



UFPB

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

João Anélio Meira e Mello Neto

**Construção de um Sensor de Nível Analógico
Capacitivo com Transmissão dos Dados Via Rede
CAN**

João Pessoa/PB

2016

JOÃO ANÉLIO MEIRA E MELLO NETO

**CONSTRUÇÃO DE UM SENSOR DE NÍVEL ANALÓGICO
CAPACITIVO COM TRANSMISSÃO DOS DADOS VIA REDE
CAN**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal da Paraíba como parte
dos requisitos necessários para obtenção do
título de Engenheiro Eletricista*

Orientador: Carlos Alberto de Souza Filho

João Pessoa/PB

2016

JOÃO ANÉLIO MEIRA E MELLO NETO

Construção de um Sensor de Nível Analógico Capacitivo com Transmissão dos Dados via Rede CAN

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal da Paraíba como parte
dos requisitos necessários para obtenção do
título de Engenheiro Eletricista*

Aprovado Pela Banca Examinadora em:

**Prof. Carlos Alberto de Souza Filho, Msc
Universidade Federal da Paraíba**

**Prof. Lucas Vinicius Hartmann, Dr.
Universidade Federal da Paraíba**

**Prof. Euler Cássio Tavares de Macêdo, Dr.
Universidade Federal da Paraíba**

João Pessoa/PB

2016

“Quem ama nunca faz o mal, e é para o bem que nascemos”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à Deus, porque sem Ele jamais eu teria chegado a esta conquista.

Em seguida, agradeço aos meus pais, João e Desterro, que estavam ao meu lado em todos os momentos nesta trajetória, com palavras de otimismo, incentivo e segurança. Foi difícil cruzar a linha de chegada, passei por dificuldades e obstáculos, mas junto também aos meus professores que foram um farol iluminando os meus caminhos e que me trouxeram um cabedal de conhecimentos no mundo da engenharia.

Aos meus irmãos, Hanna Janyne e Victor, pelo incentivo na realização dos meus sonhos.

Aqui estou para agradecer, em especial, as orientações do Professor Carlos Alberto, imprescindíveis na realização deste trabalho.

Além disso, agradeço a amizade dos meus colegas, Thiago e Paulo, que no percurso desta caminhada compartilhamos conhecimentos, experiências, momentos de alegria e também de tristeza.

Aos demais familiares e amigos, que de certa forma contribuíram dando apoio para realização desta etapa da minha vida.

RESUMO

Este trabalho aborda a construção e calibração de um sensor de nível analógico capacitivo, capaz de fazer medições de líquidos condutores. Foi desenvolvido um circuito de condicionamento de sinal, que relaciona a saída com a alteração dos valores de capacitância do sensor, de acordo com o nível. Foi feita a modelagem do sensor e em seguida foi encontrada a equação que mapeia a medição de nível com a sua respectiva saída.

Palavras-chave: Sensor de nível; Rede CAN; Circuito de condicionamento.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

| | |
|---------------------------------------|----|
| Figura 1 - Capacitor cilíndrico | 14 |
|---------------------------------------|----|

Capítulo 2

| | |
|---|----|
| Figura 2 - Flutuador tipo boia | 16 |
| Figura 3 - Sensor de nível por condução | 17 |
| Figura 4 - Sensor de nível ultrassônico | 18 |
| Figura 5 - Sensor hidrostático | 19 |
| Figura 6 - Detectores de nível por vibração | 20 |
| Figura 7 - Medidor de nível a laser | 21 |
| Figura 8 - Capacitor de placas paralelas | 22 |
| Figura 9 - Capacitor cilíndrico | 24 |
| Figura 10 - Sensor de nível cilíndrico | 24 |
| Figura 11 - Mensagem CAN normal | 27 |
| Figura 12 - Níveis de tensão nas mensagens da rede CAN | 28 |
| Figura 13 - Estrutura característica de um nó da rede CAN | 29 |
| Figura 14 - Diagrama funcional de um sistema de aquisição | 31 |
| Figura 15 - Diagrama do sistema | 35 |

Capítulo 3

| | |
|---|----|
| Figura 16 - Modelo do sensor | 37 |
| Figura 17 - Modelagem do sensor | 38 |
| Figura 18 - Sensor de nível capacitivo construído | 39 |
| Figura 19 - Diagrama de blocos do sistema | 40 |
| Figura 20 - Circuito para medição de capacitância | 40 |
| Figura 21 - Oscilador Ponte de Wien | 42 |
| Figura 22 - Ganho | 43 |
| Figura 23 - Retificador | 44 |
| Figura 24 - Circuito para conversão 0-10 V | 46 |
| Figura 25 - Encapsulamento INA 122 | 46 |
| Figura 26 - TIVA™ C Series TM4C123G Launchpad | 48 |
| Figura 27 - Fluxograma do programa de transmissão | 49 |
| Figura 28 - PCB do circuito de condicionamento de sinal | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 29 - Circuito de Condicionamento..... | 50 |
| Figura 30 - Circuito do transceptor CAN..... | 51 |

Capítulo 4

| | |
|--|----|
| Figura 31 - Sistema de medição..... | 52 |
| Figura 32 - Curva capacitância x nível | 54 |
| Figura 33 - Forma de onda na saída do circuito oscilador | 55 |
| Figura 34 - Sinal de saída do medidor de capacitância para nível zero | 56 |
| Figura 35 - Sinal de saída do circuito medidor de capacitância para metade do reservatório | 57 |
| Figura 36 - Retas dos valores reais e valores coletados | 58 |
| Figura 37 - Sinal na saída do circuito medidor de capacitância e na saída final do sistema..... | 59 |
| Figura 38 - Curva do sinal de saída x altura | 61 |
| Figura 39 - Mensagem Rede CAN | 62 |

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Capítulo 1

| | |
|---|----|
| Quadro 1 – Especificações do sistema..... | 15 |
|---|----|

Capítulo 2

| | |
|--|----|
| Quadro 2 - Regras da norma ISO 11898 para o comprimento do barramento em função da taxa de transmissão | 26 |
|--|----|

Capítulo 3

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Valores de constantes dielétricas | 36 |
|--|----|

Capítulo 4

| | |
|--|----|
| Tabela 2 - Dados obtidos para levantamento da curva capacitância x nível..... | 53 |
| Tabela 3 - Valores de tensão obtidos na saída do circuito medidor de capacitância..... | 57 |
| Tabela 4 - Valores de tensão na saída do sistema | 60 |

Sumário

| | |
|---|----|
| Sumário..... | 10 |
| Capítulo 1 - Introdução..... | 12 |
| 1.1. Métodos de Medição..... | 12 |
| 1.2. Objetivos Gerais | 14 |
| 1.3. Objetivos Específicos | 14 |
| 1.4. Estrutura do Trabalho..... | 14 |
| 1.5. Especificações..... | 15 |
| Capítulo 2 - Embasamento Teórico | 16 |
| 2.1. Sensores de Nível | 16 |
| 2.1.1. Flutuadores | 16 |
| 2.1.2. Sensor de Nível Condutivo | 17 |
| 2.1.2. Sensor de Nível Ultrassônico | 17 |
| 2.1.3. Sensor Hidrostático..... | 18 |
| 2.1.4. Medição de Nível por Vibração..... | 19 |
| 2.1.5. Sensor de Nível a <i>Laser</i> | 20 |
| 2.1.6. Sensor de Nível Capacitivo..... | 21 |
| 2.2. Interface CAN..... | 25 |
| 2.2.1. Histórico | 25 |
| 2.1.2. Conceituação..... | 26 |
| 2.1.3. Características da camada Física..... | 27 |
| 2.3. Sistema de Aquisição de Dados..... | 30 |
| 2.3.1. Definição de aquisição de dados e controle | 30 |
| Capítulo 3 – Descrição do Sistema | 35 |
| 3.1. Arquitetura do Sistema | 35 |
| 3.2. Modelagem do Sensor | 36 |
| 3.3. Circuito de Condicionamento..... | 39 |
| 3.3.1. Circuito Medidor de Capacitância..... | 40 |
| 3.3.2. Oscilador..... | 42 |
| 3.3.3. Ganho..... | 43 |
| 3.3.4. Retificador | 44 |

| | |
|---|----|
| 3.3.5. Conversão 0-10V | 45 |
| 3.3.6. Aquisição dos Dados | 47 |
| 3.3.6.1. Software | 48 |
| 3.4. Construção do Circuito de Condicionamento..... | 49 |
| 3.4.1. Placas de Circuito Impresso | 49 |
| Capítulo 4 - Resultados..... | 52 |
| 4.1. Curva Capacitância x Nível..... | 53 |
| 4.2. Oscilador | 55 |
| 4.3. Medição de Capacitância..... | 56 |
| 4.4. Conversão 0-10 V..... | 58 |
| 4.5. Rede CAN | 61 |
| Conclusão..... | 63 |
| Bibliografia..... | 64 |

Capítulo 1 - Introdução

Com o advento da revolução industrial e o crescimento desenfreado da produção e comercialização de produtos, a indústria se viu na necessidade do desenvolvimento de processos automatizados. Nesse ambiente industrial um dos componentes mais utilizados e imprescindíveis, são os componentes capazes de adquirir informações relativas aos processos de produção. Os sensores são os componentes que desempenham esse papel, de adquirir informações relativas as variáveis de processos [5].

As variáveis de processos são geralmente variáveis físicas como temperatura, pressão força, comprimento, ângulo de rotação, nível de recipiente, fluxo e etc [5]. Outro dispositivo de grande relevância no processo são os transdutores, cuja função é converter um sinal físico em um sinal capaz de ser interpretado por dispositivos eletrônicos.

A medição de nível é extremamente utilizada nas mais diversas aplicações industriais, podendo ser citadas a medição de nível de grãos em silos, em reservatórios de combustíveis, em reservatórios de água. Embora seja relativamente simples em seus conceitos, a medição requer na prática artifícios e técnicas avançadas, principalmente para fins operacionais.

1.1. Métodos de Medição

Os três tipos básicos de medição de nível são [6]:

- 1) Direto;
- 2) Indireto;
- 3) Descontínuo.

A medição direta pode ser realizada medindo-se de forma direta a distância entre o nível do produto e um referencial previamente definido. Neste tipo de medição faz-se uso da observação visual, empregando instrumentos como por exemplo, réguas, gabaritos, visores de nível, boia ou flutuador.

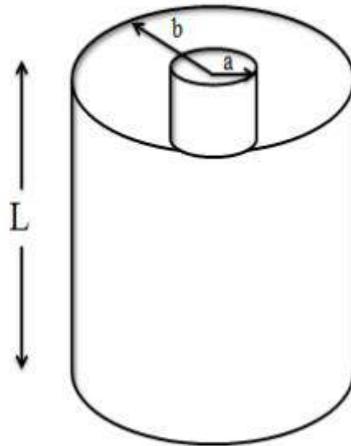
Na medição indireta, o nível é medido em função de grandezas físicas a ele relacionadas, como por exemplo, pressão (manômetros de tubo U, níveis de diafragma, células de pressão diferencial, etc), empuxo (níveis de deslocador) e princípios elétricos (níveis capacitivos, detector de nível condutivo, níveis radioativos, níveis ultrassônicos, detector de nível de lâminas vibrantes, etc.).

Na medição descontínua, ou discretas, tem-se apenas a indicação quando o nível do elemento a ser medido atinge certos pontos, como em condições de alarmes de nível alto ou baixo [6].

O protótipo foi desenvolvido para suprir uma necessidade que o laboratório de Automação e Controle (LAC) tinha na parte de sensoriamento analógico de nível, pois o único sensor de nível existente no laboratório era um sensor de nível discreto do tipo condutivo. O sensor foi desenvolvido de forma flexível para se tornar compatível tanto na área industrial, se conectando com CLPs (Controlador Lógico Programável), bem como utilizando a comunicação via rede CAN.

Neste trabalho foi utilizado o sensor capacitivo cilíndrico, apresentado na Figura 1. O sensor de capacitância pode ser aplicado a fluidos não-condutores e condutores. No caso de fluidos condutores, deve-se utilizar uma capa isolante em volta de uma haste, a qual servirá como eletrodo (uma das placas do capacitor). A outra placa condutora ou eletrodo do capacitor pode ser a própria parede do reservatório (se esta for metálica) ou então uma nova haste.

Figura 1 - Capacitor cilíndrico



Fonte: Notas de Aula de Física 3 [23].

1.2. Objetivos Gerais

Construção de um sensor de nível analógico capacitivo com transmissão dos dados via rede CAN.

1.3. Objetivos Específicos

- Construção e calibração do sensor de nível; desenvolvimento do circuito de condicionamento (placa de circuito impresso). Verificação do funcionamento do sensor como um todo, bem como, constatar o processo de transmissão de dados.

1.4. Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado da seguinte maneira:

No capítulo 2 é realizada uma revisão teórica de todos assuntos utilizados para elaboração do sensor.

No capítulo 3 é apresentado a modelagem do sensor e a equação que o representa.

No capítulo 4 será estudado cada estágio do circuito de condicionamento do sinal.

O capítulo 5 falará sobre a construção do circuito de condicionamento e do circuito do transceptor da rede CAN.

Por fim, no capítulo 6 estão detalhados os resultados obtidos experimentalmente, além dos comentários e observações das formas de onda apresentadas.

1.5. Especificações

O sensor proposto terá as especificações mostradas no Quadro 1.

Quadro 1 - Especificações do sistema

| | |
|---------------------|----------------------------|
| Aplicação | Líquido condutivo |
| Faixa de Medição | 0-12 cm |
| Sinal de Saída | 0-10 V (utilização em CLP) |
| Comunicação Digital | CAN |

Fonte: Autor

Capítulo 2 - Embasamento Teórico

2.1 Sensores de Nível

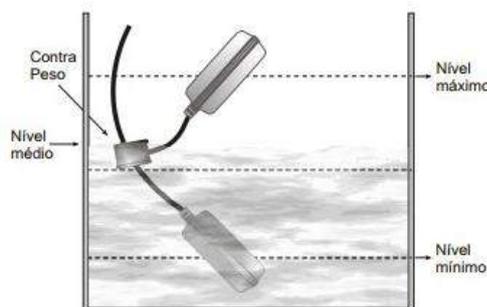
Esta seção versará sobre o estudo dos sensores de nível mais utilizados em aplicações tanto industriais quanto não industriais, tais como: Flutuador, condução, ultrassônico, pressão hidrostática, vibratório, *laser* e mais detalhadamente o sensor capacitivo.

2.1.1 Flutuadores

Os sensores de níveis, baseados na teoria de Arquimedes, do empuxo, ainda que de tecnologia um tanto que arcaica, continuam como dispositivos de escolha para muitas aplicações.

O flutuador sobe à medida que o nível do líquido sobe. O movimento do flutuador é traduzido para uma ação de controle. Em algumas aplicações são empregadas conexões mecânicas que convertem o movimento de subida e descida do flutuador numa abertura/fechamento de um contato. No caso de tanques abertos, a boia é o sistema mais comum. A boia fica sobre o líquido e conectada ao exterior do reservatório, indicando indiretamente o nível. A conexão pode ser direta, magnética ou hidráulica. Mostra-se na Figura 2 uma chave tipo boia.

Figura 2 - Flutuador tipo boia



Fonte: Hidroshop [15].

2.1.2 Sensor de Nível Condutivo

É uma forma de medição indireta na qual, o nível é detectado a partir da condutância elétrica do material, o qual é um líquido condutor de corrente com uma fonte relativamente baixa (menor que 20 V). Esse é um dos métodos mais simples e barato para detecção e controle de nível.

Uma forma comum de implementar esse sistema é utilizar dois ou mais eletrodos espaçados, não sendo necessário referenciar o reservatório ao potencial do terra. Pode-se ver na Figura 3 um exemplo de um medidor disponível no mercado.

Figura 3 - Sensor de nível por condução



Fonte: Pepperl-fuchs [16].

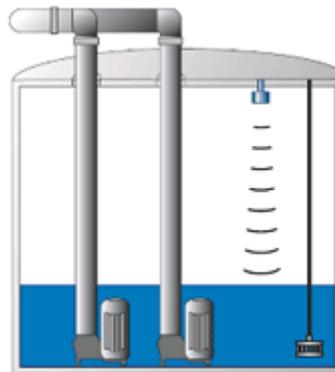
2.1.2. Sensor de Nível Ultrassônico

Os sensores que fazem uso de ultrassons, representado na Figura 4, encontram uma grande gama de utilizações na indústria e mesmo em outros campos. Esses sensores se caracterizam por operar com um tipo de radiação não sujeita a interferência eletromagnética e totalmente limpa, o que pode ser de grande importância para determinados tipos de aplicação [9].

O princípio de funcionamento do sensor é baseado na emissão de uma onda sonora de alta frequência, e na medição do tempo levado para a recepção do eco produzido quando esta onda se choca com um objeto capaz de refletir a onda.

Os sensores emitem pulsos ultrassônicos ciclicamente. Quando um objeto reflete estes pulsos, o eco resultante é captado e convertido em um sinal elétrico. [10]

Figura 4 - Sensor de nível ultrassônico



Fonte: Renováveis Magazine [10].

2.1.3. Sensor Hidrostático

O sensor de nível do tipo hidrostático, vide Figura 5, tem seu princípio de funcionamento totalmente baseado na medição da pressão exercida pela coluna de líquido acima do sensor.

O dispositivo sensor possui uma boa robustez, pois pode ser utilizado em tanques com presença de espuma, turbulência ou gases/vapores além de não ser afetado por características do fluido que possam sofrer mudanças como viscosidade ou constantes dielétrica [11].

Figura 5 - Sensor hidrostático



Fonte: Medidores Tipo Hidrostático [25].

2.1.4. Medição de Nível por Vibração

Essa medição é feita utilizando detectores que funcionam como chaves. Esses detectores são construídos no formato de um garfo, com dentes simétricos, preso por uma membrana que faz parte da montagem do sistema. O sistema é forçado a vibrar em sua frequência de ressonância quando estimulado por um cristal piezoelétrico. Esse garfo ressonante é construído de modo que, quando imerso em um líquido, a frequência de ressonância é deslocada 10% a 20%. A frequência de ressonância natural é medida por um transdutor piezoelétrico, e o deslocamento de frequência é detectado por um circuito de referência.

A principal característica desse tipo de sistema é a robustez, pelo fato de não necessitar partes móveis. Assim, o sensor pode ser montado em qualquer posição sem que seja necessário calibrá-lo, além de ter tamanho reduzido [1]. Na Figura 6 estão representados medidores comerciais.

Figura 6 - Detectores de nível por vibração



Fonte: Digitrol, chaves-de-nível [18].

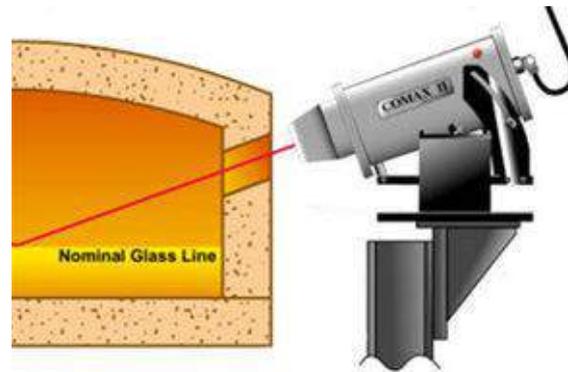
2.1.5. Sensor de Nível a *Laser*

Os sensores de nível a *laser* tem o seu princípio de funcionamento semelhante ao dos medidores de nível por ultrassom. Esse método é bastante eficaz e pode ser aplicado na medição de nível de sólidos, substâncias com massa específica elevada, líquidos opacos, produtos alimentícios, cimentos e etc.

O sistema é composto por um laser, instalado na parte superior do reservatório que dispara um pulso que percorre a distância até a superfície do material, sendo então refletido e registrado por um detector.

O sistema de detecção é composto por um temporizador que registra o tempo e o converte em distância. O laser quase não apresenta dispersão e conseqüentemente elimina a possibilidade de falsos ecos do sinal emitido. Esses sistemas são ideais para medição de nível em reservatórios com obstáculos e podem medir distâncias de até 450 m. Mostra-se na Figura 7 um medidor a laser comercial [11].

Figura 7 - Medidor de nível a laser



Fonte: Directindustry [19].

2.1.6. Sensor de Nível Capacitivo

2.1.6.1. Descrição do Sensor Capacitivo

O método capacitivo pode ser aplicado para medição de nível de materiais isolantes ou condutores. Em líquidos condutores de corrente elétrica, deve-se moldar uma camada de isolante revestindo uma haste, a qual servirá como eletrodo (uma das placas do capacitor). A outra placa condutora ou eletrodo do capacitor pode ser a própria carcaça do reservatório (se esta for metálica), isso para medição de líquidos não-condutores, ou uma nova haste para medição de líquidos condutores

2.1.6.2. Efeito Capacitivo

A capacitância é uma propriedade elétrica presente entre dois condutores separados por um não condutor (dielétrico). A carga q em um capacitor é proporcional à tensão V_a que existe entre duas placas paralelas. A constante de proporcionalidade que relaciona a carga q e a tensão V_a é chamada de capacitância C [F], definida pela relação:

$$Q = C * V \quad (2.1)$$

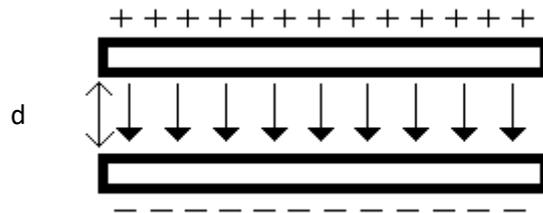
Em que:

- $Q \left[\frac{C}{m^2} \right]$ é a densidade de carga;
- C é a Capacitância [F];
- V [V] a tensão aplicada no capacitor.

Cabe notar que a quantidade de carga armazenada em um capacitor depende da sua geometria e das propriedades dielétricas do isolante. Para um capacitor de placas paralelas, representado na Figura 8, a capacitância C é representada por:

$$C = \frac{\varepsilon_i * A}{d} \quad (2.2)$$

Figura 8 - Capacitor de placas paralelas



Fonte: Autor

onde ε_i é a permissividade do isolante (diz respeito a capacidade de armazenar cargas) em F/m e d é a distância de separação entre as placas do capacitor [m]. A permissividade para um isolante é dada por:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_o * K \quad (2.3)$$

Sendo $\varepsilon_o (8,85 * 10^{-12} F/m)$ a permissividade do vácuo e K a permissividade relativa ou constante dielétrica do isolante.

O valor da capacitância para a configuração cilíndrica do capacitor, cuja superfície interna tem raio a , enquanto a superfície externa tem raio b , representado pela Figura 9, é encontrado usando o teorema de Gauss, o qual será descrito nos parágrafos posteriores.

O capacitor pode ser carregado ligando a placa (ou armadura) externa à terra. Admitindo-se que carregamos a armadura interna com carga por unidade de comprimento igual a λ , a carga externa será tal que sua densidade será $-\lambda$.

De acordo com o teorema de Gauss, quando aplicado à armadura interna o campo elétrico a uma distância r do eixo do cilindro é dado pela expressão:

$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon r} \quad (2.4)$$

O campo elétrico tem a direção radial, conforme indicado na Figura 9. Como o outro eletrodo não contribui para o campo elétrico para os pontos no seu interior, conclui-se que, na região entre as placas, o campo é dado por:

$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon r} \text{ para } a < r < b \quad (2.5)$$

A expressão para o potencial elétrico como função da distância é:

$$V(r) = \frac{\lambda \ln r}{2\pi\epsilon} + V_0 \text{ para valores de } r \text{ tais que } r_1 < r < r_2 \quad (2.6)$$

onde a constante V_0 é uma constante arbitrária.

A diferença de potencial entre as placas (definida como a diferença de potencial entre a placa carregada positivamente e a carregada negativamente) é dada pela expressão:

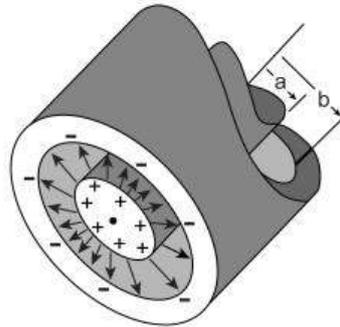
$$\Delta V = V(b) - V(a) = \frac{\lambda \ln(b/a)}{2\pi\epsilon} \quad (2.7)$$

A capacitância, portanto, de um capacitor cilíndrico é dada por:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln(b/a)} \quad (2.8)$$

Em que l é o comprimento dos cilindros e a e b são os raios do cilindro interno e do cilindro externo respectivamente.

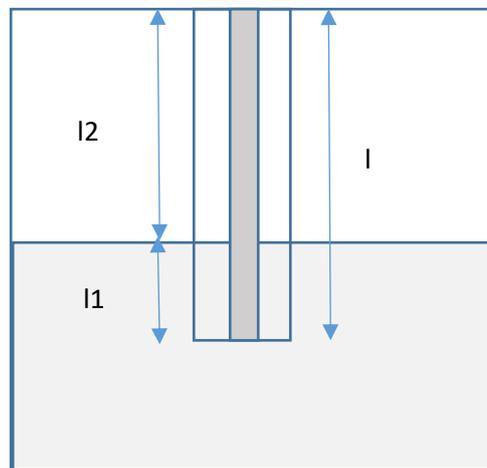
Figura 9 - Capacitor cilíndrico.



Fonte: Instrumentação e Fundamentos de Medidas [1].

O sensor de nível capacitivo cilíndrico projetado está ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Sensor de nível cilíndrico



Fonte: Autor

A medida que o líquido sobe, preenchendo o sensor, o valor da capacitância vai sendo alterado de acordo com o comprimento da parte que está imersa que aumentará (l_1) juntamente com a parte que terá o ar como dielétrico que diminuirá (l_2).

2.2 Interface CAN

2.2.1 Histórico

Em meados dos anos 1980, a indústria automobilística começou a perceber um elevado crescimento no número de componentes eletrônicos de controle e telemetria usados em veículos. Por exemplo, a rede de dados chegava a ter 10km de extensão, com cabos de cerca de 10cm de diâmetro [2]. Isso deixava o veículo bem mais pesado e conseqüentemente com um consumo de combustível bastante elevado. Reconfigurações na rede e manutenção nos nós tomavam muito tempo e mostravam-se fontes de erro. Para resolver esse problema, o modelo de Controller Area Network (CAN) foi proposto por Robert Bosch em 1980, para interconexão de componentes de controle em veículos [5]. A rede sugerida apresenta significativas vantagens, e vem se tornando a opção mais utilizada para montagem de uma rede de dados veicular.

A rede automotiva CAN é padronizada mundialmente pela resolução ISO (International Society of Organization) 11898. A regulamentação específica que estabelece os diferentes tipos de redes CAN e a aplicabilidade de cada uma em diferentes automóveis é regulamentada pela SAE (Society of Automotive Engineers)[3].

Por possuir boas características, a rede CAN vem tendo bastante aceitação também em aplicações industriais, com alto índice de sucesso. Isso se deve às características robustas e confiáveis da rede. Pois se trata de uma rede que foi desenvolvida para um meio muito ruidoso e com grandes oscilações de alimentação.

A rede CAN proporciona as seguintes características:

- Prioridade de mensagens;
- Tempos de latência garantidos;
- Flexibilidade de configuração;
- Recepção multinó com re-sincronização;
- Consistência dos dados;
- Multimestre;

- Detecção e sinalização de erro;
- Distinção entre erros temporários e falhas permanentes em nós.

2.1.2. Conceituação

A rede CAN é baseada no conceito de multi-mestre, em que todos os módulos (nós) podem se tornar mestre em determinado momento e escravo em outro. Possui uma transmissão broadcast, a qual se caracteriza por enviar suas mensagens para todos os nós existentes na rede.

Outra vantagem de se usar este protocolo é o fato de apresentar detecção de portadora e de colisão e arbitragem na prioridade da mensagem (CSMA/CD+AMP). Isto significa que todo nó que deseja transmitir uma mensagem verifica o estado do barramento, analisando se outro nó está ou não enviando uma mensagem de maior prioridade. Caso isso ocorra, as colisões são detectadas e a mensagem de menor prioridade interromperá sua transmissão e o nó de maior prioridade continuará enviando, sem a necessidade de reiniciá-la [7].

A taxa de transmissão dos dados é inversamente proporcional ao comprimento do barramento. A maior velocidade é encontrada considerando-se um barramento de até 30 metros. O Quadro 2 mostra a relação entre o comprimento da rede e a taxa de transmissão dos dados, regulamentada pela norma ISO 11898.

Quadro 2 - Regras da norma ISO 11898 para o comprimento do barramento em função da taxa de transmissão

| Taxa de Transmissão | Comprimento (m) |
|---------------------|-----------------|
| 1 Mbp/s | 30 |
| 800 kbp/s | 50 |
| 500 kbp/s | 100 |
| 250 kbp/s | 250 |
| 125 kb/s | 500 |
| 62,5 kb/s | 1000 |
| 20 kb/s | 2500 |
| 10 kb/s | 5000 |

Fonte: Autor

O formato das mensagens da rede CAN pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 - Mensagem CAN normal.

| | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------|-------------|-------------|----|-----|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| S O F | 11 ou 29 - Bit Identificador | R T R | I D E | r0 | DLC | 0... 8 Bytes Data | C R C | A C K | E O F | I F S |
|-------------|---------------------------------|-------------|-------------|----|-----|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|

Fonte: Autor

Em que:

- SOF – Início de quadro. Um único bit dominante;
- Identificador – Quanto maior a prioridade da mensagem, menor o valor lógico desse campo;
- RTR – Bit dominante quando requisita dados de outro(s) nó(s) especificado(s) pelo campo identificador;
- IDE – Bit dominante quando o campo identificador é de tamanho normal;
- r0 – Reservado pela especificação;
- DLC – 4 bits indicando o total de bytes usados no campo de dados;
- Dados – Até 64 bits;
- CRC – Teste de redundância cíclica de 16 bits dos dados anteriores. Utiliza um polinômio identificador simples ($X^{15} + X^{12} + X^1$).
- ACK – Campo de 2 bits que permite a todo e qualquer nó validar a mensagem. 1 bit para escrita e outro como delimitador.
- EOF – 7 bits que indicam o final do quadro e verificam erro de bit stuffing.
- IFS – 7 bits que indicam o tempo para o controlador disponibilizar o dado para a aplicação.

2.1.3. Características da camada Física

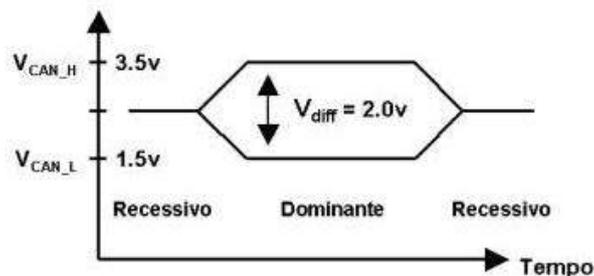
Na especificação inicial feita por Robert Bosch, nenhum meio foi definido, permitindo assim diferentes opções para o meio de transmissão e níveis de tensão dos

sinais [4]. Essas informações foram mais tarde consideradas pelo padrão ISO, onde estão definidas as características dos sinais. Com o CAN, é possível utilizar diversos meios físicos, tais como: par trançado, fibra ótica, etc. Porém, hoje em dia, a maioria das aplicações utiliza um barramento diferencial a dois fios ou quatro fios. Esse barramento trabalha com os sinais de dados CAN_H (CAN High) e CAN_L (CAN Low).

Na rede CAN, os dados enviados devem ser interpretados pela análise da diferença de potencial entre os fios CAN_H e CAN_L, portanto classificado como par trançado diferencial. Este método atenua fortemente os efeitos causados por interferências eletromagnéticas, uma vez que qualquer sinal comum aos dois fios será eliminado do sistema.

Na rede CAN, os dados são representados por bits dominantes e recessivos, de acordo com a condição presente nos fios CAN_H e CAN_L. A Figura 12 ilustra os níveis de tensão em uma rede CAN, bem como os níveis de tensão para os bits dominantes e recessivos [22].

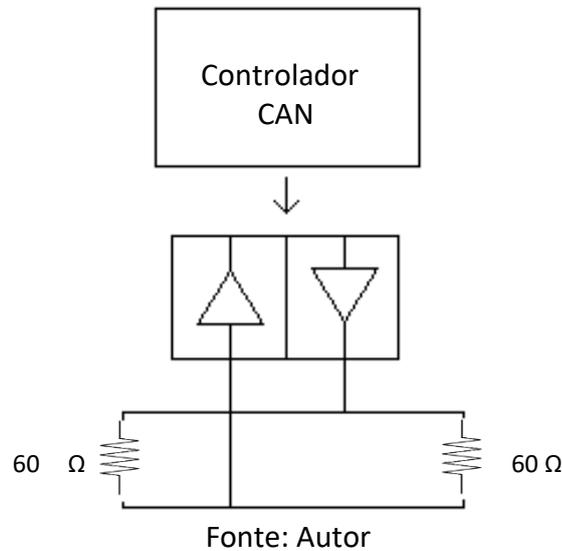
Figura 12 - Níveis de tensão nas mensagens da rede CAN



Fonte: Autor

A camada física é responsável pela transferência de bits entre os nós de uma rede CAN. Esta camada especifica o modo como os sinais são transmitidos, parâmetros como temporização, codificação e sincronização das sequências de bits a serem transmitidos. A estrutura característica de um nó da rede CAN é mostrada na Figura 13.

Figura 13 - Estrutura característica de um nó da rede CAN



A estrutura de um nó da rede CAN é constituída pelos seguintes elementos:

- 1) Controlador CAN: o controlador CAN tem como função implementar as características da rede. As principais funções são:
 - a. Filtragem das mensagens;
 - b. Encapsulamento da mensagem que será transmitida;
 - c. Cálculo do CRC;
 - d. Inserir e apagar o “ bit stuff ”;
 - e. Sincronização do “bit time”
 - f. Detecção e sinalização de erros;
 - g. Gerar e detectar o bit de reconhecimento da mensagem;
 - h. Disponibilizar a mensagem para o nó interessado.

- 2) Transceptor: Adapta o sinal digital para os padrões da rede, por meio de um transmissor e receptor. Ao mesmo tempo protege o controlador de eventuais sobretensões ou curto de rede. Ele apresenta algumas características importantes como:
 - a. Taxa de transmissão acima de 1 Mbit/s;
 - b. Proteção contra sobrecarga;
 - c. Proteção contra curto-circuito tanto para terra como para fonte;
 - d. Baixo consumo de corrente em modo de repouso;

2.3. Sistema de Aquisição de Dados

2.3.1. Definição de aquisição de dados e controle

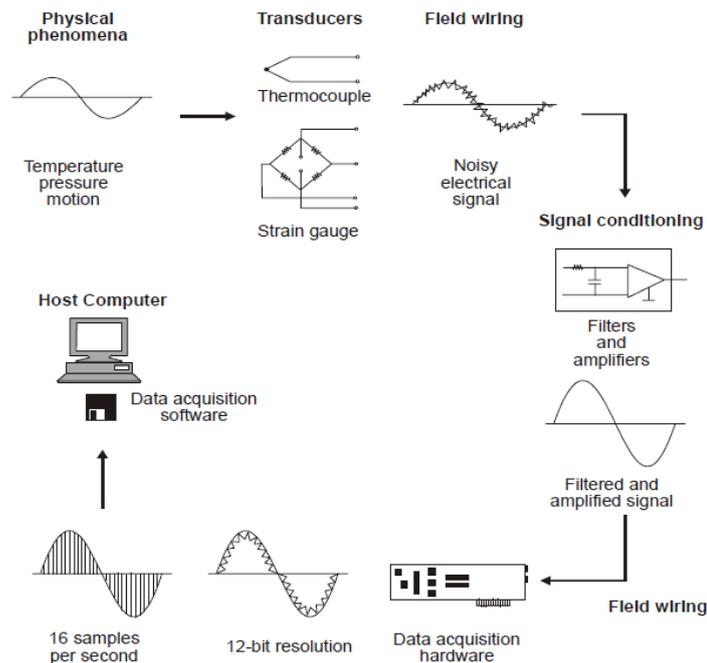
A aquisição de dados é o processo pelo qual um fenômeno físico é transformado em um sinal elétrico o qual é medido e convertido em um formato digital para processamento, análise e armazenamento.

Um sistema de aquisição de dados e controle, construído em torno do poder e flexibilidade que um computador pode oferecer, pode conter uma grande variedade de blocos de hardware e de diferentes fabricantes. Portanto, faz-se necessário um sistema que integre os componentes em um sistema de trabalho completo [8].

Os elementos básicos de um sistema de aquisição de dados, como mostrado no diagrama funcional da Figura 14, são os seguintes:

- Sensores e transdutores;
- Sistema de comunicação;
- Condicionamento de sinal;
- Hardware de aquisição de dados;
- PC (Sistema Operacional);
- Software de aquisição de dados.

Figura 14 - Diagrama funcional de um sistema de aquisição



Fonte: Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems [8].

2.3.1.1. Sensores e Transdutores

Os transdutores são responsáveis pela conversão de um tipo de grandeza em outra, por exemplo, elétrica em magnética, térmica em elétrica e vice-versa.

Juntamente com os transdutores, os sensores fornecem a interface entre o mundo real e o sistema de aquisição de dados, por intermédio da conversão do fenômeno físico em sinais elétricos compatíveis com o condicionamento de sinal e/ou com o sistema de aquisição [8].

2.3.1.2. Sistema de Comunicação

Representa a conexão física entre os transdutores e sensores e o hardware de condicionamento de sinal e/ou sistema de aquisição de dados. Quando o sinal de saída do circuito de condicionamento ou o hardware de aquisição de dados está localizado

remotamente do PC, então o sistema de comunicação proporciona a conexão destes elementos de hardware com o supervisorio [8].

2.3.1.3. *Condicionamento do Sinal*

Os sinais elétricos gerados pelos transdutores geralmente necessitam ser convertidos para um formato aceitável pelo sistema de aquisição de dados, particularmente o conversor A/D, o qual converte os dados do sinal para um formato digital [8].

As principais funções de um circuito de condicionamento de sinal são:

- Filtragem;
- Amplificação;
- Linearização;
- Isolação;
- Fonte de Excitação;

Um filtro pode ser definido como uma malha seletiva de frequência. A filtragem do sinal é realizada por meio de circuitos cujo ganho depende da frequência do sinal a eles aplicados. Essa propriedade permite que eles sejam empregados para selecionar uma certa faixa de frequência, ou para eliminar sinais indesejáveis, tais como ruído [8][12].

A amplificação permite o aumento da resolução do sinal medido, por meio da amplificação do sinal de entrada. Este processo proporciona ao sinal de saída a mesma faixa de entrada dos conversores AD.

A linearização é o processo de interpretar o sinal medido pelo sensor, podendo ser feita tanto por condicionamento de sinal quanto por software. Este processo facilita a análise e processamento do sinal adquirido.

Uma das aplicações dos equipamentos de condicionamento de sinais é isolação que ele proporciona entre o sistema, onde está ocorrendo a medição, e o sistema de processamento, uma vez que os PC's são aparelhos caros e de elevada importância.

Podem ser utilizados transformadores, ou óptico acopladores para que haja o isolamento entre os dois sistemas.

2.3.1.4. *Hardware de Aquisição*

O hardware de aquisição de dados age como uma interface entre um computador e sinais externos. Ele trabalha basicamente como um dispositivo que digitaliza sinais analógicos de entrada de forma que um computador possa interpretá-los. Os três principais componentes de um dispositivo de aquisição (DAQ) são os circuitos eletrônicos de condicionamento de sinal, conversor analógico-digital (ADC) e o barramento do computador. Existem nos DAQs outras funcionalidades como conversores digital-analógico, linhas de I/O digital, as quais fornecem sinais digitais em suas entradas e saídas e contadores/temporizadores que contam e geram pulsos digitais [8][12].

2.3.1.5. *Computador*

Um computador com software programável controla a operação do dispositivo DAQ, sendo usado para processamento, visualização e armazenamento de dados de medição. São usados computadores específicos para cada tipo de aplicação. Por exemplo, um desktop é utilizado em um laboratório, por obter maior capacidade de processamento de dados, um notebook pode ser usado em campo, por sua portabilidade, ou um computador industrial usado no chão de fábrica, por obter maior robustez [12].

2.3.1.6. *Software de Aquisição*

O software simplifica a comunicação com o dispositivo DAQ, abstraindo comandos de hardware de baixo nível e a programação no nível de registro. Tipicamente, o software de driver para aquisição de dados expõe uma interface de

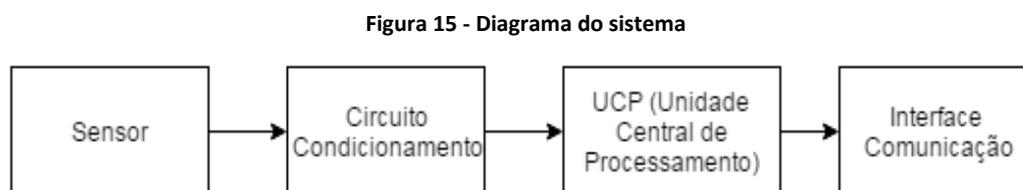
programação de aplicação (API) que é utilizada em um ambiente de programação para a construção de software de aplicação. O software de aplicação facilita a interação entre o computador e o usuário na aquisição, análise e apresentação dos dados da medição. Ele é uma aplicação pré-construída, com funções predefinidas, ou um ambiente de programação destinado ao desenvolvimento de aplicações com funções customizadas [12].

Capítulo 3 – Descrição do Sistema

Neste capítulo será descrito o sistema proposto para o sensor capacitivo de medição de nível. Serão apresentados o projeto e confecção da estrutura mecânica, o modelo matemático do sensor capacitivo, o circuito de condicionamento, aquisição e transmissão do sinal.

3.1. Arquitetura do Sistema

O sistema completo é composto pelo sensor, circuito de condicionamento do sinal, unidade central de processamento e uma interface de comunicação. A arquitetura do sistema está ilustrada na Figura 15.



Fonte: Autor

O elemento sensor é do tipo capacitivo variando a capacitância em função da altura de nível do recipiente. O circuito de condicionamento mede a variação de capacitância do sensor, fornecendo um sinal de saída com um valor de 0 a 10 V correspondente a uma variação de nível entre altura de 0 até 12 cm. A unidade central de processamento, constituída pela placa TIVA da Texas Instruments, adquire o sinal elétrico proveniente do circuito de condicionamento e calcula o valor da altura do nível correspondente. A Interface de Comunicação foi desenvolvida utilizando a rede CAN.

3.2. Modelagem do Sensor

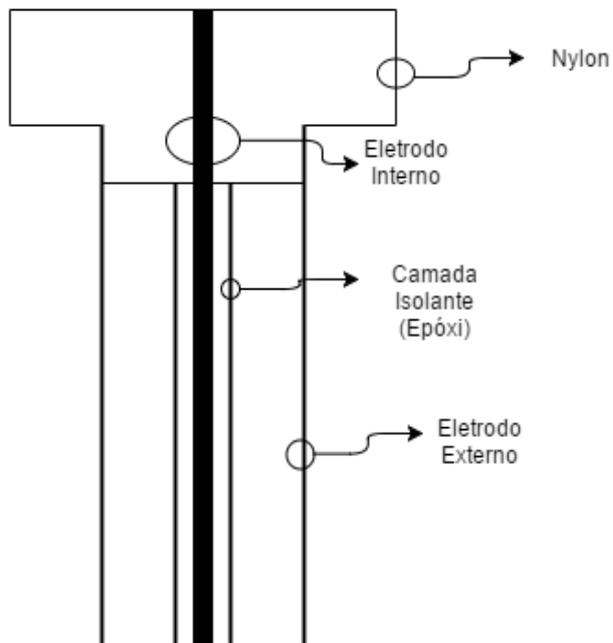
O sensor capacitivo proposto nesse trabalho consiste em dois cilindros de alumínio concêntricos, pode ser visto na Figura 16. O cilindro interno possui um diâmetro de 0,6 cm e o externo um diâmetro de 1,55 cm. O eletrodo interno foi revestido por uma camada de epóxi, material isolante, com espessura de 1 mm, a qual foi descoberta medindo o diâmetro do eletrodo interno antes e depois da aplicação do epóxi e fazendo a subtração dos dois valores. A escolha desse material se deu devido as suas propriedades elétricas. O dielétrico total é composto pelo epóxi aplicado sobre o eletrodo interno e na parte superior uma camada de nylon. As constantes dielétricas do epóxi e do nylon podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 1 - Valores de constantes dielétricas

| Cristais Inorgânicos | ϵ_r | Cerâmicas | ϵ_r |
|--|--------------|----------------------------|--------------|
| NaCl (seco) | 5,5 | Alumina | 8,1 – 9,5 |
| CaCO ₃ | 9,15 | Porcelana | 6,0 – 8,0 |
| Al ₂ O ₃ , MgO | 10,0; 8,2 | Enstatita | 5,5 – 7,5 |
| TiO ₂ | 100 | Forsterita | 6,2 |
| BaTiO ₃ | 4100 | Silicato de Alumínio | 4,8 |
| Vidros | ϵ_r | Titanatos | 50 |
| Sílica fundida | 3,8 | Zirconia | 8 – 10,5 |
| Pirex | 5,1 | Mica | 5,4 – 8,7 |
| Vidro soda-lime | 6,9 | Resinas Poliméricas | ϵ_r |
| Resinas poliméricas não polares | ϵ_r | Poli (cloreto de vinila) | 3,2 – 3,6 |
| Polietileno | 2,3 | Acetato de polivinil | 3,2 |
| Polipropileno | 2,5 - 2,6 | Nylon | 3,6 – 4,0 |
| Politetrafluoretileno | 2,1 | Polietileno tereftalato | 2,5 – 3,0 |
| | | Epóxi | 3,0 – 4,5 |
| | | Policarbonato | 2,9 – 3,0 |

Fonte: Página da Unioeste [13].

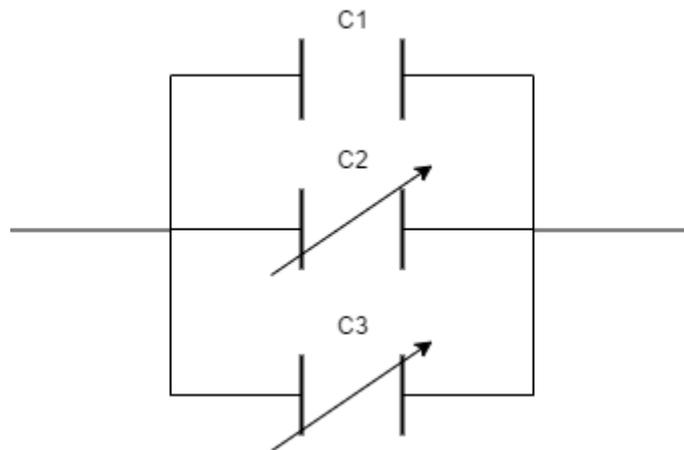
Figura 16 - Modelo do sensor



Fonte: Autor

O sensor pode ser modelado como sendo três capacitores em paralelo, com o capacitor C1 sempre fixo, pois seu dielétrico não varia, composto por eletrodo interno, nylon e eletrodo externo. O capacitor C2 só existirá quando o tanque estiver meio vazio, é formado por eletrodo externo, água (elemento condutor), ar, epóxi e eletrodo interno. Já o capacitor C3 consiste no eletrodo externo, água, epóxi e eletrodo interno, visto na Figura 17. Caso o tanque esteja totalmente cheio, o modelo se reduzirá ao capacitor C1 e C3 e caso o tanque esteja totalmente vazio o modelo se resumirá aos capacitores C1 e C2.

Figura 17 - Modelagem do sensor



Fonte: Autor

Portanto, A capacitância resultante é a soma das capacitâncias do vapor, ou ar, e do líquido. Considerando, por exemplo, sonda e vaso cilíndricos, temos uma relação similar à capacitância de um cabo coaxial, que pode ser calculada pela equação (2.8), vista no Capítulo 2, subseção 2.1.6. Em que ϵ_0 é a constante dielétrica do vácuo, ϵ_r é a constante relativa do dielétrico entre as placas, h é o comprimento dos condutores, b é o diâmetro do condutor externo e a é o diâmetro do condutor interno, como mostrado na Figura 2. Como a capacitância total C é a soma das capacitâncias C_1 e C_2 , tem-se que o modelo pode ser representado pela equação abaixo:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (3.1)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{r1}h_1}{\ln \frac{b}{a}} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{r2}h_2}{\ln \frac{b}{a}} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{r3}h_3}{\ln \frac{b}{a}} \quad (3.2)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0(\epsilon_{r1}h_1 + \epsilon_{r2}h_2 + \epsilon_{r3}h_3)}{\ln \frac{b}{a}} \quad (3.3)$$

O protótipo do sensor de nível capacitivo construído pode ser visualizado na Figura 18 juntamente com sua faixa de medição 0 a 12 cm.

Figura 18 - Sensor de nível capacitivo construído



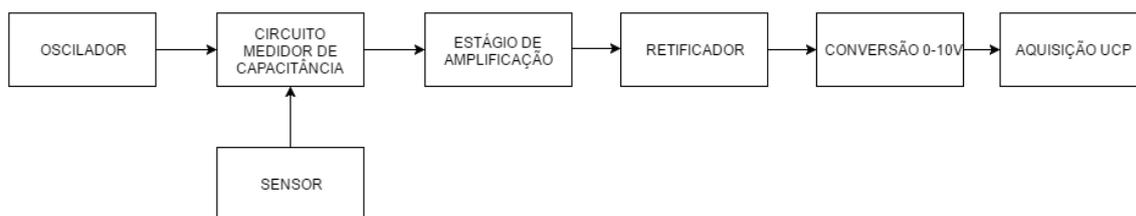
Fonte: Autor

3.3. Circuito de Condicionamento

Para padronizar o tratamento dado ao sinal de entrada o circuito de condicionamento do sinal foi dividido em estágios, representado por diagrama de blocos na Figura 19. Os estágios estão listados abaixo e serão explanados nas subseções seguintes.

- Circuito para medição de capacitância;
- Oscilador do tipo ponte de Wien;
- Amplificador;
- Conversão 0-10V;
- Aquisição.

Figura 19 - Diagrama de blocos do sistema



Fonte: Autor

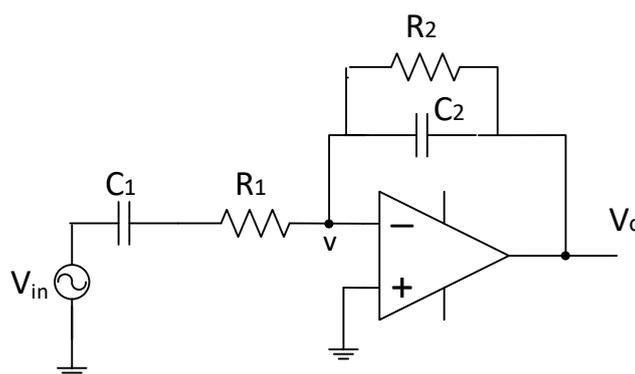
3.3.1. Circuito Medidor de Capacitância

Para medição da capacitância variável do sensor foi utilizado o circuito representado na Figura 20. O qual possui um capacitor C_1 em série com o resistor R_1 e um capacitor C_2 em paralelo com a resistência R_2 .

Aplicando a teoria de Amplificador Operacional, tem-se a seguinte equação.

$$\frac{V_{in} - 0}{Z_1} = \frac{0 - V_o}{Z_2} \quad (4.1)$$

Figura 20 - Circuito para medição de capacitância



Fonte: Autor

Onde a impedância Z_1 corresponde ao capacitor C_1 em série com o resistor R_1 e a impedância Z_2 ao equivalente paralelo do capacitor C_2 e o resistor R_2 .

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = \frac{j\omega C_1 R_1 + 1}{j\omega C_1} \quad (4.2)$$

$$Z_2 = \frac{R_2 * 1/j\omega C_2}{R_2 + 1/j\omega C_2} = \frac{R_2}{j\omega C_2 R_2 + 1} \quad (4.3)$$

Substituindo as equações (4.2) e (4.3) em (4.1), tem-se a seguinte relação entre a saída e a entrada.

$$\frac{V_{in}}{\frac{j\omega C_1 R_1 + 1}{j\omega C_1}} = \frac{V_o}{\frac{R_2}{j\omega C_2 R_2 + 1}}$$

$$V_o = -V_{in} * \frac{R_2}{j\omega C_2 + 1} / \frac{j\omega C_1 R_1 + 1}{j\omega C_1} = \frac{j\omega C_1 R_2}{(j\omega C_1 R_1 + 1) * (j\omega C_2 R_2 + 1)} \quad (4.4)$$

Adotando $j\omega C_1 R_1 \ll 1$ e $j\omega C_2 R_2 \gg 1$ a equação (4) reduz-se a relação abaixo:

$$V_o = -\frac{C_1}{C_2} * V_{in} \quad (4.5)$$

Para que a equação 5 seja válida, faz-se necessário que os valores dos capacitores e resistores obedeçam as condições estabelecidas neste trabalho.

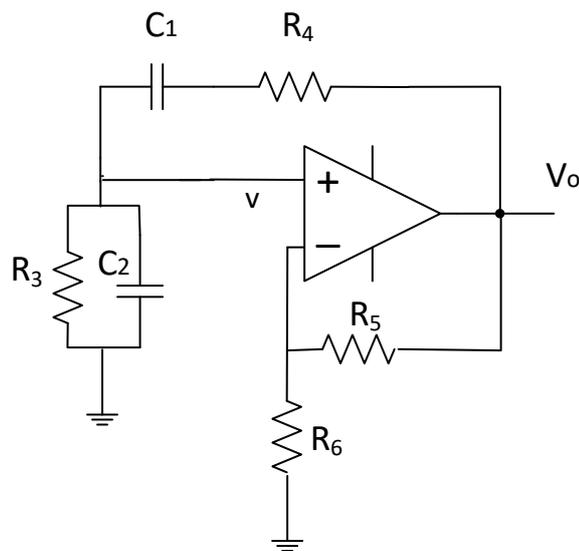
Deste modo os valores escolhidos foram: $C_1 = \text{sensor}$ (capacitância variável); $C_2 = 10 \text{ nF}$; $R_1 = 10 \text{ } \Omega$; $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$;

O resistor R_1 tem por objetivo a minimização do efeito derivativo na entrada do amplificador e o resistor R_2 reduzir o ganho integrativo no sistema, evitando assim que o sistema fique instável.

3.3.2. Oscilador

Para que o circuito funcione corretamente, um sinal senoidal deve ser aplicado na entrada não inversora do Amplificador Operacional. A fim de proporcionar este sinal projetou-se um oscilador do tipo ponte de Wien representado na Figura 21.

Figura 21 - Oscilador Ponte de Wien



Fonte: Elaborada pelo Autor

$$L(S) = \left[1 + \frac{R_B}{R_A} \right] * \left[\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right] \quad (4.6)$$

$$L(S) = \frac{1 + \frac{R_B}{R_A}}{3 + SRC + \frac{1}{SRC}} \quad (4.7)$$

Substituindo S por $j\omega$:

$$L(S) = \frac{1 + R_B/R_A}{3 + j(\omega RC - 1/\omega RC)} \quad (4.8)$$

Pelas condições de Barkhausen, a parte imaginária deve ser igual a zero e o módulo da função de transferência igual a 1, portanto [24]:

$$\omega RC = \frac{1}{\omega RC} \quad (4.9)$$

Os valores utilizados no trabalho foram

$$C_1, C_2 = 10 \text{ nF};$$

$$R_3, R_4, R_5 = 10 \text{ k}\Omega;$$

$$R_6 = 22 \text{ k}\Omega;$$

Substituindo os valores na Equação 4.9 obtem-se o seguinte valor de frequência

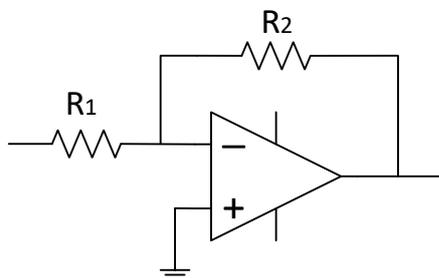
$$w = \frac{1}{RC} = \frac{1}{10 * 10^3 * 10 * 10^{-9}} = 10^3 \text{ rad/s}$$

$$f = \frac{w}{2\pi} = 1,591 \text{ khz}$$

3.3.3. Ganho

A saída de medição de capacitância fornece um sinal de baixa amplitude na ordem de milivolts. Conseqüentemente um amplificador inversor, representado na Figura 22, foi utilizado para fornecer um ganho a este sinal.

Figura 22 - Ganho



Fonte: Elaborada pelo autor

O circuito inversor apresenta um ganho representado pela equação (4.9).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4.9)$$

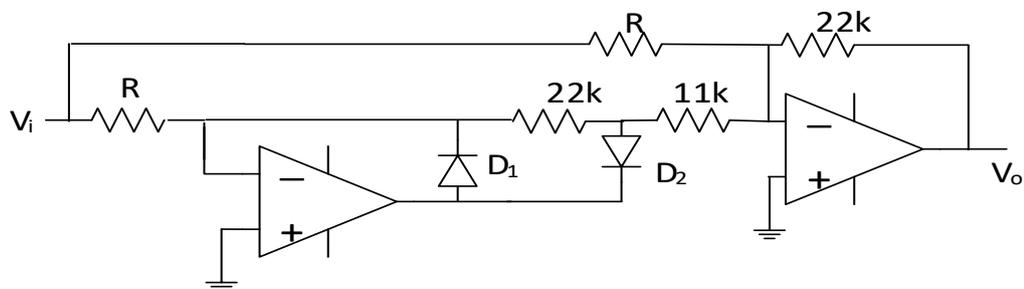
Foram escolhidos $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ e $R_2 = 2,2\text{ k}\Omega$, para obter um ganho $G=2,2$, pois para se ter um sinal de 0 a 10 V na saída o ganho total necessário é de 41,9, onde o restante será aplicado no estágio de conversão de 0-10V, mostrado detalhadamente na seção 3.2.5 e nos resultado, seção 4.4.

O ganho foi dividido em estágios para que a influência do ruído no sistema fosse minimizada.

3.3.4. Retificador

Na saída do amplificador inversor existe um sinal senoidal. Com o intuito de retificar este sinal foi projetado um retificador de onda completa baseado no amplificador operacional TL084, o qual consiste de dois estágios, o primeiro é um retificador de meia onda e o segundo é um somador inversor. Quando a entrada do circuito é negativa o somador somará a tensão de entrada com o dobro da tensão na saída do retificador. Como resultado a saída tem a mesma amplitude e a mesma polaridade da tensão de entrada. Quando a entrada do circuito é positiva, o retificador de meia onda fornece saída nula e o sinal de entrada é amplificado uma vez pelo somador. O circuito empregado pode ser visualizado na Figura 23.

Figura 23 - Retificador



Fonte: Elaborada pelo autor

No retificador de onda completa que foi projetado, uma das especificações é que o ganho de tensão deva ser unitário. Para que o retificador tivesse o ganho especificado escolheu-se os seguintes valores dos resistores R de acordo com a seguinte análise:

$$V_{O1} = -V_{IN} * 22 \frac{k\Omega}{R}$$

$$-V_{O1} * \frac{22 k}{11 k} - V_{IN} * \frac{22 k\Omega}{R} = V_{O2}$$

$$V_{O2} = V_{IN} \frac{22 k}{R} * \frac{22 k}{11 k} - V_{IN} * \frac{22 k}{R}$$

$$V_{O2} = V_{IN} * \frac{22 k}{R} = V_{IN}$$

$$R = 22 k\Omega$$

No ciclo positivo do sinal de entrada V_{in} , a saída V_{O2} será o próprio sinal com o ganho correspondente aos amplificadores. Já nos ciclos negativos, V_{O1} será zero, devido às posições dos diodos.

Dessa forma:

$$\frac{0 - (-V_{IN})}{22 k} = \frac{V_{O2} - 0}{22 k}$$

$$\frac{V_{IN}}{22 k} = \frac{V_{O2}}{22 k}$$

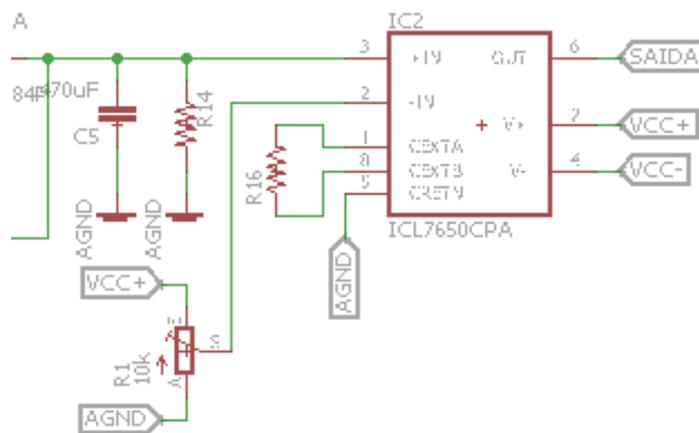
$$V_{O2} = V_{IN}$$

3.3.5. Conversão 0-10V

Para que o sensor seja empregado em uma planta industrial, cujo padrão de sinal de entrada do CLP (controlador lógico programável) ser de 0 a 10 V fez-se necessário a conversão do sinal entre os valores de 0 a 10 V (resposta linear de acordo com o nível).

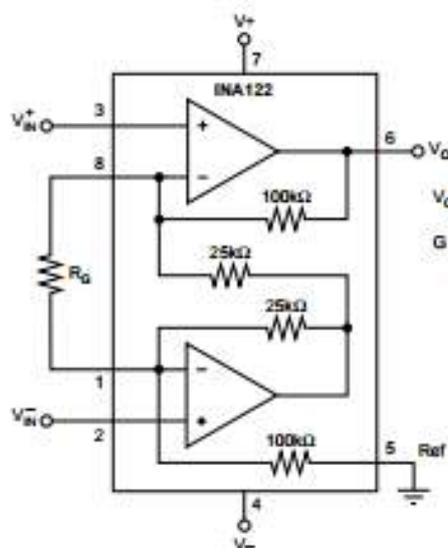
Portanto para obter um sinal na saída entre 0-10 V, foi implementado o circuito da Figura 24. Cujo sinal a ser convertido passa por um amplificador de instrumentação (INA 122), representado na Figura 25, em que o mesmo fará um deslocamento no sinal de saída, eliminando o valor de offset, ao mesmo tempo fazendo com que o sinal fique dentro da faixa de 0-10 V. Para isso foi escolhido o valor de R_G de acordo com os valores medidos no sinal de saída [4]. Utilizando a equação (4.10) dada no datasheet do INA 122, obtém-se:

Figura 24 - Circuito para conversão 0-10 V



Fonte: Autor

Figura 25 - Encapsulamento INA 122



Fonte: Datasheet INA 122 [14].

$$V_O = (V_{in}^+ - V_{in}^-)G \quad (4.10)$$

onde,

$$G = 5 + \frac{200k}{R_G} = \frac{5R_G + 200k}{R_G} \quad (4.11)$$

Substituindo G na Equação 4.10, tem-se que:

$$V_O = (V_{in}^+ - V_{in}^-) * \left(\frac{5R_G + 200k}{R_G} \right)$$

$$R_G V_O = (V_{in}^+ - V_{in}^-) * (5R_G + 200k)$$

$$R_G V_O - 5R_G (V_{in}^+ - V_{in}^-) = 200k (V_{in}^+ - V_{in}^-)$$

Portanto, o valor de R_g é calculado usando a equação mostrada abaixo:

$$R_G = \frac{200k(V_{in}^+ - V_{in}^-)}{V_O - 5(V_{in}^+ - V_{in}^-)} \quad (4.12)$$

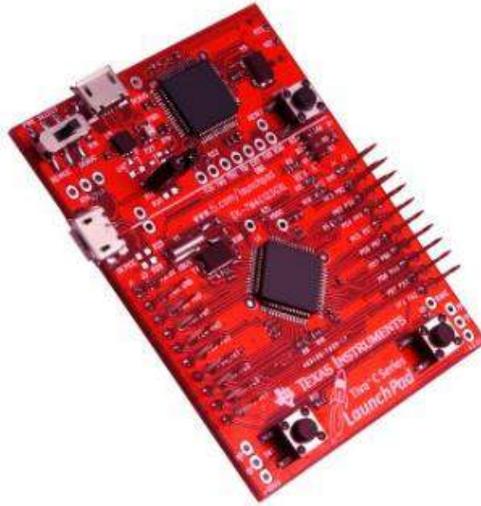
3.3.6. Aquisição dos Dados

Para aquisição e processamento dos dados foi utilizada a plataforma de desenvolvimento de baixo custo de microcontroladores ARM Cortex-M4F, da Texas Instruments, TIVA TM4C123GXL, apresentado na Figura 26. O microcontrolador da placa é o TM4C123GH6PM com uma interface de dispositivo USB 2.0 e módulo de hibernação. O kit apresenta botões programáveis e um RGB LED para aplicações customizadas.

A TIVA TM4C123GXL também oferece os seguintes recursos:

- 80 MHz 32-bit;
- 256 KB Flash, 32 KB SRAM, 2 KB EEPROM;
- 2 módulos *Controller Area Network* (CAN);
- USB 2.0 Host/Device/OTG + PHY;
- Dual 12-bit 2MSPS ADCs, PWMs;
- 8 UART, 6 I2C, 4 SPI.

Figura 26 - TIVA™ C Series TM4C123G Launchpad

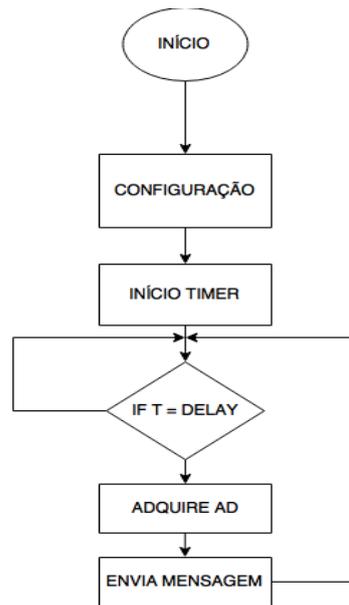


Fonte: Texas Instruments [20].

3.3.6.1. Software

O software utilizado para transmissão dos dados, utilizando a TIVA, tem o fluxograma mostrado na Figura 27. O programa inicia com a inclusão das bibliotecas, em seguida os periféricos responsáveis pela transmissão na rede CAN são configuradas. Essa transmissão ocorre a cada um segundo devido ao delay implementado logo abaixo. O sinal analógico é convertido para valores digitais e finalmente transmitidos. O programa de recepção é relativamente mais simples, pois o mesmo fará a recepção e o envio dos valores pela porta serial (UART).

Figura 27 - Fluxograma do programa de transmissão



Fonte: Autor

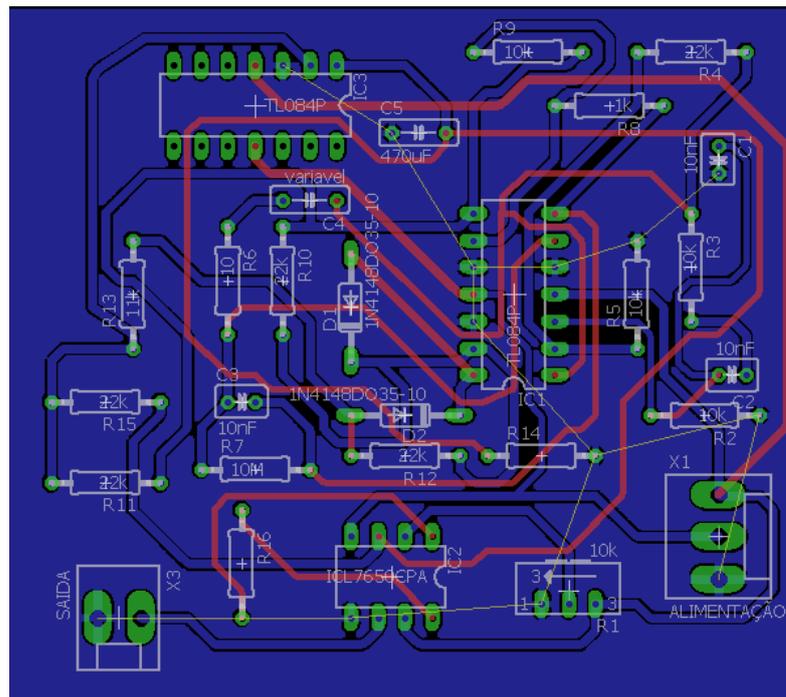
3.4. Construção do Circuito de Condicionamento

Esta seção versará sobre a construção e concepção do circuito de condicionamento e do circuito do transceptor.

3.4.1. Placas de Circuito Impresso

Mostram-se na Figura 28 as trilhas da placa de circuito impresso para o circuito de condicionamento, desenvolvido no software gratuito Eagle®. O circuito se mostrou de certa forma complexo pela quantidade de componentes e trilhas, por conseguinte fez-se necessário a utilização de uma placa de fenolite dupla face para tornar mais simples a interligação entre os pontos.

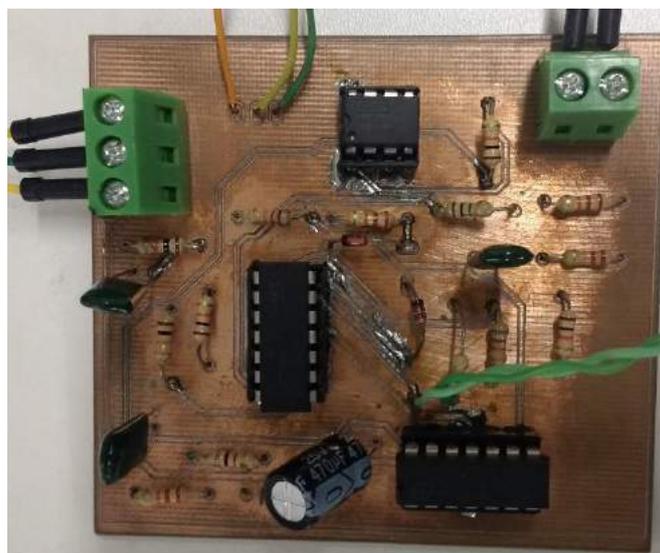
Figura 28 - PCB do circuito de condicionamento de sinal



Fonte: Autor

Mostra-se na Figura 29 a placa após sua confecção e soldagem de todos os componentes.

Figura 29 - Circuito de Condicionamento

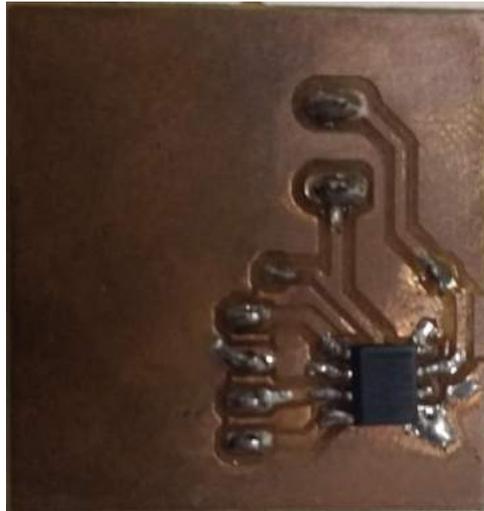


Fonte: Autor

Como foi mencionada a transmissão de dados será feita por meio da rede CAN. Para implementação do protocolo foi necessária a utilização de um transceptor, CI VP

232 da Texas, pois a placa de aquisição da TIVA possui apenas o controlador. A mensagem foi enviada de um nó a outro, por isso foram confeccionadas duas placas de transceptores, uma em cada nó da rede, uma delas é representada na Figura 30.

Figura 30 - Circuito do transceptor CAN



Fonte: Autor

Capítulo 4 - Resultados

O produto final deste trabalho consiste em um sensor de nível capacitivo analógico utilizado para medição de líquidos condutores. O sistema completo pode ser visualizado na Figura 31.

Figura 31 - Sistema de medição



Fonte: Autor

4.1. Curva Capacitância x Nível

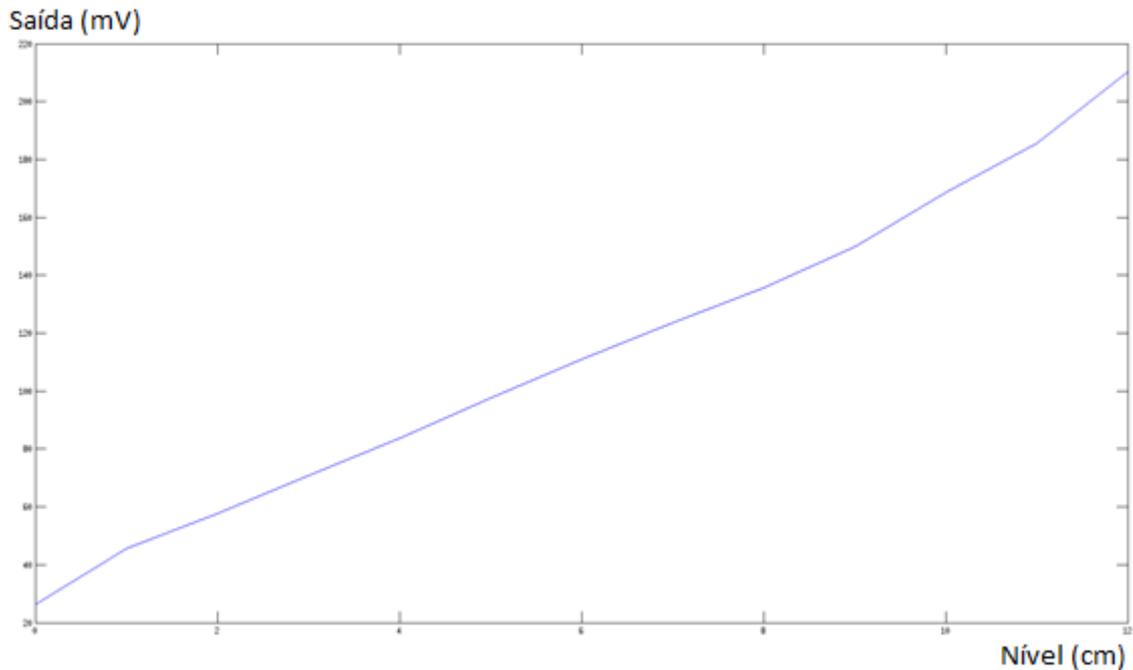
Utilizando um tanque com uma régua e um capacitômetro foram realizadas três medições da capacitância, para cada centímetro, variando o nível entre 0 e 12 centímetros. Quando o nível é 0 cm o tanque está vazio e conseqüentemente não há água no interior do sensor, e quando o nível estiver em 12 cm o tanque estará no seu limite e a cavidade do sensor será totalmente preenchido por água. A Tabela 3 apresenta os dados das medições.

Tabela 2 - Dados obtidos para levantamento da curva capacitância x nível

| Nível (cm) | Cm1(pF) | Cm2 (pF) | Cm3 (pF) | C _{med} (pF) |
|------------|---------|----------|----------|-----------------------|
| 0,0 | 26,1 | 26,87 | 26,18 | 26,38 |
| 1,0 | 45,03 | 45,47 | 46,74 | 45,74 |
| 2,0 | 57,31 | 58,62 | 57,55 | 57,82 |
| 3,0 | 69,52 | 71,57 | 71,13 | 70,74 |
| 4,0 | 83,09 | 83,74 | 84,40 | 83,74 |
| 5,0 | 96,92 | 97,76 | 98,23 | 97,63 |
| 6,0 | 110,36 | 112,31 | 110,17 | 110,94 |
| 7,0 | 123,01 | 124,86 | 122,93 | 123,60 |
| 8,0 | 135,67 | 136,12 | 135,05 | 135,61 |
| 9,0 | 150,03 | 149,78 | 150,02 | 149,94 |
| 10,0 | 167,85 | 168,57 | 169,78 | 168,73 |
| 11,0 | 185,09 | 184,86 | 186,61 | 185,52 |
| 12,0 | 209,6 | 211,9 | 209,3 | 210,26 |

A Figura 32 fornece a curva levantada a partir dos dados obtidos experimentalmente.

Figura 32 - Curva capacitância x nível



Fonte: Autor

Com os valores das capacitâncias coletados anteriormente foi encontrado o valor do dielétrico do epóxi. Pois quando o sensor estiver totalmente cheio o capacitor resultante será a soma do capacitor que possui o nylon como dielétrico e o capacitor que possui o epóxi como dielétrico.

$$C = C_1 + C_3$$

$$210,26 * 10^{-12} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{r1}h_1}{\ln\frac{b}{a}} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{r3}h_1}{\ln\frac{b}{a}}$$

$$210 * 10^{-12} = \frac{2\pi\epsilon_0(\epsilon_{r1}h_1 + \epsilon_{r3}h_3)}{\ln\frac{b}{a}}$$

Portanto considerando $\epsilon_{r1} = 4,0$ (Tabela 2) e $h_1 = 1 \text{ cm}$, tem-se que o valor da constante dielétrica relativa do epóxi é de 29,5.

No caso de quando o tanque estiver vazio a constante dielétrica do ar juntamente com a constante do epóxi pode ser calculada da seguinte forma:

$$C = C_1 + C_2$$

$$26,38 * 10^{-12} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{r1}h_1}{\ln\frac{b}{a}} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{r2}h_2}{\ln\frac{b}{a}}$$

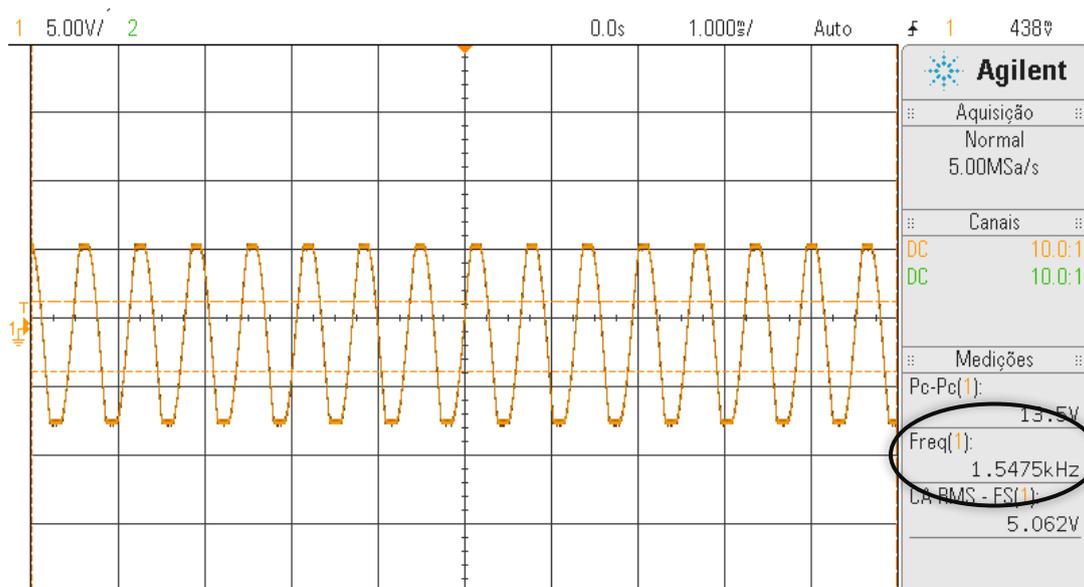
$$26,38 * 10^{-12} = \frac{2\pi\epsilon_0(\epsilon_{r1}h_1 + \epsilon_{r2}h_2)}{\ln\frac{b}{a}}$$

Isso resulta em constante dielétrica relativa, dos dois materiais, de 3,42.

4.2. Oscilador

A Figura 33 mostra o sinal obtido na saída do circuito oscilador, comprovando os cálculos que mostravam que o circuito iria oscilar a uma frequência de 1,59 kHz aproximadamente.

Figura 33 - Forma de onda na saída do circuito oscilador



4.3. Medição de Capacitância

A Figura 34 mostra o sinal obtido na saída do circuito de medição de capacitância para o tanque totalmente vazio e a Figura 35 representa o sinal de saída para o tanque a meia altura.

Figura 34 - Sinal de saída do medidor de capacitância para nível zero

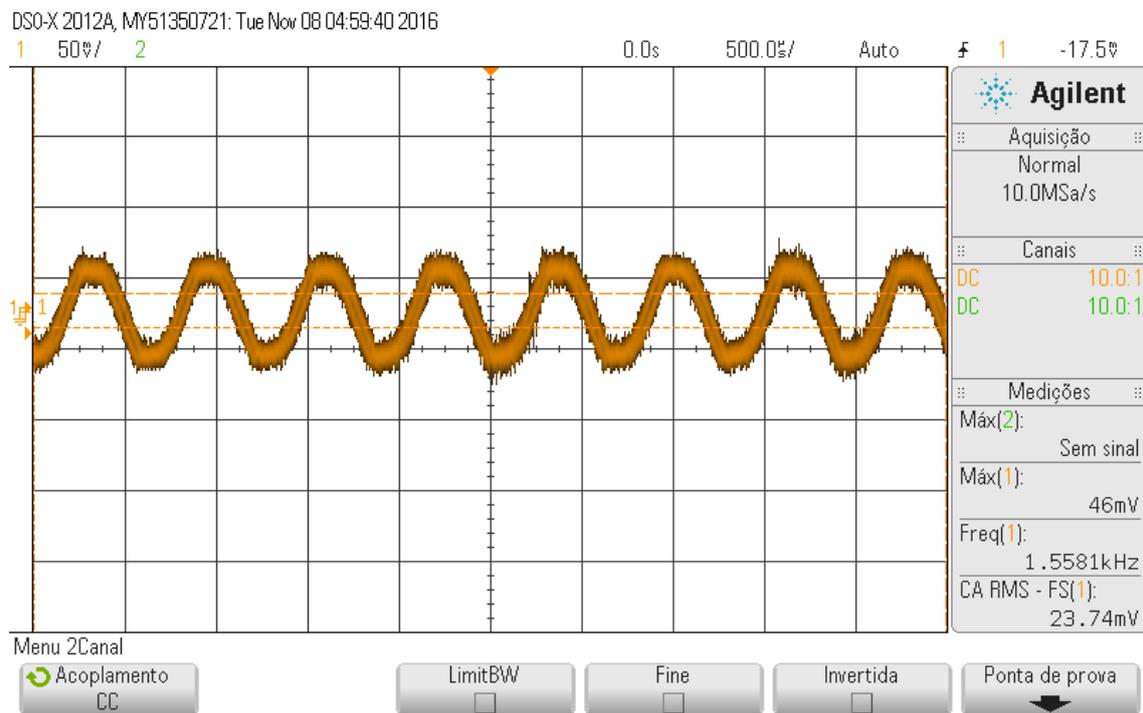
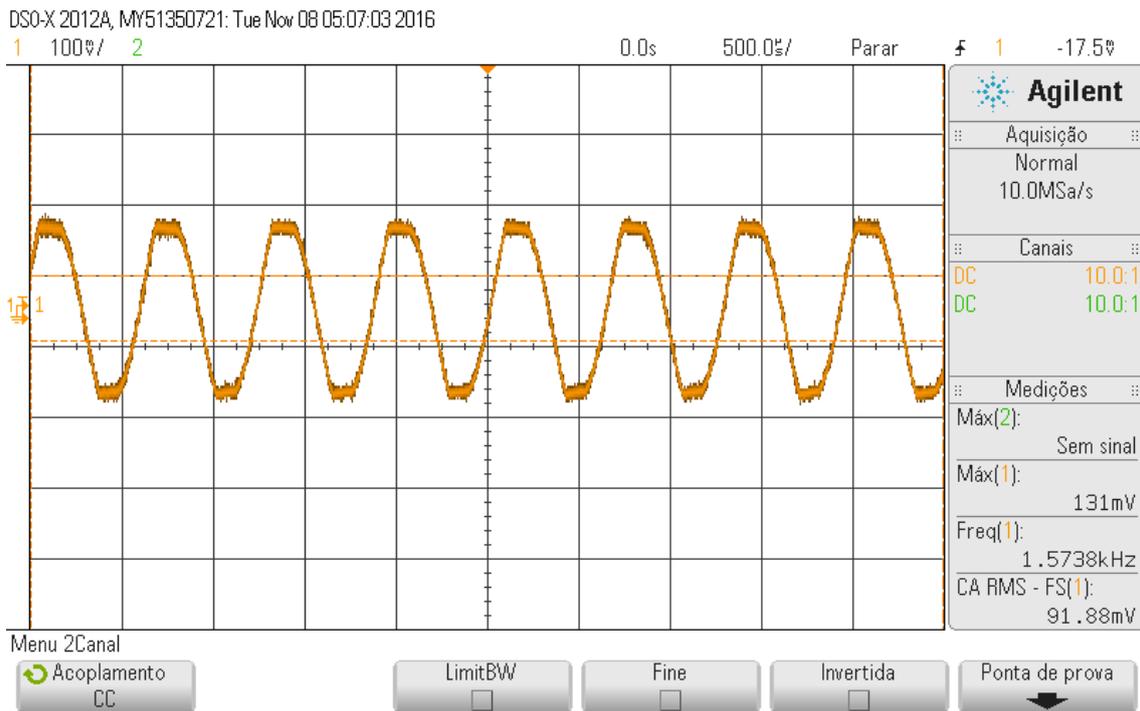


Figura 35 - Sinal de saída do circuito medidor de capacitância para metade do reservatório



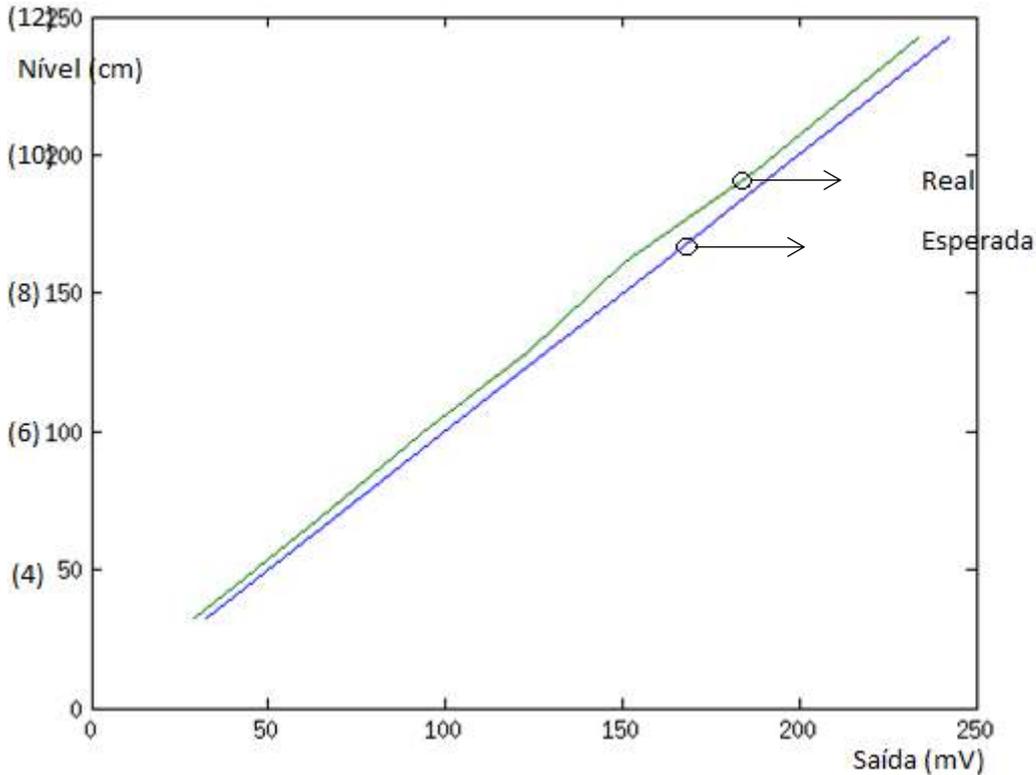
Pode-se constatar pela Tabela 4 que os valores obtidos experimentalmente chegam bem próximos dos valores calculados, os quais foram encontrados por meio dos valores das capacitâncias da Tabela 2 e utilizando a equação 4.5. Os valores diferem um pouco devido a tolerância dos resistores e de ruídos inerentes ao sistema.

Tabela 3 - Valores de tensão obtidos na saída do circuito medidor de capacitância

| Nível (cm) | V_{rms} (mV) | V_{max} (mV) | C_{med} (pF) | $V_{calculado}$ (mV) | Erro (%) |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|----------|
| 0,0 | 23,79 | 32,52 | 26,38 | 29,33 | 10,87 |
| 1,0 | 40,23 | 56,89 | 45,74 | 50,86 | 11,85 |
| 2,0 | 48,30 | 68,30 | 57,82 | 64,30 | 6,22 |
| 3,0 | 58,22 | 82,33 | 70,74 | 78,66 | 4,66 |
| 4,0 | 70,05 | 99,06 | 83,74 | 93,11 | 6,39 |
| 5,0 | 81,75 | 115,61 | 97,63 | 108,56 | 6,49 |
| 6,0 | 91,88 | 128,69 | 110,94 | 123,36 | 4,32 |
| 7,0 | 102,64 | 144,25 | 123,60 | 137,44 | 4,95 |
| 8,0 | 114,08 | 161,33 | 135,61 | 150,80 | 6,98 |
| 9,0 | 124,94 | 176,70 | 149,94 | 166,73 | 5,97 |
| 10,0 | 137,20 | 194,03 | 168,73 | 187,62 | 3,41 |
| 11,0 | 154,61 | 218,65 | 185,52 | 206,30 | 5,98 |
| 12,0 | 171,23 | 242,15 | 210,26 | 233,81 | 3,56 |

Abaixo na Figura 36 foram plotadas juntas as curvas real (verde) e a esperada (azul) com os valores da Tabela 4.

Figura 36 - Retas dos valores reais e valores coletados



4.4. Conversão 0-10 V

Em mãos dos valores de tensão de entrada mostrados na Tabela 4 e tendo que garantir um valor de 10 V na saída para o tanque cheio, o valor de R_G (resistor que regula o ganho), mostrado na Figura 25, para o amplificador de instrumentação foi calculado da seguinte maneira.

Considerando $V_{in} = 242,15 \text{ mV}$ e $V_o = 10 \text{ V}$ e aplicando a Equação 4.2 tem-se que

$$R_G = \frac{200k(V_{in}^+ - V_{in}^-)}{V_o - 5(V_{in}^+ - V_{in}^-)}$$

$$R_G = \frac{200k(0,24215)}{10 - 5(0,24215)}$$

$$R_G = 5510,14$$

Utilizando a Equação 4.11 pode-se calcular o ganho proporcionado por esse valor de resistência que deve ser de:

$$G = 5 + \frac{200k}{5510,14}$$

$$G = 41,29$$

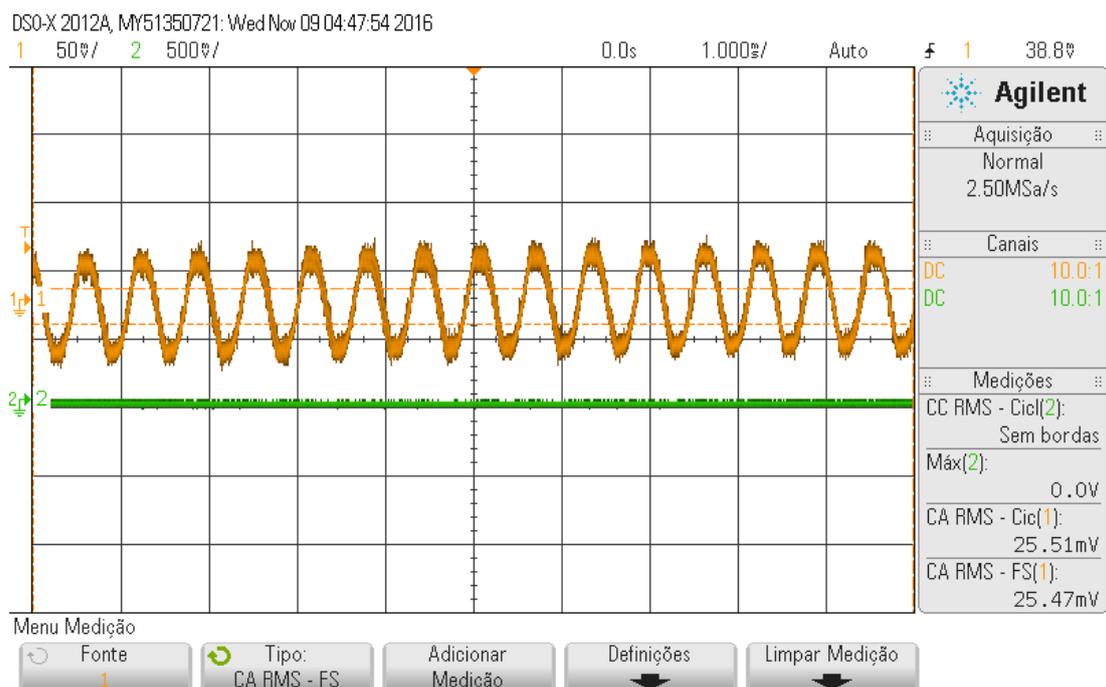
Porém uma parte desse ganho já foi implementado no estágio anterior de amplificação, o qual foi de 2,2. Portanto o ganho necessário de fato é 18,76, e isso será obtido implementando um R_G de:

$$R_G = \frac{200k}{G - 5} = 14,53 \text{ k}\Omega$$

Deste modo, foi utilizado um potenciômetro de precisão de 100 k Ω com o objetivo de se chegar mais próximo do valor calculado.

A forma de onda na Figura 37 está mostrando os sinais na saída do circuito medidor de capacitância (amarelo) e na saída do sistema. Esses sinais foram capturados enquanto o tanque estava totalmente vazio.

Figura 37 - Sinal na saída do circuito medidor de capacitância e na saída final do sistema



Na Tabela 5 estão explicitados os valores de tensão na saída para todas as alturas.

Tabela 4 - Valores de tensão na saída do sistema

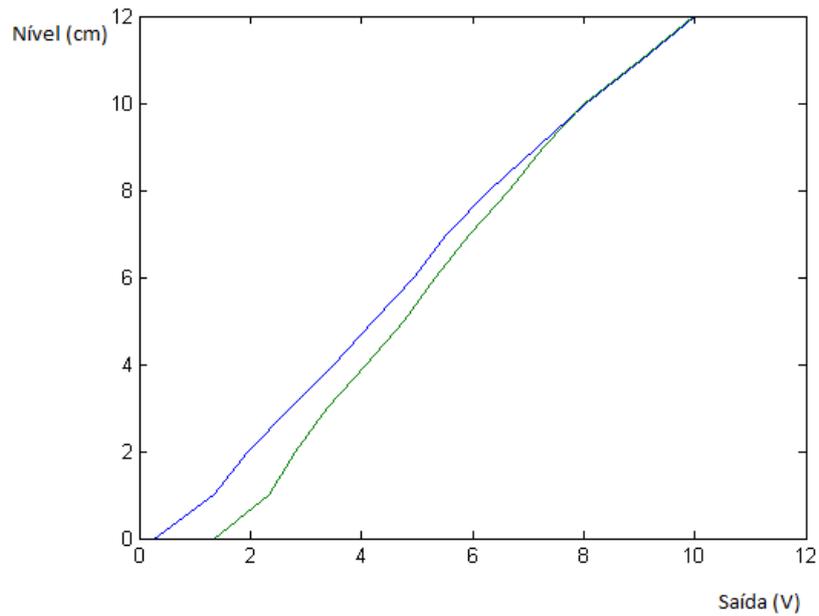
| Nível (cm) | $V_{saída}(V)$ |
|-------------------|----------------------------------|
| 0,0 | 0,25 |
| 1,0 | 1,33 |
| 2,0 | 1,95 |
| 3,0 | 2,72 |
| 4,0 | 3,51 |
| 5,0 | 4,21 |
| 6,0 | 4,93 |
| 7,0 | 5,55 |
| 8,0 | 6,29 |
| 9,0 | 7,17 |
| 10,0 | 8,02 |
| 11,0 | 9,06 |
| 12,0 | 10,02 |

A partir dos dados mostrados na Tabela 5 foi encontrada a seguinte equação responsável pelo mapeamento do sinal de saída do sensor:

$$y = 1,36 x - 0,82$$

Os dados coletados foram plotados juntamente com a curva dos níveis de tensão na saída do circuito medidor de capacitância com os valores corrigidos pelo ganho previamente calculado de 41,29, representados na Figura 38. Pode-se perceber que os valores iniciais possuem uma certa discrepância do sinal do estágio do circuito de medição de capacitância, isso se deu pelo fato de ter sido alterado o valor do offset para que o sinal fosse mostrado a partir de um valor bem próximo de zero.

Figura 38 - Curva do sinal de saída x altura

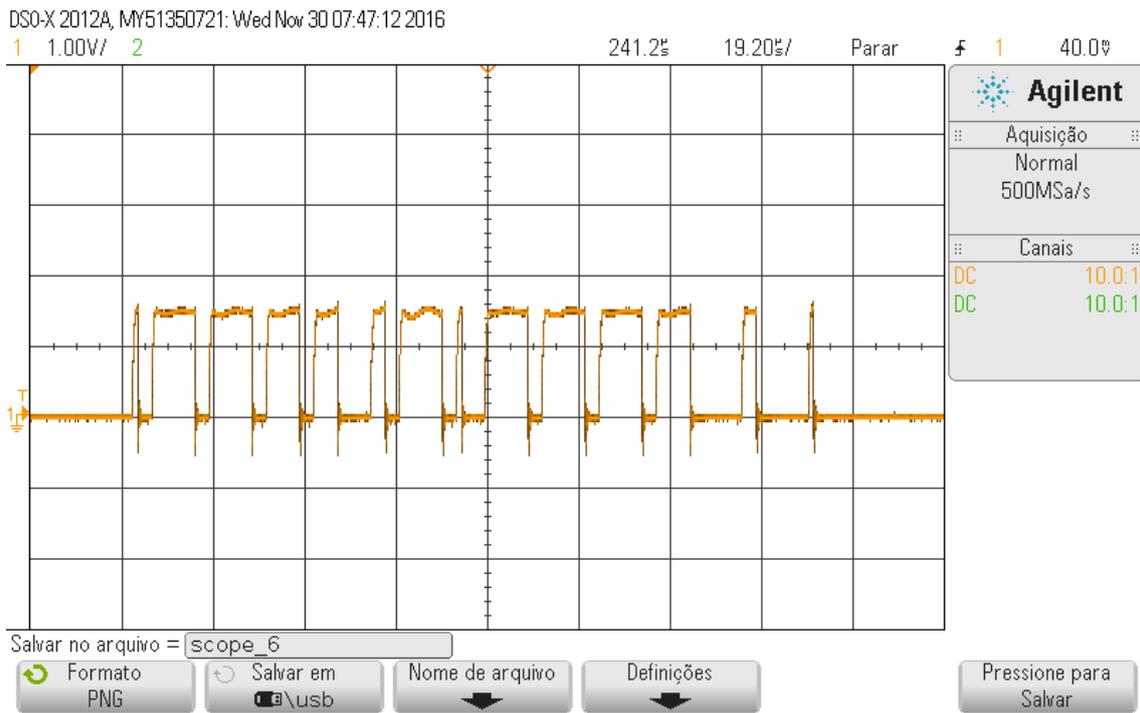


4.5. Rede CAN

Os dados enviados via rede CAN podem ser vistos na Figura 39. Onde, cada pacote da mensagem está detalhado abaixo e mostrado na forma de onda.

- SOF - Um bit dominante;
 - Identificador – 11 bits;
 - RTR – Um bit;
 - IDE – Um bit;
 - r0 – Reservado pela especificação;
 - DLC – 4 bits;
 - Dados – Até 64 bits, 16 bits utilizados;
 - CRC – 16 bits
 - ACK – 2 bits.
 - EOF – 7 bits.
 - IFS – 7 bits;
- Os itens RTR, IDE, r0, DLC e Dados são agrupados por uma chave de lado direito rotulada "Pacote de controle".
- Os itens ACK, EOF e IFS são agrupados por uma chave de lado direito rotulada "Pacote de Fim".

Figura 39 - Mensagem Rede CAN



Conclusão

O desenvolvimento do sensor capacitivo analógico foi de grande valia por aplicar conhecimentos de diversas disciplinas como instrumentação industrial e eletrônica, a qual foi necessária para o estudo e implementação do circuito de condicionamento do sistema.

O sensor confeccionado mede o nível de um fluido condutor a partir da variação de capacitância fornecendo um sinal de tensão na saída do sistema.

Uma das principais dificuldades encontrada durante o desenvolvimento do protótipo foi achar um material capaz de isolar completamente o eletrodo interno do capacitor, isso se deu sobretudo pelo fato do cilindro ser de alumínio e, por conseguinte possuir uma superfície de difícil aderência. Foram testados diversos materiais como tintas automotivas, aplicadas juntamente com um primer, para melhorar na aderência e tintas em spray, porém todas se mostraram ineficientes na isolação. Por fim, foi testada a isolação composta por uma camada de epóxi, a qual se mostrou bastante eficaz, resistindo a uma tensão aplicada de 500 V, utilizando-se um megometro, e possuir uma camada uniforme.

Pelos resultados obtidos, o sensor se mostrou bastante eficiente, mesmo com a presença de ruídos detectados na linha onde a fonte de alimentação do circuito estava conectada.

Como legado o protótipo pode ser aplicado em diversas disciplinas, para análise e estudo, por exemplo, do circuito de condicionamento, na disciplina de eletrônica, e também na detecção do formato da mensagem, no estudo de redes de comunicação, da disciplina de instrumentação industrial.

Como projeto futuro fica o desenvolvimento de placas individuais para cada estágio do circuito de condicionamento, como cartões que pudessem ser conectados um em cima do outro. Isso auxiliaria na disciplina tornando-as mais palpável e mais prazerosa de ser vista pelos alunos.

Bibliografia

- [1] Balnibot, A., & Brussamarello, J. V. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*. Rio de Janeiro. genio. 2010. pg 270-291.
- [2] Barbosa, L. R. G. *Rede CAN*. Belo Horizonte. Escola de Engenharia da UFMG. 2003.
- [3] Watanabe, E. H. *Aplicação de Software Aberto em Redes Industriais*. Curitiba. 2006
- [4] Robert Bosch. *Annual Repport 1991*. Stuttgart.
- [5] Thebas, Vantuil Manoel. *Automação Industrial*. Serra. 2009.
- [6] Cassiolato, César - *Medição de Nível à Nível de Interface*. *Revista Controle & Instrumentação*. Ed. 110. 2005.
- [7] Geraldo, A. *Rede CAN para Acionamento e Controle da Plataforma Autônoma para Coleta de Dados Hidrológicos*. São Carlos. 2008.
- [8] Park, J.; Mackay, S. *Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems*. Australia. 2003
- [9] Instituto Newton Braga. *Como Funcionam os sensores ultrassônicos*. 2012.
- [10] <http://www.renovaveismagazine.pt/?p=5451> Acessado em: 24/10/2016
- [11] <http://www.nivetec.com.br/produto.asp?cat=2&pro=16>. Acessado em: 24/10/2016.
- [12] <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/> . Acessado em: 27/10/2016
- [13] <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap18.pdf>. Acessado em 31/10/2016
- [14] Burr - Brown. Datasheet: INA 122. Eletronic Publication, 1997.
- [15] <https://www.hidroshop.com.br/>. Acessado em: 01/10/2016.
- [16] http://www.pepperl-fuchs.de/germany/de/classid_487.htm?view=productlist. Acessado em: 01/11/2016.

- [17] <http://www.renovaveismagazine.pt/?p=5451>. Acessado em: 01/11/2016.
- [18] <http://www.digitrol.com.br/chaves-de-nivel.php>. Acessado: 01/11/2016.
- [19] <http://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial/sensor-nivel-laser-80593.html>. Acessado em: 02/11/2016.
- [20] <http://www.ti.com/tool/ek-tm4c123gxl>. Acessado em: 02/11/2016.
- [21] <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap18.pdf>. Acessado em: 03/11/2016.
- [22] Taniguchi, M. J. *Rede CAN - O que é e como funciona*. 2015.
- [23] http://www.alessandrosantos.com.br/emanuel/usp/fisica3/notas_de_aula/node46.html. Acessado em: 28/11/2016.
- [24] http://www.ele.ita.br/~eloif/graduacao/EEA_46/L4_PonteWien_Roteiro_6.pdf. Acessado em: 28/11/2016.
- [25] Medidores Tipo Hidrostático. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Acessado em: 29/11/2016.