

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RAFAEL BRESSAN DIAS**

**REDE DE SENSORES RESISTIVOS PARA MONITORAÇÃO DE  
ESCOAMENTO BIFÁSICO EM LONGAS DISTÂNCIAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA  
2015**

RAFAEL BRESSAN DIAS

**REDE DE SENSORES RESISTIVOS PARA MONITORAÇÃO DE  
ESCOAMENTO BIFÁSICO EM LONGAS DISTÂNCIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Marco José da Silva, Dr.  
Co-Orientador: Eduardo Nunes dos Santos, Me.

CURITIBA  
2015

RAFAEL BRESSAN DIAS

## REDE DE SENSORES RESISTIVOS PARA MONITORAÇÃO DE ESCOAMENTO BIFÁSICO EM LONGAS DISTÂNCIAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 22 de julho de 2015.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemarle G. Castagna, Dr  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

### ORIENTAÇÃO

---

Marco Jose Da Silva, Dr  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

---

Eduardo Nunes dos Santos, Me  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Co-Orientador

### BANCA EXAMINADORA

---

Marco Jose Da Silva, Dr  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Eduardo Nunes dos Santos, Me  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Glauber Gomes de Oliveira Brante, Dr  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, meus agradecimentos vão para minha família por ter acreditado em mim e pelo apoio em todos os momentos.

Quero agradecer também aos membros dos laboratórios Lacit e Lasii, que me ajudaram nos conceitos científicos de grande valor para este trabalho e que levarei para toda a vida. Não acho necessário citar nomes, uma vez que me prolongaria muito.

E, principalmente, ao professor Marco José da Silva, que pela paciência, orientação e incentivo, tornou possível o desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

DIAS, Rafael B. **Rede de Sensores Resistivos para Monitoração de Escoamento Bifásico em Longas Distâncias**. 2015. 54f. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Elétrica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

Escoamentos bifásicos líquido-gás estão presentes em diversas aplicações industriais, como por exemplo, na exploração e produção de petróleo, onde normalmente tais escoamentos estão confinados em dutos. A monitoração de escoamentos bifásicos em plantas-piloto e em condições controladas é de grande importância para melhor entendimento de fenômenos físicos envolvidos, os quais são, por sua vez, empregados para validação e aprimoramento de modelos de escoamentos. A medição de parâmetros ao longo da tubulação é muitas vezes necessária para observar a evolução do escoamento. Neste trabalho foi projetado e desenvolvido um sistema de medição composto de uma rede de sensores resistivos interligados por uma rede CAN (*controller area network*), permitindo a monitoração do escoamento em distâncias de algumas dezenas de metros. O sistema baseia-se em trabalhos anteriores desenvolvidos na UTFPR e expande a capacidade de investigação de escoamentos no Núcleo de Escoamentos Multifásicos da UTFPR. Foi desenvolvida tanto a eletrônica dos sensores e da central de aquisição, assim como o firmware dos microcontroladores envolvidos e o software de supervisão do sistema. Após alguns testes estáticos, o sistema foi testado preliminarmente numa planta-piloto de escoamentos apresentando desempenho satisfatório, sendo uma nova ferramenta para monitoramento de escoamentos bifásicos líquido-gás.

**Palavras-chave:** Escoamentos bifásicos; Rede CAN; Sensores Resistivos.

## ABSTRACT

DIAS, Rafael B. **Resistive sensor network for monitoring two-phase flow in long distances**. 2015. 54f. de Conclusão de Curso Engenharia Elétrica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

Liquid-gas two-phase flows are present in many industrial applications, such as in oil exploration and production, where normally such flows are confined to pipes. Flow monitoring in pilot plants and in controlled conditions is of great importance for a better understanding of physical phenomena, which in turn are employed for validation and improvement of flow models. Measuring parameters along the pipe is often required to observe the evolution of the flow. In this work, the design and construction of a measuring system comprising of resistive sensors interconnected to a CAN (controller area network) bus, enabling flow monitoring at distances of up to tens of meters. The system is based on previous works at UTFPR and expands the flow the capacity of Research Center of Multiphase Flows (NUEM) at UTFPR. Both sensors and data acquisition electronics as well as the firmware of the microcontroller involved and the system supervision software have been developed. After some static tests, the system was tested in flowing conditions in a pilot-plant, showing good performance. Hence being a appropriate new tool for monitoring liquid-gas two-phase flows.

**Keywords:** Two-phase flows; CAN network; Resistive Sensors.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação da velocidade entre as redes estudadas. ....	23
Tabela 2 - Todos os resistores usados no teste de linearidade. ....	41

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Padrões de escoamento gás-líquido em dutos horizontais. ....	14
Figura 2 - Célula unitária .....	14
Figura 3 - Detalhes da sonda resistiva a dois fios .....	16
Figura 4 - Topologia em barramento .....	19
Figura 5 - Relação entre velocidade e comprimento do cabo para a rede CAN.....	21
Figura 6 - Representação dos bits dominantes e recessivos. ....	21
Figura 7 - Estrutura de mensagem da versão A.....	22
Figura 8 - Estrutura de mensagem da versão B.....	22
Figura 9 - Projeção da distribuição dos sensores dentro da atual planta de estudos.....	25
Figura 10 - Esquemático do circuito de geração de sinal desenhado no EAGLE 5.10. ....	27
Figura 11 - Esquemático do circuito de excitação de um dos sensores.....	28
Figura 12 - Circuito do amplificador de transimpedância. ....	28
Figura 13 - Diagrama de bloco teórico do circuito de excitação e medição .....	29
Figura 14 - Forma de ondas para o sensor com os terminais completamente imersos no líquido .....	29
Figura 15 - Forma de ondas do sinal recebido no sensor .....	30
Figura 16 - Formas de ondas gerador de função .....	30
Figura 17 - Formas de ondas que representam o controle da excitação e momento de medição.....	31
Figura 18 - Vista superior da placa do sensor .....	32
Figura 19 - Comparação entre o antigo ponto de medição e o proposto .....	32
Figura 20 - Ilustração dos sensores ligados ao barramento CAN .....	33
Figura 21 - Placa central. ....	33
Figura 22 - Fluxograma do Firmware dos sensores. ....	34
Figura 23 - Fluxograma do Firmware da Central de aquisição.....	35
Figura 24 - Fluxograma do Software de aquisição.....	36
Figura 25 - Fluxograma do Medidor. ....	36
Figura 26 - Primeira janela do software de aquisição.....	37
Figura 27 - Janela de aquisição .....	38

Figura 28 - Diagrama de bloco do MCP2551. ....	39
Figura 29 - Barramento CAN.....	39
Figura 30 - Teste estático com resistores no módulo sensor de canal A. ....	41
Figura 31 - Teste estático com resistores no módulo sensor de canal B. ....	42
Figura 32 - Teste estático com fluidos.....	43
Figura 33 - Relação da condutância versus altura do líquido.....	43
Figura 34 - Teste com Fluidos velocidade de líquido 0,3 m/s e velocidade de gás 0,03 m/s.....	44
Figura 35 - Teste com Fluidos velocidade de líquido 0,3 m/s e velocidade de gás 0,1 m/s.....	45
Figura 36 - Teste com Fluidos velocidade de líquido 0,3 m/s e velocidade de gás 0,2 m/s.....	45
Figura 37 - Teste com Fluidos velocidade de líquido 0,3 m/s e velocidade de gás 0,7 m/s.....	46
Figura 38 - Teste com Fluidos velocidade de líquido 0,3 m/s e velocidade de gás 2 m/s.....	46

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>12</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>13</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>14</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>15</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>16</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>18</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	10
1.2 OBJETIVO GERAL .....	11
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>12</b>
2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO .....	12
2.2 REGIME INTERMITENTE .....	14
2.3 IMPEDÂNCIA ELÉTRICA EM FLUÍDOS .....	14
2.4 SONDAS RESISTIVAS.....	16
2.5 REDES DE COMUNICAÇÃO .....	17
<b>2.5.1 Topologia</b> .....	<b>18</b>
<b>2.5.2 Tipos de redes</b> .....	<b>19</b>
<b>3 DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>25</b>
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	25
3.2 HARDWARE E FIRMWARE .....	26
<b>3.2.1 Micro controlador</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2.2 Unidade sensora</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2.3 Central de aquisição</b> .....	<b>33</b>
3.3 FIRMWARE .....	33
3.4 SOFTWARE.....	37
3.5 REDE.....	38
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>40</b>
4.1 DESEMPENHO DO SISTEMA .....	40
4.2 LINEARIDADE .....	40
4.3 TESTES EM FLUÍDOS .....	42

4.3.1	Teste estático.....	42
4.3.2	Teste em escoamento .....	44
5	CONCLUSÃO.....	48
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	48
	REFERÊNCIAS.....	49
	ANEXO A - CIRCUITO DO MÓDULO DE SENSOR RESISTIVO .....	51

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Conforme expõe o Ministério de Minas e Energia do Brasil, em 2009, novas camadas de petróleo foram descobertas no país, que passou a apresentar possibilidade de se tornar um dos exportadores desta substância e de seus derivados para outros países. Tal potencial de reserva de petróleo foi avaliado como forma de propiciar ao Brasil o envolvimento entre países, que têm grandes reservas no mundo. Para que seja possível operar com eficiência, em águas muito profundas, o país tem desenvolvido tecnologias que propiciam a descoberta de reservas e a atuação em pesquisas, que são realizadas por meio de parcerias com universidades e centros de pesquisa. (BRASIL, 2009). Assim, a investigação dos escoamentos da produção em plantas-piloto e condições controladas tem sido mais e mais uma demanda para entendimento dos fenômenos físicos envolvidos. Assim a partir destes é possível o desenvolvimento ou aprimoramento de modelos ou simuladores de escoamento que por sua vez são utilizados para análise e projeto da produção de hidrocarbonetos.

O escoamento que está presente nas linhas de produção é conhecido como escoamento multifásico, sendo o mais comum o escoamento bifásico líquido-gás, onde um gás e um líquido escoam simultaneamente nos dutos (FALCONE, HEWITT E ALIMONT 2009). Várias técnicas de medição foram desenvolvidas no passado (DA SILVA 2008). Entre estes, destacam-se os sensores baseados em medidas de resistência/condutância do fluido, pois são simples, robustos e de baixo custo (YANG et al. 2003). Entretanto, a maioria das técnicas desenvolvidas até agora é focada em medidas em alguns poucos pontos do escoamento. Atualmente há uma demanda para monitoração da evolução do escoamento ao longo da tubulação que pode apresentar algumas dezenas de metros de comprimento. Trabalhos anteriores na UTFPR deram início ao desenvolvimento de rede de sensores resistivos (MACHADO; HILDERBRANDO; LIPINSKI, 2013), porém tais sensores estão conectados a uma central de medição permitindo apenas alguns metros de distância para monitoração.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem como objetivo principal o projeto e construção de uma rede de sensores resistivos interligados por uma rede de comunicação para a monitoração escoamento bifásico líquido-gás em planta experimentais podendo apresentar distâncias de até algumas dezenas de metros.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar protocolos de comunicação existentes no mercado como: Ethernet, CAN, Zeegbe e RS485. Comparar a viabilidade de cada um e escolher o que melhor se adapta no projeto. Testar e avaliar o desempenho do sistema.

Com a finalidade de tornar a manutenção do sistema mais rápida e simples, é importante reduzir o número de placas intrusivas, assim como o sistema final, que deverá ser de fácil implantação e manutenção.

Para que isto seja possível será necessário que cada ponto de medição tenha um circuito independente ligado à rede e que seja capaz de medir e guardar os dados e enviar para o computador posteriormente.

Para que se tenha segurança nas medições registradas é importante que os sensores sejam organizados, de forma integrada, em um sistema de informações, que possa detectar a concentração de substâncias em um espaço considerável. No entanto, este tipo de registro precisa ser integrado em face da complexidade de sua montagem e a grande distância que são utilizados e que se mostra como o fator crítico em aquisição de informações pela rede, que precisa registrar em tempo real as informações.

Em relação à manutenção dos sensores e da própria unidade de recebimento de informações se tem uma complexidade de aplicação, visto que para que haja manutenção do sistema também ocorre a necessidade de parar a produção de petróleo, e tal situação gera imensos prejuízos, assim, a aplicação e montagem de uma rede adequada se apresentam como aspectos de extrema relevância e assunto que deve ser considerado de forma cuidadosa.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO

Escoamento bifásico gás-líquido consiste no escoamento simultâneo de gás e líquido em uma tubulação. Esse tipo de escoamento está presente em uma grande gama de aplicações da engenharia, dentre elas podem-se citar as indústrias petrolífera, química, nuclear entre outras. A fim de compreender esse fenômeno é necessário realizar uma breve descrição de algumas variáveis, parâmetros e conceitos envolvidos.

#### a) Fração de Vazio

A fração de vazio envolve a razão entre a área transversal que ocupa o gás e a área da tubulação que é ocupada pelas duas fases. Assim, é possível ter a fração de líquido e a fração de vazio de forma análoga. É um dos principais parâmetros na investigação experimental de escoamentos bifásicos gás-líquido.

#### b) Velocidade Superficial

A velocidade superficial é uma variável muito importante para a investigação de escoamentos bifásicos gás-líquido, pois está presente em muitas das equações e modelagens do escoamento bifásico. Representada por  $j$ , a velocidade está diretamente relacionada com a vazão volumétrica  $Q$  dividida pela área da seção transversal da tubulação  $A$ . Para cálculo dessa variável, admite-se que apenas uma das fases está escoando através da seção transversal total da tubulação.

#### c) Velocidade da Mistura

A velocidade da mistura é definida como a soma das velocidades superficial de cada fase, ou o fluxo volumétrico total por unidade de área.

#### d) Padrões de escoamento

O denominado padrão de escoamento é a designação aplicada para as duas fases que se distribuem em um duto, uma vez que cada possível padrão se relaciona com uma distribuição espacial diferenciada em interfaces, que demonstra que há

escoamentos diferentes em características diversas conforme as distribuições de velocidades, segundo explicita Shoham (2006).

O mesmo autor complementa que são três fatores que podem propiciar a existência de um padrão de escoamento em um sistema bifásico. O primeiro é entendido como a vazão em cada fase por meio de um parâmetro operacional do sistema, sendo o segundo fator o que envolve, também, o fator geométrico que se vincula com a construção do duto e a devida inclinação deste, e o terceiro fator se relaciona com as características que se relacionam com os fluídos, ou seja, a densidade, a tensão superficial e a viscosidade destes.

Com base nas distinções e definições de padrões de escoamento se pode expor que não há um grupo unificado de padrões utilizados em pesquisas expostas por diversos autores, uma vez que cada detalhamento pode levar em consideração diversos padrões de escoamento.

De acordo com registros de Falcone, Hewitt e Alimonti (2009), o escoamento que ocorre por golfadas tem como característica a passagem de grandes bolhas denominadas de golfadas, que podem ser seguidas por um pistão de líquido, em que se têm bolhas dispersas. O denominado escoamento anular apresenta um núcleo gasoso que surge envolvido em camada de líquido, que se apresenta em contato com as paredes do tudo, o que permite surgimento de bolhas na camada líquida. No escoamento por padrão estratificado se tem a separação gravitacional do líquido e do gás, surgindo apenas em dutos horizontais, visto que o líquido flui pela parte inferior do duto e o gás por meio da parte posterior, seguindo a ação da gravidade em presença de bolhas de escoamentos horizontais, e estas bolhas acabam se acumulando na parte superior do duto, conforme se pode identificar na Figura 1 que segue ilustrativa destes padrões.

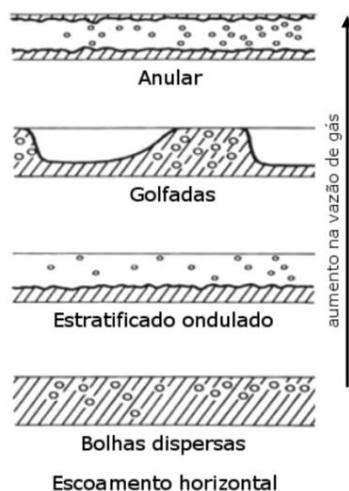


Figura 1 - Padrões de escoamento gás-liquido em dutos horizontais.  
Fonte: Libert (2013)

## 2.2 REGIME INTERMITENTE

O regime intermitente envolve a presença de bolhas de Taylor, grandes bolhas que concentram parte de fração de gás ao longo do escoamento, assim, este regime compreende estes padrões de escoamento horizontal por golfadas com bolhas alongadas.

Nessa forma de padrão se observa a célula unitária que compõe a bolha e um pistão líquido que pode ser visualizado na representação na figura 2.

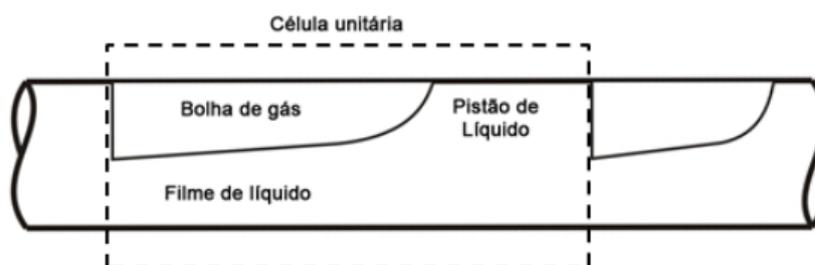


Figura 2 - Célula unitária  
Fonte: Dos Santos (2011)

## 2.3 IMPEDÂNCIA ELÉTRICA EM FLUÍDOS

A impedância elétrica envolve a oposição que o circuito elétrico impõe na passagem de corrente quando submetido à tensão, dessa forma o sensor precisa analisar adequadamente a natureza deste aspecto. Assim, o valor obtido se relaciona com a tensão e corrente de forma que os valores se mostram complexos por meio do

entendimento de que  $V$  seja tensão,  $I$  a corrente e  $Z$  a impedância na equação apresentada:

$$Z = \frac{V}{I} \quad (1)$$

Este tipo de equação demonstra a complexidade deste dado em relação a resistência elétrica que se envolve com a reatância, ou seja, em algumas circunstância deve ser visto o processo inverso da impedância  $Z$ , por meio da admitância  $Y$ , segundo explica Da Silva (2008), em face de se obter a impedância de um fluido em célula de medição composta por dois eletrodos de planos idênticos. Este tipo de relação estabelecida entre as propriedades elétricas da substância entre placas ocorre por meio da seguinte equação:

$$Y = j\omega K_g \varepsilon_0 \varepsilon^* \quad (2)$$

Em que  $\omega$  é a frequência angular,  $K_g$  é uma constante geométrica,  $\varepsilon_0$  é a permissividade do vácuo que tem o valor de 8,85 pF/m e  $\varepsilon^*$  é a permissividade relativa complexa.

Da Silva (2008) expõe que o estudo da frequência de medição se apresenta limitada em MHz, o que implica que deve ser verificada a permissividade relativa complexa do fluido, em presença de baixa frequência, que pode ser vista na equação que segue.

$$\varepsilon^* = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (3)$$

Na qual  $\varepsilon$  é a constante dielétrica do fluido e  $\sigma$  sua condutividade.

$$K_g = \frac{l^2}{d} = \frac{A}{d} \quad (4)$$

Assim,  $A$  é visto como a área das placas quadradas de lado  $l$  e  $d$  se apresenta como a distância proposta, o que propicia identificar a impedância do fluido e realizar a verificação inversa para a admitância.

## 2.4 SONDAS RESISTIVAS

Em um meio contínuo, que não se apresenta como isolante elétrico, ocorre um alto contraste e grande condutividade entre fases, de forma que a sonda resistiva de dois fios é aplicada de forma bifásica. Segundo explicam Lucas e Albusaidi (1999), as aplicações envolvem medição de taxa de óleo em escoamento de óleo e de água, bem como de escoamento de sólidos de perfuração, sendo possíveis aplicações em indústria química, como também em processamento de alimentos (MACHADO; HILDERBRANDO; LIPINSKI, 2013). **A Erro! Fonte de referência não encontrada.**, que segue representa uma forma típica de sonda resistiva, que é aplicada em medição de espessura do filme de líquido.

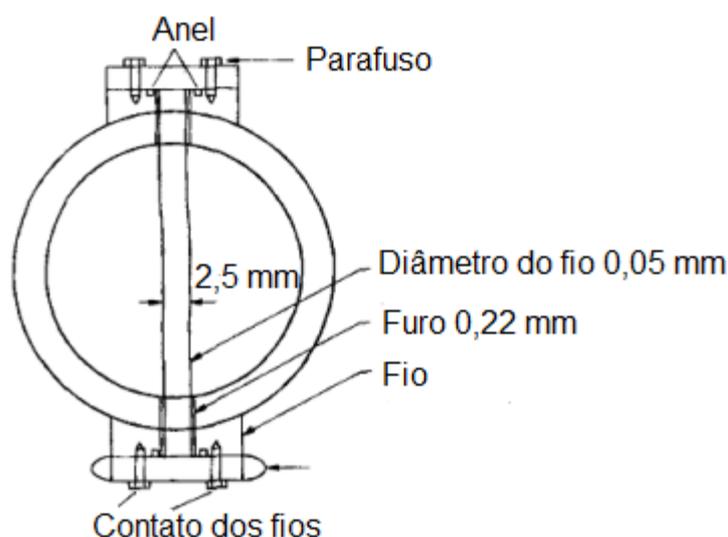


Figura 3 - Detalhes da sonda resistiva a dois fios  
Fonte: Zabarás e Duckler, 1986.

Uma das aplicações destes sensores é para o mapeamento de distribuições de concentração, sendo colocados em tubulação, porque apresentam baixo grau de intrusão. Os sensores captam o sinal ao mesmo tempo em que os eletrodos se movimentam com a corrente alternada, o que implica que por meio destes se pode analisar o valor recebido pelo sensor e, dessa forma, é possível interpretar os valores de corrente ou de tensão que se recebeu.

O sistema de sondas foi desenvolvido e, inicialmente, testado por Brown et al. (1978) e ao longo dos testes foram encontradas dificuldades, que podem ser mencionadas como a saturação de sondas para medições, que envolviam as espessuras de filme de líquido quando identificados valores acima dos determinados

pela distância entre os dois eletrodos, de maneira que se resolveu aplicar baixas frequências no sinal da sonda (MACHADO; HILDERBRANDO; LIPINSKI, 2013).

Na diminuição da altura do líquido poderia ocorrer a adesão de uma fina camada deste na sonda, quando um fluído passasse por algum tipo de ondulação o que poderia propiciar medidas com um grau de erro, e esta condição se torna outro obstáculo, sendo encontrada como solução para tal condição a aplicação de fios finos, com menos de 0,1 mm de diâmetro, propiciando desta forma a diminuição da quantidade de líquido que aderiria a sonda (Machado, Hilderbrando, Lipinski, 2013).

Brown et al. (1978) apresentam uma fórmula simplificada, que segue exposta abaixo, e que permite calcular a condutância do fio por meio de uma formulação da impedância do fluído entre os dois fios.

$$G_E = \frac{\pi \gamma h}{\ln \frac{d}{r}} \quad (5)$$

Para entendimento se tem que  $G_E$  é a condutância do líquido,  $\gamma$  representa a condutividade deste e  $h$  é a dimensão finita do fluído, em que  $d$  é a distância entre os fios e  $r$  o raio dos fios.

O objetivo desta medição é determinar a velocidade da mistura, bem como a distribuição de cada fase no escoamento, sendo este possível perante a aplicação de um par de sensores expostos, em uma distância, que se mostra conhecida, sendo o fato delineado por meio do primeiro sensor que se mostra no seguinte tempo depois, sabendo-se que este parâmetro propicia a velocidade por meio de uma equação de movimento uniforme que é exposta a seguir:

$$V = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (6)$$

Desta equação se tem que:  $\Delta t$  se apresenta como um valor de tempo medido e  $\Delta d$  apresenta a distância entre os sensores conhecidos.

## 2.5 REDES DE COMUNICAÇÃO

As redes de comunicação são de extrema importância em plantas e ambientes industriais. A comunicação entre controladores lógicos programáveis

(CLP), sensores, atuadores, inversores de frequência, dispositivos de interface humana-máquina (IHM) e computadores pode ser um grande problema devido à enorme quantidade de cabos e de informações que trafegam simultaneamente. Além disso, há situações em que se necessita a troca de dispositivos para manutenção ou até mesmo a inserção/remoção. Portanto, redes de comunicação industriais utilizam formas de comunicação e protocolos avançados para troca de informações de forma rápida e segura.

### 2.5.1 Topologia

A topologia de uma rede se refere ao layout físico de conexão dos dispositivos. Cada dispositivo tem um endereço para que possa ser reconhecido pela rede e estes são chamados de nós. São três as topologias básicas que podem ser usadas em uma rede: rede em anel, barra e em formato de estrela (ROSS; KUROSE, 2010).

Nas topologias em barramento, todos os nós se conectam pelo mesmo meio de transmissão, assim cada nó pode receber qualquer mensagem que venha a trafegar pelo barramento. O controle dessas redes pode ser centralizado ou descentralizado e, geralmente, é realizado por meio de uma multiplexação, em que a rede define qual nó deve transmitir. A grande vantagem em comparação com a rede em anel é que essa estrutura, quando detecta problema em um nó, somente o mesmo será ou reiniciado ou desligado, sem prejudicar o restante da rede.

O enlace pode variar dependendo da rede utilizada, sendo possível chamá-la de *Simplex*, *Half-duplex* ou *Full-duplex*. A ligação do enlace do tipo *Simplex* é usada quando há apenas um sentido de comunicação, já o *Half-duplex* é utilizado quando há possibilidade de dois sentidos, porém havendo um sentido por vez. Por último, o modo *Full-duplex* permite que um nó possa enviar e receber ao mesmo tempo (SOARES; GUIDO; SÉRGIO, 2003).

A ligação do nó ao meio físico da rede é um ponto crítico no projeto de uma rede em barramento como na Figura 4, as ligações são feitas de maneira que se altere menos o possível as características elétricas do barramento comum. A ligação será feita através de um transceptor (transmissor e ou receptor), que transmite ou recebe informações e faz a interface com a barra (SOARES; GUIDO; SÉRGIO, 2003).

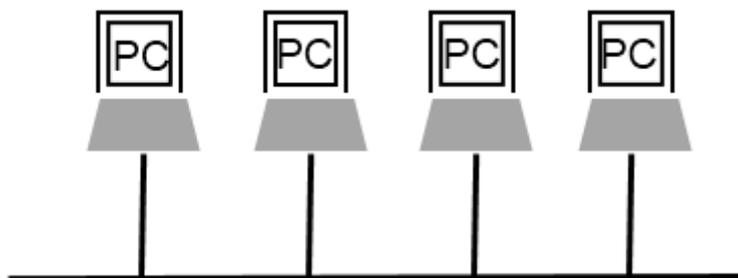


Figura 4 - Topologia em barramento  
Fonte: autoria própria.

## 2.5.2 Tipos de redes

Os protocolos ZigBee, RS485, CAN e Ethernet são amplamente usados na indústria, por terem funções como retransmissão e pela simplicidade. Os critérios de escolha foram o desempenho dos drivers e o tamanho final de uma placa, também possíveis problemas, como ruído.

### a) ZigBee

A arquitetura ZigBee não precisa de licença para seus sinais de rádio e frequência, pois usa a banda ISM (*Instrumentation, Scientific & Medical*) que opera nas frequências de 902 a 928MHz, 2400 a 2483,5 MHz e 5725 a 5850 MHz. O desenvolvimento do padrão é feito pela *ZigBee Alliance* junto com o IEEE e mais um grupo de quarenta e cinco empresas. As interfaces disponíveis, atualmente, no mercado operam com velocidades de conexão entre 10 Kbps e 115 Kbps e o alcance estando entre dez metros e cem metros. Os dispositivos *ZigBee* podem retransmitir um sinal, atuando como concentrador de dados não havendo necessidade de um dispositivo específico para a função.

A principal vantagem do ZigBee é o baixo consumo de energia e a fácil operação de conexão do protocolo e praticidade de uma comunicação sem fio. A desvantagem para esse sistema seria a baixa taxa de transferência e possíveis ruídos, também o custo, se fosse colocado um módulo ZigBee para cada sensor.

### b) RS458

A denominada RS485 é uma comunicação serial desenvolvida pela EIA (*Electronics Industry Association*). A comunicação é possível por meio de um transceptor de dois ou mais terminais chamados de A e B. O transceptor faz a

conversão da diferença das tensões dos terminais, transformado em zero e um para enviar para o dispositivo controlador. Há possibilidade de comunicação half-duplex e full-duplex, para cada caminho de comunicação, sendo necessário um par de fios e um fio de referência. Na comunicação, em apenas um sentido por vez, serão usados três fios, dois destinados para a tensão diferencial e o terceiro para a referência e nos sistemas, em que o sentido de comunicação é bidirecional, é preciso um par a mais de fios.

O protocolo RS485 é sem dúvida o de mais baixo custo e simples implementação em nível de hardware. Mas as dificuldades com o software como endereçamento e detecção de erro e a detecção de colisão de pacotes também só seria possível se feito por software.

### c) CAN

A rede CAN foi desenvolvida pela empresa BOSCH e disponibilizada nos anos oitenta, tendo grande demanda no setor de caminhões. Hoje, este sistema é utilizado na indústria e em diversos meios de transportes. A rede CAN foi a grande solução para o emaranhando de fios e cabos dentro dos circuitos, sensores de porta, farol, ignição (SOUZA, 2011).

A estrutura física da rede CAN consiste de dois fios que recebem o nome de CANH (*CAN high* ou de nível alto) e CANL (*CAN low* ou de nível baixo). O comprimento do cabo vai desde quarenta metros, porém, essa distância é inversamente proporcional com a velocidade de comunicação, como mostrado a seguir, a velocidade diminui quando a distância e o aumento da velocidade desta arquitetura é inversamente proporcional ao comprimento do cabo, para um metro é possível chegar até 10 Mbps e para distâncias de 1 Km a velocidade cai para 100 Kbps.

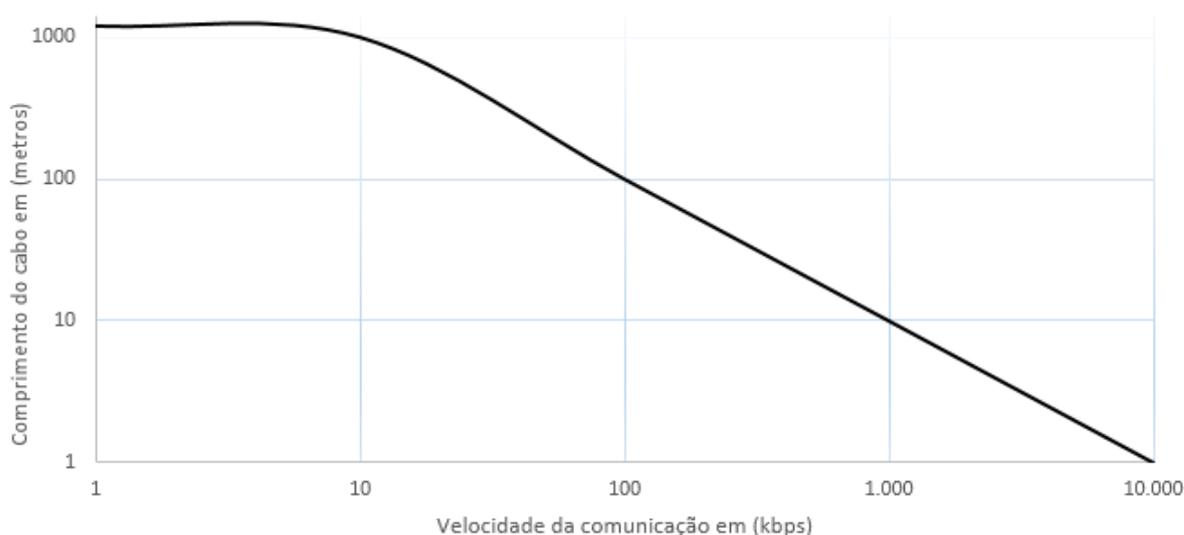


Figura 5 - Relação entre velocidade e comprimento do cabo para a rede CAN.  
Fonte: autoria própria

É fundamental ressaltar que a rede CAN, diferentemente de outros dispositivos eletrônicos, faz sua comunicação com valores de bits que ao invés de chamar zero e um, são chamados de dominantes e recessivos. O bit 0 possui prioridade em relação ao bit 1 (GUIMARÃES; SARAIVA, 2014).

A Figura 6 mostra os níveis de tensão nos fios da CAN\_H e CAN\_L e a diferença de potencial entre os mesmos e se, em determinado momento, é bit dominante ou recessivo, que é importante, principalmente, para evitar colisões.

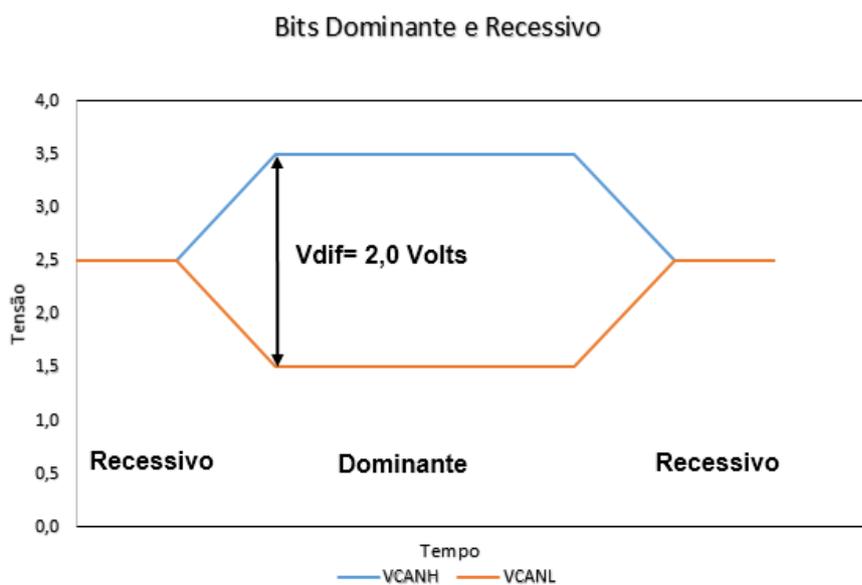


Figura 6 - Representação dos bits dominantes e recessivos.  
Fonte: autoria própria

As mensagens no barramento CAN são do tipo endereçável e qualquer informação, que trafegue pela rede, pode ou não ser processada pelo nó. Isso faz com que esse barramento tenha uma rápida manutenção e a tarefa de colocar um novo nó é uma tarefa relativamente fácil e rápida. Nesta rede, não existe um mestre, responsável por definir a ordem da mensagem que será enviada como prioridade, e as de menor prioridade devem aguardar, segundo explica Barbosa (2014).

A prioridade de cada mensagem na rede CAN é definida no campo do identificador. No barramento CAN, todos os nós ligados estão monitorando os bits da mensagem, sendo que os bits zeros são dominantes e uns são recessivos. Pode-se ter como exemplo um nó enviando uma mensagem com identificador com todos os bits em zero e outro nó enviando uma mensagem com apenas o primeiro bit em nível lógico um. A comunicação desses dois nós enviaria toda a mensagem e o segundo nó, ao receber um bit dominante, sabendo que o seu é recessivo, o mesmo interrompe o envio e aguarda o próximo instante. As mensagens com identificador mais próximo de zero se apresentam como mais prioritárias, conforme expõe Barbosa (2012).

Existem, até o momento, duas versões do protocolo CAN versão A e B. A diferença entre essas versões é no número de mensagens diferentes que podem ser transmitidas no barramento CAN. A diferença durante a transmissão ou recepção é o tamanho do identificador de mensagem, enquanto o identificador da versão A possui 11 bits, a versão B possui 29 bits. A figura 7 a seguir representa os campos de mensagem usado na versão A e a figura 8 representa os campos da versão B (SOUZA, 2011).

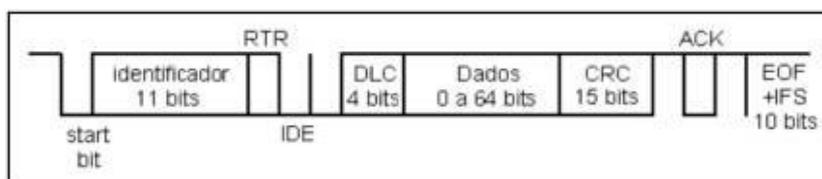


Figura 7 - Estrutura de mensagem da versão A.  
Fonte: Souza (2011).

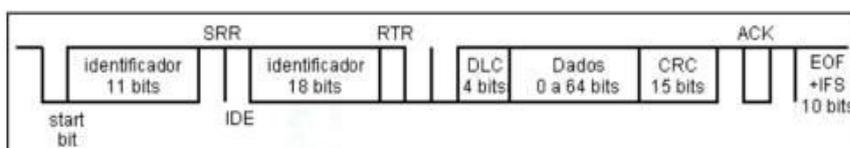


Figura 8 - Estrutura de mensagem da versão B.  
Fonte: Souza (2011).

As duas versões do protocolo CAN têm a mesma estrutura como visto anteriormente, o primeiro campo é chamado de SOF ou (Start of Frame) que significa o início de uma mensagem, os próximos onze bits servem para identificar as mensagens, os bits RTR, IDE e D0 são de controle e o campo DLC contém quatro bits para informar a quantidade de dados que será enviada, podendo ser de zero a oito bytes. Os dados são de 64 bits ou oito bytes e o campo CRC (*cyclic redundancy check*), formado por dezesseis bits, contendo uma palavra de *checksum* que é usado para detecção de erros. O campo EOF *end-of-frame* significa fim da mensagem. Logo após EOF, tem-se o IFS (*inter-frame space*) formado por sete bits para demandar tempo e o controlador mover os dados para memória (GUIMARÃES, 2014).

#### d) Comparação

É evidente que o consumo de energia de cada sensor precisa ser o menor possível e, ao mesmo tempo, conseguir uma aquisição com grande resolução em taxa de transferência satisfatória. Imaginando uma grande instalação, a facilidade de manutenção é importante para reduzir o tempo ocioso, quando a mesma apresentar algum problema. A tabela 1 a seguir traz algumas informações, que foram levantadas com pesquisa em sites de compra de componentes eletrônicos.

Tabela 1 - Comparação da velocidade entre as redes estudadas.

Rede	Velocidade (Kbps)	Módulo externo	Alcance (m)	Consumo (mW)
Zigbee	20 -- 900	Sim	40	50mW
Ethernet	10/100M	Sim	100 até o roteador	825mW
RS-485	Até 10 Mbps	Não	Até 1200 m	217 mW
CAN	50 -- 1000	Não	40 a 1000	50mW

Fonte: estudo feito em sites <http://farnellnewark.com.br/>

De antemão, já se pode descartar o uso de redes sem fio, por sensibilidade ao ruído, pode-se também destacar a diferença entre módulos com e sem fio, sendo um dos requisitos do projeto o baixo consumo de energia, fato que obrigou a deixar de lado esse tipo de tecnologia no momento.

As placas devem ser reduzidas ao máximo em tamanho e em módulos externos, assim, seria possível usar processadores robustos como ARM ou Kits já com muitos recursos, mas tal condição teria um custo maior, por isso, não se

apresentou como opção interessante para esse projeto no momento. Futuramente, talvez, quando for preciso mais inteligência em cada unidade de sensor se possa aplicar tal condição.

Em geral, a rede CAN se destaca como a melhor opção, pois tem um baixo consumo de energia e apresenta um custo envolvido menor. A rede atende os requisitos de taxa de transmissão, sendo também uma rede muito usada na indústria. Além disso, módulos para sua operação estão disponíveis em diversos micro controladores, facilitando sua implementação.

### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A ideia geral é usar a planta existente no NUEM/UTFPR, disponibilizada para experimentos, a qual possui controle de velocidade de líquido e gás. Os sensores com eletrônica própria de medição e driver de rede CAN são controlados por comandos enviados pela rede. A central gerencia a leitura e repassa as informações para o computador. As partes constituintes do sistema são ilustradas na Figura 9, que mostra um escopo do sistema proposto. A rede será ligada a  $n$  sensores, distribuídos ao longo da tubulação, transmitindo as informações para o computador por intermédio da central. No canto inferior esquerdo se tem uma representação da eletrônica de cada sensor, que possuiu circuitos analógicos para a medição e um micro controlador, que processa essa informação e a disponibiliza na rede.

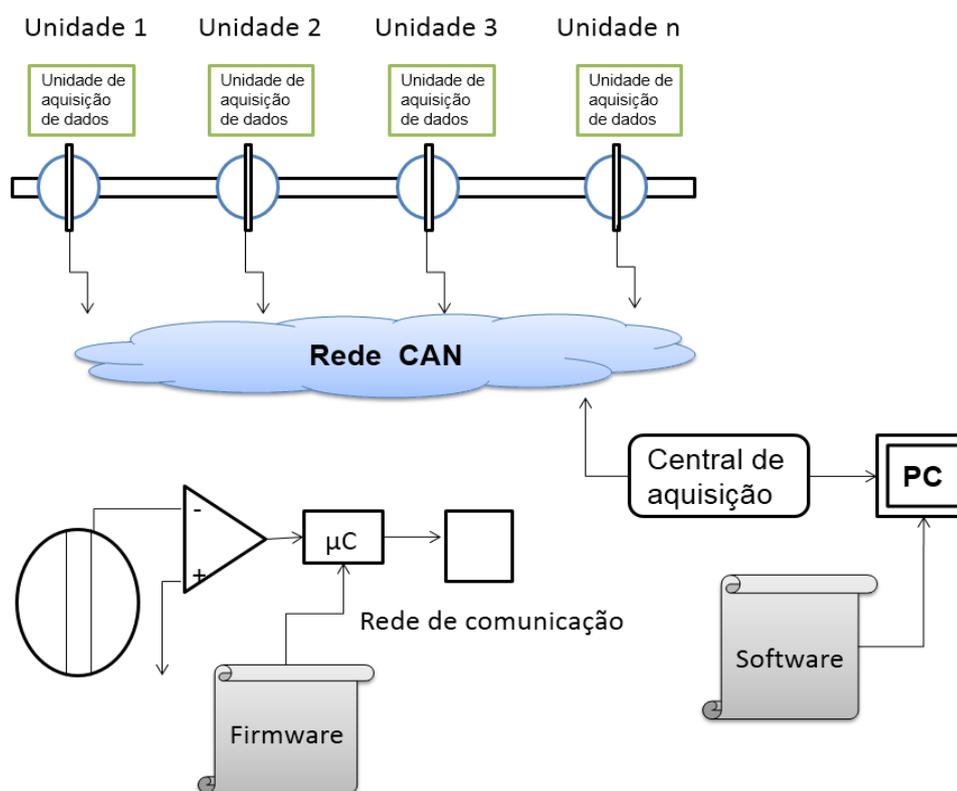


Figura 9 - Projeção da distribuição dos sensores dentro da atual planta de estudos.  
Fonte: autoria própria.

## 3.2 HARDWARE E FIRMWARE

O Hardware proposto do sensor está dividido em duas partes. Uma é a geração de sinal e leitura que vem de trabalhos anteriores (MACHADO; HILDERBRANDO; LIPINSKI, 2013). E outra que é a inclusão de um micro controlador que gerencia da tarefa de gerar o sinal, guardar os valores lidos do sensor e enviar para a rede CAN.

Para permitir a comunicação da rede CAN com o sensor é necessário que uma central dedicada receba os dados e repasse para o computador, fazendo também o intermédio de comandos do computador para os sensores. Os firmwares ou softwares dos micros controladores do sensor e da central foram desenvolvidos a fim de facilitar as melhorias futuras, com comandos simples para implementação em qualquer software ou adaptação de mais funcionalidades.

### 3.2.1 Micro controlador

Atualmente, o mercado de componentes eletrônicos oferece variedade de micro controladores que, internamente, apresenta algum módulo de rede ou um meio de comunicação com módulos externos como a comunicação serial UART e SPI.

Um dos critérios para a seleção adequada do MCU é que possua esses módulos de comunicação serial ou, internamente, o drive da rede escolhida.

Com base nessas características foi escolhido o micro controlador PIC18F25K80 da *Microchip Technology Inc.*, uma vez que esse é facilmente encontrado no mercado e atende as características do projeto. O micro controlador é composto de um driver de rede CAN interno e conversores AD de 12 bits, permitindo uma boa resolução na amostragem dos dados. Além disso, características como memória contribuem para a funcionalidade do sistema.

### 3.2.2 Unidade sensora

As unidades sensoras foram desenvolvidas por Machado, Hilderbrando e Lipinski (2013) e são compostas de dois fios metálicos de aço inox com espessura de 120  $\mu\text{m}$ , sendo um deles o eletrodo de excitação e o outro o eletrodo de recepção, responsável pelo sinal de resposta proporcional à altura do filme de líquido. A técnica

de medição baseia-se nos conceitos de corrente de condução em fluídos não isolantes. Cada sensor possui um circuito de excitação de onda alternada de modo a evitar o desgaste por eletrólise nos fios e um circuito de medição responsável por realizar a aquisição deste sinal e o condicionar para a leitura no micro controlador

O sinal é gerado pela fonte de tensão alternada (Figura 10) alternando o controle da chave analógica DG419 (Figura 11) na qual envia o sinal (Figura 12) para o circuito do sensor A e do sensor B. Anteriormente, foi mencionado que um dos objetivos se apresenta, também, na redução da quantidade de placas intrusivas por ponto de medição. Se ambas as placas forem excitadas simultaneamente poderia haver uma interferência elétrica.

É importante a comutação entre os sensores para garantir a correta medição. O circuito dos sensores A e B podem ser controlados para conduzir o sinal alternado ou simplesmente desligar a excitação. Isso é importante para garantir a não excitação simultânea dos sensores, garantindo a correta medição.

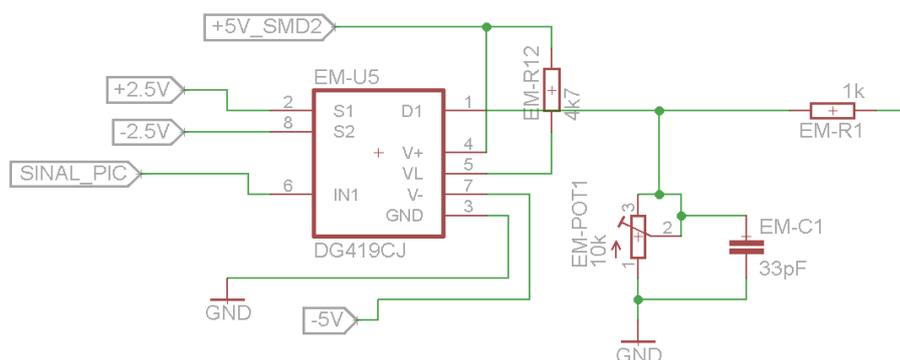


Figura 10 - Esquemático do circuito de geração de sinal desenhado no EAGLE 5.10. Fonte: autoria própria.

A Figura 10 mostra o circuito de chaveamento do sinal, que tem como referência mais e menos 2,5 Volts. A Figura 11 é o chaveamento apenas de um sensor, que liga o sinal de excitação ou desliga. A medição é feita na Figura 12 no amplificador de transimpedância, que recebe o sinal e envia para o amplificador, que ignora a componente negativa a fim de não influenciar a aquisição do conversor analógico digital do micro controlador.

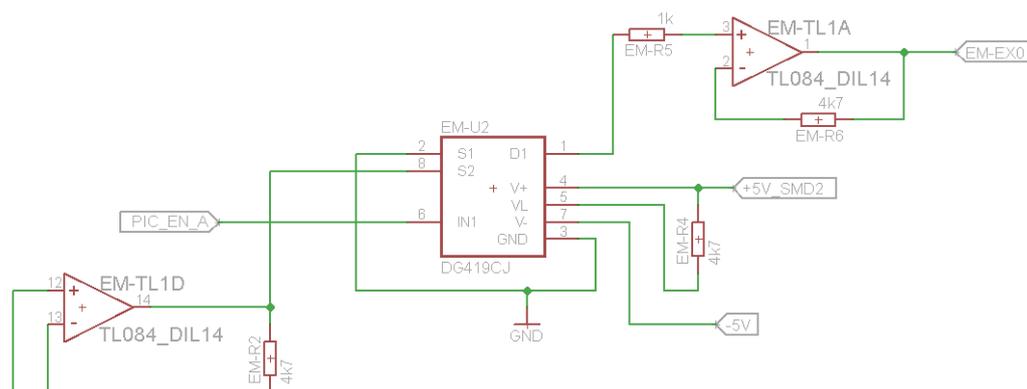


Figura 11 - Esquemático do circuito de excitação de um dos sensores.  
Fonte: autoria própria

A aquisição é feita por um circuito amplificador de transimpedância (Figura 13) que envia o sinal amplificado para um amplificador *rail-to-rail*, que tem a função de cortar a componente negativa do sinal e entregar para o micro controlador apenas a componente positiva do sinal. Desta forma, é possível a conversão AD (analógico digital) no PIC.

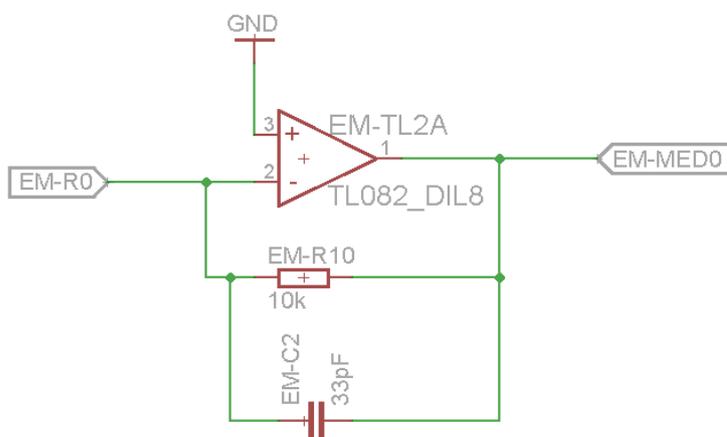


Figura 12 - Circuito do amplificador de transimpedância.  
Fonte: autoria própria.

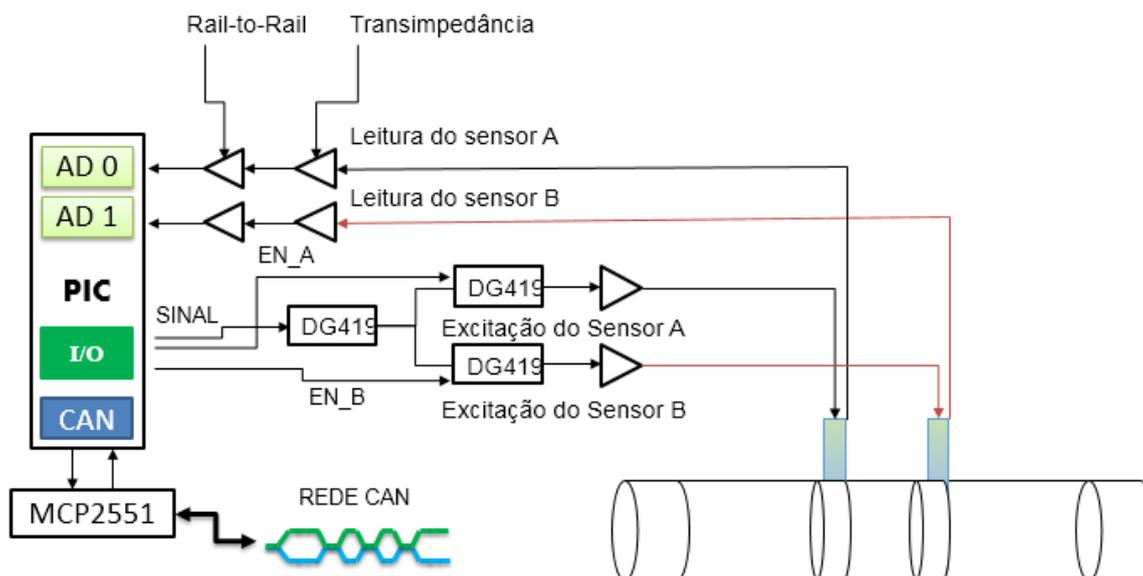


Figura 13 - Diagrama de bloco teórico do circuito de excitação e medição  
Fonte: autoria própria.

A montagem dos sensores só foi feita em placas simples para testes. Isso por que é necessário um teste mais sofisticado e em quantidade maior de nós dentro da planta na qual será utilizado, evitando o surgimento de problemas de hardware ainda não constatados, também é importante a pré-utilização para acréscimos de recursos como sinais luminosos, sensor de temperatura e outros recursos que possam vir a facilitar a utilização e ou melhorar a qualidade dos dados.

A Figura 14 tem, no primeiro canal, a forma de ondas geradas na primeira chave DG419, que tem amplitude de +2,5 volts e -2,5 volts. O segundo canal é a onda que é enviada para o sensor.



Figura 14 - Forma de ondas para o sensor com os terminais completamente imersos no líquido  
Fonte: autoria própria.

Foram feitos dois testes: um com o tubo vazio e outro com o tubo cheio. A figura acima permite ver o primeiro canal que se tem o sinal que chega para o conversor analógico digital do micro controlador, quando os eletrodos estão secos e na Figura 15 se tem as formas de ondas para o sensor com os fios totalmente imersos na água.



Figura 15 - Forma de ondas do sinal recebido no sensor  
Fonte: autoria própria.

A fim de avaliar o correto funcionamento foi medida, com o osciloscópio, a forma de onda, que chega ao conversor analógico digital do micro controlador, como mostrado na Figura 15.



Figura 16 - Formas de ondas gerador de função  
Fonte: autoria própria.

A forma de onda de excitação é uma onda alternada de mais ou menos 5 Volts, para diminuir a eletrólise dos fios que poderia comprometer as medições e aumentar muito a manutenção do sistema. A figura 16 mostra a tela do osciloscópio,

em que o canal 1 é o sinal gerado na saída do sensor e o canal 2 é o sinal gerado no micro controlador.

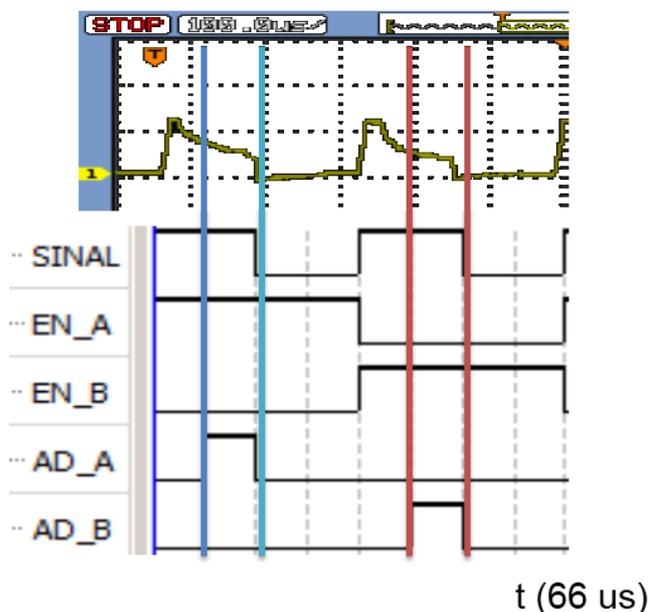


Figura 17 - Formas de ondas que representam o controle da excitação e momento de medição  
Fonte: autoria própria.

A Figura 17 mostra resumidamente, como são os oito passos de cada ciclo de excitação e leitura dos sensores. O sinal gera a forma de onda de excitação para ambos os sensores. Os sensores são habilitados alternadamente, enquanto um envia o sinal gerado, o outro permanece inativo. Os oito passos são lidos e armazenados no buffer de leitura do sensor, mas apenas um passo é enviado para a rede. Isso porque o dado relevante é a partir da estabilidade do sinal. Pode-se notar que o passo 2 e 6 são os passos enviados do sensor A e B, respectivamente.

No protótipo do sensor foi usando uma placa de fibra de dupla face. A vantagem de uma montagem manual é que erros de desenho, muitas vezes, podem ser corrigidos sem grandes problemas ou até perdas de lotes inteiros de placas feitas industrialmente. A Figura 18 apresenta a vista superior da placa tendo o micro controlador e componente de ajuste e na parte inferior, em que são encontrados os circuitos analógicos e de comutação.

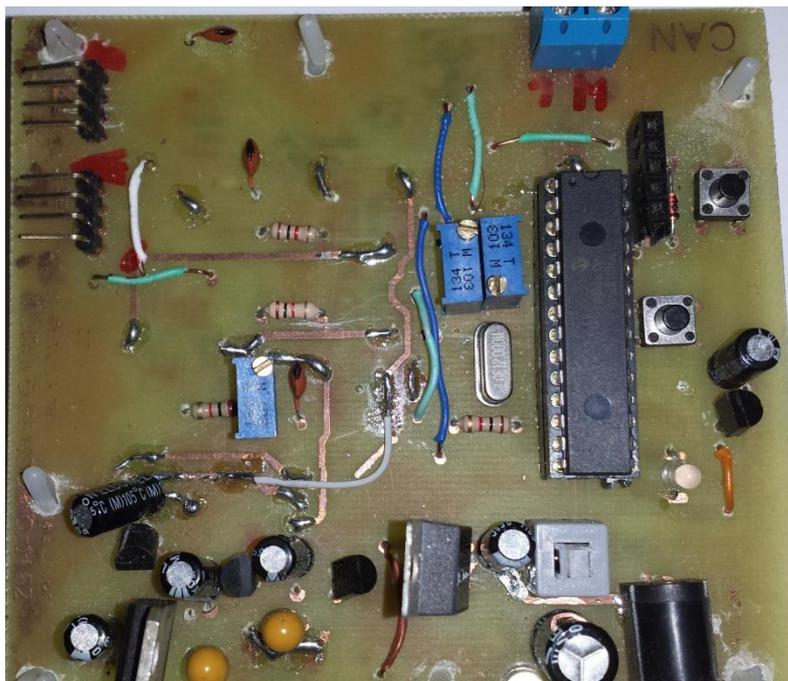


Figura 18 - Vista superior da placa do sensor  
Fonte: autoria própria.

Esse circuito possibilita a retirada da placa de guarda situada, atualmente, entre as duas placas de medição como mostrado na Figura 19.

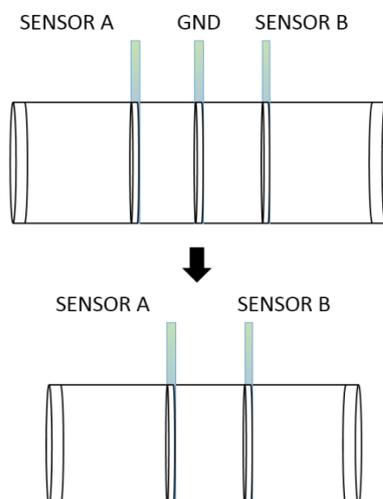


Figura 19 - Comparação entre o antigo ponto de medição e o proposto  
Fonte: autoria própria.

A Figura 20 mostra como ficaria a planta completa e o remodelamento dos pontos de medição e a adição dos módulos medidores.

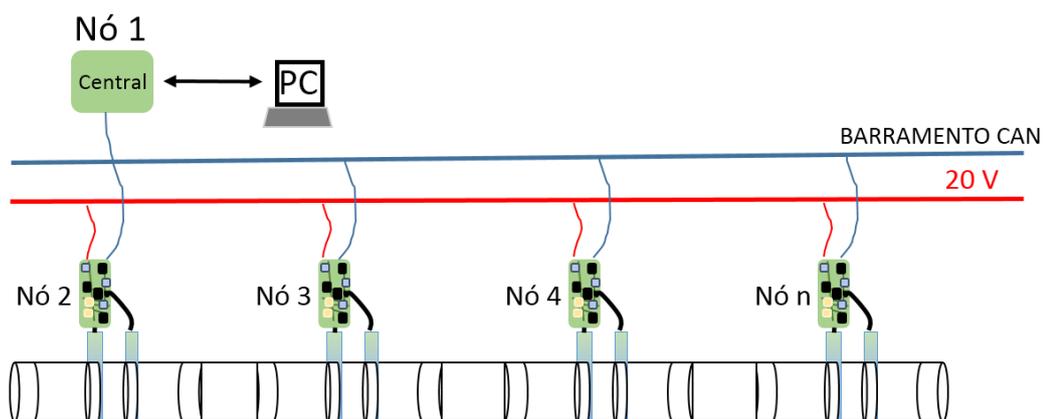


Figura 20 - Ilustração dos sensores ligados ao barramento CAN  
Fonte: autoria própria.

### 3.2.3 Central de aquisição

A central vista na Figura 21, conta com um firmware com funções de interpretação de comandos oriundos do computador. Esses comandos permitem alterar o endereço de cada nó, ligar e desligar a leitura, iniciar a aquisição e teste de presença de um nó, ligando ou desligando um sinal luminoso do nó.

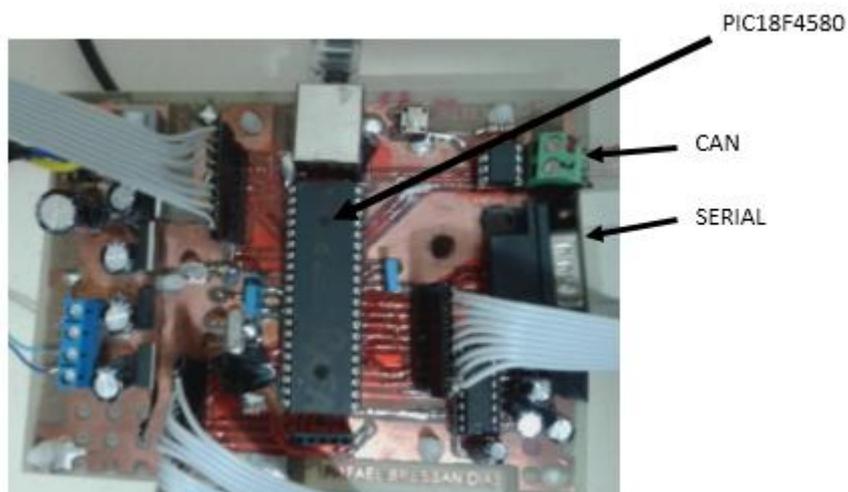


Figura 21 - Placa central.  
Fonte: autoria própria

## 3.3 FIRMWARE

O firmware dos sensores tem as funções de executar comandos recebidos da central como o de teste de funcionamento e gerar as formas de onda de excitação com um sinal chaveado em 1,75 kHz e a comutação entre ambos os sensores, em

que somente um sensor é excitado por vez. Quando a leitura de ambos os sensores está completa, os valores são então enviados pela rede CAN até a central. Pode-se ver o fluxograma do firmware na Figura 22.

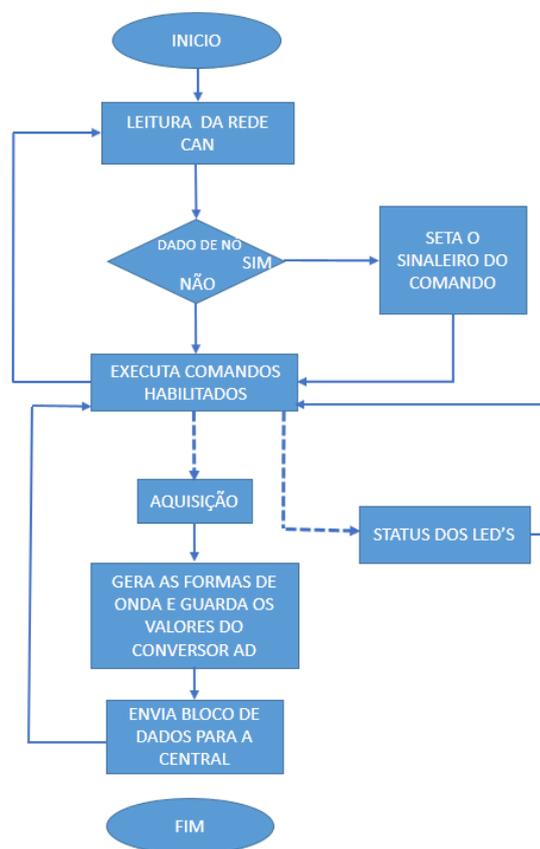


Figura 22 - Fluxograma do Firmware dos sensores.  
Fonte: Autoria própria

O firmware da central visto na Figura 22, tem a função de intermediar as configurações dos sensores como teste e habilitar e desabilitar aquisição. Durante a aquisição, a central separa os dados de cada sensor, em uma tabela de dados, e feito isso envia para o computador via comunicação serial. O fluxograma do software pode ser visto na Figura 23 e Figura 24.

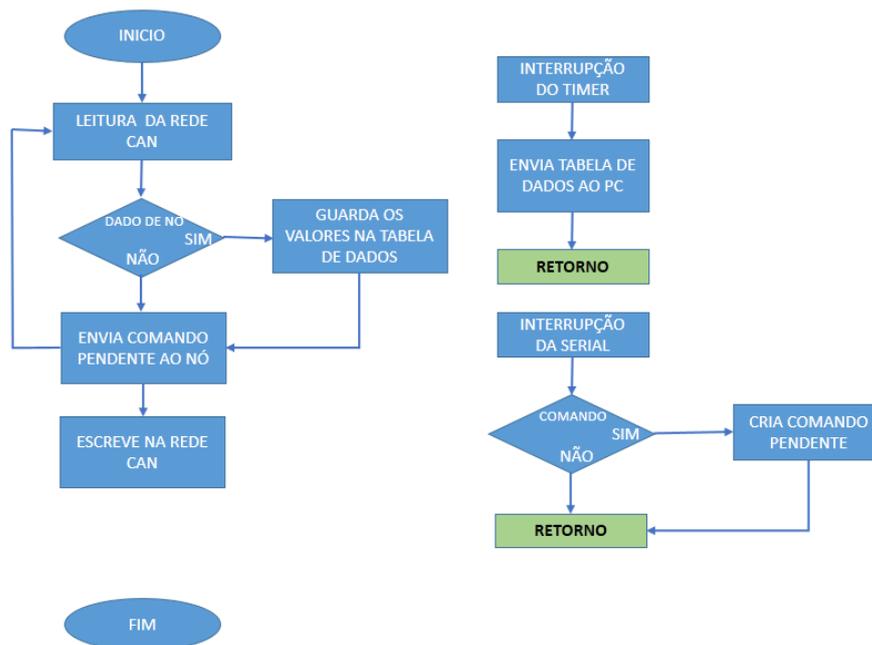


Figura 23 - Fluxograma do Firmware da Central de aquisição.  
Fonte: Autoria Própria

A programação feita no software permite o teste dos sensores e o recebimento dos dados. Quando um medidor é instanciado, o mesmo separa o campo da tabela de dados referentes ao sensor, no qual será armazenado, em um buffer e, ao mesmo tempo, atualizando o gráfico das formas de onda instantâneas. Quando o tempo de aquisição é terminado ou se o buffer estiver cheio, os dados de buffer serão armazenados em um arquivo de texto simples para o processamento futuro.

A comunicação da Central para o nó funciona com o envio de caracteres especiais, funcionando com comandos. Isso porque, por vez a CAN envia 8 bytes de dados, sendo que se enviar 1 ou 8 bytes, a mensagem será enviada durante o mesmo intervalo de tempo.

A estrutura da comunicação funciona enviando um byte, que define se é comando ou um novo endereço do nó dentro da rede CAN. Se for um endereço, o nó irá configurar e alterar o seu endereço e, posteriormente, enviar um conjunto de caracteres “OK!”, para dizer para a central que o endereço foi alterado com sucesso.

Se for um comando, o mesmo deve comparar com os comandos reconhecidos pelo firmware e, então, destinar à função de que trata cada comando.

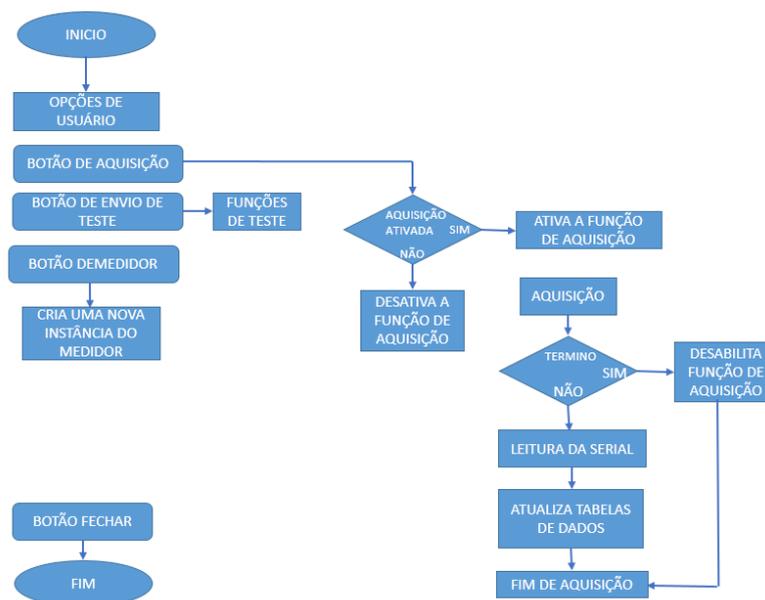


Figura 24 - Fluxograma do Software de aquisição.  
Fonte: Autoria Própria

O diagrama de blocos do software, como mostrado na Figura 25, manda os comandos enviados pelo usuário para a Central, que redireciona para o nó específico. O software faz leituras periódicas da central recebendo um bloco de dados com todas as medições de cada nó. Após a leitura, o software disponibiliza um bloco de dados para cada instância do medidor.

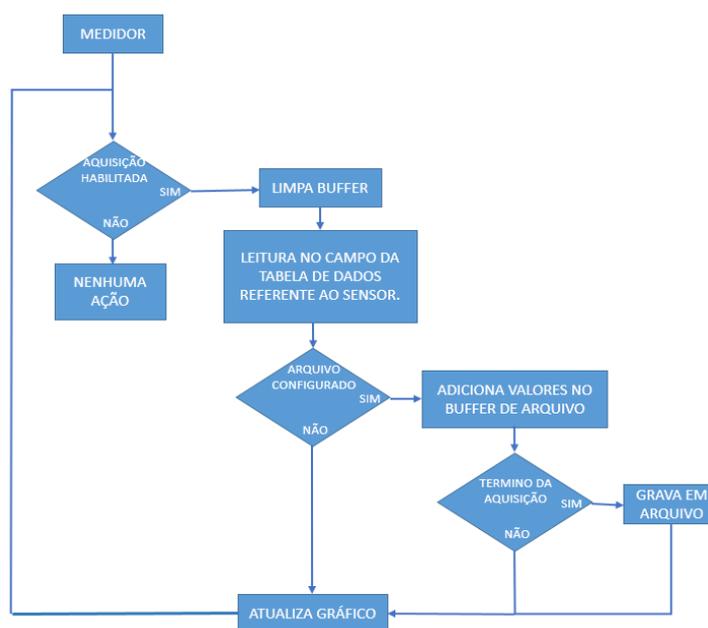


Figura 25 - Fluxograma do Medidor.  
Fonte: Autoria Própria

O fluxograma do medidor, como mostrado na Figura 25, seleciona o bloco de dados do nó configurado pelo usuário e grava, em um bloco de memória, todas as medições até seu término. Finalizado o tempo de aquisição e sendo configurado um arquivo de destino, o medidor grava essas informações em um arquivo.

### 3.4 SOFTWARE

Para o controle da central foi desenvolvido um software codificado em uma linguagem de programação de alto nível (C#) que comanda a leitura e escrita de dados para cada nó.

A central é comandada pelo software codificado em C# (C Sharp) que diz para a central se é para ler um dado ou escrever um dado em um nó específico. A aquisição simples ocorre quando o computador envia um bloco de dados específicos para a central e esta envia uma mensagem para todos os nós, fazendo com que os mesmos enviem os valores de cada sensor. Após o início de dados iniciados, a central distribui os dados dos sensores dentro de um vetor de dados e envia esse vetor para o computador. No software é possível criar janelas de medição e escolher qual o sensor que se deseja ler.

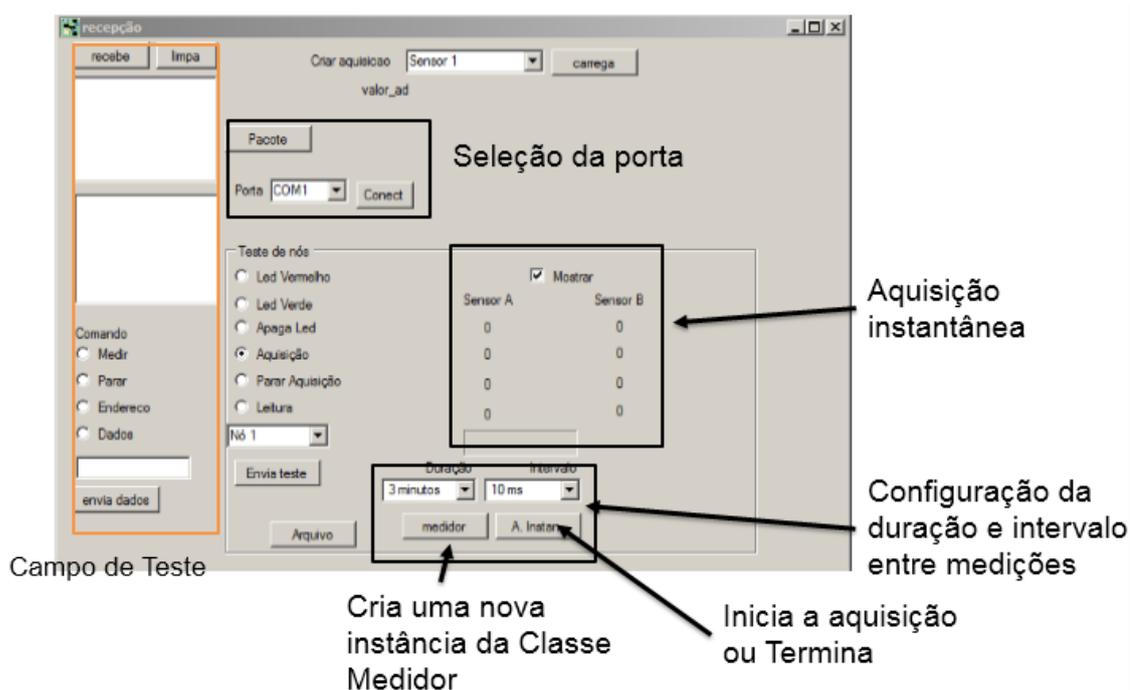


Figura 26 - Primeira janela do software de aquisição.  
Fonte: autoria própria.

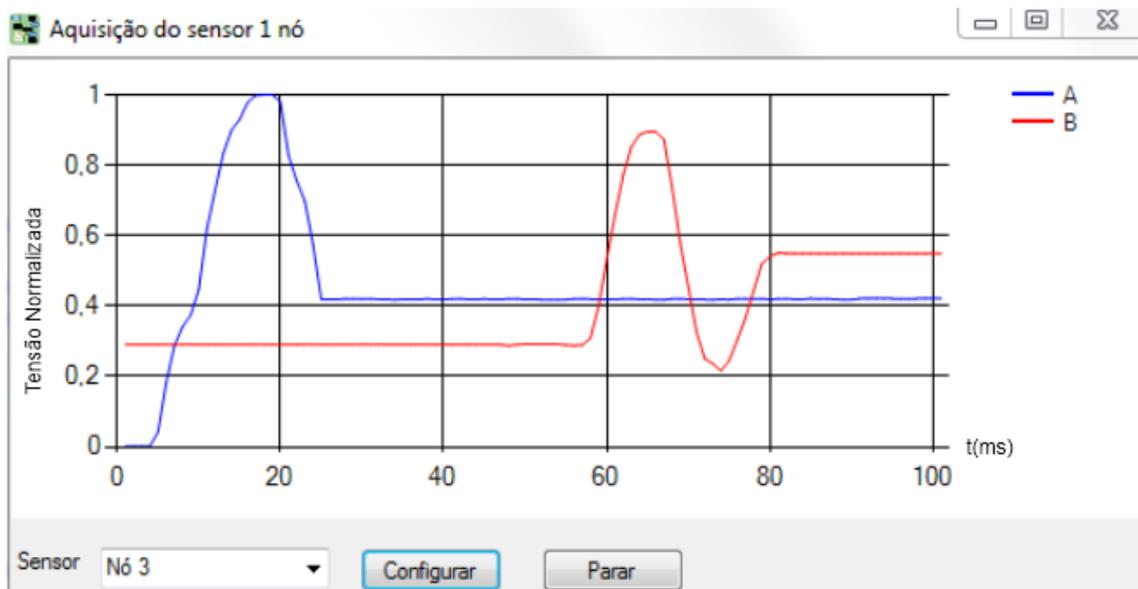


Figura 27 - Janela de aquisição  
Fonte: autoria própria.

Na Figura 27 foi feito um teste de funcionamento ligando potenciômetros e variando para verificar o funcionamento de placas com micro controlador e CAN.

### 3.5 REDE

A ligação nos sensores será de quatro fios, sendo dois de alimentação e dois destinados para a rede CAN. A comunicação do micro controlador com a rede é realizada por meio do conversor de nível, que é responsável pela interface do controlador da rede para o nível físico, no qual possui características de nível de tensão e padrão de dados diferentes. Esse conversor de nível, quando em modo de recepção, realiza a leitura dos estados da rede dominante e recessivo e passa para o controlador na forma de nível lógico 0 ou 1. O mesmo acontece quando se transmite, só que dessa vez o conversor recebe os níveis lógicos do controlador e repassa para a rede.

O circuito integrado MCP2551 (Figura 28) é um transceptor que realiza a interface do módulo interno do PIC com a camada física do barramento. Conforme as informações da folha de dados do fabricante, esse transceptor é projetado para sistemas de 12 até 24 volts e pode chegar a uma frequência de comunicação de 1 Mbps, permitindo uma quantidade de até 112 nós.

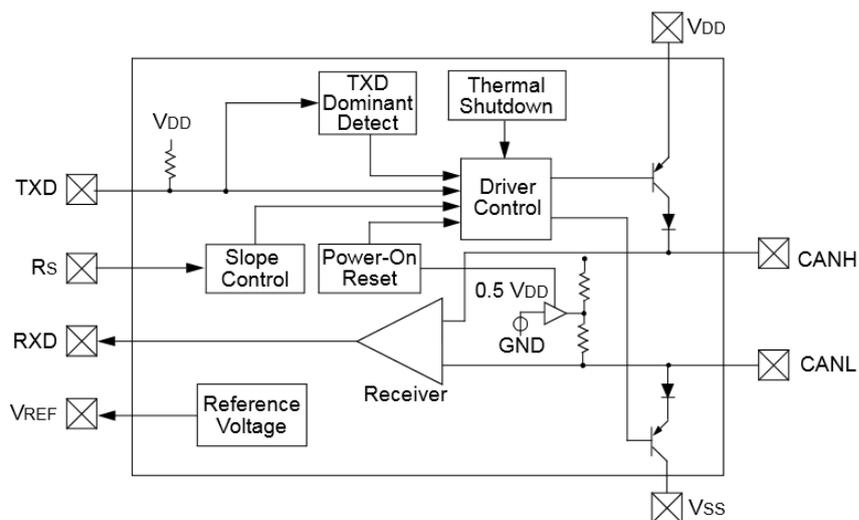


Figura 28 - Diagrama de bloco do MCP2551.  
Fonte: Microchip Technology (2015)

Os pinos RXD e TXD do MCP2551 são ligados aos CAN\_TX e CAN\_RX do micro controlador e os pinos CANH e CANL são ligados ao barramento CAN. O barramento CAN tem em cada extremidade um resistor de 120 ohms como mostrado na Figura 29.

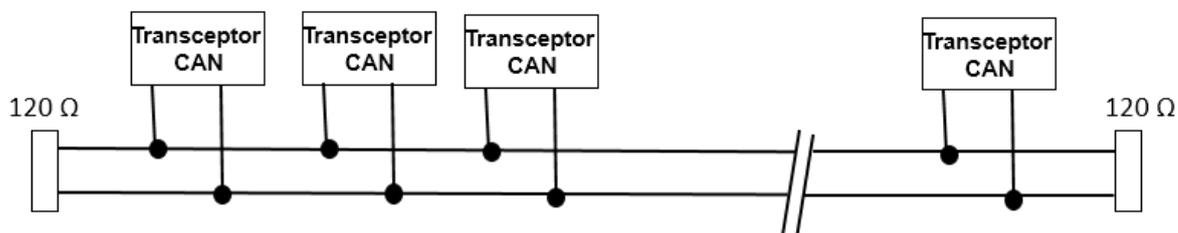


Figura 29 - Barramento CAN.  
Fonte: autoria própria.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 DESEMPENHO DO SISTEMA

Para garantir que o sistema funciona corretamente foram feitos testes de linearidade com resistores e com a variação da altura de líquido nos tubos usados na planta do LACIT, que possuem diâmetro interno de 26 mm e externo de 32 mm. Este teste é importante para a validação do sensor.

### 4.2 LINEARIDADE

A fim de verificar a linearidade do sistema, testes foram efetuados para obter a curva de ajuste que associa os valores de tensão a valores de resistências dentro da faixa de medição do sensor. Foram utilizados dois módulos de medição conforme Figura 30 e Figura 31.

O teste foi feito usando resistores com valor de resistência dentro do range que o sensor é capaz de medir. Esse range é de 6,8 kilo-ohms até 870 kilo-ohms. Dentro desse range foram divididos em dez resistores distintos e, posteriormente, fez-se o uso de resistores comerciais de valor aproximado.

Com o intuito de usar os valores reais e absolutos desses resistores, os mesmos foram medidos, usando uma ponte RLC (Analisador de Componentes), para obter o valor real de cada um. A partir dos valores reais, cada resistor foi, então, ligado ao fio que excita e o que mede cada sensor e, posteriormente, comparados. Para a visualização, o valor das resistências está em Siemens. Os valores comerciais, medidos na ponte RLC e as tensões medidas, em cada sensor, estão na Tabela 2.

Tabela 2 - Todos os resistores usados no teste de linearidade.

Comercial $\Omega$	Medido RLC $\Omega$	Condutância S)	Sensor A Tensão	Sensor B Tensão
6.800	6.615	1,51172E-04	3,971347988	3,971732369
100.000	99.577	1,00425E-05	0,277857884	0,285083984
220.000	216.477	4,61943E-06	0,135863160	0,142787876
270.000	270.077	3,70265E-06	0,111745676	0,118483079
390.000	381.977	2,61796E-06	0,083586336	0,090456419
470.000	466.977	2,14143E-06	0,069449106	0,077620622
560.000	553.977	1,80513E-06	0,062094156	0,069101797
680.000	669.977	1,49259E-06	0,054576172	0,061716797
720.000	742.977	1,34594E-06	0,050802713	0,057329389
820.000	822.977	1,21510E-06	0,047099385	0,053771424

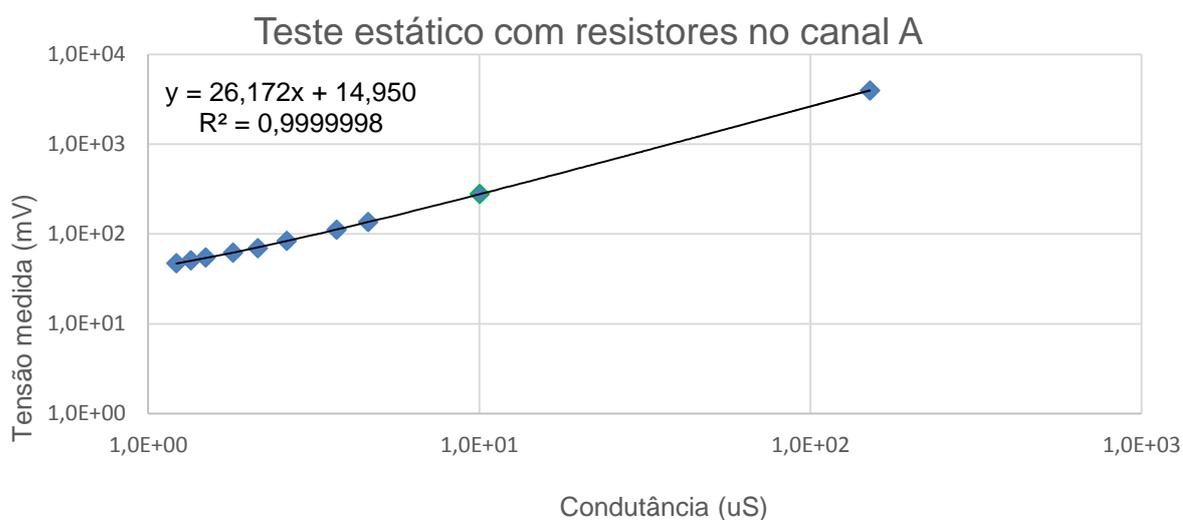


Figura 30 - Teste estático com resistores no módulo sensor de canal A.  
 Fonte: autoria própria

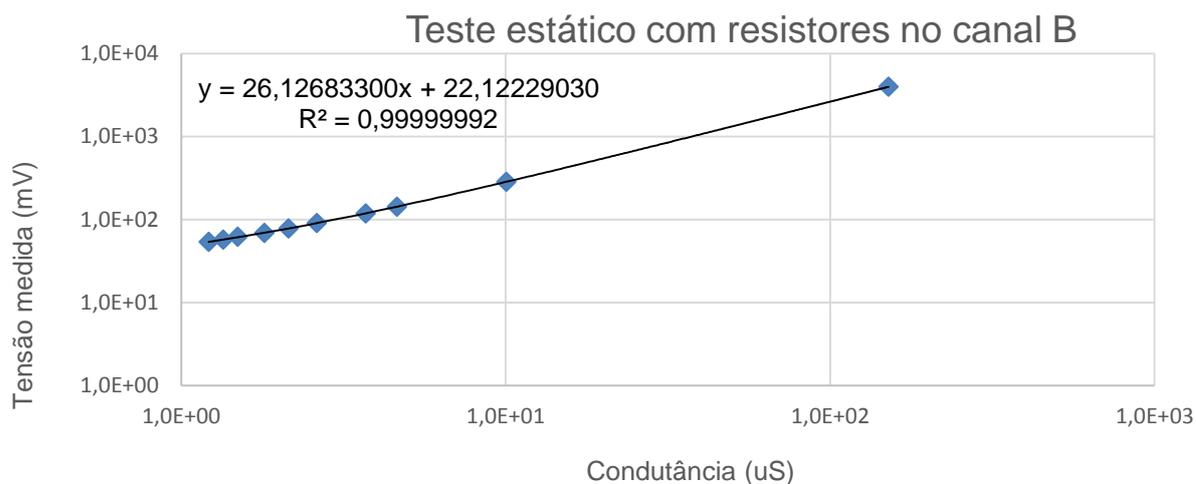


Figura 31 - Teste estático com resistores no módulo sensor de canal B.  
Fonte: autoria própria

### 4.3 TESTES EM FLUÍDOS

Testes com fluídos foram realizados a fim de validar o sistema quanto à monitoração do escoamento bifásico.

#### 4.3.1 Teste estático

A fim de obter uma correção entre a altura do filme de líquido dentro da tubulação e a tensão medida, experimentos estáticos foram realizados.

Efetuuou-se a medição a partir de um arranjo de 2 sensores resistivos montados em uma seção de testes composta por tubo de 26 mm de diâmetro interno. Foram efetuadas 10 medidas gradativas, aumentando a concentração de água até se obter a fração de vazio = 0. Ao longo deste processo, valores de pressão e temperatura foram monitorados e se mantiveram constantes a 15° C e 918 mBAR respectivamente.

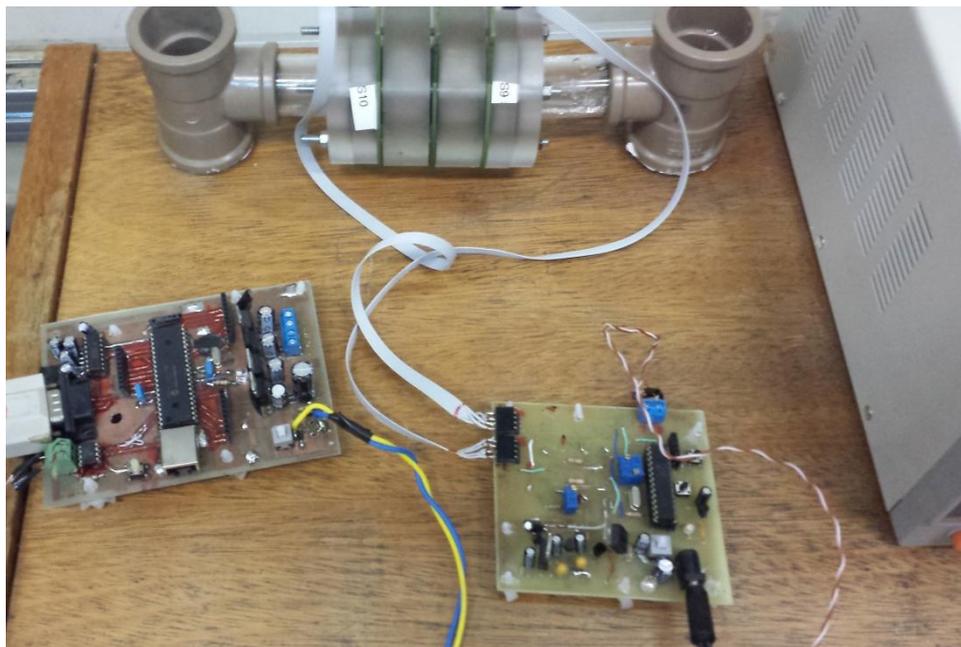


Figura 32 - Teste estático com fluidos.  
Fonte: autoria própria

A Figura 33 apresenta os dados medidos para ambos os sensores. O eixo horizontal apresenta a altura de líquido normalizada entre 0-100% e o eixo vertical a condutância medida pelo sistema.

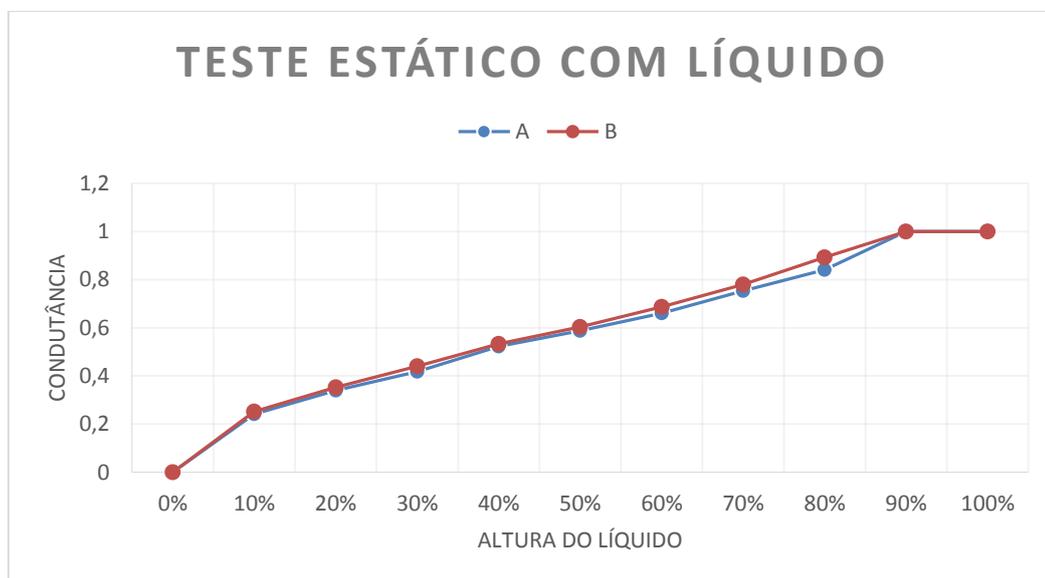


Figura 33 - Relação da condutância versus altura do líquido.  
Fonte: Autoria própria.

### 4.3.2 Teste em escoamento

A partir dos resultados obtidos e funcionamento do sistema surgiu a necessidade de testes para o monitoramento de escoamento bifásico gás-líquido (ar-água) utilizando a planta experimental.

A planta experimental está situada no Laboratório de Ciências Térmicas (LACIT) do Núcleo de Escoamentos Multifásicos da UTFPR do campus Curitiba. A linha de escoamento é composta com uma tubulação de acrílico de diâmetro interno de 26 mm e diâmetro externo de 32 mm. Ao início da linha se encontra um misturador, responsável por unir o ar comprimido e a água proveniente de um sistema de armazenamento. A planta é comandada por um sistema supervisor, que controla um conjunto de moto-bomba e um inversor de frequência a fim de permitir a circulação das fases em um loop para a monitoração.

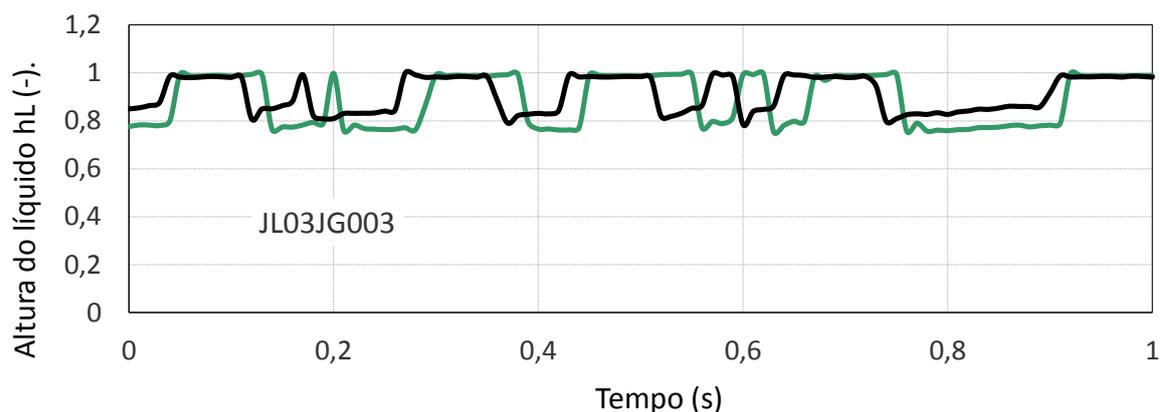


Figura 34 - Teste com Fluidos velocidade de líquido 0,3 m/s e velocidade de gás 0,03 m/s.

Fonte: autoria própria.

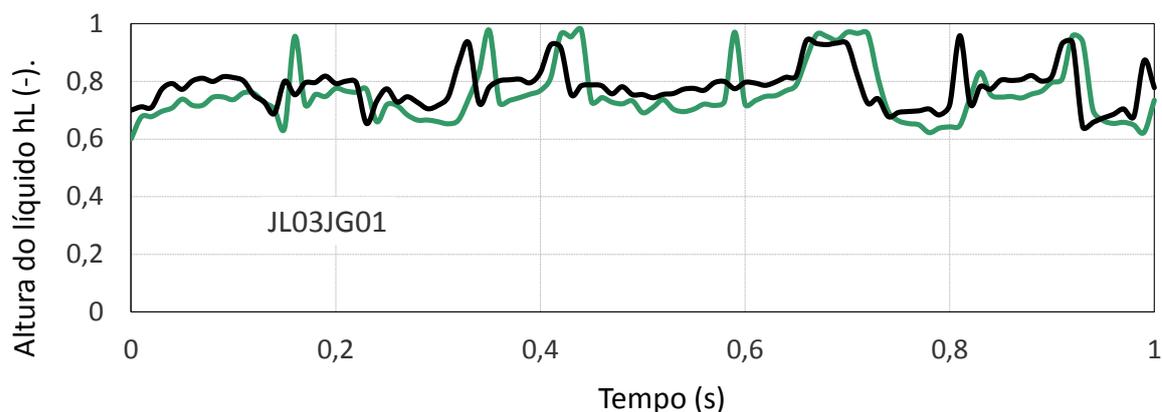


Figura 35 - Teste com Fluidos velocidade de líquido 0,3 m/s e velocidade de gás 0,1 m/s.  
Fonte: autoria própria.

Os padrões vistos na Figura 35 são de um aumento na velocidade de gás, fazendo aumentar o tamanho de bolhas, mas ainda não muito definidas. A defasagem dos sensores não está igual, porque algumas bolhas são unidas, formando uma bolha maior, ao longo do escoamento e, também, no espaço entre um sensor e outro. O mesmo padrão é observado na Figura 37, porém as bolhas são maiores.

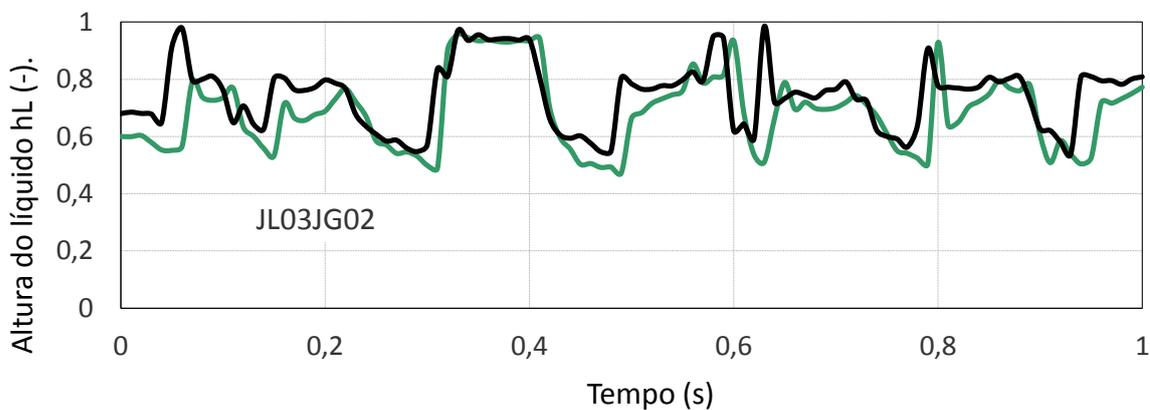


Figura 36 - Teste com Fluidos velocidade de líquido 0,3 m/s e velocidade de gás 0,2 m/s.  
Fonte: autoria própria.

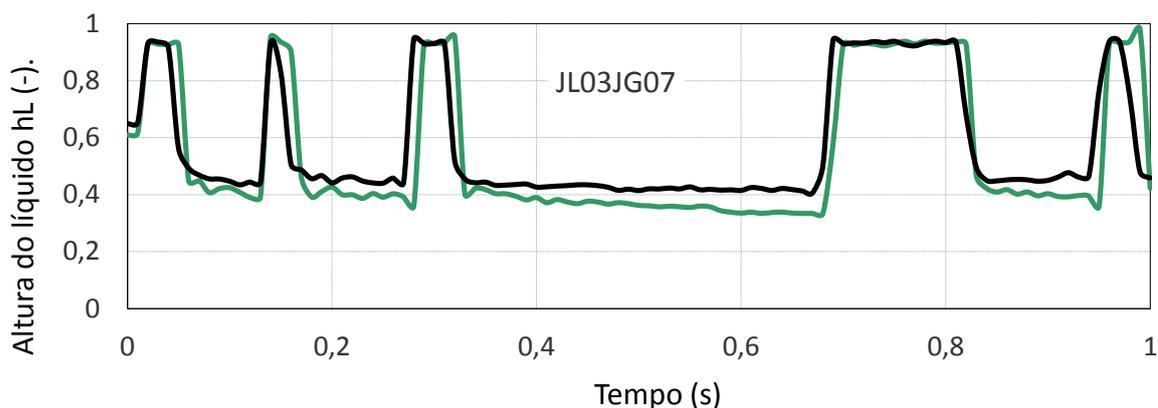


Figura 37 - Teste com Fluidos velocidade de líquido 0,3 m/s e velocidade de gás 0,7 m/s.  
Fonte: autoria própria.

A Figura 38 mostra um padrão mais definido, pois são pistões de ar e água. A visualização fica mais nítida. Esse padrão é chamado de golfada e é o padrão de interesse dos laboratórios NUEM.

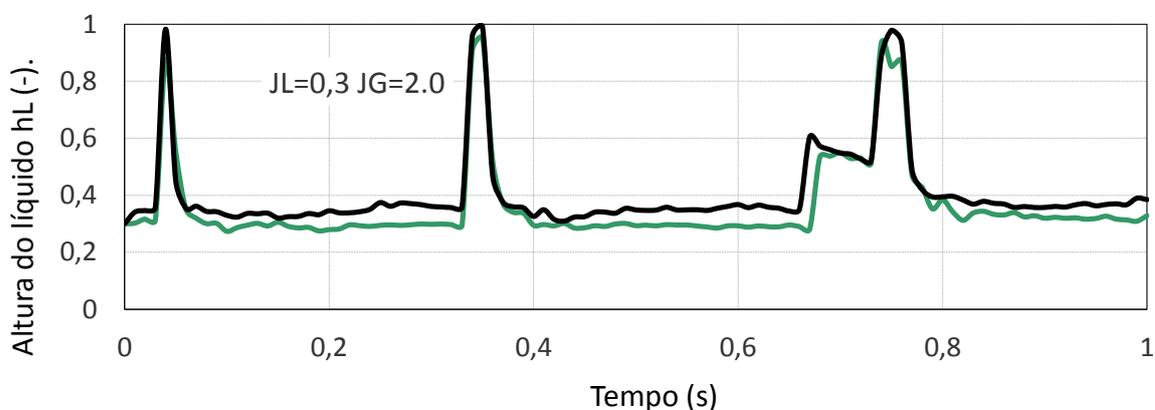


Figura 38 - Teste com Fluidos velocidade de líquido 0,3 m/s e velocidade de gás 2 m/s.  
Fonte: autoria própria.

Nos gráficos demonstrados da Figura 34 até a Figura 38 decorrem de um teste dinâmico com a velocidade de líquido em 0,3 metros por segundo e velocidade de gás em 0,03 metros por segundo. A amplitude das séries representa a altura do líquido em cada sensor. É notável que exista uma defasagem entre os dois sensores, isso ocorre porque os sensores estão espaçados, havendo um atraso na passagem de um sensor e outro, o que é visível no gráfico como uma defasagem.

Na Figura 38, a altura de líquido aparece como um pico, isso porque a velocidade de gás é de 2 metros por segundo, formando um pistão de líquido menor do que o pistão de gás

## 5 CONCLUSÃO

Para concluir este projeto foram feitos testes com a rede CAN e, posteriormente, feita uma placa protótipo de nó do sensor. O firmware escrito em C, tanto da Central como do Nó também foram feitos dedicados para suas respectivas funções.

O software, escrito em C#, precisa ser interpretado pela máquina virtual NET, mas mesmo para essa aplicação se mostrou eficiente ao lado da possibilidade de criar em tempo de execução as janelas de medidores, bem como em configurar arbitrariamente, sendo algo que traz flexibilidade ao sistema.

Os testes preliminares com a central e os respectivos nós de medição mostrou que a rede CAN se encaixa com os objetivos deste trabalho, sendo de montagem simples e eficiente. É importante salientar que a Figura 22 de uma central surge somente enquanto ocorre teste da rede CAN e, posteriormente, deve-se adquirir uma placa dedicada.

Testes estáticos foram satisfatórios ao mostrar a linearidade do sensor e possibilitando o teste dinâmico, finalizando os testes.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

A partir do momento em que o projeto é finalizado, já será estudado como substituir a Central por uma placa PCI-CAN, que permitirá ao sistema funcionar a plena velocidade de comunicação 1 Mbps.

Os nós deverão ter um projeto físico reduzido, feitos com precisão industrial e, em grande quantidade, para atender a demanda dos laboratórios NUEM que estão passando por ampliação. O Hardware dos sensores pode, ainda, sofrer melhorias como, por exemplo, sensor de temperatura do escoamento, sensor de umidade atmosférica e sensor de pressão atmosférica.

## REFERÊNCIAS

- BARBOSA, Luiz Roberto Guimarães Barbosa. **Rede CAN**. Belo Horizonte, 2003. Escola de Engenharia da UFMG. Disponível em: <[http://www.cpdee.ufmg.br/~elt/docs/DSP/Resumo\\_CAN.pdf](http://www.cpdee.ufmg.br/~elt/docs/DSP/Resumo_CAN.pdf)>. Acesso em: 21 jul. 2015.
- BORGES, Fátima. **Redes de comunicação industrial**. set. 2007. Schneider Electric. Disponível em: <[http://www.schneiderelectric.pt/documents/product-services/training/doctecnico\\_redes.pdf](http://www.schneiderelectric.pt/documents/product-services/training/doctecnico_redes.pdf)>. Acesso em: 05 jan. 2015.
- BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à análise de circuitos**. 8. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1998
- BOYLESTAD, Robert; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria dos circuitos**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2004.
- BRASIL. **Modelo regulatório do pré-sal**. 27 ago. 2009. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/destaques-do-setor-de-energia/pre-sal>>. Acesso em: 21 jul. 2015.
- COMER, Douglas E. **Interligação em rede com TCP/IP**. Rio de Janeiro: Campus, 1998. v. 1.
- CROWE, C. T. **Multiphase Flow Handbook**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006.
- DA SILVA, Marco J. **Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging**. Dordrecht: TUDpress, 2008.
- FALCONE, G.; HEWITT, G.F.; ALIMONT, C.; HARRISON, B. **Multiphase Flow Metering: Current Trend and Future Developments**. Petroleum Engineering, Sidney, Australia. abr. 2002, p. 77-84.
- FALCONE, G.; HEWITT, Geoffrey F.; ALIMONTI, Claudio. **Multiphase Flow Metering: Principles and Applications**. Elsevier B. V., 2009.
- GUIMARÃES, Alexandre de Almeida; SARAIVA, Antônio Mauro. **O Protocolo CAN: Entendendo e Implementando uma Rede de Comunicação Serial de Dados baseada no Barramento “Controller Area Network”**. 2002. Disponível em: <<http://www.alexag.com.br/artigos/sae2002.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2015.
- JAWOREK, A.; KRUPA, A. **Phase-shift detection for capacitance sensor measuring void fraction in two-phase flow**. Sensors and Actuators, v. 160, p. 78–86, 2010.
- KRON MEDIDORES. **Conceitos básicos de RS-485 e RS-422**. Disponível em: <[www.kronweb.com.br](http://www.kronweb.com.br)>. Acesso em: 5 jan. 2015.
- LINEAR TECHNOLOGY. **LTC485**: low power RS485 - interface transceiver. Disponível em: <<http://www.farnell.com/datasheets/25242.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2015.

MACHADO, Diogo Teixeira; HILDEBRANDO, Felipe Cainã Costa Lima; LIPINSKI, Leonardo. **Sistema multicanal de sensores resistivos para medição de escoamento bifásico**. Curitiba, 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MICROCHIP TECHNOLOGY. **Asynchronous Communications with the PICmicro USART**. 2003. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00774a.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2015.

MICROCHIP TECHNOLOGY. **MCP2551**. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21667f.pdf>>. Acesso em: 1 fev. 2015.

MICROCHIP. **MCP2551: interface controller area network**. Disponível em: <<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010405>>. Acesso em: 05 jan. 2015.

MICROCHIP. **PIC18F25K80 is a high performance 8-bit MCU with Integrated ECAN™**. Disponível em: <<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en550200>>. Acesso em: 05 jan. 2015.

PEREIRA, Fábio. **Microcontrolador PIC18 Detalhado**. São Paulo: Érica, 2010.

PERTENCE JÚNIOR, Antonio. **Amplificadores operacionais e filtros ativos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1988.

PETROBRAS. **Pré-sal**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>. Acesso em: 4 jan. 2014.

ROSS, Keith W.; KUROSE, James F. **Redes de computadores e a internet: uma abordagem top-down**. 5 ed. São Paulo: Pearson, 2010.

SOARES, Luiz Fernando Gomes; LEMOS, Guido; COLCHER, Sérgio. **Redes de computadores**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2003.

SOUZA, Amadeu V. **REDE CAN com PIC**. Minas Gerais: CERNE, 2011.

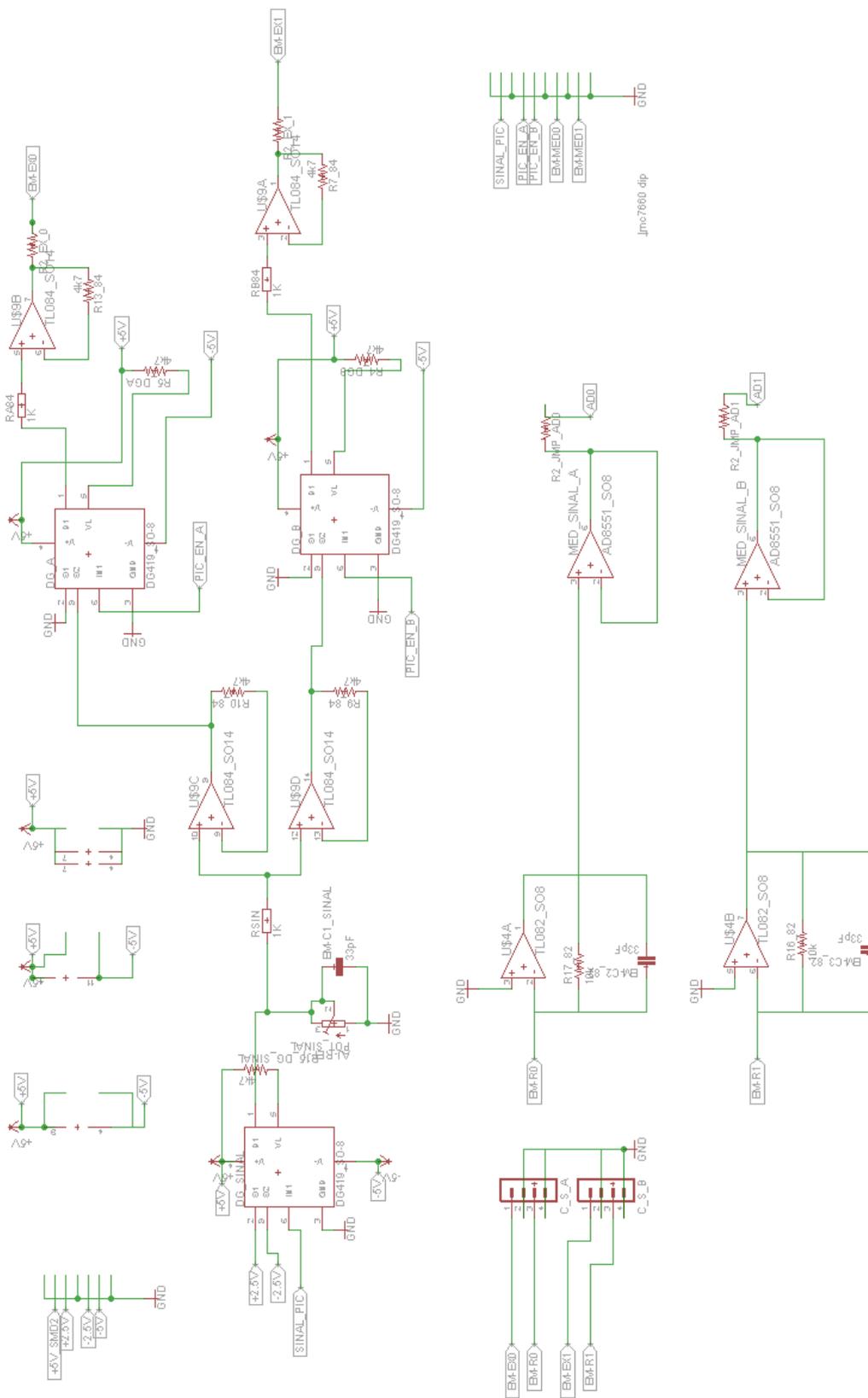
TEXAS INSTRUMENTS. **Half-duplex RS-485 transceiver**. Mar. 2007. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/slls612c/slls612c.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2015.

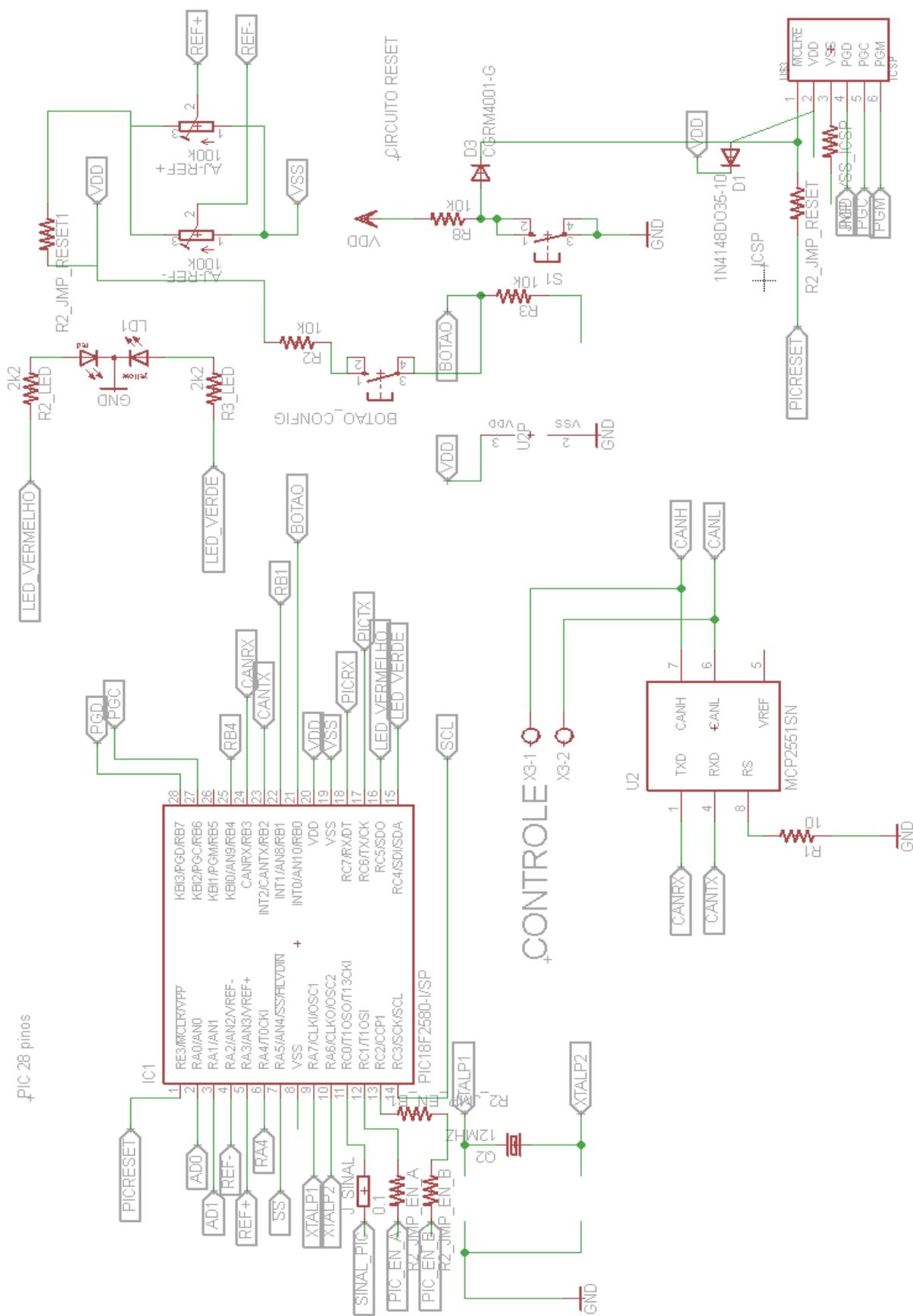
YANG, H.C.; KIM, D.K.; KIM, M.H. **Void fraction measurement using impedance method**. Flow Measurement and Instrumentation. v. 14, p. 151–160, 2003.

ZABARAS, G.; DUKLER, A. E. Vertical Upward Cocurrent Gas-Liquid Annular Flow. University of Houston, 1986.

## ANEXO A - CIRCUITO DO MÓDULO DE SENSOR RESISTIVO

### EXCITACAO E MEDICAO





# FONTES DE 5 E 2.5 VOLTS

