



**INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA**

**CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

CHRISTIAN SHIKANAI FELICIANO

Desenvolvimento de um Módulo de Condicionamento e Monitoramento de Sinais para Sensores LVDT

**Florianópolis - SC
2019**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

CHRISTIAN SHIKANAI FELICIANO

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE CONDICIONAMENTO E
MONITORAMENTO DE SINAIS PARA SENSORES LVDT**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Mecatrônica.

Professor Orientador: Valdir Noll, Dr.

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2019.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Feliciano, Christian Shikanai

Desenvolvimento de um Módulo de Condicionamento e Monitoramento de Sinais para Sensores LVDT / Christian Shikanai Feliciano; orientação de Valdir Noll. –

Florianópolis, SC, 2018.

71p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.

Inclui Referências.

1. Sensores LVDT. 2. Condicionamento de Sinal. 3. Monitoramento de Processos.
4. NodeMCU. 5. Internet das Coisas. I. Noll, Valdir. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III. Desenvolvimento de um Módulo de Condicionamento e Monitoramento de Sinais para Sensores LVDT.

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE CONDICIONAMENTO E MONITORAMENTO DE SINAIS PARA SENSORES LVDT

CHRISTIAN SHIKANAI FELICIANO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 03 de julho de 2019.

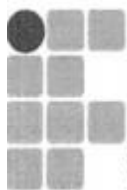
Banca examinadora:

Prof. Valdir Noll, Dr.
Orientador

Prof. André Roberto de Sousa, Dr.
Coorientador

Prof. Adriano Régis, Dr.
Membro Titular

Prof. Maurício Edgar Stivanello, Dr.
Membro Titular



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE CURSO

Declaro que o estudante CHRISTIAN SHIKANAI FELICIANO, matrícula nº 142003343-3, do curso de ENGENHARIA MECATRÔNICA, defendeu o trabalho intitulado DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE CONDICIONAMENTO E MONITORAMENTO DE SINAIS PARA SENSORES LVDT, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 03 de julho de 2019.



Prof. Orientador do TCC: Valdir Noll

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, quem me tem dado incontáveis bênçãos. “Pois todas as coisas vêm dEle, existem por meio dEle e são para Ele. A Ele seja toda a glória para sempre! Amém.” (Romanos 11.36).

Aos meus pais, pois eles são a base de tudo na minha vida. Amo muito vocês e sou eternamente grato pelos seus ensinamentos e por fazerem parte da minha história. “Os nossos pais amam-nos porque somos seus filhos, é um fato inevitável. Nos momentos de sucesso, isso pode parecer irrelevante, mas nas ocasiões de fracasso, oferecem um consolo e uma segurança que não se encontram em qualquer outro lugar.” (Bertrand Russell).

Aos meus irmãos Rafael (In memoriam) e Jonathan que são aqueles que me ensinaram e continuam me ensinando a cada dia como viver uma vida de felicidade e superação.

Ao meu avô Júlio (In memoriam), quem foi o meu grande conselheiro e me guiou nos caminhos corretos da vida.

À minha avó Izabel, quem tem me suportado ao longo desses anos, sempre me motivando a continuar mesmo em meio às diversidades da vida.

À minha família, os quais eu sei que posso contar em qualquer momento ou situação, todos são essenciais na formação de quem sou hoje.

Ao Pr. Maicon Gama, quem foi extremamente importante para me auxiliar nos períodos mais obscuros.

Ao Prof. Valdir Noll, quem me auxiliou em cada etapa deste projeto, sendo um excelente orientador.

Aos professores André, Adriano e Stivanello, por terem aceitado participar da banca examinadora deste trabalho.

Aos demais professores da mecatrônica por participarem da minha formação profissional, pois se hoje tenho capacidade de estar executando este projeto, é porque todos vocês fizeram parte disto.

Aos meus colegas de equipe ao longo do curso, Possa, Ramon, Vinícius e Volnei, os quais fizeram parte da minha formação, pois aprendi muito com cada um em suas respectivas áreas de melhor desenvolvimento.

Ao Nicholas Tavares, quem fez parte ao longo da minha jornada no curso sempre me dando suporte para seguir até o final e também quem me auxiliou nas correções e formatação deste trabalho.

Ao Luiz Eduardo e Richard Probst, meu chefe e meu colega de trabalho no estágio, os quais me ensinaram muito.

Ao Thiago Koerich, quem foi meu companheiro de bolsa e me deu suporte neste projeto.

Aos meus amigos da faculdade, principalmente o Leonardo Rosa e o Maurício Júnior, os quais me auxiliaram e muito neste projeto.

Ao Pr Koki e Taveira Júnior, os quais me deram diversos suportes e conselhos ao longo desta jornada.

Ao Jimmy Pontes, que foi um grande amigo em um período complicado de minha vida e continua sempre me motivando a buscar novas conquistas.

A todos os demais amigos que me fizeram e fazem parte da minha vida, sem vocês minha vida seria muito chata e não haveria sentido.

Aos demais profissionais que compõem a instituição, pois de alguma forma cada um de vocês foram importantes para minha formação.

Ao IFSC, pela oportunidade de fazer o curso.

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso
sem perder o entusiasmo”

Winston Churchill

RESUMO

Sensores de deslocamento de precisão tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) têm sido crescentemente empregados para monitoramento e controle de processos industriais e sistemas automáticos que envolvam a medição de pequenos deslocamentos com alta exatidão. Sua boa robustez em ambientes industriais, a alta repetibilidade nos resultados e o custo atrativo tem impulsionado sua aplicação em vários setores da indústria. Para que esta medição ocorra corretamente, são necessários circuitos de alimentação do sensor, de condicionamento dos sinais de saída e de envio desses dados para visualização e armazenamento, pois as necessidades atuais e futuras de aplicação destes sensores impõem que os sinais de medição sejam armazenados, processados e comunicados. Portanto este projeto de TCC (trabalho de conclusão de curso) aborda as funcionalidades e características desse tipo de sistema, visando a implementação do mesmo para aplicações de monitoramento e controle de processos.

Palavras-chave: LVDT, Monitoramento e controle de processos, Circuito de condicionamento de sinais, Armazenamento e processamento de dados.

ABSTRACT

Precision displacement sensor LVDT (Linear Variable Differential Transformer) has been increasingly used for monitoring and control of industrial processes and automated systems that involve the measurement of small displacements with high accuracy. Its good robustness in industrial environments, high repeatability in results and attractive cost has boosted its application in various industrial sectors. For correctly measurement, power circuit, output signal conditioning and circuits sending this data for visualization and storage are required, because the current and future application needs of these sensors require that the measurement signals be stored, processed and communicated. Therefore, this project of undergraduate thesis explains the functionalities and characteristics of this type of system, aiming the implementation of the same for monitoring and process control application.

Keywords: LVDT, Monitoring and control of process, Signal conditioning circuit, Storage and processing of data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sensor LVDT e suas respectivas partes.....	19
Figura 2 – Modelos de LVDT.....	20
Figura 3 – Diagrama AD698.....	22
Figura 4 – Diagrama PGA970.....	23
Figura 5 – Esquemático de processamento de dados.....	27
Figura 6 – As variantes do ESP8266.....	29
Figura 7 – Placa NodeMCU.....	30
Figura 8 – Pinagem do NodeMCU.....	30
Figura 9 – Plataforma Node-RED®.....	32
Figura 10 – Principais Nodes.....	32
Figura 11 – Nível de tensão contínua para o sensor sem deslocamento.....	35
Figura 12 – Nível de tensão contínua para o sensor com deslocamento.....	35
Figura 13 – Nível de tensão contínua para o sensor com núcleo centralizado.....	36
Figura 14 – Nível de tensão contínua para o sensor com deslocamento máximo.....	36
Figura 15 – Gráfico que relaciona a tensão de excitação com o resistor R_1	38
Figura 16 – Gráfico da escala da tensão de saída.....	39
Figura 17 – Gráficos da tensão de saída com offset.....	40
Figura 18 – Esquemático do circuito base do AD698AP.....	41
Figura 19 – Esquemático do circuito do AD698AP para o sensor LVDT T101F.....	42
Figura 20 – Estação de solda Toyo® TS-940 à 250°C.....	42
Figura 21 – Circuito do AD698AP soldado em uma placa padrão 10x10.....	43
Figura 22 – Apalpador de medição da Heidenhaim®.....	43
Figura 23 – Multímetro ET-2075A da Minipa®.....	44
Figura 24 – Dados em bits na tela do computador recebidos pela serial.....	44
Figura 25 – Fluxograma do código para levantamento de dados.....	45
Figura 26 – Deslocamento (mm) versus tensão.....	46
Figura 27 – Diagrama de implantação do sistema.....	47
Figura 28 – Fluxograma do programa de processamento de dados.....	48
Figura 29 – Fluxograma do programa de comunicação com a web.....	48
Figura 30 – Fluxograma do programa que efetua o processamento de dados.....	49
Figura 31 – Efetuando a conexão <i>wifi</i> com o ESP8266 e obtendo endereço IP.....	50

Figura 32 – Programação Node-RED®.....	51
Figura 33 – Interface gráfica da medição do sensor.....	52
Figura 34 – Interface gráfica para calibração do sensor.....	52
Figura 35 – Blocos-Padrão Retangulares.....	55
Figura 36 – Disposição do LVDT na experimentação do projeto.....	55
Figura 37 – Gráfico da medida corrigida média versus medida real.....	56
Figura 38 – Medição obtida quando deslocado 0,34mm.....	59
Figura 39 – Medição obtida quando deslocado 3,33mm.....	59
Figura 40 – Arquivo texto gerado com os dados de medição do sensor.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de etapas de condicionamento de sinal necessárias.....	23
Tabela 2 – Especificações gerais do AD698.....	25
Tabela 3 – Especificações e funcionamento do PGA970.....	26
Tabela 4 – Descrição e mapeamento da pinagem do NodeMCU.....	31
Tabela 5 – Comparativo dos CIs AD698 e PGA970.....	33
Tabela 6 – Especificações do sensor LVDT T101F.....	37
Tabela 7 – Componentes utilizados no circuito.....	41
Tabela 8 – Dados do levantamento da curva deslocamento x tensão.....	46
Tabela 9 – Dados obtidos com o experimento do projeto.....	54
Tabela 10 – Variância, desvio e erro padrão dos dados obtidos na medição.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ADC – Conversor Analógico/Digital
CI – Circuito Integrado
CPU – Unidade Central de Processamento
DAC – Conversor Digital/Analógico
FRAM – Memória de Acesso Aleatório de Ferroelétrico
GND – Ground (0V)
I/O – Entradas e Saídas
I2C – Circuito Inter-Integrado
IDE – Ambiente de Desenvolvimento Integrado
IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina
IoT – Internet das Coisas
LVDT – Transformador Diferencial Variável Linear
MISO – Entrada no Mestre/Saída no Escravo
MOSI – Saída no Mestre/Entrada no Escravo
OWI – Interface de Um Fio
PC – Computador Pessoal
PWM – Modulação de Largura de Pulso
RAM – Memória de Acesso Aleatório
RMS – Raiz Quadrada Média
ROM – Memória Somente para Leitura
RVDT – Transformador Diferencial Variável Rotativo
SPI – Interface Periférica Serial
TCP/IP – Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo de Internet
UART – Receptor/Transmissor Assíncrono Universal
URL – Localizador Padrão de Recursos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. OBJETIVO GERAL.....	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.3. JUSTIFICATIVA.....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1. TRANSDUTORES LVDT.....	18
2.1.1. Funcionamento do LVDT.....	18
2.1.2. Classificação dos LVDTs.....	19
2.1.3 Características dos LVDTs.....	20
2.1.4. Aplicações com LVDT.....	21
2.2. CONDICIONAMENTO DE SINAL.....	22
2.2.1. Circuitos de Condicionamento de Sinal.....	22
2.2.2. Características de Circuitos de Condicionamento de Sinal.....	23
2.3. AD698.....	24
2.3.1. Características do AD698.....	25
2.4. PGA970.....	25
2.4.1. Características do PGA970.....	25
2.5. PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE DADOS.....	27
2.5.1. Processamento de Dados.....	27
2.5.2. Armazenamento de Dados.....	28
2.6. ESP8266.....	28
2.6.1. Características do ESP8266.....	29
2.6.2. NodeMCU e o ESP8266.....	29
2.6.3. Plataforma Node-RED®.....	31
3. METODOLOGIA.....	33
3.1. PLANEJAMENTO.....	33
3.2. COMPARATIVO DOS CIRCUITOS INTEGRADOS.....	33
3.3. VALIDAÇÃO DO SENSOR LVDT.....	34
3.4. PROJETO DO CIRCUITO.....	37
3.5. CONFECÇÃO DA PLACA DO CIRCUITO.....	40
3.6. LEVANTAMENTO DA CURVA TENSÃO X DESLOCAMENTO.....	43
3.7. PROCESSAMENTO DE DADOS.....	47
3.8. INTERFACEAMENTO E ARMAZENAMENTO DE DADOS.....	50
4. EXPERIMENTAÇÃO DO PROJETO.....	53
4.6. AJUSTES DE PROJETO.....	53
4.7. EXPERIMENTAÇÃO PARA VALIDAÇÃO DO PROJETO.....	53
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	57
5.1. SENSORIAMENTO COM LVDT.....	57
5.2. CONDICIONAMENTO DE SINAL.....	57
5.3. PROCESSAMENTO DE DADOS.....	58
5.4. INTERFACEAMENTO DE DADOS.....	59
5.5. ARMAZENAMENTO DE DADOS.....	60
5. CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS.....	63
APÊNDICE A – PROGRAMA DE LEVANTAMENTO DE DADOS.....	66

APÊNDICE B – PROGRAMA DE PROCESSAMENTO DE DADOS.....	67
APÊNDICE C – DADOS LEVANTADOS NO EXPERIMENTO PRÁTICO.....	70

1. INTRODUÇÃO

Grande parte da indústria necessita de dados de deslocamento ou vibração para poder atuar em seus processos antes que aconteçam falhas que comprometam a produção. Para isso, buscaram-se soluções das mais variadas possíveis para sistemas de aquisição, processamento e armazenamento de dados. Este projeto consiste em explorar informações relevantes a respeito deste assunto, pois trará em seu conteúdo o funcionamento e implementação de um circuito de condicionamento de sinal para sensores do tipo LVDT. Objetiva-se processar e armazenar os dados obtidos pelo sensor por meio de um microprocessador, de modo que o usuário possa visualizar e até mesmo processar estes dados produzindo estudos estatísticos e metrológicos.

Este trabalho descreve um sistema de condicionamento de sinal de sensores LVDT, optando entre as soluções providas dos circuitos o CI AD698 e o CI PGA970 em busca da solução mais adequada para processar os dados adquiridos pelo sensor. Após o processamento, utilizar-se-á esses dados de forma a enviá-los a um banco de dados em nuvem computacional para posteriores estudos e análises de dados do processo atrelado ao sensoriamento.

1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolvimento de um circuito que permita alimentar corretamente um sensor LVDT isolado, condicionar os sinais providos do sensor e, posteriormente, enviar os dados convertidos para um banco de dados em servidor em nuvem computacional.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os tipos e funcionamento de sensores LVDT;
- Analisar as características dos sinais de alimentação e saída do sensor;
- Desenvolver circuitos de alimentação e condicionamento dos sinais;
- Desenvolver módulo para interfaceamento dos dados providos do sensor com um computador do tipo PC;
- Desenvolver software para aquisição e armazenamento dos resultados em nuvem computacional;
- Montar os circuitos, calibrar o sistema e determinar suas características metrológicas.

1.3. JUSTIFICATIVA

Atualmente no mercado existem módulos de condicionamento e interfaceamento disponíveis, porém todos importados e de alto custo. Isso limita a aplicação e desenvolvimento de pesquisas empregando LVDT até mesmo em instituições como o IFSC. Pensando nisto, a proposta de trabalho será focada nesta demanda. O trabalho propõe desenvolver um módulo para alimentação e condicionamento de sinais de sensores LVDT, incluindo a conexão deste módulo com computadores, para aquisição dos resultados. O sistema será desenvolvido, calibrado e testado para uma aplicação convencional de deslocamento linear. O sucesso deste tem importância para futuras atividades de ensino e pesquisa, na área de metrologia e engenharia de precisão no IFSC.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O uso de transdutores LVDT para sensoramento de processos surge da necessidade de melhorar a exatidão de dimensionamento, tanto no quesito de posicionamento, quanto em deslocamentos vibracionais, visando o aumento da qualidade dos maquinários em ambientes industriais. Com isso, observou-se a possibilidade de explorar sobre como efetuar um circuito condicionador de sinal junto a um interfaceamento para usar como monitoramento de dados, de modo a armazená-los em busca de produzir um banco de informações, o qual ajudaria em estudos estatísticos.

2.1. TRANSDUTORES LVDT

Os LVDTs são transdutores eletromecânicos, ou seja, dispositivos que possuem a capacidade de converter movimentos especificamente retilíneos ou vibrações mecânicas em corrente elétrica, tensão ou sinais elétricos. São mecanismos geralmente utilizados em sistemas de controle que necessitam de sensores mecânicos para medição de movimento (OMEGA ENGINEERING, 2015).

Estes dispositivos fornecem um valor de saída de tensão proporcional ao deslocamento medido, porém, para o seu perfeito funcionamento, são necessários circuitos capazes de gerar correntes elétricas senoidais de alta frequência e também de determinar a diferença de deslocamento mecânico.

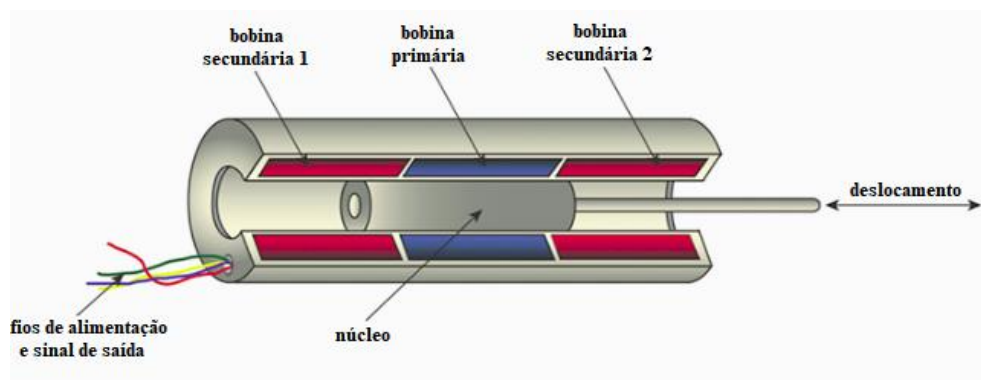
Atualmente há uma diversidade de LVDTs disponíveis no mercado. Para avaliar qual o melhor para cada tipo de aplicação faz-se necessário a determinação de fatores de funcionamento, sendo eles: qualidades estáticas e dinâmicas, sensibilidade ou taxa de transferência, sinal de saída, faixa de frequência de operação e erro estático de conversão ou do sinal.

2.1.1. Funcionamento do LVDT

A figura 1 mostra um sensor convencional e suas respectivas partes que o compõem. Este possui uma bobina primária que se localiza centralizada em relação às outras duas secundárias que se encontram nas extremidades, além disso, também há o núcleo onde está conectado o sistema de medição. A bobina primária é excitada por meio de uma corrente senoidal de alta frequência para que possa gerar um campo magnético dentro do sensor. Portanto ao se movimentar o núcleo, o campo magnético que está incidindo sobre cada uma

das bobinas secundárias é modificado de maneira proporcional e inversa, ou seja, quando uma aumenta a outra diminui. Com isso, ao condicionar o sinal do sensor obtém-se um sinal de saída equivalente à diferença entre as tensões induzidas em cada bobina do secundário.

Figura 1 – Sensor LVDT e suas respectivas partes.



Fonte: Adaptada de Honeywell International – Collins, Danielle (2019)

2.1.2. Classificação dos LVDTs

Uma das maneiras de se classificar transdutores do tipo LVDT é pela sua forma de executar a conversão eletromecânica, podendo ser por meio de conversão eletromagnética ou conversão magnetoelétrica.

A conversão eletromagnética tem como característica fazer a conversão de energia elétrica provida de sistemas magnéticos em energia mecânica e vice-versa. Já a conversão magnetoelétrica é semelhante à eletromagnética, porém a principal diferença é a utilização de um núcleo com imã permanente, retirando assim a necessidade de haver tensão excitante sobre a bobina primária (OMEGA ENGINEERING, 2015).

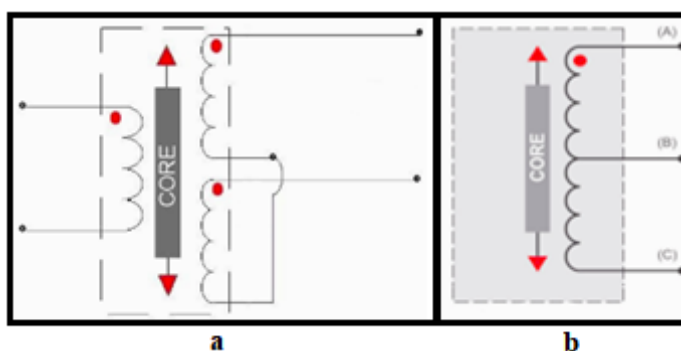
Outras duas maneiras de classificar os transdutores são por meio da identificação do seu sinal de saída, os quais podem ser tanto analógicos, quanto digitais; e também, por meio dos diferentes tipos de núcleos que equipam o sensor, sendo estes, núcleo móvel e núcleo com avanço forçado.

Os LVDTs equipados com núcleo móvel são considerados mecanismos com uma boa resolução, pois não tem desgaste, assim, não havendo restrição quanto à resolução dos dados medidos. Já os mecanismos que utilizam núcleo com avanço forçado são aqueles que necessitam de molas internas, força magnética ou até mesmo motores elétricos para que seus núcleos sejam empurrados continuamente de forma que atinjam sua máxima extensão. Geralmente utiliza-se esse tipo de sensor em aplicações cujo movimento é lento. Dispositivos

como esse não exigem qualquer conexão entre o objeto a ser medido e o núcleo (OMEGA ENGINEERING, 2015).

Por fim, outra forma de classifica-los é por meio das suas bobinas, pois enquanto há um modo que necessita de três enrolamentos, sendo uma para o primário e as demais para o secundário, há também um modo onde se utiliza apenas dois enrolamentos, que, neste caso, ao invés de ter uma bobina específica para o primário, usa-se na verdade a bobina formada pela junção das duas que compõem o secundário, conforme mostra na figura 2. Estes LVDTs são classificados como ponte completa e meia ponte, respectivamente.

Figura 2 – Modelos de LVDT: a) Ponte completa; b) Meia ponte.



Fonte: Adaptada de Alliance Sensors Group – Herceg, Ed (2019)

2.1.3. Características dos LVDTs

Existem inúmeros fatores que podem caracterizar um transdutor, porém, para cada aplicação deve se analisar quais deles interferem diretamente, indiretamente ou não são relevantes para aquele sistema. Algumas características metrológicas principais de sensores LVDT são:

- **Linearidade:** refere-se ao quanto um sistema tem sua variável de saída dependente diretamente ou inversamente proporcional a variável de entrada. No caso de sensores deste tipo, a linearidade significa a quantidade de curso do sensor correspondente a uma transformação proporcional da tensão em relação ao deslocamento.
- **Temperatura operacional:** refere-se à temperatura suportada pelo sensor em operação.
- **Intervalo de medição:** trata-se do indicador de qual a parcela do curso total corresponde à medição, ou seja, é a região onde há a resolução máxima que se pode obter na leitura.

- **Exatidão:** trata-se um dos fatores mais importantes na caracterização, pois o fato deste tipo de sensor não possuir uma linearidade entre os sinais de entrada e saída em seus extremos, acaba interferindo em sua exatidão. Esse indicador é utilizado para dizer o quão exato é o sensor, ou seja, o quanto o valor medido se aproxima do valor real.

- **Saída:** refere-se à característica do sinal de saída do sensor, que pode ser no modo tensão, corrente ou frequência.

- **Tipo do LVDT:** essa característica lhe é atribuída pela sua classificação, pois como visto anteriormente existem os de ponte completa e os de meia ponte.

Há também algumas características que são intrínsecas a esse tipo de sensor, como por exemplo, o fato de serem extremamente sensíveis à interferência eletromagnética.

2.1.4. Aplicações com LVDT

Transdutores do tipo LVDT são comumente utilizados em áreas com usinagem, aviação, robótica, controle computadorizado ou de movimento e fabricação automatizada. São projetados para atender demandas de aplicações industriais, tais quais: aeroespaciais, diafragma do tipo “flush”, projetos com áreas perigosas, montagem em placas de computador, sistemas de alta exatidão, sistemas submersíveis, aplicações sanitárias, entre outras.

As aplicações em turbinas de geração de energia necessitam de sensoriamento utilizando transdutores do tipo LVDT, pois o seu posicionamento requer certo monitoramento. Em sistemas hidráulicos também há essa necessidade, porém sua aplicação é pelo fato dos acumuladores precisarem de um sensoriamento de carga, o qual pode ser efetuado por meio de um LVDT (OMEGA ENGINEERING, 2015).

Na aviação encontra-se outra área com muito uso para esse tipo de sensoriamento, pois seu controle de posição é muito rigoroso, assim, utiliza-se de uma diversidade de transdutores de deslocamento ao longo da aeronave para verificação se os dados do projeto estão estabelecidos no produto (OMEGA ENGINEERING, 2015).

Outra aplicação que é muito utilizada para este tipo de sensoriamento é a área de metrologia atrelada à engenharia de precisão. Devido a alta repetibilidade do LVDT torna-se altamente requisitado para compor um sistema de medição.

Outro exemplo de aplicação é a medição da deformação gerada em uma viga de sustentação ao ser exposta a uma força externa, pois nesse caso, a medição é de uma escala

baixíssima, portanto requer uma medida exata para que a análise do comportamento do sistema não seja prejudicada.

2.2. CONDICIONAMENTO DE SINAL

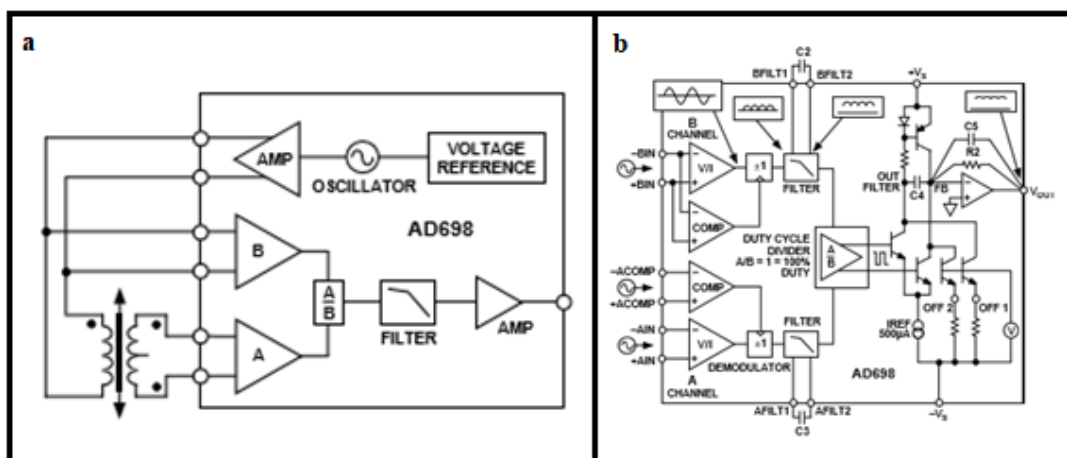
O condicionamento de sinal é a conversão do sinal elétrico de saída do circuito de alimentação do sensor LVDT de forma a adequá-lo para que possa ser processado posteriormente, permitindo interfaceamento com os outros dispositivos. Para que o sinal seja medido adequadamente faz-se necessário o uso de circuitos condicionadores de sinal.

2.2.1. Circuitos de Condicionamento de Sinal

Existem diversos tipos de circuitos para gerar condicionamento de sinal, porém é importante ressaltar alguns diagramas e circuitos bases que geralmente são utilizados para exercer essa função junto ao LVDT. Alguns exemplos incluem a utilização de circuitos integrados, como o AD698 e o PGA970. Além destes, também existe a possibilidade de utilização de circuitos construídos especificamente para realizar o condicionamento de sinal, baseado em amplificadores de instrumentação ou a aquisição de módulos comerciais de empresas, tais como da National Instruments®. Não é muito utilizada a ideia de construir seu próprio circuito pelo fato de que sua realização é muito complexa, especialmente no que se refere a evitar ruídos. A segunda solução é usual, porém, é o modo mais caro de se implementar um condicionamento de sinal.

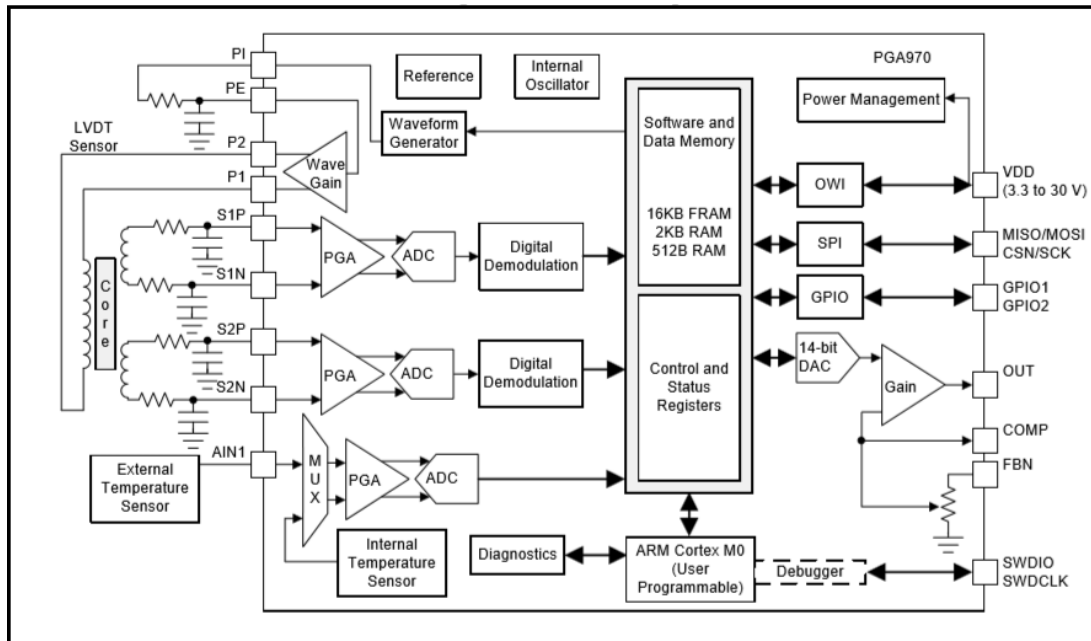
As figuras 3 e 4 mostram o diagrama interno do CI AD698 e do CI PGA970, respectivamente.

Figura 3 – Diagrama AD698: a)Simplificado; b)Geral.



Fonte: Analog Devices (1995)

Figura 4 – Diagrama PGA970.



Fonte: Texas Instruments (2016)

2.2.2. Características de Circuitos de Condicionamento de Sinal

O condicionamento de sinal passa por várias etapas: amplificação, atenuação, isolamento, filtragem, excitação, linearização, compensação de junta fria e configuração de ponte.

Cada sistema de aquisição de dados que necessite condicionamento de sinal irá ser composto por um agrupamento de etapas citadas anteriormente. A tabela 1 mostra alguns exemplos de transdutores e quais etapas são requisitadas em cada condicionamento de sinal.

Tabela 1 – Exemplos de etapas de condicionamento de sinal necessárias.

Exemplos	Amplificação	Atenuação	Isolação	Filtragem	Excitação	Linearização	CJC	Configuração de ponte
Termopar	•		•	•		•	•	
Termistor	•		•	•	•	•		
RTD	•		•	•	•	•		
Strain Gage	•		•	•	•	•		•
Acelerômetro	•		•	•	•	•		
Microfone	•			•	•	•		
LVDT/RVDT	•		•	•	•	•		
Alta Tensão		•	•					

Fonte: National Instruments (2018)

As seguintes etapas que são normalmente utilizadas:

- **Amplificação** – os amplificadores aumentam o nível de tensão de entrada visando ampliar nível de tensão dos sinais de saída, evitando medir sinais muito baixos e que podem ser confundidos com ruídos elétricos.
- **Atenuação** – sendo o processo oposto à amplificação, torna-se necessária em transdutores cuja tensão possui uma amplitude geralmente superior a 10V.
- **Isolação** – os dispositivos com isolamento elétrico passam o sinal da fonte para o sistema de medição sem possuir uma conexão física. São utilizados para isso transformadores, acopladores capacitivos ou acopladores ópticos. O isolamento bloqueia surtos de alta tensão e rejeita tensões elevadas em geral, protegendo assim, o operador e até mesmo o sistema de medição.
- **Filtragem** – os filtros rejeitam ruídos indesejados dentro de uma determinada faixa de frequência, de tal modo a passar apenas uma faixa específica.
- **Excitação** – são circuitos que fornecem uma determinada tensão ou corrente específica para fazer funcionar o sistema de medição.
- **Linearização** – torna-se necessária uma linearização quando os sensores produzem um sinal de tensão que não está linearmente relacionado com a medição física. Esse processo pode ser executado tanto por um circuito condicionador de sinal, quanto por um *software* que recebe os dados e opera com eles matematicamente.
- **Compensação de junção fria** – é uma tecnologia necessária para medições como o termopar, pois como a medição da temperatura é feita por meio da diferenciação entre as tensões de dois metais com características diferentes, a aplicação de uma correção aprimorada faz-se imprescindível. No caso de LVDTs não há necessidade.
- **Configuração em ponte** – utilizada em sistemas que possuem configurações do tipo meia ponte ou ponte completa. Determina o chaveamento da tensão de entrada, em caso de meia ponte usam-se apenas duas chaves semicondutoras, enquanto a ponte completa necessita de quatro chaves para executar o processo.

2.3. AD698

O AD698 é um CI da Analog Devices® que corresponde a um subsistema completo de condicionamento de sinal de LVDTs monolíticos. Muito utilizado junto a esse tipo de sensor, pois possui um alto grau de precisão e repetibilidade em relação à transformação de

posição em tensão. O dispositivo opera tanto com sensores LVDTs meia ponte, quanto de ponte completa, além também de poder auxiliar RVDTs (ANALOG DEVICES, 1995).

2.3.1. Características do AD698

O CI AD698 possui como características principais ser um circuito que não necessita de ajustes externos, uma linearidade na casa de 0,05%, além de aceitar configurações de sensores LVDT de ponte completa ou meia ponte.

Além destas características, o CI também possui algumas especificações de funcionamento, as quais são mostradas na tabela 2.

Tabela 2 – Especificações gerais do AD698.

Classificações máximas absolutas	
Tensão de alimentação	Máxima de 36V (entre +Vs e -Vs)
Temperatura de operação	Entre -40 e 85°C
Tensão de saída	+/- 11V
Corrente de saída	11Ma
Tensão de excitação do sensor	Entre 2,1 a 24V
Corrente de excitação	Mínimo de 30mA, nominal de 50mA
Frequência de excitação	Entre 20Hz e 20kHz

Fonte: Analog Devices (1995)

2.4. PGA970

O PGA970 é um CI que possui um sistema integrado que executa o condicionamento de sinal de sensores LVDTs. Dispositivo desenvolvido pela Texas Instruments®, o qual possui um microcontrolador do tipo ARM Cortex-M0, que possibilita fazer alterações por *software* de modo a configurar o funcionamento do condicionamento de sinal, além de poder manipular os dados de modo a entregar uma saída de dados digitalizada, mais elaborada e conveniente de acordo com cada processo (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

2.4.1. Características do PGA970

As características gerais do CI são: possui uma faixa de alimentação que varia entre 3,5 a 30V e uma faixa de temperatura de -40 a 125°C. Porém o mesmo também possui algumas características específicas que são tanto de caráter analógico, quanto de digital, além das especificações dos periféricos.

As especificações analógicas são:

- Possui um *front-end* analógico com ganho programável para sensores LVDT;
- Gerador de onda de excitação e amplificação;

- Dois ADCs de 24bits com demulador de amplitude e fase;
- ADC auxiliar de 24bits;
- Sensor interno de temperatura;
- Saída DAC de 14bits com ganho programável;
- Diagnóstico integrado.

Já as especificações digitais são:

- Microcontrolador ARM Cortex M0;
- Programa de 16kb de FRAM;
- RAM de 2kb;
- 512b de RAM para pesquisa de gerador de forma de onda;
- Oscilador interno de 8MHz.

Os periféricos do CI são:

- SPI;
- OWI.

Além dessas características iniciais é necessário caracterizar o sistema no quesito de seus aspectos de funcionamento, os quais constam na tabela 3.

Tabela 3 – Especificações e funcionamento do PGA970.

Classificações máximas absolutas		
Tensão VDD (V_{DD})		Entre -0,3 e 33V
Tensão GATE		Entre -0,3 e 33V
Tensão na entrada do sensor		Entre -0,3 e 3,45V
Tensão nos pinos P1, P2, S1P, S1N, S2P e S2N		Entre -0,3 e 3,45V
Tensão nos pinos de entrada e saída		Entre -0,3 e 3,45V
Tensão no pino FBN		Entre -0,3 e ($V_{DD}+0,3$)V
Corrente fornecida (I_{DD})	Curto na saída (OUT)	Máxima de 40mA
	Curto no sensor (LVDT)	Máxima de 40mA
Máxima temperatura de junta (T_J)		Máxima de 155°C
Temperatura armazenada (T_{stg})		Entre -65 e 150°C
Condições de operação recomendadas		
Tensão de potência fornecida (V_{DD})		Entre 3,5 e 30V
Taxa de giro	$V_{DD} = 0$ a 30V	Máxima de 0,5V/ μ s
Corrente de potência fornecida (I_{DD})	Condições de operação normal*	Máxima de 12,5mA
Temperatura de junção em operação		Entre -40 e 125°C
Temperatura programável	FRAM	Máxima de 125°C
Capacitor no pino do V_{DD}		Mínimo de 470, nominal de 680nF
* $V_{DD} = 14V$, gerador de forma de onda em 5kHz, S1 e S2 ativos, sem carga no primário do LVDT e na saída, além do M0 rodando em 8MHz.		

Fonte: Texas Instruments (2016)

2.5. PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE DADOS

Nos dias atuais, com o avanço tecnológico e com a entrada da indústria 4.0, deve-se pensar em um projeto que possua processamento e armazenamento de dados, uma vez que todos os sistemas relacionados à IoT têm como requisito principal a utilização de dados para posterior análise e processamento, além da necessidade de guardá-los de forma permanente.

Portanto, nos tópicos a seguir, será explorado o que é processamento de dados e o porquê de armazená-los.

2.5.1. Processamento de Dados

O processamento de dados consiste de uma série de atividades organizadamente realizadas, as quais resultam em um arranjo de informações, ou seja, o sistema utiliza-se de uma “matéria prima” (dado bruto) junto a um agrupamento ordenado de tarefas, resultando em um dado processado (informação).

Apesar de em alguns casos as palavras informação e dados serem consideradas sinônimas, quando se trata de processamento de dados esses termos são distintos, pois enquanto o primeiro se refere ao dado que já passou pelo processamento, o segundo está se referindo ao dado em si (FILHO, Raimundo).

Um exemplo de processadores de dados são computadores, pois são sistemas que fazem a coleta de dados e executam funções ordenadas de modo a entregar informações processadas ao usuário. A figura 5 mostra um esquema ilustrando o funcionamento.

Figura 5 – Esquema de processamento de dados.



Fonte: Autor (2019)

2.5.2. Armazenamento de Dados

A busca pelo armazenamento de dados é algo muito desejado pelo ser humano. Desde os primórdios da humanidade tem-se por objetivo guardar as informações de modo a facilitar novos estudos. Com o aprimoramento da tecnologia esse anseio tornou-se ainda maior, utilizando dos dados armazenados para fazer comparativos ou até mesmo executar estudos mais aprofundados.

Existem inúmeros modos de se executar o armazenamento de dados, porém o mais atual e próspero devido à indústria 4.0 vem sendo o armazenamento em nuvem computacional. Porém, além da necessidade de guardar os dados, também se tem buscado a visualização do mesmo de forma remota. Com isso torna-se necessária a utilização de ferramentas que possam enviar os dados para a nuvem computacional de modo a processá-los e colocá-los em uma interface gráfica, enquanto os mesmos são registrados em um banco de dados que, posteriormente, possam ser manipulados.

Uma das tecnologias emergentes e que consegue executar essa função de interfaceamento junto ao armazenamento de dados é o CI da Espressif® ESP8266, que tem possibilidade de enviar os dados via comunicação sem fio *wifi* para um servidor externo. Em geral servidores em nuvem computacional também possuem integração ao *software* aberto da IBM®, chamado de Node-RED®, o qual facilita o processo de produção de uma interface gráfica.

2.6. ESP8266

O ESP8266 é um CI que tem sido importante para estimular o desenvolvimento de circuitos eletrônicos relacionados à IoT pelo fato de seu baixo custo e sua rapidez na disseminação de dados, pois ele possui interface *wifi* integrado ao seu sistema, assim, possibilitando a conexão de diversos dispositivos como sensores e atuadores à internet.

Existem diversas placas que possuem o CI integrado ao seu sistema, como por exemplo: NodeMCU, WeMosD1, WeMosD1 mini, WeMosD1 mini pro, ESP-01, etc.

Este módulo utiliza-se do protocolo TCP/IP para executar a conexão à rede *wifi*, o qual possui a capacidade tanto de hospedar uma aplicação, quanto de responder a outros processadores de aplicação.

2.6.1. Características do ESP8266

Algumas das principais características desse CI são (CURVELLO, 2015):

- Barramentos I2C, SPI e UART;
- Entrada ADC e saída PWM;
- CPU que opera em 80MHz;
- 32kB de RAM para instruções;
- 96kB da RAM para dados;
- 64kB de ROM para boot.

A figura 6 mostra as variantes que possui a ESP8266.

Figura 6 – As variantes do ESP8266.



Fonte: Embarcados - Curvello (2015)

2.6.2. NodeMCU e o ESP8266

O NodeMCU é uma plataforma *open source* que tem integrado ao seu sistema o CI ESP8266, visando a criação e desenvolvimento de projetos IoT. Esta placa foi iniciada em 2014 e, apesar do pouco tempo no mercado, já vem se consolidando no uso de projetos pelo seu ótimo fator custo-benefício.

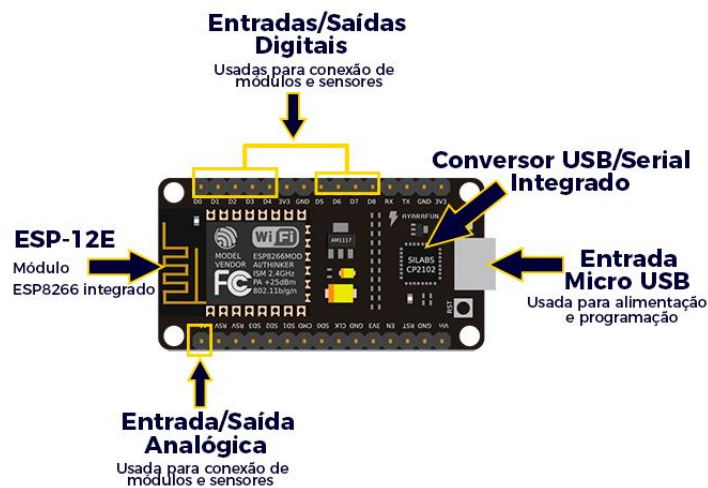
As principais características desse sistema são (OLIVEIRA, 2016):

- Processador ESP8266-12E;
- Arquitetura RISC de 32bits;
- Wifi nativo padrão;
- Possui um pino analógico com resolução de 10bits;

- Pinos operam em nível lógico de 3,3V;
- Programável via USB ou wifi;
- Compatível com módulos e sensores utilizados no Arduino;
- Compatível com a IDE do Arduino.

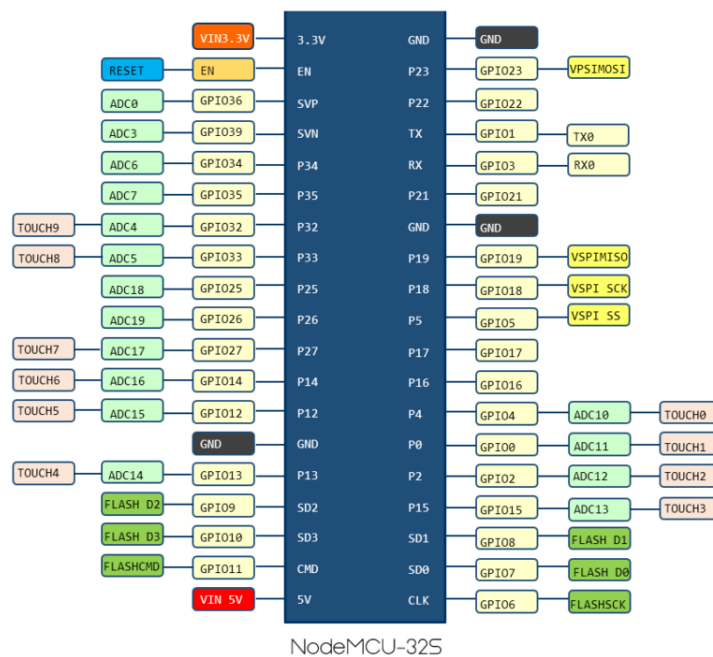
A figura 7 e 8 mostram respectivamente, a composição da placa do NodeMCU e a disposição da sua pinagem.

Figura 7 – Placa NodeMCU.



Fonte: Master Walker – Oliveira, Greice (2016)

Figura 8 – Pinagem do NodeMCU.



Fonte: Master Walker – Oliveira, Greice (2016)

Na tabela 4 encontra-se o mapeamento dos pinos do NodeMCU em relação ao ESP8266-12E, além de suas respectivas funções.

Tabela 4 – Descrição e mapeamento da pinagem do NodeMCU.

Pino NodeMCU	Pino ESP8266-12E	Função do Pino
Tx	TxD	Transmite os Dados
Rx	RxD	Recebe os Dados
A0	A0	Entrada Analógica
D0	GPIO16	Entrada/Saída Digital
D1	GPIO5	Entrada/Saída Digital (SCL)
D2	GPIO4	Entrada/Saída Digital (SDA)
D3	GPIO0	Entrada/Saída Digital (10k Pull-Up)
D4	GPIO2	Entrada/Saída Digital (10k Pull-Up/BULTIN_LED)
D5	GPIO14	Entrada/Saída Digital (SCK)
D6	GPIO12	Entrada/Saída Digital (MISO)
D7	GPIO13	Entrada/Saída Digital (MOSI)
D8	GPIO15	Entrada/Saída Digital (10k Pull-Up/SS)
GND	GND	Ground
5V	-	VCC 5V
3,3V	3,3V	VCC 3,3V
RST	RST	Reset

Fonte: Master Walker – Oliveira, Greice (2016)

2.6.3. Plataforma Node-RED®

O Node-RED® é uma ferramenta visual que foi desenvolvida pela IBM® para implementar, criar ou conectar dispositivos IoT. Atualmente estendeu-se também para *hardwares*, APIs e *web services*. Essa plataforma possui um editor baseado em navegador cuja conexão de fluxos é feita por meio de ligações entre os *nodes*, possuindo também compatibilidade com todos os tipos de *browser*.

A plataforma do Node-RED® utiliza do sistema da node.js para executar os *nodes*, os quais podem ser programados por meio da linguagem JavaScript, dentro do editor. Ela possui cerca de 40 *nodes* em sua configuração inicial, sendo possível a expansão por meio de instalação de bibliotecas existentes nas comunidades.

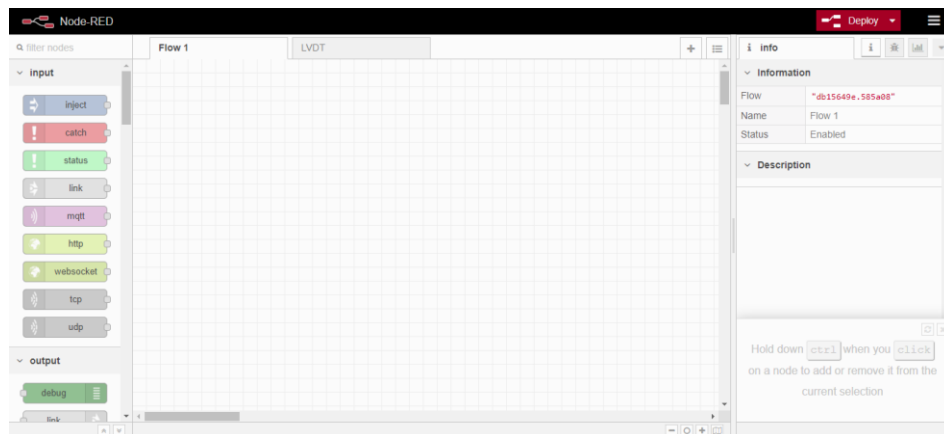
A biblioteca padrão permite a utilização de *nodes* para executar funções relacionadas ao acesso à internet e banco de dados (HTTP, MQTT, TCP, UDP, entre outros). Além disso, há a biblioteca de *dashboard*, a qual é utilizada para expandir a plataforma de modo a criar interfaces gráficas no *browser*, pois ela possui *nodes* que possibilitam a criação de botões, lacunas para inserção de dados, gráficos, entre outros elementos.

Para obter a plataforma, faz-se necessário primeiramente a instalação do Node.js, depois deve abrir o *prompt* de comando e escrever “npm install -g -unsafe-perm node-red”, no caso do sistema operacional ser Linux, usa-se o mesmo código, apenas necessita acrescentar

antes a palavra “sudo”. Com isso, torna-se possível prosseguir com a execução da plataforma, onde se deve executar o comando “node-red” no terminal, assim, o sistema exibirá as informações, dentre as quais, há uma que corresponde ao local de endereço do servidor e a porta onde o serviço esta sendo executado, portanto o próximo passo é colocar esse endereçamento no *browser*, de modo a abrir a plataforma na *web* (BASÍLIO, 2000).

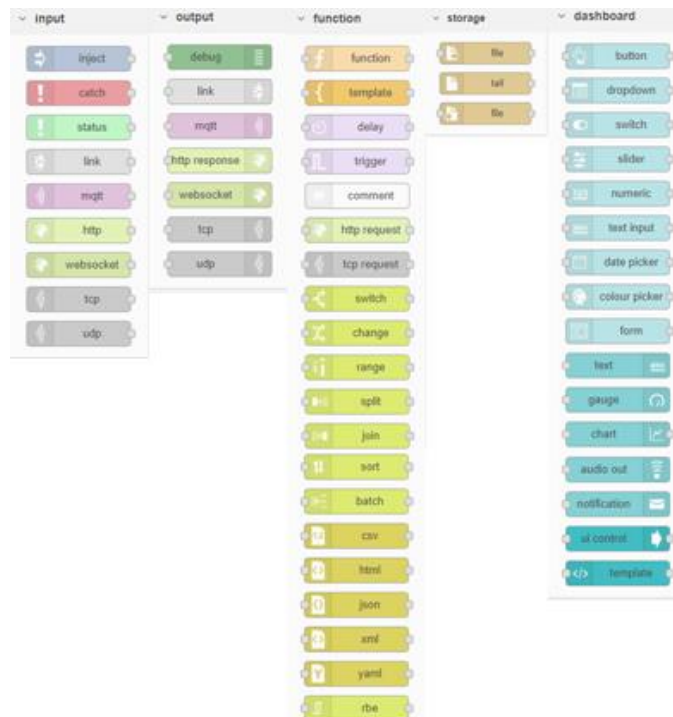
Mostra-se, respectivamente nas figuras 9 e 10, como executar o Node-RED® (depois de já instalado em seu computador), a plataforma e alguns nodes que podem ser utilizados.

Figura 9 – Plataforma Node-RED®.



Fonte: Autor (2019)

Figura10 – Principais Nodes.



Fonte: Autor (2019)

3. METODOLOGIA

Depois de feito todo o levantamento de dados na fundamentação teórica, tornou-se possível o planejamento da parte prática do projeto, o qual tem como objetivo validar os estudos na área que foi feita a análise prévia.

3.1. PLANEJAMENTO

Para execução dos procedimentos verificou-se que a maneira mais adequada de produzir o sistema de validação seria iniciar com um estudo comparativo entre os CIs AD698 e PGA970 para verificar quais as diferenças e quais as potencialidades de cada um deles. Por meio disso, faz-se a escolha de qual CI tem a melhor resposta para a aplicação do trabalho em questão.

Com a escolha do CI feita, faz-se necessário a validação do LVDT, o qual consiste no procedimento de verificar a medição do sensor e fazer o levantamento da curva que corresponde à função da tensão pelo deslocamento.

Ao término destes processos, o sensor está pronto para junto do circuito de condicionamento de sinal executar a aquisição de dados, restando apenas o serviço de processar os dados adquiridos pelo sistema, para que assim, os mesmos possam ser armazenados na nuvem.

3.2. COMPARATIVO DOS CIRCUITOS INTEGRADOS

Na tabela 5 consta um breve comparativo entre os circuitos integrados, o que auxilia na escolha de qual é mais adequado para o projeto.

Tabela 5 – Comparativo dos CIs AD698 e PGA970.

Quesitos Avaliativos	AD698	PGA970
Requisitos do Projeto	Atende	Atende
Requisitos do LVDT T101F	Atende	Atende
Processamento de Dados	Apenas Condicionamento	Condicionamento + Processamento Programável
Conversor A/D	Não Possui	Possui
Operabilidade	Fácil	Complexa

Fonte: Autor (2019)

Apesar dos dois CIs serem sistemas de condicionamento de sinais e terem muitas características semelhantes, o principal ponto que os diferencia é como processam os dados que lhes são fornecidos, pois enquanto o AD698 apenas executa a função de condicionar o sinal, o PGA970 tem a vantagem de incluir um *software* para o processamento dos dados, o

que possibilita executar alguns ajustes, não ficando apenas no condicionamento do sinal. Além disso, possui internamente um conversor A/D, o qual possibilita entregar o dado de saída de modo digital, o que não ocorre com o AD698, pois o sinal de saída deste é apenas analógico.

Porém, mesmo que o PGA970 possua algumas vantagens técnicas, o AD698 atende o que é necessário para execução do projeto, viabilizando operar o LVDT adequadamente de modo que a sua operabilidade é mais viável perante o tempo determinado para este projeto. Portanto, após a análise comparativa verificou-se que a utilização do AD698 seria a mais coerente para o andamento do projeto. Pretende-se utilizar um conversor AD interno à placa da NodeMCU como entrada para o envio de dados à nuvem computacional.

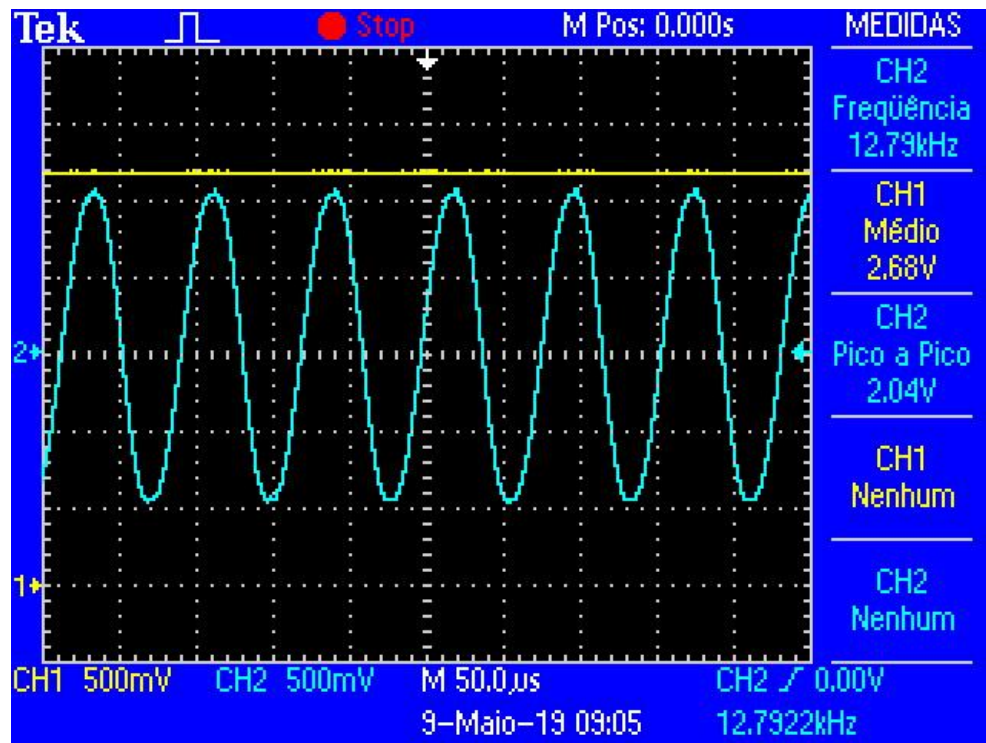
3.3. VALIDAÇÃO DO SENSOR LVDT

Para a validação do sensor fez-se necessária a montagem do circuito base de um dos CIs de condicionamento de sinal, para que pudesse ser executada a alimentação correta do sensor LVDT T101F da Peter Hirt®, visto que o mesmo possui especificações de tensão e frequência de excitação equivalentes a 3V(rms) e 13kHz. Além disso, o curso total é de 4,6mm, porém seu curso de medição se restringe a ± 1 mm, pois como observado na fundamentação teórica os transdutores LVDT possuem uma restrição de medição em suas extremidades, já que nelas o sinal de saída não é proporcional ao deslocamento, assim, sendo desconsiderado no momento de efetuar uma medição.

Portanto para executar o procedimento de validação do sensor, como visto no tópico anterior, foi escolhido o CI AD698 para executar o procedimento e também foi utilizado o osciloscópio da Tektronix®, o qual mostrou os sinais apresentados nas figuras 11, 12, 13 e 14, as quais representam o valor de tensão contínua relativos ao sensor sem deslocamento, sensor com deslocamento, sensor com o núcleo centralizado e sensor com deslocamento máximo, respectivamente.

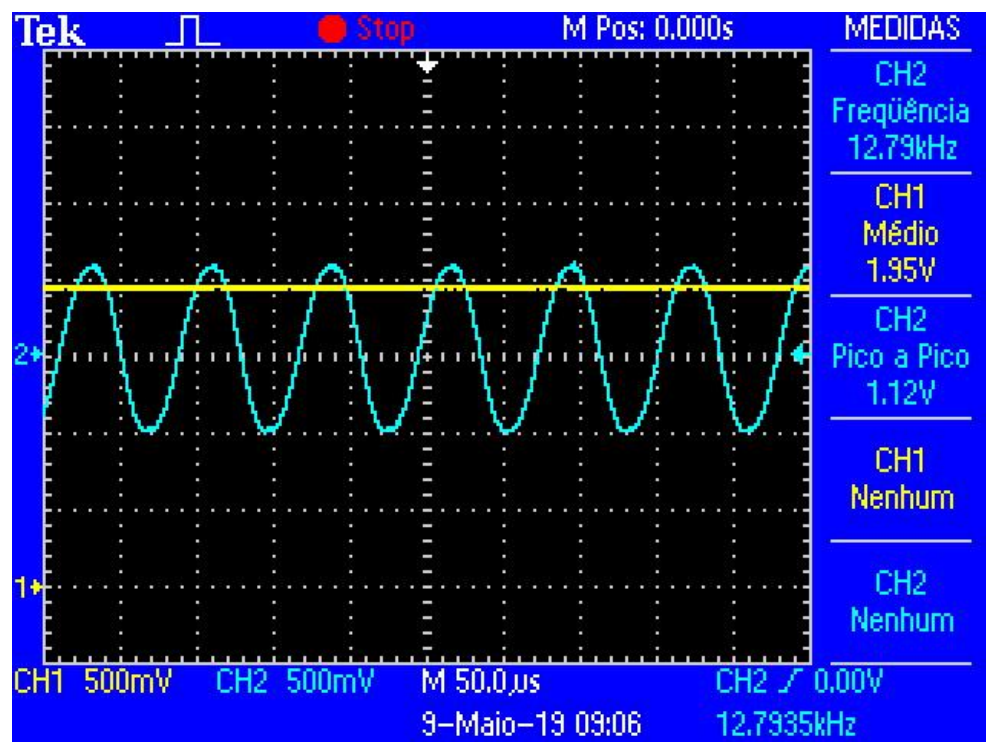
Mostra-se, também, o sinal senoidal que é o resultado da diferença de sinais das bobinas secundárias. Observa-se que a amplitude desse sinal varia de acordo com a posição do eixo sensor. Note que a figura 13 tem sinal senoidal de amplitude zero, justamente porque o núcleo magnético está exatamente na metade de seu curso.

Figura 11 – Nível de tensão contínua para o sensor sem deslocamento.



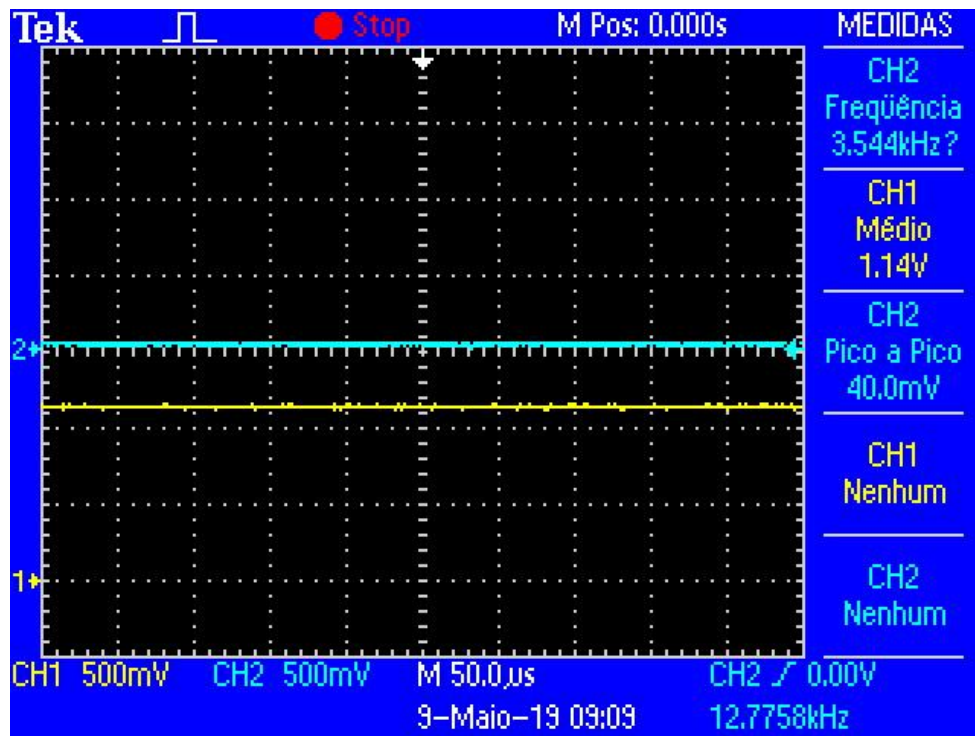
Fonte: Autor (2019)

Figura 12 – Nível de tensão contínua para o sensor com deslocamento.



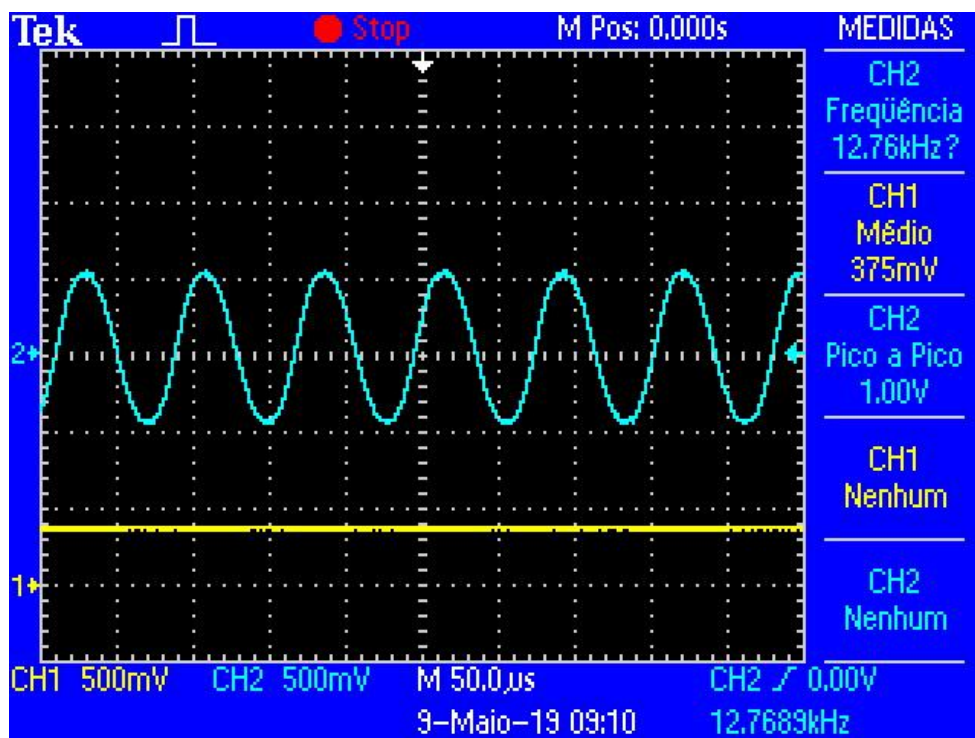
Fonte: Autor (2019)

Figura 13 – Nível de tensão contínua para o sensor com o núcleo centralizado.



Fonte: Autor (2019)

Figura 14 – Nível de tensão contínua para o sensor com deslocamento máximo.



Fonte: Autor (2019)

Verificou-se que o sensor LVDT estava em perfeitas condições de medição, com isso viabilizando o prosseguimento do projeto passando-se agora para o ajuste do circuito de condicionamento.

3.4. PROJETO DO CIRCUITO

Depois de feita a escolha do CI de condicionamento e aquisição de dados, torna-se necessário efetuar alguns procedimentos para que o circuito seja construído. Segue-se um passo a passo de como calcular cada segmento do circuito e quais as análises efetuadas.

1º Passo – Fazer o levantamento dos dados base do sensor LVDT: Os dados necessários do sensor LVDT para executar as análises e cálculos do circuito de condicionamento de sinal são: tensão de alimentação, frequência de excitação, sensibilidade e curso de medição.

A tabela 6 mostra os dados técnicos do sensor LVDT T101F da Peter Hirt®, o qual foi o utilizado no projeto pelo fato de sua disponibilidade no laboratório de metrologia do IFSC.

Tabela 6 – Especificações do sensor LVDT T101F.

Dados	Valor
Tensão de alimentação	3V(rms) $\pm$ 0,5%
Frequência de excitação	13kHz $\pm$ 5%
Sensibilidade	73,75mV/Vmm
Curso de medição	$\pm$ 1mm

Fonte: Peter Hirt (200?)

2º Passo – Determinar a frequência de oscilação: Para determinar a frequência de oscilação do sistema foi necessário o uso da frequência de excitação (f_{exc}) do sensor para calcular a frequência do subsistema (f_{sub}), além do capacitor C_1 .

As equações 1 e 2 são utilizadas para calcular a frequência do subsistema e o capacitor que gera a frequência de excitação, respectivamente.

$$f_{sub} = \frac{f_{exc}}{10} \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{31,47\mu FHz}{f_{exc}} \quad (2)$$

Portanto, utilizando o valor da frequência de excitação do sensor junto às equações acima, obtêm-se os respectivos valores para frequência do subsistema e o capacitor C_1 .

$$f_{sub} = \frac{13kHz}{10} = 1,3kHz$$

$$C_1 = \frac{31,47\mu FHz}{13kHz} \cong 2,42nF$$

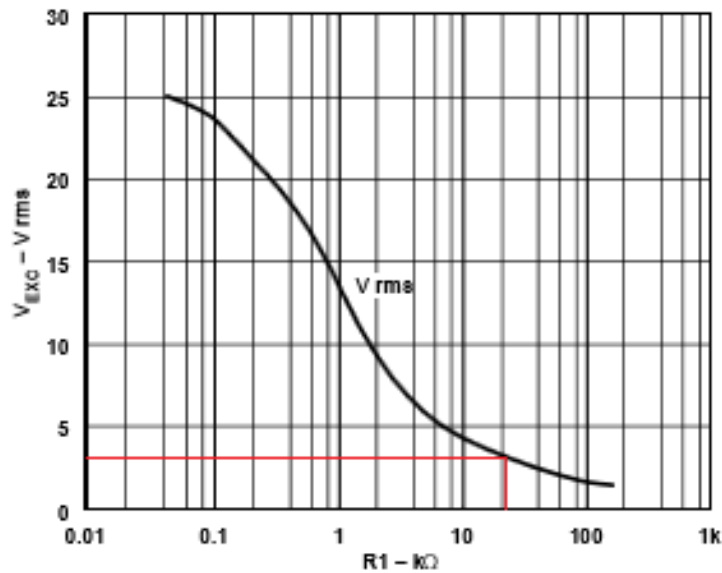
Logo o subsistema terá uma frequência de 1,3kHz, enquanto o capacitor necessário para gerar a frequência de excitação do sensor é de aproximadamente 2,42nF.

3º Passo – Determinar a amplitude de oscilação: São necessários os dados de tensão de alimentação do sensor, resistência R_1 , frequência do subsistema, além dos capacitores C_2 , C_3 e C_4 .

Para este passo é necessário o uso da equação 3, a qual corresponde ao cálculo dos filtros de sinal, além do gráfico que relaciona a resistência R_1 com a tensão de excitação do sensor, o qual está representado na figura 15.

$$C_2 = C_3 = C_4 = \frac{10^{-4} FHz}{f_{sub}} \quad (3)$$

Figura 15 – Gráfico que relaciona a tensão de excitação com o resistor R_1 .



Fonte: Analog Devices (1995)

$$C_2 = C_3 = C_4 = \frac{10^{-4} FHz}{1,3kHz} \cong 76,92nF$$

Portanto ao analisar o gráfico pode-se dizer que o valor do resistor R_1 , para que a tensão de excitação seja o mais próximo de 3V(rms), deve ser de aproximadamente 20kΩ. Utilizando o valor da frequência do subsistema calculada no passo anterior pode-se determinar os valores dos capacitores C_2 , C_3 e C_4 equivalentes a 76,92nF.

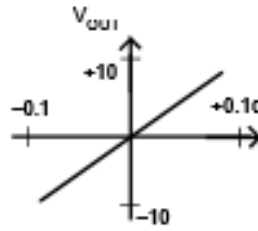
4º Passo – Configurar a escala total da tensão de saída: São necessários os dados de sensibilidade (S), curso de medição (d), escala da tensão de saída (V_{out}), além da resistência R_2 .

Para esse passo utiliza-se da equação 4, a qual relaciona o valor da resistência R_2 com a tensão de saída.

$$R_2 = \frac{V_{out}}{S \cdot d \cdot 500 \mu A} \quad (4)$$

Na equação 4 pode ser vista a necessidade de uma escala de tensão de saída, a qual deve ser escolhida pelo projetista, seguindo o conceito de que irá gerar uma saída de acordo com o gráfico da figura 16.

Figura 16 – Gráfico da escala da tensão de saída.



Fonte: Analog Devices (1995)

Portanto com os dados disponíveis do sensor T101F, pode-se gerar uma equação 5, a qual relaciona o valor da resistência R_2 diretamente com o valor da escala de tensão de saída, de maneira específica para este modelo.

$$R_2 = \frac{V_{out}}{73,75mV/Vmm \cdot 2mm \cdot 500 \mu A} \therefore R_2 \cong 13559,32A \cdot V_{out} \quad (5)$$

Como o NodeMCU aceita em sua entrada uma tensão máxima de 3,3V, deve-se projetar uma tensão de saída próximo dos 3V, assim, obtendo uma escala que varia entre $\pm 3V$, equivalente a uma amplitude de 6V. Esta é utilizada para efetuar o cálculo da resistência R_2 .

$$R_2 \cong 13559,32A \cdot 6V \cong 81,36k\Omega$$

Logo, para gerar uma saída de escala total de 6V, faz-se necessário o uso de uma resistência equivalente a 81,36k Ω .

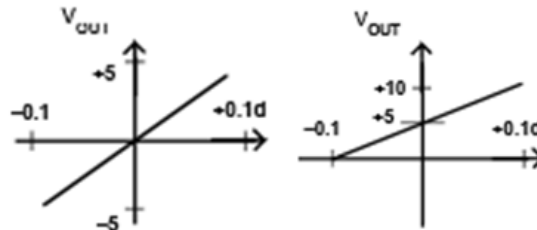
5º Passo – Regular o *offset* da tensão de saída: Para esta parte se faz necessário conhecer o valor máximo de tensão de saída com *offset* (V_{os}), a qual equivale à escala da tensão máxima centrada em zero, a resistência R_2 , além da resistência R_3 ou R_4 , que depende se o *offset* desejado é positivo ou negativo.

Para esse passo será necessário o uso da equação 6, a qual calcula o valor da resistência de offset. Deve-se analisar se o sistema pede um offset positivo ou negativo, alternando assim, o valor de R_3 para R_4 na equação. Neste caso utilizou-se da resistência R_3 .

$$R_3 = \frac{1,2 \cdot R_2}{V_{os}} - 2k\Omega \quad (6)$$

Como visto anteriormente a tensão de saída desejada é equivalente a 3V, pois é a tensão próxima da máxima de entrada do conversor analógico-digital disponível no NodeMCU, com isso, pode-se afirmar que o valor máximo de tensão com o *offset* é de 1,5V. Portanto a figura 17 mostra o exemplo dos gráficos da tensão de saída após o uso do *offset*.

Figura 17 – Gráfico da tensão de saída com offset.



Fonte: Analog Devices (1995)

Utilizando os dados calculados nos passos anteriores, pode-se calcular o valor da resistência R_3 .

$$R_3 = \frac{1,2 \cdot 81,36k\Omega}{1,5} - 2k\Omega \cong 63,09k\Omega$$

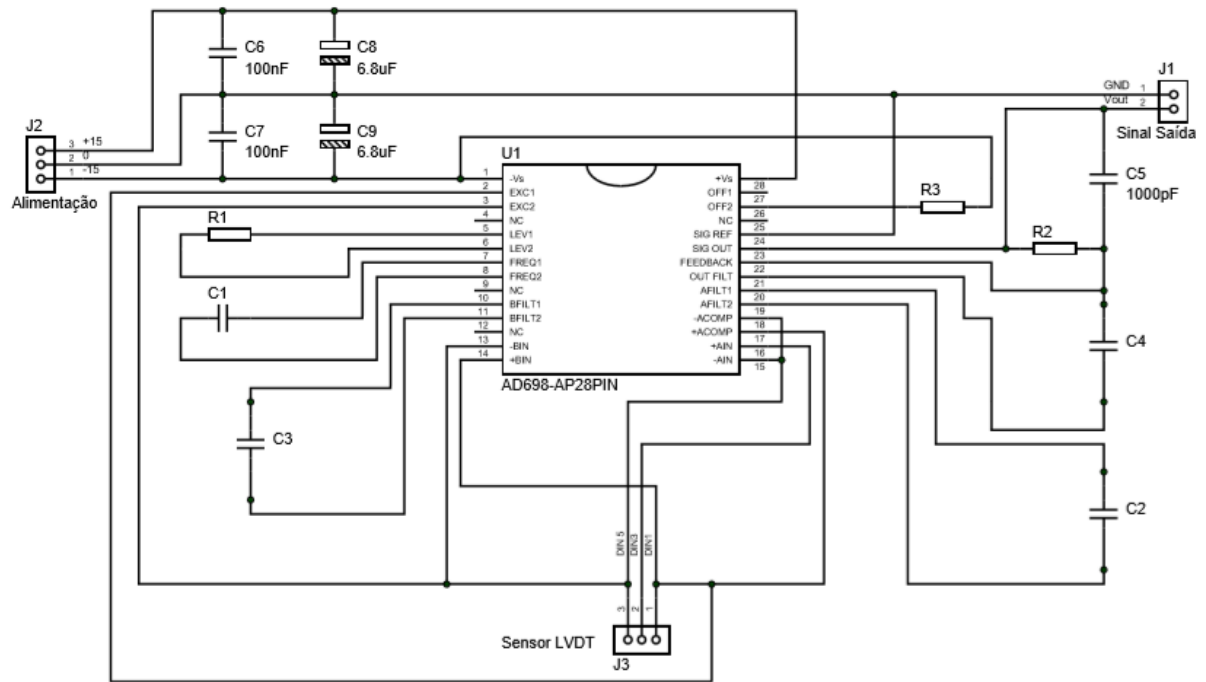
Logo o valor da resistência R_3 para gerar um offset que forneça uma tensão de saída de 3V deve ser equivalente a 63,09k Ω .

3.5. CONFECÇÃO DA PLACA DO CIRCUITO

Depois de executado todo o projeto do circuito base para a produção do condicionamento de sinal do sensor LVDT por meio do CI AD698, tornou-se possível a confecção do circuito. A figura 18 mostra o esquemático do circuito.

Com o esquemático finalizado e também os dados dos componentes necessários para cumprir com a funcionalidade do circuito, buscou-se saber quais desses componentes são comerciais. Caso não sejam, deve-se observar qual componente é o mais próximo ou até mesmo como adquirir um componente com valor equivalente ao calculado. A tabela 7 mostra os componentes que serão utilizados e a forma de ligação (serie ou paralelo) de resistores foi usada para obter um valor equivalente.

Figura 18 – Esquemático do circuito base do AD698AP.



Fonte: Autor (2019)

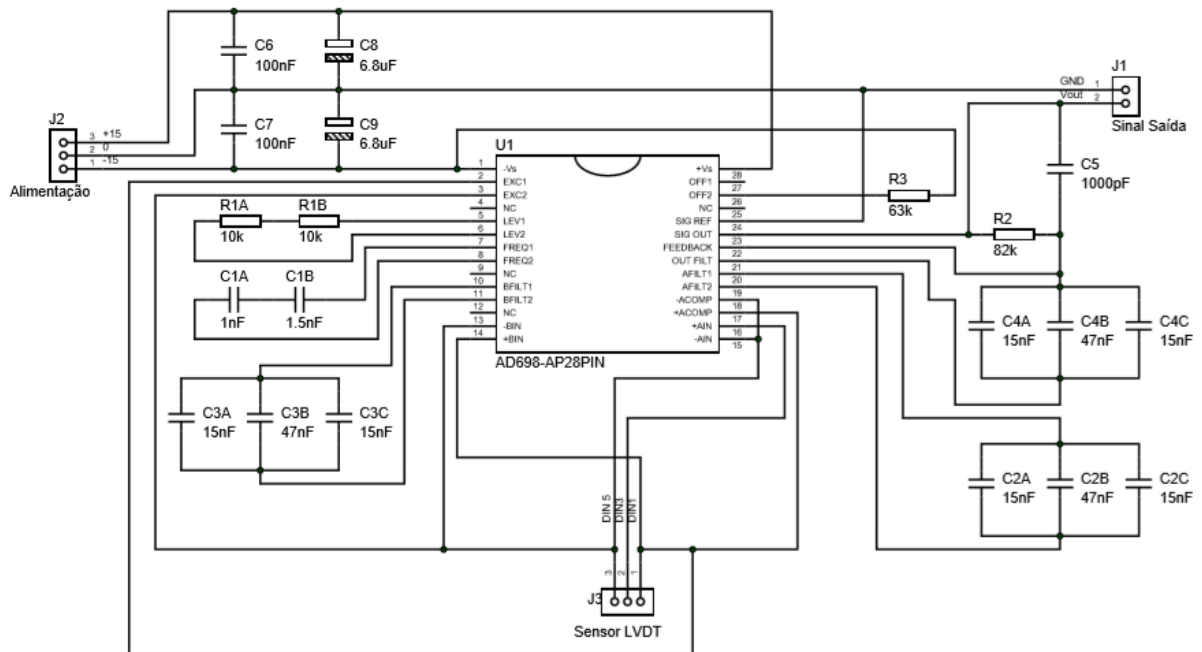
Tabela 7 – Componentes utilizados no circuito.

Componentes	Valor	Modo	Equivalência
Resistor R1	20k Ω	Série	10k Ω + 10k Ω
Resistor R2	82k Ω	-	82k Ω
Resistor R3	63k Ω	Série	62k Ω + 1k Ω
Capacitor C1	2,5nF	Paralelo	1nF + 1,5nF
Capacitor C2	77nF	Paralelo	15nF + 15nF + 47nF
Capacitor C3	77nF	Paralelo	15nF + 15nF + 47nF
Capacitor C4	77nF	Paralelo	15nF + 15nF + 47nF
Capacitor C5	1000pF	-	1000pF
Capacitor C6	100nF	-	100nF
Capacitor C7	100nF	-	100nF
Capacitor C8	6,8 μ F	-	6,8 μ F
Capacitor C9	6,8 μ F	-	6,8 μ F

Fonte: Autor (2019)

Com isso feito, desenhou-se o esquemático final do circuito, o qual está representado na figura 19.

Figura 19 – Esquemático do circuito do AD698AP para o sensor LVDT T101F.



Fonte: Autor (2019)

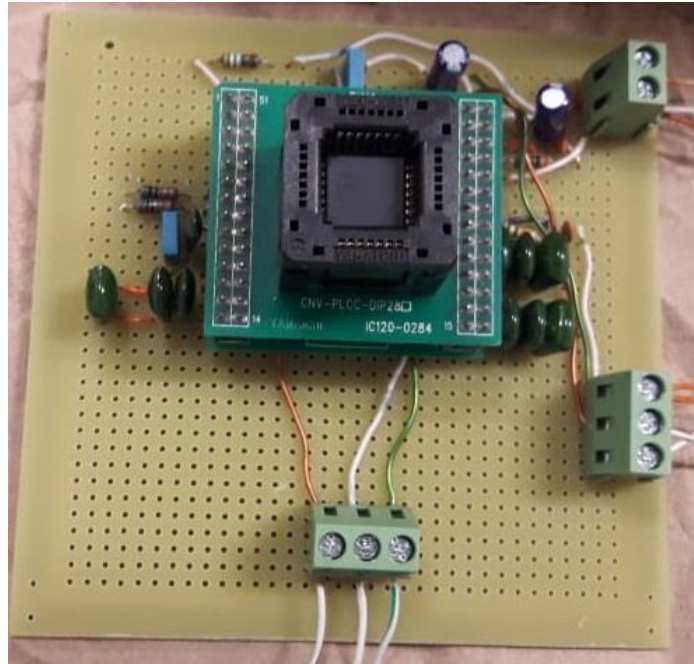
Depois de finalizado o esquemático com os valores corretamente acertados do circuito, seguiu-se para a etapa de soldar os componentes em uma placa protótipo padrão 10x10. Para efetuar este ato, utilizou-se de uma estação de solda TS-940 da Toyo®, com temperatura controlada em 250°C e a solda da Cobix® (63% estanho e 37% chumbo), mostrados nas figuras 20 e 21, a estação de solda e a placa soldada, respectivamente.

Figura 20 – Estação de solda Toyo® TS-940 a 250°C.



Fonte: Autor (2019)

Figura 21 – Circuito do AD698AP soldado em uma placa padrão 10x10.



Fonte: Autor (2019)

3.6. LEVANTAMENTO DA CURVA TENSÃO X DESLOCAMENTO

Para o levantamento da curva da tensão em função do deslocamento fez-se necessária a utilização do laboratório de metrologia do IFSC, pois, para esse tipo de medição usou-se o apalpador de medição da Heidenhain® como deslocamento padrão enquanto o LVDT deslocava em paralelo, assim, com o uso de um multímetro ET-2075A da Minipa® para verificar a tensão de saída e com o uso da ESP8266 enviando os dados da tensão pela serial para serem exibidas no monitor do computador. As figuras 22, 23 e 24 mostram fotos das respectivas informações: medidor de deslocamento da Heidenhain®, multímetro da Minipa® e a tela de dados recebidos pela serial.

Figura 22 – Apalpador de medição da Heidenhain®.



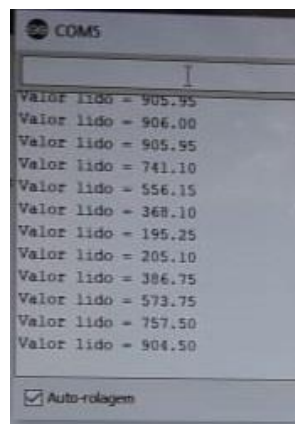
Fonte: Autor (2019)

Figura 23 – Multímetro ET-2075A da Minipa®.



Fonte: Autor (2019)

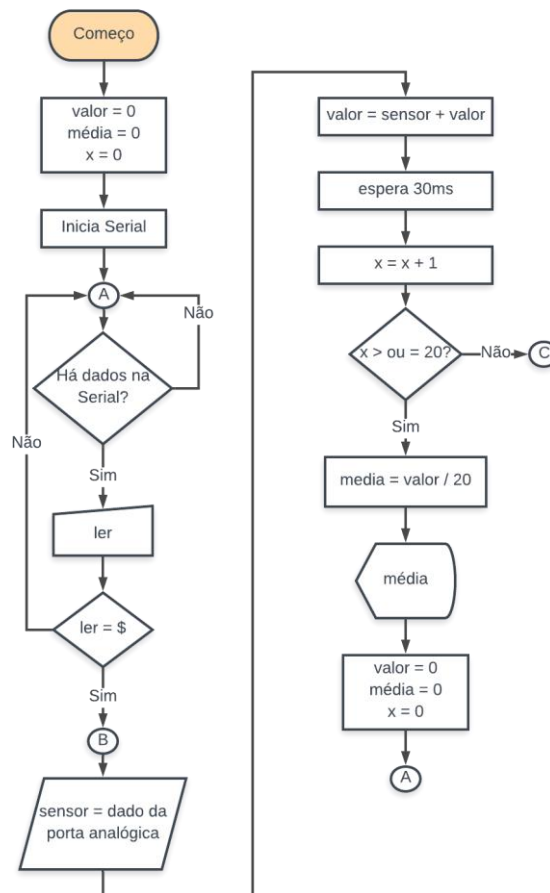
Figura 24 – Dados na tela do computador recebidos pela serial.



Fonte: Autor (2019)

A programação do NodeMCU para levantar o dado do valor de tensão foi produzida na IDE do Arduino, a qual consta no Apêndice A. A figura 25 mostra um fluxograma do código que foi produzido para executar o levantamento de dados.

Figura 25 – Fluxograma do código para levantamento de dados.



Fonte: Autor (2019)

A tabela 8 mostra todos os dados adquiridos do sistema. Na figura 26 o gráfico é gerado pela relação entre o deslocamento (em milímetros) equivalente a tensão de saída do circuito medidor.

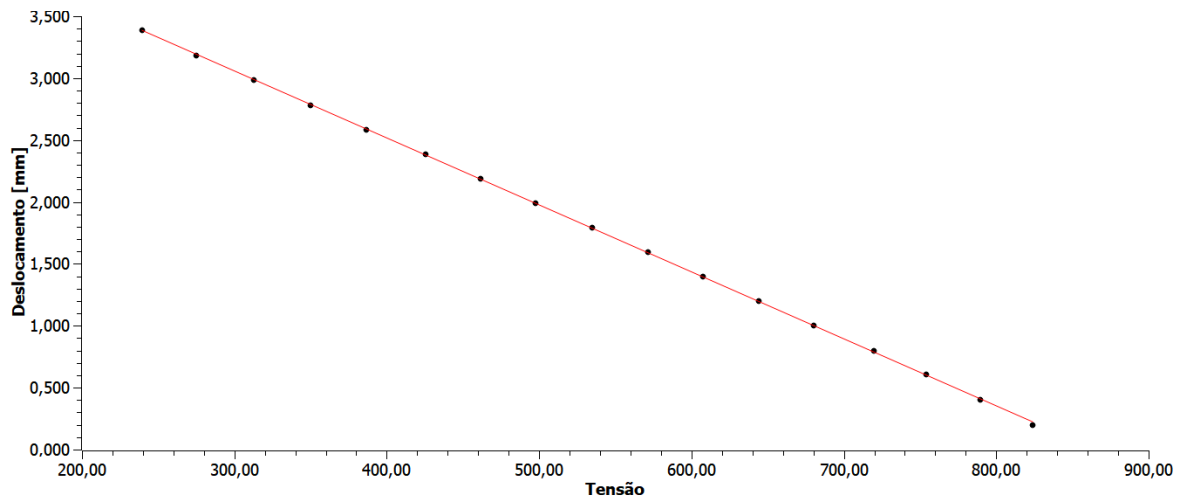
O valor digital é obtido pela média das últimas 20 medições, para servir como um filtro de ruídos de medição que possam ter ocorrido durante a conversão analógico-digital. O valor digital representa o valor medido de tensão pela relação 1024 para 3,3V.

Tabela 8 – Dados do levantamento da curva deslocamento x tensão.

Medidas	Valor Real (mm)	Média do Valor Digital	Tensão (V)
0	0,000	857,45	2,543
1	0,198	823,65	2,442
2	0,404	789,30	2,336
3	0,605	754,30	2,228
4	0,800	719,65	2,120
5	1,000	679,95	2,011
6	1,198	644,40	1,902
7	1,396	607,65	1,790
8	1,594	571,55	1,678
9	1,793	534,90	1,564
10	1,989	497,70	1,453
11	2,187	461,40	1,343
12	2,383	425,65	1,230
13	2,583	386,40	1,116
14	2,779	349,90	1,007
15	2,984	312,90	0,894
16	3,184	274,95	0,781
17	3,389	239,45	0,670

Fonte: Autor (2019)

Figura 26 – Deslocamento (mm) versus tensão.



Fonte: Autor (2019)

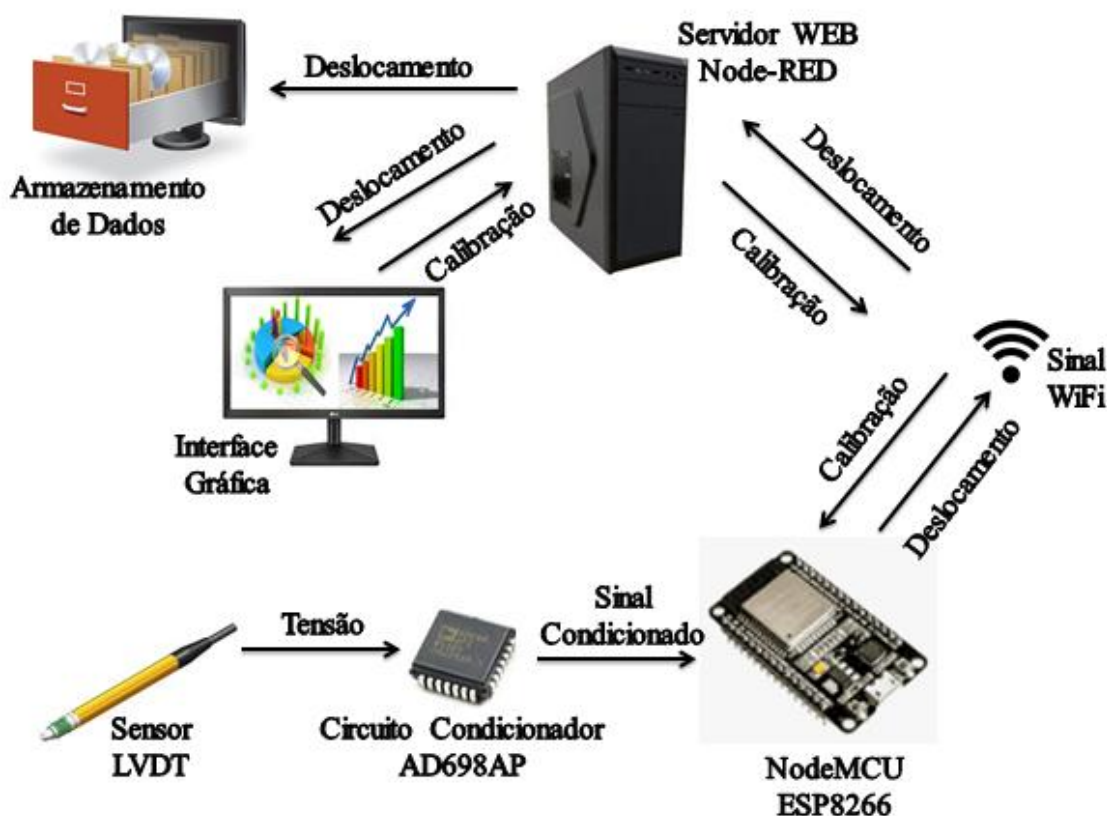
Por último, usando o método dos mínimos quadrados, obteve-se a equação que relaciona o deslocamento (y) com o valor da tensão de saída medido pelo conversor ADC (x), representada pela equação 7.

$$y = -0,0054 \cdot x + 4,6811 \quad (7)$$

3.7. PROCESSAMENTO DE DADOS

Com o circuito de condicionamento de sinal do sensor montado e a curva que corresponde ao deslocamento em relação à tensão de saída obtida, torna-se possível a produção de um programa que execute o processamento de dados, possibilitando o interfaceamento e o armazenamento. Portanto para a melhor compreensão do sistema encontra-se na figura 27 um diagrama de implantação.

Figura 27 – Diagrama de implantação do sistema.

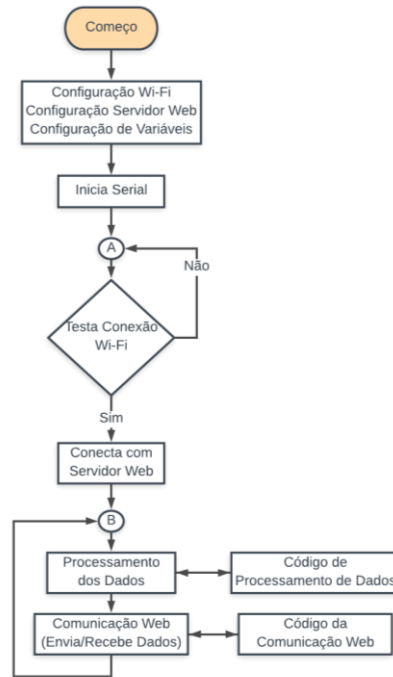


Fonte: Autor (2019)

Para realizar esta parte utilizou-se do ambiente da Arduino IDE, a qual permite a execução de um programa para processamento dos dados coletados pelo circuito NodeMCU. Juntamente a isso, elaborou-se a comunicação via sinal *wifi* com a web, para que por meio da plataforma do Node-RED®, fossem coletados os dados processados, assim, permitindo o interfaceamento, além também de armazená-los em um arquivo que pode ser posteriormente aberto como um arquivo texto padrão.

A figura 28 mostra o fluxograma do programa desenvolvido no ambiente do Arduino IDE.

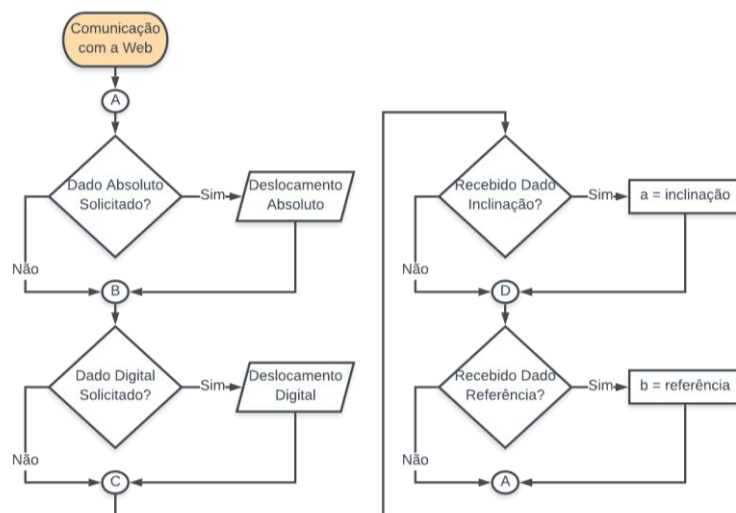
Figura 28 – Fluxograma do programa de processamento de dados.



Fonte: Autor (2019)

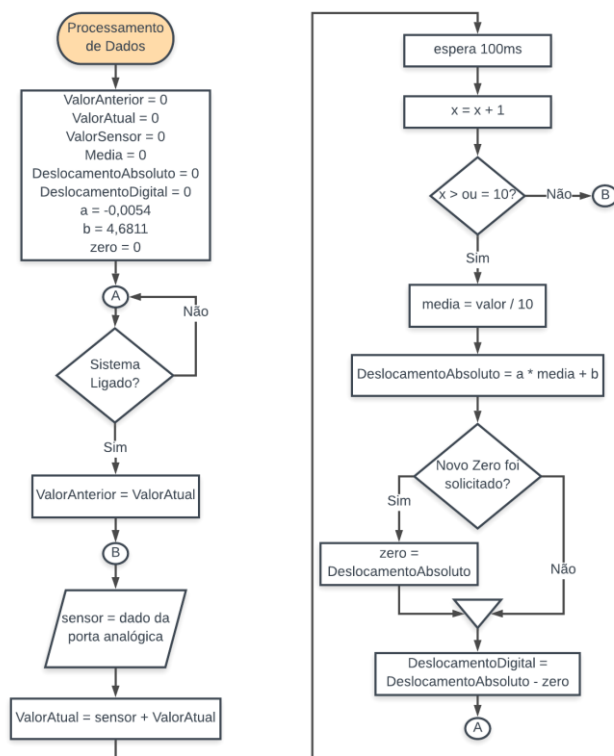
Nas figuras 29 e 30 apresentam-se respectivamente, o fluxograma da comunicação com a web, ou seja, como são efetuados o envio e o recebimento de dados, e o fluxograma do programa que executa o processamento dos mesmos, o qual transforma o valor da tensão de saída em um valor de deslocamento correspondente ao ocorrido com o sensor.

Figura 29 – Fluxograma do programa de comunicação com a web.



Fonte: Autor (2019)

Figura 30 – Fluxograma do programa que efetua o processamento de dados.



Fonte: Autor (2019)

Pode-se observar junto às figuras 28, 29 e 30 que este programa consiste em executar primeiramente a conexão com a rede *wifi* para que posteriormente se estabeleça a conexão com o servidor web, depois de efetuado essa parte, o programa deve verificar constantemente se há alguma solicitação da web para envio de dados ou se existe algum dado sendo transmitido pela mesma. A troca de informações consiste no envio dos valores de deslocamento absoluto (valor entre o zero e o deslocamento máximo) e de deslocamento digital (valor referente ao zero escolhido pelo usuário) ou na recepção dos dados de calibração, sendo o primeiro o novo valor da inclinação da curva (a), já o segundo seria o novo valor de coeficiente linear da curva (b), o qual corresponde à referência.

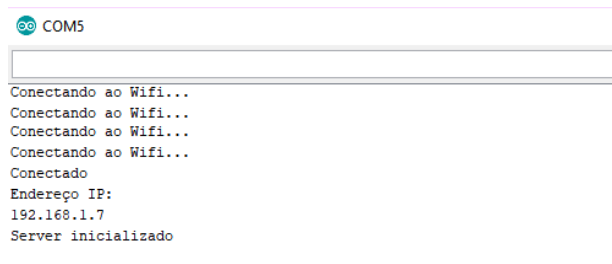
Enquanto essa verificação ocorre, também há a necessidade de executar o processamento de dados, o qual inicia fazendo a verificação se o sistema está ativo, depois passa para aquisição do valor de tensão sendo adquirida a média de 10 medições, assim passando esse valor pela equação 7 (página 46), resultando no valor de deslocamento absoluto. Feito isso, chega-se a parte final do processamento, que é quando o programa efetua a produção do valor de deslocamento digital, o qual ocorre quando o usuário solicita um zero

diferente do valor do sensor sem deslocamento. No caso de não haver essa solicitação, os dois valores de deslocamento são exatamente iguais.

No Apêndice B, encontram-se as linhas do código referente ao programa, sendo elas respectivamente, a parte de cabeçalho junto às funções de void setup (onde executa as configurações iniciais) e void loop (onde executa os processos de maneira repetida), a parte de envio, recebimento e processamento dos dados, além das funções que efetuam os resets de dados do sistema e reconexão com a rede *wifi*, caso a mesma possua alguma falha no meio do processo.

Para finalizar, a figura 31 mostra se há ou não conexão do ESP8266 com a rede *wifi* por meio do monitor serial da porta COM 5, além também de identificar qual o endereço de IP que o sistema adquiriu.

Figura 31 – Efetuando a conexão *wifi* com o ESP8266 e obtendo endereço IP.



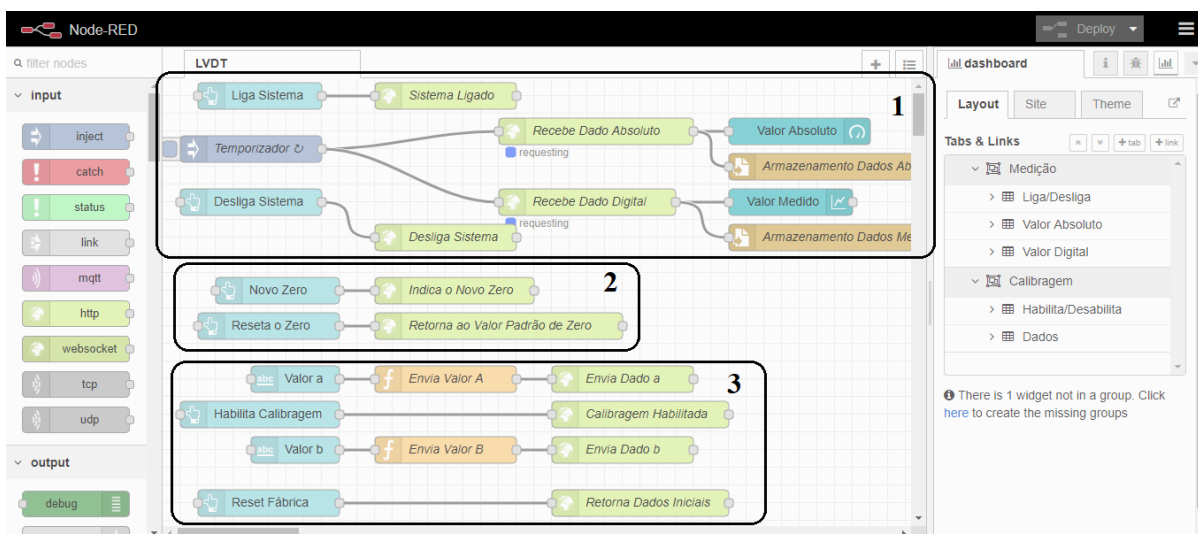
Fonte: Autor (2019)

3.8. INTERFACEAMENTO E ARMAZENAMENTO DE DADOS

Para a visualização e armazenamento dos dados utilizaram-se os recursos da plataforma do Node-RED® pelo fato de possuir a biblioteca de *dashboard* que facilita o procedimento, além de já possuir o recurso de armazenamento dos dados em um arquivo que pode ser lido como texto. Outro fator que influenciou na escolha dessa plataforma para executar a parte gráfica do projeto, foi que ela é compatível com diversos sistemas, sendo possível a integração entre a programação de processamento de dados com a interface gráfica.

A figura 32 mostra a interface de programação por meio dos nodes efetuada para gerar a interface gráfica e armazenar os dados.

Figura 32 – Programação Node-RED®.



Fonte: Autor (2019)

Como pode ser observado por meio da figura 32, existem vários nodes interconectados que executam as funções predeterminadas. Para produzir esse sistema utilizou-se dos nodes de *dashboard* para efetuar as partes gráficas, como botões e gráficos que são apresentados em uma página da web e também nodes de requisição HTTP para obter e enviar os dados.

Pode ser observado que no bloco demarcado com o número 1 há dois botões principais que ligam e desligam o sistema, os quais enviam por meio de uma requisição HTTP no modo POST um sinal para a programação de processamento de dados, habilitando que sejam ou não executadas as funções principais. Também é possível observar que há um temporizador que aciona duas requisições HTTP no modo GET, cujo objetivo é obter os dados de valor absoluto mostrando-os em um gráfico do tipo *gauge* e de valor digital, o qual seria apresentado no modo gráfico de linha, além de arquivá-los cada um em seu respectivo arquivo, os quais seriam endereçados no computador do usuário para que possam ser lidos posteriormente.

O bloco 2 apresenta um botão de ajuste do zero, o qual tem o objetivo de modificar o valor zero do sensor, pois em algumas aplicações como o caso de verificação de um objeto cuja necessidade é a análise de planicidade do mesmo faz-se necessário estabelecer o zero em uma posição predeterminada, para que assim, ao deslocar o sensor sobre o objeto possa ser observado as variações no plano. Além disso, há também outro botão que efetua o reset deste ajuste, pois com isso, o usuário tem seu equipamento em sua condição padrão novamente.

Já no bloco 3 pode-se observar que há duas lacunas de texto, as quais recebem os valores que compõem a equação 7 (página 46), sendo o valor 'a' correspondente a inclinação

da curva e o valor 'b' o coeficiente linear. Também se visualiza que existem dois botões, um para habilitar o envio dos dados de calibração para reformular a nova equação e o outro para voltar os valores pré-estabelecidos caso tenha ocorrido algum equívoco ao modificar os parâmetros.

Nas figuras 33 e 34 mostram respectivamente, as interfaces gráficas das páginas web de medição e de calibragem do sensor.

Figura 33 – Interface gráfica da medição do sensor.



Fonte: Autor (2019)

Figura 34 – Interface gráfica para calibração do sensor.



Fonte: Autor (2019)

4. EXPERIMENTAÇÃO DO PROJETO

Nesse capítulo foi realizado um experimento utilizando blocos-padrão para a verificação da resposta, visando validar a implementação efetuada, porém, para isso, fez-se necessário efetuar antecipadamente alguns ajustes no projeto.

4.1. AJUSTES DE PROJETO

Ao longo do projeto, fizeram-se necessários alguns ajustes para que o funcionamento do sistema como um todo obtivesse valores aceitáveis. O primeiro ajuste foi o aterramento dos pinos 2 e 4 do conector DIN do sensor LVDT, pois sem isso, haveria muita influencia de ruídos externos ao sensor. Outro aterramento executado foi o da carcaça metálica que envolve o transdutor, pois também havia influencias de ruídos.

Um dos maiores problemas foi a oscilação da frequência de excitação, a qual ocorreu por conta do uso de um capacitor de qualidade inferior, assim, após um determinado tempo de operação, ele variava sua capacitância ocasionando na variação do valor da frequência. Portanto, para este caso, necessitou-se a troca do mesmo por um de valor equivalente, porém de maior qualidade.

Outro problema que influenciou no funcionamento foi a queda indevida da tensão de saída, tornando-a instável. Para evitar esta ocorrência utilizou-se de valores diferentes de resistência no *offset* da saída, o que estabilizou o problema, porém ainda havia uma leve oscilação em determinados momentos, os quais poderiam ser ocasionados pelo fato de que a fonte de alimentação possui uma leve variação em sua tensão.

4.2. EXPERIMENTAÇÃO PARA VALIDAÇÃO DO PROJETO

Para finalizar fez-se um experimento utilizando blocos-padrão para validação do projeto. Com o sistema em funcionamento, o transdutor foi colocado preso verticalmente a uma superfície plana por meio de um imã, com a parte do sensor voltada para baixo e encostada na superfície horizontal também plana.

Depois da fixação se utilizou de blocos-padrão entre a ponta do sensor e a superfície plana para adquirir as referências. Ao inserir um novo bloco, podem-se obter os dados de deslocamento. Para esse processo utilizaram-se de blocos de valores correspondentes a 1mm, 1,5mm, 2mm, 2,5mm, 3mm, 3,5mm e 4mm. Foram executadas quatro vezes as respectivas medidas e com isso, buscou-se verificar o erro de medição. Na tabela 9 estão dispostos os

dados gerados por essa experimentação junto aos valores correspondente de erro em cada medida, e nas figuras 35 e 36 apresentam-se os blocos padrão e a disposição do LVDT, respectivamente. No Apêndice C, podem-se verificar as medições efetuadas pelo circuito por meio das imagens da tela que apresenta o interfaceamento dos dados.

Tabela 9 – Dados obtidos com o experimento do projeto.

1ª Medição			
Bloco Padrão (mm)	Deslocamento (mm)	Correção de <i>Offset</i>	Erro
0,00	0,38	0,00	0,00
1,00	1,36	0,98	-0,02
1,50	1,79	1,41	-0,09
2,00	2,21	1,83	-0,17
2,50	2,73	2,35	-0,15
3,00	3,23	2,85	-0,15
3,50	3,67	3,29	-0,21
4,00	4,17	3,79	-0,21
2ª Medição			
0,00	0,19	0,00	0,00
1,00	1,08	0,89	-0,11
1,50	1,52	1,33	-0,17
2,00	2,07	1,88	-0,12
2,50	2,67	2,48	-0,02
3,00	3,14	2,95	-0,05
3,50	3,67	3,48	-0,02
4,00	4,14	3,95	-0,05
3ª Medição			
0,00	0,23	0,00	0,00
1,00	1,25	1,02	0,02
1,50	1,81	1,58	0,08
2,00	2,39	2,16	0,16
2,50	2,81	2,58	0,08
3,00	3,32	3,09	0,09
3,50	3,85	3,62	0,12
4,00	4,19	3,96	-0,04
4ª Medição			
0,00	0,41	0,00	0,00
1,00	1,25	0,84	-0,16
1,50	1,79	1,38	-0,12
2,00	2,28	1,87	-0,13
2,50	2,81	2,40	-0,10
3,00	3,25	2,84	-0,16
3,50	3,69	3,28	-0,22
4,00	4,17	3,76	-0,24

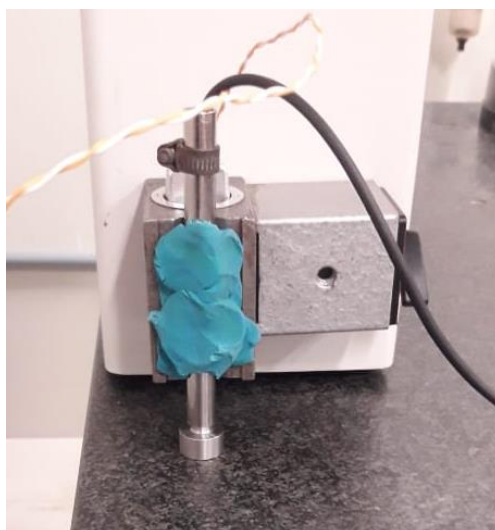
Fonte: Autor (2019)

Figura 35 – Blocos-Padrão Retangulares.



Fonte: VTA Ferramentas (20--?)

Figura 36 – Disposição do LVDT na experimentação do projeto.



Fonte: Autor (2019)

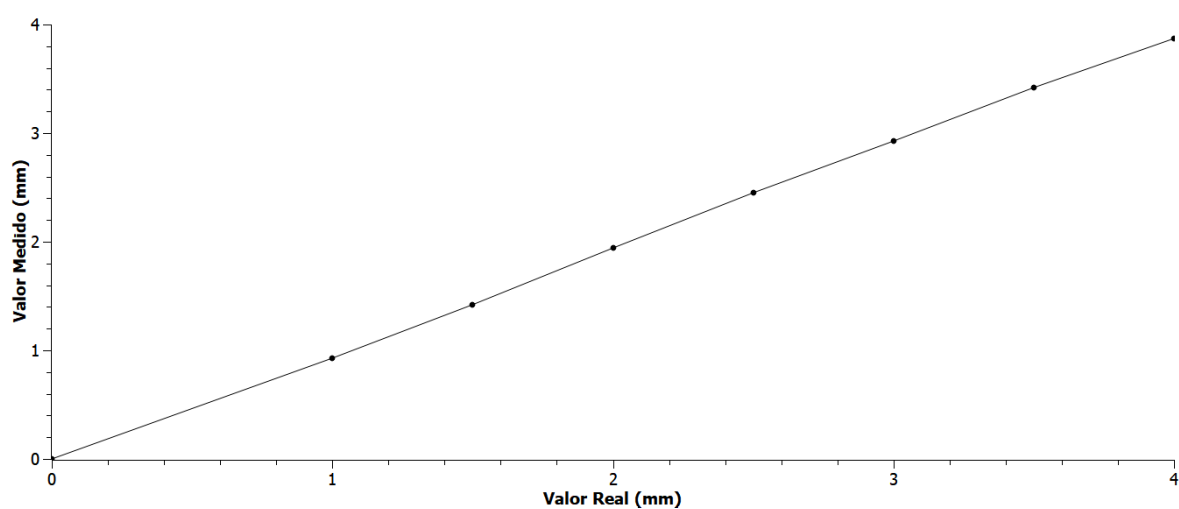
A tabela 10 apresenta os dados de variância, desvio e erro padrão na medição do sensor para cada valor levantado com os blocos-padrão. A figura 37 apresenta o gráfico relacionando a medida real, gerada pelo bloco-padrão, e a medida corrigida média.

Tabela 10 – Variância, desvio e erro padrão dos dados obtidos na medição.

Bloco-Padrão (mm)	Deslocamento Corrigido Médio (mm)	Variância (mm²)	Desvio Padrão (mm)	Erro Padrão (mm)
1,00	0,93	0,0068	0,08	0,04
1,50	1,42	0,0118	0,11	0,05
2,00	1,94	0,0230	0,15	0,08
2,50	2,45	0,0101	0,10	0,05
3,00	2,93	0,0135	0,12	0,06
3,50	3,42	0,0267	0,16	0,08
4,00	3,87	0,0101	0,10	0,05
Valor Total Médio		0,0146	0,12	0,06

Fonte: Autor (2019)

Figura 39 – Gráfico da medição corrigida média versus medida real.



Fonte: Autor (2019)

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo fizeram-se análises a respeito dos resultados do projeto, bem como se explica a metodologia de testes para avaliação do protótipo.

Iniciou-se com a análise do comportamento dos circuitos condicionadores de sinal, quais seus resultados e quais as melhorias que se fizeram necessárias nesta parte do projeto.

Também se analisou os *softwares* de processamento, interfaceamento e armazenamento dos dados, visando descrever o seu comportamento e apresentando os resultados obtidos.

5.1. SENSORIAMENTO COM LVDT

Existem diversas aplicações possíveis na área de engenharia mecatrônica, pois este sensor auxilia muito na verificação de posição, o qual corresponde a um dos fatores que mais influenciam no funcionamento de máquinas industriais. Para sistemas automatizados a precisão no posicionamento é um fator bem importante, visto que na atualidade tem-se buscado cada vez mais processos de qualidade, os quais visam inibir os erros processuais. Outro setor que pode ser beneficiado com este tipo de sensoriamento é em relação à deformação de estruturas, pois nesses casos pode-se afirmar que existe uma necessidade de um bom instrumento de medição para que o dimensionamento seja adequado à utilização proposta.

No que diz respeito à utilização de transdutores LVDT, observa-se que são utilizados para sensoriamento de sistemas de variação de poucos milímetros, pois ao longo do projeto, observou-se que a sensibilidade do sistema é bem suscetível ao deslocamento. Em relação à implementação do circuito eletrônico que efetua o seu condicionamento, pode-se dizer que não é tão simples pelo fato de se tratar de um circuito de extrema precisão na escolha dos seus componentes eletrônicos. Além disso, por ser um circuito eletrônico analógico, detectou-se que é bem sensível a ruídos de origem elétrica.

5.2. CONDICIONAMENTO DE SINAL

Com relação ao circuito de condicionamento de sinal, notou-se que as informações a respeito de como executá-lo para sensoriamento utilizando LVDT são bem escassas, o que dificulta bastante na produção de circuitos que sejam adequados.

Verificaram-se ao longo do projeto várias falhas no *datasheet* do CI AD698, os quais trouxeram dificuldades para produzir o circuito base de medição. As principais falhas encontradas foram nas fórmulas para calcular a frequência de excitação do sensor e para gerar a tensão de saída adequada.

Portanto, após o termino do projeto do circuito, foram implementadas algumas melhorias no mesmo. A primeira foi em relação ao cálculo da frequência de excitação, pois a constante que relaciona o capacitor com a frequência estava incorreta, logo, ao analisar a equação 2 (página 37) pode-se observar que o valor encontrado é de 31,47μFHz, porém no *datasheet* original do CI o valor era 35μFHz. A segunda correção foi em relação ao resistor da escala da tensão de saída que ao invés de utilizar o valor calculado, utilizou-se de um resistor de 15kΩ, o qual não foi baseado na equação do fabricante. Neste caso não foi possível alterar valores na equação correspondente, pois não havia um padrão específico para essa mudança. A terceira e última alteração foi com os resistores de *offset* que no lugar do valor calculado, foram utilizados dois resistores em série, sendo o valor deles de 4,9kΩ e 2,2kΩ, resultando em um equivalente a 7,1kΩ. Também não foi possível a alteração neste equacionamento.

Com isso, pode-se afirmar que o funcionamento do circuito de condicionamento de sinais não foi exatamente como esperado pelo fato de haver uma pequena variação na tensão de saída, porém foi suficiente para o levantamento de dados de modo a proporcionar informações para a análise do sistema. Logo, é correto afirmar que a utilização de componentes de maior precisão resultaria em menor influência nos dados, assim, podendo aumentar a exatidão nos valores medidos.

5.3. PROCESSAMENTO DE DADOS

A parte de processamento de dados é uma das etapas mais importantes para o projeto, portanto requerendo certo cuidado. Para que fosse bem sucedida, era necessário que o levantamento de dados fosse feito com uma quantidade mínima de informações para que houvesse valores suficientes para identificar a parte linear da curva que relaciona a tensão de saída com o deslocamento do sensor, pois em suas extremidades não há linearidade. Para isso, utilizou-se um instrumento de medição que possuísse valores de deslocamento menores que a escala do sensor, ou seja, como o sensor possui um curso de pouco mais de quatro milímetros, necessitava-se que a instrumentação possuísse uma resolução de pelo menos centésimos de milímetro, para assim, conseguir efetuar o levantamento da equação da curva.

Portanto, pode-se afirmar que tanto no quesito de levantamento, quanto no tratamento dos dados adquiridos pelo sensor, foram bem sucedidos. Pois enquanto a aquisição da curva linear do sensor obteve valores suficientes para gerar uma equação confiável, também houve o cuidado necessário na aquisição de dados, de modo a retirar a média em um intervalo de tempo, o que resultava em um dado com o mínimo de influência de variações de leitura do conversor AD.

5.4. INTERFACEAMENTO DE DADOS

Foram apresentados de maneira gráfica os dados de medição obtidos, além de se tornar uma interface de fácil operação pelo usuário. Para entrar na interface do sistema, basta estar conectado na mesma rede em que o NodeMCU foi conectado e acessar a URL <http://localhost:1880/ui> em qualquer browser.

As figuras 38 e 39 mostram a interface em funcionamento, sendo que a primeira mostra o deslocamento em 0,34mm, enquanto a segunda corresponde a um deslocamento de 3,33mm.

Figura 38 – Medição obtida quando deslocado 0,34mm.



Fonte: Autor (2019)

Figura 35 – Medição obtida quando deslocado 3,33mm.

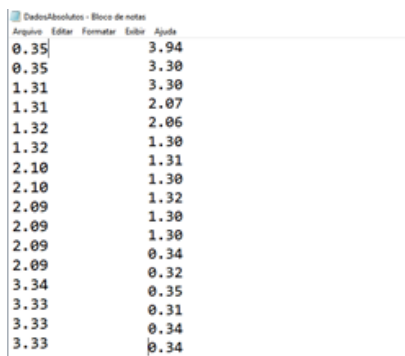


Fonte: Autor (2019)

5.5. ARMAZENAMENTO DE DADOS

A plataforma do Node-RED® já possui um node específico que adquire os dados e arquiva em um documento que pode ser lido como texto, bastando escolher o endereçamento em que o arquivo deve ser salvo. A figura 40 mostra um trecho do arquivo com os dados do sensor. Esse tipo de facilidade permite, posteriormente à medição, fazer análise dos dados medidos em futuras aplicações.

Figura 40 – Arquivo texto gerado com os dados de medição do sensor.



A screenshot of a text editor window titled 'DadosAbsolutos - Bloco de notas'. The window contains a two-column list of numerical data. The first column has values ranging from 0.35 to 3.33, and the second column has values ranging from 0.30 to 3.94. The data is as follows:

0.35	3.94
0.35	3.30
1.31	3.30
1.31	2.07
1.32	2.06
1.32	1.30
2.10	1.31
2.10	1.30
2.09	1.32
2.09	1.30
2.09	1.30
2.09	0.34
3.34	0.32
3.33	0.35
3.33	0.31
3.33	0.34
3.33	0.34

Fonte: Autor (2019)

6. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi descrito o desenvolvimento do projeto de um circuito eletrônico para operar corretamente um dispositivo de medição de deslocamentos (LVDT), que pode ser usado para o monitoramento de processos, e que permite também o interfaceamento e armazenamento de dados. Como demonstrado, verificou-se que o circuito proposto funciona bem para operar com o LVDT e o sistema de envio de dados para *web* também operou a contento.

A implementação da parte de processamento, interfaceamento e armazenamento de dados funcionou adequadamente e pode ser utilizada como base para outros projetos de monitoramento utilizando sensores, com pequenas mudanças.

Embora a implementação do circuito condicionador de sinal tenha sido trabalhosa, além de não obter a exatidão desejada, devido aos erros gerados pelos diversos problemas encontrados ao longo do projeto, tais como os ruídos e instabilidades de sinal, se pode dizer que foi possível a produção do mesmo.

A principal vantagem de utilizar um circuito como o proposto é o fato de ser mais barato que os módulos condicionadores de sinal, porém em contrapartida sua principal desvantagem é que a exatidão nos dados se torna menor, pois como visto no capítulo anterior, o desvio padrão médio do sistema é de 0,12mm e o erro padrão médio fica em torno dos 0,06mm. Esses dados correspondem a 2,61% e 1,30% do curso total. Para sistemas que não necessitem de extrema exatidão, torna-se, portanto, uma solução bem viável, porém em setores aeronáuticos, por exemplo, que exigem maior exatidão, esse sistema provavelmente não poderia ser usado.

Esses dados indicam que a medição real deve ocorrer em torno do intervalo que correspondente ao valor medido menos o desvio padrão como medição inferior e o valor medido mais o desvio padrão sendo a medição superior. A equação 8 mostra como verificar o intervalo que corresponde a medição real.

$$\text{Medida Real} = \text{Valor Medido} \pm \text{Desvio Padrão} \quad (8)$$

Do ponto de vista didático, pode-se afirmar que este projeto foi importante para ajudar no aprendizado da engenharia mecatrônica, pois ao longo do desenvolvimento se observou problemas dos mais diversos e aprendeu-se como deveriam ser efetuados os procedimentos para solucioná-los. Além disso, também foi um momento onde muitos conhecimentos se solidificaram, pois ao longo do curso são apresentadas diversas ferramentas e como utilizá-

las, porém ao executar um projeto como este, surgem situações distintas onde se torna necessário entender melhor o funcionamento delas.

Portanto, foi um projeto interessante, pois trouxeram alguns aspectos pouco explorados no curso, acrescentando e muito, para o aprendizado. Além disso, torna-se interessante também pelo fato de ser um projeto que integra várias áreas de conhecimento da mecatrônica, pois envolve a eletrônica, a metrologia, a engenharia de precisão, a parte de programação, além também do contexto de gerenciamento de projeto que é muito importante para o setor de engenharia.

Dentre as melhorias sugeridas para este projeto, está a busca por ajustes na exatidão do circuito condicionador de sinal, pois é nesta parte onde se concentraram a maior parte dos problemas na implementação, como por exemplo, a utilização de uma fonte industrial simétrica $\pm 15V$ muito estabilizada, pois oscilações na tensão da fonte implicam em alterações na medição. Além também de fazer um estudo melhor sobre o comportamento do circuito a respeito da tensão de saída, visando facilitar a escolha dos componentes eletrônicos necessários.

Para finalizar, outras melhorias de projeto que poderiam ser implementadas são a respeito da produção de um aplicativo de interface gráfica do sistema, viabilizando o acesso por meio de *smartphones*, além também de alguns acréscimos de funcionalidades no processamento, tal como guardar em arquivos dados estatísticos ou até mesmo fazer análises metroológicas.

REFERÊNCIAS

WERNECK, Marcelo Martins. **Transdutores e interfaces**. [S.I.]: Livros Técnicos e Científicos, 1996. 225 p. ISBN 85-216-1052-1.

BOLTON, William. **Instrumentação e controle: sistemas, transdutores, condicionadores de sinais, unidades de indicação, sistemas de medição, sistemas de controle, respostas de sinais**. Tradução de Luiz Roberto de Godoi Vidal. Curitiba: Hemus, 2002. 197 p., il. ISBN 852890119X.

INSTITUTO NCB. **Como Funcionam os LVDTs (ART 113)**. [S. l.], 20--?. Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/826-como-funcionam-os-lvdt-art113>. Acesso em: 17 nov. 2018.

OMEGA ENGINEERING. **Transdutores de Deslocamento Variável Linear**. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://br.omega.com/artigos-tecnicos/transdutores-de-deslocamento-variavel-linear.html>. Acesso em: 20 dez. 2018.

ANALOG DEVICES. **Universal LVDT Signal Conditioner - AD698**. U.S.A., 1995. Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48147/AD/AD698.html>. Acesso em: 4 jan. 2019.

TEXAS INSTRUMENT. **PGA970 LVDT Sensor Signal Conditioner**. [S. l.], Janeiro 2016. Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/813726/TI1/PGA970.html>. Acesso em: 4 jan. 2019.

PETER HIRT. **T101F**. [S. l.], 200-?. Disponível em: <https://www.peterhirt.ch/en/products/t101f>. Acesso em: 22 fev. 2019.

COLLINS, Danielle. **What is an LVDT?**. [S. l.], 3 nov. 2018. Disponível em: <https://www.motioncontroltips.com/what-is-an-lvdt-linear-variable-differential-transformer/>. Acesso em: 11 mar. 2019.

HERCEG, Ed. **GE Gas Turbine LVDTs with an ASG S1A LVDT Signal Conditioner**. [S. l.], 201-?. Disponível em: <http://alliancesensors.com/ge-gas-turbine-lvdt-asg-s1a-lvdt-signal-conditioner>. Acesso em: 15 mar. 2019.

NATIONAL INSTRUMENTS. **O que é Condicionamento de Sinal?**. [S. l.], 2018. Disponível em: <http://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/09/what-is-signal-conditioning-.html>. Acesso em: 8 abr. 2019.

FILHO, Prof. Raimundo de Gouveia Nóbrega. **O CONCEITO DE PROCESSAMENTO DE DADOS**. UFPB, 20--?. Disponível em: <http://www.di.ufpb.br/raimundo/Generalidades/ProcDados.html>. Acesso em: 29 abr. 2019.

CURVELLO, André. **Apresentando o módulo ESP8266**. [S. l.], 29 abr. 2015. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/modulo-esp8266/>. Acesso em: 3 maio 2019.

VEIGA, Fernando. **Node Red - Construindo Dashboard - Parte 01: instalação e configuração**. [S. l.], 12 jan. 2018. Disponível em: <https://imasters.com.br/desenvolvimento/node-red-construindo-dashboard-parte-01-instalacao-e-configuracao>. Acesso em: 3 maio 2019.

VEIGA, Fernando. **Node Red - Construindo Dashboard - Parte 02: nodes de input**. [S. l.], 19 jan. 2018. Disponível em: <https://imasters.com.br/desenvolvimento/node-red-construindo-dashboard-parte-02-nodes-de-input>. Acesso em: 3 maio 2019.

VEIGA, Fernando. **Node Red - Construindo Dashboard - Parte 03: nodes de output e gráficos**. [S. l.], 26 jan. 2018. Disponível em: <https://imasters.com.br/desenvolvimento/node-red-construindo-dashboard-parte-03-nodes-de-output-e-graficos>. Acesso em: 3 maio 2019.

OLIVEIRA, Greici. **NodeMCU - Uma Plataforma com Características Singulares para o seu Projeto IoT**. [S. l.], agosto 2016. Disponível em: <http://blogmasterwalkershop.com.br/embarcados/nodemcu/nodemcu-uma-plataforma-com-caracteristicas-singulares-para-o-seu-projeto-iot/>. Acesso em: 10 maio 2019.

BASÍLIO, Shirley. **O que é Node-RED? Conhecendo e Instalando**. [S. l.], 2000. Disponível em: <http://blogmasterwalkershop.com.br/outros/o-que-e-node-red-conhecendo-e-instalando/>. Acesso em: 20 maio 2019.

VTA FERRAMENTAS. **Bloco-Padrão Retângular para Calibração de Micrômetros em Croblox® em Aço Starrett**. [S. l.], 20--?. Disponível em: <http://lojavirtual.toplojas.com.br/vtaferramentas/ProdutosDetalhes.php?Nome=bloco-padrao-retangular-para-calibracao-de-micrometros-em-crobox%AE-em-aco-starrett&Codigo=925510&Origem=>. Acesso em: 12 jun. 2019.

APÊNDICE A – PROGRAMA DE LEVANTAMENTO DE DADOS

```
const int analogInPin = A0;
int sensorValue = 0;
float media = 0;
void setup() {
  pinMode(A0, INPUT);
  Serial.begin(115200);
}
void loop() {
  int x = 0;

  if (Serial.available() > 0)
  {
    char ler = Serial.read();
    if (ler == '$'){
      for (x=0; x<10; x++)
      {
        sensorValue = analogRead(analogInPin)+sensorValue;
        delay(300);
      }
      media = (float)sensorValue/(float)10;
      Serial.print("Valor lido = ");
      Serial.println(media);
      media = 0;
      sensorValue = 0;
    }
  }
}
```

APÊNDICE B – PROGRAMA DE PROCESSAMENTO DE DADOS

Cabeçalho do Programa:

```
//Bibliotecas:
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <ESP8266WebServer.h>

//Biblioteca Wifi
//Biblioteca Servidor WEB

//Definições:
#define desligado 0
#define ligado 1
#define naoEnviado 0
#define enviado 1
#define desabilitado 0
#define habilitado 1

//Define que desligado é 0
//Define que ligado é 1
//Define que não enviado é 0
//Define que enviado é 1
//Define que desabilitado é 0
//Define que habilitado é 1

//Configuração da Porta do Web Server:
ESP8266WebServer server (80);

//Servidor WEB porta padrão HTTP -> 80

//Variáveis Constantes:
const char* ssid = "Nome da Rede";
const char* password = "Senha da Rede";
const int analogPinInPin = A0;
const int led = 2;

//Variável que indica nome da rede wifi
//Variável que indica senha da rede wifi
//Atribuição da nomenclatura A0 para o pino de entrada analógica
//Atribuição da nomenclatura led para o pino 2 do ESP32

//Variáveis Mutáveis:
int valorSensor = 0;
int valorAtual = 0;
int valorMedido = 0;
float media = 0;
float deslocamentoAbsoluto = 0;
float deslocamentoDigital = 0;
float a = -0.0054;
float b = 4.6893;
float zero = 0;
unsigned char flagSistema = desligado;
unsigned char flagCalibragem = naoEnviado;
unsigned char flagZero = naoEnviado;
unsigned char flagFabrica = desabilitado;
unsigned char flagReset = desabilitado;
String inclinacao = "";
String referencia = "";

//Variável que indica o valor lido pelo sensor em bits
//Variável que indica o valor lido pelo sensor em bits (soma total)
//Variável que indica o valor lido pelo sensor em bits (soma anterior)
//Variável que indica o valor médio lido pelo sensor em bits
//Variável que indica o valor de deslocamento absoluto em mm
//Variável que indica o valor de deslocamento calculado em mm
//Variável que indica a inclinação da curva bit x deslocamento
//Variável que indica o coeficiente linear da curva bit x deslocamento
//Variável que indica o valor zero da nova curva bit x deslocamento
//Flag que indica se o sistema está ligado ou desligado
//Flag que indica o novo valor de calibragem foi ou não enviado
//Flag que indica que o novo zero foi ou não enviado
//Flag que indica que o sensor foi ou não resetado para os dados de fábrica
//Flag que indica que o sensor teve ou não seu zero resetado
//Variável que recebe o valor de a
//Variável que recebe o valor de b
```

Função Void Setup:

```
void setup()
{
    //Configuração das Pinagens:
    pinMode (A0, INPUT);
    pinMode (led, OUTPUT);

    //Configuração da Serial:
    Serial.begin (115200);

    //Configuração do Wifi:
    WiFi.mode (WIFI_STA);
    WiFi.begin (ssid, password);

    //Verificando Conexão Wifi:
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
    {
        delay(500);
        Serial.println ("Conectando ao Wifi...");
    }
    Serial.println ("Conectado");
    Serial.println ("Endereço IP: ");
    Serial.println (WiFi.localIP());

    //Configurando o Servidor WEB:
    server.on ("/ligaSistema", [] ()
    {
        server.send (200, "text/plain", "Sistema Ligado");
        flagSistema = ligado;
    });
    server.on ("/desligaSistema", [] ()
    {
        server.send (200, "text/plain", "Sistema desligado");
        flagSistema = desligado;
    });

    server.on ("/novaCalibragem", [] ()
    {
        server.send (200, "text/plain", "Sensor Calibrado");
        flagCalibragem = enviado;
    });
    server.on ("/resetFabrica", [] ()
    {
        server.send (200, "text/plain", "Sensor Resetado de Fábrica");
        flagFabrica = habilitado;
    });
    server.on ("/novoZero", [] ()
    {
        server.send (200, "text/plain", "Novo Zero Ajustado");
        flagZero = enviado;
    });
    server.on ("/resetZero", [] ()
    {
        server.send (200, "text/plain", "Sensor Resetado no Zero");
        flagReset = habilitado;
    });
    server.on ("/dadoAbsoluto", handleAbsoluto);
    server.on ("/dadoDigital", handleDigital);
    server.on ("/valorA", HTTP_POST, handleInclinacao);
    server.on ("/valorB", HTTP_POST, handleReferencia);
    server.begin();
    Serial.println ("Server inicializado");
}
```

Função Void Loop:

```
void loop()
{
    medicao ();

    server.handleClient();

    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED)
    {
        digitalWrite(led, HIGH);
    }
    else
    {
        digitalWrite(led, LOW);
        Serial.println("Caiu WiFi");
        wifiReconnect();
    }
}
```

Envio de Dados para WEB:

```
void handleAbsoluto()
{
    String messageA = String(deslocamentoAbsoluto);
    server.send(200, "text/plain", messageA);
}

void handleDigital()
{
    String messageD = String(deslocamentoDigital);
    server.send(200, "/text/plain", messageD);
}
```

Recebimento de Dados da WEB:

```
void handleInclinacao()
{
    if (flagCalibragem == enviado)
    {
        inclinacao = server.arg("valorA");
        a = inclinacao.toFloat();
        flagCalibragem == naoEnviado;
    }
}

void handleReferencia()
{
    if (flagCalibragem == enviado)
    {
        referencia = server.arg("valorB");
        b = referencia.toFloat();
        flagCalibragem == naoEnviado;
    }
}
```

Processamento de Dados:

```
void medicao()
{
    if (flagSistema == ligado)
    {
        valorMedido = valorAtual;
        for (int x = 0; x<10; x++)
        {
            valorAtual += analogRead (A0);
            delay(100);
        }
        valorSensor = valorAtual - valorMedido;
        media = (float)valorSensor/(float)10;
        deslocamentoAbsoluto = a*media + b;
        if (flagZero == enviado)
        {
            zero = deslocamentoAbsoluto;
            flagZero = naoEnviado;
        }
        deslocamentoDigital = deslocamentoAbsoluto - zero;
    }
}
```

Resets e Reconexão Wifi:

```
void resetVariaveis()
{
    if (flagReset == habilitado)
    {
        zero = 0;
        flagReset == desabilitado;
    }
}

void resetSensor ()
{
    if (flagFabrica == habilitado)
    {
        a = -0.0054;
        b = 4.6893;
        flagFabrica == desabilitado;
    }
}

void wifiReconnect()
{
    WiFi.begin (ssid, password);

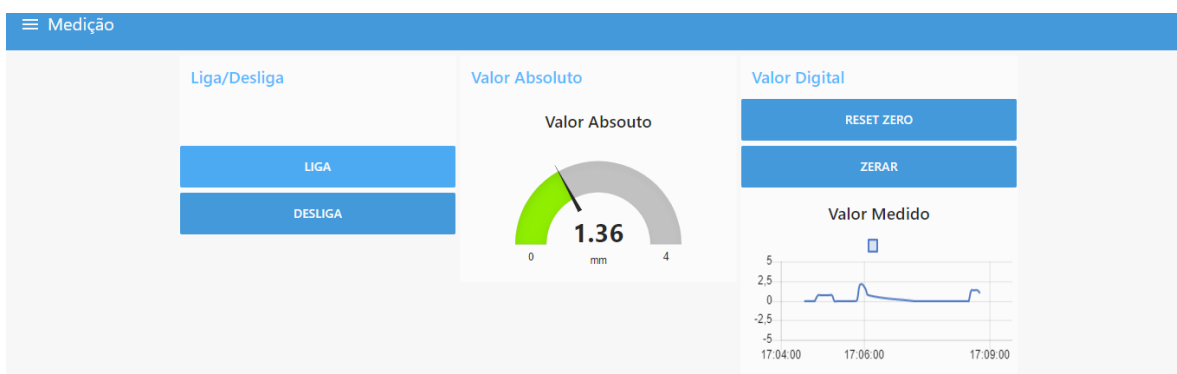
    //Verificando Conexão Wifi:
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
    {
        delay(500);
        Serial.println ("Conectando ao Wifi...");
    }
    Serial.println ("Conectado");
    Serial.println ("Endereço IP: ");
    Serial.println (WiFi.localIP());
}
```

APÊNDICE C – DADOS LEVANTADOS NO EXPERIMENTO PRÁTICO

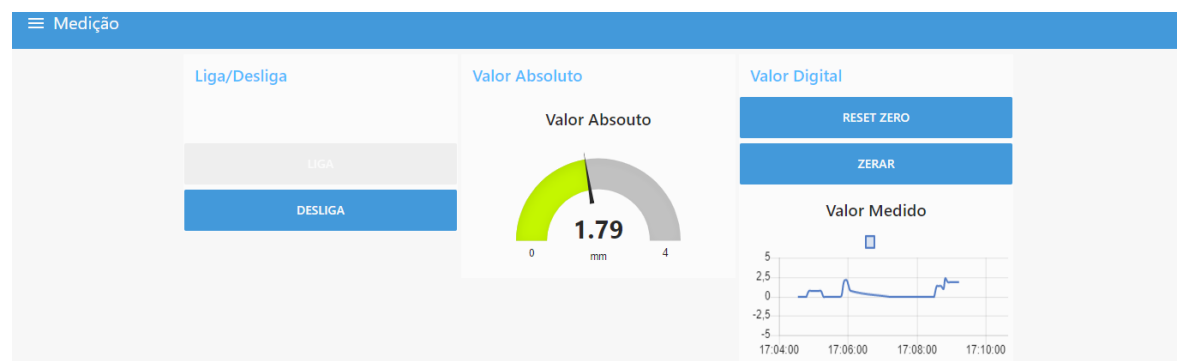
Sem Bloco-Padrão:



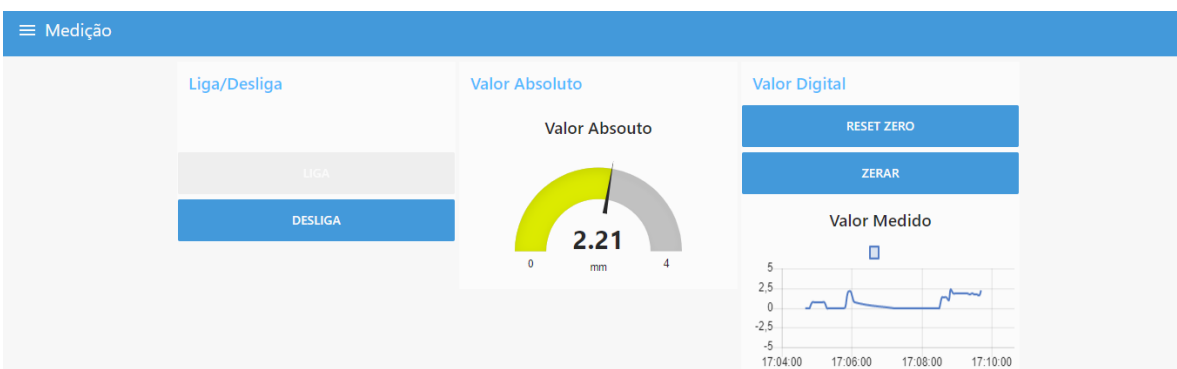
Com Bloco-Padrão (1mm):



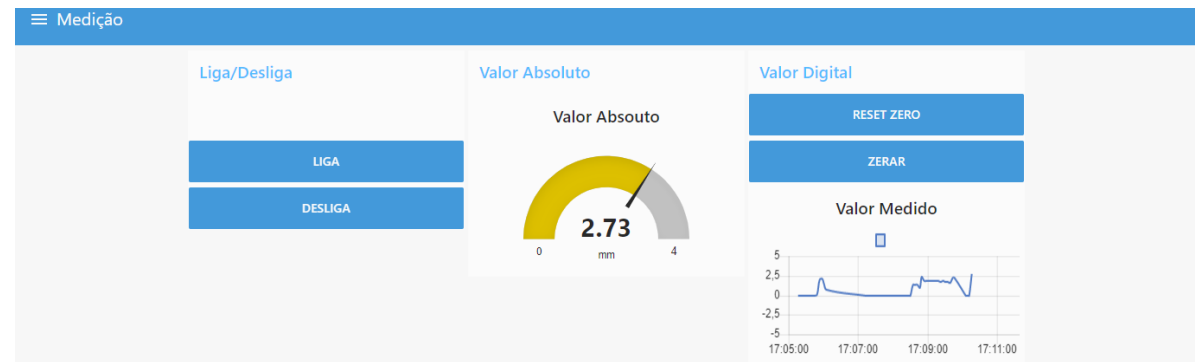
Com Bloco-Padrão (1,5mm):



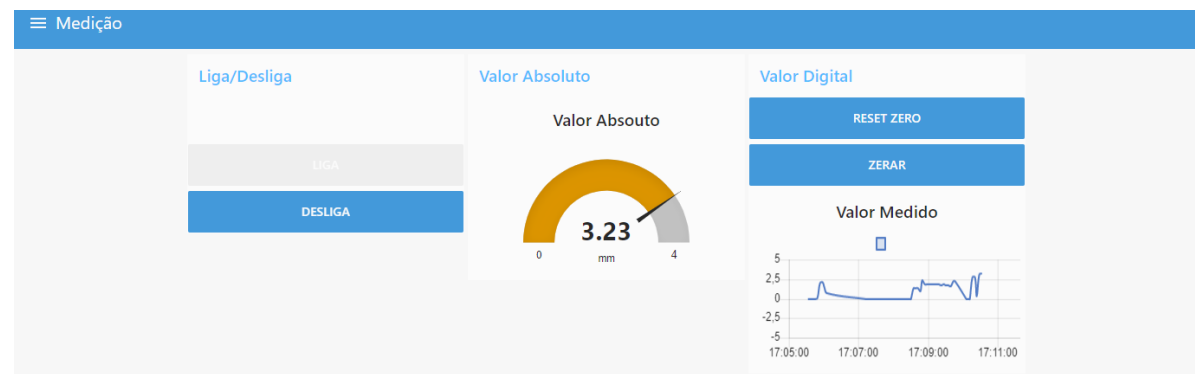
Com Bloco-Padrão (2mm):



Com Bloco-Padrão (2,5mm):



Com Bloco-Padrão (3mm):



Com Bloco-Padrão (3,5mm):



Com Bloco-Padrão (4mm):

