



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**



**THENISON VIANA SOUZA**

**MÉTODO PARA DIAGNÓSTICO DE ETANOL  
ADULTERADO EM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA  
EM FUNCIONAMENTO ATRAVÉS DA VIBRAÇÃO**

**JOÃO PESSOA - PB**  
**2022**

**PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / Nº 89**

**THENISON VIANA SOUZA**

**MÉTODO PARA DIAGNÓSTICO DE ETANOL ADULTERADO EM MOTOR DE  
COMBUSTÃO INTERNA EM FUNCIONAMENTO ATRAVÉS DA VIBRAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora  
Prof<sup>a</sup>. Monica Carvalho, PhD

Co-orientador  
Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho

**JOÃO PESSOA - PB  
2022**

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

S729m Souza, Thenison Viana.

Método para diagnóstico de etanol adulterado em motor de combustão interna em funcionamento através da vibração / Thenison Viana Souza. - João Pessoa, 2022.  
59 f. : il.

Orientação: Mônica Carvalho.

Coorientação: Abel Cavalcante Lima Filho.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Motores de combustão interna. 2. Etanol. 3. Análise do caos. 4. Sinal caótico. I. Carvalho, Mônica. II. Lima Filho, Abel Cavalcante. III. Título.

UFPB/BC

CDU 621.43(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA n° 89 da Sessão de Defesa Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba.

Ao vigésimo quarto dia do mês de fevereiro de dois mil e vinte e dois foi instalada a Banca de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas, as 14h00, de forma remota [meet.google.com/zsc-arhj-ojm](https://meet.google.com/zsc-arhj-ojm) (Google Meet) que se submeteu a defesa pública de THENISON VIANA SOUZA, matrícula 20191012175, com o título “MÉTODO PARA DIAGNÓSTICO DE ETANOL ADULTERADO EM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA EM FUNCIONAMENTO ATRAVÉS DA VIBRAÇÃO”. A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: MONICA CARVALHO (UFPB), ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO (UFPB), FRANCISCO ANTONIO BELO (UFPB), e ALISSON VASCONCELOS DE BRITO (UFPB). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o candidato foi aprovado pela Comissão Examinadora. E, para constar, foi lavrada a presente ata, assinada pelos membros da Comissão.

Observações: \_\_\_\_\_

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dra. MONICA CARVALHO  
Orientadora

Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO - UFPB  
Co-orientador

Prof. Dr. Francisco Antonio Belo - UFPB  
Examinador Externo

Prof. Dr. Alisson Vasconcelos de Brito - UFPB  
Examinador Externo

PPGER/CEAR/UFPB - Campus I, Caixa Postal 5115, CEP: 58051-900, João Pessoa - PB, Brasil.

Obs.(1): O discente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 45 dias a contar da data da defesa, os exemplares definitivos da dissertação.

Obs.(2): O docente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 20 dias a contar da data da defesa, o relatório de orientação para avaliação do colegiado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais e meus irmãos por nunca deixarem eu desistir e sempre me mostrarem o caminho dos estudos.

Aos meus avós Vicentina e Manuel, já falecidos, que sonhavam em me ver formado.

À minha tia Janete e meu tio Reinaldo, que me criaram na infância junto com meus avós e contribuíram muito na minha rotina estudantil.

A minha esposa pelo incentivo e apoio, sempre me dizendo que eu sou capaz e posso ir além.

À minha orientadora Monica Carvalho e meu co-orientador Abel Cavalcante Lima Filho, pela oportunidade, disponibilidade e atenção que me deram durante toda essa jornada.

Aos professores, Koje Daniel Vasconcelos Mishina, Marcelo Cavalcanti Rodrigues e Thyago Leite de Vasconcelos Lima pelo imenso apoio dado para a realização do experimento e coleta dos dados.

Ao alunoda graduação em engenharia mecânica Vinícius Antônio Abrantes da Silva por me auxiliar na preparação das amostras e realização do experimento.

Aos meus colegas de trabalho pelo suporte constante para que eu pudesse me dedicar ao curso da melhor forma possível.

Agradeço também à UFPB por me disponibilizar suas instalações e corpo discente para que eu pudesse me qualificar ainda mais.

## SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO.....	5
1.1 INTRODUÇÃO .....	5
1.2 ESTADO DA ARTE.....	6
2. OBJETIVOS .....	9
2.1 OBJETIVO GERAL .....	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
3.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA .....	10
3.2 O ETANOL NO BRASIL.....	14
3.3 DENSIDADE DE MÁXIMOS .....	15
4 METODOLOGIA.....	19
4.1 REAGENTES UTILIZADOS.....	19
4.2 PREPARAÇÕES DAS AMOSTRAS.....	19
4.3 REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO .....	32
4.4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE ÁUDIO E CÁLCULO DA FFT.....	39
4.5 MÉTODO PARA O CÁLCULO DO SAC-DM.....	41
5. RESULTADOS .....	43
6 CONCLUSÃO.....	50
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	51

## FIGURAS

Figura 1 – Constituição geral dos motores de quatro tempo do ciclo Otto. ....	12
Figura 2 - As quatro etapas do ciclo Otto. ....	13
Figura 3 - Amostra Identificada. ....	21
Figura 4 - Amostras Identificadas. ....	21
Figura 5 - Instrumentos de Medição. ....	22
Figura 6 - Proveta graduada de vidro com volume de 1000 ml do fabricante “VIDROLABOR”. ....	23
Figura 7 - Densímetro de vidro para massa específica de álcool etílico e suas misturas. ....	24
Figura 8 - Termômetro para massa específica de álcool etílico e suas misturas. ..	25
Figura 9 - Densímetro e Termômetro inseridos na proveta de 1000 ml. ....	26
Figura 10 - Operador despejando o etanol na proveta para a determinação da massa específica. ....	27
Figura 11 - Becker de vidro. ....	28
Figura 12 - Proveta graduada de vidro. ....	29
Figura 13 - Pipeta graduada de vidro. ....	30
Figura 14 - Ford Fiesta utilizado. ....	32
Figura 15. - Ford Fiesta utilizado. ....	33
Figura 16 - Modificação do tanque de combustíveis. ....	34
Figura 17 - Modificação do tanque de combustíveis. ....	35
Figura 18 - Posicionamento do equipamento de medição do sinal de vibração do motor. ....	37
Figura 19 - Posicionamento do equipamento de aquisição do sinal da vibração do motor. ....	38
Figura 20. - Amostras utilizadas no experimento + etanol inalterado. ....	39
Figura 21 - Sistema de aquisição de vibração. ....	40
Figura 22 - Metodologia para análise de sinais usando densidade de máximos. ....	42

Figura 23 - Sinais de vibração adquiridos para diferentes percentuais de álcool nas amostras. (a) sinais com longo intervalo, (b) sinais com intervalo curto. ....	43
Figura 24 - Comprimento do coeficiente de correlação. ....	44
Figura 25 - Funções de autocorrelação de sinais de vibração obtidos com o motor funcionando com combustível com diferentes percentuais de álcool. ....	46
Figura 26 - FFT dos sinais de vibração para diferentes amostras.....	47
Figura 27 - Variação de SAC-DM x Tempo. ....	48
Figura 28 - SAC-DM versus porcentagem de etanol na amostra usada para combustão do motor do veículo.....	48
Figura 29 - Regressão linear da curva SAC-DM versus porcentagem de etanol na mistura. ....	49



## **TABELAS**

Tabela 1 - Detalhamento das amostras propostas.....	20
Tabela 2 - Resultado encontrado após validação das amostras. ....	31
Tabela 3 - Características do sistema de aquisição de vibração. ....	40
Tabela 4 - Cálculo da densidade de máximos do sinal de vibração (verificando comportamento caótico). ....	45

## RESUMO

Todo material orgânico gera energia, mas o biocombustível é fabricado em escala comercial a partir de produtos agrícolas como a cana-de-açúcar, no caso do álcool etanol. Atualmente, o etanol brasileiro representa a melhor e mais avançada opção para a produção sustentável de biocombustíveis em larga escala no mundo. O uso de etanol combustível reduz a emissão de gases de efeito estufa e reduz a dependência energética de combustíveis fósseis. Porém, mesmo com fiscalização da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) nos postos de combustível, não são raros os casos de adulteração. No caso do etanol, adulterações comuns incluem a mistura de etanol hidratado com etanol anidro (aquele que é misturado à gasolina, de cor alaranjada), metanol, ou até mesmo água. Tais adulterações são visualmente imperceptíveis, mas podem causar alterações no desempenho do carro, nas concentrações de gases poluentes produzidos e nos níveis de deterioração das peças, originando geralmente altos custos para o reparo dos componentes afetados pelos malefícios da adulteração. Atualmente, veículos automotivos não possuem dispositivos de segurança capazes de informar se o combustível está adulterado ou não, sendo essa análise realizada pelos órgãos regulatórios utilizando instrumentos. Este trabalho desenvolve um método para determinação em tempo real e de forma não invasiva, da adulteração de etanol. Um sistema baseado em Arduíno adquire o sinal de vibração emitido pelo motor de um veículo em funcionamento, e o sinal é então processado utilizando uma técnica para extração de características de sinais caóticos denominada densidade de máximos. Testes experimentais foram realizados em motor de combustão para desenvolvimento e validação do método proposto. Não foi encontrado na literatura científica nenhum trabalho que propõe estimar combustível com o carro em funcionamento, como a técnica proposta nesse trabalho, e esta é a primeira vez que a teoria do caos é aplicada à identificação de combustível adulterado. Observou-se a função de autocorrelação a longo prazo para sinais de vibração obtidos com o motor funcionando a partir de combustível com diferentes percentuais de etanol, que revelou um decaimento a longo prazo que evidencia o comportamento caótico do sinal. Demonstrou-se uma tendência linear entre a variável caótica SAC-DM e o percentual de etanol na mistura com coeficiente de correlação de 0,96.

**Palavras chave:** Motores de combustão interna, etanol, análise do caos, sinal caótico

## ABSTRACT

All organic material generates energy, but biofuel is manufactured on a commercial scale from agricultural products such as sugarcane, in the case of ethanol alcohol. Currently, Brazilian ethanol represents the best and most advanced option for the sustainable production of biofuels on a large scale in the world. The use of fuel ethanol reduces the emission of greenhouse gases and reduces energy dependence on fossil fuels. However, even with inspection by the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP) at gas stations, cases of tampering are not rare. In the case of ethanol, common adulterations include the mixture of hydrated ethanol with anhydrous ethanol (the one that is mixed with gasoline, which is orange in color), methanol, or even water. Such tampering is visually imperceptible, but can cause changes in the car's performance, in the concentrations of pollutant gases produced and in the levels of deterioration of parts, generally leading to high costs for the repair of components affected by the damage caused by tampering. Currently, automotive vehicles do not have safety devices capable of informing whether the fuel is adulterated or not, and this analysis is carried out by regulatory bodies using instruments. This work develops a method for real-time and non-invasive determination of ethanol adulteration. An Arduino-based system acquires the vibration signal emitted by the engine of a running vehicle, and the signal is then processed using a technique for extracting chaotic signal characteristics called density peaks. Experimental tests were carried out in a combustion engine for the development and validation of the proposed method. No work was found in the scientific literature that proposes to estimate fuel with the car running, as the technique proposed in this work, and this is the first time that chaos theory is applied to the identification of adulterated fuel. The long-term autocorrelation function was observed for vibration signals obtained with the engine running from fuel with different percentages of ethanol, which revealed a long-term decay that evidences the chaotic behavior of the signal. A linear trend was demonstrated between the chaotic variable SAC-DM and the percentage of ethanol in the mixture with a correlation coefficient of 0.96.

**Keywords:** Internal combustion engines, ethanol, chaos analysis, chaotic signal

## **1 APRESENTAÇÃO**

### **1.1 INTRODUÇÃO**

Os motores a combustão são máquinas térmicas que transformam a energia proveniente de uma reação química em energia mecânica. Sua evolução data de 1866, quando o engenheiro, físico e inventor alemão Nikolaus August Otto desenvolveu o princípio de funcionamento conhecido como Ciclo Otto, que consiste em transformações termodinâmicas que podem ser observadas nos automóveis até os dias de hoje (Rangel, 2018). Esse ciclo consiste em quatro etapas, sendo elas: admissão, compressão, explosão e o escape. No entanto, essa máquina tão importante e engenhosa já sofreu diversas modificações desde a sua criação, levando a vários tipos existentes atualmente.

Os motores a combustão são mecanismos largamente utilizados no nosso cotidiano, sendo a sua utilização para o transporte a mais significativa. No mundo moderno, os motores a combustão tem papel crucial, pois a grande maioria dos veículos que utilizamos utiliza esse tipo de motor como componente. Em 2018, o Instituto Brasileiro de Planejamento e Tributação - IBPT divulgou um estudo que estimava no Brasil 65,8 milhões de veículos dos mais diversos tipos, entre leves, ônibus, caminhões e motocicletas, todos esses em efetiva utilização (IBPT – EMPRESÔMETRO, 2018). Desse total, 41,2 milhões são automóveis (62,65%), 7,0 milhões são comerciais leves (10,67%), 2 milhões são caminhões (3,09%), 376,5 mil são ônibus (0,57%) e 15,1 milhões são motocicletas (23,01%). Esses números tornam esses tipos de veículos os maiores responsáveis na emissão desses gases. Esse cenário é ainda mais agravado devido à existência da prática da adulteração dos combustíveis, ou seja, a adição de solventes e outros compostos ao combustível, a fim de tornar o produto mais barato. Esses compostos podem ser outros combustíveis que, em concentrações diferentes das especificadas em norma, também configuram a adulteração do produto. Esse trabalho será dedicado especificamente à detecção de adulteração no etanol combustível.

De acordo com os regulamentos brasileiros (RESOLUÇÃO ANP N° 7, de 9.2.2011), a concentração de etanol em etanol combustível pode ser aceita em uma concentração máxima de 93,8% e um mínimo de 92,5% em massa. A principal forma de adulteração em amostras de etanol combustível é a adição ilegal de água ou, em casos mais graves, a substituição do etanol pelo metanol. A ANP, através de resolução

(RESOLUÇÃO ANP N° 19, de 15.4.2015), regulariza os níveis máximos permitidos de água e metanol nas amostras de etanol combustível. Para detectar esse tipo de fraude e ajudar o consumidor a evitar utilizar em seu veículo combustíveis que trarão malefícios ao automóvel e até ao próprio consumidor, existem variados métodos científicos que utilizam as mais variadas técnicas.

Em sua grande maioria, os métodos descritos requerem a análise das amostras em laboratório, sendo que absolutamente todas são invasivas, ou seja, utilizam amostras do combustível para realizar as análises.

Esse trabalho apresenta a possibilidade de estimar o comprimento de correlação de diferentes sinais (sonoro, corrente de armadura e vibração) de um MIT (motor de combustão interna) através de uma fórmula simples, que considera apenas a densidade máxima desse sinal.

## **1.2 ESTADO DA ARTE**

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

Em Chagas (2006) o tema adulteração do etanol foi abordado, sendo desenvolvido um fotômetro NIR portátil para determinar o teor de água em álcool combustível hidratado combustível (AEHC) e o teor de etanol (Álcool etílico anidro carburente) em gasolina.

Carneiro et al (2008) propôs a utilização de modelos de mínimos quadrados parciais baseados em técnicas da Transformada de Fourier como um método rápido e preciso para avaliar a qualidade do álcool etílico hidratado combustível, bem como para detectar sua adulteração com metanol.

Opekar et al (2011) desenvolveu e testou uma sonda de impedância sem contato com uma célula de detecção plana ou tubular, para determinação rápida do teor de etanol na gasolina.

Figueiredo et al (2013) utilizou atenuação ultrassônica e velocidade de propagação para detecção de adulterações no etanol e biocombustíveis.

Pereira et al (2012) propôs a determinação de etanol em amostras de álcool e combustível usando a análise de injeção rápida em lote, que é uma técnica de injeção sem fluxo introduzida por Wang e Taha.

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

Pereira et al (2013) fez a determinação simultânea de etanol e metanol em etanol combustível usando voltametria cíclica em um eletrodo de ouro.

Silva et al (2013) propôs um método eletroanalítico simples e de baixo custo para identificar adulteração em amostras de álcool etílico hidratado usando análises multivariadas.

Arik et al (2014) investigou as propriedades dielétricas das misturas etanol / gasolina na região espectral terahertz, para determinação do teor de etanol na gasolina.

Abreu et al (2015) propôs a detecção da adulteração de etanol por metanol, utilizando a voltametria cíclica e calibração multivariada.

Vello et al (2017) descreveu o desenvolvimento de uma plataforma simples, rápida e precisa, baseada em sensores nanoestruturados que operam através de medições de capacitância, para avaliar amostras de etanol.

Quiroga et al (2017) avaliou o comportamento térmico e da cinética de misturas etanol / gasolina, por análise termogravimétrica, a fim de determinar o teor de etanol na gasolina.

Babu et al (2017) fez uma revisão sobre a detecção de adulteração em combustíveis através de técnicas computacionais.

Ávila et al (2018) empregou cromatografia líquida de alta eficiência, com detecção de índice de refração, para quantificar o teor de etanol na gasolina.

Broek et al (2019) utilizou um sensor portátil e barato para detecção altamente seletiva de metanol. Consiste em uma coluna de separação (Tenax) que separa metanol de interferentes como etanol, acetona ou hidrogênio, como na cromatografia gasosa, e um sensor de gás quimiorresistivo (nanopartículas de SnO<sub>2</sub> dopadas com Pd) para quantificar a concentração de metanol.

Karatepe et al (2020) utilizou um novo sensor baseado em antenas patch microstrip retangulares para detectar diferentes proporções de álcool etanol em vinhos e álcool isopropílico em desinfetantes.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Desenvolver um método para a detecção de adulteração de combustíveis em veículos automotivos através da aquisição do sinal de vibração emitido por um motor à combustão em funcionamento.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos são:

- Contribuir para um melhor entendimento do fenômeno da adulteração de combustíveis, em especial do etanol, por meio de revisão bibliográfica, visando à identificação dos determinantes e seus efeitos;
- Identificar as substâncias adulterantes mais utilizadas no etanol, tomando como referência os relatórios emitidos pela ANP;
- Desenvolvimento de algoritmo computacional para detecção e identificação de características de vibração da queima de etanol nos motores de veículos automotivos baseado na variável caótica densidade de máximos;
- Validação dos resultados a partir de metodologia experimental.



### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Inventado e desenvolvido com sucesso no final da década de 1860, o motor de combustão interna (MCI) tornou-se a tecnologia dominante de motores em várias áreas, em especial na mobilidade humana, sendo componente presente em navios, automóveis e locomotivas. Ao passo que os combustíveis principais utilizados nos veículos automotivos no início dos anos 1900 eram vapor ou eletricidade, em 2010, somente os Estados Unidos apresentavam uma frota de 200 milhões de veículos movidos a motor de combustão interna (FERGUSON & KIRKPATRICK, 2016).

Em um MCI a queima ou oxidação do combustível no interior do motor gera energia química, que por sua vez é convertida em energia mecânica. Antes da combustão a matéria-prima é a mistura combustível-ar e após a queima os produtos originados são os fluidos de trabalho reais (HEYWOOD, 1988).

Existem várias classificações para um MCI, destacando-se entre elas as seguintes (PULKRABEK, 1997; GUPTA, 2006):

##### **Ciclo termodinâmico:**

- a) Ciclo Otto - fornecimento de calor a volume constante;
- b) Ciclo Diesel - fornecimento de calor a pressão constante;
- c) Ciclo Dual - fornecimento de calor a volume e pressão parcialmente constantes;
- d) Ciclo de Joule ou de Brayton.

##### **Ciclo de trabalho:**

- a) Ciclo de quatro tempos - quatro movimentos do pistão em duas rotações do motor para cada ciclo;
- b) Ciclo de dois tempos - dois movimentos de pistão durante uma rotação do motor para cada ciclo;

**Tipo de Ignição:**

a) Ignição por faísca - o processo de combustão é iniciado em cada ciclo usando uma vela de ignição que produz uma descarga elétrica de alta tensão entre dois eletrodos, inflamando a mistura de ar-combustível na câmara de combustão ao redor da vela;

b) Ignição por compressão – o processo de compressão é iniciado quando a mistura ar-combustível se inflama devido à alta temperatura na câmara de combustão, causada por alta compressão.

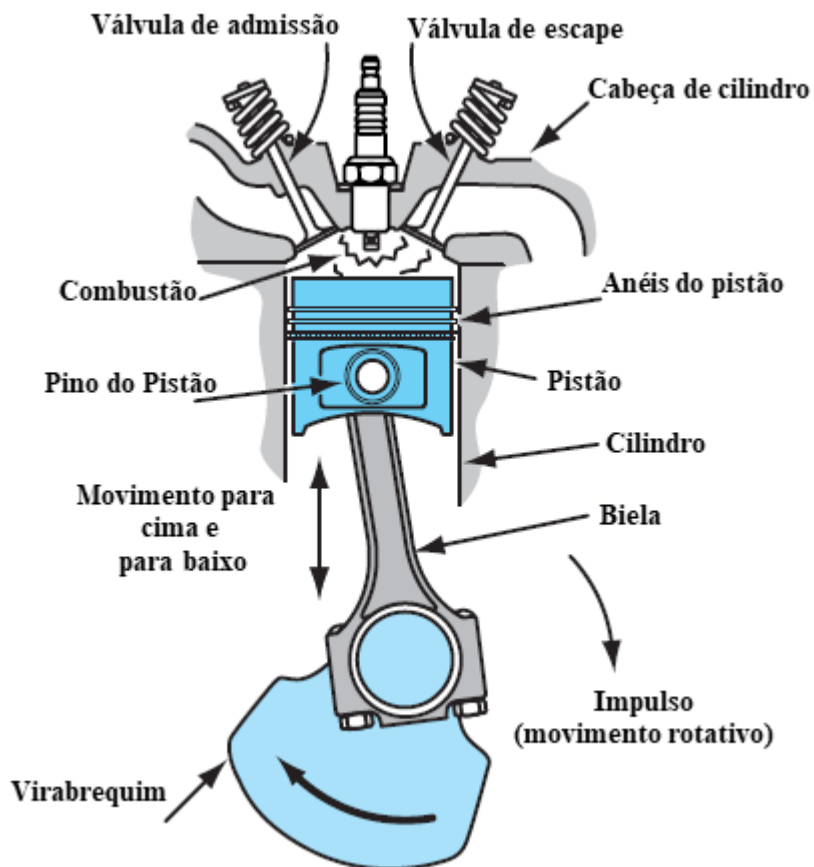
A maioria dos automóveis e caminhões leves que compõe a frota atual de veículos é movida por um motor de combustão interna de quatro tempos com ignição por faísca, primeiramente construído por Nicolaus Otto em 1876 (GILLES, 2018).

Os motores de ciclo Otto começaram a substituir os motores a vapor devido à sua melhor eficiência, a não necessidade de reservatório de água para expansão, ao menor consumo de combustível, ao menor peso e dimensões(VARELLA, 2008).

Desde sua invenção, os motores de combustão interna ciclo Otto foi um dos motores mais usados pela indústria automobilística, sendo modificado e evoluindo através do tempo com a criação de novas tecnologias.

O processo de ignição por faísca a quatro tempos em motores a combustão é cíclico e complexo, compreendendo as etapas de admissão, compressão, explosão e exaustão, descritas a seguir (HEYWOOD, 1988; HALDERMAN, 2012; GILLES, 2018):

Figura 1–Constituição geral dos motores de quatro tempo do ciclo Otto.



Fonte: Adaptado de Gilles (2018)

- **Admissão:** a válvula de admissão está aberta e o pistão dentro do cilindro viaja para baixo, puxando uma mistura de ar e combustível para dentro do cilindro. O virabrequim gira 180 graus do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI) e o eixo de comando gira 90 graus. À medida que o virabrequim continua a girar, o pistão começa a subir novamente no cilindro e a válvula de admissão se fecha.

- **Compressão:** à medida que o motor continua a girar, a válvula de admissão se fecha e o pistão se move para cima no cilindro, comprimindo a mistura ar-combustível. O virabrequim gira 180 graus do PMI para o PMS e o eixo de comando gira 90 graus.

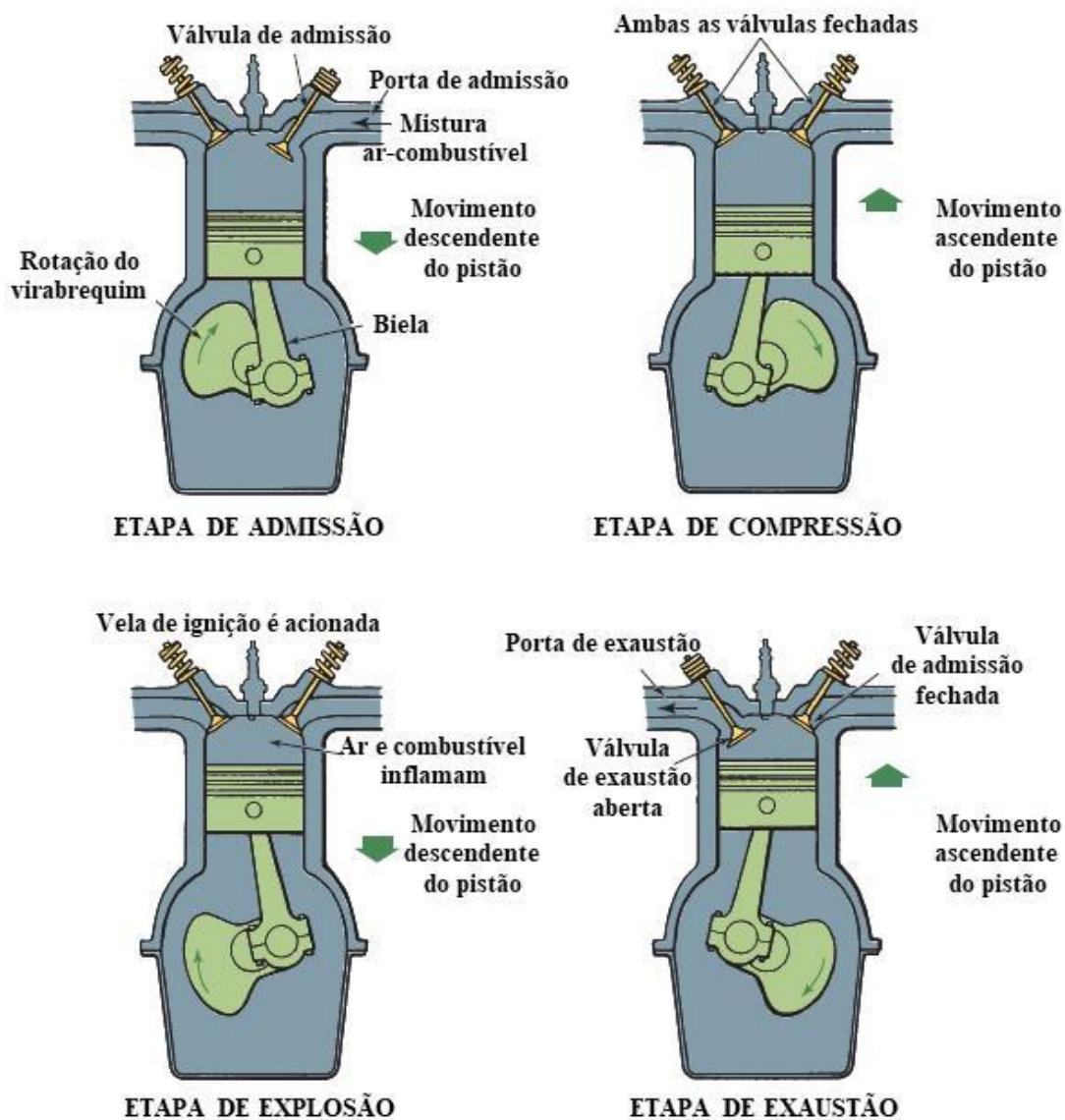
- **Explosão:** quando o pistão se aproxima da parte superior do cilindro, a faísca na vela de ignição acende a mistura ar-combustível, que força o pistão para baixo. O virabrequim gira 180 graus PMS para o PMI e o eixo de comando gira 90 graus.

- **Exaustão:** o motor continua a girar e o pistão novamente se move para cima no cilindro. A válvula de escape se abre e o pistão força os gases residuais resultantes da

queima do combustível para fora da válvula de escape, para o coletor de escape e o sistema de escape. O virabrequim gira 180 graus do PMI para o PMS e o eixo de comando gira 90 graus.

Todo o ciclo de quatro tempos se repete, iniciando novamente quando o pistão se move para baixo no curso de admissão. Para parar o motor, a eletricidade do sistema de ignição é desligada pelo interruptor de ignição, que interrompe a faísca nas velas de ignição. Na Figura 2 estão ilustradas as quatro etapas do ciclo Otto.

**Figura 2 - As quatro etapas do ciclo Otto.**



Fonte: Adaptado de Halderman (2012)

### 3.20 ETANOL NO BRASIL

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

O surgimento do etanol no Brasil remonta do início do século XX e basicamente foram duas as razões para esse surgimento: a necessidade de amenizar as sucessivas crises do setor açucareiro e a tentativa de reduzir a dependência do petróleo importado. Em 1925, surgiu a primeira experiência brasileira com etanol combustível. Em 1933, o governo de Getúlio Vargas criou o Instituto do Açúcar e do Álcool – IAA. No mesmo ano, através do Decreto-Lei nº 737, de 23 de setembro, tornou-se obrigatória a mistura de etanol na gasolina. Em 1975, foi lançado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), como objetivo de reduzir a dependência nacional em relação ao petróleo importado, que correspondia a aproximadamente 80% do petróleo consumido no país, correspondendo a 50% da balança da balança comercial. Àquela época, embora cientistas já viessem alertando o público sobre as consequências do aumento da densidade de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, ainda não se tinha percepção da influência da emissão de  $\text{CO}_2$  durante a queima de combustíveis fósseis sobre o bem estar da humanidade, de forma que nenhum país adotou qualquer medida restritiva (LEITE, 2008).

Devido ao forte caráter intervencionista do programa, uma série de medidas de incentivo à produção e uso do álcool combustível foi adotada, dentre elas estão: a obrigatoriedade da adição do álcool à gasolina, a concessão de subsídios para a instalação de destilarias anexas às usinas de açúcar, o controle dos preços e incentivos fiscais, o incentivo à produção de carros movidos a álcool, a adoção de medidas protecionistas em relação ao álcool importado e o incentivo à pesquisa e desenvolvimento nos campos de produção e uso de álcool combustível (CARNEIRO, 2008)

Após o Proálcool, o etanol ganhou um grande impulso e se tornou uma importante fonte de energia para o país. Nos anos 2000, os produtores de etanol do Brasil encontraram-se diante de novos desafios provocados por fatores internos e externos. No âmbito do mercado interno, o desafio foi a evolução do carro *flexfuel*, que funciona com etanol, gasolina ou qualquer mistura entre os dois combustíveis, permitindo ao consumidor

o arbítrio para escolher com que combustível abastecerá seu automóvel (MORIZONO,2018).

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

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

### 3.3 DENSIDADE DE MÁXIMOS

Em um máximo local de um sinal no intervalo  $[t, t+\delta t]$ , para um  $\delta t$  suficientemente pequeno, têm-se  $q_i'(t)>0$  e  $q_i'(t+\delta t)<0$  nas quais essas relações simbolizam a derivada primeira do sinal no tempo, tal que  $-q_i''(t)\delta t>q_i'(t)>0$ .Dentro do conceito de máximo local, a densidade de máximos média  $\langle\rho_i\rangle$  pode ser obtida de acordo com a Equação 3.1, usando a probabilidade conjunta  $P(q_i',q_i'')$  (LUCENA-JUNIOR, 2020)

$$\begin{aligned}\langle\rho_i\rangle &\equiv \frac{1}{\delta t} \int_{-\infty}^0 dq_i'' \int_0^{-q_i'' \delta t} dq_i' P(q_i', q_i'') \\ &= \int_{-\infty}^0 dq_i'' q_i'' P(0, q_i'')\end{aligned}\tag{3.1}$$

O princípio da máxima entropia pode ser usado para construir a distribuição de probabilidade conjunta para  $q(t)$  e às suas derivadas. Após implementação dos cálculos algébricos, a integração em  $q(t)$  leva a  $P(q_i',q_i'')$  que resulta na Equação 3.2.

$$P(0, q_i'') = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\langle q_i'^2 \rangle \langle q_i''^2 \rangle}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{q_i''^2}{\langle q_i''^2 \rangle}\right) \quad (3.2)$$

Da qual

$$\langle q_i'^2 \rangle = -\left. \frac{d^2 C_i(\delta t)}{d(\delta t)^2} \right|_{\delta t=0} ; \quad \langle q_i''^2 \rangle = \left. \frac{d^4 C_i(\delta t)}{d(\delta t)^4} \right|_{\delta t=0} \quad (3.3)$$

Sendo  $C_i(\delta t)$  a função de autocorrelação do sinal dada pela Equação 3.4

$$C_i(\delta t) = \langle q_i(t + \delta t), q_i(t) \rangle \quad (3.4)$$

As expressões definidas acima podem ser usadas para escrever a densidade dos máximos em termos da função de autocorrelação. A Equação 3.5 é aplicada à análise de amostras de sinais não periódicos, em que  $\langle \rho_i \rangle$  é teórico e  $C_i$  é calculado através das derivadas segunda e quarta (Equação 3.3) da função de autocorrelação em zero, representadas respectivamente neste trabalho por  $C_i''$  e  $C_i(4)$ , conforme apresentado em BAZEIA *et al.* (2017) e MEDEIROS *et al.* (2018), e padronizado em ÁVILA e ARAÚJO (2012).

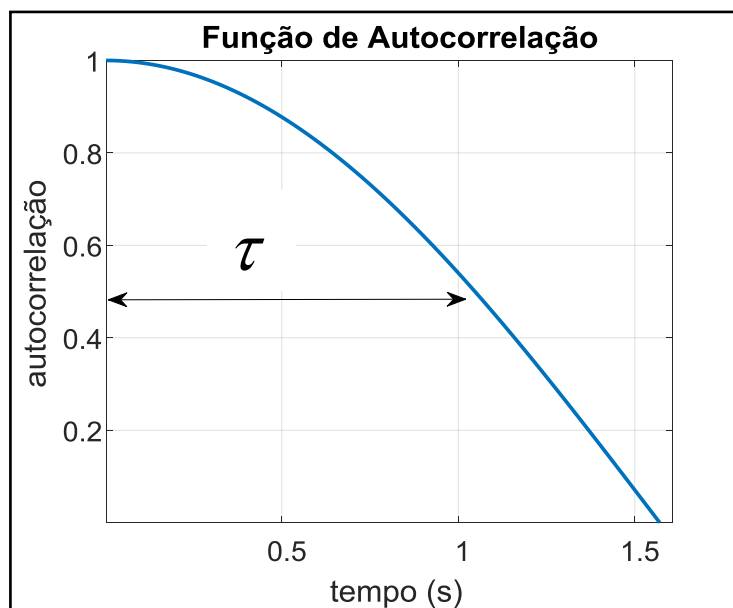
$$\langle \rho_i \rangle = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\langle q_i''^2 \rangle}{\langle q_i'^2 \rangle}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{d^4 C_i}{dt^4}(0)}{-\frac{d^2 C_i}{dt^2}(0)}} \quad (3.5)$$

Em uma evolução de tempo curto as funções de autocorrelação para sistemas caóticos podem ser aproximadas a uma função cosseno do tipo  $\cos(kt)$ , que ao ser aplicada na equação 3.17, obtém-se:

$$\langle \rho \rangle = \frac{k}{2\pi} \quad (3.6)$$

A Equação 3.6 pode ser expressa de acordo com comprimento de correlação ( $\tau$ ) que é obtido de acordo com o valor do período de meia altura, ou seja, quando a função de autorrelação assume pela primeira vez o valor igual a 0,5 (Figura 3.1).

Figura 3.1 – Comprimento de correlação



Então, considerando a aproximação da função de autorrelação como uma função cosseno para tempo curto e sabendo que para  $\cos(k\tau) = 0,5$ ,  $k$  será igual a  $\pi/(3\tau)$ , que substituído na equação 3.6 resulta em

$$\langle \rho \rangle = \frac{1}{6\tau} \quad (3.7)$$

Para efeitos práticos a propriedade caótica do sinal de vibração utilizado pode



ser comprovada ao se comparar o valor  $\langle\rho\rangle$  da equação 3.7 com o valor obtido a partir da contagem de picos do sinal que gera a função de correlação, técnica denominada SAC-DM (Signal Analysis based on Chaos using Density of Maxima) dada pela Equação 3.8.

$$SAC - DM = \frac{\textit{número de picos da amostra}}{\textit{tempo de aquisição da amostra}} \quad (3.8)$$

Ao se comprovar o comportamento caótico do sinal é possível observar a densidade de máximos como uma ferramenta determinística e sensível às condições iniciais de um sistema, cuja aplicação específica desse trabalho pode ser correlacionada à variação do percentual de etanol combustível através da contagem de picos em uma determinada faixa de tempo do sinal de vibração.

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 REAGENTES UTILIZADOS**

Para a realização do experimento, foram utilizados 30 litros de etanol combustível (adquiridos em posto de combustível da cidade de João Pessoa), aproximadamente 3,2 litros de etanol anidro com 99% de pureza e aproximadamente 332 ml de água destilada.

### **4.2 PREPARAÇÕES DAS AMOSTRAS**

A primeira etapa do experimento foi a preparação das amostras de etanol combustível, procedimento manual realizado no laboratório do Grupo de Instrumentação e Controle em Estudo de Energia e Meio Ambiente (GPICEEMA). Primeiro foi definido o número de amostras, no qual o quantitativo de oito amostras foi escolhido como suficiente para atender às variações de purezas desejadas no experimento. Posteriormente, definiu-se o volume total de cada amostra, de forma que todas ficassem com volumes semelhantes e em quantidade necessária para permitir o funcionamento do motor de combustão utilizado, durante tempo suficiente para a realização das medições.

Após essa definição, procedeu-se a validação da amostra do etanol adquirido no posto de combustível, utilizando o método do densímetro de vidro, o mesmo posteriormente utilizado para validar as amostras. Após validar a amostra de 30L do etanol do posto, procedeu-se com a definição dos quantitativos de reagentes em cada amostra, de forma que os percentuais de massa de etanol das oito amostras variassem de valores imediatamente inferiores a 89%, até valores imediatamente superiores aos 96% (próximos aos valores mínimos e máximos permitidos por norma). Foram feitos então cálculos para definir o volume de água destilada e etanol anidro que deveriam ser adicionado ao etanol combustível do posto para se obter os percentuais de etanol desejados em cada amostra. Esses cálculos resultaram nos quantitativos da tabela 1, que mostra as quantidades de cada reagente contidas em cada amostra.

**Tabela 1 - Detalhamento das amostras propostas.**

<b>Amostras</b>	<b>Combustível (L)</b>	<b>Águadestilada (ml)</b>	<b>Etanol Puro (L)</b>	<b>% massa</b>
<b>Amostra 1</b>	4	130	-	89
<b>Amostra 2</b>	4	97	-	90
<b>Amostra 3</b>	4	65	-	91
<b>Amostra 4</b>	4	35	-	92
<b>Amostra 5</b>	4	5	-	93
<b>Amostra 6</b>	3,5	-	0,5	94
<b>Amostra 7</b>	3	-	1,2	95
<b>Amostra 8</b>	2	-	1,95	96

**Fonte: Silva (2021).**

Escolhidas as composições e quantitativos de cada amostra, procedeu-se para a preparação propriamente dita.

O procedimento escolhido foi adicionar água destilada ao etanol combustível de posto para obter amostras com menor porcentagem de etanol e adicionar etanol anidro para obter amostras com maior teor de etanol. Depois de concluídas as misturas, cada amostra foi submetida ao método de validação do densímetro de vidro.

Foram utilizados galões tipo “bombona” de 5L para cada amostra. Os galões foram identificados cada com o número da amostra, o volume total de combustível e a massa específica obtida após as misturas (Figuras 2 e 3).

**Figura 3 - Amostra Identificada.**

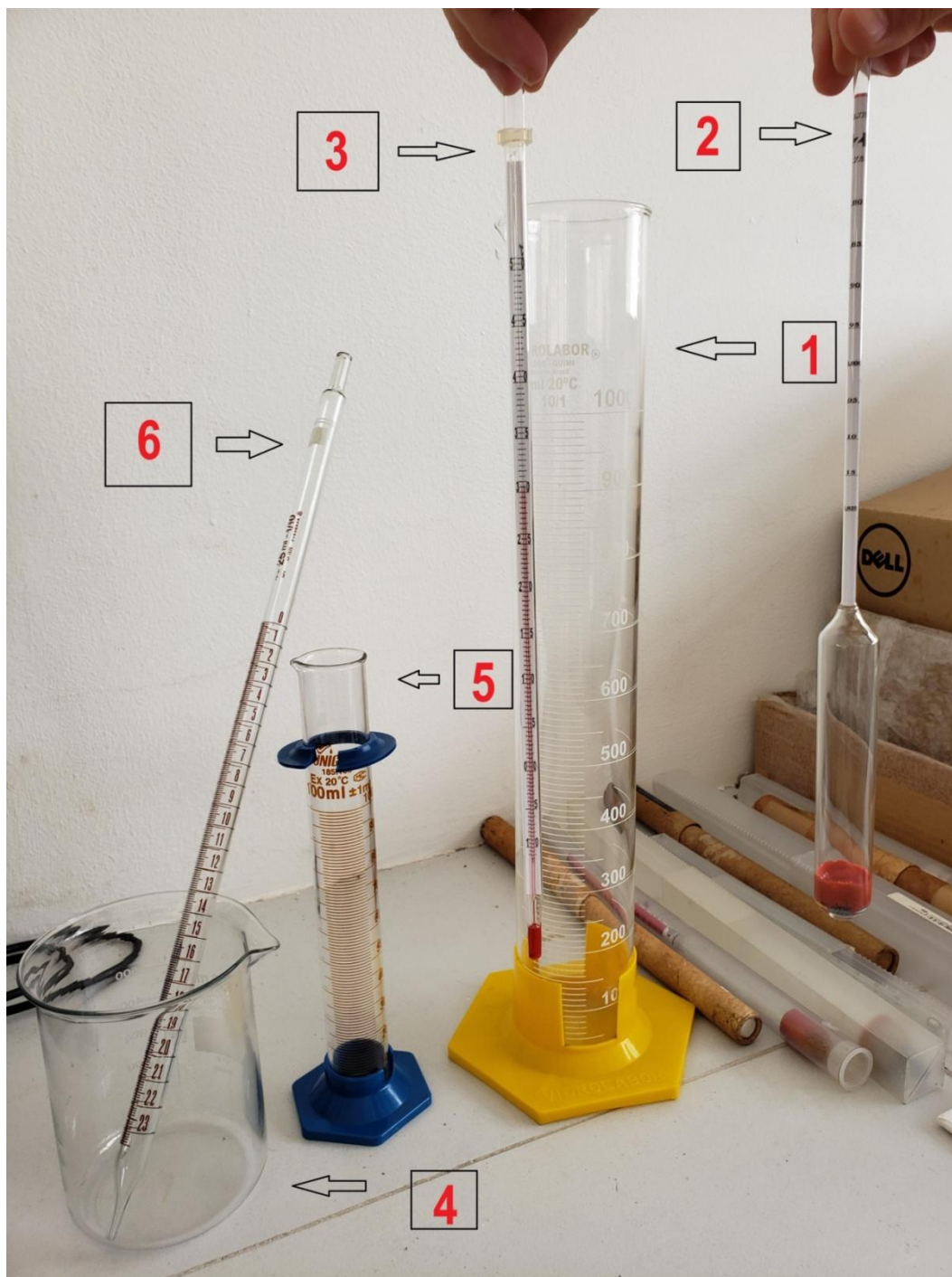
Fonte: Acervo do Autor

**Figura 4 - Amostras Identificadas.**

Fonte: Acervo do Autor.

Foram utilizados vários instrumentos de medição, que serão mostrados e descritos e que são os mesmos recomendados pela ANP e utilizados no método de identificação do percentual de pureza dos combustíveis em postos de gasolina.(Figura 3).

**Figura 5 - Instrumentos de Medição**



**Fonte: Acervo do Autor.**

A seguir, são mostrados e descritos individualmente, todos os instrumentos utilizados para a preparação das amostras, de acordo com sua numeração na figura 3:

**1** - PROVETA GRADUADA de vidro com volume de 1000 ml do fabricante “VIDROLABOR”.

- Utilizada inicialmente para a identificação da porcentagem em volume de etanol contida no combustível adquirido no posto de combustível. Posteriormente utilizada para divisão das amostras e em seguida a identificação do percentual em volume de etanol contido em cada uma.

**Figura 6 - Proveta graduada de vidro com volume de 1000 ml do fabricante “VIDROLABOR”.**



**Fonte: Acervo do Autor**

**2-DENSÍMETRO** de vidro para massa específica de álcool etílico e suas misturas.

- Utilizado para determinar a densidade em massa de etanol no combustível adquirido no posto de combustíveis nas amostras.

**Figura 7 - Densímetro de vidro para massa específica de álcool etílico e suas misturas.**



**Fonte: Acervo do Autor.**

**3 – TERMÔMETRO** de imersão para petróleo e biocombustíveis do fabricante “INCOTERM”.

**Figura 8 - Termômetro para massa específica de álcool etílico e suas misturas.**



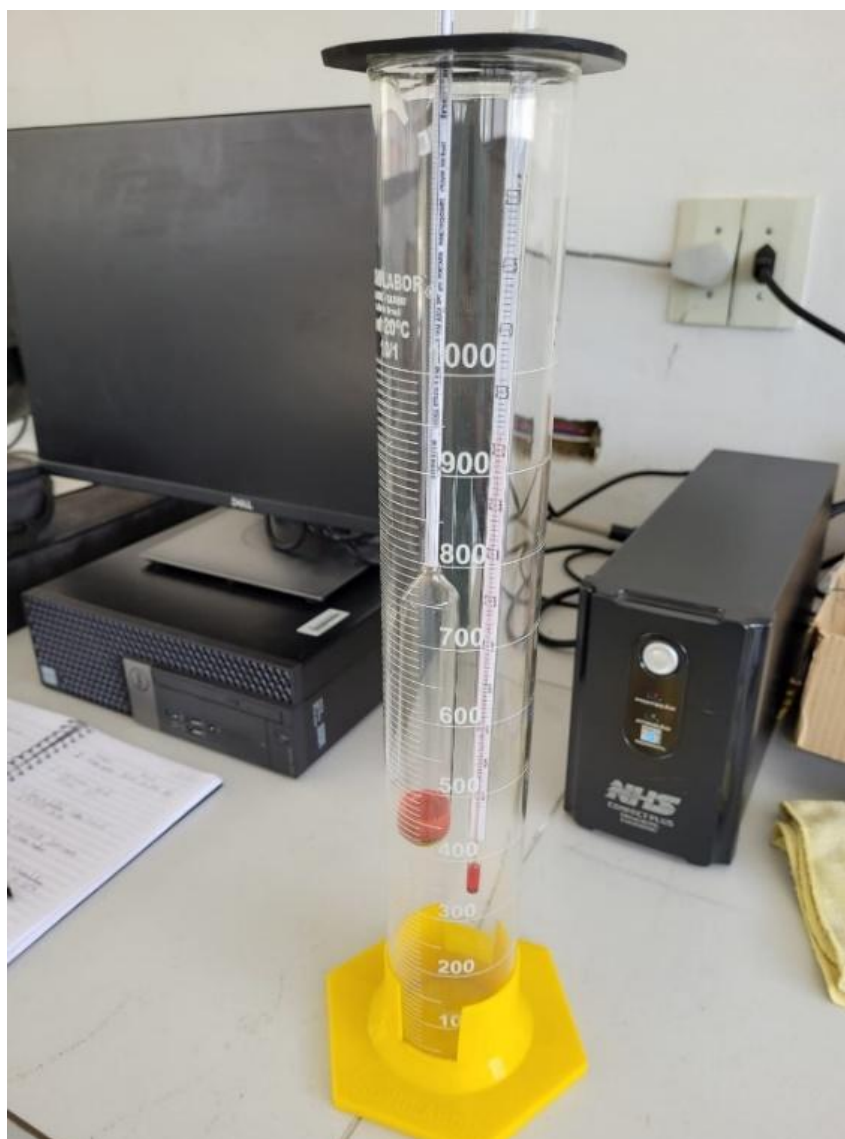
**Fonte: Acervo do Autor**

Com a proveta de vidro de 1000 ml contendo aproximadamente 850 ml da amostra ou etanol combustível do posto, inseriu-se o densímetro de forma que o mesmo não tenha contato com as paredes da proveta e evite assim interferências nas medições. Em seguida, com o auxílio de um suporte de borracha improvisado, o termômetro foi inserido na proveta também ficando distanciado das paredes da proveta (figura 7). Após se verificar a estabilidade da temperatura da mistura (após 5 min), fizeram-se as leituras e, com ajuda de



um software ou de uma tabela pré-preenchida, foram convertidos os percentuais de volume em percentuais em massa.

**Figura 9 - Densímetro e Termômetro inseridos na proveta de 1000 ml.**



**Fonte: Acervo do Autor**

**Figura 10 - Operador despejando o etanol na proveta para a determinação da massa específica.**



**Fonte: Acervo do Autor**

Os instrumentos 4, 5 e 6 da figura 3, que serão mostrados a seguir, foram utilizados para realizar medições menores, como a adição de água destilada e etanol anidro nas amostras.

**4** -BECKER de vidro de 600 ml.

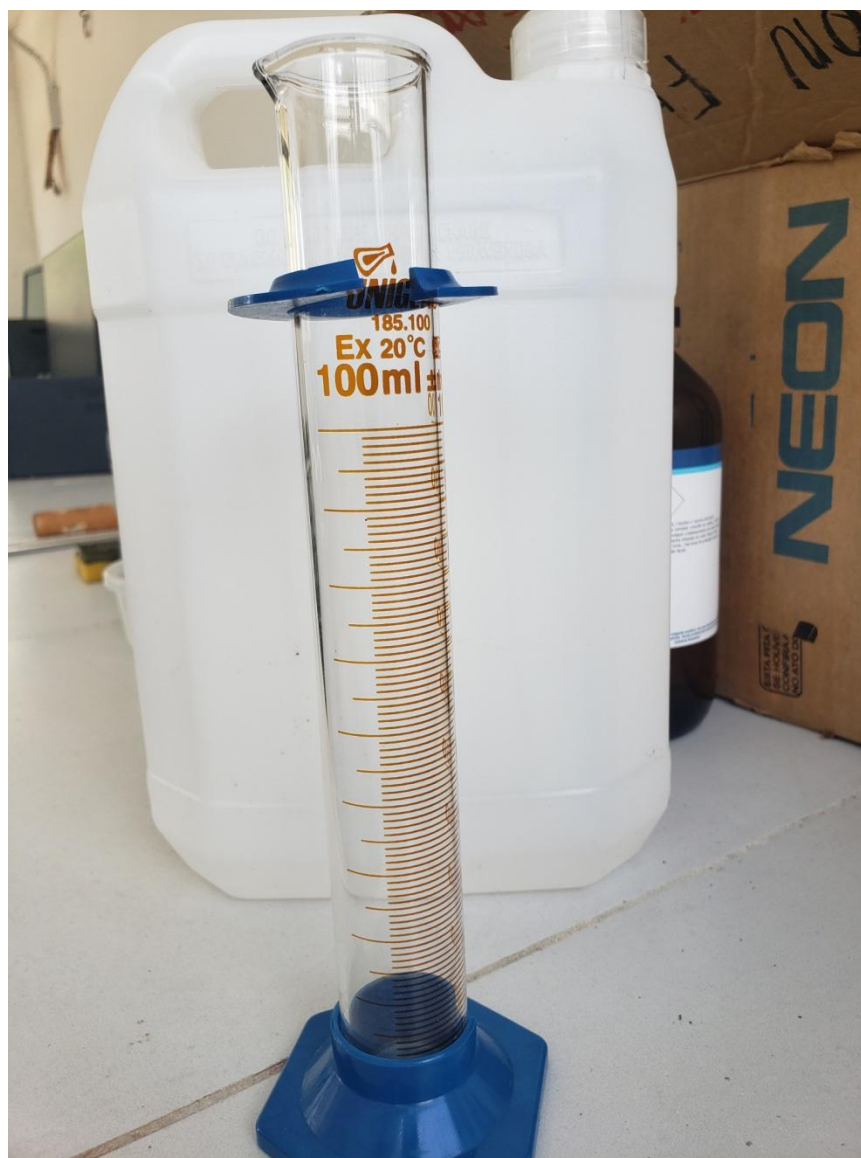
**Figura 11 - Becker de vidro**



**Fonte: Acervo do Autor**

**5-** PROVETA GRADUADA de vidro com volume de 100 ml do fabricante “UNIGLAS”.

**Figura 12 - Proveta graduada de vidro.**



**Fonte: Acervo do Autor**

**6 - PIPETA GRADUADA** de vidro de 25 ml.

**Figura 13 - Pipeta graduada de vidro.**



**Fonte: Acervo do Autor**

Com as amostras preparadas, seguindo a norma ABNT NBR 5992, as concentrações de massa de combustível etanol nas misturas são dadas pela tabela 2.

**Tabela 2 - Resultado encontrado após validação das amostras.**

<b>Amostras</b>	<b>Proposto</b>	<b>Executado</b>
<b>Amostra 1</b>	89%	89,35%
<b>Amostra 2</b>	90%	90,10%
<b>Amostra 3</b>	91%	91,44%
<b>Amostra 4</b>	92%	92,13%
<b>Amostra 5</b>	93%	93,04%
<b>Amostra 6</b>	94%	93,92%
<b>Amostra 7</b>	95%	94,70%
<b>Amostra 8</b>	96%	96,05%

**Fonte: Acervo do Autor**

### 4.3 REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado dentro do perímetro da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), mais precisamente atrás da Oficina Mecânica do Centro de Tecnologia, sendo utilizado um veículo Ford Fiesta 1.6 (Figuras 9 e 10), fabricado em 2005 e de propriedade da própria UFPB. A velocidade de rotação do motor do veículo em marcha lenta é de 850rpm+/- 50rpm (FORD,2005).

**Figura 14 - Ford Fiesta utilizado**



**Fonte: Lima (2019).**

**Figura 15. - Ford Fiesta utilizado**



**Fonte: Lima (2019).**

O procedimento para a realização do experimento consistiu em adicionar ao tanque de combustíveis do veículo uma das amostras preparadas por vez e, com o veículo em funcionamento, realizaram-se as aquisições dos sinais. Para facilitar a troca das amostras no tanque de combustíveis do veículo, uma modificação foi feita no mesmo, criando-se um tanque auxiliar externo e adaptando-se os componentes da bomba de combustíveis para acoplá-la ao novo dispositivo (Figuras 11 e 12).

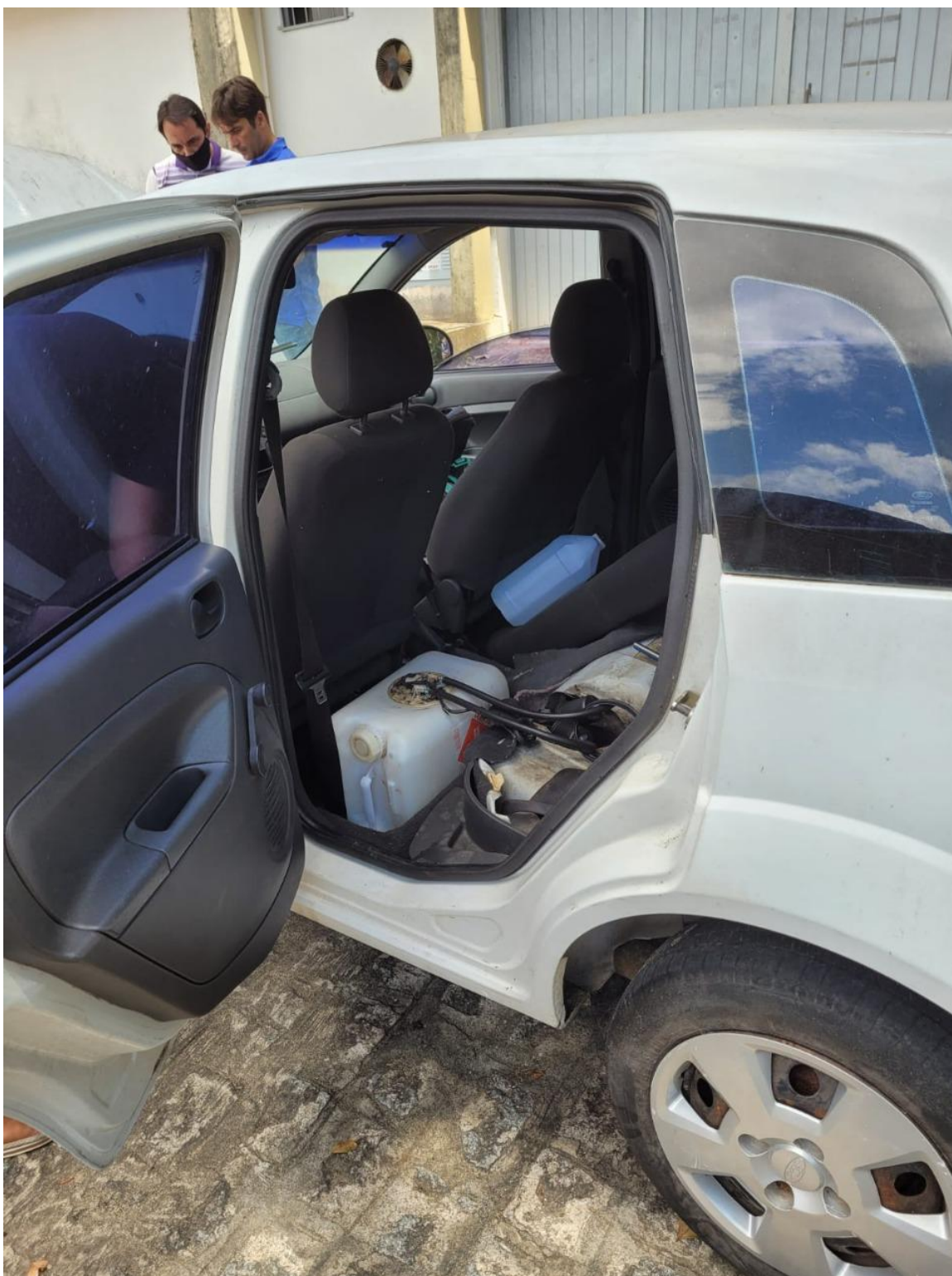


**Figura 16 - Modificação do tanque de combustíveis.**



**Fonte: Acervo do Autor**

**Figura 17 - Modificação do tanque de combustíveis.**



**Fonte: Acervo do Autor.**

Inicialmente fizemos o aquecimento do motor com o veículo em funcionamento por 30 minutos com o combustível original do posto e, após esse prazo, fizemos a substituição pela primeira amostra. Com o veículo já funcionando com a amostra, iniciamos as aquisições do sinal da vibração do motor. Foram dois dias de experimento, sendo realizadas várias aquisições de 5 minutos por amostra, sem intervalo entre elas. O intervalo entre as amostras foi apenas o período da troca das mesmas no tanque externo.

Nas figuras 18 e 19 temos o posicionamento do equipamento responsável pelas aquisições.

**Figura 18 - Posicionamento do equipamento de medição do sinal de vibração do motor.**



**Fonte: Acervo do Autor**

**Figura 19 - Posicionamento do equipamento de aquisição do sinal da vibração do motor.**



**Fonte: Acervo do Autor**

O equipamento de aquisição do sinal de vibração foi posicionado conforme figura 19, baseado em experimentos anteriores realizados, nos quais os sinais adquiridos com o equipamento em posição semelhante foram satisfatórios.

Na figura 20 temos expostas todas as amostras, assim como o etanol original, adquirido em posto de combustível de João pessoa.

**Figura 20 - Amostras utilizadas no experimento + etanol inalterado**



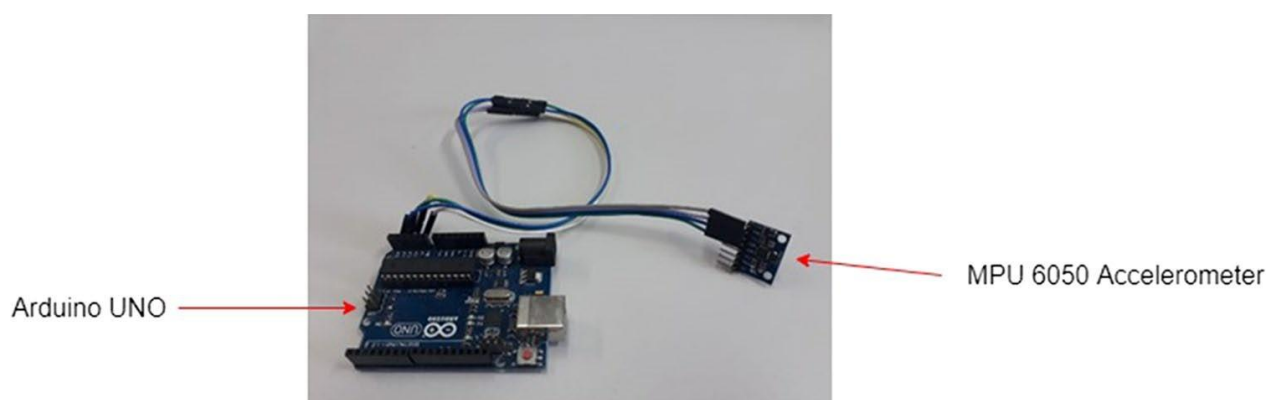
**Fonte: Acervo do Autor**

#### **4.4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE ÁUDIO E CÁLCULO DA**

## FFT

O sistema de aquisição de vibração foi desenvolvido em Firmino et al (2020), e é composto de um acelerômetro MPU6050e um Arduino UNO. Este sistema tem uma frequência de amostragem de 512 Hz, o que é suficiente de acordo com o teorema de Nyquist, uma vez que a rotaçãovelocidade do motor é definida como 900 rpm, medida pelotacômetro do painel do carro. Este sistema é mostrado na Fig. 21.Além disso, a tabela3 apresenta as especificações técnicas dos acelerômetros Arduino UNO e MPU 6050, respectivamente, utilizados para desenvolver o dispositivo de aquisição de vibração.

**Figura 21 - Sistema de aquisição de vibração.**



**Fonte: Firmino (2020)**

**Tabela 3 - Características do sistema de aquisição de vibração.**

Especificações do Arduino UNO	
Microcontrolador	ATmega328 P
Tensão de Operação	5 V
Tensão de Entrada (recomendado)	7–12 V
Tensão de Entrada (limite)	6–20 V
Pinos de E/S Digitais	14
Pinos de E/S Digitais	6
Pinos de Entrada Analógicos	6
Velocidade do Relógio	16 MHz

Especificações do acelerômetro MPU 6050

	Tensão de alimentação	2.3–3.4	V
	Consumo	3.9 mA max	
	Faixas de medição	$\pm 2$ g; $\pm 4$ g; $\pm 8$ g; $\pm 16$ g	
	Frequência de operação	20 Hz–20 kHz	
	Tolerância de calibração	$\pm 3\%$	
	Interface	I2C	
	Sensor de temperatura embutido	Yes	
	Temperatura de operação	–40 °C to + 80 °C	
<b>Fonte:</b> <b>(2020)</b>	Taxa de amostragem (aplicada no sistema)	512 Hz	<b>Firmino</b>

#### 4.5 MÉTODO PARA O CÁLCULO DO SAC-DM

Primeiramente deve-se identificar se o sinal é caótico ou possui componentes caóticas, para depois proceder com a formulação do algoritmo e processamento de dados. Na formulação do algoritmo, serão utilizadas as equações 3.5, 3.7 e 3.8, além do método proposto por Kulp e Smith (2011).

Em caso de falha da série no teste de determinismo, a aplicação do método proposto estará comprometida, pois se conclui que ela é estocástica ou muito ruidosa. Em testes realizados (Lima, 2019), os sinais de vibração sonora do MIT foram confirmados positivos para caóticos.

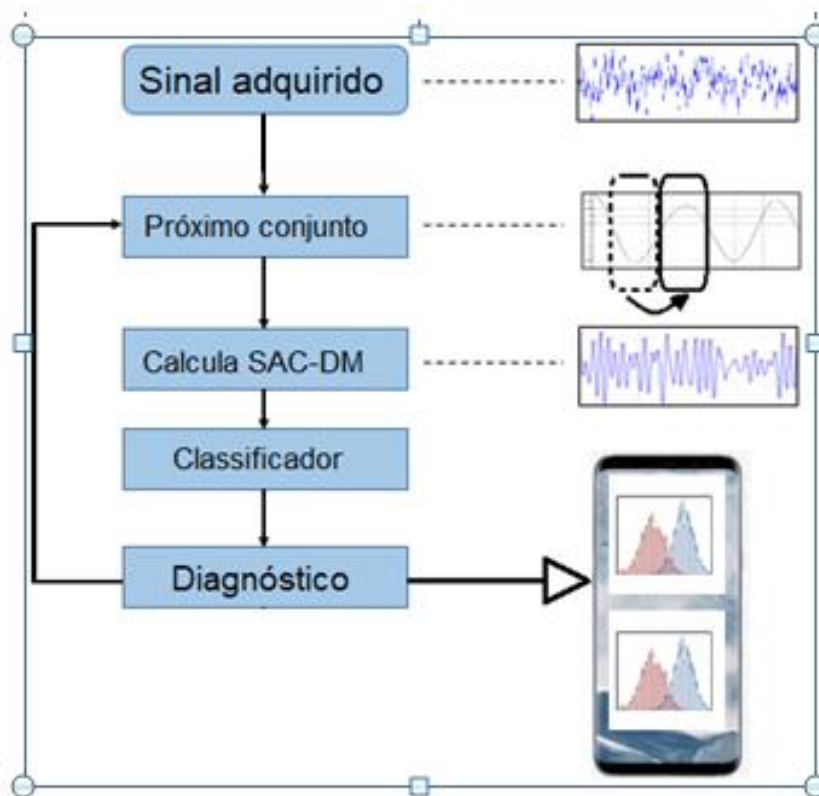
A Figura 22 apresenta um esboço do método básico para processamento dos sinais e identificação da falha, possibilitando entender de forma mais clara a metodologia proposta nesse trabalho. Primeiro, o sinal é adquirido pelo protótipo de aquisição. Na sequência, o valor de SAC-DM é calculado para cada subconjunto da componente do sinal.

Será utilizado um classificador para realizar o diagnóstico. Os resultados são calculados usando uma técnica de aprendizado de máquina. Um método muito popular para a análise preditiva foi desenvolvido por Breiman (2001) chamado Floresta aleatória. Funciona como uma grande coleção de árvores de decisão não correlacionadas. Em outras palavras, é um conjunto de árvores de decisão, na maioria das vezes treinadas com o método de ensacamento. A ideia geral do método de ensacamento é que uma combinação de modelos de aprendizagem aumenta o resultado geral. Uma vantagem da floresta



aleatória é que ela pode ser usada para problemas de classificação e regressão, que formam a maioria dos sistemas atuais de aprendizado de máquina.

**Figura 22 - Metodologia para análise de sinais usando densidade de máximos.**

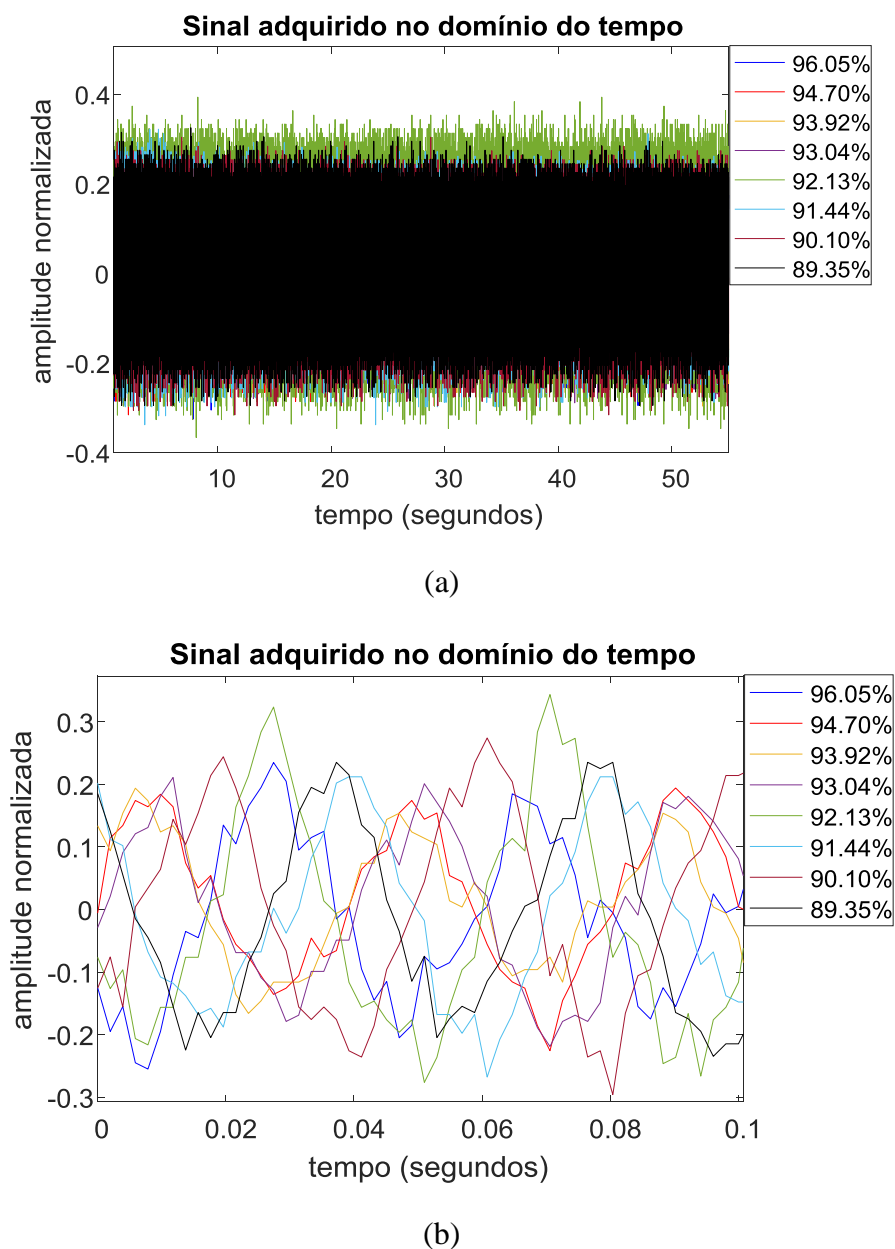


**Fonte: Adaptado de Lima (2019).**

## 5. RESULTADOS

Para aquisição dos sinais de vibração do motor foi utilizada uma taxa de aquisição de 510 amostras por segundo. O gráfico da Figura 23 ilustra sinais de vibração adquiridos para diferentes percentuais de álcool nas amostras utilizadas para combustão do motor. Não percebe-se a partir da aquisição no tempo variações significativas entre os sinais que permitam uma análise do percentual de etanol na mistura.

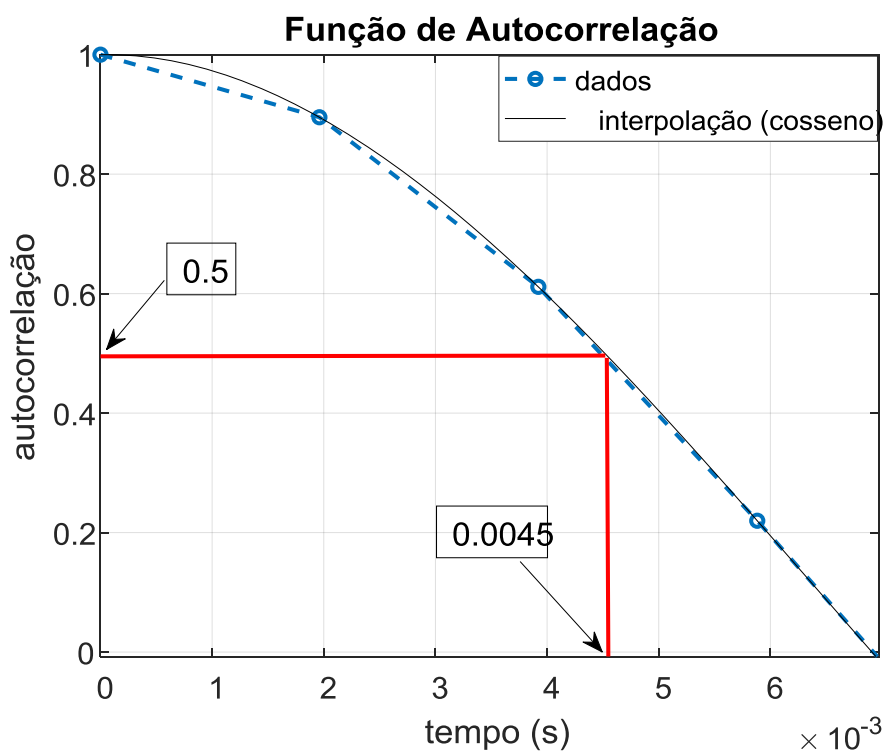
**Figura 23 - Sinais de vibração adquiridos para diferentes percentuais de álcool nas amostras. (a) sinais com longo intervalo, (b) sinais com intervalo curto.**



Para se utilizar a abordagem de processamento de dados utilizando densidade de máximos se faz necessário comprovar que o sinal possui propriedades caóticas. Em LIMA et al. (2021) foi comprovado o determinismo e comportamento caótico do motor de combustão através do sinal do som. Aqui, para efeito didático, também analisaremos o caos para o sinal de vibração utilizado nos cálculos.

Com esse intuito foi utilizado o sinal de vibração para uma amostra dentro do padrão exigido pela norma com percentual de etanol de 93,04%. Para gerar a figura 23 foi retirada a parcela periódica do sinal e evidenciada a parcela caótica utilizando análise wavelete multiresolução (Mallat, 2009). Foi utilizada uma wavelet-mãe da família Daubechies e o detalhe D3. A figura 24 ilustra o início da curva da função de autocorrelação do sinal calculada através da Equação 3.4, o gráfico ilustra uma curva de melhor aproximação obtida a partir dos pontos da função de autocorrelação usando uma função cosseno. Da figura consegue-se extrair o comprimento de correlação da curva à meia altura que no caso foi  $\tau = 0,0045$ .

**Figura 24 - Comprimento do coeficiente de correlação.**



A partir da Equação 3.6 obtém-se o valor teórico da densidade de máximos.

$$\langle \rho \rangle = \frac{1}{6\tau} = \frac{1}{6 * 4,5 * 10^{-3}} = 37,04 \text{ Hz}$$

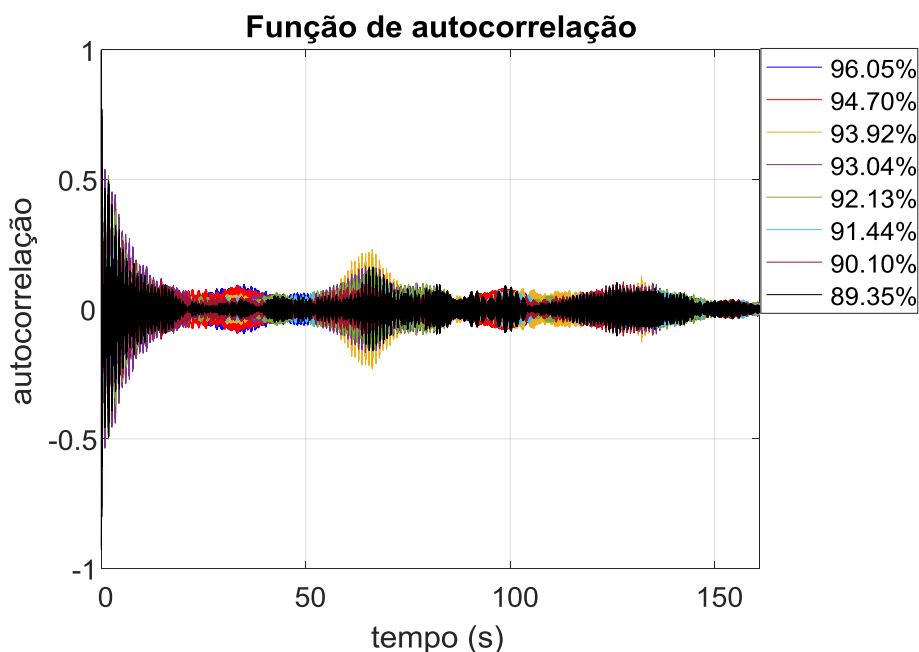
Na Tabela 4 é feita uma comparação entre o valor teórico da densidade de máximos obtido a partir do comprimento de correlação usando a Equação 3.6 com a técnica SAC-DM proposta nesse trabalho (Equação 3.7). O erro relativo em torno de 5,5% mostra a aproximação dos resultados obtidos e a evidência o comportamento caótico do sinal.

**Tabela 4 - Cálculo da densidade de máximos do sinal de vibração (verificando comportamento caótico).**

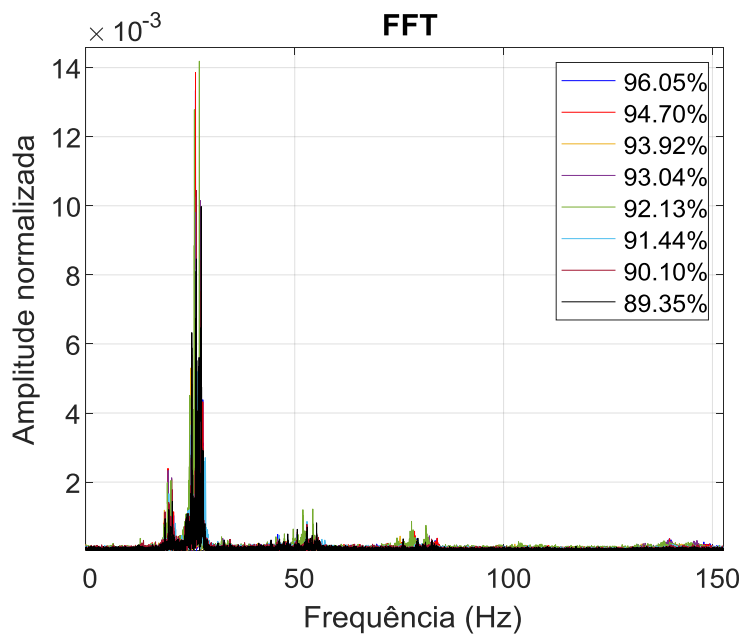
	$\rho$ (Eq. 3.7)	SAC-DM (Eq. 3.8)	Erro relativo (%)
Densidade de máximos média do sinal de vibração	37,04 Hz	39,09 Hz	5,5

A Figura 25 ilustra a função de autocorrelação a longo prazo para sinais de vibração obtidos com o motor funcionando a partir de combustível com diferentes percentuais de etanol. Percebe-se um decaimento a longo prazo que também evidencia o comportamento caótico do sinal (FIEDLER-FERRARA; DO PRADO, 1994).

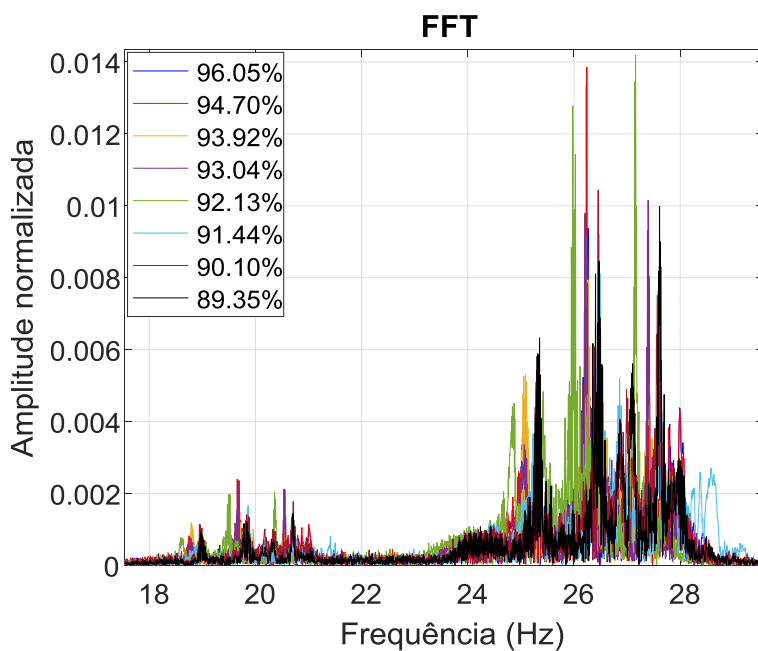
**Figura 25 - Funções de autocorrelação de sinais de vibração obtidos com o motor funcionando com combustível com diferentes percentuais de álcool.**



As Figuras 26(a) e 26(b) ilustram a Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform - FFT) dos sinais das amostras considerando o espectro completo e o espectro aproximado na frequência de vibração do sinal, respectivamente. A partir da FFT percebe-se uma concentração de picos próximo da frequência de explosão do motor (aproximadamente 27 Hz), porém não de forma regular. Essa falta de regularidade de picos principalmente evidenciada na figura 26(b) em torno da frequência de explosão do motor mostra uma variação da velocidade de explosão ao longo do período de aquisição. Ambos os gráficos não permitem obtenção de padrão para identificação do percentual de etanol combustível utilizado para funcionamento do veículo.

**Figura 26 - FFT dos sinais de vibração para diferentes amostras.**

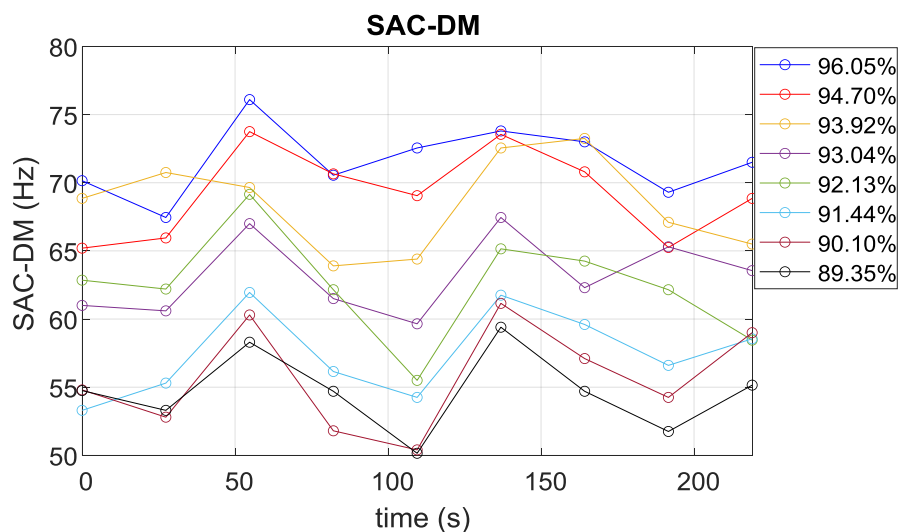
(a)



(b)

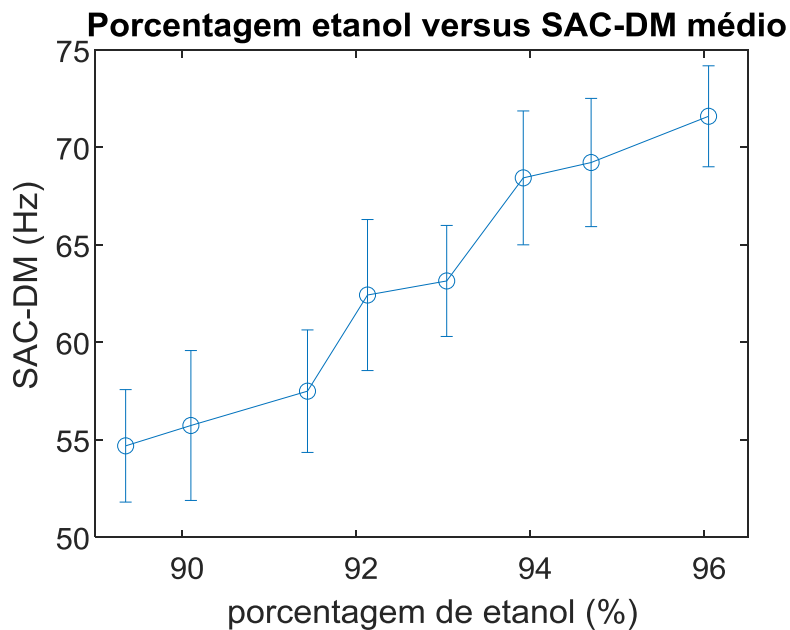
Através da Figura 27 pode-se ver ao longo do tempo os valores de SAC-DM obtidos a cada 27 segundos, para as diferentes amostras de combustível. Percebe-se uma tendência de maior valor de SAC-DM para maiores percentuais de concentração de etanol.

**Figura 27 - Variação de SAC-DM x Tempo.**



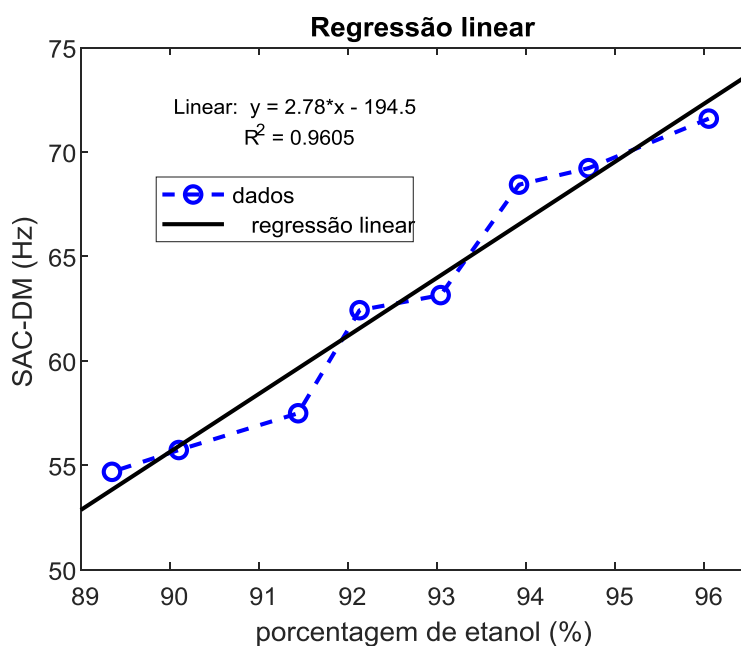
A Figura 28 ilustra o gráfico da média da variável caótica SAC-DM para diferentes amostras de combustível e seus desvios erros padrão em função do percentual de etanol na mistura. O relativo alto desvio padrão em relação às médias obtidas indicam uma necessidade de aquisição de longo prazo, para garantir certa exatidão na estimativa, tendo em vista a variação dinâmicas das peças e estruturas que compõem o veículo.

**Figura 28 - SAC-DM versus porcentagem de etanol na amostra usada para combustão do motor do veículo.**



Na figura 29 foi realizada uma regressão linear da curva da Figura 27, na qual é gerada uma função de calibração que pode ser utilizada para se determinar o percentual de etanol a partir do SAC-DM. Para a curva de regressão foi obtido um coeficiente de correlação linear de 0,9605, próximo do valor ideal 1 (um), evidenciando uma tendência linear entre a variação de percentual de etanol no combustível e o SAC-DM.

**Figura 29 - Regressão linear da curva SAC-DM versus porcentagem de etanol na mistura.**





## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho abordou a análise de etanol combustível em veículos automotivos equipados com motores de combustão interna. A proposta apresenta relevância por se tratar de uma técnica não invasiva, que propõe estimar o combustível com o carro em funcionamento, o que a difere dos trabalhos encontrados na literatura, que utilizam métodos que exigem acesso às amostras do objeto de estudo. A proposta é pioneira também no sentido de ser a primeira vez que a teoria do caos é aplicada na identificação de combustível adulterado.

Confrontando os resultados obtidos com os objetivos do estudo, verificou-se que tanto o objetivo geral como os específicos foram atingidos. Foi comprovada uma tendência linear entre a variável caótica densidade de máximos e o percentual de etanol na mistura, com coeficiente de correlação de 0,96, mesmo observando uma pequena variação da relação etanol/água.

Futuramente, a técnica pode ser testada também para identificação da adulteração de outros combustíveis, como a gasolina. Outros sinais também podem ser testados nessa técnica, como o sinal sonoro do motor em funcionamento.

Dessa forma, conclui-se que esse estudo atendeu às expectativas iniciais, e mostrou-se promissor, pois a partir dele abre-se um campo de variações para a utilização da técnica utilizada.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, ROMÁRIO E. L.; PAZ, JOSÉ E. M.; SILVA, ADENILTON C.; PONTES, MÁRCIO J. C.; LEMOS, SHERLAN G. **Adulteração de etanol combustível com metanol avaliado por voltametria cíclica e calibração multivariada**. Combustível, ScienceDirect, n.156, p.20-25, 2015.

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 A, The Journal of Physical Chemistry A, n.118, p.3081-3089, 2014.

AMORESANO, A.; IODICE, P.; LANGELLA, G. **Etanol nas misturas de combustíveis da gasolina\_ efeito no consumo de combustível e nas emissões de motores fora do motor dos SI em condições frias de operação**. Engenharia Térmica Aplicada, ScienceDirect, n.130, p.1081-1089, 2018.

ÁVILA, G.; ARAÚJO, L. C. L. de. 2012. **Cálculo: ilustrado, prático e descomplicado**. 1ª Edição: LTC.

ÁVILA, 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, ScienceDirect, n.115, p.99-110, 2017.

ÁVILE, LORENA MORINE; SANTOS, AMANDA P. F. DOS; MATTOS, DANIELLE I. M. DE; SOUZA, CRISTIANE GINENES DE; ANDRADE, DÉBORA FRANÇA DE; D'ÁVILA, LUIZ ANTONIO. **Determinação de etanol na gasolina por cromatografia líquida de alta eficiência**. Combustível, ScienceDirect, n.212, p.236-239, 2018.

BABUA, V.; KRISHNAB, R.; MANIC, N. **Revisão sobre a detecção de adulteração em combustíveis através de técnicas computacionais**. Materials Today, ScienceDirect, n.4, p.1723-1729, 2017.

BAZEIA, D.; PEREIRA, M. B. P. N.; BRITO, A. V.; OLIVEIRA, B. F.; RAMOS, J. G. G. S. **A novel procedure for the identification of chaos in complex biological systems**. Scientific reports, v. 7, p. 44900, 2017.

BROEK, J. VAN DEN; ABEGG, S.; PRATSINIS, S.E.; GÜNTNER, A.T.. **Highly selective detection of methanol over ethanol by a handheld gas sensor**. Nature Communications, 2019.

CABALA, R.; KADLECOVÁ, T.; OPEKAR, F. **Uma simples sonda de impedância sem contato para determinação de etanol na gasolina**. Analytica Chimica Acta, ScienceDirect, n.694, p.57-60, 2011.

CARNEIRO, H. S. P. **Determinação de adulteração de etanol combustível com metanol através de análise multivariada no FT-MIR e FT-NIR.** 2008.

CARNEIRO, HELENA S.P.; MEDEIROS, ALEX R. B.; OLIVEIRA, FLÁVIA C. C.; AGUIAR, GUSTAVO H. M.; RUBIM, JOEL C.; SUAREZ, PAULO A. Z. **Determinação da Adulteração de Combustível Etanol por Metanol Utilizando Mínimos Quadrados Parciais Baseados em Técnicas da Transformada de Fourier.** *Energy e Fuels*, Energy e Fuels, n.22, p.2767-2770, 2008.

FERGUSON, C. R., KIRKPATRICK, A. T., 2016. **“Internal Combustion Engines Applied Thermosciences”.** *John Wiley & Sons*, 2ª edição. West Sussex: Reino Unido.

FIEDLER-FERRARA, N.; DO PRADO, C. P. C., 1994. **“Caos: Uma introdução”**, Blucher.

FIGUEIREDO, MONIQUE K.-K.; COSTA-FÉLIX, RODRIGO PB; MAGGI, LUIS E.; ALVARENGA, ANDRÉ V.; ROMEIRO, GILBERTO A. **Detecção de adulteração de etanol e biocombustível usando um método de medição ultrassônico.** *Combustível*, ScienceDirect, n.91, p.209-212, 2012.

FIRMINO, JOÃO L.; NETO, JOÃO M.; OLIVEIRA, ANDERSSON G.; SILVA, JOSÉ C.; MISHINA, KOJE V.; RODRIGUES, MARCELO C. **Misfire detection of an internal combustion engine based on vibration and acoustic analysis.** *The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021.

FORD. **Motor 1.6L Zetec Rocam: EcoSport e Fiest.** [S.1.], 2005.

GILLES, T., 2018. **“Automotive Engines: Diagnosis, Repair and Rebuilding”.** *Cengage Learning*, 8ª edição. Nova York: Estados Unidos.

HALDERMAN, J. D., 2012. **“Automotive Technology – Principles, Diagnosis and Service”.** *Prentice Hall*, 4ª Edição. Nova Jersey: Estados Unidos.

HEYWOOD, J. B., 1988. **“Internal combustion engine fundamentals”.** *McGraw-Hill*. Nova York: Estados Unidos.

HOECKEL, P. H. d O. **Implicações da oferta e demanda de etanol: comportamento de preços, interações com os mercados agrícolas e mudanças no comércio.** 2018.

KARATEPE, AYŞEGÜL; AKGOL, OĞUZHAN; ABDULKARIM, YADGAR L.; DALGAC, ŞEKIP; MUHAMMADSHARIF, FAHMI F.; AWL, HALGURD N.; DENG, LIANWEN; UNAL, EMIN; KARAASLAN, MUHARREM; HENG, LUO; HUANG, SHENGXIANG. **Multipurpose chemical liquid sensing applications by microwave approach.** *PLoS ONE*, 2020.

LEITE, R. C.; CORTEZ, L. A. B. O etanol combustível no Brasil. **Revista Biocombustíveis no Brasil: Realidades e Perspectivas**, Ministério das Relações Exteriores, 2008.

LIMA, T. L. d. V. **Métodos não invasivos para detecção e isolamento de falhas em motores de combustão interna baseados em dimensões fractais e análise multiresolução wavelet**. Tese de doutorado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, dez. 2019.

LIMA, T.L.D.V.; FILHO, A.C.L.; BELO, F.A.; SOUTO, F.V.; SILVA, T.C.B.; MISHINA, K.V.; RODRIGUES, M.C., 2021, **Noninvasive Methods for Fault Detection and Isolation in Internal Combustion Engines Based on Chaos Analysis**. *Sensors*, 21, 6925.

LUCENA-JUNIOR, J. A., LIMA, T. L. V., BRUNO, G. P., BRITO, A. V., RAMOS, J. G. G. S., BELO, F. A., LIMA-FILHO, A. C. 2020, **Chaos theory using density of maxima applied to the diagnosis of three-phase induction motor bearings failure by sound analysis**, *Computers in Industry*, Volume 123,103304.

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

MORIZONO, R. C.; RAMOS, H. R; KNISS, C. T. **Análise da preferência de consumidores por etanol e gasolina no Brasil**. *Ensaio FEE*, v. 38, n. 4, p. 877-902, 2018.

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

PEREIRA, POLYANA F.; MARRA, MARIANA C.; MUNOZ, RODRIGO AA; RICHTER, EDUARDO M. **Sistema de análise de injeção rápida em lote para determinação no local de etanol em gasóleo e etanol combustível**. *Talanta*, ScienceDirect, n.90, p.99-102, 2012.

PULKRABEK, W. W., 1997. **“Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine”**. *Prentice Hall*, 1ª edição. Nova Jersey: Estados Unidos.

SILVA, ADENILTON CAMILO; PONTES, LILIANA F. B. L.; PIMENTEL, MARIA FERNANDA; PONTES, MÁRCIO JOSÉ COELHO. **Detecção de adulteração em combustível de álcool etílico hidratado usando métodos de espectroscopia no infravermelho e reconhecimento supervisionado de padrões**. *Talanta*, ScienceDirect, n.93, p.129-134, 2012.

VARELLA, C. A. A. **Princípios de funcionamento dos motores de combustão interna**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

VELLO, TATIANA. P.; OLIVEIRA, RAFAEL F. DE; SILVA, GUSTAVO O.; CAMARGO, DAVI H. S. DE; BUFON, CARLOS C. B. **A simple capacitive method to evaluate ethanol fuel samples.** Scientific reports, v. 7, n. 1, p 1-7, 2017.