

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA

LUCAS VACILOTTO BONFATI

**DESENVOLVIMENTO DE CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE
SINAIS PARA UM SENSOR CAPACITIVO UTILIZADO PARA
CLASSIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

LUCAS VACILOTTO BONFATI

**DESENVOLVIMENTO DE CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE
SINAIS PARA UM SENSOR CAPACITIVO UTILIZADO PARA
CLASSIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Eletrônica, do Departamento
de Eletrônica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Luiz Stevan Jr.

PONTA GROSSA

2017



FOLHA DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS PARA UM SENSOR CAPACITIVO UTILIZADO PARA CLASSIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS

Desenvolvido por:

LUCAS VACILOTTO BONFATI

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado em 27 de novembro de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica. O candidato foi arguido pela banca examinadora composta pelos professores abaixo assinado. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Dr. Sergio Luiz Stevan Jr.
Professor Orientador

Me. José Jair Alves Mendes Jr.
Membro titular

Me. Edison Luiz Salgado Silva
Membro titular

A Deus primeiramente
Aos meus pais, Marcos e Roseane
Aos meus avós, João Eloi, Noemia e
Maria
À minha tia e meu irmão, Joseane e
Alexandre
Aos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Com certeza estes agradecimentos não serão capazes de contemplar todas as pessoas que, de uma forma ou outra, fizeram parte de toda essa caminhada acadêmica. No entanto, podem estar certos do meu eterno reconhecimento e gratidão a todos que estiveram ao meu lado nessa etapa.

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, e por todas as oportunidades que Ele me concedeu e concede diariamente.

Aos meus familiares por todo o apoio que me foi dado em todos os momentos, sejam eles felizes ou tristes.

Ao professor Dr. Sergio Luiz Stevan Jr., orientador deste trabalho, pela oportunidade que me proporcionou de trabalhar em diversos projetos, especialmente neste. Agradeço também pela disponibilidade, por me proporcionar um imenso crescimento pessoal e intelectual, e pelo incentivo de sempre em todas as atividades.

Ao meu amigo e professor Me. José Jair Alves Mendes Jr. por toda a colaboração no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, especialmente pela ajuda na utilização do software LabVIEW™.

Aos professores que, de alguma forma, auxiliaram de alguma forma no decorrer deste trabalho.

A todos meus amigos que estiveram ao meu lado durante essa jornada acadêmica, Felipe, Guilherme, Thamiris, Caroline, Manoela, Denis, Mário Elias, e tantos outros que não estão aqui nominados, mas fizeram parte dessa minha passagem pela UTFPR.

E aos integrantes do CIEBE, onde pude trabalhar no desenvolvimento deste e tantos outros projetos, e fiz grandes amigos que levarei para toda a vida.

Pois agora lá fora,
o mundo todo é uma ilha
a milhas e milhas e milhas...
(GESSINGER, Humberto, 1987)

RESUMO

BONFATI, Lucas Vacilotto. **Desenvolvimento de circuito de condicionamento de sinais para um sensor capacitivo utilizado para classificação de combustíveis.** 2017. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Atualmente, os veículos *Flex* realizam o controle da injeção e combustão do combustível no motor com base nas informações fornecidas pela sonda lambda. Entretanto este equipamento apresenta diversas desvantagens a longo prazo como o aumento do consumo por parte do motor. Visando obter alternativas ao uso de sondas lambda para controle da injeção eletrônica de veículos automotores, buscou-se circuitos capazes de identificar diferentes combustíveis com auxílio de um sensor capacitivo desenvolvido para esse fim para avaliação do combustível na entrada do motor. Desenvolveu-se uma plataforma e um protocolo para realização das avaliações experimentais com combustíveis em diferentes concentrações, simulando as possíveis opções de abastecimento em um veículo *Flex*. Posteriormente, foram projetados, implementados e avaliados dois circuitos para medição de capacitância. Após a coleta, processamento e avaliação dos dados obtidos, verificou-se que um dos circuitos desenvolvidos apresentou resultados satisfatórios para o objetivo de classificar as diferentes concentrações de combustíveis utilizadas (E27 a E100) para os requisitos do sensor utilizado, com erro inferior a 4% quando comparado ao valor fornecido pelo sensor comercial.

Palavras-chave: Capacitância. Instrumentação. Combustível. Sensor. Circuito.

ABSTRACT

BONFATI, Lucas Vacilotto. **Development of signal conditioning circuit for a capacitive sensor used for fuel classification**. 2017. 74 p. Work of Conclusion Course (Graduation in Electronic Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Currently, flex-fuel vehicles are able to control the injection and combustion of fuel in the engine based on the information provided by a lambda probe. However, this equipment presents several long-term disadvantages, such as increased engine consumption. Aiming to obtain alternatives to the use of lambda probes to control the electronic injection of automotive vehicles, this work focused on establish circuits capable of identifying different fuels based on a capacitive sensor developed for this purpose to evaluate the fuel at the entrance of the engine. A platform and protocol were developed to perform the experimental evaluations with different concentrations of fuels, simulating the possible fueling options in a flex vehicle. Subsequently, two circuits for capacitance measurement were designed, implemented, and evaluated. After collecting, processing, and evaluating the obtained data, it was verified that one of the developed circuits presented satisfactory results. The results were analyzed for the purpose of classifying the different concentrations of the used fuels (E27 to E100) based on the requirements of the used sensor, and presented an error lower than 4 % compared to the value provided by the commercial sensor.

Keywords: Capacitance. Instrumentation. Fuel. Sensor. Circuit.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Relação de λ com potência e consumo de combustível.....	15
Figura 2 – Fluxograma de trabalho	20
Figura 3 – a) Sonda lambda nova; b) Sonda lambda após 60000 km	26
Figura 4 – Problemas encontrados em sondas lambda; a) formação de sedimentos na sonda lambda; b) efeito de um motor que está queimando óleo; c) mistura injetada no motor estava rica demais; d) efeito que pode ser causado pelo uso de aditivos na gasolina.....	26
Figura 5 – Disposição do sensor capacitivo no motor	27
Figura 6 – Capacitor de placas paralelas	28
Figura 7 – Seção transversal do capacitor cilíndrico	29
Figura 8– Seção transversal do sensor capacitivo	31
Figura 9 – Sensor capacitivo para combustíveis.....	33
Figura 10 – Sensor comercial para combustíveis.....	34
Figura 11 – Ponte RLC Instek LCR-819.....	35
Figura 12 – CI 555 em seu modo astável.....	36
Figura 13 – Circuito (2) – parte (A) – Gerador de onda.....	37
Figura 14 – Circuito (2) – parte (B) – Conversor de frequência em tensão	39
Figura 15 – Circuito (2) – Parte (C) - Etapa de amplificação do sinal.....	40
Figura 16 – Ponte de Wheatstone.....	42
Figura 17 – Circuito (1) baseado na conversão de capacitância em frequência	44
Figura 18 – Circuito (1) implementado em PCI	46
Figura 19 – Circuito (2) implementado em PCI; a) Partes (A) e (B); b) Parte (C)	47
Figura 20 – Processo de separação da gasolina e etanol.....	49
Figura 21 – Fluxograma de preparação das amostras.....	50
Figura 22 – a) Ponte de Wheatstone implementada; b) Sensor PT100	51
Figura 23 – Caracterização do PT100.....	52
Figura 24 – Serpentina para aquecimento do combustível	52
Figura 25 – Planta de testes montada.....	53
Figura 26 – Fluxograma de realização dos testes dinâmicos.....	54
Figura 27 – Fluxograma de operação da aplicação pelo usuário.....	55
Figura 28 – Painel Frontal em LabVIEW™.....	55
Figura 29 - Resposta do circuito (1) – Capacitância x período.....	57
Figura 30 - Resposta do circuito (2) – Capacitância x tensão elétrica.....	58
Figura 31 - Medição com circuito (1) – Sensor + combustível (Faixa: E0-E100).....	60
Figura 32 - Medição com circuito (1) – Sensor + combustível (Faixa: E27-E100).....	61
Figura 33 - Medição com circuito (1) – Sensor + combustível (Faixa: E30-E100).....	61
Figura 34 - Comparativo dos valores de capacitância.....	63
Figura 35 - Variação de capacitância com aquecimento do combustível	63
Figura 36 - Medição com circuito (2) – Sensor + combustível (repouso)	64

Figura 37 - Medição com circuito (2) – Sensor + combustível (dinâmico)	64
Figura 38 - Comparativo dos valores de capacitância (sobrepostos)	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação estequiométrica para combustíveis diversos	14
Tabela 2 – Constantes dielétricas de materiais diversos	33
Tabela 2 – Valores teóricos de capacitância no sensor	33
Tabela 3 – Identificação das amostras de combustível	50
Tabela 4 – Concentração de etanol nas amostras utilizadas	59
Tabela 5 – Valores de capacitância das amostras	62
Tabela 6 – Comparativo de capacitâncias (Circuito (1) x Ponte RLC)	66
Tabela 7 – Erro percentual – Circuito (1)	68

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
IPVA	Imposto de Propriedade de Veículos Automotores
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
UCM	Unidade de Controle do Motor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVO GERAL	18
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2 METODOLOGIA	20
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1 COMBUSTÍVEIS E MOTORES AUTOMOTIVOS	23
3.2 O SENSOR DE OXIGÊNIO (SONDA LAMBDA) E A INJEÇÃO ELETRÔNICA	24
3.3 O CAPACITOR E A CAPACITÂNCIA	28
3.3.1 O Capacitor Cilíndrico	29
3.4 O SENSOR CAPACITIVO	31
3.5 SENSOR COMERCIAL PARA COMBUSTÍVEIS	34
3.6 EQUIPAMENTO DE VALIDAÇÃO (CALIBRAÇÃO)	34
3.7 CIRCUITOS PARA MEDIÇÃO DE CAPACITÂNCIA VARIÁVEL	35
3.7.1 Circuito Integrado Temporizador 555	35
3.7.2 Conversão Do Valor De Capacitância Em Tensão Elétrica	36
3.8 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA – PT100	41
3.9 LABVIEW E INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL	42
4 DESENVOLVIMENTO	43
4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	48
4.2 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS	55
5 RESULTADOS	57
5.1 ANÁLISE DOS CIRCUITOS EM LABORATÓRIO:	57
5.2 APLICAÇÃO EXPERIMENTAL – PLANTA DE TESTES	58
5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	65
6 CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

Com a diminuição das reservas de petróleo e os constantes aumentos nos preços dos combustíveis, há a necessidade de melhorar o desempenho dos motores empregados nos veículos, seja melhorando a eficiência destes ou buscando combustíveis alternativos.

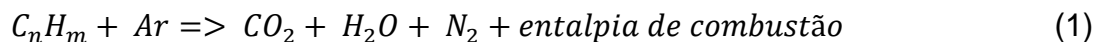
O Brasil foi pioneiro no uso do etanol hidratado como alternativa à gasolina como combustível para motores de combustão interna (em meados de 1970) e posteriormente no uso da tecnologia dos motores de combustível duplo, conhecidos como motores *Flex*, que trabalham de forma simultânea com gasolina, etanol ou a mistura destes (SCHIRMER; RIBEIRO, 2017).

Apesar de seu uso como combustível já ocorrer desde a década de 1930, o consumo do etanol em larga escala foi motivado por ações governamentais que levaram, dentre outras medidas, a concessão de incentivos fiscais na tributação de compra de veículos novos movidos a etanol. Além dessas medidas, houve a adoção de uma alíquota menor de IPVA (Imposto de Propriedade de Veículos Automotores) aos proprietários dos veículos (ROPPA, 2005).

Por força da legislação a gasolina passou a contar com a adição de 15% de etanol anidro em sua composição na década de 1970, sendo posteriormente este teor elevado para 20% e 25% nas décadas de 1980 e 1990, respectivamente. Atualmente, o teor de etanol anidro presente na gasolina tipo C, vendida ao consumidor final, é de 27% (SCHIRMER; RIBEIRO, 2017).

Quando da popularização do etanol hidratado, os automóveis eram dotados de motores com a presença de carburador, mecanismo responsável pela mistura do combustível com o ar em uma certa proporção, e injeção da mistura no motor para a combustão. No entanto, ele era ajustado para trabalhar com um tipo específico de combustível, não podendo ser feita a simples troca sem que houvesse a necessidade de reajustar sua configuração.

Para ocorrer a combustão de maneira adequada e dentro dos padrões necessários para que o motor gere pressão e trabalho suficientes a partir da expansão dos gases, é preciso que a mistura ar/combustível seja adequada. O processo de combustão é uma reação química complexa que pode ser generalizada (SILVA, 2016) desta forma:



No final de uma combust\~{a}o completa, as mol\~{e}culas de Carbono e de Hidrog\~{e}nio provindas da composi\~{c}\~{a}o do combust\~{i}vel se combinam com o oxig\~{e}nio para formar CO_2 e H_2O , que s\~{a}o produtos saturados em oxig\~{e}nio. Entretanto, se o processo n\~{a}o for ideal, h\~{a} a libera\~{c}\~{a}o de outros componentes, isso porque um processo de combust\~{a}o em um motor real jamais \~{e} completo quando da realiza\~{c}\~{a}o de um ciclo termodin\~{a}mico. Isto pode ocorrer devido a uma falta ou mesmo excesso de oxig\~{e}nio, ou por efeito de extin\~{c}\~{a}o da frente de chama nas paredes, entre outros fatores (C\~{A}MARA, 2006).

Para buscar otimizar o processo de queima, existe uma quantidade \~{o}tima de massa de combust\~{i}vel em rela\~{c}\~{a}o \~{a} massa de ar que proporciona o melhor rendimento da rea\~{c}\~{a}o qu\~{i}mica. Esta rela\~{c}\~{a}o depende das caracter\~{i}sticas de cada combust\~{i}vel e chama-se de rela\~{c}\~{a}o estequiom\~{e}trica. Esta rela\~{c}\~{a}o procura determinar qual \~{e} a propor\~{c}\~{a}o ideal para a rea\~{c}\~{a}o de combust\~{a}o, baseados em uma propor\~{c}\~{a}o de ar oxig\~{e}nio e o combust\~{i}vel, considerando sua composi\~{c}\~{a}o qu\~{i}mica (FAGGI, 2010).

Dessa forma, pode-se estimar a quantidade m\~{i}nima de oxig\~{e}nio necess\~{a}ria para que ocorra a combust\~{a}o do combust\~{i}vel. A rela\~{c}\~{a}o estequiom\~{e}trica \~{e} apresentada em unidades de massa de cada componente, sendo eles o ar e o combust\~{i}vel. A Tabela 1 apresenta, dentre outros combust\~{i}veis, os valores de rela\~{c}\~{a}o estequiom\~{e}trica para o etanol e a gasolina.

Tabela 1 – Rela\~{c}\~{a}o estequiom\~{e}trica para combust\~{i}veis diversos

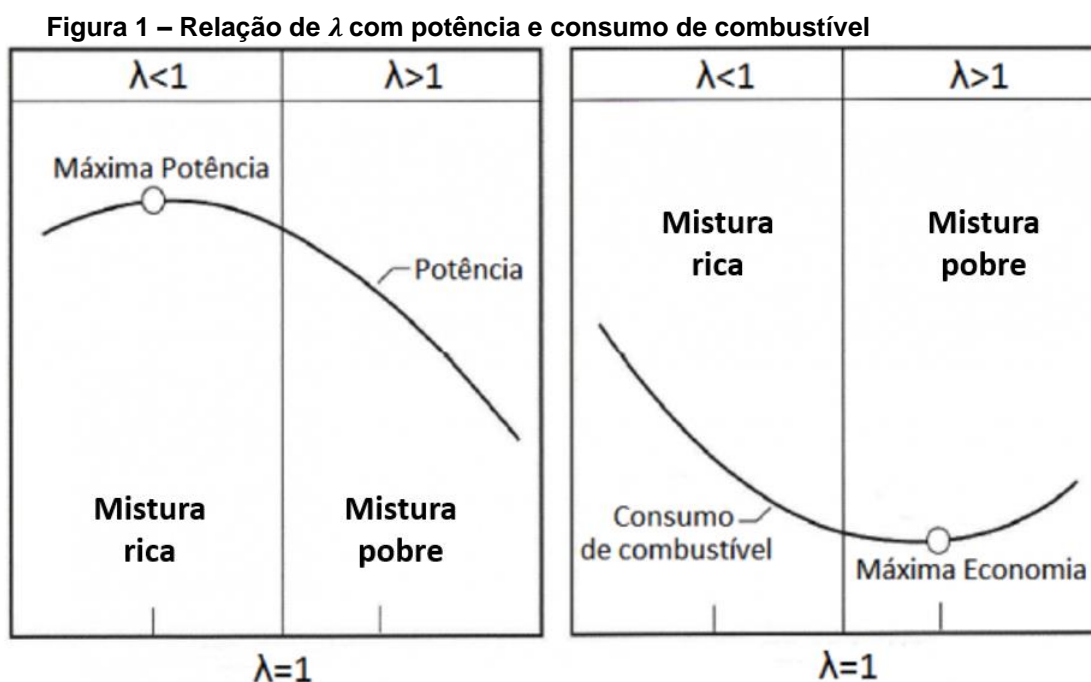
Combust\~{i}vel	Rela\~{c}\~{a}o Ar- Combust\~{i}vel estequiom\~{e}trica
Gasolina Comum E25	13,28
Gasolina de avia\~{c}\~{a}o	14,7
Diesel	14,5
Metanol	6,47
Etanol	9
Querosene	14,5
Nitrometano	2

Fonte: (PRO TUNE, 2013)

Para determinar o comportamento de uma queima de combustível utiliza-se a relação estequiométrica ótima, dada pela Tabela 1, em função da relação estequiométrica real, ou seja, a relação ar-combustível que efetivamente está sendo consumido pelo veículo. Esta relação dá origem a um parâmetro chamado de λ (Lambda), e é por meio dele que pode-se dizer se um sistema está operando de forma calibrada ou descalibrada (FAGGI, 2010).

$$\lambda = \frac{\text{relação REAL de AR - Combustível}}{\text{relação estequiométrica (ideal) de AR - Combustível}} \quad (2)$$

A literatura aponta que valores de λ ligeiramente menores que 1 apontam para o maior rendimento do motor (menor consumo) por existir excesso de ar na reação química. Esse fenômeno é vulgarmente denominado como “mistura pobre” (pobre em combustível). Por sua vez, valores de λ ligeiramente maiores que 1 apontam para um desempenho otimizado, ou seja, de maior potência, o qual é resultante por excesso de combustível e é vulgarmente denominado como “mistura rica” (rica de combustível). Esta noção entre potência e consumo em função de λ é ilustrada na Figura 1.



Fonte: Adaptado de (PRO TUNE, 2013)

No passado, por não se ajustar ao combustível utilizado automaticamente, o carburador ocasionava um maior consumo por parte do motor, uma vez que a relação ar/combustível injetada não era sempre a melhor possível. Visando solucionar este problema, e posteriormente também possibilitar o emprego de combustíveis diferentes misturados, passou-se a empregar um sistema de injeção eletrônica nos automóveis em substituição ao carburador (GOLDENSTEIN; AZEVEDO, 2006).

A utilização de diferentes misturas de combustível em sistema de injeção eletrônica necessita do uso de diversos sensores no motor do veículo, sendo um deles (de fundamental importância para os veículos *Flex*) responsável pela determinação do tipo de combustível (ou mistura) que está sendo injetado no motor.

O uso de sensores para a determinação das características do combustível ainda não é recorrente na indústria automotiva (e não existe a venda no mercado nacional), existindo poucos modelos de sensores sendo inseridos apenas em projetos veiculares mais complexos. Verificou-se que atualmente, no mercado nacional, apenas sensores de oxigênio na exaustão dos motores a combustão, são utilizados para avaliar o tipo de combustível queimado no motor, mas que sensores capacitivos podem ser uma alternativa de estudos para a determinação do tipo de combustível presente na injeção eletrônica.

Para avaliar o tipo de combustível, a maioria dos carros utiliza um sensor de oxigênio colocado na saída do motor. Este sensor também conhecido como sensor sonda lambda, em função da relação estequiométrica real e teórica apontadas na equação (2). Sua função é detectar a quantidade de gás oxigênio nos gases expelidos pelo motor (ou seja, derivado da queima do combustível) e através deste valor, determinar se a proporção de ar está adequada ou não ao tipo de combustível (BOSCH, 2011). Esta informação é enviada à central da injeção eletrônica, que analisa o valor recebido (normalmente através de tabelas pré-programadas em memória) permitindo que ela possa reajustar a proporção de ar em relação ao combustível injetado no motor para níveis que proporcionem um maior rendimento na queima.

No entanto, a verificação feita pelo sensor de oxigênio, ocorre somente depois que já houve a combustão por parte do motor. A partir disso é que a correção da mistura feita pela injeção eletrônica será, caso necessária, realizada, ocasionando o desempenho descalibrado do veículo durante um certo tempo, o que pode resultar um aumento temporário do consumo de combustível e na queda de desempenho

(rendimento) do motor. Exatamente por este motivo os fabricantes solicitam que sempre que houver o abastecimento com um combustível diferente do anterior, que o motorista dirija por pelo menos 10 km, para que os parâmetros de injeção possam ser ajustados automaticamente.

Em alguns casos, quando um veículo *Flex* realiza um abastecimento onde há a troca do combustível normalmente utilizado e o condutor não transita com o veículo o suficiente para a injeção eletrônica detectar a alteração da mistura no tanque de combustível, podem ocorrer dificuldades para religar o veículo, pois a central está com seus parâmetros de referência incorretos. Em alguns casos, é necessário a intervenção de assistência técnica para que, através de equipamentos específicos, possa ser realizado o ajuste dos parâmetros da central por um equipamento dedicado para que o veículo funcione novamente.

A melhor solução para resolver este problema possivelmente seria a utilização de sensores na entrada da injeção do motor, para que houvesse a detecção do combustível que está sendo utilizado, e assim a central da injeção eletrônica poderia realizar a injeção da mistura ar/combustível em uma proporção otimizada, reduzindo o consumo de combustível e a diminuição de emissão de poluentes no ambiente, pois haveria um maior rendimento.

Um fator importante é que tal sensor (sonda lambda) perde eficiência com o passar do tempo, em função da exposição contínua aos gases de queima do combustível, exposição à temperatura e também contaminação por partículas de óleo que podem ser expelidas por motores com maior tempo de uso. Por este motivo, os fabricantes indicam que com o passar do tempo, o sensor começa a ter uma operação fora do melhor ajuste inicial, resultando em um aumento do consumo do motor, que é estimado em até 15% (BOSCH, 2015).

1.1 JUSTIFICATIVA

Identifica-se que o método indireto de identificação da mistura de combustíveis para carros *Flex* está envolto de condições de operação como um período relativamente grande para reajuste de parametrização, mas também apresenta problemas de envelhecimento rápido e está sujeito a uma operação longínqua fora da faixa ideal.

Como apresentado anteriormente, o método de identificação indireta apresenta falhas, com isso o desenvolvimento de sensores que possam avaliar o combustível na entrada do motor pode trazer benefícios a curto e longo prazo para o desempenho e consumo dos motores.

Com o motor em funcionamento sempre haverá consumo de combustível, logo haverá um fluxo de combustível pela tubulação que não pode ser interrompido para realizar a medição. Por isso essa medição deve ocorrer de maneira dinâmica. Ademais, a composição do combustível não pode sofrer alterações em virtude da medição, deve-se então prover uma forma de realizá-la sem que comprometa a qualidade da amostra.

Para tal, um sensor capacitivo desenvolvido em um trabalho anterior na UTFPR (patente requerida junto ao INPI: BR 20 2015 023180 6), para ser instalado na tubulação antes da injeção eletrônica de um motor foi utilizado nesse trabalho. Com esse sensor pode-se avaliar as características dielétricas do combustível e assim correlaciona-las com a proporção de misturas de gasolina e etanol providas do tanque de combustível.

Com isso, tem-se a necessidade de realizar a medição do valor da capacitância para relacioná-lo ao combustível que circula pelo sensor. No entanto, a capacitância é uma grandeza elétrica que requer equipamentos específicos para ser medida, e conta com fatores dificultam esta medição como a variação da temperatura do combustível e a interferência de capacitâncias parasitas.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento, análise e validação de circuitos eletrônicos capazes de realizar o condicionamento de sinal proveniente do sensor capacitivo para combustíveis, visando detectar a proporção da mistura etanol/gasolina de maneira dinâmica. Tais circuitos devem ser capazes de realizar a conversão dos valores de capacitância para outra grandeza elétrica que possa ser mais facilmente medida. Além disso, é preciso que os circuitos evitem a influência de fatores ambientais, tais como elementos parasitas ou grandezas inerentes que interfiram na resposta apresentada pelo sensor.

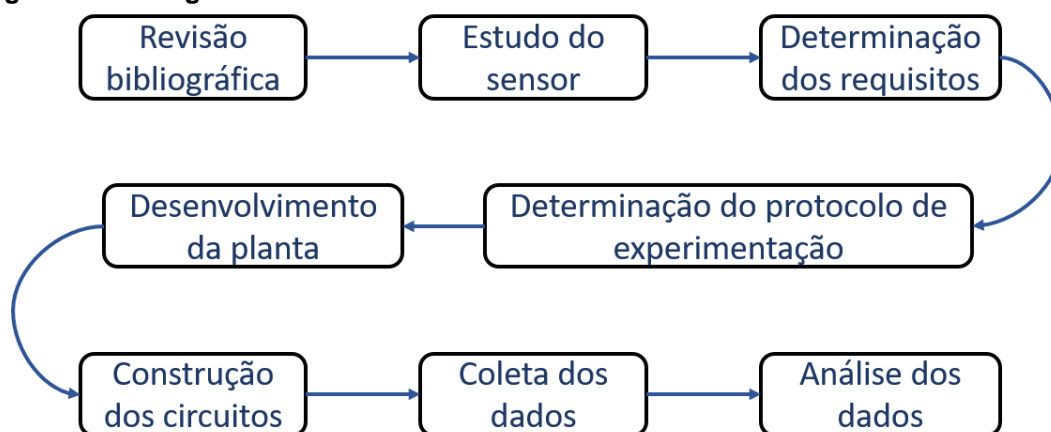
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a revisão bibliográfica dos temas correlatos ao trabalho;
- Projetar e implementar dois circuitos capazes de realizar a medição do valor de capacitância do sensor capacitivo para combustíveis;
- Desenvolver uma plataforma para realização dos testes com combustíveis;
- Preparar as amostras para teste com diferentes concentrações de etanol e gasolina;
- Realizar os testes com as diferentes amostras utilizando os dois circuitos e as diferentes amostras de combustível na plataforma de testes;
- Processar e analisar os dados obtidos com os testes realizados.

2 METODOLOGIA

Para ilustrar o processo metodológico, o fluxograma da Figura 2 ilustra o processo de desenvolvimento e realização deste trabalho.

Figura 2 – Fluxograma de trabalho



Fonte: Autoria própria

Inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica de temas correlatos como a composição dos combustíveis no país e no exterior, o funcionamento dos motores a combustão utilizados na atualidade por veículos automotores e o comportamento destes com diferentes combustíveis. Foi estudado o princípio de funcionamento da injeção eletrônica nos motores a combustão, bem como a sua parametrização em função de diferentes combustíveis. Neste processo, foram levantados os sensores envolvidos no processo de injeção também foram estudados, em especial, aqueles que pudessem avaliar a mistura de gasolina e etanol para veículos com injeção eletrônica *Flex*.

Com base em um sensor capacitivo proposto anteriormente e da necessidade de desenvolvimento de um circuito de medição de capacitância, também foram levantados os aspectos pertinentes ao desenvolvimento do trabalho como as características elétricas dos capacitores e os fatores que interferem no valor da capacitância. Ainda neste escopo, também foi realizado uma modelagem numérica aproximada do comportamento elétrico (capacitância) do protótipo do sensor de combustível a ser utilizado para o estudo.

Com relação a medição do valor de capacitâncias, foram levantadas algumas técnicas e circuitos a serem projetados/construídos que possibilitassem a medição da

capacitância e sua conversão em outra grandeza elétrica. Para tal, primeiramente levantou-se os requisitos de capacitância do protótipo do sensor, utilizando uma avaliação analítica aproximada e também uma estimativa com uma Ponte RLC Instek LCR-819. Uma vez que estes requisitos foram levantados (a possível faixa de operação do sensor), os circuitos foram ajustados e posteriormente testes de validação foram realizados.

Antes de utilizar os circuitos no sensor capacitivo foram realizados testes para validação da resposta fornecida por eles utilizando-se de capacitores comerciais com valores já conhecidos. Assim pode-se atestar o correto funcionamento dos circuitos e confirmar a relação da resposta fornecida por eles com a capacitância medida.

Uma vez que os circuitos foram montados e testados em bancada para capacitores com valores comerciais, elaborou-se um protocolo de experimentação prática para garantir a reprodutibilidade do processo e proporcionar avaliação estatística que pudesse fornecer confiabilidade aos dados coletados.

Em seguida, montou-se uma planta de testes para coleta dos dados, em que foram instalados os equipamentos de medição da capacitância em função da presença do combustível e de temperatura, uma bomba para circulação do combustível na tubulação e um reservatório para o combustível utilizado. Além do sensor capacitivo, utilizou-se um sensor comercial importado, o qual foi utilizado como auxiliar para a caracterização do combustível, e uma termorresistência para obtenção da temperatura.

Para a realização dos testes foram utilizadas diversas amostras de combustível com diferentes proporções de etanol e gasolina. Estes testes também foram submetidos à diferentes temperaturas para verificar o comportamento do sensor capacitivo com a variação das amostras. Para composição das amostras utilizou-se etanol hidratado e gasolina disponível nos postos. Esta última foi submetida a um processo de separação do etanol já misturado (que por lei é 27%), obtida por meio do processo de separação pela adição de água à gasolina comum. Posteriormente, foram misturadas amostras de gasolina sem etanol e etanol hidratado em proporções conhecidas.

A coleta dos dados foi realizada utilizando a DAQ (*Data Acquisition*), *hardware* da National Instruments para aquisição e condicionamento de sinais. Ela atua como a interface entre os sinais a serem medidos e o computador onde o *software* a ser utilizado está instalado. Possui entradas e saídas digitais e é dotada de conversores

analógico-digital que possibilitam a manipulação por equipamentos digitais de valores analógicos provenientes das medições.

Implementou-se uma aplicação no *software LabVIEW™* para a aquisição dos valores provenientes dos sensores com o auxílio da DAQ, além de uma interface para visualização dos dados no instante da medição. O processamento realizado posteriormente a coleta também se utilizou do *software LabVIEW™*, devido a sua capacidade de atender o grande volume de dados obtidos e a sua confiabilidade no tratamento destes.

No tratamento dos dados coletados, realizaram-se análises estatísticas para verificação, comparação e posterior apresentação dos mesmos. Para validar os valores obtidos utilizou-se uma Ponte RLC Instek LCR-819, equipamento calibrado utilizado para medição de capacitância, possibilitando a comparação com os valores reais.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão abordados os temas que fundamentam este trabalho e os tópicos que auxiliaram no desenvolvimento e validação dos circuitos.

3.1 COMBUSTÍVEIS E MOTORES AUTOMOTIVOS

A gasolina é um dos subprodutos do petróleo e é um composto de diversos hidrocarbonetos; no entanto sua composição final depende do petróleo utilizado e do processo de produção empregado. Os hidrocarbonetos que formam a gasolina são, em sua maioria, pertencentes às classes das parafinas, olefinas, naftênicos e aromáticos, em cadeias de 4 a 12 átomos de carbono, e tendo seu ponto de ebulição na faixa de 30 °C a 215 °C (ANP, 2016).

No Brasil são comercializadas gasolinas de dois diferentes tipos: A e C. A gasolina tipo A não possui adição de etanol anidro em sua composição e é vendida diretamente pelos produtores. Já a gasolina tipo C possui adição do etanol anidro combustível em sua composição pelos revendedores antes de ser comercializada aos postos revendedores, e posteriormente ao consumidor final. Essa é a gasolina denominada Comum encontrada nos postos de combustíveis (ANP, 2016).

Há ainda as gasolinas Premium que estão à disposição do consumidor nos postos de combustíveis, que são composições de gasolina tipo C com aditivos que, em sua maioria, proporcionam uma melhora no desempenho do motor, mas não devem comprometer a qualidade e segurança do produto. Esta geralmente possui um valor final mais elevado em comparação à gasolina C Comum e os aditivos a serem utilizados devem estar registrados na ANP (ANP, 2016).

O etanol é um biocombustível obtido por meio da fermentação de açúcares (como a cana-de-açúcar) e é uma alternativa na substituição dos combustíveis fósseis nos motores de combustão interna. O Brasil teve um aumento significativo do uso do etanol como combustível na década de 1970 influenciado por incentivos governamentais (ROPPA, 2005) e ainda hoje é o segundo maior produtor e um dos maiores consumidores desse produto (ANP, 2016).

Classifica-se em dois diferentes tipos: etanol hidratado e etanol anidro. Quando comercializado nos postos de combustíveis ao consumidor final tem-se o

chamado etanol hidratado, que possui entre 4% e 5% de água em sua composição. Já o etanol anidro, que é adicionado à gasolina, possui menos de 1% de água (ANP, 2016).

Apesar da oferta de dois combustíveis (etanol e gasolina) nos postos revendedores, antes de 2003 o consumidor não podia escolher entre eles no abastecimento. Isso deve-se ao fato dos veículos automotores mais antigos não possuírem motores capazes de funcionar com diferentes combustíveis, sendo necessário que fosse escolhido no ato da compra do veículo, caso o fabricante disponibilizasse ambas as opções para venda. Os consumidores ficavam sujeitos a não poderem utilizar seus veículos caso houvesse um desabastecimento por parte dos distribuidores de algum combustível até que o fornecimento fosse normalizado. Além disso, em baixas temperaturas, os veículos movidos a etanol enfrentavam dificuldades para serem ligados (FAGGI, 2010).

A tecnologia dos motores que podem ser abastecidos com ambos os combustíveis, conhecidos como *Flex*, proporcionou ao consumidor a opção de escolher entre etanol e gasolina no ato do abastecimento a partir de 2003, quando foi comercializado o primeiro veículo no Brasil com esta característica. Além disso, o motor é capaz de funcionar com a mistura entre os dois combustíveis, adaptando-se para trabalhar da melhor forma (HIGA, 2011).

Para ser possível a utilização dos motores *Flex* é fundamental que o veículo tenha condições de verificar qual o combustível que está sendo utilizado. Essa tarefa cabe a injeção eletrônica e ao sensor de oxigênio (sonda lambda). No entanto, há situações em que o controle realizado atualmente pela injeção eletrônica não é suficiente para evitar o funcionamento do automóvel fora dos parâmetros otimizados (ANDREOLI, 2009).

3.2 O SENSOR DE OXIGÊNIO (SONDA LAMBDA) E A INJEÇÃO ELETRÔNICA

Nos veículos automotores comercializados no Brasil, o sistema de injeção eletrônica de combustível presente nos motores utiliza um sensor de oxigênio para controle da combustão, também conhecido como sonda lambda, que é instalado junto ao coletor de exaustão dos gases do motor. Depois que há a queima do combustível no interior do motor, são gerados gases que são expelidos pelo escapamento do

automóvel, e a composição desses gases é utilizada como referência para a injeção eletrônica ajustar seu funcionamento (BOSCH, 2011).

Sua construção se dá por um sensor cerâmico central revestido por uma camada protetora de metal, além de um aquecedor interno. Esse aquecedor tem por função elevar a temperatura da cerâmica próximo aos 350 °C, que é quando o sensor passa a trabalhar de maneira adequada, tornando possível sua utilização. Já o invólucro de metal que envolve o sensor cerâmico tem por função protegê-lo do contato direto com os gases provenientes do motor. A outra extremidade da sonda lambda fica em contato com o ar externo (BOSCH, 2015).

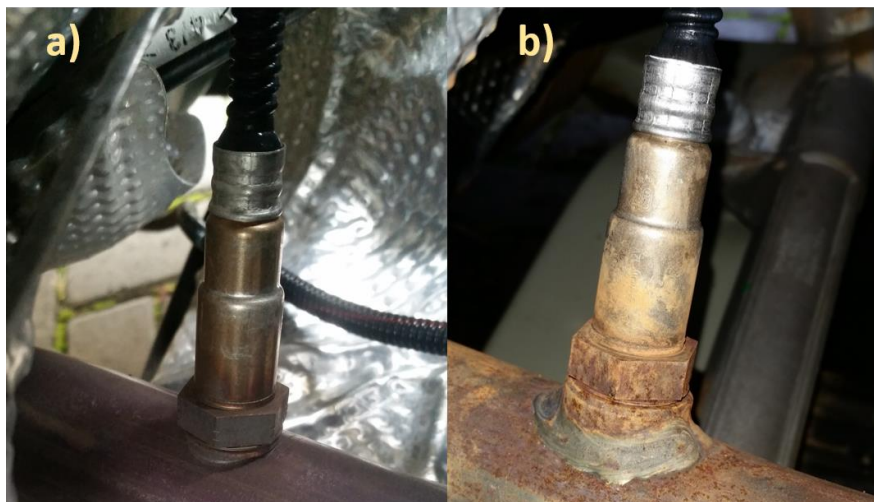
Baseado na variação das propriedades da cerâmica em altas temperaturas, quando em funcionamento a cerâmica detecta a diferença da concentração de oxigênio presente nos gases vindos do motor com o ar externo, gerando com isso uma tensão elétrica ou uma variação de resistência vista em seus terminais. Por meio dessa informação, a injeção eletrônica verifica se houve excesso ou falta de combustível na mistura que foi injetada no motor e faz o ajuste para que as próximas injeções de ar/combustível proporcionem um melhor rendimento (BOSCH, 2011).

Os fabricantes de sondas lambda recomendam que estas sejam verificadas a cada 30.000 km rodados com o veículo para certificar-se que não há necessidade de manutenção ou substituição da peça (BOSCH, 2015). Estima-se, segundo o fabricante que domina o fornecimento às principais montadoras do mundo, que uma sonda lambda desgastada ou com defeito gera um aumento de até 15% no consumo de combustível pelo motor, além de aumentar a emissão de poluentes no ambiente e acelerar o processo de desgaste do catalisador (BOSCH, 2015).

Para ilustrar, a Figura 3 a) apresenta o aspecto externo de uma sonda lambda instalada em um automóvel *Flex* novo, já a Figura 3 b) mostra uma sonda lambda usada instalada em um automóvel semelhante, com 60000 km rodados.

No entanto, o interior da sonda lambda é a parte em que a ação dos gases resulta no desgaste e degradação do sensor (BOSCH, 2011). A Figura 4 ilustra os principais problemas que ocorrem na sonda lambda, interferindo diretamente em sua eficiência e no rendimento do motor do veículo.

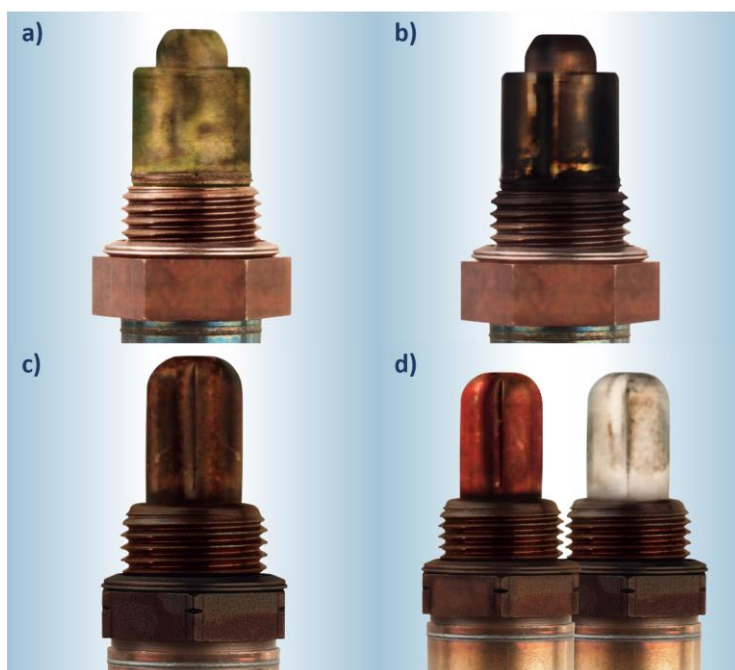
Figura 3 – a) Sonda lambda nova; b) Sonda lambda após 60000 km



Fonte: Autoria própria

A Figura 4 a) indica que houve entrada de anticongelante na câmara de combustão e há formação de sedimentos na sonda lambda; a Figura 4 b) mostra o efeito de um motor que está queimando óleo; a Figura 4 c) indica que a mistura injetada no motor estava rica demais; e a Figura 4 d) mostra o efeito que pode ser causado pelo uso de aditivos na gasolina.

Figura 4 – Problemas encontrados em sondas lambda; a) formação de sedimentos na sonda lambda; b) efeito de um motor que está queimando óleo; c) mistura injetada no motor estava rica demais; d) efeito que pode ser causado pelo uso de aditivos na gasolina



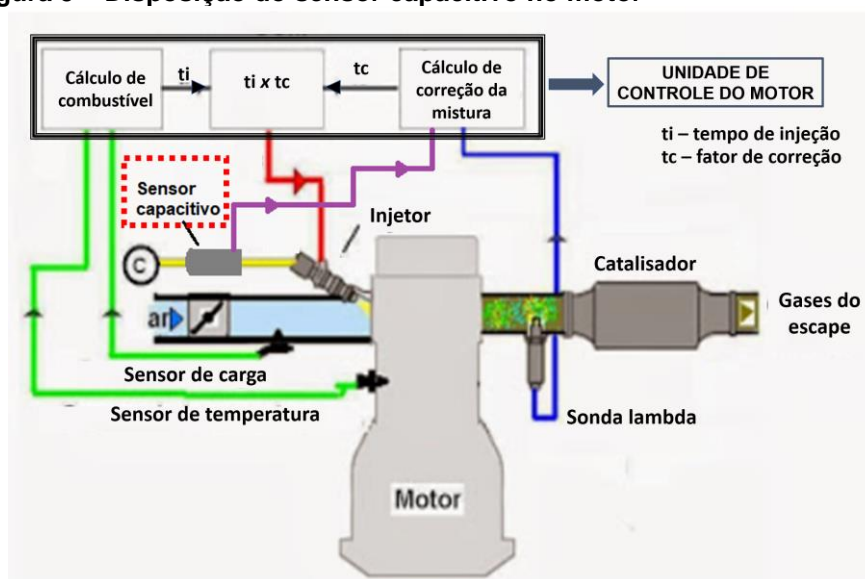
Fonte: BOSCH (2011), adaptado

Com base nessas informações fica evidenciado a necessidade de buscar-se alternativas para substituir a utilização da sonda lambda nos sistemas de injeção eletrônica. Apesar de cumprir a tarefa para a qual foi idealizada, a sonda lambda pode não oferecer ao motor o melhor rendimento possível e ainda, considerando a variação dos preços dos combustíveis fósseis em decorrência da oferta finita de petróleo, é extremamente importante prover uma melhoria nesse aspecto.

Para contornar os problemas elencados com a utilização da sonda lambda é preciso que a medição do combustível seja realizada antes do combustível ser utilizado pela injeção eletrônica para funcionamento do motor. Dessa forma, o ajuste da mistura ar/combustível seria feito de maneira a propiciar o melhor rendimento na combustão, evitando que haja queima excessiva de combustível para então ser feita a correção da mistura, como ocorre atualmente com a sonda lambda. A perda de eficiência da sonda lambda também pode ocasionar um aumento no consumo de combustível e seria eliminado com a verificação do combustível utilizado ao invés de ser feita nos gases expelidos pelo motor.

A Figura 5 representa um motor automotivo e mostra a localização onde seria instalado o sensor capacitivo, entre o reservatório de combustível e o injetor. Assim como ocorre com a sonda lambda, o sensor capacitivo é responsável por fornecer informações para a central da injeção (unidade de controle do motor) realizar o controle.

Figura 5 – Disposição do sensor capacitivo no motor



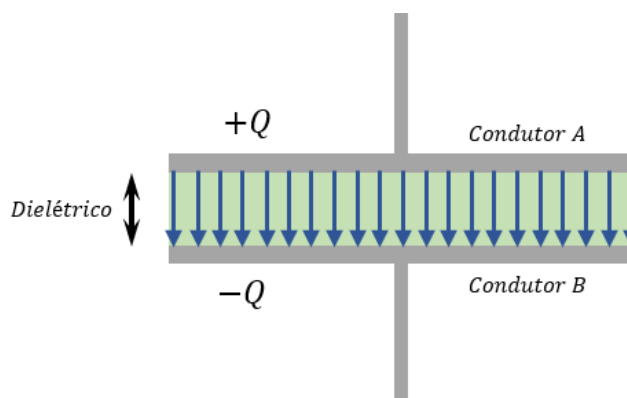
Fonte: (ELETROELETRONICA AUTOMOTIVA, 2013), adaptado

Além disso, com a verificação antes da injeção, minimizar-se-ia a possibilidade de ocorrerem problemas de funcionamento do motor quando houvesse a troca do combustível utilizado no abastecimento e a central de injeção não for capaz de detectar tal mudança antes que o motor fosse desligado. Com isso, ao tentar religar o motor, os parâmetros armazenados na central da injeção eletrônica não são compatíveis com a realidade da mistura de combustível que está sendo efetivamente utilizada e pode haver dificuldade em colocar o motor em funcionamento novamente.

3.3 O CAPACITOR E A CAPACITÂNCIA

Capacitores são compostos por condutores, chamados de eletrodos, separados por um elemento dielétrico e são capazes de armazenar cargas elétricas formando um campo elétrico entre os eletrodos (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). Podem possuir diversas geometrias, sendo os mais comuns os de cilindros concêntricos e os de placas paralelas. A capacidade destes eletrodos serem carregados com cargas opostas quando submetidos a uma diferença de potencial elétrico determina o que se chama de capacitância, medida em Farads. A Figura 6 representa um capacitor.

Figura 6 – Capacitor de placas paralelas



Fonte: Autoria própria

Quando o capacitor é carregado, seus condutores adquirem cargas iguais, porém com sinais opostos ($+Q$ e $-Q$), mas convencionou-se que a carga de um capacitor é representada pelo valor absoluto das cargas sobre seus condutores, identificada apenas por Q . Os condutores de um capacitor são superfícies

equipotenciais, ou seja, em toda sua extensão apresentam o mesmo potencial elétrico, e entre eles há uma diferença de potencial V .

A relação entre a carga Q (Coulomb) e a diferença de potencial em V (Volts) de um capacitor pode ser vista na equação (3).

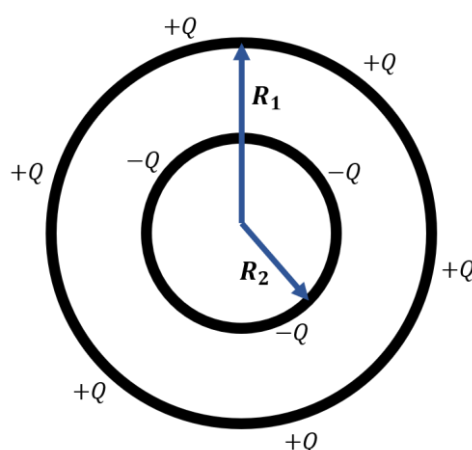
$$Q = C V \quad (3)$$

Onde C é uma constante de proporcionalidade também chamada de Capacitância do capacitor, dada em Farads, e essa propriedade será utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

3.3.1 O Capacitor Cilíndrico

Formado por 2 cilindros coaxiais de comprimento L e de raios R_1 e R_2 , sua seção transversal é mostrada pela Figura 7. Assumindo $L \gg R_1$ pode-se desprezar a distorção do campo elétrico existente nas extremidades de ambos os cilindros, e considerando que o cilindro interno de raio R_2 está aterrado, o potencial elétrico sobre o cilindro externo de raio R_1 é igual a V .

Figura 7 – Seção transversal do capacitor cilíndrico



Fonte: Autoria própria

Partindo da Lei de Gauss (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009), escrita na equação (4), tem-se:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \quad (4)$$

Em que \vec{E} é o campo elétrico (em N/C), Q_{int} é a carga na superfície gaussiana na qual a integral é calculada, e ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo. Os cilindros que formam o capacitor são concêntricos com as linhas de força sendo retas radiais, então define-se a superfície gaussiana como um cilindro de raio R (m) e comprimento L (m). Partindo da integral da equação (4) tem-se o expresso na equação (5):

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 LR} \quad (5)$$

Assumindo que a diferença de potencial entre dois pontos i e f pode ser descrita pela equação (6), temos o potencial elétrico V .

$$V = V_f - V_i = \int_{\vec{R}_i}^{\vec{R}_f} \vec{E}(\vec{R}) \cdot d\vec{l} \quad (6)$$

Assim, obtém-se a equação (7):

$$V = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L} \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (7)$$

Então, substituindo o obtido na equação (7) na equação (3), e isolando C , tem-se o valor da capacitância do capacitor cilíndrico mostrado na equação (8):

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{L}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} \quad (8)$$

Assumindo que os cilindros sejam homogêneos por toda a extensão do capacitor, pode-se definir C' como sendo a capacitância por unidade de comprimento, então tem-se o exposto na equação (9):

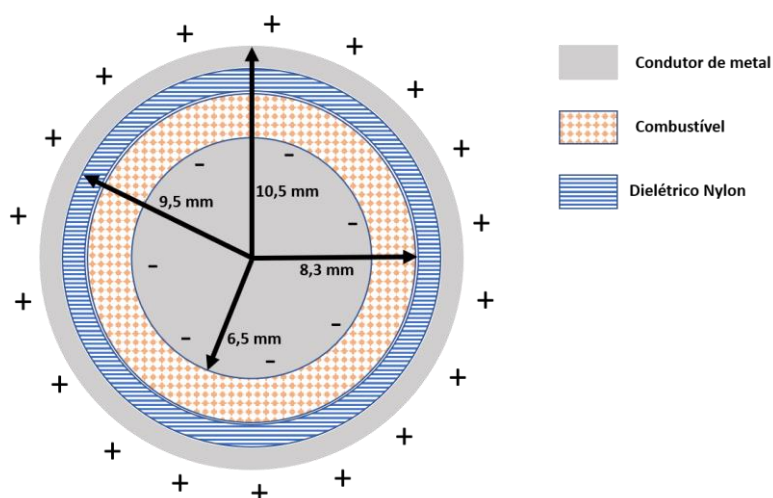
$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} \quad (9)$$

Com isso tem-se que a capacitância para um capacitor cilíndrico concêntrico é dependente apenas de seus aspectos geométricos, neste caso os raios R_1 e R_2 , uma vez que as demais variáveis podem ser substituídas por uma constante matemática.

3.4 O SENSOR CAPACITIVO

Optou-se por utilizar um sensor capacitivo baseado no princípio de um capacitor cilíndrico, uma vez que tais sensores podem ser empregados nas mais diversas aplicações, tais como na área automotiva e biomédica, além de apresentarem estabilidade do sinal, baixo consumo de energia e menor sensibilidade a variações de temperatura quando comparados a sensores resistivos (MOHAMMAD; THOMSON, 2017). Para realização dos testes e coleta de dados desse estudo utilizou-se um sensor capacitivo composto por dois cilindros de metal com diferentes raios, separados por uma camada de Nylon e uma camada de ar que é preenchida pelo combustível durante o funcionamento. A seção transversal que representa o sensor capacitivo pode ser vista na Figura 8.

Figura 8– Seção transversal do sensor capacitivo



Fonte: Autoria própria

Tendo os valores dos raios dos cilindros externo e interno, pode-se aplicar na equação (8) para obter o valor teórico de capacitância apresentado pelo sensor, porém considerando que o dielétrico presente entre os cilindros condutores é o vácuo. Para a aplicação proposta neste sensor o que ocasiona a variação da capacitância é a mudança do dielétrico entre os condutores, uma vez que os raios dos cilindros permanecem inalterados.

Tal fato pode ser visualizado na equação (10):

$$C_{sensor} = k C_{ar} \quad (10)$$

Onde k é a constante dielétrica do material usado entre os condutores. Para o sensor capacitivo em questão, tem-se que há dois diferentes materiais utilizados como dielétrico. O primeiro deles é uma camada de Nylon que forma o corpo do sensor e serve de apoio para o cilindro externo. Como esta camada de Nylon não sofre variação de sua espessura, pode-se dizer que sua influência no valor final de capacitância pode ser mensurada e ter seu valor definido.

O segundo material dielétrico é o líquido que substitui o ar contido no interior do sensor, e como neste caso o líquido em questão é o combustível a ser medido, ele será responsável por ocasionar a variação da capacitância do sensor capacitivo. Como a espessura do espaço por onde o combustível circula também não sofre variação, a constante dielétrica do combustível é a responsável efetivamente por essa variação na capacitância.

Portanto, combustíveis com diferentes constantes dielétricas vão proporcionar diferentes valores de capacitância no sensor. A Tabela 2 apresenta alguns valores de constante dielétrica de diversos materiais.

Tabela 2 – Constantes dielétricas de materiais diversos

Material	Constante dielétrica (k)
Ar	1,00059
Água (20°C)	78,5
Etanol	25
Gasolina	2
Nylon	3,8
Papel	3,5
Poliestireno	2,55
Porcelana	6,5

Fonte: (TIPLER; MOSCA, 2009); (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012), adaptado

Com base na Tabela 2 e nas dimensões do protótipo do sensor utilizado, pode-se estimar os valores de capacitância esperados quando da sua utilização com combustíveis, sendo estes valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores teóricos de capacitância no sensor

Líquido	Capacitância (pF)
Ar	5,963
Gasolina	10,577
Etanol	36,820

Fonte: Autoria própria

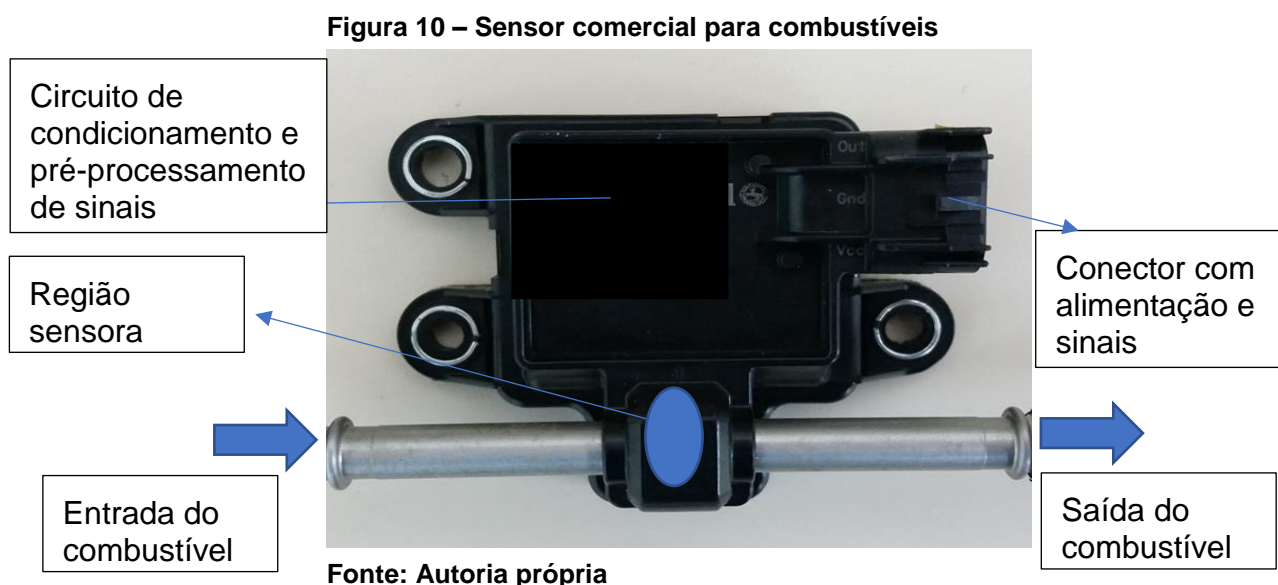
O sensor capacitivo (STEVAN Jr.; PUCHTA, 2015) que será empregado nesse estudo pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Sensor capacitivo para combustíveis

Fonte: Autoria própria

3.5 SENSOR COMERCIAL PARA COMBUSTÍVEIS

O sensor comercial utilizado para verificação das amostras (*Fluid Sensor – Flex Fuel Ethanol*) não é comercializado no Brasil e foi importado para ser utilizado nesse estudo. Esse sensor é capaz de realizar a detecção da concentração de etanol na gasolina. Tem como saída um sinal de frequência que varia de 50 Hz (quando não há etanol) até 150 Hz (quando o combustível é apenas etanol), sendo sua variação linear em relação a porcentagem de etanol no combustível. O sensor comercial pode ser visto na Figura 10.



3.6 EQUIPAMENTO DE VALIDAÇÃO (CALIBRAÇÃO)

Para realizar medições de capacitância na ordem de pico Farads com confiabilidade, a qual é a ordem de grandeza do sensor capacitivo, deve-se utilizar uma Ponte RLC. Esse equipamento, mostrado na Figura 11, é capaz de realizar a medição de valores não apenas de capacitância, mas também de indutância e impedância, e será utilizado no decorrer deste estudo.

Figura 11 – Ponte RLC Instek LCR-819



Fonte: Autoria própria

3.7 CIRCUITOS PARA MEDIÇÃO DE CAPACITÂNCIA VARIÁVEL

A seguir serão apresentados dois diferentes métodos utilizados nesse estudo para medição de capacitância de maneira indireta.

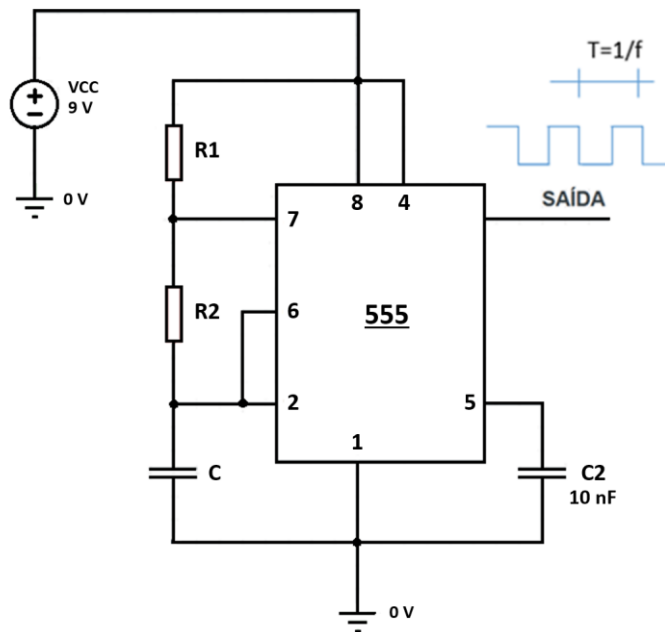
3.7.1 Circuito Integrado Temporizador 555

O circuito integrado 555 é bastante conhecido e utilizado em circuitos eletrônicos, atendendo a diversas aplicações. Dentre seus principais empregos estão os circuitos temporizadores e osciladores. A razão de ter seu uso tão difundido deve-se ao fato de ser de baixo custo e complexidade (LIMA, 2010).

Quando utilizados para circuitos temporizadores possuem basicamente dois modos de operação: astável e monoastável.

- Modo astável: neste modo o circuito possui o comportamento de um oscilador, podendo ser utilizado, por exemplo, para piscar uma lâmpada.
- Modo monoastável: A partir de um sinal em sua entrada o circuito gera um único pulso com comprimento fixo, podendo ser utilizado como um disparador para outra aplicação (LIMA, 2010).

Figura 12 – CI 555 em seu modo astável



Fonte: Datasheet: TLC555 (2016), adaptado

No circuito o capacitor C , que representa o sensor capacitivo, é carregado pelos resistores R_1 e R_2 , e sua descarga se dá apenas pelo resistor R_2 por meio do pino 7 do CI. A equação (11) apresenta a frequência de saída do 555 no modo astável (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

$$f = \frac{1,44}{[(R_1 + 2 R_2) C]} \quad (11)$$

3.7.2 Conversão Do Valor De Capacitância Em Tensão Elétrica

O segundo circuito desenvolvido baseia-se na conversão do valor de capacitância em tensão elétrica. Sua topologia utiliza amplificadores operacionais, e caracterizam-se de maneira geral por um amplificador diferencial com elevado ganho, alta impedância de entrada e baixa impedância de saída (PERTENCE JR, 2003).

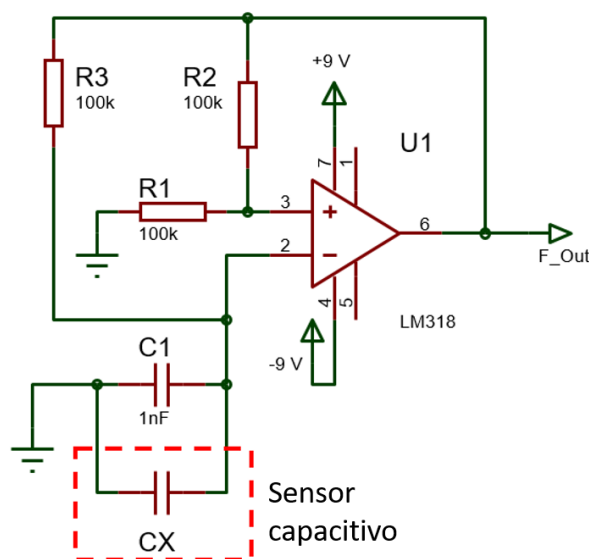
Quando operam na região ativa, são capazes de realizar operações matemáticas como soma, diferenciação e integração. Já na região de saturação, podem ser empregados como comparadores, filtros e geradores de ondas. Os amplificadores possuem três configurações de entrada: inversora, não inversora e

diferencial, sendo essa última quando são utilizadas as entradas inversora e não inversora simultaneamente (PERTENCE JR, 2003).

Pode-se dividir o segundo circuito desenvolvido, denominado circuito (2), em 2 partes diferentes, sendo elas: Gerador de onda e Conversor de frequência em tensão.

A primeira parte baseia-se no princípio de funcionamento de um oscilador, que segundo Pertence Junior (2003) são circuitos cuja função é produzir um sinal alternado quando alimentado por uma fonte de tensão contínua. A topologia empregada nessa primeira parte do circuito, denominada de parte (A), pode ser vista na Figura 13.

Figura 13 – Circuito (2) – parte (A) – Gerador de onda



Fonte: Autoria própria

A frequência da onda de saída pode ser obtida por meio do período que pode ser obtido por meio das equações (12) e (13). Neste circuito também optou-se em inserir um capacitor comercial de valor fixo em paralelo ao sensor para evitar valores muito baixos de capacitância no circuito. A equação (14) fornece o valor de capacitância equivalente do circuito, que corresponde a soma dos valores do capacitor comercial e do sensor capacitivo.

$$T = 2R_3C \ln \frac{1 + \lambda}{1 - \lambda} \quad (12)$$

Em que:

$$\lambda = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (13)$$

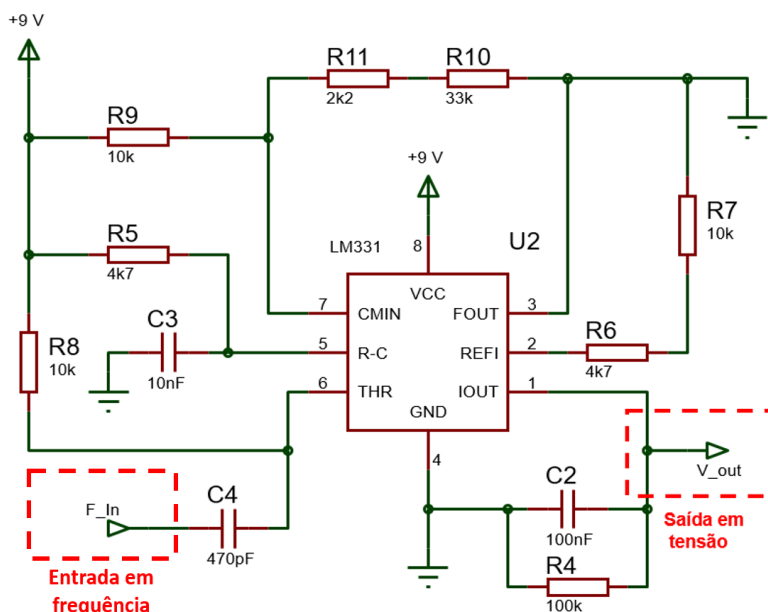
E:

$$C = C_1 + C_x \quad (14)$$

Como os resistores possuem valores fixos, a variação da frequência ocorre com a variação da capacitância, e devido ao fato do capacitor em paralelo ser de valor fixo, a variação da capacitância ocorre apenas com a variação da capacitância no sensor. Com isso, tem-se como produto da parte (A) a transformação do valor de capacitância do sensor em uma onda quadrada de frequência variável, a ser injetada na parte (B) do circuito.

A frequência fornecida pela parte (A) é então inserida em um circuito integrado LM331 (TEXAS INSTRUMENTS, 2015), que tem por finalidade converter esse valor de frequência em um valor de tensão contínua. O LM331 é um conversor de precisão tanto para F-V como V-F, ou seja, frequência em tensão ou tensão em frequência, dependendo apenas da topologia empregada. O circuito que realiza a conversão da frequência em tensão, em conjunto ao LM331, é aqui denominado parte (B) e mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Circuito (2) – parte (B) – Conversor de frequência em tensão



Fonte: Datasheet LM331 (2015), adaptado

A frequência de saída do circuito é fornecida pela equação (15).

$$F_{in} = \frac{1}{T} \quad (15)$$

Por sua vez a equação (16) fornece o valor de tensão de saída do circuito da Figura 14.

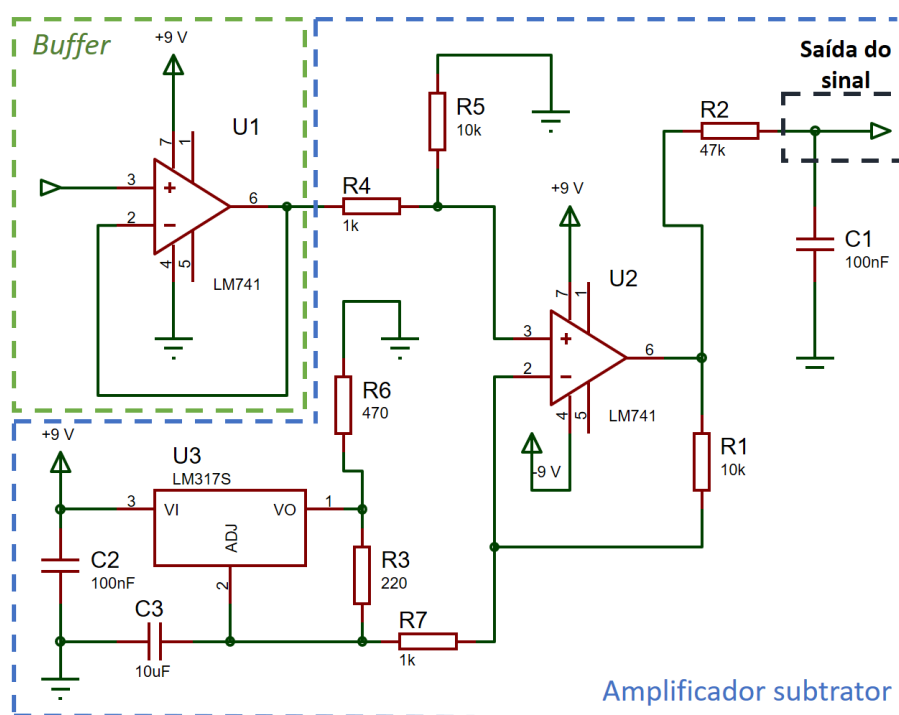
$$V_{out} = F_{in} \times 2,09 \times \frac{R_4}{R_6 + R_7} \times (R_5 C_3) \quad (16)$$

Como os resistores e capacitores utilizados não sofrem variação de seus valores, pode-se dizer que a variação de tensão na saída do circuito está diretamente relacionada à variação da frequência na entrada do circuito, representada por F_{in} , proveniente da parte (A) do circuito com a indicação F_{out} .

Por se tratarem de valores de capacitância relativamente baixos a serem medidos, a variação na frequência do gerador de onda é pequena, e isso, por consequência, resulta em uma pequena variação no valor de tensão de saída do circuito. Visando melhorar esse resultado e facilitar a posterior medição dos valores de tensão do circuito, optou-se por amplificar o sinal obtido na saída.

Com a variação da saída de tensão da parte (B) estando na casa de centenas de mV, implementou-se o circuito apresentado na Figura 15, denominado parte (C). Este circuito é composto por dois estágios de amplificação do sinal, sendo o primeiro um buffer, que consiste em um amplificador de ganho unitário onde a amplitude da tensão de saída possui o mesmo valor da tensão de entrada, porém com incremento da potência devido à alta impedância de entrada e baixa impedância na saída. O buffer foi necessário para o sinal ser injetado no segundo estágio, que consiste em um amplificador subtrator, responsável por amplificar o valor da diferença de tensão presente em suas entradas, nesse caso com ganho 10.

Figura 15 – Circuito (2) – Parte (C) - Etapa de amplificação do sinal



Fonte: Autoria própria

O valor da tensão de saída fornecida com o circuito amplificador subtrator pode ser obtido por meio da equação (17), sendo o valor do ganho ajustado com a mudança dos valores dos resistores empregados no circuito. Para fins de cálculo tem-se que $R_1 = R_5$ e $R_4 = R_7$.

$$V_{out} = \frac{R_5}{R_4} \times (V_2 - V_1) \quad (17)$$

Para ajuste da tensão de referência utilizada na entrada do subtrator implementou-se uma fonte utilizando o circuito integrado LM317 (TEXAS INSTRUMENTS, 2016), que consiste em um regulador de tensão variável, cuja saída depende do valor de tensão proporcionado por um divisor resistivo. O uso deste circuito auxiliar com o LM317 se fez necessário para fornecer a tensão de referência ao subtrator sem que houvesse alteração da impedância responsável pelo ganho na saída do amplificador, o que não seria possível caso fosse utilizado um simples divisor resistivo para obtenção desta tensão de referência. A equação (18) mostra como é definido o valor de tensão de saída do LM317.

$$V_{out} = 1,25 \times \left(1 + \frac{R_6}{R_3}\right) \quad (18)$$

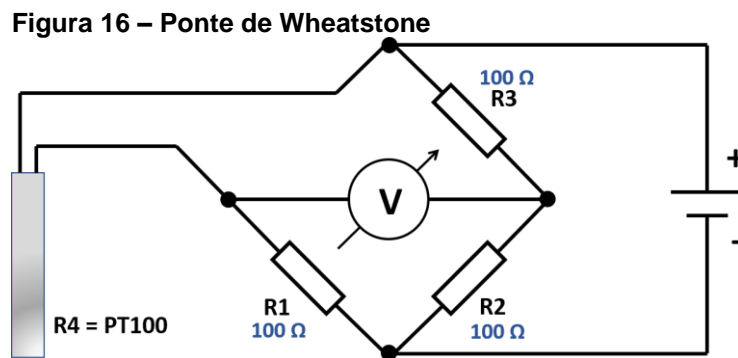
Com o emprego da etapa de amplificação o valor de tensão de saída passou a estar na casa das unidades de Volts, facilitando a visualização e medição dos valores provenientes da variação da capacitância.

3.8 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA – PT100

Os termômetros de resistência ou termorresistências, são sensores de temperatura que apresentam uma variação da sua resistência elétrica com a variação da temperatura do ambiente ou objeto medido. Caracterizam-se como uma boa opção por possuírem alta estabilidade mecânica e térmica, serem resistentes a contaminação pelo meio externo, além de sua relação resistência por temperatura ser praticamente linear para a faixa de operação indicada em cada modelo (NOVUS, 2008).

Para esse estudo, utilizou-se a termorresistência PT100, a qual possui platina em seu interior como metal responsável por provocar a variação da resistência. Quando a temperatura for de 0° C apresenta uma resistência de 100 Ω (NOVUS, 2008). Para monitoramento da temperatura com o PT100 necessitou-se implementar um circuito para condicionamento do sinal, e optou-se por utilizar uma Ponte de Wheatstone, que é capaz de transformar a variação da resistência apresentada pelo termorresistor em um valor de tensão elétrica estando relacionada com a variação da temperatura medida (MEASUREMENTS GROUP, 1993), e é mostrada na Figura 16.

Para tal, necessitou-se realizar a caracterização prévia do PT100, onde foram realizadas medições de temperatura com o auxílio de um termômetro e correlacionadas ao valor de tensão na Ponte, obtendo-se uma relação matemática entre tensão e temperatura.



Fonte: Autoria própria

3.9 LABVIEW E INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL

O *LabVIEW™* é um *software* de Instrumentação Virtual desenvolvido pela empresa *National Instruments*, que se caracteriza por sua linguagem de programação (denominada linguagem G), que é gráfica e intuitiva. O *software* também proporciona ao usuário a possibilidade de realizar a aquisição de sinais, processamento e análise em um mesmo ambiente (LA BANCA; MENDES JÚNIOR; STEVAN Jr, 2016).

Seu ambiente de programação é denominado Instrumento Virtual (VI) e divide-se em uma interface em que é desenvolvida a lógica da aplicação, chamada de Diagrama de Blocos, e outra interface denominada Painel Frontal onde são exibidos ao usuário os controles e indicadores da aplicação. Além disso, o *LabVIEW™* é capaz de exportar dados para utilização em outros *softwares* (LA BANCA; MENDES JÚNIOR; STEVAN Jr, 2016).

4 DESENVOLVIMENTO

Após ter sido realizada a revisão bibliográfica dos temas que norteiam este trabalho, passou-se a fase de desenvolvimento dos circuitos eletrônicos. Foram verificadas topologias que se mostravam capazes de realizar a medição do valor de capacitância, no entanto em virtude de o sensor capacitivo utilizado neste estudo possuir valores de capacitância reduzidos, na casa de dezenas de pico Farads, nem todos atendiam a faixa de valores desejada.

Além disso levou-se em consideração a complexidade de cada circuito, a disponibilidade no Brasil dos componentes eletrônicos necessários, o tipo de resposta fornecida por ele, uma vez que a capacitância é uma grandeza que demanda equipamentos dedicados para ter seu valor medido.

Como os circuitos implementados tem por objetivo facilitar o processo de medição do valor de capacitância no sensor capacitivo, eles devem possuir a capacidade de transformar o valor de capacitância em outra grandeza elétrica que possa ser de mais fácil leitura. Tal medida se faz necessária devido ao fato de quando se utiliza um sistema microcontrolado realizando a aquisição de um sinal, por exemplo, ele não é capaz de ler de maneira direta um valor de capacitância.

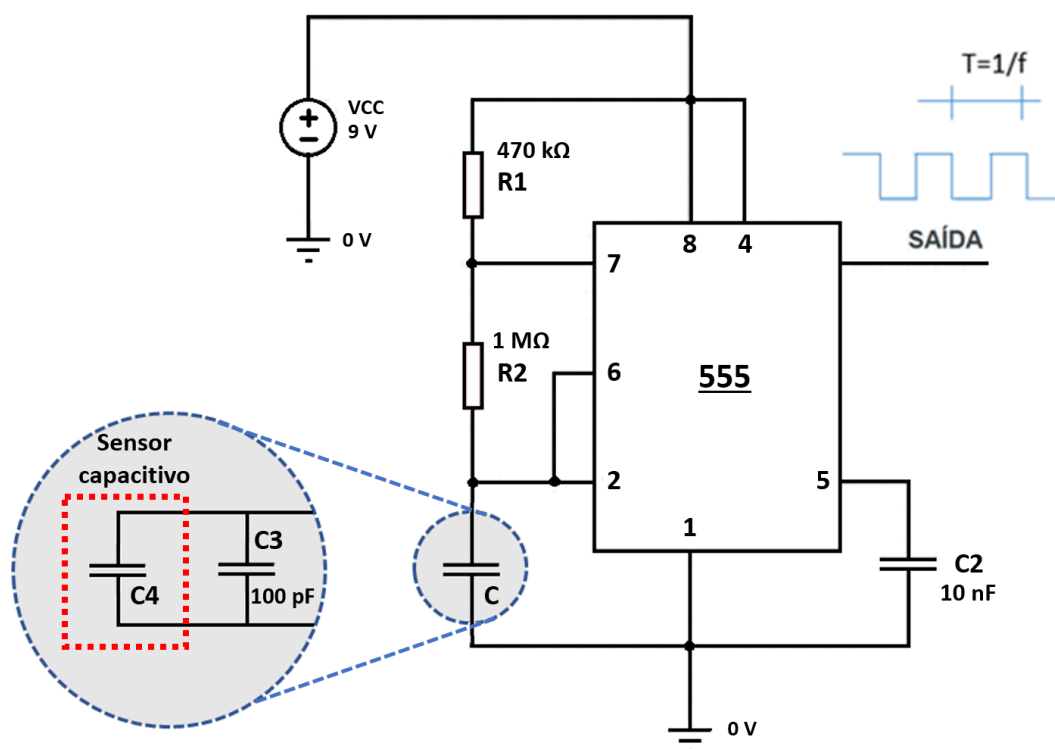
Com isso, definiu-se que os circuitos a serem implementados forneceriam suas respostas em valores de tensão elétrica e de frequência. Assim poderiam ser empregados tanto em entradas analógicas (para os valores de tensão) e em entradas digitais (no caso de frequência) de sistemas que utilizem microcontroladores até sistemas embarcados mais complexos.

Para implementação do primeiro circuito, denominado de circuito (1), optou-se por uma topologia de menor complexidade e tamanho utilizando o circuito integrado 555, adaptada para atender o propósito deste trabalho. Baseado no funcionamento de um oscilador, o circuito implementado utilizou um circuito integrado (CI) TLC555 (TEXAS INSTRUMENTS, 2016) em sua configuração de oscilador astável.

O CI TLC555 é uma das variações existentes do 555. Seu funcionamento é semelhante ao CI convencional, porém apresenta algumas vantagens que favorecem sua utilização para esse trabalho, tais como menor consumo de energia, capacidade de operar com valores de capacitância menores, maior precisão e menores picos de tensão na saída quando há mudança do nível lógico.

A topologia utilizada nesse circuito está ilustrada na Figura 17.

Figura 17 – Circuito (1) baseado na conversão de capacitância em frequência



Fonte: Datasheet TLC555 (2016), adaptado

O circuito implementado empregou o modo de operação astável, onde é utilizado um arranjo de capacitor e resistores (arranjo RC) que geram uma onda quadrada na saída com frequência fixa, conforme equação existente na folha de dados do componente (TEXAS INSTRUMENTS, 2016) fornecida pelo fabricante e mostrada na equação (19).

$$f = \frac{1,44}{[(R_1 + 2 R_2) (C_3 + C_4)]} \quad (19)$$

Como nota-se na equação (19) o valor da frequência de saída do CI 555 é inversamente proporcional ao valor de capacitância, uma vez que nessa montagem, os valores dos resistores R1 e R2 permanecem inalterados. Sabendo que a alteração da capacitância se dá pela variação apresentada no sensor capacitivo, tem-se que variação da frequência de saída do circuito está relacionada ao sensor utilizado.

Por trabalhar com valores reduzidos de capacitância, adicionou-se em paralelo ao sensor capacitivo um capacitor comercial identificado na Figura 17 por C3,

a fim de evitar que o valor de capacitância visto pelo circuito atingisse níveis muito baixos e ocasionasse, por consequência, valores de frequência na saída muito elevados. Isso se deve ao fato de que capacitores associados em paralelo têm seus valores de capacitâncias somados, sendo essa soma chamada de capacitância equivalente.

Justifica-se a limitação dos valores máximos de frequência de operação do 555 pois quando se utilizam valores baixos, na casa de unidades de kHz, há maior linearidade do sinal (TEXAS INSTRUMENTS, 2015), além de tornar mais fácil o monitoramento por sistemas microcontrolados pois exige uma menor taxa de amostragem para leitura do sinal. Para definição dos valores dos componentes utilizados definiu-se a faixa de capacitância a ser medida de 10 pF a 100 pF, atendendo ao sensor capacitivo.

Utilizando-se da equação (19) e tendo os limites de valores de frequência e capacitância definidos, chegaram-se aos valores dos resistores R_1 e R_2 a serem empregados na montagem, sendo utilizados os resistores de valor comercial mais próximo para implementação. Após a definição de todos dos valores de componentes, optou-se por realizar a simulação numérica no *software* Proteus® para verificar o funcionamento do circuito e se apresentava comportamento condizente ao esperado.

Com a simulação realizada pode-se constatar que o circuito atuava conforme o previsto. Passou-se por conseguinte para a fase de montagem utilizando componentes reais em *protoboard*, na qual podem ser realizados testes preliminares e os componentes empregados podem ser facilmente substituídos ou rearranjados. Implementado em bancada, foram realizados testes iniciais que mostraram que o circuito estava em operação.

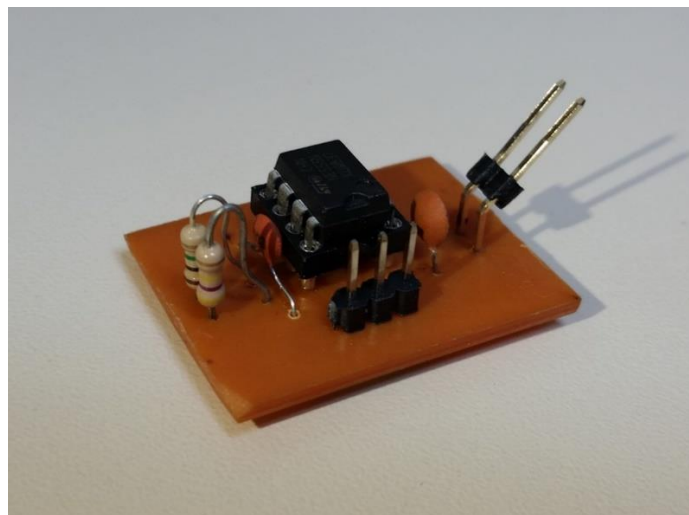
Após a realização dos testes em *protoboard*, que mostraram que o circuito proposto apresentava o comportamento esperado, passou-se ao processo de implementação em Placa de Circuito Impresso (PCI). Tal medida se faz necessária em vista da necessidade de minimizar a incidência de interferência por elementos parasitas no circuito, além de ser necessária para que ele possa ser utilizado para a aplicação proposta.

Desenvolveu-se o *layout* da PCI aplicando técnicas que visam torná-lo menos suscetível a incidência de elementos parasitas, reduzindo o comprimento das trilhas por exemplo, em *software* específico, e realizou-se o processo de construção da placa. Esse processo envolve a transferência térmica do *layout* à placa de cobre

virgem, corrosão em uma solução de Percloroeto de Ferro, furação e soldagem dos componentes eletrônicos.

O circuito montado, que foi utilizado para conexão ao sensor, pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 – Circuito (1) implementado em PCI



Fonte: Aatoria própria

Baseado no circuito responsável por fornecer uma saída em tensão elétrica, realizou-se a definição dos valores dos componentes a serem empregados no segundo circuito (denominado Circuito (2)) para atender os valores de capacitância para a aplicação proposta.

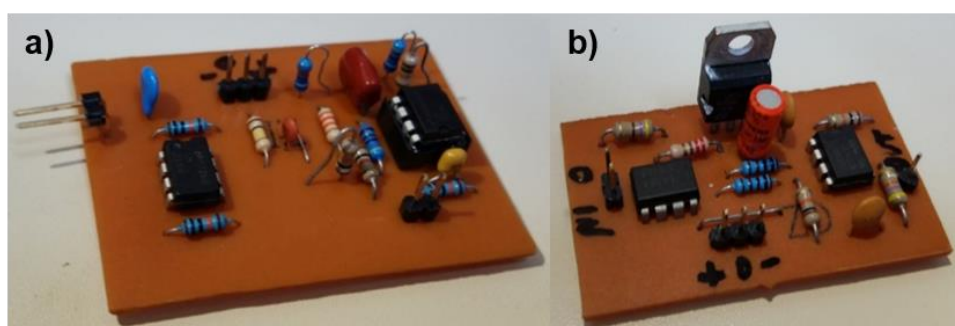
Antes da implementação final, foram realizadas simulações numéricas para o segundo circuito a fim de verificar o funcionamento e ajustar os valores dos componentes a serem empregados. Feito isso, montou-se o circuito em *protoboard* para realização de testes e possíveis ajustes que, por ventura, fossem necessários. Os testes preliminares apresentaram um resultado condizente ao esperado, então passou-se à fase de implementação do circuito final.

Quando da implementação dos circuitos, as partes (A) e (B) foram dispostas na mesma placa de circuito impresso visando inibir a incidência de elementos parasitas, possuindo os terminais em uma das extremidades da placa para conexão ao sensor capacitivo sem a necessidade do uso de outros condutores. O circuito com os dois estágios de amplificação, parte (C), foi inserido em outra placa de circuito impresso. Além disso, ambas as placas tiveram seus *layouts* desenvolvidos de

maneira a ficarem com tamanho reduzido e trilhas curtas, diminuindo a possibilidade de elementos parasitas interferirem na medição realizada.

O circuito implementado e utilizado para testes é composto pelas placas mostradas na Figura 19. A primeira placa (Figura 19 a)), é responsável por realizar a conversão de capacitância em tensão elétrica, e nesta pode-se notar a existência dos terminais que são conectados ao sensor capacitivo. Já a segunda placa (Figura 19 b)), é responsável por amplificar o sinal fornecido pela primeira placa.

Figura 19 – Circuito (2) implementado em PCI; a) Partes (A) e (B); b) Parte (C)



Fonte: Autoria própria

A equação (20) fornece o valor da saída em tensão no segundo circuito, composto pelas partes (A), (B) e (C), relacionada a capacitância medida no sensor capacitivo.

$$V = 10 \times \left(\frac{668231,3 \cdot 10^{-9}}{(219760 \times C_X) + 0,21976 \cdot 10^{-3}} - 3,92 \right) \quad (20)$$

Com os circuitos (1) e (2) implementados e em funcionamento, tem-se a necessidade de verificar se ambos são capazes de operar de maneira adequada em toda a faixa de capacitância desejada, definida anteriormente como sendo de 10 pF a 100 pF. Para realização dos testes utilizaram-se capacitores cerâmicos comerciais, sendo estes associados para obtenção de valores intermediários na faixa de 10 pF a 100 pF.

Como tais componentes possuem uma tolerância em relação ao seu valor teórico, utilizou-se um equipamento específico para verificação dos valores reais de capacitância de cada capacitor, neste caso a Ponte RLC Instek LCR-819 configurada para realizar a medição na frequência de 10 kHz e tensão de 1 V. Essa verificação é

necessária pois os circuitos implementados neste trabalho fornecem os dados com base na medição do valor real de cada componente, e não de seu valor teórico, assim é possível garantir confiabilidade aos dados obtidos.

A coleta dos dados foi realizada utilizando a DAQ (*Data Acquisition*), *hardware* da National Instruments para condicionamento de sinais, com uma interface que foi desenvolvida utilizando-se o *software* LabVIEW™. Para cada circuito foram realizadas 10 medições, uma para cada um dos valores de capacitor, iniciando-se com o de 10 pF, e este valor tendo um incremento de 10 pF a cada nova medição, até que fosse atingido o valor de 100 pF na última. Todas as medições foram feitas utilizando uma taxa de amostragem de 70 kHz, que atendeu de maneira satisfatória ambos os circuitos. Para que houvesse um padrão entre todas as coletas, cada medição realizada em um capacitor teve sua duração definida em 10 segundos.

Após a coleta dos dados utilizando os circuitos em capacitores comerciais, utilizou-se também o *software* LabVIEW™ para realização do processamento. Cada arquivo gerado na medição teve seus dados divididos em 70 partes e realizou-se o cálculo da frequência de cada uma dessas partes, e posteriormente fez-se o cálculo da média aritmética dos 70 valores obtidos para obtenção do valor final medido. Adotou-se este processo para que pudesse ser verificado o comportamento dos circuitos em diferentes momentos das medições.

4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para realização dos testes com os combustíveis, fez-se necessário realizar o preparo das amostras a serem utilizadas com as diferentes misturas de etanol/gasolina. Nos postos de combustíveis o consumidor final tem a sua disposição a gasolina tipo C, com adição de etanol em sua composição. Para esse estudo foi necessária a utilização de outras proporções de etanol/combustível que não a encontrada na gasolina comercial, assim como de gasolina sem adição de etanol.

Realizou-se então o processo de separação do etanol presente na gasolina por meio da adição de água ao combustível. A água é um composto polar, a gasolina é apolar, e o etanol possui uma parte polar e outra apolar. Quando o etanol está associado a gasolina, a sua parte apolar é atraída pelas moléculas de gasolina por conta da força de dipolo induzido. Quando se adiciona água, a parte polar do etanol é

atraída pelas moléculas de água, então formam-se ligações de hidrogênio que são mais fortes que as do tipo dipolo induzido, separando o etanol da gasolina (FERNANDES, 1997).

A Figura 20 apresenta o processo de separação do etanol presente na gasolina tipo C.

Figura 20 – Processo de separação da gasoline e etanol



Fonte: Aatoria própria

Após o processo de separação, obteve-se gasolina quase sem nenhum etanol acrescido. Não se pode garantir que todo o etanol foi extraído em função dos equipamentos utilizados não serem os mais adequados para o processo, além de não haver meio de realizar tal conferência senão em laboratório específico. No entanto o produto obtido atende as necessidades desse estudo, sendo aqui denominada de gasolina pura, e é utilizada como matéria-prima para composição das amostras.

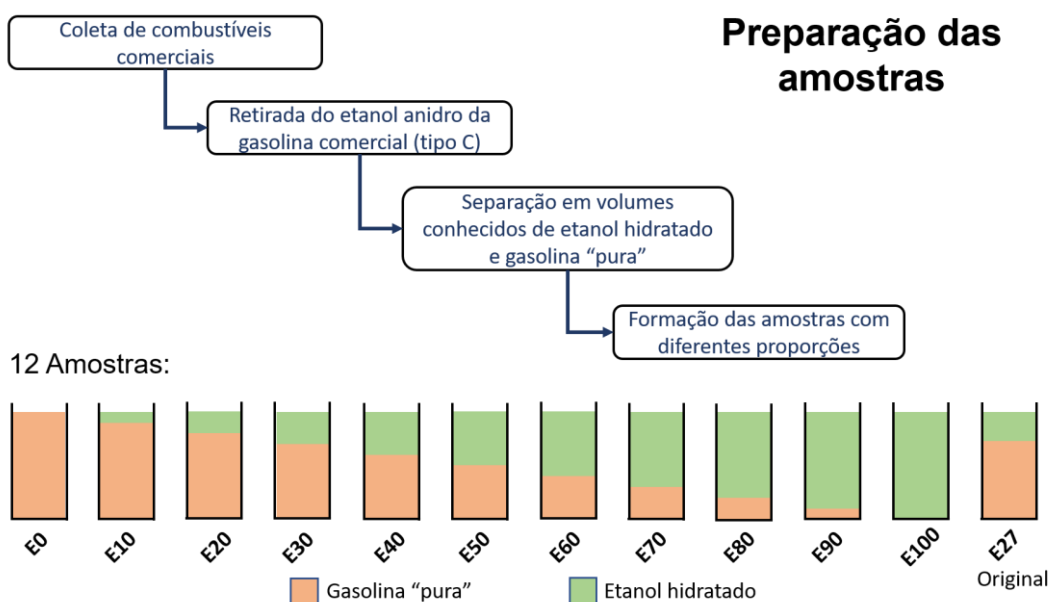
Adquiriu-se etanol hidratado para realizar a preparação das misturas utilizadas como amostra. Nesse caso não se realizou o processo de retirada da água que é adicionada ao etanol pelos distribuidores pois demandaria recursos avançados para tal, não sendo possível sua realização para esse estudo. Em posse dos combustíveis isolados, passou-se a confecção das misturas conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Identificação das amostras de combustível

Denominação – Amostra	Etanol (em %)	Gasolina (em %)
E0	0	100
E10	10	90
E20	20	80
E27	27	73
E30	30	70
E40	40	60
E50	50	50
E60	60	40
E70	70	30
E80	80	20
E90	90	10
E100	100	0

Fonte: Autoria própria

Pode-se verificar na Figura 21 o fluxograma que demonstra o processo de preparação das amostras de combustível para realização dos testes.

Figura 21 – Fluxograma de preparação das amostras

Fonte: Autoria própria

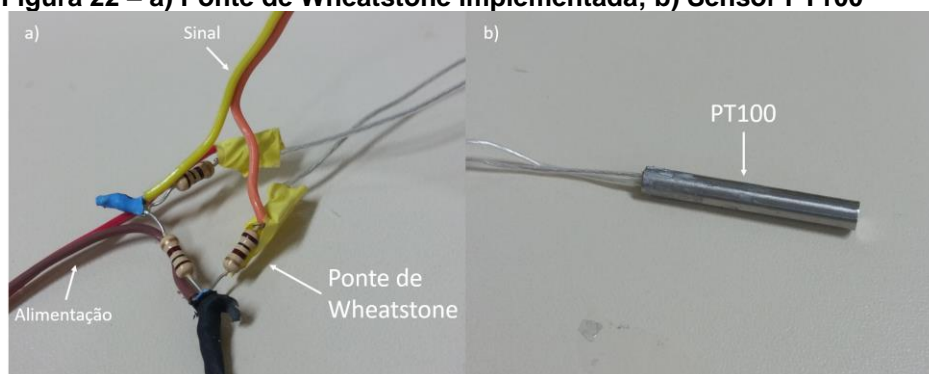
Implementou-se então uma planta para realização dos testes utilizando os combustíveis e o sensor capacitivo. Por se tratar de líquidos inflamáveis, todo o

processo tem de ser realizado de forma adequada, a fim de minimizar os riscos de acidente. Toda a montagem deu-se nas dependências da UTFPR, utilizando-se de materiais adquiridos para este fim.

A planta implementada possui um reservatório, com capacidade de 2 litros para o combustível, o sensor capacitivo utilizado nos testes, um invólucro de borracha com uma termorresistência (PT100) em seu interior para monitoramento da temperatura, e um sensor comercial de combustíveis para validação das amostras. Além desses, uma bomba de combustível é responsável por realizar a circulação do combustível que saía do reservatório por uma mangueira, e após percorrer todos os equipamentos da planta retornava ao reservatório.

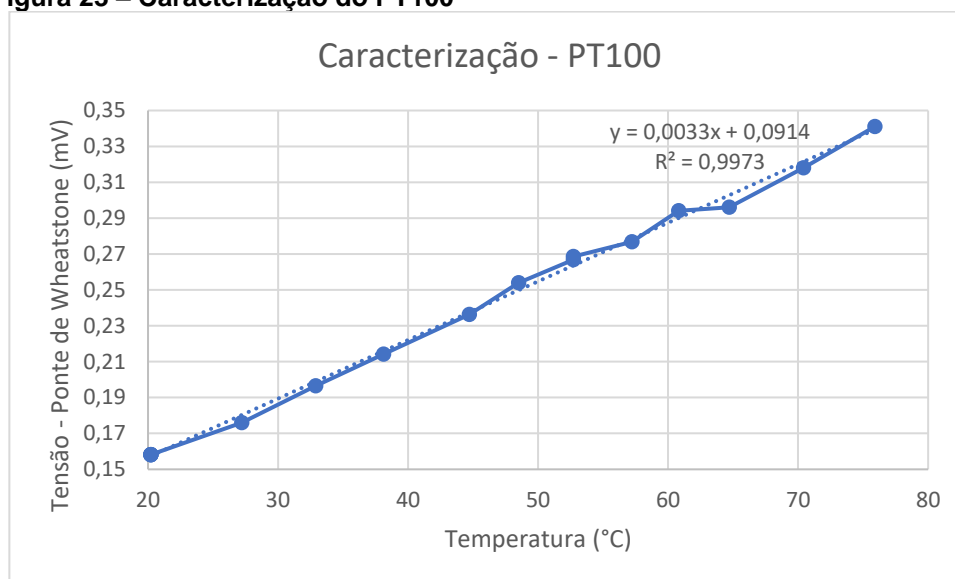
A Figura 22 apresenta a montagem da Ponte de Wheatstone e o PT100 empregada nos testes. Utilizaram-se resistores de precisão que possuem tolerância de até 1% em seu valor teórico de $100\ \Omega$, e estes tiveram seus valores aferidos previamente para garantir que seus valores reais estavam na faixa esperada. Para alimentação utilizou-se a DAQ, que fornece a tensão de 5 V necessária para funcionamento da Ponte.

Figura 22 – a) Ponte de Wheatstone implementada; b) Sensor PT100



Fonte: A autoria própria

Realizou-se a caracterização do PT100 para obtenção da relação de temperatura por tensão, e utilizou-se um termômetro para medição da temperatura de água em aquecimento. Os valores de temperatura obtidos com o termômetro foram relacionados com as tensões apresentadas pela Ponte de Wheatstone e são mostrados na Figura 23, bem como a equação que relaciona a temperatura medida com a tensão.

Figura 23 – Caracterização do PT100

Fonte: Autoria própria

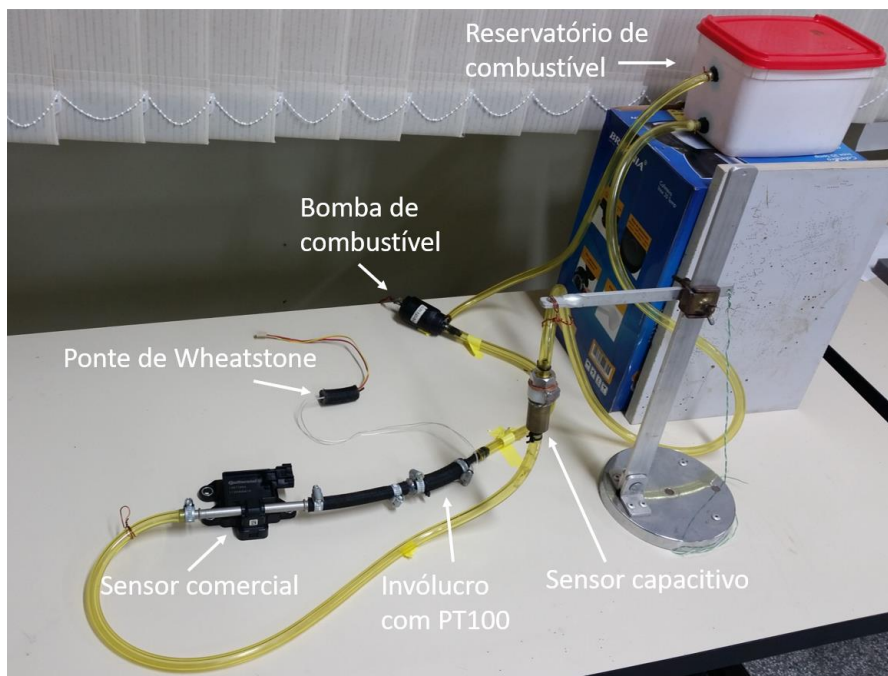
Com o objetivo de ocasionar uma variação da temperatura do combustível para verificação do comportamento do sensor capacitivo, implementou-se uma técnica para aquecimento do líquido. Confeccionou-se uma serpentina em tubo de cobre que foi conectada a um reservatório onde adicionava-se água quente, e uma bomba responsável pela circulação dessa água. Ao ser imersa no reservatório da planta, a serpentina realizava o aquecimento do combustível. A Figura 24 traz a serpentina confeccionada e utilizada nos testes.

Figura 24 – Serpentina para aquecimento do combustível

Fonte: Autoria própria

Após montada, a planta foi disposta conforme mostrado na Figura 25 para realização dos testes.

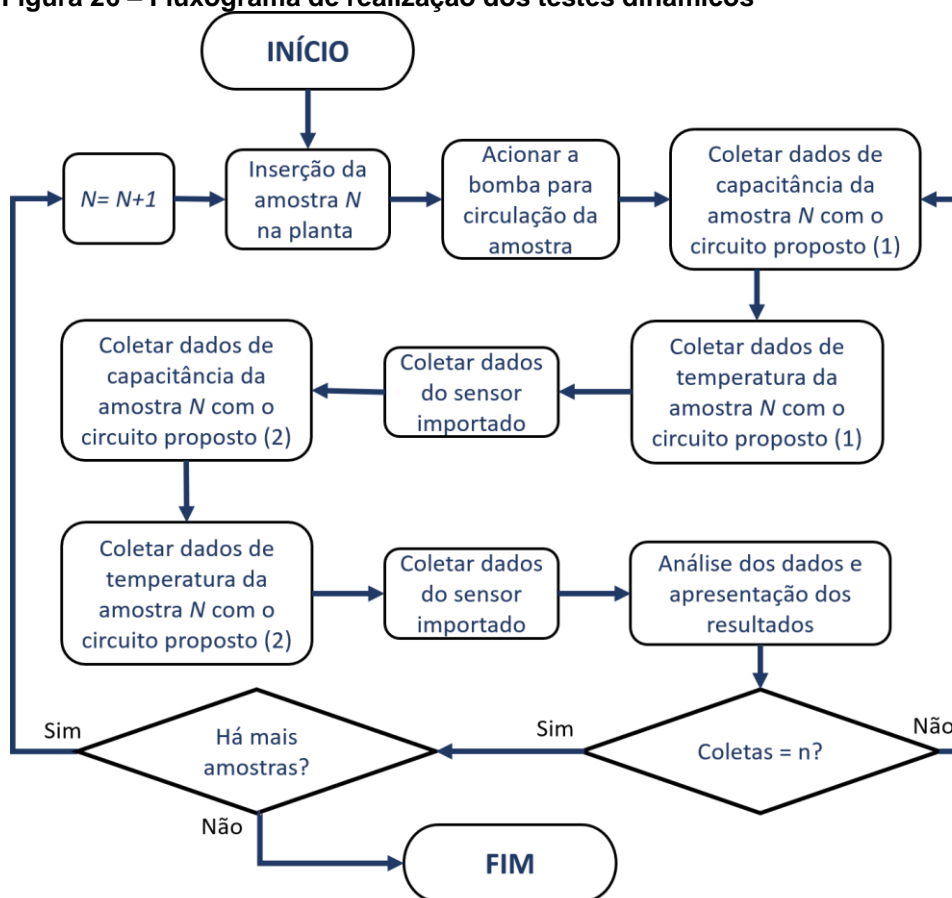
Figura 25 – Planta de testes montada



Fonte: Autoria própria

O fluxograma mostrado na Figura 26 apresenta o procedimento adotado na realização dos testes com as amostras na planta, onde realizou-se a aquisição dos dados para posterior análise.

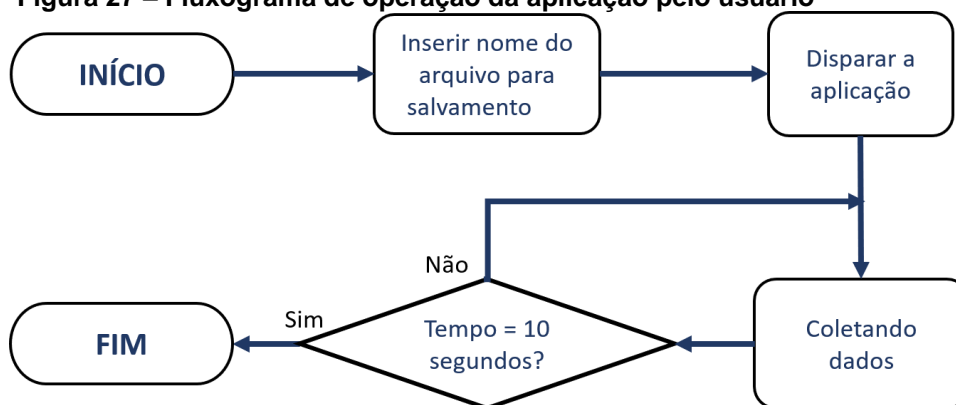
Figura 26 – Fluxograma de realização dos testes dinâmicos



Fonte: Autoria própria

Por fim, implementou-se uma interface para aquisição dos dados utilizando o *software LabVIEW™*, que realizava a medição e gravação dos dados provenientes das 4 variáveis envolvidas, sendo elas a frequência do sensor comercial, a frequência de saída do circuito (1), a tensão elétrica de saída do circuito (2) e a tensão elétrica proveniente da Ponte de Wheatstone. A cada medição realizada é gerado pelo *software* um arquivo de texto com os dados obtidos e fluxograma da Figura 27 apresenta a sequência da aplicação.

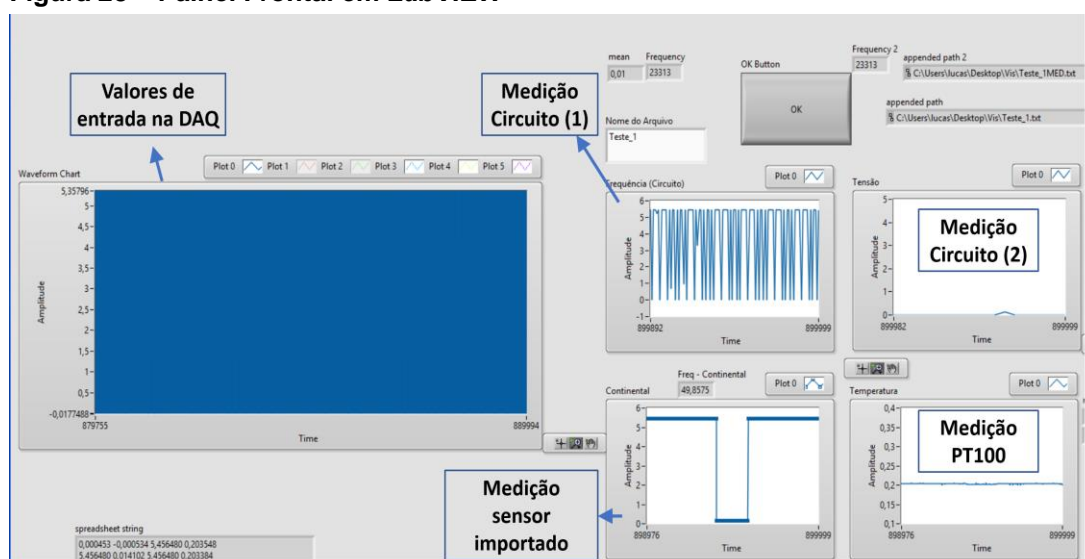
Figura 27 – Fluxograma de operação da aplicação pelo usuário



Fonte: Autoria própria

O painel frontal visto pelo usuário durante a medição é mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Painel Frontal em *LabVIEW™*



Fonte: Autoria própria

4.2 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS

Após definidos os procedimentos e concluída a montagem da planta de testes, iniciou-se então a coleta de dados utilizando o sensor capacitivo associado aos circuitos (1) e (2) e as amostras de combustíveis com diferentes proporções. Para cada amostra de combustível foram realizadas 20 medições, sendo 10 com cada um dos circuitos implementados. Semelhante aos testes realizados com capacitores

comerciais, utilizou-se a DAQ (*Data Acquisition*) para realizar o condicionamento dos sinais em conjunto com o *LabVIEW™*.

Das 10 medições realizadas com cada circuito, 5 foram feitas com o combustível em repouso no sensor, e outras 5 com o combustível circulando pela planta para simular uma situação mais próxima a um veículo, em que o combustível circula entre o tanque e a injeção eletrônica, e a medição seria feita nesse percurso.

Após coletados e processados, os dados foram preliminarmente analisados para identificar possíveis valores fora do esperado ocasionados por erros no processo de medição. Então, obteve-se a média aritmética dos valores obtidos para cada amostra, sendo o resultado dessa média o valor de medição a ser definido para aquela amostra. Com todos os valores das amostras registrados e também com os valores reais obtidos com a Ponte RLC, calculou-se o erro percentual para cada amostra e o desvio padrão.

5 RESULTADOS

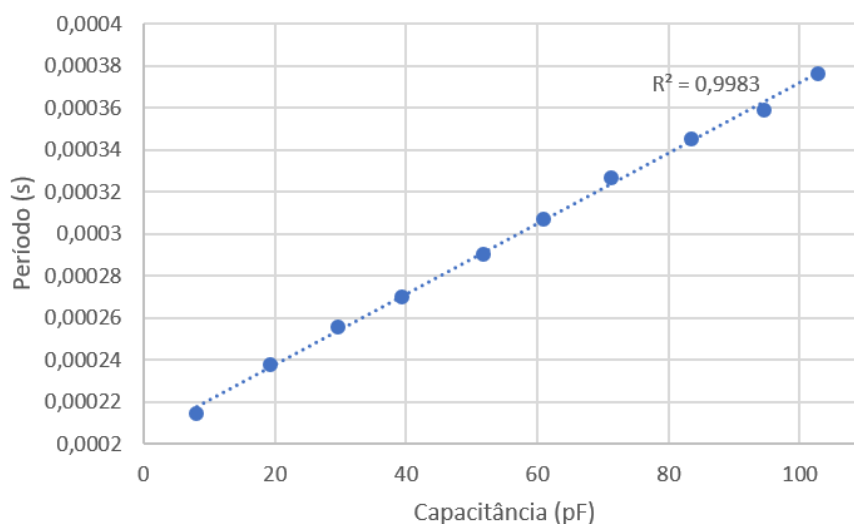
Nesta seção serão apresentados os dados obtidos nas coletas de dados realizadas com os circuitos (1) e (2).

5.1 ANÁLISE DOS CIRCUITOS EM LABORATÓRIO:

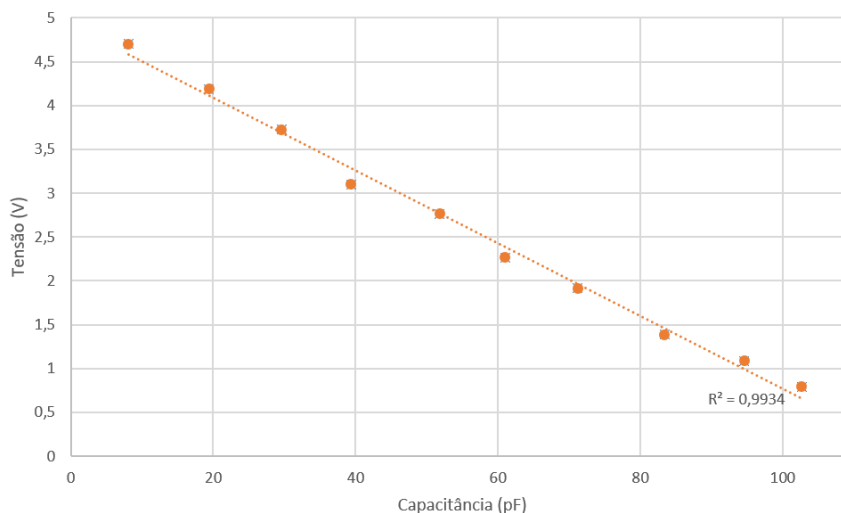
Ambos os circuitos foram verificados em laboratório e de maneira complementar, medidos os valores de saída de frequência e tensão utilizando um osciloscópio a cada nova medição realizada com os capacitores comerciais. Dessa forma, pode-se confrontar os dados medidos com auxílio do osciloscópio com os obtidos após o processamento em *LabVIEW™* das coletas realizadas, assegurando que estavam em conformidade com o valor esperado.

Os dados obtidos com os circuitos (1) e (2) são mostrados, respectivamente, na Figura 29 e Figura 30. Para tornar mais fácil a visualização no gráfico optou-se em se apresentar os dados do circuito (1) com o valor do período correspondente a frequência obtida em cada ponto, sendo possível obter o período realizando a inversão do valor de frequência.

Figura 29 - Resposta do circuito (1) – Capacitância x período



Fonte: Autoria própria

Figura 30 - Resposta do circuito (2) – Capacitância x tensão elétrica

Fonte: Autoria própria

Para avaliação dos dados obtidos observou-se o coeficiente de determinação, mostrado nos gráficos como R^2 , que se trata de uma correlação entre as duas séries de dados apresentadas. Ele indica o poder preditivo da reta mostrada e seu valor varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 indica melhor capacidade de regressão da reta. Em cada gráfico gerado com os dados obtidos, foi obtida a reta de tendência, que revela uma relação linear entre as variáveis envolvidas, e o valor de R^2 é obtido por meio dessa reta de tendência.

Como os resultados dos testes realizados com capacitores comerciais mostraram-se satisfatórios, passou-se então à etapa de testes com o sensor capacitivo e os combustíveis.

5.2 APLICAÇÃO EXPERIMENTAL – PLANTA DE TESTES

Para possibilitar a visualização dos dados, plotaram-se em gráficos que relacionam a saída dos circuitos implementados a concentração de etanol presente em cada amostra utilizada. Dessa forma, o comportamento do sinal pode ser observado em toda a faixa amostral.

A Tabela 5 apresenta as concentrações reais de etanol em cada uma das amostras segundo o sensor comercial, sendo esses valores utilizados como referência na análise dos dados provenientes dos circuitos implementados.

Tabela 5 – Concentração de etanol nas amostras utilizadas

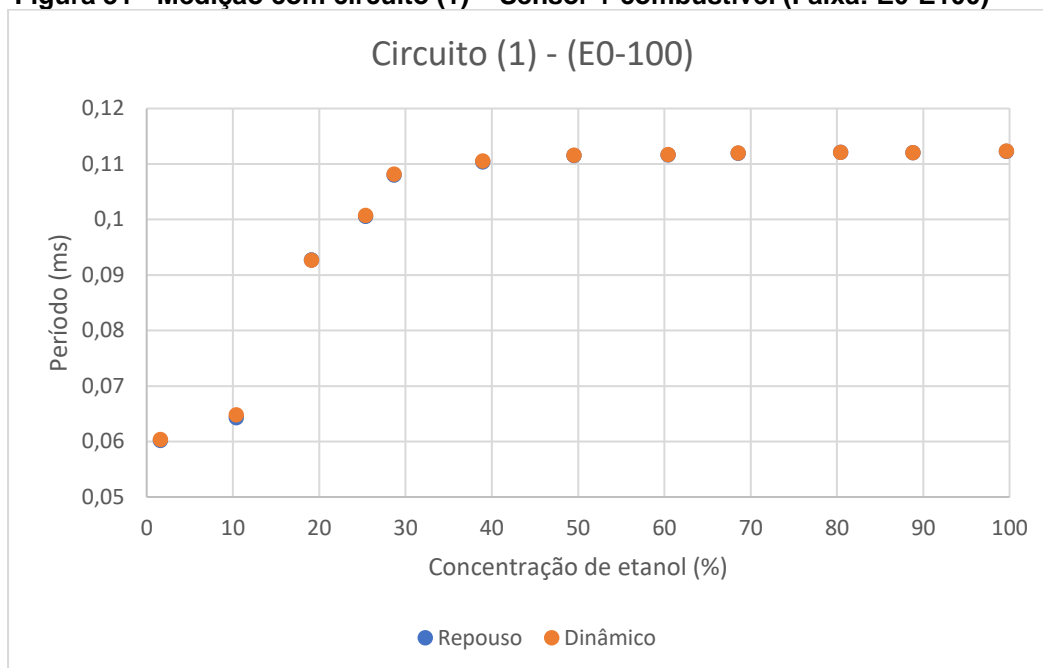
Denominação – Amostra	Concentração teórica (em %)	Concentração real (em %)	Erro percentual
E0	0	1,62	1,62
E10	10	10,41	4,12
E20	20	19,12	4,68
E27	27	25,38	6,70
E30	30	28,67	4,40
E40	40	38,96	2,58
E50	50	49,52	0,95
E60	60	60,44	0,74
E70	70	68,57	2,03
E80	80	80,43	0,54
E90	90	88,82	1,30
E100	100	99,67	0,33

Fonte: Autoria própria

A variação existente entre os valores teóricos e reais de concentração de etanol nas amostras deve-se ao processo empregado para obtenção da gasolina sem etanol por meio do processo de separação com adição de água, e também devido a volatilidade da gasolina. No entanto, os valores reais de concentração aproximam-se dos valores teóricos, permitindo a utilização destas amostras nos testes.

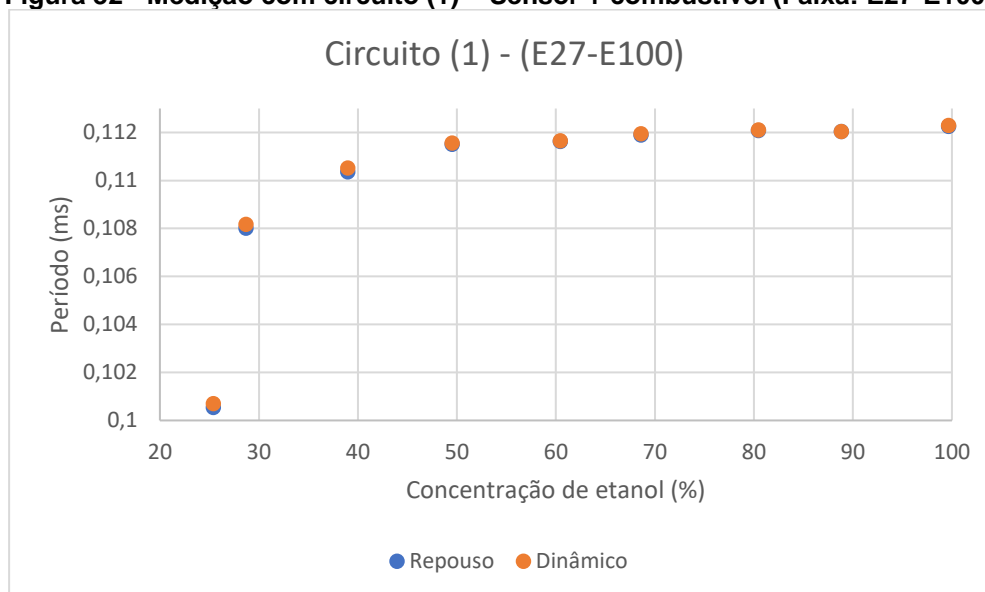
A saída fornecida pelo circuito (1) é em frequência, mas para proporcionar uma melhor visualização gráfica dos dados obtidos optou-se por converter o valor de frequência em período, para então se obterem os gráficos correspondentes. Tal conversão ocorre pelo cálculo do valor inverso da frequência para obter-se o período equivalente.

A Figura 31 apresenta o comportamento do circuito (1) em relação as amostras quando o combustível permanecia em repouso, ou seja, não estava circulando pela planta de testes. Também apresenta o comportamento quando o combustível estava circulando pela planta de testes durante toda a medição com o auxílio da bomba de combustível. Pode-se verificar que o comportamento do circuito (1) nas duas situações é aproximado.

Figura 31 - Medição com circuito (1) – Sensor + combustível (Faixa: E0-E100)

Fonte: Autoria própria

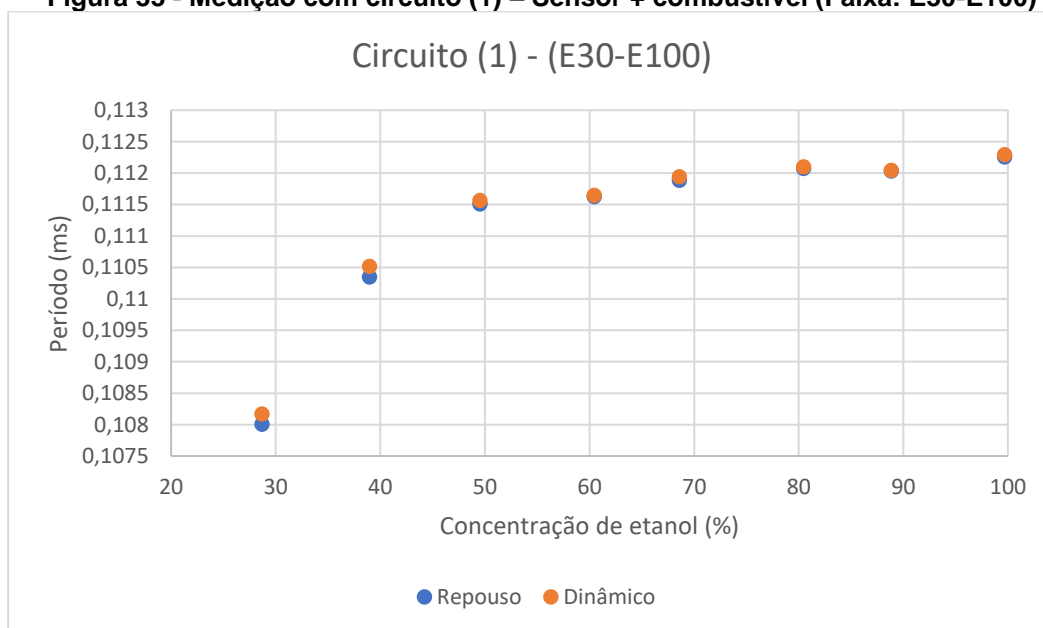
Pode-se ver verificar na Figura 32 o comportamento do circuito (1) nas amostras E27 a E100 quando o combustível está em repouso e circulando. Destaca-se esta faixa de amostras devido ao fato de ser a menor concentração possível de etanol com a qual o veículo seria abastecido, uma vez que é a concentração de etanol presente na gasolina tipo C vendida nos postos de combustíveis a qual o consumidor final tem acesso.

Figura 32 - Medição com circuito (1) – Sensor + combustível (Faixa: E27-E100)

Fonte: Autoria própria

Pode-se verificar que tanto em repouso quanto no modo dinâmico os valores apresentados pelo circuito (1) possuem proximidade quando comparados entre si.

Na Figura 33 pode-se visualizar o comportamento do circuito (1) na faixa de E30 a E100 com o combustível em repouso e circulando, onde a variação do valor do período é pequena, tornando difícil sua visualização sem o detalhamento dessa faixa de amostras específicas.

Figura 33 - Medição com circuito (1) – Sensor + combustível (Faixa: E30-E100)

Fonte: Autoria própria

Novamente, na faixa em destaque (E30-E100), pode-se notar a proximidade entre os valores apresentados pelo circuito (1) quando realizada a medição em repouso e de maneira dinâmica. Além disso, para esta faixa percebe-se que a variação do valor do período do sinal diminui com o aumento da concentração de etanol, dificultando a classificação da amostra devido a proximidade entre os valores apresentados para diferentes amostras.

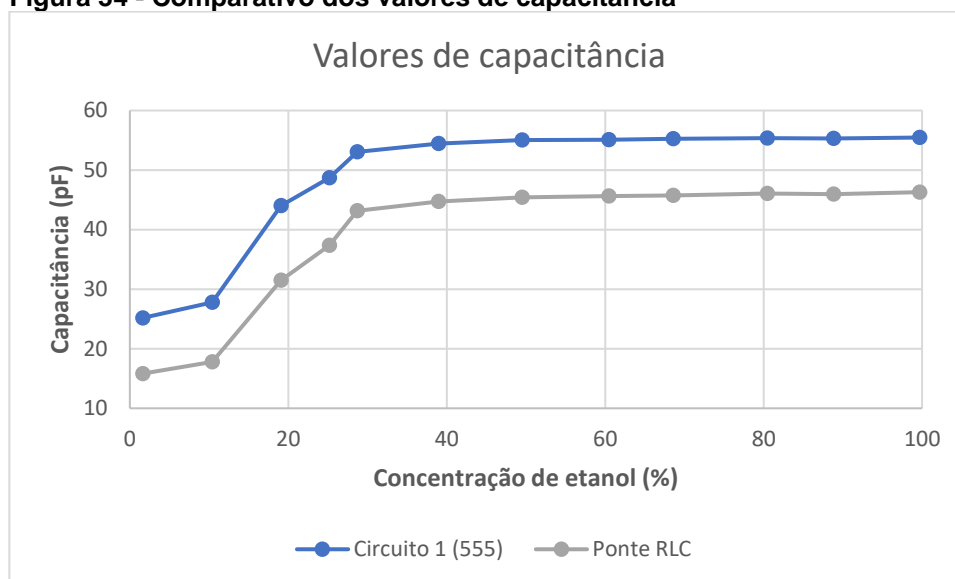
Com base nos valores de frequência obtidos para cada amostra com a medição realizada pelo circuito (1) e com o emprego desses valores na equação (19), pode-se obter o valor correspondente da capacitância medida pelo circuito (1). Adicionalmente, para fins de comparação, obtiveram-se os valores de capacitância no sensor capacitivo com cada uma das amostras utilizadas por meio da medição com a Ponte RLC. Os dados são apresentados na Tabela 6, e na Figura 34 que traz a comparação dos valores obtidos.

Tabela 6 – Valores de capacitância das amostras

Denominação – Amostra	Capacitância teórica – Circuito (1) (pF)	Capacitância na Ponte RLC (pF)
E0	25,15	15,82
E10	27,76	17,77
E20	44,00	31,52
E27	48,70	37,35
E30	53,05	43,13
E40	54,43	44,73
E50	55,03	45,41
E60	55,08	45,63
E70	55,26	45,73
E80	55,35	46,08
E90	55,31	45,94
E100	55,46	46,28

Fonte: Autoria própria

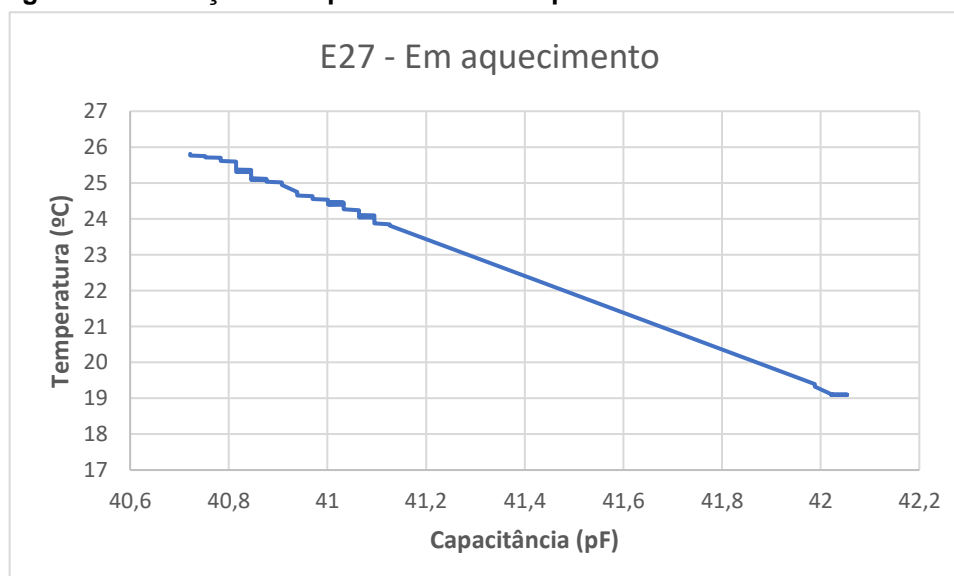
Figura 34 - Comparativo dos valores de capacitância



Fonte: Autoria própria

Há ainda a influência da temperatura do combustível no seu valor de capacitância. Na Figura 35 pode-se verificar que para a mesma amostra de combustível (E27), em processo de aquecimento, há variação no valor da capacitância medida pelo circuito (1). Isso ocorre devido ao fato da temperatura influenciar no valor das constantes dielétricas dos combustíveis, resultando na alteração da capacitância do sensor.

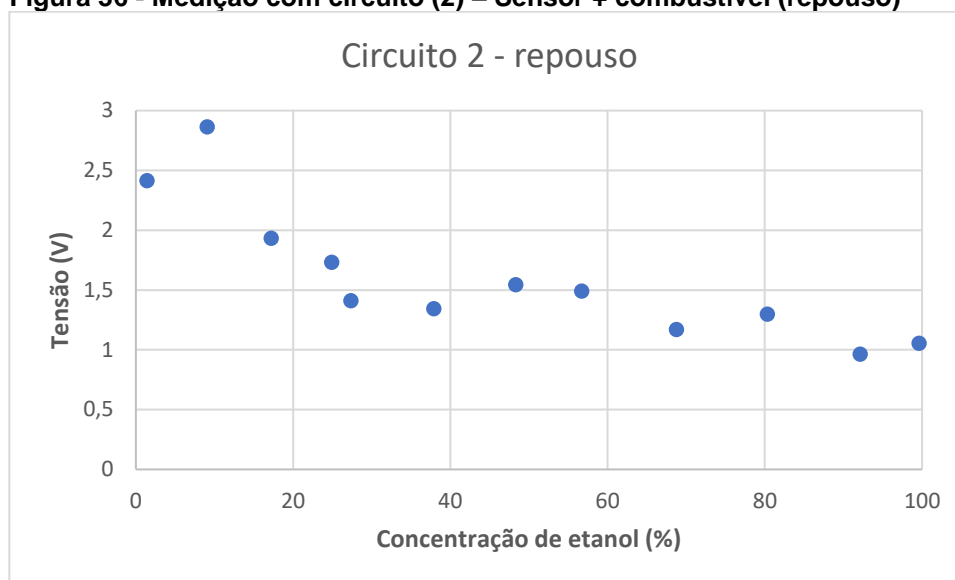
Figura 35 - Variação de capacitância com aquecimento do combustível



Fonte: Autoria própria

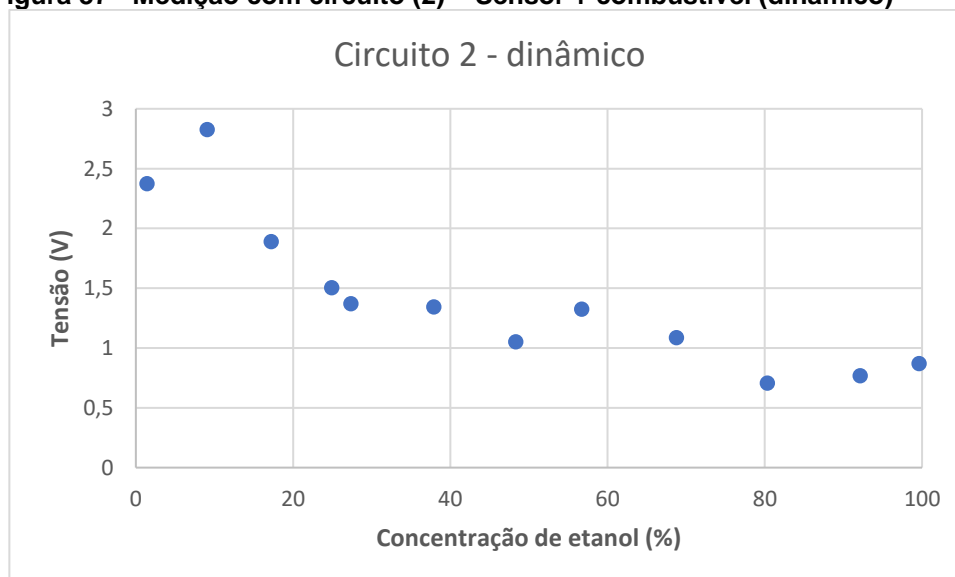
Para o circuito (2), foram utilizadas as mesmas amostras que com o circuito (1), logo as concentrações de etanol nas amostras são semelhantes as apresentadas pela Tabela 5. A Figura 36 e a Figura 37 apresentam o comportamento do circuito (2) quando o combustível permanecia em repouso e em circulação, respectivamente.

Figura 36 - Medição com circuito (2) – Sensor + combustível (repouso)



Fonte: Autoria própria

Figura 37 - Medição com circuito (2) – Sensor + combustível (dinâmico)



Fonte: Autoria própria

As respostas apresentadas pelo circuito (2), tanto com o combustível em repouso como em circulação, não apresentam uma relação condizente com a variação das amostras e, portanto, da capacitância. Dessa forma, sua utilização para medição

em conjunto ao sensor capacitivo torna-se inviável, uma vez que os dados obtidos mostram que o circuito não oferece uma resposta confiável.

No caso do circuito (2), seu comportamento se deu de maneira diferente de quando se utilizaram capacitores comerciais para realização dos testes iniciais. Naquela ocasião, o comportamento ocorreu como previsto, variando a tensão de saída de forma condizente a variação da capacitância medida, já com o sensor capacitivo não houve padrão na saída apresentada.

Alguns fatores podem justificar o fato do circuito (2) não atender de maneira adequada o sensor utilizado, tais como a oscilação na tensão de alimentação do circuito, que mesmo utilizando fontes exclusivas ainda estava sujeita a pequenas variações. Além disso, devido ao baixo valor de capacitância medido no sensor, o oscilador responsável por gerar a frequência a partir da medição apresentava variação de sua saída para um mesmo valor de capacitância, ocasionando uma instabilidade na tensão de saída.

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Com base nos valores obtidos com o circuito (1) e apresentados na Tabela 6, realizou-se a análise estatística dos resultados apresentados pelo circuito (1). Para o circuito (2), em virtude de não ter apresentado dados confiáveis quando utilizado junto ao sensor capacitivo, não se realizou esta análise.

A Tabela 7 apresenta a diferença de valores obtidos com a utilização do circuito (1) e com a Ponte RLC.

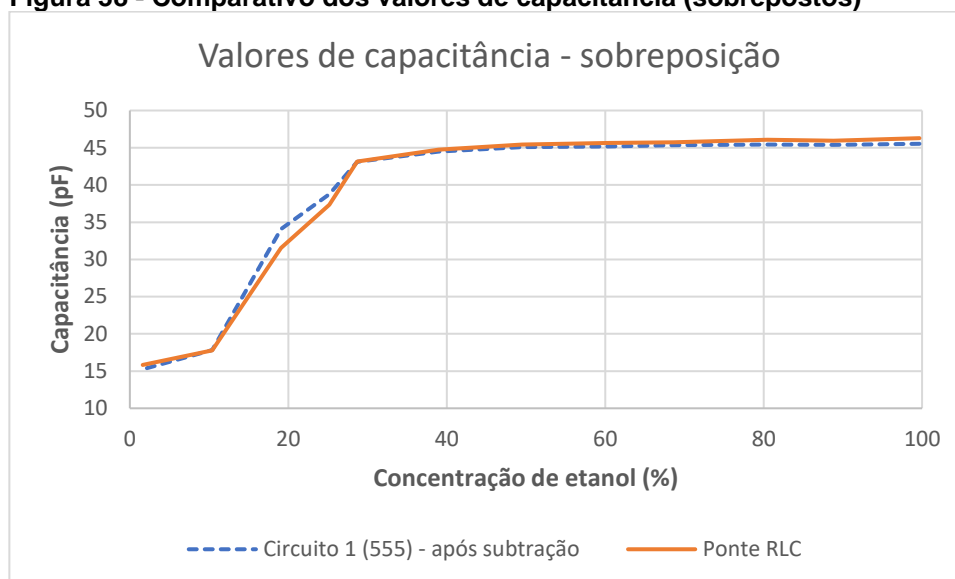
Tabela 7 – Comparativo de capacitâncias (Circuito (1) x Ponte RLC)

Denominação – Amostra	Capacitância teórica – Circuito (1) (pF)	Capacitância na Ponte RLC (pF)	Diferença (valor teórico x real)
E0	25,175	15,826	9,348
E10	27,763	17,774	9,988
E20	44,007	31,521	12,486
E27	48,702	37,350	11,351
E30	53,059	43,133	9,925
E40	54,430	44,733	9,696
E50	55,039	45,411	9,628
E60	55,089	45,638	9,451
E70	55,26	45,730	9,529
E80	55,353	46,087	9,265
E90	55,319	45,945	9,373
E100	55,464	46,284	9,180
Média:			9,935
Desvio padrão:			0,988

Fonte: Autoria própria

Com base no comparativo entre os valores de capacitância obtidos com o circuito (1) e com a Ponte RLC, pode-se verificar que há correspondência entre esses dois valores. Quando obtido o valor por meio da medição realizada pelo circuito (1) e aplicação na equação de resposta do circuito, comparado ao obtido na medição da Ponte RLC, há uma diferença de valor mas que ocorre em toda a faixa amostral. Considerando a existência dessa diferença em todas as amostras, obteve-se a diferença entre os valores de cada amostras e calculou-se a média dessas diferenças.

O valor médio das diferenças existentes entre os valores de capacitância apresentados na Tabela 7 foi de 9,935 e pode ser justificado pela existência de elementos parasitas que ocasionam essa variação na medição em toda a faixa de testes realizada. Além disso, em decorrência do efeito de franja, os valores de capacitância podem divergir até 30% do valor modelado (HOSSEINI; ZHU; PETER, 2007). Com base nessa informação fez-se a subtração nos valores de capacitância do circuito (1) do valor média da diferença, para gerar uma sobreposição no gráfico e facilitar a comparação das curvas obtidas. O resultado é mostrado na Figura 38.

Figura 38 - Comparativo dos valores de capacitância (sobrepostos)

Fonte: Autoria própria

Realizou-se a análise estatística dos valores de capacitância medidos com o circuito (1) e os apresentados pela Ponte RLC. Dessa maneira, fica evidenciado que há proximidade entre os valores obtidos de diferentes formas com as mesmas amostras, mostrando que o comportamento do circuito (1) atende ao previsto e é capaz de fornecer uma resposta com um bom nível de confiabilidade.

Quanto a diferença de valores da medição quando confrontados aos apontados pela Ponte RLC, pode-se atribuir a ocorrência dessa diferença a presença de capacitâncias parasitas que, apesar das medidas adotadas para evitá-las na construção do circuito, interferem na medição e na resposta do circuito. No entanto, como houve uma linearidade na diferença em toda a faixa medida, pode-se realizar a compensação desse valor via *software*.

Com base nos valores da diferença entre as amostras, fez-se a subtração do valor médio de diferença de cada um dos valores obtidos com o circuito (1), tal qual mostrado na Figura 38 onde os sinais estão sobrepostos, e a partir destes calculou-se o erro relativo percentual. Os valores de erro são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Erro percentual – Circuito (1)

Amostra	Erro percentual
E0	3,70
E10	0,29
E20	8,09
E27	3,79
E30	0,02
E40	0,53
E50	0,67
E60	1,06
E70	0,88
E80	1,45
E90	1,22
E100	1,63

Fonte: Aatoria própria

A partir dos valores de erro em cada amostra pode-se observar que a maioria apresentou um valor abaixo de 4%, o que indica um resultado satisfatório nas medições realizadas com o circuito (1). Há um maior valor de erro para a amostra E20, no entanto a faixa de amostras E27-E100 apresentou valores reduzidos de erro, faixa que os veículos podem ser abastecidos uma vez que a gasolina tipo C já possui 27% de etanol em sua composição, atingindo ao objetivo proposto no trabalho uma vez que nessa faixa o erro não ultrapassou 5%.

6 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo o desenvolvimento de um circuito capaz de realizar a identificação de combustíveis a partir de um sensor capacitivo. Diante das informações apresentadas no trabalho, fica evidenciada a necessidade do surgimento de sensores capazes de substituir a função realizada pela sonda lambda, pois esta possui inúmeras desvantagens e não oferece o melhor rendimento ao motor do veículo.

A partir da realização de testes com ambos os circuitos desenvolvidos com diferentes amostras de combustíveis, processamento e análise dos dados obtidos com as coletas de dados, pode-se concluir que para utilização no sensor capacitivo para combustíveis desenvolvido apenas o circuito (1) apresentou um resultado satisfatório, uma vez que o circuito (2) apresentou instabilidade durante sua operação.

Com base nos valores de capacitância obtidos tanto com o circuito (1) quanto com a Ponte RLC, percebe-se a proximidade destes valores para as amostras E30 a E100, principalmente nas amostras em que há maior concentração de etanol. Essa situação justifica-se pelo fato de gasolina e etanol possuírem valores de constante dielétrica bem diferentes, 2 para a gasolina e 25 para o etanol. Com isso, quando a concentração de etanol é elevada, a influência da gasolina é muito pequena, o que ocasiona valores de capacitância próximos e dificulta a identificação da amostra.

Além disso, pequenas diferenças de temperatura entre as amostras no momento da medição podem produzir diferentes valores de capacitância no sensor, podendo impossibilitar a correta identificação do combustível por parte do circuito.

Tem-se então a necessidade de avaliar em trabalhos futuros o comportamento de cada uma das amostras com a variação de sua temperatura, a fim de implementar um ajuste no circuito capaz de correlacionar o valor da capacitância com a temperatura do combustível, proporcionando maior confiança nas medições realizadas. Além disso, deve-se analisar a viabilidade de implementação de um circuito microcontrolado responsável exclusivamente por realizar as medições, considerando as condições de operação e limitações do microcontrolador utilizado, tais como erro, tempo de conversão do sinal, e a taxa máxima de amostragem.

Pode-se ainda estudar a possibilidade de implementar, de maneira adicional ao circuito desenvolvido nesse trabalho, outra forma de monitoramento das amostras no sensor. Uma opção que pode ter sua viabilidade avaliada é a medição do valor de

impedância apresentado pelo mesmo sensor e ser buscada uma relação entre esta propriedade e a capacitância, além da temperatura, para obter um melhor resultado.

Com o aprimoramento do circuito desenvolvido nesse trabalho com recursos adicionais para verificação do combustível e um sistema dedicado de aquisição de dados embarcado, pode-se implementar uma solução para uso associado ao sensor capacitivo em um veículo automotor substituindo a utilização da sonda lambda. Por fim, pode-se dizer que o circuito (1) implementado nesse trabalho apresentou resultados satisfatórios nos testes realizados e, portanto, o objetivo proposto foi atingido.

REFERÊNCIAS

ANDREOLI, Alexandre Giordani. **Injeção eletrônica programável para automóveis**. 2009. 129 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Gasolina**. 30 set. 2016. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/petroleo-derivados/155-combustiveis/1855-gasolina>>. Acesso em: 16 out. 2017.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Etanol**. 30 set. 2016. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/biocombustiveis/etanol>>. Acesso em: 16 out. 2017.

BOSCH. Sondas lambda Bosch. **Folder técnico**. 17 mar. 2015. Disponível em: <http://br.bosch-automotive.com/media/ww/products/downloads_12/Folder_Sonda_Lambda_2015.pdf>. Acesso em: 16 out. 2017.

BOSCH. Conselhos Bosch. **Folder técnico**. 1 dez. 2011. Disponível em: <http://pt.bosch-automotive.com/media/pt/parts/brochures_1/sondas_lambda/folheto_poster_tecnico_pt.pdf>. Acesso em: 9 nov. 2017.

CÂMARA, Júlio César Chaves. **MONITORAMENTO ELETRÔNICO DA MISTURA AR / COMBUSTÍVEL EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO**. 2006. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.

ELETROELETRONICA AUTOMOTIVA. Erros que abordam a sonda lambda. **Página informativa**. 1 dez. 2013. Disponível em: <<http://aparecidooliveira.blogspot.com.br/2013/12/erros-que-abordam-sonda-lambda.html>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

FAGGI, Rodrigo. **Formação de Mistura Ar Combustível em Motores de Ignição por Faísca a Quatro Tempos**. 2010. 60 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Automotiva, Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2012.

FERNANDES, Marilda. **INFLUÊNCIA DO ETANOL NA SOLUBILIDADE DE HIDROCARBONETOS MÓNOAROMÁTICOS EM AQÜÍFEROS CONTAMINADOS COM GASOLINA**. 1997. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

GOLDENSTEIN, Marcelo; AZEVEDO, Rodrigo Luiz Sias de. **Combustíveis alternativos e inovações no setor automotivo: será o fim da "era do petróleo"?**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 23, p. 235-267, mar. 2006.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física**. Vol. 3. 8 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**: Vol. 3: eletromagnetismo. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HIGA, Humberto Yuki. **Estudo e proposição de redução de consumo do motor flex-fuel**. 2011. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

HOSSEINI, M.; ZHU, G.; PETER, Y.-A. A new formulation of fringing capacitance and its application to the control of parallel-plate electrostatic micro actuators. **Analog Integr. Circuits Signal Process**. 2007, 53, 119–128.

LA BANCA, M. M. R.; MENDES JÚNIOR, J. J. A.; STEVAN Jr, S. L. EMG e LABVIEW: Conceitos e Aplicações. Seminário de Eletrônica e Automação, 2016, 2016, Ponta Grossa. Seminário de Eletrônica e Automação, 2016. v. 7.

LIMA, Charles Borges de. **TUTORIAL TÉCNICO: O TEMPORIZADOR 555**. Revista Ilha Digital, Florianópolis, v. 2, p.97-106, 2010. Disponível em: <<http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/>>. Acesso em: 13 dez. 2017.

MEASUREMENTS GROUP. **Student manual for strain gage technology**. Raleigh, 1993.

MOHAMMAD, Kaveh; THOMSON, Douglas J.. Differential Ring Oscillator Based Capacitance Sensor for Microfluidic Applications. **IEEE Transactions On Biomedical Circuits And Systems**, v. 11, n. 2, p.392-399, abr. 2017.

NOVUS. **TERMORRESISTÊNCIAS Pt100**. Novus Produtos Eletrônicos Ltda, 2008.

PERTENCE JR., Antonio. **Eletrônica Analógica** – Amplificadores operacionais e filtros ativos. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

PRO TUNE ELETRONIC SYSTEMS. Lambda. **Catálogo técnico**. 1 jan. 2013. Disponível em: <<http://www.protuneelectronics.com/index.php/detalhes-dicas/16/lambda>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

ROPPA, B. F. **Evolução do consumo de gasolina no Brasil e suas elasticidades: 1973 a 2003**. 64 f. Monografia (Bacharelado em Economia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SCHIRMER, Waldir Nagel; RIBEIRO, Camilo Bastos. Panorama dos combustíveis e biocombustíveis no Brasil e as emissões gasosas decorrentes do uso da gasolina/etanol. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 2, n. 2, p. 16-22, 2017.

SILVA, Inara Amoroso da. **Hidrogênio: Combustível do Futuro**. Ensaio e Ciência: C. Biológicas, Agrárias e da Saúde, v. 20, n. 2, p.122-126, 5 ago. 2016. Editora e Distribuidora Educacional.

STEVAN Jr., S. L.; PUCHTA, E. D. P.. **SENSOR CAPACITIVO PARA IDENTIFICAÇÃO DE COMPOSIÇÃO DE COMBUSTÍVEL PARA MOTORES AUTOMOTIVOS FLEX À COMBUSTÃO INTERNA**. 2015, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020150231806, título: "SENSOR CAPACITIVO PARA IDENTIFICAÇÃO DE COMPOSIÇÃO DE COMBUSTÍVEL PARA MOTORES AUTOMOTIVOS FLEX À COMBUSTÃO INTERNA", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial, Depositante (s): Sergio Luiz Stevan Junior; Erickson Diogo Pereira Puchta; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Depósito: 14/09/2015

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet: TLC555**. 2016. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc555.pdf>>. Acesso em: 01/03/2017.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet: LM331**. 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm331.pdf>>. Acesso em: 13/03/2017.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet: LM318**. 2013. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm318-n.pdf>>. Acesso em: 01/03/2017.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet: LM317**. 2016. Disponível em:
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf>>. Acesso em: 17/04/2017.

TIPLER, Paul Allen; MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros**: volume 2: eletricidade e magnetismo, óptica. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.