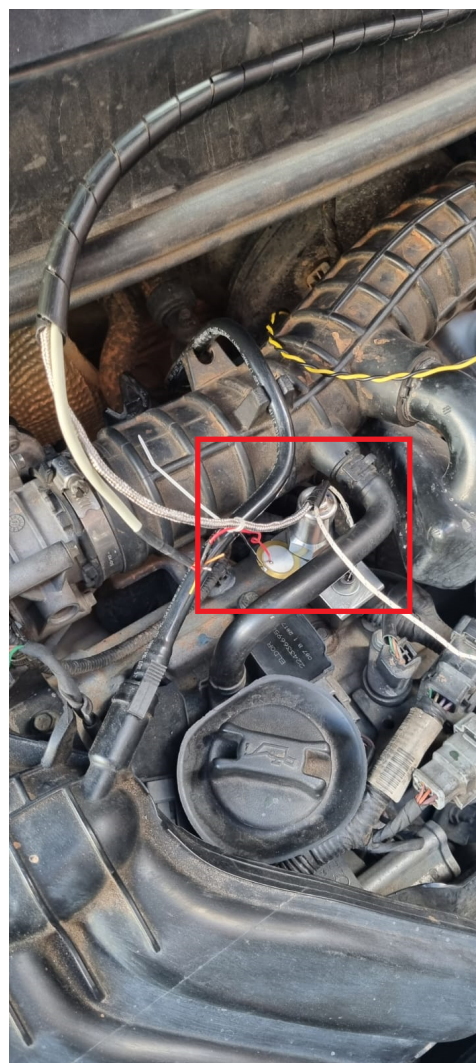


Fonte: (SENSORS, 2024)

(c) Veículo instrumentado com equipamento para aquisição de dados.



(d) Detalhe no posicionamento do acelerômetro sobre o bloco do motor.



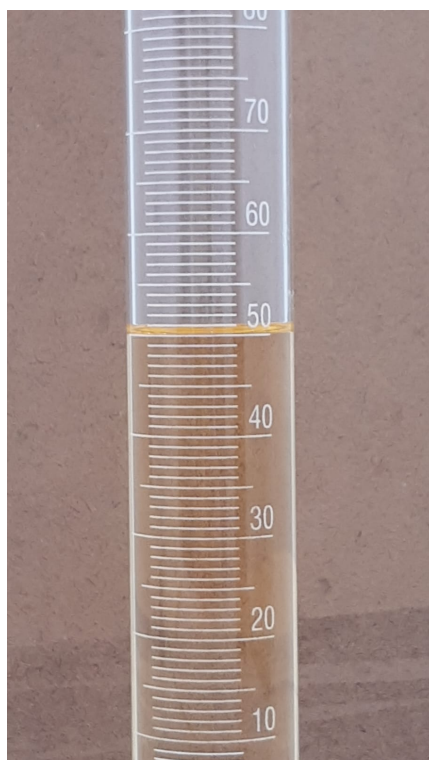
Fonte: (Autor)

### 3.4 Análise do combustível

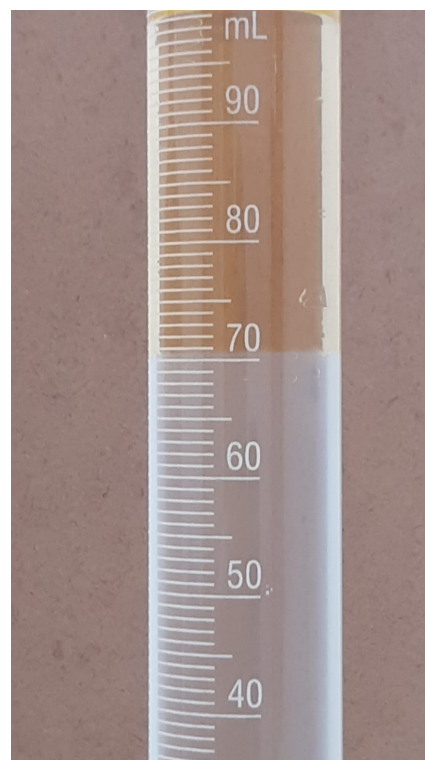
Após a execução de cada rodada de aquisições para um mesmo percentual de etanol, uma amostra de combustível foi retirada para o cálculo do percentual de etanol presente na mistura utilizando a norma ABNT NBR 13992 - *Gasolina automotiva, determinação do teor de etanol anidro combustível (EAC)*.

Figura 12 – Análise da amostra de combustível após aquisição de dados via norma ABNT.

(a) Proveta graduada contendo apenas o combustível.



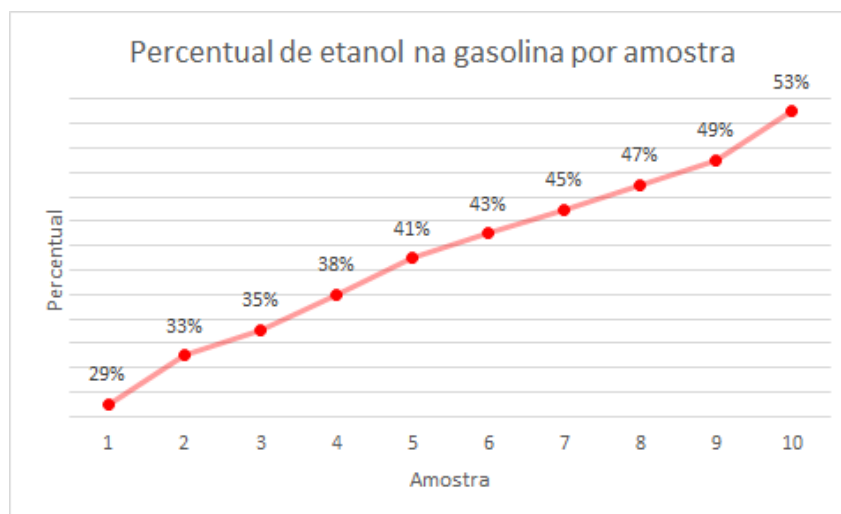
(b) Proveta contendo o combustível + solução de NaCl.



Fonte: (Autor)

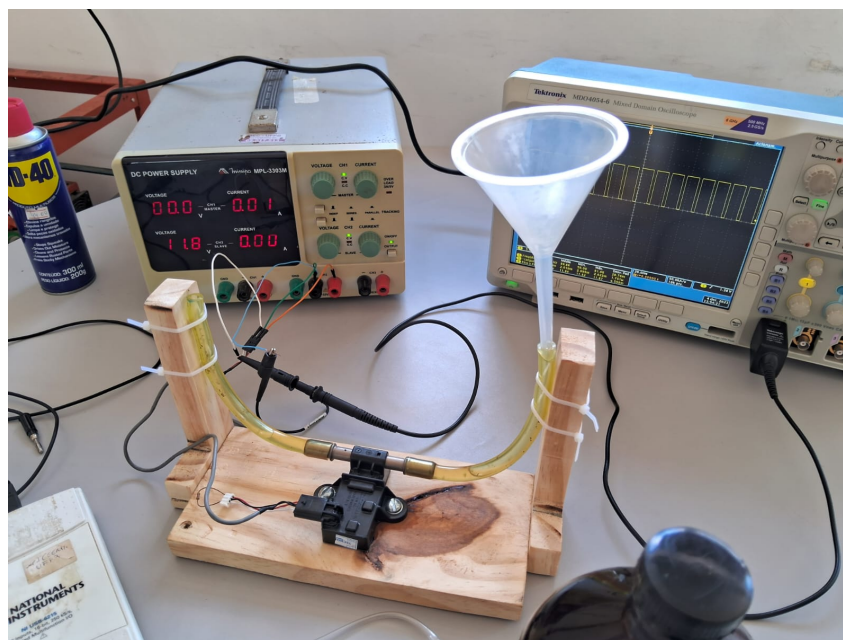
A Figura 13 a seguir apresenta o resultado dessa análise para cada amostra de combustível.

Figura 13 – Percentual de etanol em cada amostra.



Fonte: (Autor)

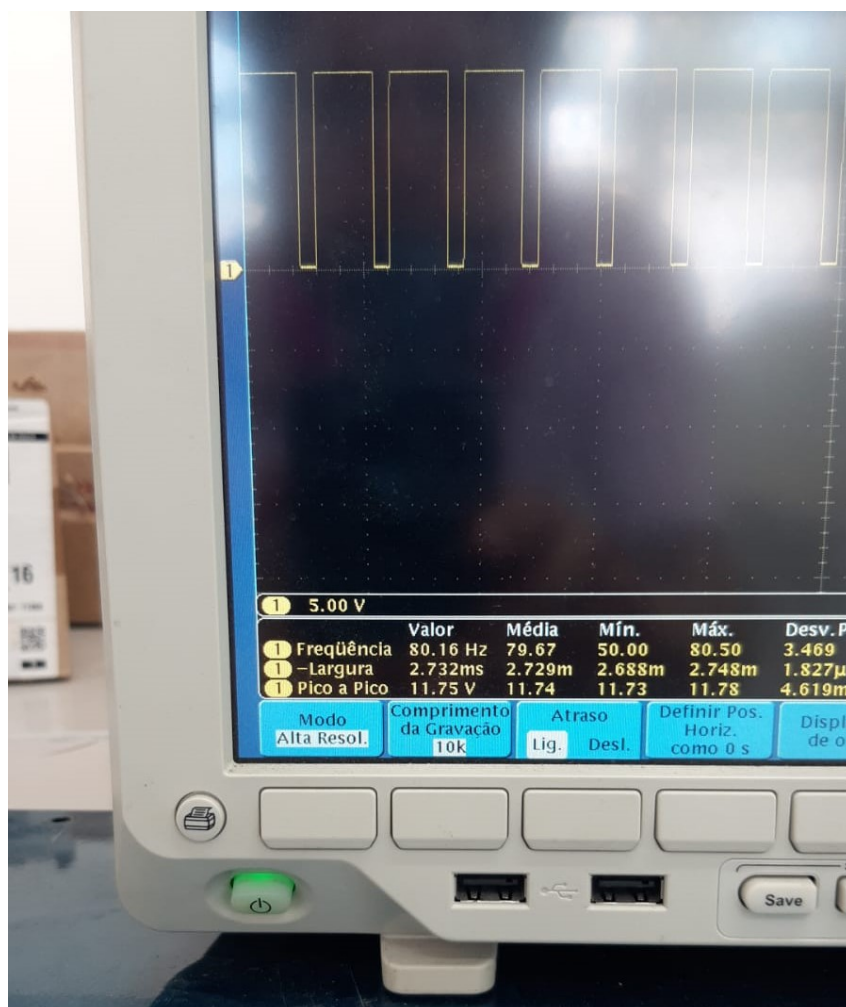
Para fins de comparação, um sensor *flex fuel* também foi utilizado para análise do combustível. O sensor retorna como saída um sinal em determinada frequência, em Hertz, de acordo com o percentual de etanol na mistura.

Figura 14 – Sensor *flex fuel* utilizado para avaliação do combustível.

Fonte: (Autor)

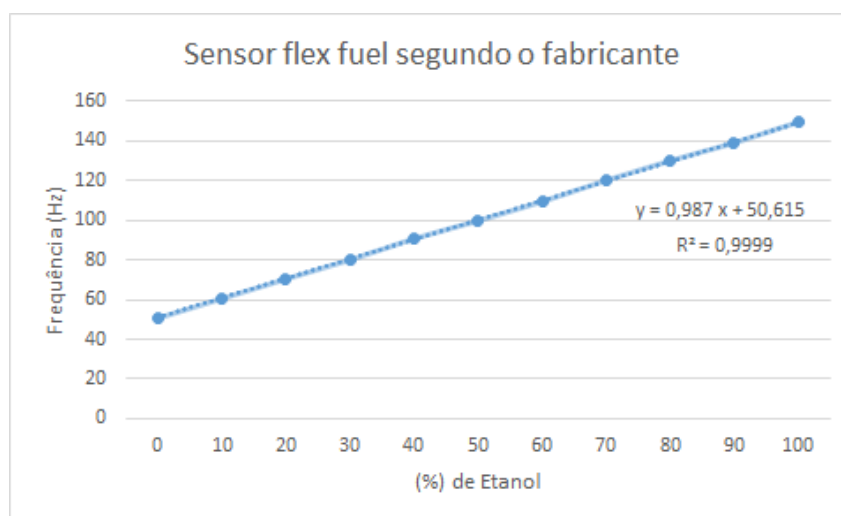
Na Figura 15 o osciloscópio indica a frequência de 80,16 Hz relacionada à amostra 01. O procedimento de análise através do sensor *flex fuel* foi repetido para todas as amostras. O resultado dessa análise está presente na Tabela 6.

Figura 15 – Sinal de saída do sensor flex visto pelo osciloscópio.



Fonte: (Autor)

Para converter essa frequência de saída em um percentual de etanol, foi utilizada a equação da reta determinada através do gráfico fornecido pela fabricante do sensor flex.

Figura 16 – Curva do percentual de etanol vs frequência (Hz) de saída do sensor *flex fuel*.

Fonte: (Autor)

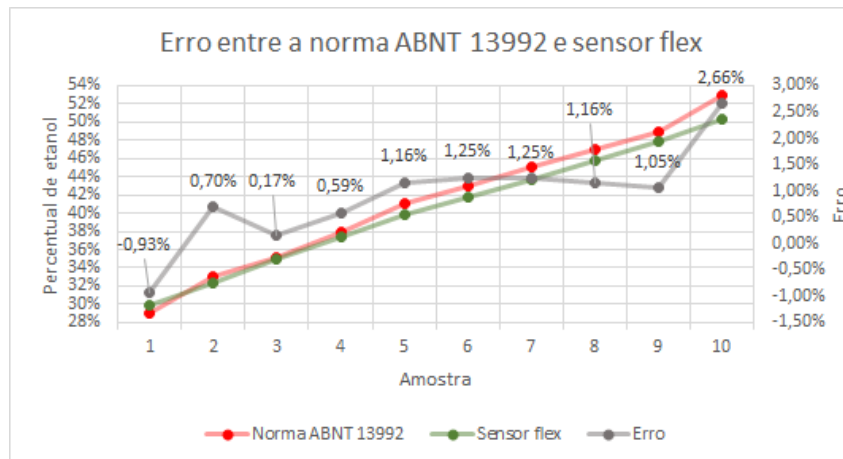
A Tabela 6 apresenta os dados obtidos através do sensor flex, em comparação com a norma ABNT NBR 13992, incluindo o erro entre as duas metodologias.

Tabela 6 – Percentual de etanol em cada mistura via sensor flex fuel.

| Amostra | (%) de Etanol | Frequência (Hz) | (%) Sensor flex | Erro    |
|---------|---------------|-----------------|-----------------|---------|
| 1       | 29%           | 80,16           | 29,934%         | -0,934% |
| 2       | 33%           | 82,5            | 32,305%         | 0,695%  |
| 3       | 35%           | 85,13           | 34,970%         | 0,170%  |
| 4       | 38%           | 87,54           | 37,411%         | 0,589%  |
| 5       | 41%           | 89,94           | 39,843%         | 1,157%  |
| 6       | 43%           | 91,82           | 41,748%         | 1,252%  |
| 7       | 45%           | 93,8            | 43,754%         | 1,246%  |
| 8       | 47%           | 95,86           | 45,841%         | 1,159%  |
| 9       | 49%           | 97,94           | 47,948%         | 1,052%  |
| 10      | 53%           | 100,3           | 50,339%         | 2,661%  |

Fonte: (Autor)

A Figura 17 apresenta as informações relativas ao erro entre as metodologias de maneira gráfica.

Figura 17 – Erro relativo entre a norma ABNT e o sensor *flex fuel*.

Fonte: (Autor)

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

### 3.5 Pós-processamento dos dados

Após a realização dos experimentos, os dados adquiridos foram depositados em uma pasta do serviço de armazenamento em nuvem *OneDrive* 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:

$$EP_n$$

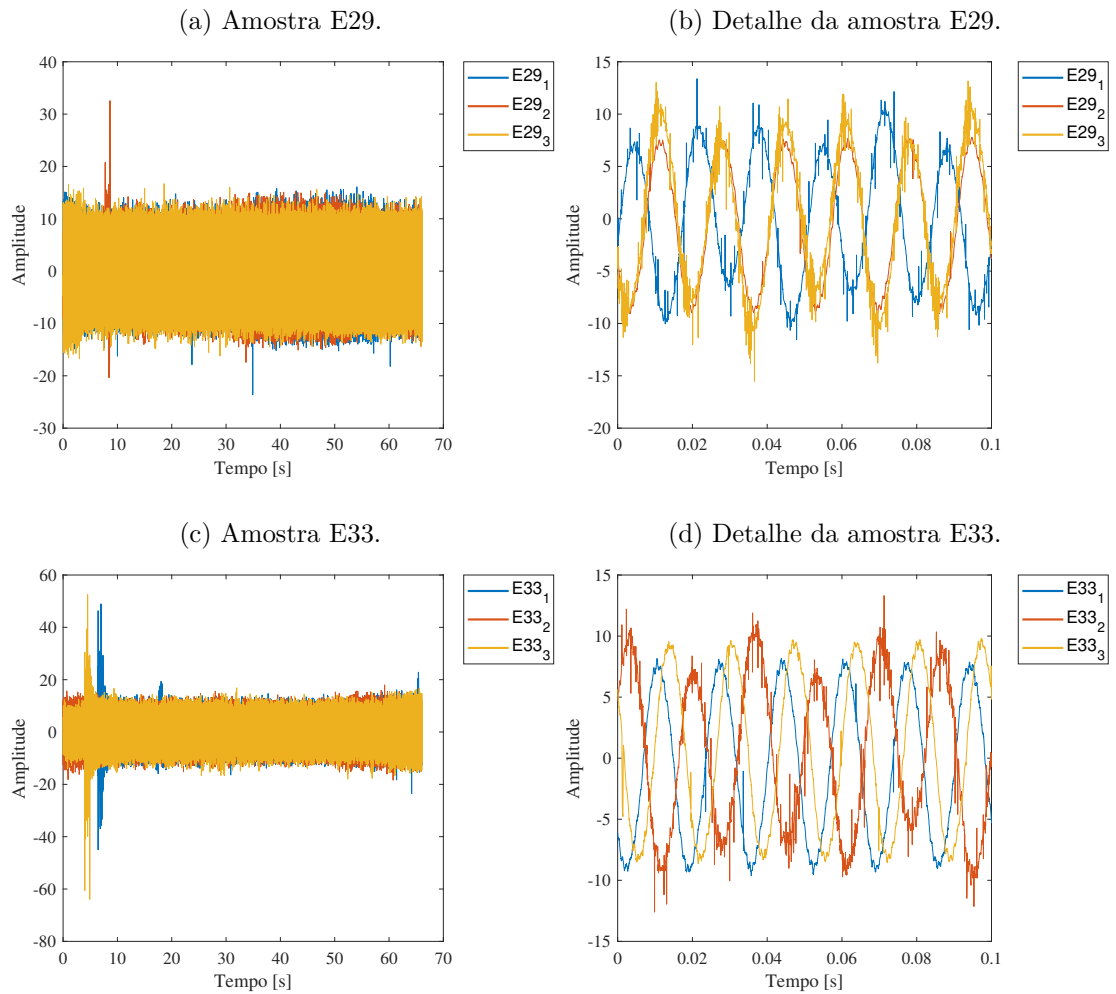
Onde E representa "Etanol", P representa o número do percentual de etanol presente na respectiva mistura e n representa o número do teste realizado, lembrando que foram realizados três testes para cada amostra.

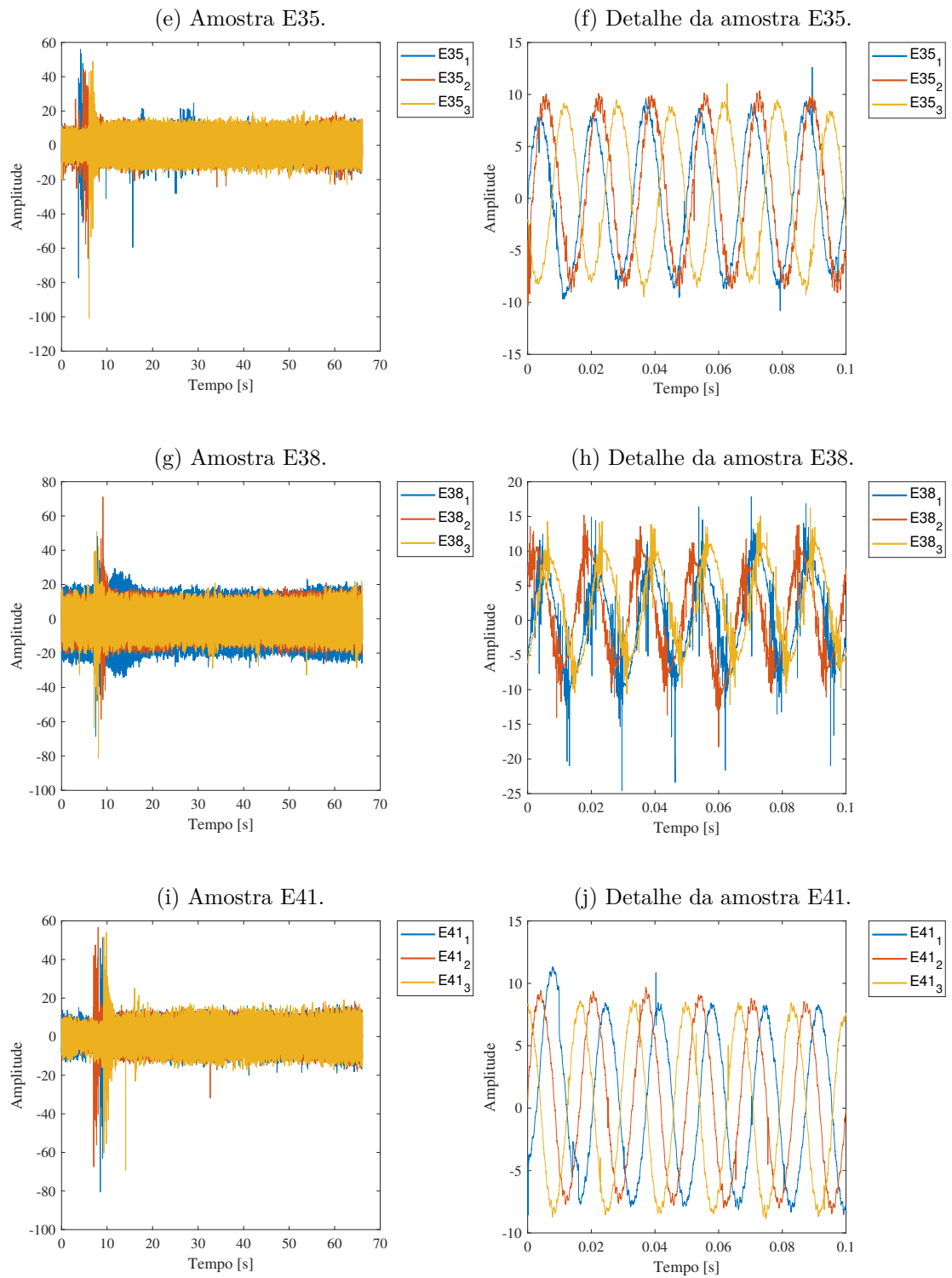
Dessa forma, E45<sub>2</sub> representa o sinal do segundo teste com a amostra de 45% de etanol na mistura.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

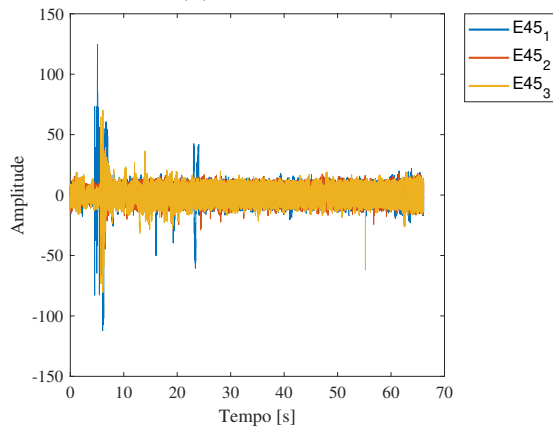
Inicialmente, os sinais de vibração foram analisados no domínio do tempo, buscando um entendimento mais simples e rápido sobre as características dos sinais para cada percentual de etanol. Os resultados dessa análise estão apresentados na figura abaixo.

Figura 18 – Sinais de vibração de cada amostra no domínio do tempo.

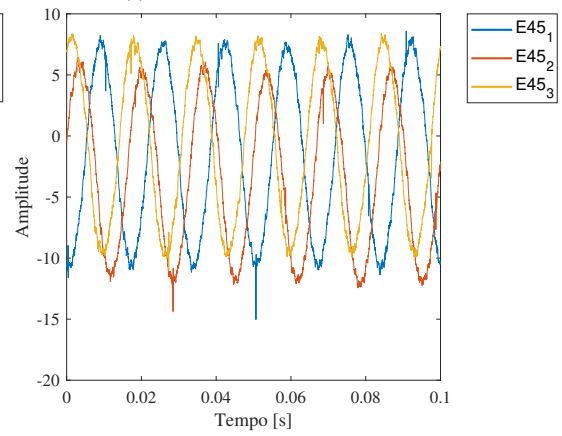




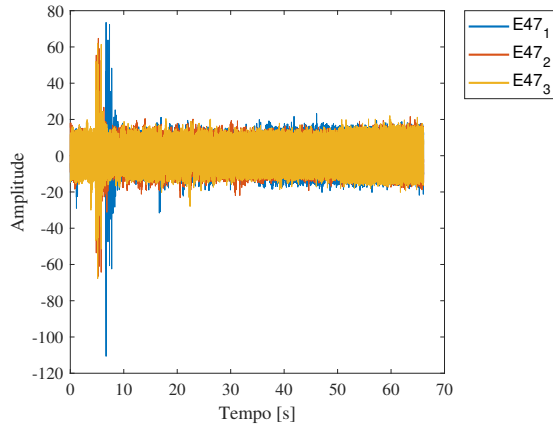
(k) Amostra E45.



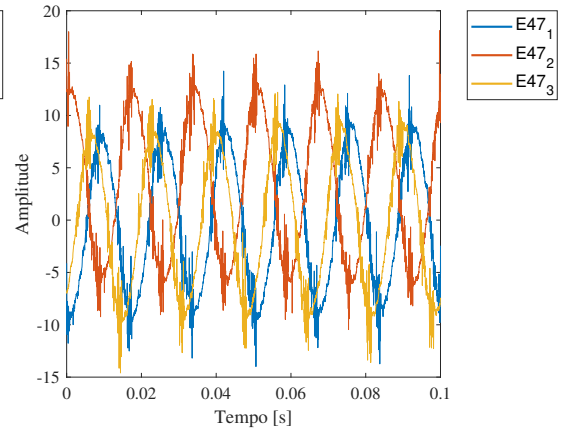
(l) Detalhe da amostra E45.



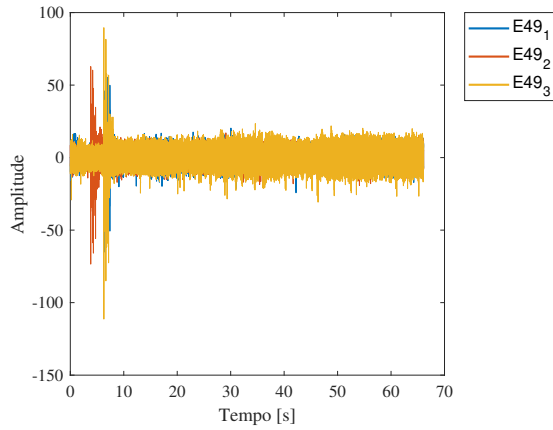
(m) Amostra E47.



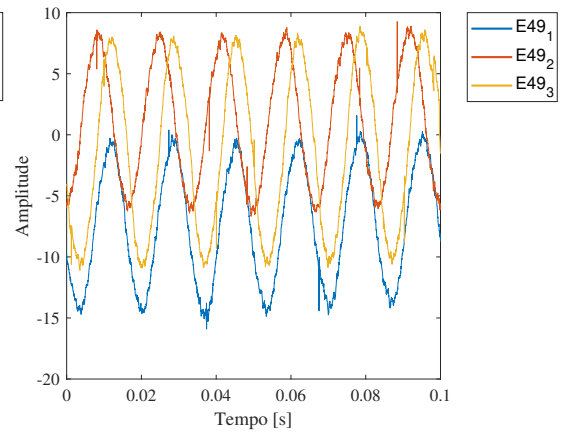
(n) Detalhe da amostra E47.

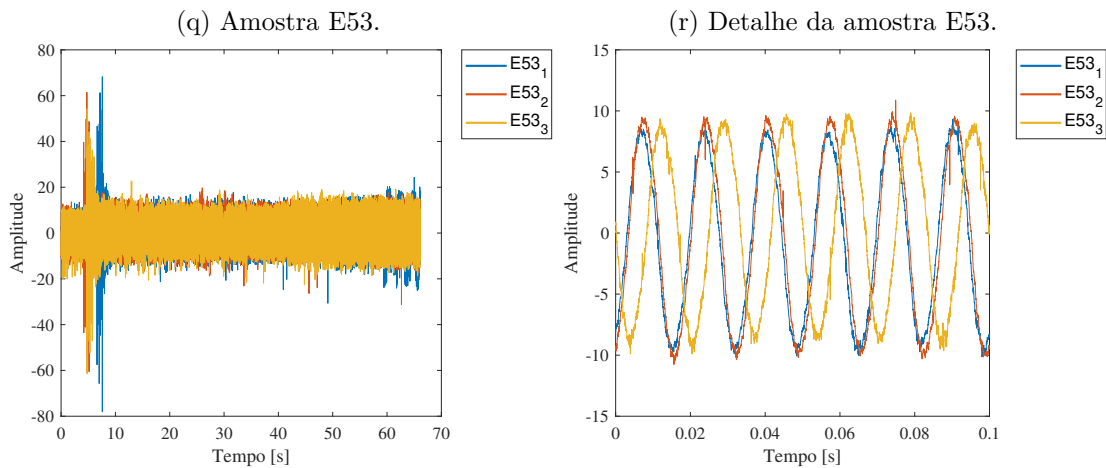


(o) Amostra E49.



(p) Detalhe da amostra E49.





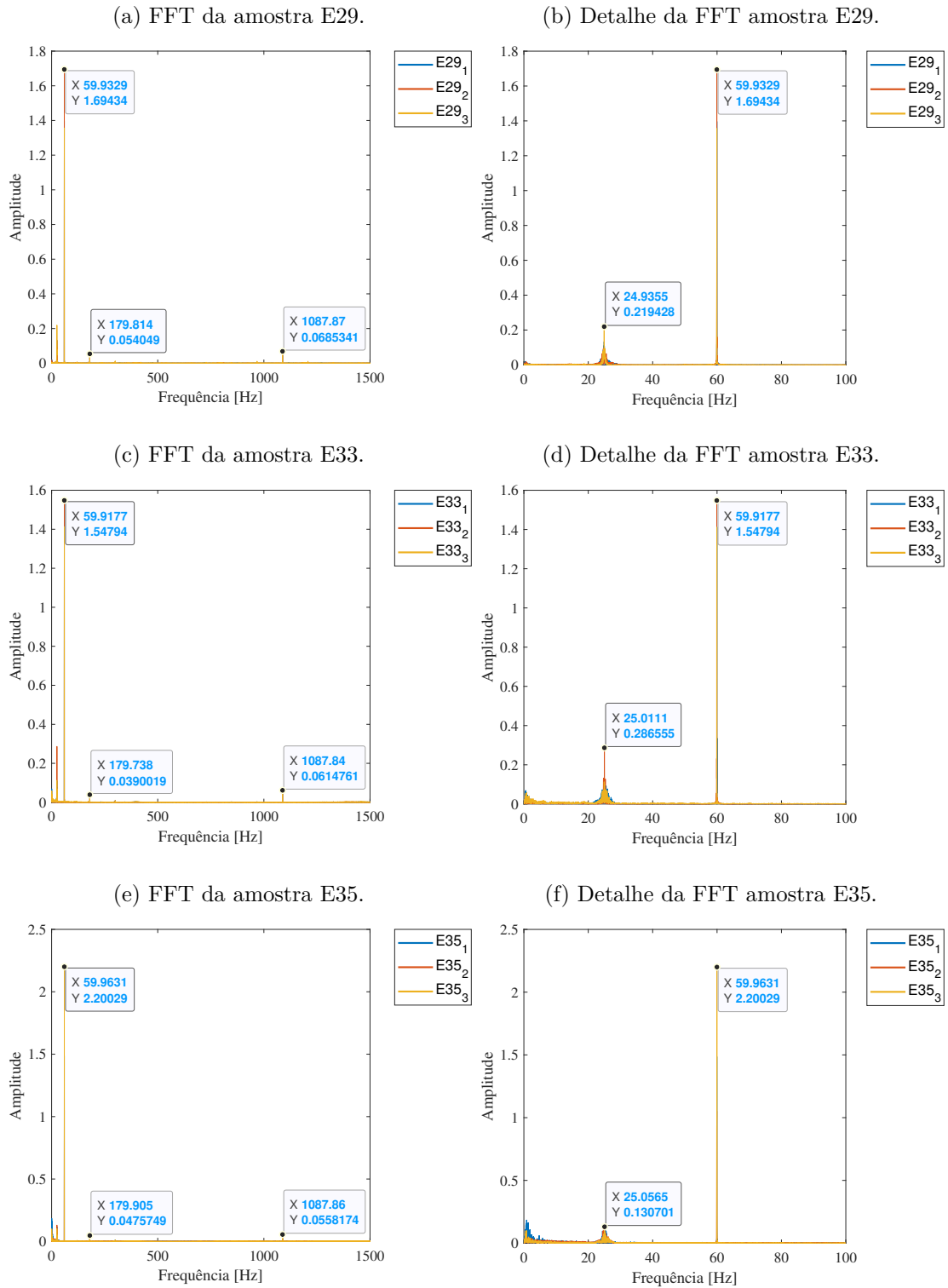
Fonte: (Autor)

A Figura 18 dispõe, individualmente, a análise no domínio do tempo de cada amostra estudada. Através dela, é possível observar a presença de altas amplitudes de vibração aproximadamente entre 5 e 10 segundos após o início do experimento. Esse fenômeno está relacionado à vibração do motor durante a partida, onde o motor rompe a inércia operando momentaneamente desbalanceado, sob baixa temperatura e com a lubrificação inadequada. Após esse período, observa-se uma estabilização das amplitudes de vibração ao longo do tempo, com amplitudes semelhantes para as três aquisições de cada amostra. Entretanto, é importante notar a detecção de picos aleatoriamente dispersos ao longo do sinal, nas mais diversas amplitudes. Na perspectiva mais ampla, pode-se observar o surgimento de picos de intensa amplitude quando comparados com o restante do sinal. Na perspectiva detalhada, pode-se observar o comportamento senoidal do sinal de vibração.

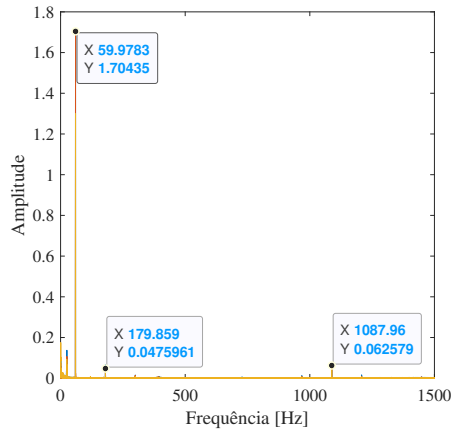
Quanto ao comportamento senoidal, é necessário salientar que mesmo tendo características caóticas, o sinal de vibração do motor de um veículo naturalmente possui característica senoidal devido à periodicidade do processo de combustão interna. Um MCI opera em marcha lenta com velocidade de rotação aproximadamente constante, no caso do veículo em estudo, essa velocidade é de aproximadamente  $750 \pm 50$  RPM, conforme Tabela 4. Isso significa aproximadamente  $750/60 = 12,5$  rotações por segundo, ou uma frequência de rotação de aproximadamente 12,5 Hz. Como trata-se de um motor 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 nesse caso é de aproximadamente 25 Hz. A técnica do janelamento de Hamming foi utilizada para redução do vazamento espectral durante o cálculo da FFT, conforme abordado na subseção 2.2.4.

A Figura 19 apresenta a análise dos sinais de vibração no domínio da frequência, almejando identificar quais são as principais frequências no espectro.

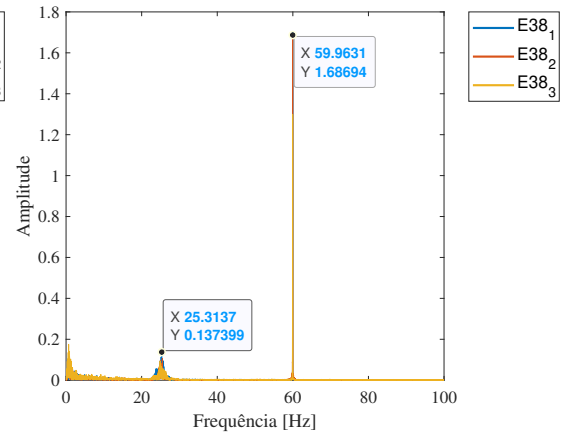
Figura 19 – Sinais de vibração de cada amostra no domínio da frequência.



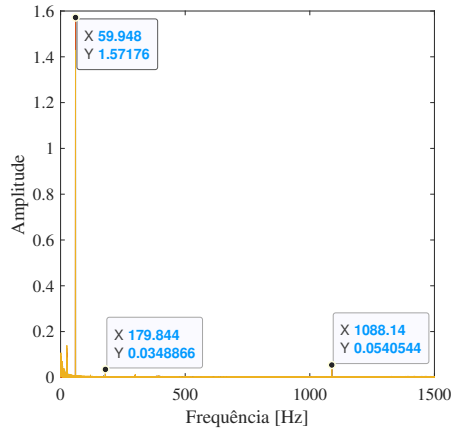
(g) FFT da amostra E38.



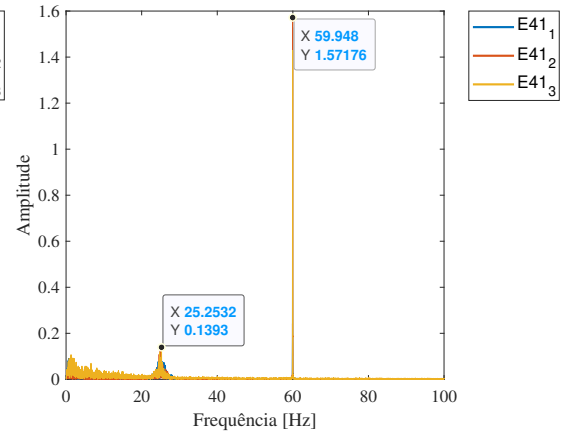
(h) Detalhe da FFT amostra E38.



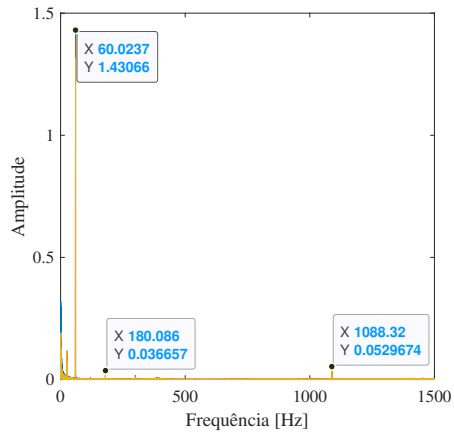
(i) FFT da amostra E41.



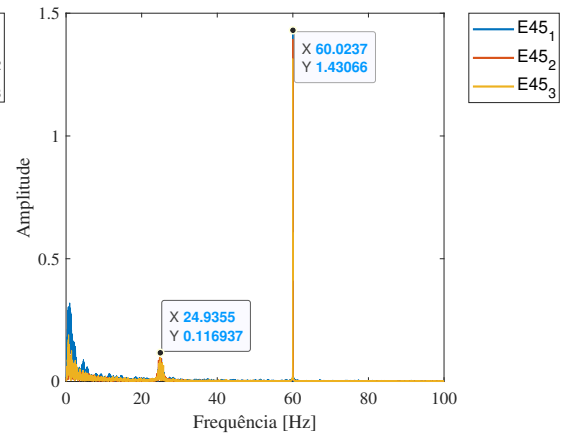
(j) Detalhe da FFT amostra E41.

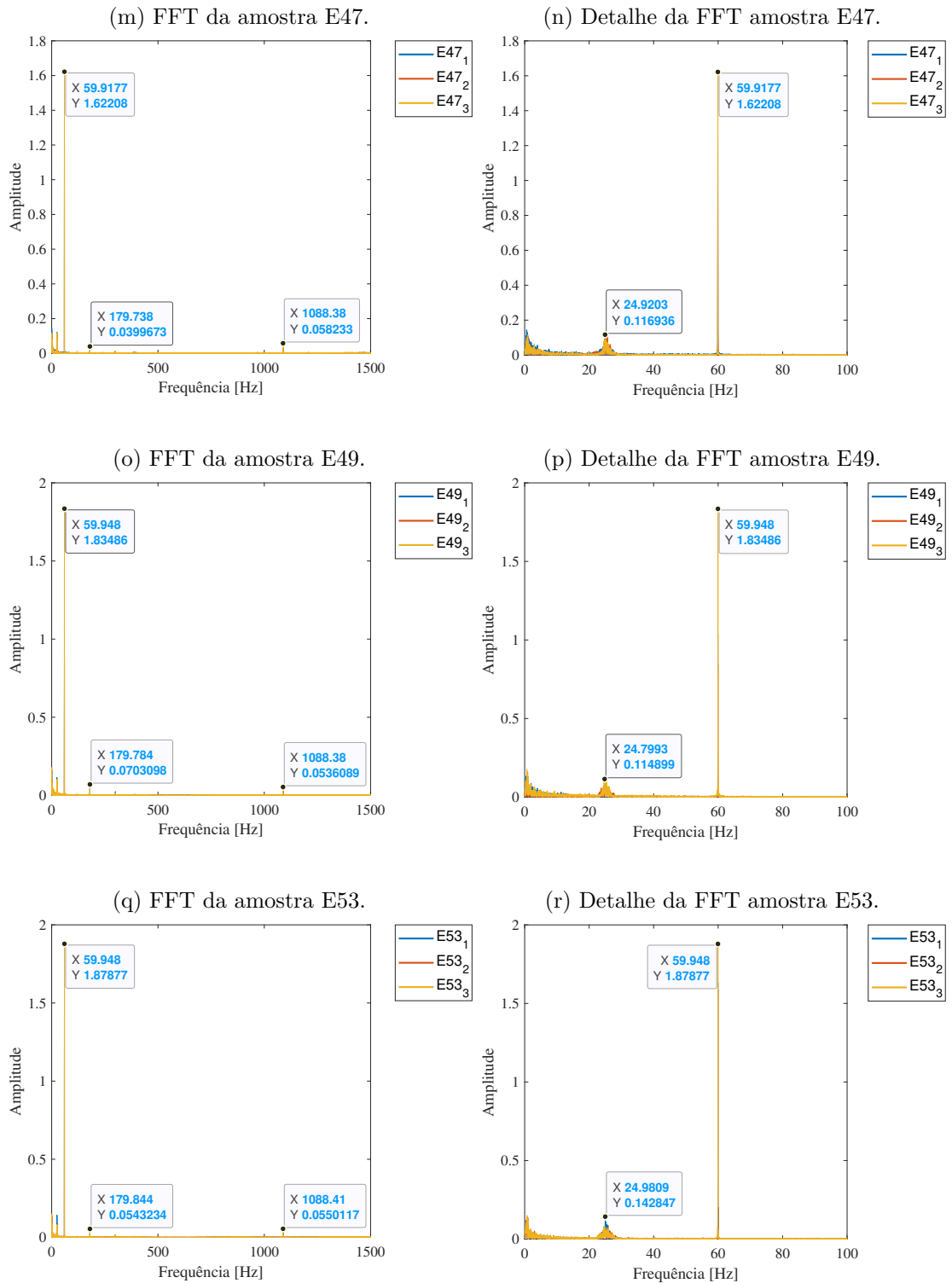


(k) FFT da amostra E45.



(l) Detalhe da FFT amostra E45.





Fonte: (Autor)

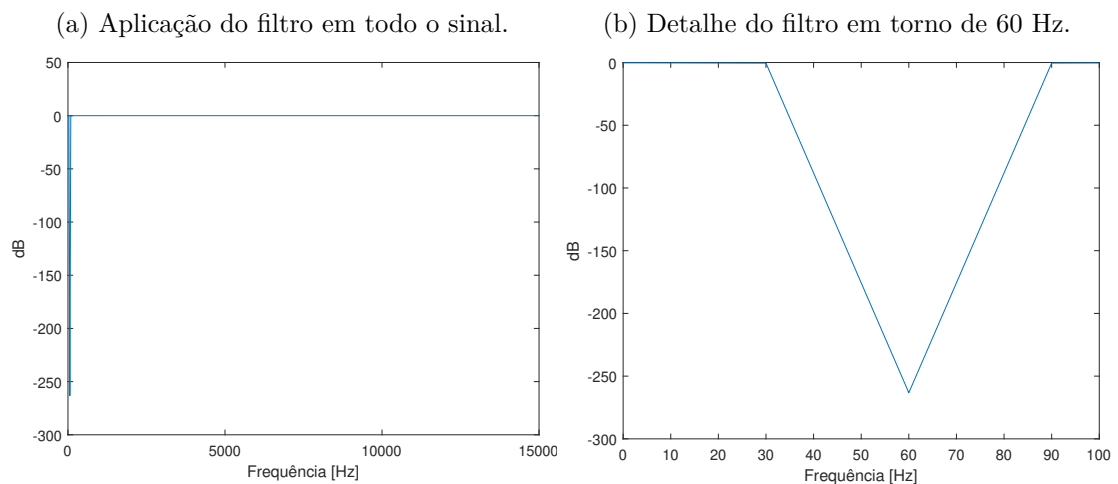
O modelo do acelerômetro utilizado nos experimentos possui uma frequência máxima de resposta igual a 15 kHz, conforme Tabela 5. Essa frequência foi utilizada no presente estudo, onde foi possível trabalhar com uma taxa de amostragem de 30000 pontos por segundo. O que corrobora com o teorema de Nyquist-Shannon via Equação 2.7.

Contudo, os gráficos apresentados na Figura 19 mostram apenas os intervalos de maior interesse, onde observam-se as frequências com maior amplitude no espectro.

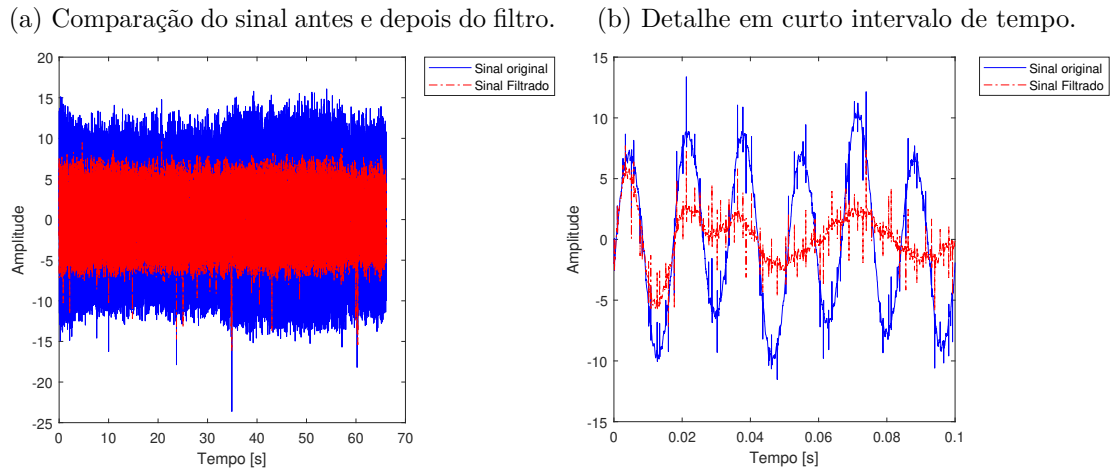
Os gráficos à esquerda mostram os resultados até uma frequência de 1500 Hz, onde é possível identificar dois picos de frequência aproximadamente em 180 Hz e 1088 Hz, para todas as amostras. À direita, apresentam-se os gráficos com um intervalo de frequência até 100 Hz, onde é possível identificar com maior clareza as baixas frequências que compõem o sinal. As frequências muito baixas ( $< 5$  Hz) estão relacionadas à partida do motor, por esse motivo são frequências com uma alta amplitude. É possível também identificar a presença de um 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.

Contudo, a frequência com maior amplitude foi uma frequência de 60 Hz, fato este inesperado principalmente dada a magnitude dessa frequência em comparação com os outros picos de frequências em destaque. A principal hipótese para o surgimento dessa frequência na análise é de que a corrente elétrica de resposta do acelerômetro tenha sido afetada pela corrente da rede elétrica local pois essa opera justamente sob uma frequência de 60 Hz. Dessa forma, optou-se por usar um filtro de Notch para remover especificamente essa frequência do sinal, nesse caso foi utilizado um fator  $\alpha = 0.998$ , conforme abordado na subseção 2.2.5. A figura abaixo representa o filtro aplicado sobre o sinal.

Figura 20 – Filtro de Notch aplicado sobre os sinais.

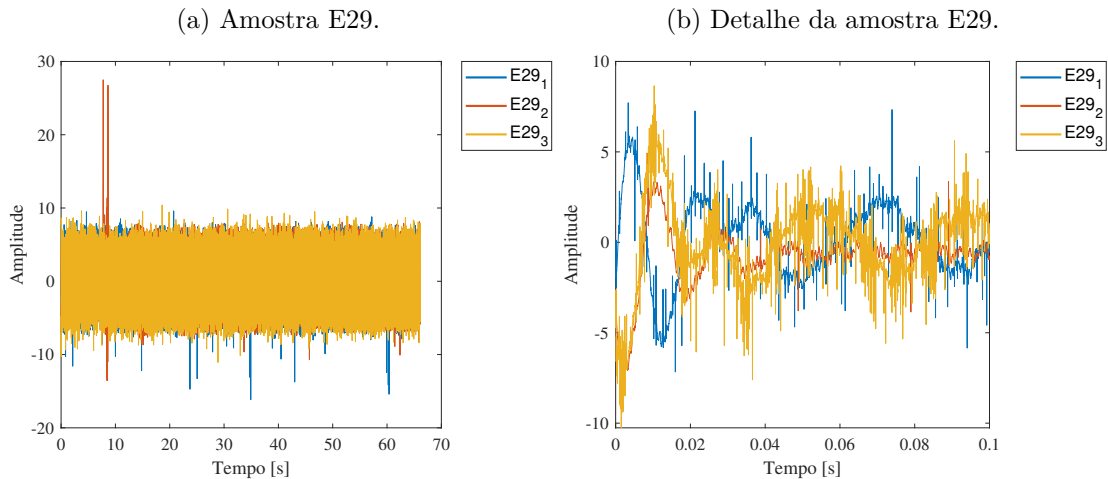


Através da figura Figura 20(b) é possível identificar uma banda de frequências sendo afetadas pelo filtro, entre 30 e 90 Hz, mesmo utilizando um valor de  $\alpha$  muito próximo de 1. Esse fato ocorre pois existe uma enorme diferença entre a frequência a ser removida (60 Hz) e a frequência de amostragem (30000 Hz). Contudo, o filtro de Notch foi capaz de remover apenas a frequência de 60 Hz do espectro do sinal, conforme demonstrado na Figura 23(b).

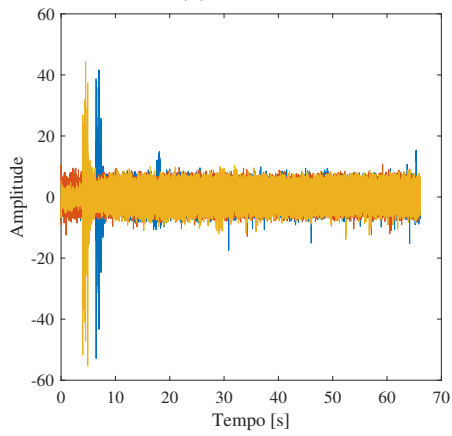
Figura 21 – Resultado da aplicação do filtro de Notch para amostra  $E29_1$ .

Através da figura Figura 21(a) é possível observar uma clara redução da amplitude do sinal de vibração após o filtro aplicado sobre o sinal, removendo a interferência da frequência de 60 Hz do sinal. Na Figura 21(b), a diferença do sinal pré e pós filtro torna-se ainda mais evidente, onde a presença da frequência da rede elétrica não interfere no sinal aquisitado. A Figura 22 apresenta o resultado após aplicação do filtro de Notch para cada amostra.

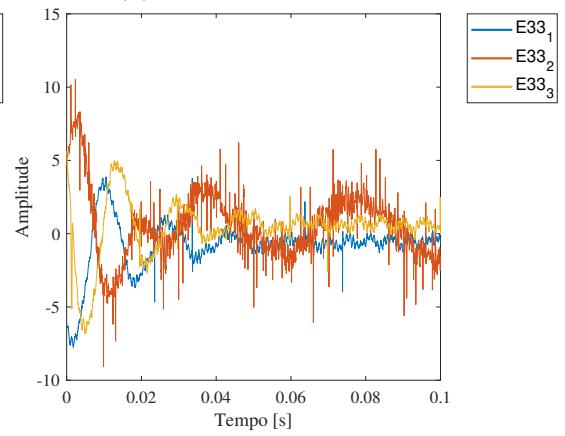
Figura 22 – Sinais de vibração no domínio do tempo após filtragem.



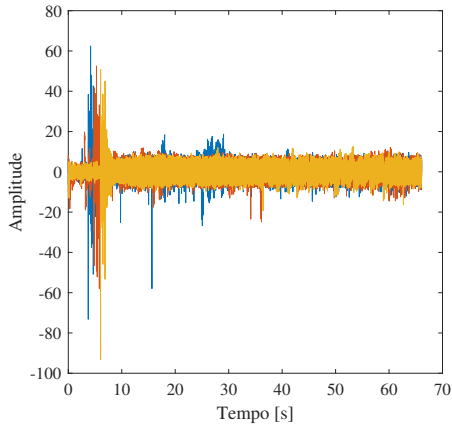
(c) Amostra E33.



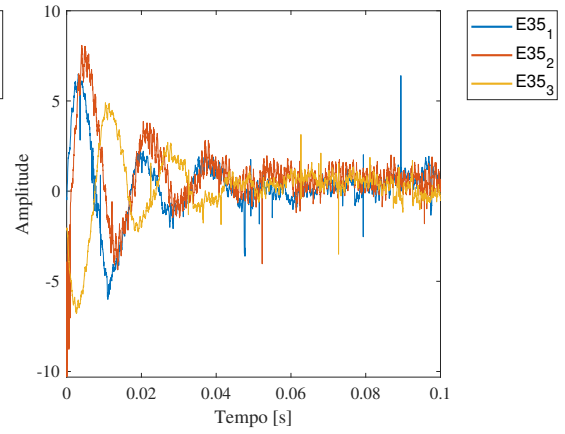
(d) Detalhe da amostra E33.



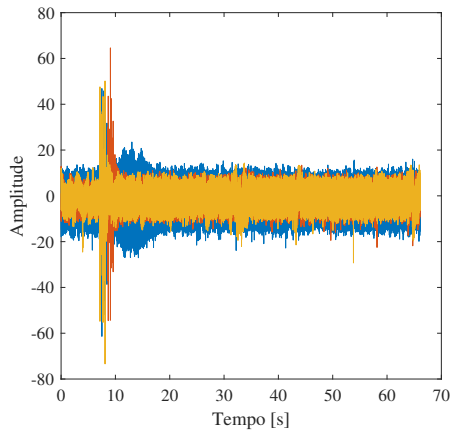
(e) Amostra E35.



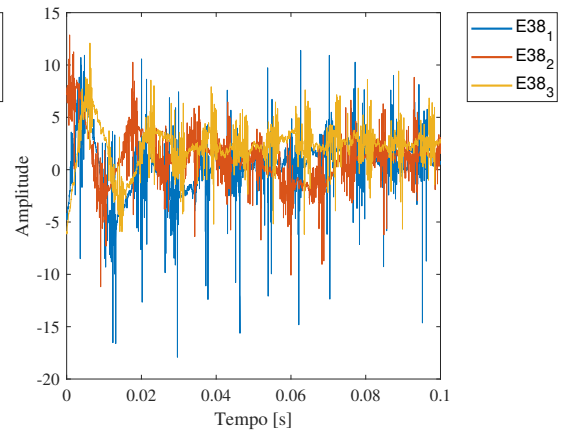
(f) Detalhe da amostra E35.



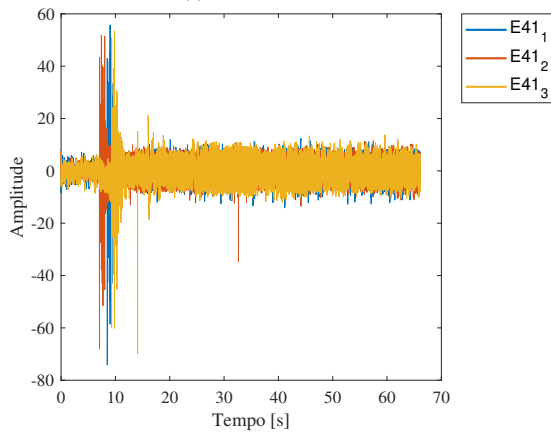
(g) Amostra E38.



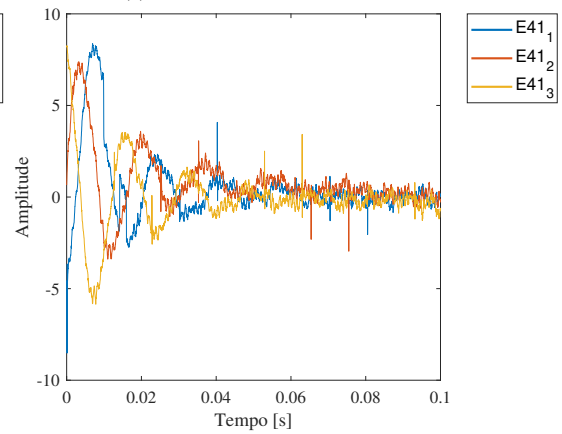
(h) Detalhe da amostra E38.



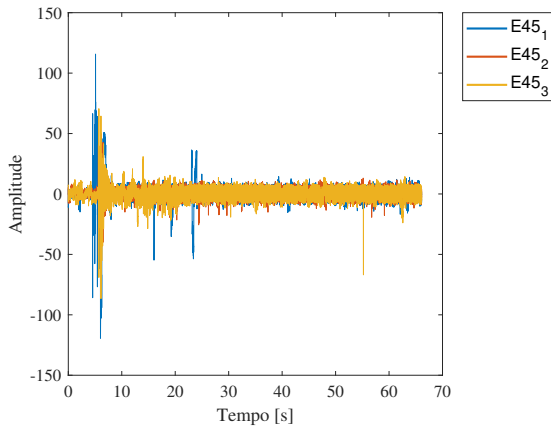
(i) Amostra E41.



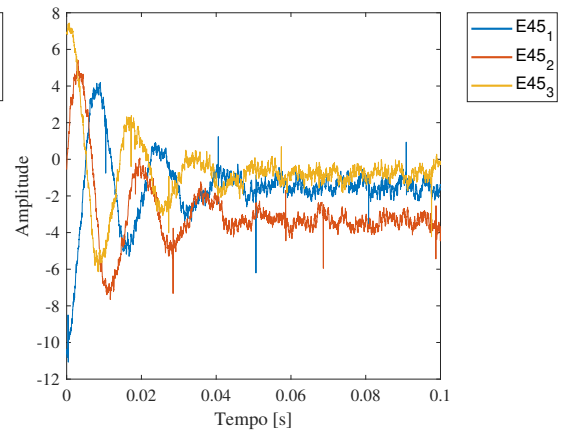
(j) Detalhe da amostra E41.



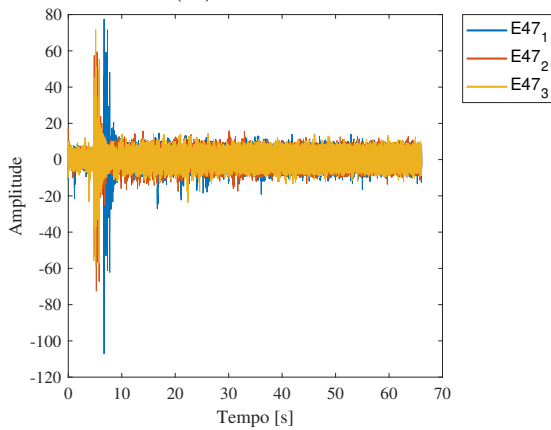
(k) Amostra E45.



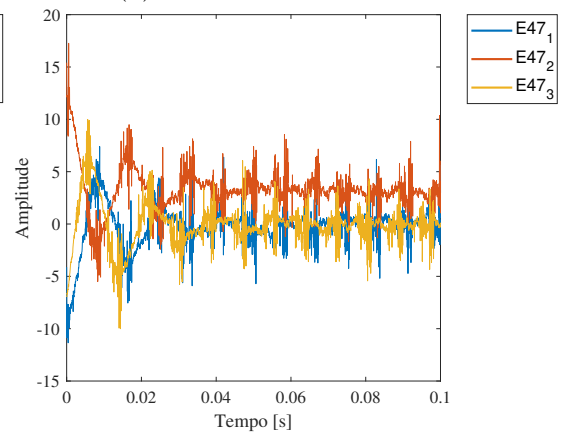
(l) Detalhe da amostra E45.

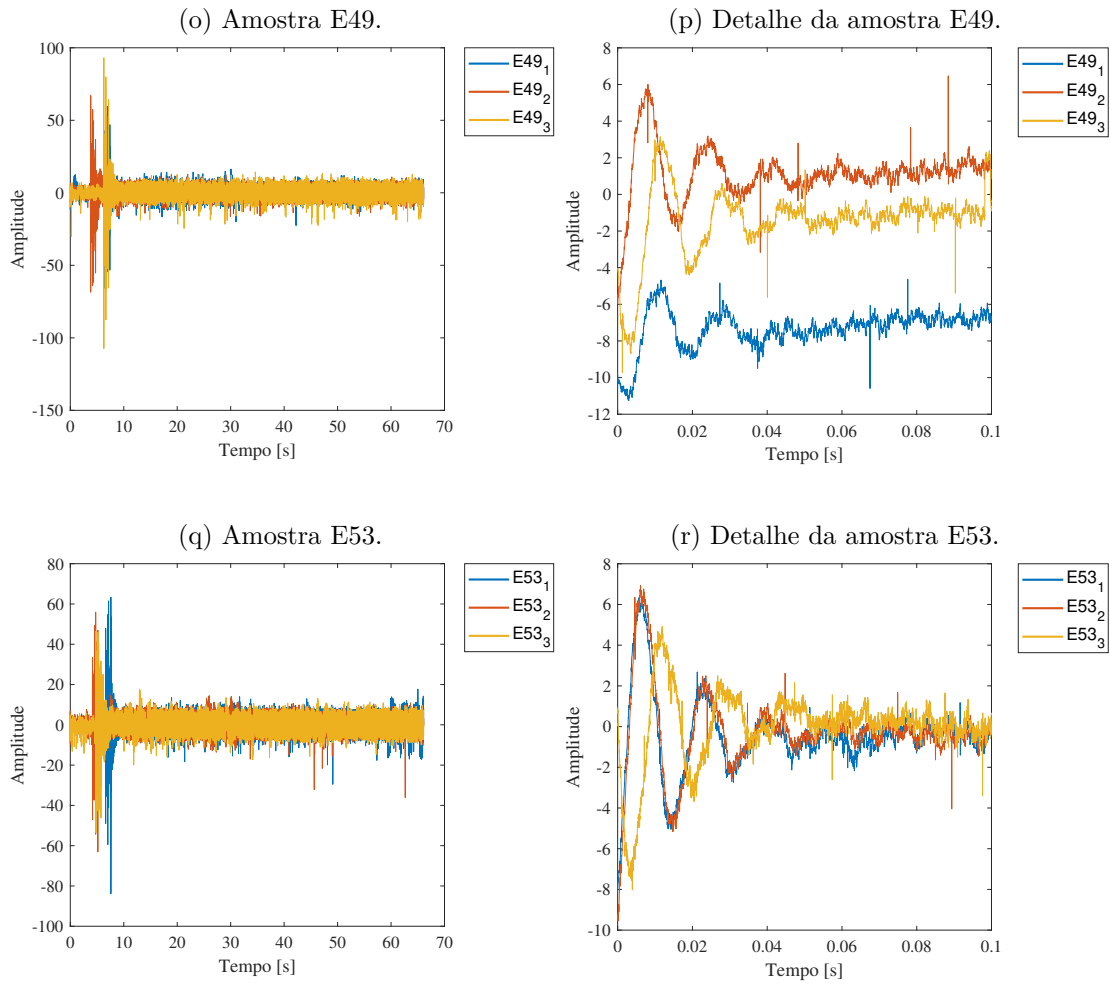


(m) Amostra E47.



(n) Detalhe da amostra E47.

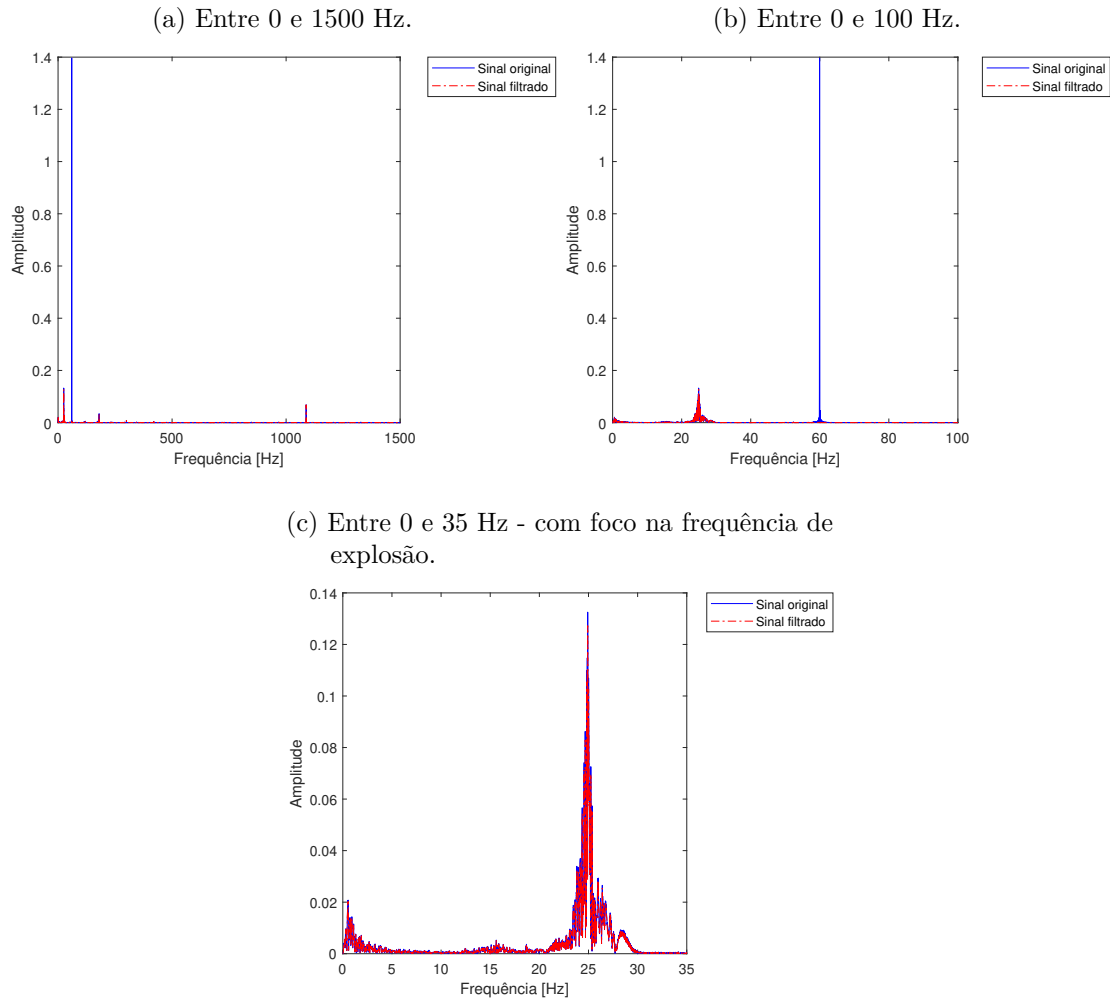




Fonte: (Autor)

Diante da Figura 22 pode-se notar a ausência da periodicidade presente nos sinais de vibração, observada anteriormente nos gráficos detalhados da Figura 18. Em todos os casos, vislumbrando todo o sinal (gráficos à esquerda) percebe-se uma semelhança quanto a amplitude de vibração entre as três aquisições para uma mesma amostra.

A seguir, a Figura 23 apresenta a aplicação do filtro de Notch na perspectiva do domínio da frequência:

Figura 23 – Resultado do filtro sobre a FFT para amostra  $E29_1$ .

Fonte: (Autor)

A Figura 23 demonstra a clara semelhança entre as frequências do sinal original e do sinal após o filtro, exceto pela frequência de 60 Hz, comprovando o sucesso na aplicação do filtro de Notch.

Após concluída a filtragem dos sinais, foi realizada a análise desses através dos métodos estatísticos abordados na subseção 2.2.6. Os resultados para cada teste estão apresentados na Tabela 7. O parâmetro de *kurtosis* foi adotado como critério para classificar os diferentes testes de uma mesma amostra, uma vez que esse parâmetro é muito sensível ao ruído do sinal, é plausível utilizar essa métrica para comparar a qualidade das diferentes aquisições de uma mesma amostra. Dessa maneira, foram identificadas aquisições onde o valor de *kurtosis* calculado foi muito discrepante em relação à média das amostras ( $\Delta > 5$ ). Essas aquisições estão destacadas na tabela abaixo e seus respectivos pontos estão marcados como *outliers* no gráfico Figura 24(b). Seguindo esse critério, tais aquisições não foram consideradas para efeitos de cálculo.

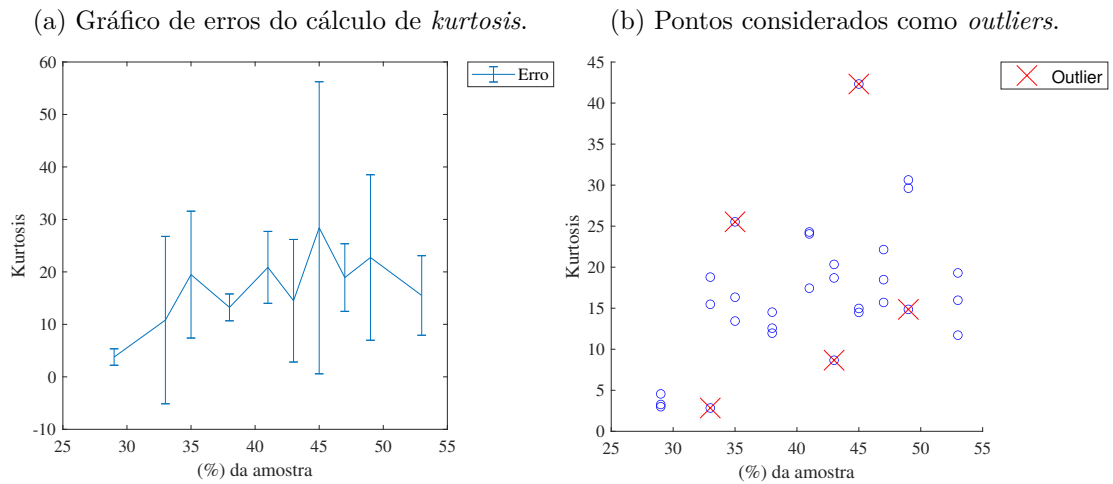
Tabela 7 – Resultados de kurtosis, RMS e Shape Factor para cada teste.

| Teste           | Kurtosis | RMS    | Shape Factor |
|-----------------|----------|--------|--------------|
| 29 <sub>1</sub> | 2,9960   | 1,3545 | 1,1766       |
| 29 <sub>2</sub> | 4,5589   | 1,3040 | 1,2346       |
| 29 <sub>3</sub> | 3,2677   | 1,5205 | 1,2092       |
| 33 <sub>1</sub> | 15,4782  | 1,8066 | 1,3685       |
| 33 <sub>2</sub> | 2,8396   | 1,5973 | 1,1937       |
| 33 <sub>3</sub> | 18,7905  | 1,7812 | 1,3285       |
| 35 <sub>1</sub> | 16,3372  | 2,7997 | 1,5061       |
| 35 <sub>2</sub> | 13,4370  | 2,6416 | 1,4220       |
| 35 <sub>3</sub> | 25,5269  | 1,9627 | 1,4304       |
| 38 <sub>1</sub> | 12,5708  | 2,6443 | 1,4227       |
| 38 <sub>2</sub> | 14,5195  | 2,1202 | 1,3733       |
| 38 <sub>3</sub> | 11,9611  | 2,6553 | 1,4039       |
| 41 <sub>1</sub> | 24,2894  | 2,0571 | 1,3644       |
| 41 <sub>2</sub> | 24,0540  | 1,8529 | 1,3774       |
| 41 <sub>3</sub> | 17,4388  | 2,6755 | 1,3526       |
| 43 <sub>1</sub> | 20,3424  | 2,2728 | 1,4321       |
| 43 <sub>2</sub> | 18,6916  | 2,5992 | 1,4119       |
| 43 <sub>3</sub> | 8,6622   | 2,8426 | 1,3429       |
| 45 <sub>1</sub> | 42,3216  | 9,1791 | 2,6523       |
| 45 <sub>2</sub> | 14,9724  | 2,3828 | 1,3935       |
| 45 <sub>3</sub> | 14,4902  | 3,4813 | 1,4813       |
| 47 <sub>1</sub> | 22,1453  | 2,7659 | 1,4487       |
| 47 <sub>2</sub> | 15,7019  | 2,6192 | 1,3541       |
| 47 <sub>3</sub> | 18,4807  | 2,6010 | 1,4154       |
| 49 <sub>1</sub> | 14,8596  | 2,7421 | 1,4061       |
| 49 <sub>2</sub> | 30,6297  | 2,1720 | 1,4183       |
| 49 <sub>3</sub> | 29,6209  | 2,7681 | 1,4075       |
| 53 <sub>1</sub> | 15,9730  | 2,7368 | 1,4548       |
| 53 <sub>2</sub> | 19,2982  | 2,2905 | 1,4489       |
| 53 <sub>3</sub> | 11,7163  | 2,5788 | 1,3995       |

Fonte: (Autor)

A análise através de *kurtosis* é representada na figura a seguir:

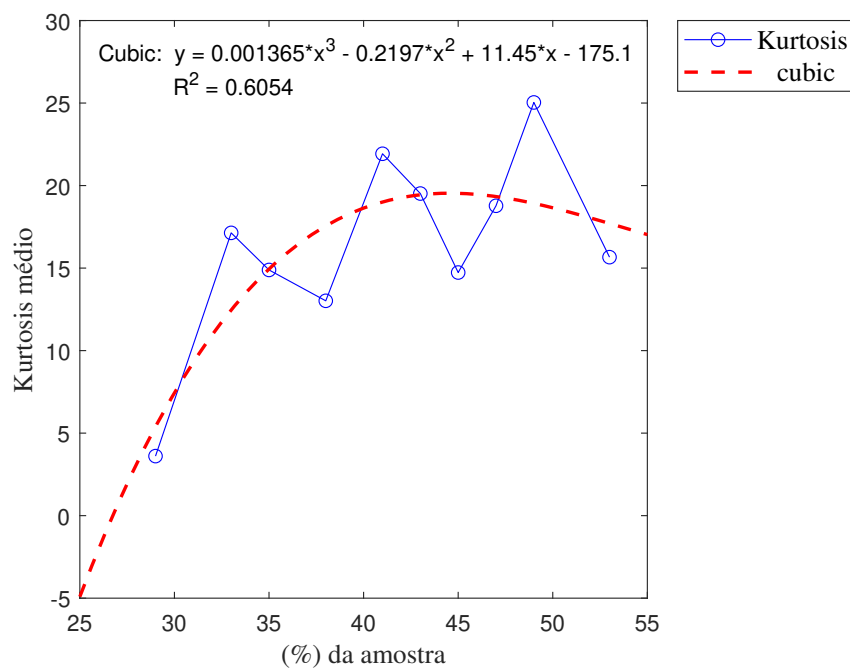
Figura 24 – Kurtosis de cada amostra do teste.



Fonte: (Autor)

Apesar de apresentar uma tendência de aumento que acompanha o aumento do percentual de etanol, a correlação entre o valor calculado de *kurtosis* e o percentual de etanol é baixa e não pode ser utilizada como um parâmetro para um diagnóstico a respeito da composição do combustível utilizado no veículo. Muito devido à sensibilidade dessa métrica ao ruído, o que causa uma variabilidade considerável para um mesmo percentual de etanol. A figura a seguir apresenta o valor médio de *kurtosis* para cada amostra.

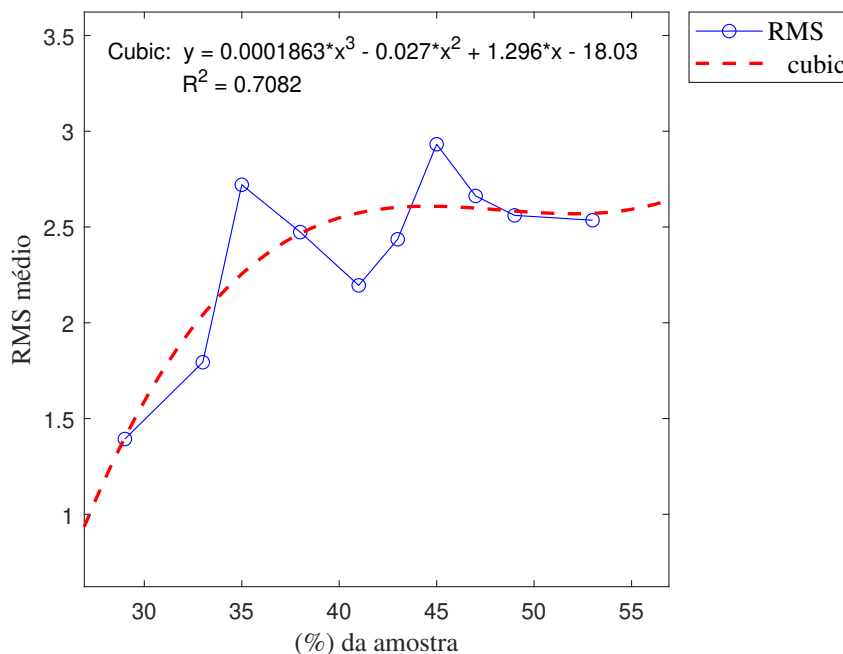
Figura 25 – Regressão polinomial: Kurtosis médio x (%) de etanol



Fonte: (Autor)

Com relação ao RMS, a Figura 26 apresenta os resultados para a média do RMS de cada amostra.

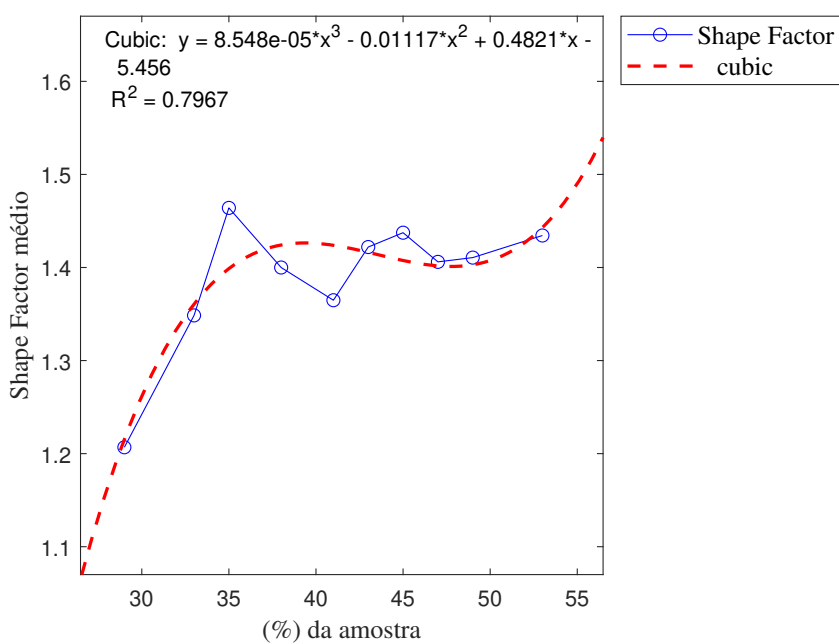
Figura 26 – Regressão polinomial: RMS médio x (%) de etanol



Fonte: (Autor)

Adiante, os resultados para a métrica de *shape factor* médio são demonstrados através da Figura 27.

Figura 27 – Regressão polinomial: Shape Factor médio x (%) de etanol



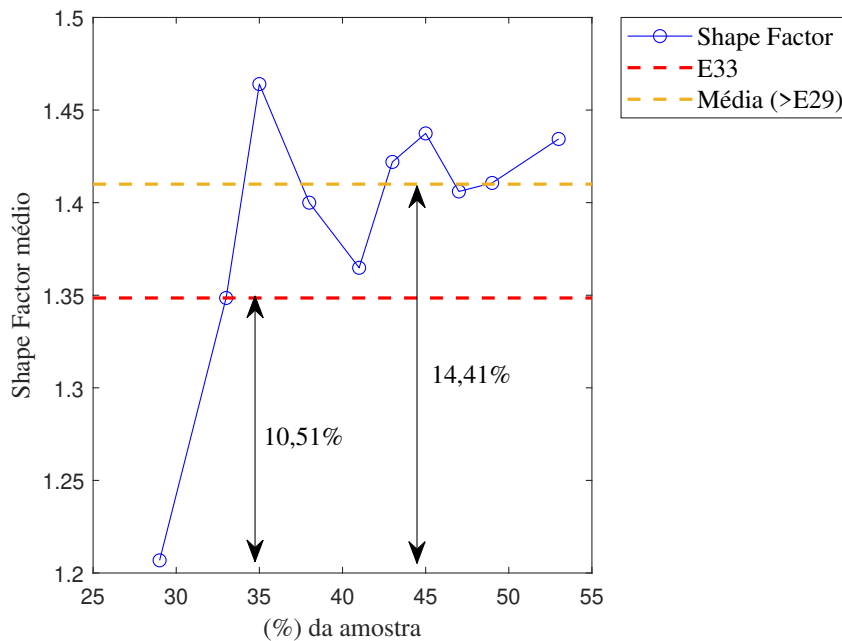
Fonte: (Autor)

Diante dos resultados expostos, é possível determinar que a métrica *shape factor* apresentou a melhor correlação ( $R^2 = 0.7967$ ) com o aumento do percentual de etanol na mistura de combustível, em comparação com o RMS ( $R^2 = 0.7082$ ) e *kurtosis* ( $R^2 = 0.6054$ ). Entretanto, essa correlação é considerada baixa em comparação com outras metodologias não invasivas, como a SAC-DM apresentada em (SOUZA et al., 2022) onde o resultado obtido possui uma correlação de ( $R^2 = 0.9605$ ).

Um outro ponto a se observar é a diferença entre o valor do *shape factor* calculado para E29 e demais amostras. É plausível utilizar essa métrica para a diagnose de uma mistura de combustível adulterada, uma vez que a gasolina do tipo C encontrada em postos de combustível atualmente possui um limite de 27% de etanol na composição, como visto na seção 1.1.

A diferença entre E29 e E33 foi superior a 10%, e superior a 14% levando em conta a média das amostras com um percentual acima de 29% de etanol. Dessa forma, foi identificada uma margem confiável para diagnosticar se a mistura atende aos requisitos da legislação vigente.

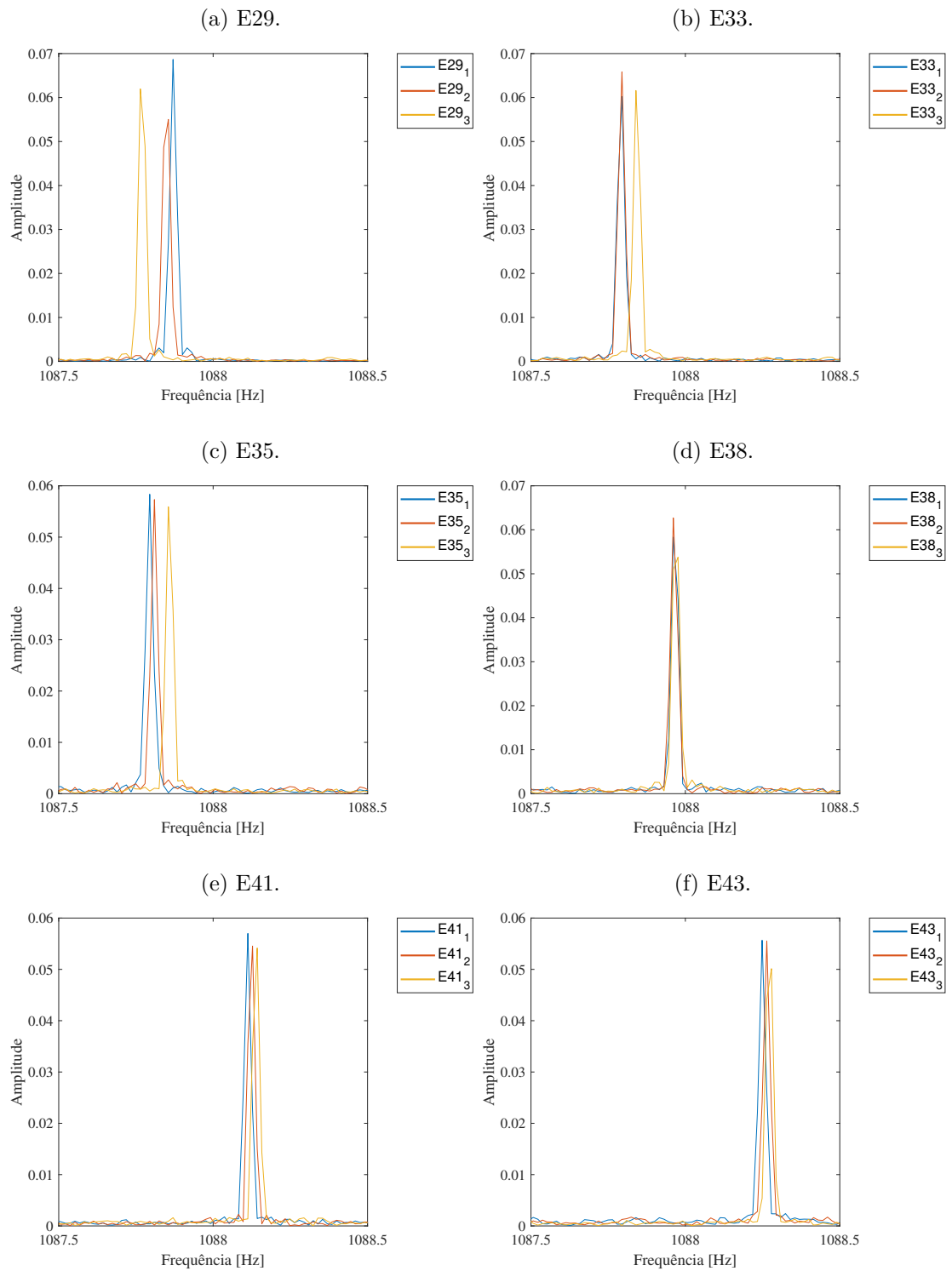
Figura 28 – Diagnose através do Shape Factor médio x (%) de etanol

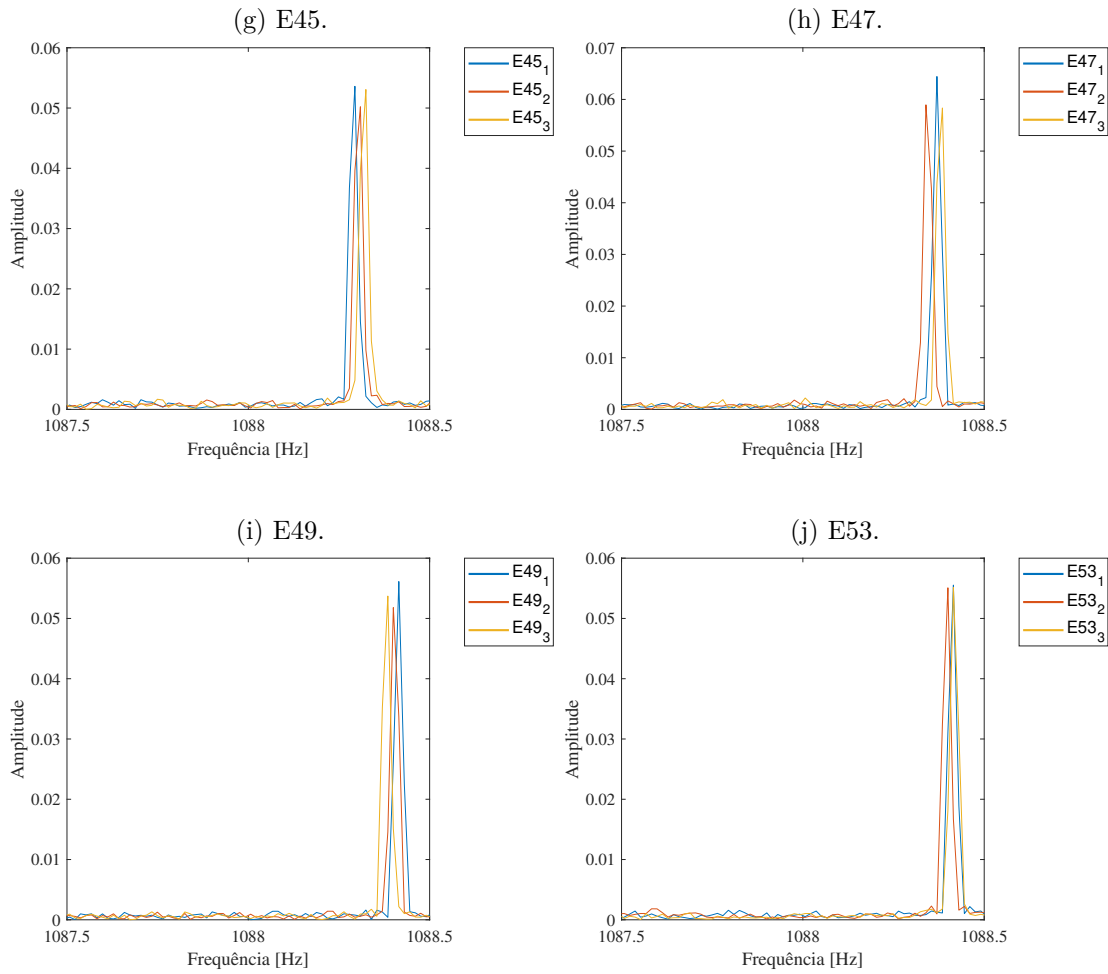


Fonte: (Autor)

Além da análise através das métricas estatísticas, uma outra característica dos sinais despertou o interesse durante a análise no domínio da frequência. A Figura 19 apresenta o resultado da FFT de cada amostra, onde é possível identificar picos de frequência em torno de 180 Hz e 1088 Hz para todas as amostras. Diante da Figura 29 torna-se possível analisar particularmente o pico em torno de 1088 Hz, onde observa-se uma correlação entre os picos em torno dessa região e o percentual de etanol.

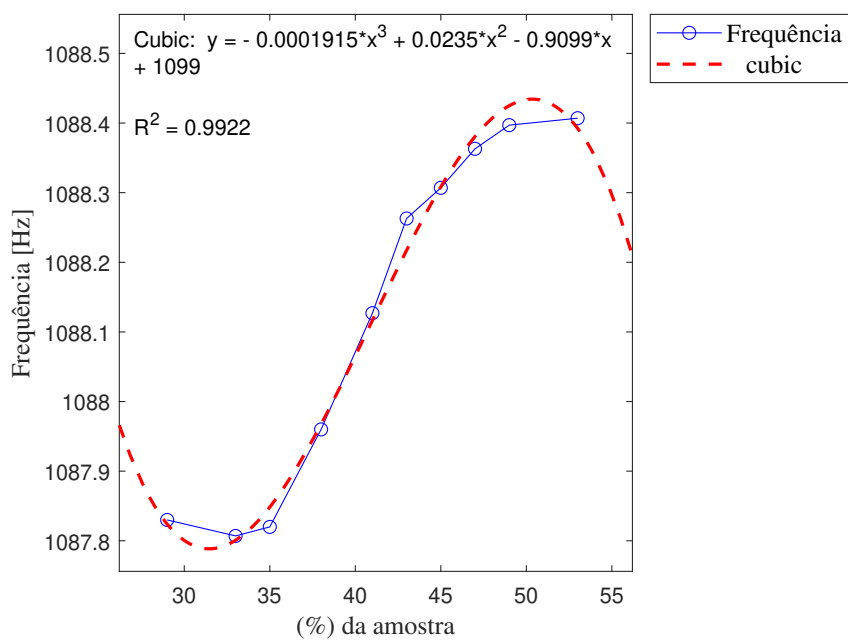
Figura 29 – Destaque do pico de frequência em torno de 1088 Hz.





O comportamento desse pico de frequências em relação ao percentual de etanol chama a atenção pela alta correlação e pela baixa variação entre os testes de uma mesma amostra, fato este que não foi possível destacar na análise estatística vista anteriormente. Esse fenômeno denota um alto nível de reprodutibilidade, podendo assim indicar um novo método para diagnóstico do percentual de etanol em uma mistura de combustível. A Figura 30 apresenta o resultado da regressão polinomial de 3º ordem, onde foi possível obter um coeficiente de correlação  $R^2 = 0.9922$ . Para uma regressão linear, o resultado obtido foi de  $R^2 = 0.9121$ , também consideravelmente superior aos resultados obtidos pelas métricas estatísticas.

Figura 30 – Média do pico em torno de 1088 Hz para cada amostra



Fonte: (Autor)

## 5 Considerações Finais

O presente trabalho estudou a correlação entre o percentual de etanol na mistura gasolina + etanol e a amplitude de vibração de um motor de combustão interna alimentado com tal mistura. Diante do atual cenário da aquecida indústria automobilística brasileira e do crescente número de veículos em circulação no país, a proposta desse trabalho demonstra relevância por se tratar de uma metodologia não invasiva capaz de detectar a adulteração do combustível em consumo, de acordo com o percentual máximo de etanol permitido via legislação.

Comparando os resultados obtidos com os objetivos propostos, verifica-se que tanto o objetivo geral quanto os objetivos específicos foram alcançados. Foi demonstrado que existe uma relação entre o percentual de etanol na mistura e as métricas estatísticas empregadas: *kurtosis*, *RMS* e *shape Factor*. Apesar de não apresentar um alto nível de correlação com o percentual de etanol, a métrica *shape factor* apresentou um resultado consideravelmente superior às demais métricas estatísticas, o que pode indicar uma menor sensibilidade dessa métrica a ruídos do sinal e consequentemente uma maior confiabilidade dos resultados através desse parâmetro.

As razões para o surgimento do pico de frequências em torno da frequência de 1088 Hz ainda são desconhecidas. A equipe do GPICEEMA realizará novos experimentos para validar o surgimento desse fenômeno e estudar sua origem e consequências de maneira profunda. Porém, dada tamanha correlação entre tal frequência e o percentual de etanol, é plausível supor que uma nova metodologia pode ser desenvolvida baseando-se nesse intervalo de altas frequências. A partir dos novos experimentos, sugere-se a replicação da metodologia empregada nesse trabalho, a fim de avaliar o comportamento das métricas estatísticas sob diferentes condições e estudar seu nível de reprodutibilidade no emprego da diagnose de combustíveis adulterados.

Também como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se o estudo da correlação entre o percentual de etanol no combustível e a ocorrência de fenômenos que podem causar severos danos à integridade estrutural do motor, tais como a detonação, pré-ignição e *misfire*. Associado à esse estudo, pode-se avaliar o uso de técnicas de inteligência artificial tais como redes neurais artificiais ou redes neurais informadas pela física, na tentativa de prever a ocorrência desses fenômenos.

## Referências

- ABREU, R. E. L.; PAZ, J. E. M.; SILVA, A. C.; PONTES, M. J. C.; LEMOS, S. G. **Adulteração de etanol combustível com metanol avaliado por voltametria cíclica e calibração multivariada.** *Combustível, Science Direct*, n. 156, p. 20–25, 2015. Citado na página 16.
- AFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira.** [S.l.], 2023. 6 p. Disponível em: <<https://anfavea.com.br/site/anuarios-2/>>. Acesso em: 09 set. 2023. Citado na página 14.
- ALTAN, H.; ARIK, E.; ESENTURK, O. **Propriedades dielétricas de misturas de etanol e gasolina por espectroscopia Terahertz e um método eficaz para determinar o teor de etanol da gasolina.** *The Journal of Physical Chemistry*, n. 118, p. 3081–3089, 2014. Citado na página 16.
- ANP. **RESOLUÇÃO ANP Nº 807, DE 23.01.2020, DOU 24.01.2020.** [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-807-2020>>. Acesso em: 01 out. 2023. Citado na página 15.
- \_\_\_\_\_. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.** [S.l.], 2023. 98 e 163 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-contenido/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2023/anuario-2023.pdf>>. Acesso em: 01 Abr. 2024. Citado na página 15.
- AVILA, I.; BALESTIERI, J. A. P.; QUIROGA, L. C. R. **Avaliação do comportamento térmico e da cinética de misturas etanol /gasolina durante a combustão por análise termogravimétrica.** *Engenharia Térmica Aplicada, Science Direct*, n. 115, p. 99–110, 2017. Citado na página 16.
- AVILE, L. M.; SANTOS, A. P. F. D.; MATTOS, D. I. M. D.; SOUZA, C. G. D.; ANDRADE, D. F. D.; D'ÁVILA, L. A. **Determinação de etanol na gasolina por cromatografia líquida de alta eficiência.** *Combustível, Science Direct*, n. 212, p. 236–239, 2018. Citado na página 16.
- BABUA, V.; KRISHNAB, R.; MANIC, N. **Revisão sobre a detecção de adulteração em combustíveis através de técnicas computacionais.** *Materials Today, Science Direct*, n. 4, p. 1723–1729, 2017. Citado na página 16.
- FERGUSON, C. R.; KIRKPATRICK, A. T. **Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences.** 3ª edição. ed. [S.l.]: Wiley, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 15, 19 e 22.
- FIGUEIREDO, M. K.; COSTA-FÉLIX, R. P.; MAGGI, L. E.; ALVARENGA, A. V.; ROMEIRO, G. A. **Deteção de adulteração de etanol e biocombustível usando um método de medição ultrassônico.** *Combustível, Science Direct*, n. 91, p. 209–212, 2012. Citado na página 16.

GANESAN, V. **IC Engines**. 4<sup>o</sup> edição. ed. [S.l.]: Tata McGraw-Hill, 2012. Citado na página 18.

GOV-BR. **PL que traz novos percentuais para a mistura de etanol e biodiesel vai para o Senado Federal**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/pl-que-traz-novos-percentuais-para-a-mistura-de-etanol-e-biodiesel-vai-para-senado-federal>>. Citado na página 27.

GUPTA, H. N. **Fundamentals of Internal Combustion Engines**. 2<sup>o</sup> edição. ed. [S.l.]: PHI Learning, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2<sup>o</sup> edição. ed. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2018. Citado 6 vezes nas páginas 20, 21, 23, 24, 25 e 27.

HUSSAIN, Z. M.; SADIK, A. Z.; O'SHEA, P. **Digital Signal Processing: An Introduction with MATLAB and Applications**. [S.l.]: Springer, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 33.

IBGE. **Série história do número de veículos no Brasil**. 2023. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120?tipo=grafico&indicador=28120>>. Citado na página 13.

IEMA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. [S.l.], 2023. 21-22 p. Disponível em: <<https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/04/SEEG-10-anos-v5.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

MAHDISOOZANI, H.; MOHSENIZADEH, M.; BAHIRAEI, M.; KASAEIAN, A.; DANESHVAR, A.; GOODARZI, M.; SAFAEI, M. R. **Performance Enhancement of Internal Combustion Engines through Vibration Control: State of the Art and Challenges**. *Applied Sciences*, v. 9, n. 3, 2019. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/9/3/406>>. Citado na página 34.

MAPA. **Portaria MAPA Nº 75 DE 05/03/2015**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=281775>>. Acesso em: 01 out. 2023. Citado na página 15.

PEREIRA, P. F.; SOUSA, R. M.; MUNOZ, R. A.; RICHTER, E. M. **Determinação simultânea de etanol e metanol em etanol combustível usando voltametria cíclica**. *Combustível, Science Direct*, n. 103, p. 725–729, 2013. Citado na página 16.

PULKRABEK, W. W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. 2<sup>o</sup> edição. ed. [S.l.]: Pearson, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 18, 20 e 26.

RENAULT. **Renault Logan - Manual do proprietário**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://cdn.group.renault.com/ren/br/renault-new-cars/editorial/manuais/manual-logan/2017/NU1077-8-L52-PTB.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2024. Citado na página 36.

SANTANA, C. M.; MAUTONE, J.; ALMEIDA, H. **Analysis of Vibration and Noise of Internal Combustion Engine By Application of Test and Experimental Analysis of The Frequency Spectrum**. *International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*, 2013. Citado na página 24.

\_\_\_\_\_. **Analysis of the Increase Level of Vibration in an Internal Combustion Engine due to the Degradation of the Lubricating Oil.** *WCX SAE World Congress Experience*, 2019. Citado na página 23.

SENSORS, H. **HS-100 Accelerometer Datasheet.** [S.l.], 2024. Disponível em: <<https://hansfordsensors.com/>>. Acesso em: 08 abr. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 38.

SILVA, A. C.; PONTES, L. F. B. L.; PIMENTEL, M. F.; PONTES, M. J. C. **Detecção de adulteração em combustível de álcool etílico hidratado usando métodos de espectroscopia no infravermelho e reconhecimento supervisionado de padrões.** *Talanta, Science Direct*, n. 93, p. 129–134, 2012. Citado na página 16.

SOUZA, T. V.; BRITO, A. V.; RAMOS, J. G. G.; MISHINA, K. D. V.; RODRIGUES, M. C.; CARVALHO, M.; BELO, F. A.; Lima Filho, A. C. **Vibration-based diagnosis of adulterated ethanol in internal combustion engine.** *Fuel*, v. 330, n. 125427, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 60.

VELLO, T. P.; OLIVEIRA, R. F. D.; SILVA, G. O.; CAMARGO, D. H. S. D.; BUFON, C. C. B. **A simple capacitive method to evaluate ethanol fuel samples.** *Scientific reports*, v. 7, n. 1, p. 1–7, 2017. Citado na página 16.

WEEKS, M. **Processamento Digital de Sinais Utilizando Matlab e Wavelets.** [S.l.]: LTC, 2012. Citado na página 32.