



Implementação de Instrumentação de Baixo Custo em Plantas de Medição de Nível em Série

Lucas Marques Ferreira

Projeto de Final de Curso

Orientadoras

Prof. Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

Prof. Andrea Valdman, D.Sc.

Julho de 2017

Implementação de Instrumentação de Baixo Custo em Plantas de Medição de Nível em Série

Lucas Marques Ferreira

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Raquel Massad Cavalcante, D.Sc.

Pedro Cabral Nin Ferreira, M.Sc.

Isabella Cristina Silva do Nascimento, Eng.

Orientado por:

Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

Andrea Valdman, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Julho de 2017

Ferreira, Lucas Marques.

Implementação de instrumentação de baixo custo em plantas de medição de nível em série./ Lucas Marques Ferreira. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2017.

vii, 84 p.; il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2017. Orientadoras: Rossana Odette Mattos Folly e Andrea Valdman.

1.Instrumentação 2. Baixo Custo. 3.Arduino 4. Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Rossana Odette Mattos Folly, Andrea Valdman I. Título.

“O caminho certo passa sobre uma corda esticada pouco acima do chão. Parece antes destinado a fazer com que as pessoas tropecem do que levá-las a um bom fim.”

Franz Kafka

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais que sempre me apoiaram em qualquer decisão que já quis tomar.

À minha namorada Carolina por me aturar por todos esses anos e sempre estar ao meu lado.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau Engenheiro Químico.

IMPLEMENTAÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO EM PLANTAS DE MEDIÇÃO DE NÍVEL EM SÉRIE

Lucas Marques Ferreira

Julho, 2017

Orientadoras: Prof. Rossana odette Mattos Folly, D.Sc.

Prof. Andrea Valdman, D.Sc.

Com o intuito de levar conhecimento prático aos alunos da Escola de Química da UFRJ, esse trabalho teve o objetivo de criar uma planta automatizada de medição de nível em série, fazendo uso de materiais de baixo custo e da plataforma Arduino. São abordados tópicos de Modelagem e de Instrumentação de Processos, que futuramente poderão ser visualizados e aplicados pelos alunos nesse projeto.

O Arduino foi utilizado como ponte de comunicação entre os sensores instalados e o sistema supervisor, fazendo uso da comunicação OPC. Esse trabalho explora o estabelecimento dessa comunicação e sua consistência.

Os sensores utilizados foram testados de forma a avaliar a viabilidade de se utilizar a plataforma Arduino em projetos de Instrumentação e Controle para a Engenharia Química, visto que essa plataforma não foi idealizada para ter grande robustez. Além disso, experimentos foram realizados para utilizar os dados provenientes das medições dos sensores instalados para modelar o próprio sistema.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XII
Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Objetivo do Trabalho	1
1.2 – Introdução e Motivação para o Trabalho	1
1.3 – Organização do Projeto	2
Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 – Instrumentação e Controle	3
2.2 – Instrumentação na Engenharia Química	4
2.2.1 – Sensores de Fluxo	4
2.2.2 – Sensores de Nível.....	10
2.3 – Modelagem de Processos Químicos.....	13
2.3.1 – Classificação dos Modelos.....	14
2.4 – Sistemas de Supervisão SCADA	14
2.5 – Arduino	15
Capítulo 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1 – Modelagem do Processo	18
3.1.1 – Modelagem dos Tanques	18
3.2 – Montagem do Sistema.....	25
3.3 – Arduino Uno.....	27
3.4 – Instrumentação Usada	28
3.4.1 – Sensor de Pressão MPX5010DP.....	28
3.4.2 – Sensor de Fluxo YF-S201	32
3.4.3 – Sensor Ultrassônico HC-SR04.....	34
3.5 – Instalação dos Sensores.....	36

3.5.1 – Instalação Elétrica.....	36
3.5.2 – Instalação Física.....	37
3.6 – Sistema Supervisório iFix	40
Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1 – Calibração e Avaliação dos Sensores.....	42
4.2 – Testes e Resultados	47
4.2.1 – Testes – Configuração Inicial	48
4.2.2 – Testes – Configuração Modificada	54
Capítulo 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES	66
5.1 – Sugestões Para Trabalhos Futuros	67
Capítulo 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
Anexo 1 – Código Usado no Arduino.....	70
Anexo 2 – Datasheet Sensor de Pressão MPX5010dp	73
Anexo 3 – Datasheet Sensor Ultrassônico HC-SR04	83
Anexo 4 – Datasheet Sensor de Fluxo YF-S201	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Placa de orifício, Tubo de Venturi e Tubo de Dall, respectivamente.....	5
Figura 2-2: Efeitos causados pela obstrução do fluxo, demonstrados num Tubo de Vari.	5
Figura 2-3: Uma Placa de Orifício e o efeito causado na pressão do sistema.....	6
Figura 2-4: Partes de um sensor de vazão do tipo turbina [4].	7
Figura 2-5: Princípio de funcionamento de um sensor de vazão ultrassônico por efeito Doppler [4].	8
Figura 2-6: Princípio de funcionamento de um sensor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito [4].....	9
Figura 2-7: Exemplo de um medidor flutuador que age sobre o cursor de um potenciômetro, retornando uma medição contínua [4]......	11
Figura 2-8: Exemplos de sensores instalados, no tanque aberto para atmosfera, instalado no fundo do tanque, no tanque fechado medindo a diferença de pressão entre a parte com e sem líquido [4].	11
Figura 2-9: Princípio de funcionamento de um sensor de nível ultrassônico [4]......	12
Figura 2-10: Exemplo de um sensor de nível por radiação instalado na parte externa de um tanque [4]......	13
Figura 2-11: Modelo matemático de um processo químico e suas variáveis.	14
Figura 2-12: Exemplo de modelos de Arduino, UNO e MEGA respectivamente.	15
Figura 2-13: Modelo alternativo ao Arduino, usado nesse projeto.	16
Figura 2-14: Alguns sensores e cabos usados no Arduino.	16
Figura 3-1: Diagrama P&ID representando o processo.....	17
Figura 3-2: Sistema sem interação.....	19
Figura 3-3: Sistema com interação.	22
Figura 3-4: Sistema visto por dois ângulos diferentes.....	26
Figura 3-5: caixa metálica usada para proteger o Arduino.....	27
Figura 3-6: Passo a passo para estabelecer a comunicação do Arduino via OPC.....	28
Figura 3-7: Sensor de pressão MPX5010dp, usado para medir o nível de água em cada tanque.	29
Figura 3-8: Relação da voltagem enviada e da pressão medida do sensor MPX5010dp [13].	29

Figura 3-9: Solução encontrada para usar o sensor MPX5010dp para medir níveis de água [9].	30
Figura 3-10: Visão frontal e lateral do sensor MPX5010dp, destacando as conexões elétricas e as entradas de pressão [13].	31
Figura 3-11: Sensor de fluxo YF-S201, usado para medir a vazão da bomba.	32
Figura 3-12: Relação entre o número de giros e a vazão do sensor YF-S201 [14].	33
Figura 3-13: Detalhe da conexão do sensor YF-S201 [14].	33
Figura 3-14: Sensor ultrassônico HC-SR04.	34
Figura 3-15: Princípio de medição do sensor HC-SR04.	36
Figura 3-16: Conexões entre os sensores e a placa do Arduino.	37
Figura 3-17: Sensor de fluxo acoplado à tubulação.	38
Figura 3-18: Detalhe do suporte criado para acomodar os sensores de pressão e o sensor ultrassônico.	39
Figura 3-19: Suporte de plástico recortado para manter o sensor ultrassônico no lugar.	39
Figura 3-20: Base de dados criada no iFix para o trabalho.	40
Figura 3-21: Tela criada no iFix, para monitoramento do processo em tempo real.	41
Figura 4-1: Avaliação do primeiro sensor de pressão, PT2001.	45
Figura 4-2: Avaliação do Segundo sensor de pressão, PT2002.	45
Figura 4-3: Avaliação do terceiro sensor de pressão, PT2003.	45
Figura 4-4: Avaliação do sensor ultrassônico instalado no segundo tanque.	46
Figura 4-5: Avaliação do Sensor de fluxo instalado.	47
Figura 4-6: Representação da configuração inicial do sistema.	49
Figura 4-7: Teste para medir a vazão de esvaziamento do tanque 1, na configuração inicial.	50
Figura 4-8: Teste para medir a vazão de esvaziamento do tanque 2, na configuração inicial.	50
Figura 4-9: Teste para medir a vazão de esvaziamento do tanque 3, na configuração inicial.	51
Figura 4-10: Zoom no gráfico do Tanque 1 quando o nível está alto.	53
Figura 4-11: Zoom no gráfico do Tanque 1 quando o nível está baixo.	53
Figura 4-12: Nova configuração do sistema após mudanças.	55
Figura 4-13: Teste para medir a nova vazão de esvaziamento do Tanque 1.	55
Figura 4-14: Teste para medir a nova vazão de esvaziamento do Tanque 2.	56
Figura 4-15: Teste para medir a nova vazão de esvaziamento do Tanque 3.	56

Figura 4-16: Zoom no novo gráfico do Tanque 1 quando o nível está alto.	57
Figura 4-17: Zoom no novo gráfico do Tanque 1 quando o nível está baixo.....	57
Figura 4-18: Novo posicionamento dos sensores após um dos sensores de pressão parar de funcionar.	59
Figura 4-19: Degrau aplicado na vazão.....	60
Figura 4-20: Detalhe do degrau aplicado na vazão.	60
Figura 4-21: Resposta do Tanque 1 ao degrau aplicado na vazão de entrada, medida pelo sensor de pressão PT2003.....	61
Figura 4-22: Resposta do Tanque 1 ao degrau aplicado na vazão de entrada, medida pelo sensor ultrassônico LT2001.....	61
Figura 4-23: Resposta do Tanque 2 ao degrau aplicado na vazão, medida pelo sensor de pressão PT2002.	62
Figura 4-24: Detalhe da resposta do Tanque 1 ao degrau aplicado, medida pelo sensor de pressão PT2003.....	63
Figura 4-25: Detalhe da resposta do Tanque 2 ao degrau aplicado, medida pelo sensor PT2002.	63
Figura 4-26: Estimação dos parâmetros dos tanques 1 e 2 a partir dos dados obtidos no Teste 2.	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Erro de aferição do sensor de pressão instalado no Tanque 1	42
Tabela 2: Erro de aferição do sensor de pressão instalado no Tanque 2	43
Tabela 3: Erro de aferição do sensor ultrassônico instalado no Tanque 2.	43
Tabela 4: Erro de aferição do sensor de pressão instalado no Tanque 3.	44
Tabela 5: Vazões calculadas a partir do Teste 1	52
Tabela 6: Faixa de vazão de operação do sistema, na configuração inicial	53
Tabela 7: Novas vazões médias após diminuição da altura do sistema.....	56
Tabela 8: Nova faixa de operação calculada.	58

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Objetivo do Trabalho

O objetivo principal deste trabalho é criar uma planta automatizada de baixo custo a ser utilizada nas disciplinas de Modelagem, Instrumentação e Controle de Processos, permitindo o desenvolvimento de práticas relacionadas a estas disciplinas pelos alunos da Escola de Química da UFRJ.

Nela serão testados e avaliados diferentes tipos de sensores de baixo custo provenientes da plataforma Arduino, em comunicação com o sistema supervisor. A utilização dessa planta automatizada permitirá o estudo da modelagem empírica do processo e determinação de parâmetros de controle.

1.2 – Introdução e Motivação para o Trabalho

Atualmente pode-se dizer que existe uma disparidade entre o que é ensinado nos cursos de Engenharia Química e o que é efetivamente requerido pela indústria, tendência que foi observada nos Estados Unidos e provavelmente pode ser vista no Brasil e em outros lugares do mundo [1]. Muitos cursos de Engenharia Química tendem a dar um foco maior na parte teórica, negligenciando a parte prática por motivos diversos. Isso pode vir a se tornar um problema real quando o engenheiro recém-formado tem seu primeiro contato com a indústria.

Em uma entrevista feita com engenheiros já formados que trabalham em grandes empresas químicas, como a Dow Chemical, uma das principais reclamações foi a falta de familiaridade dos engenheiros recém-formados com muitos dos equipamentos usados na Engenharia Química. Os estudantes muitas vezes nunca tiveram um contato direto com bombas, trocadores de calor e colunas de destilação [1], equipamentos usados no dia a dia de uma fábrica química.

Esse estudo reforça a necessidade de que os profissionais recém-formados tenham não só um bom entendimento das matérias chave da Engenharia Química, mas também uma vivência e familiaridade com a parte prática.

Com isso em mente, esse projeto tem por objetivo dar aos alunos de Engenharia Química na UFRJ uma oportunidade de contato com um ambiente mais prático, no qual seja possível visualizar e aplicar o conhecimento teórico aprendido em sala em um projeto real. Daí surgiu a ideia de se criar uma mini planta automatizada de tanques de

nível, fazendo uso da plataforma Arduino. Apesar do Arduino não apresentar uma grande robustez, ele se destaca pelo seu baixo custo e por apresentar uma ampla gama de sensores à sua disposição. Utilizando materiais de baixo custo na sua produção, os alunos conseguiriam observar como o nível de um sistema se comporta frente a perturbações diversas, e poderiam se familiarizar com alguns sensores de medição e com um sistema supervisório.

Na planta estariam implementados sensores para a medição de nível e de fluxo, conectados a um sistema supervisório que permitisse visualizar todo o comportamento do sistema em tempo real na tela de um computador. Nela seria possível observar e aplicar conhecimentos de modelagem, instrumentação e controle de processos.

1.3 – Organização do Projeto

Esse trabalho foi dividido da seguinte maneira, visando facilitar o entendimento do que foi feito:

- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica, no qual são apresentados alguns dos conceitos utilizados aqui, desde a modelagem de processos até o uso e a importância dos sensores na indústria química, além de abordar de uma forma rápida a plataforma Arduino e o sistema de supervisão SCADA.
- Capítulo 3 – Materiais e Métodos, no qual está descrita toda a montagem do processo, os sensores utilizados e sua instalação no sistema, a criação da tela de supervisão e também a modelagem inicial do processo.
- Capítulo 4 – Resultados e Discussão, no qual estão descritos os testes feitos no sistema, os resultados obtidos e também a avaliação de cada sensor.
- Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para melhorar esse projeto.

Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Instrumentação e Controle

Durante sua operação, uma planta química deve satisfazer uma série de requerimentos, enquanto está sujeita a sofrer diversas influências externas. Dentre os requerimentos, pode-se destacar [2]:

- **Segurança:** o requerimento mais básico e importante em qualquer processo químico. Para garantir a segurança durante o funcionamento, as temperaturas, pressões e concentrações de operação devem ser sempre monitoradas e mantidas dentro da faixa de segurança.
- **Especificação do Produto:** o produto final deve apresentar a especificação desejada. Para isso as condições do processo devem estar sendo monitoradas de forma a otimizar a produção e garantir a qualidade.
- **Leis Ambientais:** a planta química deve obedecer às leis ambientais locais. Isso implica que os efluentes e os gases gerados também devem ser monitorados, e, se necessário, medidas corretivas devem ser tomadas.

Com a competição se tornando cada vez mais acirrada no cenário da indústria química, e processos se tornando mais complexos de se operar, torna-se vantajosa a utilização de um sistema de controle automático para manutenção das condições ótimas de operação [3]. Dentre as vantagens de se utilizar um sistema de controle automático, estão:

- Otimizar a performance de processos químicos;
- Melhorar a segurança dos processos químicos;
- Garantir a qualidade e especificação do produto;
- Aumentar a eficiência e diminuir custos;
- Minimizar efeitos de distúrbios no processo.

De uma forma bastante simples, sistemas de controle têm por objetivo manter estáveis algumas variáveis do processo (variáveis controladas), através da manipulação de outras variáveis (variáveis manipuladas) [3]. Para o bom funcionamento de um sistema de controle, além de uma boa modelagem matemática, ele deve receber leituras precisas das variáveis controladas e manipuladas, para poder comparar com os valores

base (*set points*) e tomar as ações corretivas adequadas. Na Engenharia Química, um sistema de controle eficiente inevitavelmente precisa de instrumentos de medição precisos e robustos, para garantir seu funcionamento sob as mais diversas condições de temperatura, pressão, pH, etc. Uma planta química que busque competitividade não opera sem um sistema de controle, que, por sua vez, não opera sem instrumentos de medição.

2.2 – Instrumentação na Engenharia Química

Como sensores são de grande importância para qualquer Engenharia, em especial para a Engenharia Química, serão apresentados alguns dos principais tipos de instrumentos de medição usados na Indústria Química para medição de nível e de vazão, incluindo os que serão utilizados nesse trabalho.

2.2.1 – Sensores de Fluxo

O fluxo é uma das variáveis mais utilizadas na Indústria Química como variável medida. A maneira como fluxo é medido irá depender se o fluxo é de um sólido, de um líquido, ou de um gás. Para o caso de sólidos, o mais apropriado é fazer a medição da taxa de massa de sólido por unidade de tempo. Já para líquidos e gases, a medição normalmente é feita em termos de volume por unidade de tempo [4].

Existe uma gama bastante ampla de sensores para realizar a medição do fluxo de um líquido. A escolha do medidor de fluxo ideal depende de vários fatores. Devem ser consideradas a temperatura de operação, pressão do fluido, viscosidade e densidade, corrosividade do sistema, presença de partículas no fluido, etc. Essas características do sistema irão levar a um grupo seletivo de sensores possíveis. O próximo passo é analisar a precisão requerida, a perda de carga máxima aceitável, a faixa de operação do sensor, e finalmente o custo [4].

Os principais sensores de fluxo para líquidos e seus respectivos princípios de medição estão apresentados de forma resumida a seguir:

2.2.1.1 – Sensores de Medição por Diferença de Pressão

A medição por diferença de pressão envolve a adição de algum instrumento na tubulação do fluido que cause uma obstrução, gerando uma diferença de pressão entre

cada um dos lados. Alguns exemplos de instrumentos usados para obstrução são a Placa de Orifício, o Tubo de Venturi e o Tubo de Dall.



Figura 2-1: Placa de orifício, Tubo de Venturi e Tubo de Dall, respectivamente [4].

Esses instrumentos são populares na indústria por não possuírem partes móveis e serem bastante robustos, de fácil manutenção, e serem produzidos em diversos diâmetros. Em compensação, a obstrução inserida gera uma perda de carga permanente no processo, sendo algumas vezes necessária a adição de uma bomba auxiliar para recuperar a carga perdida durante a medição [4].

A adição da restrição de fluxo à tubulação faz com que a velocidade do fluido nessa região aumente, e a pressão diminua. O fluxo é proporcional à raiz quadrada da diferença de pressão medida.



Figura 2-2: Efeitos causados pela obstrução do fluxo, demonstrados num Tubo de Vari [4].

Naturalmente, para a medição do fluxo por diferença de pressão, além de uma obstrução, são necessárias duas tomadas de pressão, uma antes da obstrução, e uma logo depois. Essas tomadas de pressão podem ser feitas usando dois sensores para a medição ou apenas um único sensor que meça a diferença de pressão entre dois pontos. Ao se utilizar dois sensores, o ideal é que sejam iguais para minimizar qualquer erro de medição [4]. O ponto onde as tomadas de pressão devem ser feitas também é importante. Como pode-se observar na Figura 2-3, o ponto de medição P1 deve estar

antes o suficiente da obstrução para que não meça os efeitos causados por ela na pressão do fluido; enquanto que o ponto de medição P2 deve estar pouco depois da obstrução, aonde a menor pressão pode ser observada.

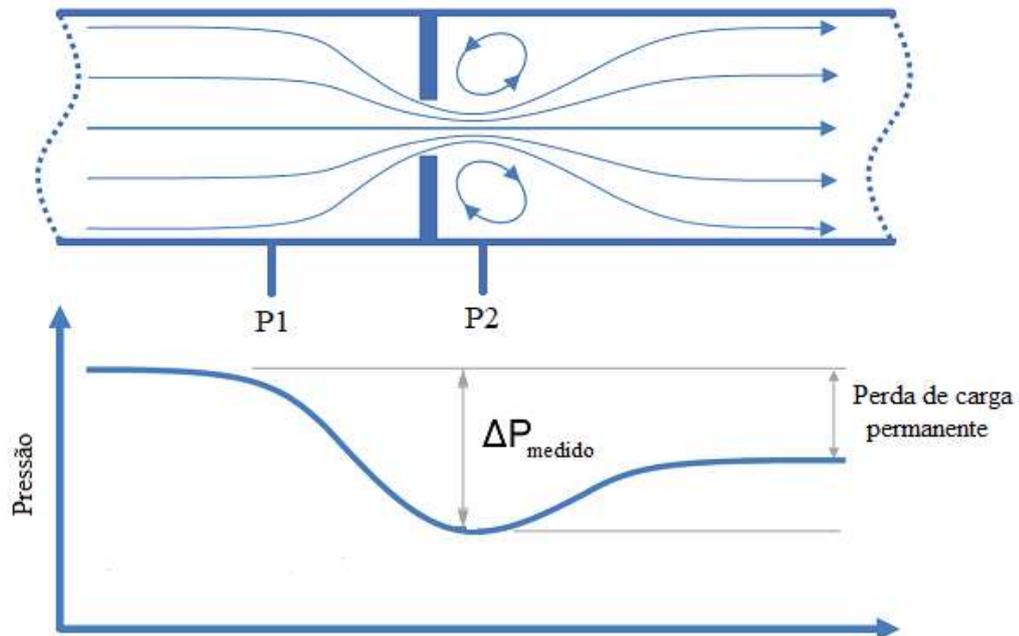


Figura 2-3: Uma Placa de Orifício e o efeito causado na pressão do sistema [4].

Os erros envolvidos nas medições com esse tipo de sensor variam de 1% a 2%. E a perda de carga gerada por eles vai depender da forma da obstrução, mas pode chegar a 90% da diferença de pressão, em magnitude, para placas de orifício.

Um cuidado que deve ser tomado para que esse método de medição funcione corretamente é garantir que, após a obstrução, o fluxo atinja condições estacionárias. Como regra base, pede-se um comprimento mínimo de dez vezes o diâmetro do tubo após a obstrução [4].

A escolha da faixa de operação adequada nesse tipo de instrumento é de extrema importância, visto que a relação entre o fluxo e a diferença de pressão envolve uma raiz-quadrada. Conforme a diferença de pressão for ficando menor, o erro na medição do fluxo pode tornar-se extremamente grande em comparação com o próprio valor do fluxo. Sendo assim, a recomendação é que esse tipo de sensor só trabalhe com vazões de 30% até 100% da sua faixa de operação [4].

2.2.1.2 – Sensores do Tipo Turbina

Um sensor do tipo turbina consiste em uma estrutura em forma de hélice colocada na tubulação, paralela à direção do escoamento do fluido. O fluido passa pelas hélices e faz com elas rodem com uma velocidade diretamente proporcional ao fluxo de fluido que passa por elas. As hélices das turbinas são construídas a partir de um material ferromagnético, e um ímã é fixado ao sensor, de forma que cada vez e a hélice girar, um pulso é gerado. Fazendo a contagem dos pulsos é possível estimar a vazão de fluido.

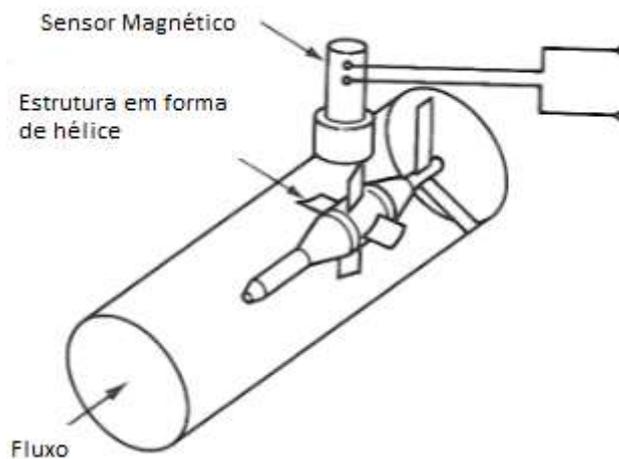


Figura 2-4: Partes de um sensor de vazão do tipo turbina [4].

A precisão na medição desses tipos de sensores pode chegar a 0,1%. Esse tipo de sensor é altamente sensível à presença de partículas ou bolhas no fluido, podendo gerar erros bastante grandes. Portanto, apesar de mais precisos, ainda é mais seguro usar sensores de medição por diferença de pressão, por serem mais robustos e sofrerem menos influências externas [4].

2.2.1.3 – Sensores do Tipo Ultrassônicos

O método de medição ultrassônico é um método não invasivo, sendo particularmente útil na medição do fluxo de fluidos corrosivos ou lamacentos, que utiliza ondas ultrassônicas para medir a vazão de um líquido. A grande vantagem desse tipo de sensor é que ele fica acoplado externamente à tubulação, diminuindo custos de instalação e manutenção, e não gerando nenhum tipo de perda de carga. Além disso, o sensor não entra em contato direto com o fluido, diminuindo os efeitos de corrosão e preservando-o. Na indústria farmacêutica, para a produção de uma droga, um sensor

externo que não tenha contato com o fluido evita possíveis contaminações ao produto [4].

Existem dois tipos de sensores ultrassônicos para a medição da vazão de um líquido. Cada um deles utiliza uma tecnologia diferente, e são usados em situações diferentes.

- Medidores de Vazão Ultrassônicos por Efeito Doppler

Esses medidores utilizam como princípio de funcionamento o Efeito Doppler, que diz que as frequências das ondas sonoras recebidas por um observador dependem do movimento da fonte ou do observador em relação à fonte do som. Esse instrumento consiste basicamente de um par transmissor/receptor ultrassônico, que são acoplados na parte externa da tubulação [4]. Uma representação desses sensor pode ser observada na Figura 2-5.

Para que esse sensor funcione corretamente, é necessária a presença de partículas sólidas ou de bolhas no fluido, elementos capazes de defletir o feixe ultrassônico enviado pelo sensor. O sensor mede a velocidade de deslocamento das partículas, que é linearmente proporcional à vazão. Esse valor é multiplicado pelo diâmetro interno do tubo para se obter a vazão volumétrica.

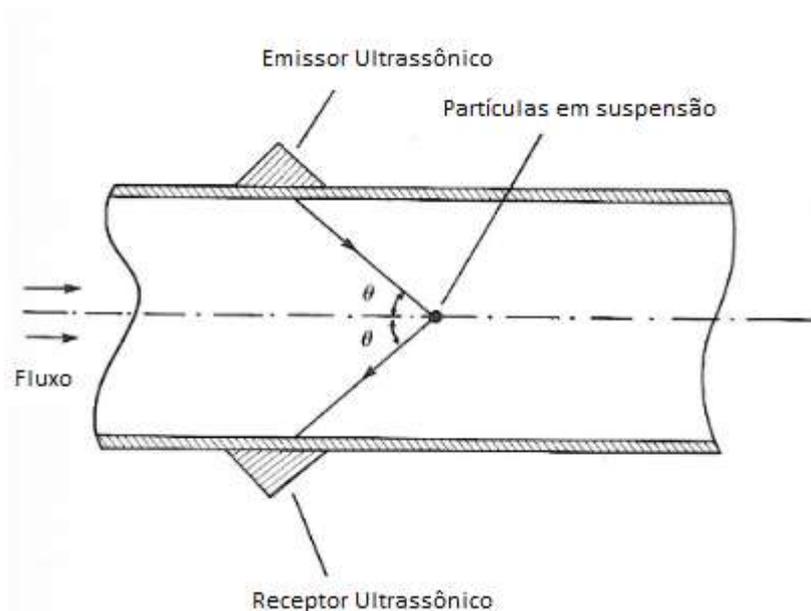


Figura 2-5: Princípio de funcionamento de um sensor de vazão ultrassônico por efeito Doppler [4].

A parte eletrônica desse sensor é relativamente simples e barata, consistindo em transmissores e receptores ultrassônicos.

Como a medição desse sensor depende da presença de partículas em suspensão, a precisão é afetada pelo tamanho e distribuição das partículas, perfil de escoamento e até mesmo a espessura da parede da tubulação. Os erros de medição podem chegar a 10%, por isso, muitas vezes esse sensor é usado apenas como indicador de vazão, deixando as medições mais precisas para outros tipos de sensores [4].

- Medidores de Vazão Ultrassônicos por Tempo de Trânsito

Esses sensores são projetados para medir a vazão volumétrica de fluidos límpidos ou gases. O sensor é formado por um par de transdutores ultrassônicos, que são capazes de emitir e receber ondas ultrassônicas, acoplados na parte externa da tubulação formando um ângulo θ . A Figura 2-6 mostra uma representação de um sensor desse tipo.

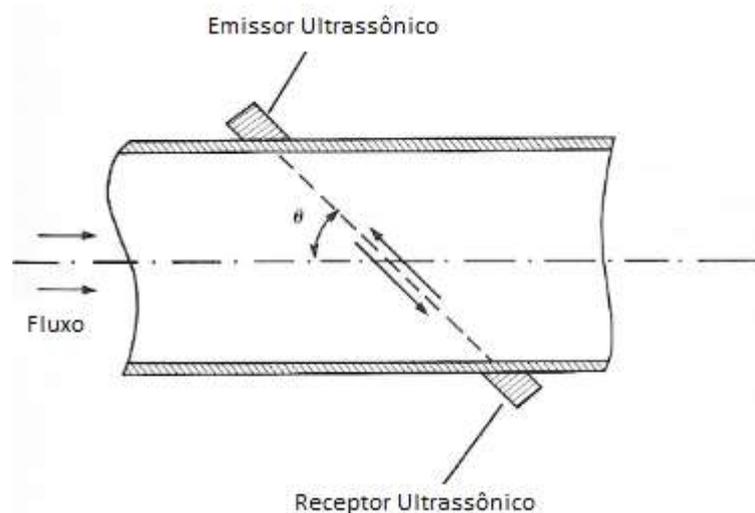


Figura 2-6: Princípio de funcionamento de um sensor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito [4].

O sensor mede o efeito que a velocidade do fluido tem sobre o tempo que a onda ultrassônica enviada pelos transdutores leva para percorrer o trajeto. Se não houver fluido na tubulação, o tempo que a onda ultrassônica leva para percorrer o trajeto de ida e de volta é o mesmo. Porém, se houver fluido escoando pela tubulação, a onda que estiver viajando no mesmo sentido do fluido chegará mais rápido que a que está viajando em sentido contrário ao escoamento [4]. Normalmente, a diferença fica por volta de 100 ns, por isso a parte eletrônica desse sensor precisa ser de alta precisão.

Esse tipo de sensor ultrassônico requer que o fluido a ser medido apresente a menor quantidade de partículas e bolhas, para evitar a deflexão da onda ultrassônica.

Sua precisão depende de fatores como o diâmetro do tubo e presença de material particulado, podendo chegar a 0,5% de erro em condições ótimas [4]. Apesar de ser mais caro, esse tipo sensor é mais usado que os sensores por Efeito Doppler, por apresentar todas as vantagens de um medidor de vazão ultrassônico e uma maior precisão.

2.2.2 – Sensores de Nível

Sensores de nível são extensamente usados pela indústria química, e uma grande variedade de instrumentos de medição de nível está disponível no mercado [4]. A medição do nível de um tanque pode ser bastante simples, inserindo uma barra graduada no tanque por exemplo. Porém, a nível industrial é necessário que os sensores de nível gerem um sinal que possa ser enviado para um sistema de controle ou apenas para monitoramento. A escolha do melhor sensor de nível deverá levar em consideração diversos fatores, como: se a medição do nível é de um fluido ou de um sólido, as condições de temperatura e pressão que o sensor ficará exposto, a necessidade de se medir o nível continuamente ou não, o nível de precisão requerido, etc.

Alguns dos sensores de nível usados na indústria química estão apresentados a seguir:

2.2.2.1 – Medidores Flutuadores

Um dos métodos mais simples e baratos de se medir o nível de um tanque é utilizando um elemento flutuador conectado a um instrumento fixo. Conforme o nível do líquido muda, o flutuador muda sua posição em relação ao instrumento fixo, podendo abrir ou fechar um circuito elétrico, ou agir sobre o cursor de um potenciômetro para medidas contínuas. É um medidor comumente usado para medir o nível de combustível em veículos. A Figura 2-7, mostrada a seguir, é uma representação de um medidor flutuador que utiliza um potenciômetro para fazer uma medição contínua.

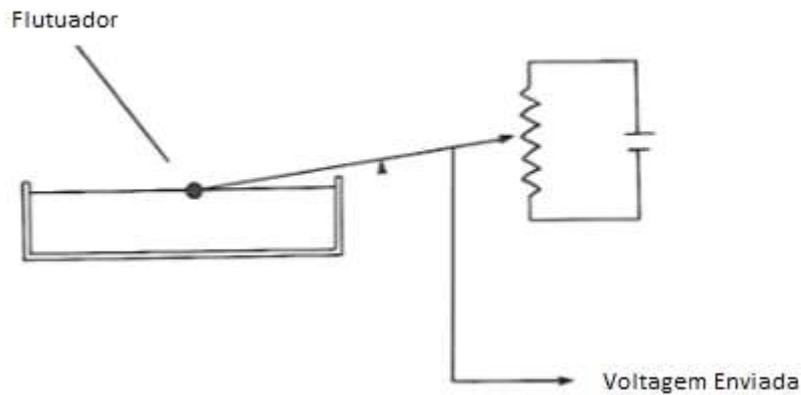


Figura 2-7: Exemplo de um medidor flutuador que age sobre o cursor de um potenciômetro, retornando uma medição contínua [4].

Apesar de ser um medidor de baixo custo, o flutuador está sempre em contato com o fluido, não sendo recomendado o uso se o fluido for corrosivo.

2.2.2.2 – Medidores por Pressão Hidrostática

Esse sensor mede a pressão hidrostática do fluido em um determinado ponto, que é diretamente proporcional à altura do fluido acima daquele ponto. É necessário saber a densidade do líquido para se calcular corretamente a pressão hidrostática, por isso esse tipo de sensor pode ser problemático de se usar em soluções ou misturas líquidas, nas quais a densidade é desconhecida. Além disso, a densidade é uma função da temperatura, e para uma medição mais precisa pode ser necessário medir a temperatura do fluido também [4]. A seguir, na Figura 2-8, estão representados alguns sensores de pressão:

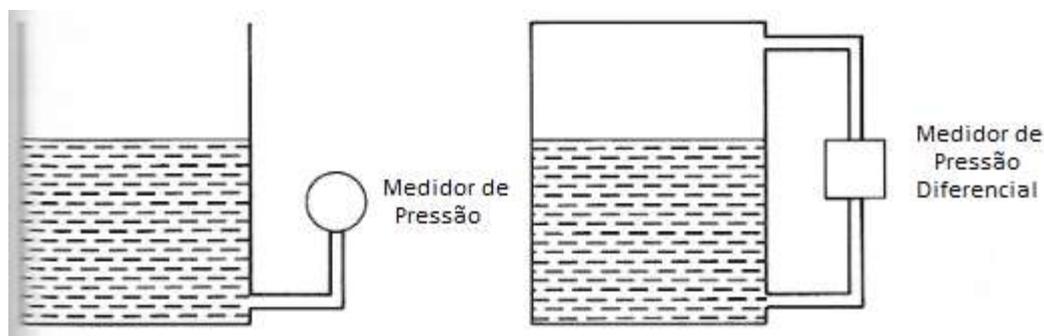


Figura 2-8: Exemplos de sensores instalados, no tanque aberto para atmosfera, instalado no fundo do tanque, no tanque fechado medindo a diferença de pressão entre a parte com e sem líquido [4].

2.2.2.3 – Medidores Ultrassônicos

Sensores ultrassônicos também podem ser usados para medir nível. Um emissor e receptor de ondas ultrassônicas é fixado acima da superfície do líquido. As ondas enviadas são refletidas pela superfície do líquido e são captadas pelo receptor. O nível pode ser medido com base no tempo decorrido entre a emissão e a recepção da onda ultrassônica. Na Figura 2-9 é possível visualizar o esquema de funcionamento de um sensor ultrassônico de distância.

A temperatura afeta a velocidade das ondas ultrassônicas no ar em uma razão de $0,607 \text{ m}/(\text{s}^\circ\text{C})$, por isso esse sensor precisa ser calibrado se for operar em temperaturas elevadas [4].

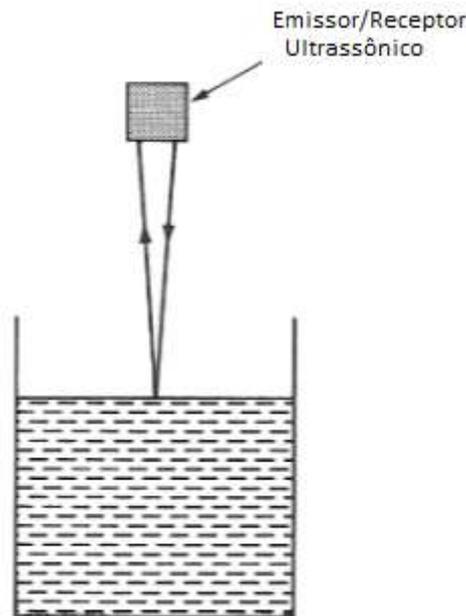


Figura 2-9: Princípio de funcionamento de um sensor de nível ultrassônico [4].

2.2.2.4 – Medidores por Radiação

O método de medição de nível por radiação é um método com custo elevado, que consiste na emissão e absorção de radiação através do fluido por um ou mais emissores e receptores. A absorção dos raios gama e beta variam de acordo com a quantidade de fluido presente, sendo assim, a radiação absorvida é uma função do nível.

Uma vantagem desses sensores é que eles podem ser acoplados externamente ao tanque. Em compensação, por emitirem radiação, uma série de medidas de segurança

devem ser tomadas. Na Figura 2-10 a seguir, é possível observar o princípio de medição de nível de um sensor por radiação.

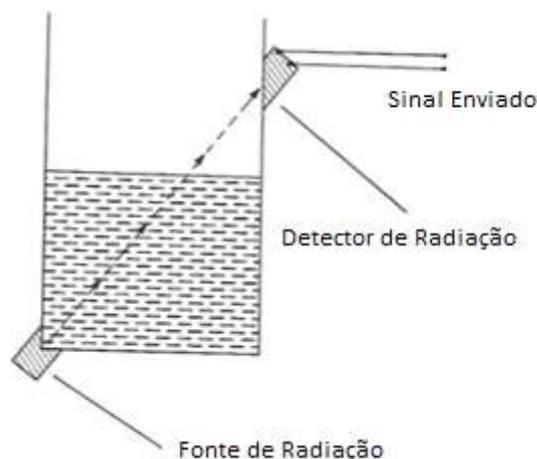


Figura 2-10: Exemplo de um sensor de nível por radiação instalado na parte externa de um tanque [4].

2.3 – Modelagem de Processos Químicos

A modelagem tem por objetivo criar um modelo matemático que represente o processo real através da descrição do processo químico por equações matemáticas que representem os fenômenos químicos e físicos que acontecem no sistema real. Modelos matemáticos podem ser usados em todas as etapas da Engenharia Química, do desenvolvimento à operação da planta, auxiliando na compreensão do processo [5]. Além disso, modelos matemáticos diminuem a necessidade de se fazer experimentos, podendo ser usados como alternativa para prever o comportamento dinâmico ou estacionário do processo.

Para se modelar um sistema, é necessário escolher quais Variáveis Dependentes Fundamentais descrevem o sistema. Normalmente, para sistemas químicos, são usadas apenas três: massa, energia e momento. Muitas vezes essas variáveis não são facilmente mensuráveis, e torna-se mais conveniente usar outras variáveis que permitem medir as Variáveis Dependentes Fundamentais: vazão, densidade, concentração, pressão e temperatura. Esse segundo grupo de variáveis são denominadas Variáveis de Estado [2].

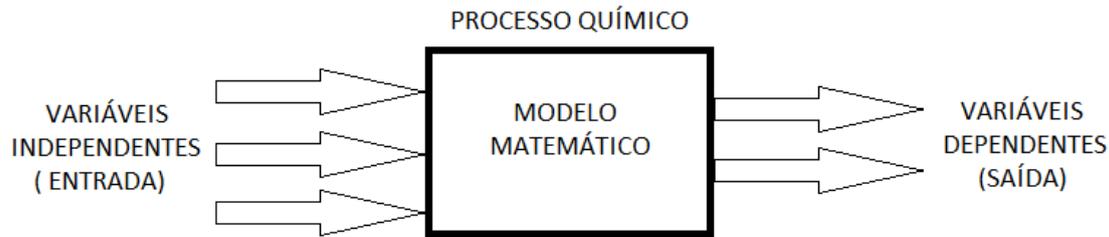


Figura 2-11: Modelo matemático de um processo químico e suas variáveis.

2.3.1 – Classificação dos Modelos

Os modelos podem ser criados a partir de duas abordagens distintas, a fenomenológica e a empírica.

- Modelagem Fenomenológica:

A modelagem fenomenológica busca descrever o sistema utilizando os princípios básicos da conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento, levando em consideração os fenômenos envolvidos no processo.

- Modelagem Empírica:

Na modelagem empírica, os mecanismos de causa-efeito entre as variáveis de entrada e de saída do processo são desconhecidos, e a correlação entre elas é feita através de dados experimentais. É necessário ter acesso aos equipamentos físicos do processo para a realização de experimentos.

2.4 – Sistemas de Supervisão SCADA

A sigla SCADA significa “*Supervisory Control and Data Acquisition*”, e se refere a uma tecnologia na qual o usuário consegue coletar dados de unidades distantes, e enviar instruções de controle para esses locais. A grande vantagem do sistema SCADA é permitir que o operador consiga monitorar alarmes, coletar dados de sensores, abrir e fechar válvulas ou fazer mudanças no *set-point* de um controlador de uma sala de controle, sem a necessidade de se locomover até a localização física desejada [6].

Os benefícios de se utilizar um sistema SCADA se tornam ainda mais evidentes em processos muito grandes, que se estendem por grandes áreas, reduzindo os custos de

visitas desnecessárias e agilizando o envio de um comando desejado [6]. Mas qualquer processo de qualquer tamanho pode se beneficiar do uso de um sistema supervisor, mesmo que seja apenas para monitoramento.

Um exemplo de aplicação da tecnologia SCADA na indústria química seria na indústria de óleo e gás, na qual os equipamentos ficam espalhados por uma área muito extensa na planta, e o processo precisa estar sempre sendo monitorado pelos operadores, requerendo quase sempre controles simples, como ligar ou desligar uma bomba, ou abrir e fechar uma válvula. A instalação do sistema SCADA nesse caso faz com que todas essas atividades possam ser feitas pela sala de controle, poupando tempo e esforço dos operadores [6].

2.5 – Arduino

O Arduino é uma plataforma eletrônica “open-source” bastante simples e de baixo custo, criado inicialmente com o intuito de ser usado em projetos interativos do meio acadêmico. Por essas características, o Arduino acabou conquistando um grande público, e hoje é uma plataforma eletrônica bastante conhecida e altamente difundida.

Além do seu baixo custo e da sua linguagem simples de programação, existe um grande número de projetos disponível online, de fácil consulta, e, somado a isso, o fórum/comunidade do Arduino é bastante movimentado, sendo fácil tirar dúvidas ou encontrar tutoriais.

Uma placa de Arduino é basicamente constituída por um chip microcontrolador, entradas analógicas e digitais, e uma saída com conexão USB. As instruções enviadas para o microcontrolador são programadas em uma linguagem simples e bastante conhecida (C++ com pequenas modificações), usando o software do Arduino (Arduino IDE), e enviadas via USB para a placa. Existem diversos modelos de Arduino à venda, com diferentes números de entradas/saídas digitais e analógicas

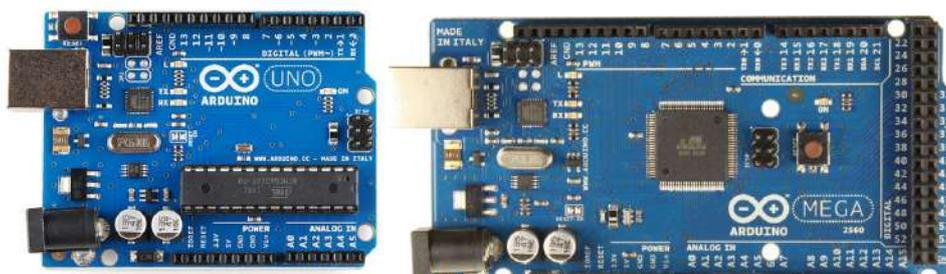


Figura 2-12: Exemplo de modelos de Arduino, UNO e MEGA respectivamente.

Por ter se difundido bastante no mercado, existem também diversas réplicas à venda. Apesar de fazerem exatamente a mesma coisa que o original, as réplicas fazem uso de drivers diferentes, muitas vezes não tão fáceis de serem encontrados, dificultando o estabelecimento da comunicação do Arduino com o computador.

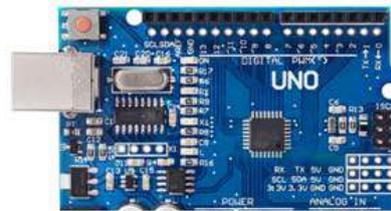


Figura 2-13: Modelo alternativo ao Arduino, usado nesse projeto.

A versatilidade do seu uso é imensa. O Arduino pode ser usado para simplesmente acender uma luz de LED, mas também pode ser usado em projetos bem mais complexos, controlando um robô ou agindo como controlador de um processo químico. Somando isso ao fato de que é possível adquirir uma placa de Arduino e um grande número de sensores por valores relativamente baixos, o Arduino se torna uma opção interessante para ser usado em projetos escolares e/ou universitários.



Figura 2-14: Alguns sensores e cabos usados no Arduino.

Capítulo 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto desenvolvido nesse trabalho consiste em uma planta composta por 3 tanques em série, um acima do outro, com pelo menos um sensor de nível instalado em cada um deles. Um quarto balde é usado para captar a água usada e permitir um reciclo, evitando desperdícios. Uma bomba foi adicionada para levar a água desse quarto balde de volta ao primeiro tanque, e um sensor de fluxo foi instalado logo em seguida para medir a vazão da bomba. Todas as válvulas usadas no sistema são manuais. Os sensores utilizados são todos conectados ao Arduino, que por sua vez está conectado ao sistema supervisório iFIX, no qual é possível monitorar o processo em tempo real. A Figura 3-1 ilustra o sistema:

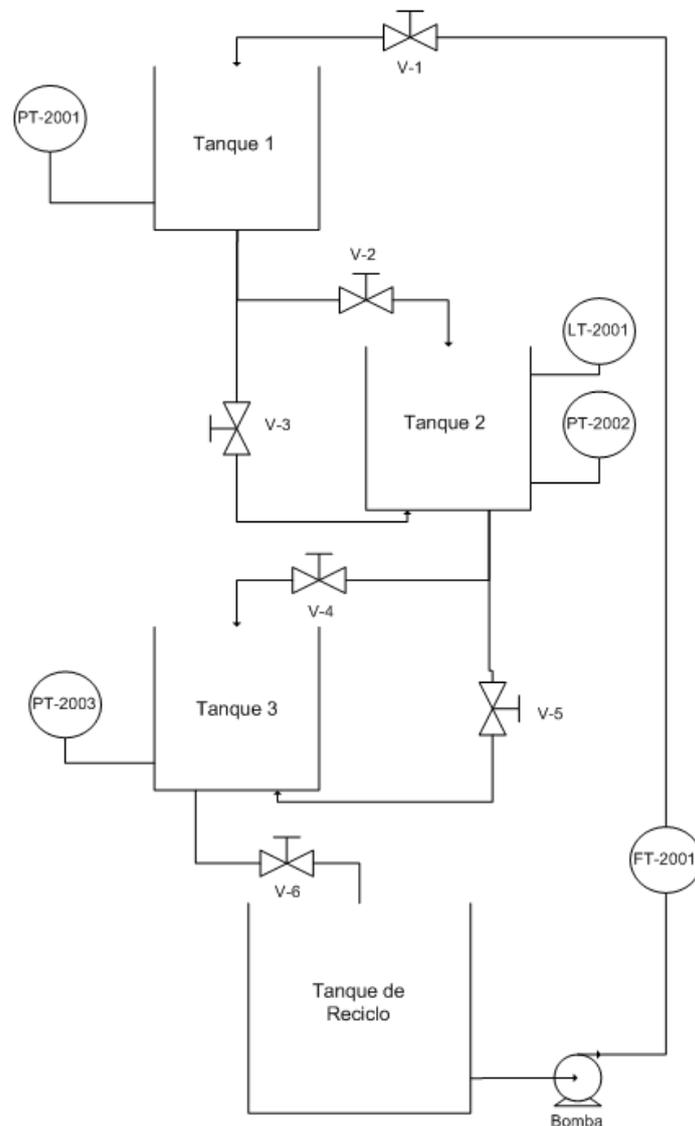


Figura 3-1: Diagrama P&ID representando o processo.

Inicialmente, o projeto foi idealizado com o Arduino agindo também como um controlador de nível, atuando no sistema por meio de uma válvula de controle. Porém, não foi possível obter uma válvula de controle, e o projeto passou a ter um foco maior na parte de instrumentação, avaliando os sensores instalados.

3.1 – Modelagem do Processo

A modelagem se faz necessária para que se possa entender o processo e para se projetar um controlador apropriado. Com o balanço de massa em cada tanque busca-se entender como a vazão inicial F_0 afeta a altura de líquido nos tanques, para que assim o controlador possa atuar de forma efetiva sobre essa vazão para controlar o nível dos tanques.

Lista de Variáveis usadas:

- A – Área da seção transversal do tanque (cm^2)
- F – Vazão de entrada ou saída nos tanques (cm^3/s)
- h – Altura da coluna d'água no tanque (cm)
- M – Massa de água no tanque (g)
- R – Resistência característica da válvula na saída de cada tanque [$\text{cm}/(\text{cm}^3/\text{s})$]
- V – Volume de água no tanque (cm^3)
- ρ – Densidade da água (g/cm^3)

3.1.1 – Modelagem dos Tanques

Serão consideradas duas condições de alimentação para os tanques de nível utilizados: Alimentação superior, gerando um sistema sem interação e alimentação inferior, gerando um sistema com interação. Além disso, a vazão de saída de cada tanque será considerada proporcional a altura do tanque em questão, e inversamente proporcional à resistência da válvula.

1. Modelagem do Sistema sem interação, como ilustrado na Figura 3-2:

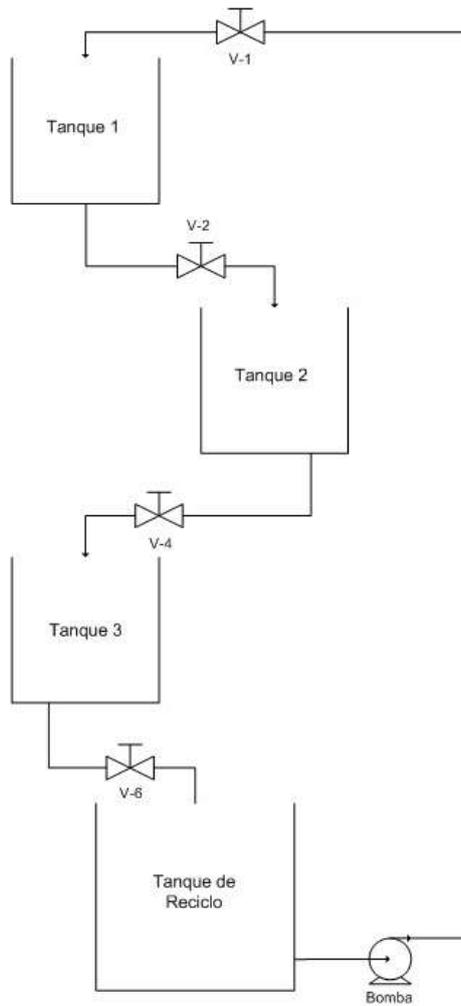


Figura 3-2: Sistema sem interação.

- Balanço de Massa no Tanque 1:

$$\frac{dM_1(t)}{dt} = \rho F_0(t) - \rho F_1(t)$$

$$\rho \frac{dV_1}{dt} = \rho F_0 - \rho F_1$$

$$\frac{dV_1}{dt} = F_0 - F_1$$

$$A \frac{dh_1}{dt} = F_0 - \frac{h_1}{R}$$

$$A \frac{dh_1}{dt} + \frac{h_1}{R} = F_0 \quad (1)$$

Transformando em Variáveis Desvio:

No estado estacionário:

$$0 + \frac{h_{1SS}}{R} = F_{0SS} \quad (2)$$

Subtraindo as equações (1) e (2), obtemos o Balanço de Massa em Variáveis Desvio:

$$A \frac{dh'_1(t)}{dt} + \frac{h'_1(t)}{R} = F'_0(t) \quad (3)$$

Aplicando Transformadas de Laplace na equação (3), obtemos a Função de Transferência do Tanque 1 (equação (4)):

$$\begin{aligned} As H'_1(s) + \frac{H'_1(s)}{R} &= F'_0(s) \\ H'_1 \left(As + \frac{1}{R} \right) &= F'_0 \\ \frac{H'_1(s)}{F'_0(s)} &= \frac{R}{(ARs + 1)} \end{aligned} \quad (4)$$

Repetindo o mesmo procedimento para os Tanques 2 e 3:

- Balanço de Massa no Tanque 2:

$$\begin{aligned} A \frac{dh'_2(t)}{dt} &= F'_1(t) - F'_2(t) \\ A \frac{dh'_2}{dt} &= \frac{h'_1}{R} - \frac{h'_2}{R} \\ AR \frac{dh'_2}{dt} + h'_2 &= h'_1 \end{aligned}$$

Aplicando Transformadas de Laplace, obtemos a Função de Transferência do Tanque 2:

$$\begin{aligned} ARs H'_2(s) + H'_2(s) &= H'_1(s) \\ H'_2(ARs + 1) &= H'_1 \\ \frac{H'_2(s)}{H'_1(s)} &= \frac{1}{(ARs + 1)} \end{aligned} \quad (5)$$

- Balanço de Massa no Tanque 3:

$$A \frac{dh'_3(t)}{dt} = F'_2(t) - F'_3(t)$$

$$A \frac{dh'_3}{dt} = \frac{h'_2}{R} - \frac{h'_3}{R}$$

$$AR \frac{dh'_3}{dt} + h'_3 = h'_2$$

Aplicando Transformadas de Laplace, obtemos a Função de Transferência do Tanque 3:

$$ARs H'_3(s) + H'_3(s) = H'_2(s)$$

$$H'_3(ARs + 1) = H'_2$$

$$\frac{H'_3(s)}{H'_2(s)} = \frac{1}{(ARs + 1)} \quad (6)$$

2. Modelagem do Sistema com interação, com a entrada de água ocorrendo pela parte de baixo de cada tanque, como mostrado na Figura 3-3. Dessa forma, a altura de água do tanque afeta a vazão de água que ele irá receber:

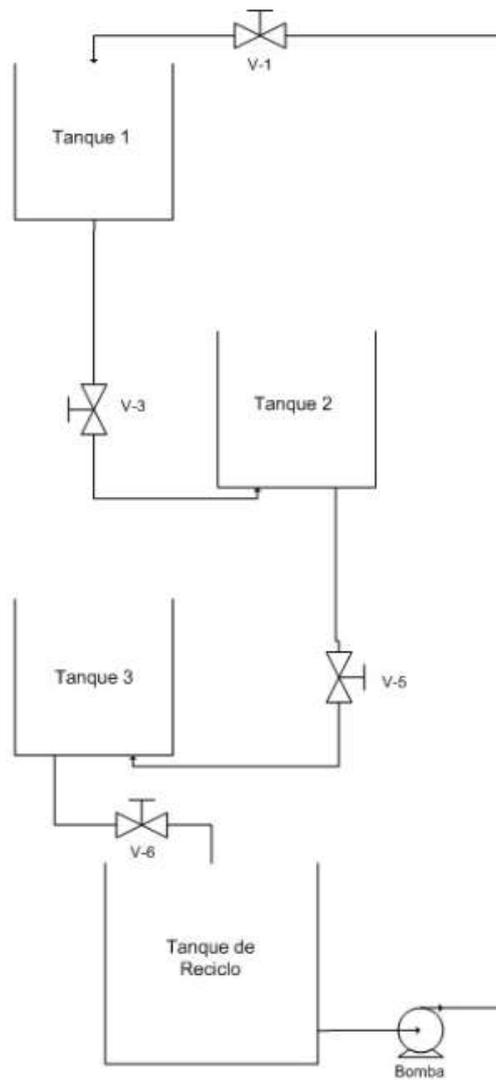


Figura 3-3: Sistema com interação.

- Balanço de Massa no Tanque 1:

$$\frac{dM_1(t)}{dt} = \rho F_0(t) - \rho F_1(t)$$

$$\rho \frac{dV_1}{dt} = \rho F_0 - \rho F_1$$

$$\frac{dV_1}{dt} = F_0 - F_1$$

$$A \frac{dh_1}{dt} = F_0 - \frac{h_1 - h_2}{R}$$

Multiplicando por “R” dos dois lados e rearrumando:

$$AR \frac{dh_1}{dt} = R F_0 - h_1 + h_2$$

$$AR \frac{dh_1}{dt} + h_1 = R F_0 + h_2$$

Transformando em Variáveis Desvio:

No Estado Estacionário:

$$0 + h_{1,SS} = R F_{0,SS} + h_{2,SS}$$

Subtraindo, obtemos o Balanço de Massa em Variáveis Desvio:

$$AR \frac{dh'_1(t)}{dt} + h'_1(t) = R F'_0(t) + h'_2(t)$$

Aplicando Transformadas de Laplace:

$$ARs H'_1(s) + H'_1(s) = R F'_0(s) + H'_2(s)$$

$$H'_1(ARs + 1) = R F'_0 + H'_2$$

$$H'_1(s) = \frac{R F'_0(s)}{ARs + 1} + \frac{H'_2(s)}{ARs + 1} \quad (7)$$

Repetindo o mesmo procedimento nos Tanques 2 e 3:

- Balanço de Massa no Tanque 2:

$$A \frac{dh'_2(t)}{dt} = F'_1(t) - F'_2(t)$$

$$A \frac{dh'_2}{dt} = \frac{h'_1 - h'_2}{R} - \frac{h'_2 - h'_3}{R}$$

Multiplicando por “R” dos dois lados e rearrumando:

$$AR \frac{dh'_2}{dt} + 2 h'_2 = h'_1 + h'_3$$

Aplicando Transformadas de Laplace:

$$ARs H'_2(s) + 2 H'_2(s) = H'_1(s) + H'_3(s)$$

Do Balanço de Massa do Tanque 1, temos que:

$$H'_1(s) = \frac{R F'_0(s)}{ARs + 1} + \frac{H'_2(s)}{ARs + 1}$$

Substituindo no Balanço de Massa do Tanque 2, obtemos:

$$ARs H'_2 + 2 H'_2 = \frac{R F'_0}{ARs + 1} + \frac{H'_2}{ARs + 1} + H'_3$$

$$ARs H'_2 + 2 H'_2 - \frac{H'_2}{ARs + 1} = \frac{R F'_0}{ARs + 1} + H'_3$$

Multiplicando por $(ARs+1)$ dos dois lados e rearrumando:

$$H'_2 [ARs (ARs + 1) + 2 (ARs + 1) - 1] = R F'_0 + H'_3 (ARs + 1)$$

$$H'_2 [(AR)^2 s^2 + (3AR)s + 1] = R F'_0 + H'_3 (ARs + 1)$$

$$H'_2(s) = \frac{R F'_0(s)}{[(AR)^2 s^2 + (3AR)s + 1]} + \frac{H'_3(s) (ARs + 1)}{[(AR)^2 s^2 + (3AR)s + 1]} \quad (8)$$

- Balanço de Massa no Tanque 3:

$$A \frac{dh'_3(t)}{dt} = F'_2(t) - F'_3(t)$$

$$A \frac{dh'_3}{dt} = \frac{h'_2 - h'_3}{R} - \frac{h'_3}{R}$$

Multiplicando por “R” dos dois lados e rearrumando:

$$AR \frac{dh'_3}{dt} + 2 h'_3 = h'_2$$

Aplicando Transformadas de Laplace:

$$ARs H'_3(s) + 2 H'_3(s) = H'_2(s)$$

Do Balanço de Massa do Tanque 2, temos que:

$$H'_2(s) = \frac{R F'_0(s)}{[(AR)^2 s^2 + (3AR)s + 1]} + \frac{H'_3(s) (ARs + 1)}{[(AR)^2 s^2 + (3AR)s + 1]}$$

Substituindo no Balanço de Massa do Tanque 3:

$$ARs H'_3 + 2 H'_3 = \frac{R F'_0}{[(AR)^2 s^2 + (3AR)s + 1]} + \frac{H'_3 (ARs + 1)}{[(AR)^2 s^2 + (3AR)s + 1]}$$

$$ARs H'_3 + 2 H'_3 - \frac{H'_3 (ARs + 1)}{[(AR)^2 s^2 + (3AR)s + 1]} = \frac{R F'_0}{[(AR)^2 s^2 + (3AR)s + 1]}$$

Multiplicando por $[(AR)^2 s^2 + (3AR)s + 1]$ dos dois lados e rearrumando:

$$H'_3 \{ARs [(AR)^2 s^2 + (3AR)s + 1] + 2[(AR)^2 s^2 + (3AR)s + 1] - (ARs + 1)\} = R F'_0$$

$$H'_3 [(AR)^3 s^3 + 5(AR)^2 s^2 + (6AR)s + 1] = R F'_0$$

$$\frac{H'_3(s)}{F'_0(s)} = \frac{R}{[(AR)^3 s^3 + 5(AR)^2 s^2 + (6AR)s + 1]} \quad (9)$$

As equações (4), (5), (6), (7), (8) e (9) são as funções de transferência do processo, e são necessárias caso se queira projetar um controlador para o processo. Os valores da área “A” e da vazão inicial “F₀” são conhecidos, restando apenas descobrir o valor da resistência imposta pelas válvulas à passagem do fluxo. Esse valor pode ser encontrado de forma experimental, e o cálculo será mostrado no próximo capítulo desse trabalho.

3.2 – Montagem do Sistema

O sistema utilizado foi construído utilizando três baldes de plástico, que formam os tanques de nível, tubos de PVC e válvulas manuais.

Os três tanques são circulares, com 30 cm de altura, por 25 cm de diâmetro. Foram acrescentadas dois orifícios no fundo de cada tanque, para permitir tanto a saída de água para o balde seguinte, quanto à entrada de água do balde anterior pelo fundo, gerando os dois sistemas descritos e modelados anteriormente na Seção 3.1.

Para o suporte da estrutura foram usadas prateleiras metálicas, que permitem uma mudança de altura se for necessário.

Um quarto balde foi inserido no projeto para captar a água e permitir sua recirculação, evitando assim o desperdício. Neste tanque, uma bomba foi acoplada para enviar a água ao primeiro tanque.

Como a placa do Arduino é sensível à água, ela foi colocada dentro de uma caixa metálica e acoplada na lateral da estrutura, numa posição que visava minimizar o risco de contato com a água.

O sistema pronto está mostrado na figura 3-4, e o detalhe da caixa de proteção do Arduino está mostrado na Figura 3-5 logo a seguir:



Figura 3-4: Sistema visto por dois ângulos diferentes.



Figura 3-5: caixa metálica usada para proteger o Arduino.

3.3 – Arduino Uno

A placa de Arduino utilizada no processo foi uma réplica do Arduino Uno (Figura 2-13). A réplica tem exatamente as mesmas especificações que o Arduino Uno original, apresentando 14 pinos de entradas/saídas digitais mais 6 entradas analógicas, onde foram conectados os medidores de nível e de vazão utilizados, uma conexão USB por onde a placa recebe o código escrito, e uma entrada para fonte de energia auxiliar.

O Arduino pode ser programado usando o Arduino IDE. De lá o código é compilado e enviado à placa via USB, e a placa executa a rotina recebida repetidamente até que seja resetada ou seja cortada a alimentação [7]. Os códigos usados nesse trabalho estarão apresentados no Anexo 1.

Para a comunicação entre o sistema supervisorio (iFix) e o Arduino, foi utilizada a comunicação OPC (*Object Linking & Embedding for Process Control*). O OPC é uma interface padronizada de comunicação, bastante usada em equipamentos industriais, e permite a transmissão de dados e monitoramento em tempo real das variáveis de medição do projeto.

O Arduino é usado como uma ponte de comunicação entre os medidores e o computador, enviando os dados coletados pelos sensores diretamente para o sistema supervisorio, em tempo real, onde são mostrados ao usuário na tela de supervisão.

Para permitir a conexão do Arduino via OPC, é necessário usar uma biblioteca customizada. Os passos necessários estão descritos no fluxograma da Figura 3-6.

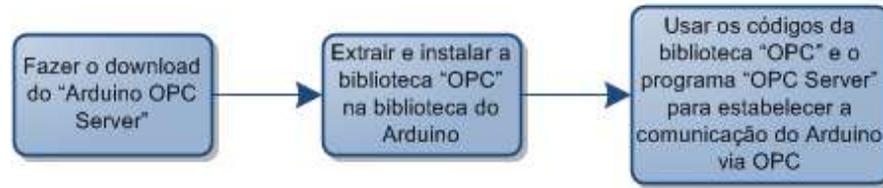


Figura 3-6: Passo a passo para estabelecer a comunicação do Arduino via OPC.

3.4 – Instrumentação Usada

O Arduino possui uma ampla gama de sensores disponíveis para uso. Como o objetivo desse trabalho é medir e controlar o nível de água de tanques, foram usados sensores de pressão, de distância, e de fluxo.

Os sensores de pressão foram usados para medir a pressão da coluna líquida nos tanques, e, conseqüentemente, o nível de água de cada tanque. Um sensor de fluxo foi utilizado para medir a vazão de entrada no primeiro tanque “F₀”. Além disso, um sensor ultrassônico foi usado para medir nível de água em um dos tanques, de forma a permitir uma comparação entre dois princípios de medição diferentes. A medição por ultrassom foi acrescentada à medição por pressão no Tanque 2, e com isso foi possível aferir sua precisão e compará-la a de sensores mais sofisticados e de alto custo, como os sensores de pressão.

3.4.1 – Sensor de Pressão MPX5010DP

Para monitorar o nível de água nos tanques, foram usados sensores de pressão do tipo MPX5010dp. Esses sensores conseguem medir diferenças de pressão numa faixa de 0-10 kPa [8], ou aproximadamente 0-1 m de coluna d’água.



Figura 3-7: Sensor de pressão MPX5010dp, usado para medir o nível de água em cada tanque.

- Princípio de Funcionamento:

O MPX5010DP é um sensor piezo-resistivo que consegue medir a diferença de pressão entre suas duas entradas. Um material piezo-resistivo é um material que varia sua resistividade de acordo com a tensão mecânica à qual está submetido. Sendo assim, o sensor envia um sinal elétrico proporcional à diferença de pressão nas duas entradas. No gráfico da Figura 3-8, é possível ver que o sinal elétrico aumenta de forma linear com o aumento da pressão.

A faixa de operação desse sensor pode ser deduzida por esse gráfico, assim como a função que liga a voltagem enviada à pressão medida. Os cálculos serão mostrados a seguir.

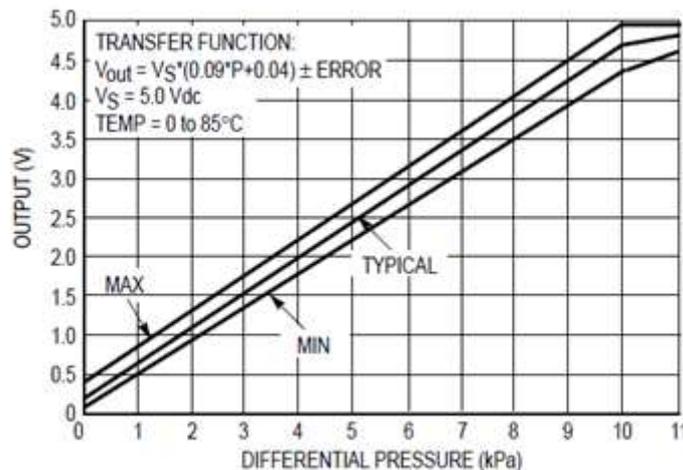


Figura 3-8: Relação da voltagem enviada e da pressão medida do sensor MPX5010dp [8].

Esse sensor não é robusto o suficiente para entrar em contato com fluidos como a água, e nem mesmo ter contato com muita umidade, sendo recomendado que ele seja apenas exposto ao ar seco. Como ele foi usado nesse trabalho para medir o nível de água dos tanques, algumas modificações foram necessárias para que os sensores não fossem danificados.

Para solucionar o problema de contato com a água, uma mangueira é conectada à entrada positiva do sensor, e então é colocada no fundo do tanque com água, enquanto a outra entrada é mantida aberta para o ambiente (pressão atmosférica), como mostrado na figura a seguir:

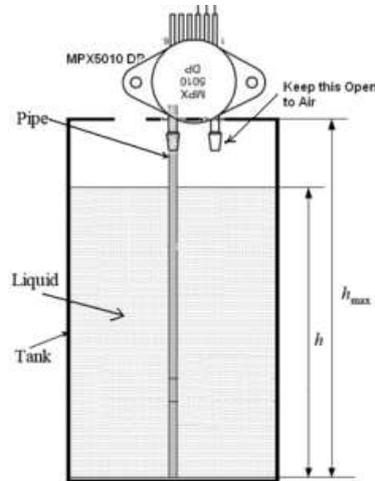


Figura 3-9: Solução encontrada para usar o sensor MPX5010dp para medir níveis de água [9].

A mangueira deve ser acoplada o mais justa possível à entrada do sensor, de forma a minimizar o “vazamento” de ar e vapor d’água, que fazem com que o sensor passe a medir uma pressão (nível de água) cada vez menor com o tempo.

Uma “solução” simples para o problema é retirar a mangueira da água e inseri-la novamente. Apesar de não resolver permanentemente, serve para zerar os erros de medição do sensor temporariamente.

- Conexões:

Sua conexão com o Arduino utiliza três pinos. Um pino para envio de sinal, um de energia (5V) e um de aterramento. O sensor é conectado a uma entrada analógica do Arduino, e, com apenas uma função simples, é possível saber a voltagem que está sendo retornada. Somando a isso algumas conversões de unidade, é possível calcular o nível de água.

Quanto à sua conexão com o processo, o sensor apresenta duas saídas, uma que deve ser conectada ao local de maior pressão (P1), que será conectada à mangueira e colocada no fundo do tanque, e a outra saída que será mantida aberta para a atmosfera (P2).

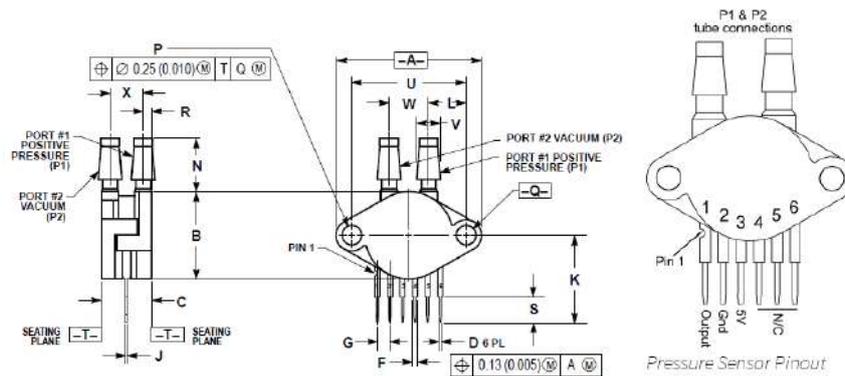


Figura 3-10: Visão frontal e lateral do sensor MPX5010dp, destacando as conexões elétricas e as entradas de pressão [8].

- Código:

O código usado para esse sensor é bem simples. A função “`analogRead()`” consegue medir indiretamente a voltagem enviada a uma das entradas analógicas. Como o sensor MPX5010dp envia uma voltagem proporcional à diferença de pressão medida, é possível, através de algumas conversões, calcular o nível de água usando a voltagem.

Na Figura 3-8, é possível ver que o sensor consegue medir numa faixa de 0-10 kPa de diferença de pressão, e a voltagem varia de aproximadamente 0-4,7 V de forma linear (existe um *offset* na voltagem que deve ser corrigido com uma calibração).

Dessa relação podemos deduzir que:

$$\text{Voltagem [V]} = 0,47 \text{ Pressão[kPa]} + \text{offset}$$

$$P = \frac{V - \text{offset}}{0,47}$$

A voltagem enviada pelo sensor ao Arduino é lida pela função “`analogRead()`”, que retorna um valor entre 0-1023 unidades, proporcional a variações de voltagem entre 0-5 V. A relação voltagem/unidades é de:

$$\frac{5}{1023} \text{ V/unidades}$$

A calibração do sensor é feita ligando-o ao Arduino e deixando as duas entradas abertas para a atmosfera. O offset encontrado foi de aproximadamente 33 unidades, ou, convertendo, 0,16 V.

A equação final de conversão para pressão ficou:

$$P = \frac{V - 0,16}{0,47}$$

Que no Arduino fica escrita como:

$$P = \frac{\text{analogRead}() ^ 5 / 1023 - 0,16}{0,47}$$

Com o valor da pressão em kPa, é fácil encontrar a altura do nível de água do tanque, bastando multiplicar a pressão encontrada por um fator de conversão:

$$\frac{100 \text{ cm coluna d'água}}{9,8} / \text{KPa}$$

$$\text{Nível [cm]} = L = P \frac{100}{9,8} = \frac{\text{analogRead}() ^ 5 / 1023 - 0,16}{0,47} \frac{100}{9,8}$$

3.4.2 – Sensor de Fluxo YF-S201

Para medição do fluxo de água que sai da bomba e entra no primeiro tanque, o sensor YF-S201 foi usado. Sua faixa de medição vai de 1-30 L/min [10]. Como a bomba usada no processo não tem capacidade muito maior que 10 L/min, esse sensor pode ser usado sem problemas no projeto.



Figura 3-11: Sensor de fluxo YF-S201, usado para medir a vazão da bomba.

- Princípio de Funcionamento:

O sensor YF-S201 utiliza o Efeito Hall para medir a vazão de água. Em seu interior há uma estrutura em formato de catavento com um ímã acoplado que trabalha em conjunto com um sensor hall para enviar um sinal elétrico. A cada giro dessa estrutura, um sinal elétrico é enviado ao Arduino, sendo possível fazer a contagem dos giros e estimar a vazão de água que passou pelo sensor.

Existe uma relação linear entre o número de giros e a vazão de água que passa pelo sensor, como pode ser visto no gráfico da Figura 3-12 mostrada a seguir:

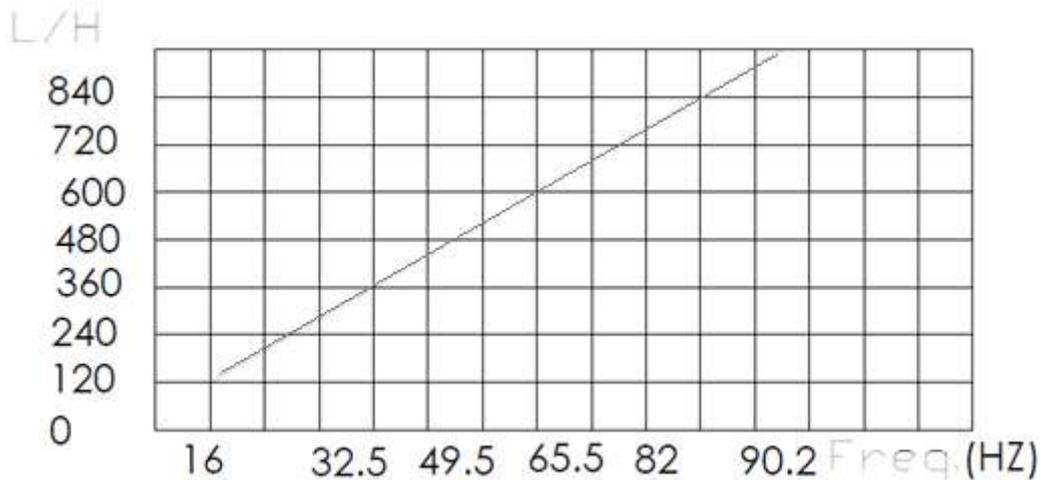


Figura 3-12: Relação entre o número de giros e a vazão do sensor YF-S201 [10].

Sabendo disso, uma função do Arduino é usada para contar o número de giros (descrição na seção de códigos), e logo em seguida os giros são convertidos em frequência e posteriormente em vazão, usando a relação retirada do gráfico:

$$Q = \frac{F}{7} \text{ [l/min]}$$

Onde “F” é a frequência do número de giros e “Q” é a vazão.

- Conexões:

A conexão desse sensor com o Arduino também utiliza 3 pinos, exatamente igual ao sensor de pressão. Um dos pinos fornece energia (5-24V) [10], o segundo é o aterramento, e o último é o de envio de sinal. O sensor deve ser conectado a uma entrada digital do Arduino, para que o número de giros consiga ser contado.



Figura 3-13: Detalhe da conexão do sensor YF-S201 [14].

Sua conexão com o sistema também é a mais simples de todas. Como ele tem o tamanho padrão de ½ polegada, basta encaixá-lo na tubulação.

- Código:

O código usado veio de uma biblioteca criada por um ex-aluno da Escola de Química, Roberto Lange. Esse sensor de fluxo já havia sido usado anteriormente em projetos do EQ Hands On, por isso a biblioteca foi criada, a fim de facilitar a programação para futuros usos.

Dentro da biblioteca estão incluídos a contagem de giros do sensor e os cálculos de conversão, usando o fator de conversão retirado do gráfico da Figura 3-12.

3.4.3 – Sensor Ultrassônico HC-SR04

O terceiro sensor usado foi o sensor ultrassônico HC-SR04. Ele foi usado para medir o nível de água em um dos tanques, a fim de comparar essa medição com os resultados obtidos pelo sensor de pressão MPX5010DP. Por ser um sensor mais barato e usar um método de medição diferente, a comparação com o sensor MPX5010DP é bastante interessante para aferir a precisão e a viabilidade de cada um deles na medição do nível de água.



Figura 3-14: Sensor ultrassônico HC-SR04.

- Princípio de funcionamento:

O HC-SR04 é um sensor que mede a distância baseado no tempo que uma onda ultrassônica enviada leva para retornar. Uma onda ultrassônica é enviada pelo sensor, que atinge um obstáculo, e logo em seguida o retorno desse sinal é detectado. Com base no tempo entre o envio e retorno do sinal, é possível calcular a distância entre o sensor e o objeto. Esse princípio é demonstrado na Figura 3-15.

Esse sensor é bastante usado em projetos de robótica, servindo como os “olhos” do robô. Para medir o nível de água, são necessários alguns cuidados para evitar o contato direto do sensor com o líquido, e também para evitar que pingos de água passem pela trajetória da onda ultrassônica, retornando valores errados.

- Conexão:

Sua conexão com o Arduino requer dois pinos digitais, além de uma conexão de energia (5V) e uma para o aterramento. Um pino digital é conectado ao pino “*trigger*”, que é o responsável por enviar o sinal ultrassônico, e o outro pino é conectado ao pino “*echo*”, que é o responsável por receber o sinal que retorna.

Não é necessária nenhuma conexão com o sistema em si, já que esse sensor mede a distância enviando ondas ultrassônicas, porém alguns cuidados são necessários. Como citado anteriormente, esse sensor não pode ter nenhum contato com a água, para evitar danos. Além disso, é necessário cuidado com a sua localização para que a onda enviada não rebata em superfícies laterais e gerem resultados errados, com pingos de água que passem pela trajetória da onda enviada pelo sensor, pois esses pingos podem alterar a leitura do sensor, e também tentar manter a superfície da água o menos turbulenta possível, pois se estiver muito turbulenta também pode causar alterações nas leituras.

Sendo assim, o sensor deve ficar o mais centralizado possível em relação ao tanque, para maximizar a distância das laterais, e também deve ficar a uma distância razoável da água para que não haja possibilidade de contato.

- Código:

O código usado consiste em colocar o pino “*trigger*” em modo HIGH por 10 µs, usando o comando “`digitalWrite`”. Isso faz com que uma onda seja emitida, e imediatamente o pino “*echo*” é colocado em estado HIGH. Seu estado só irá mudar para LOW quando a onda for recebida de volta [11]. O cálculo da distância é baseado no tempo que o pino “*echo*” ficou em estado HIGH. É possível medir esse tempo usando a função “`pulseIn`” do Arduino.

O cálculo pode ser descrito pela equação abaixo:

$$D = \frac{t v}{2} \quad [m]$$

Onde “D” se refere à distância percorrida pela onda ultrassônica, “v” é a velocidade do som no meio em questão, e “t” é o tempo de viagem.

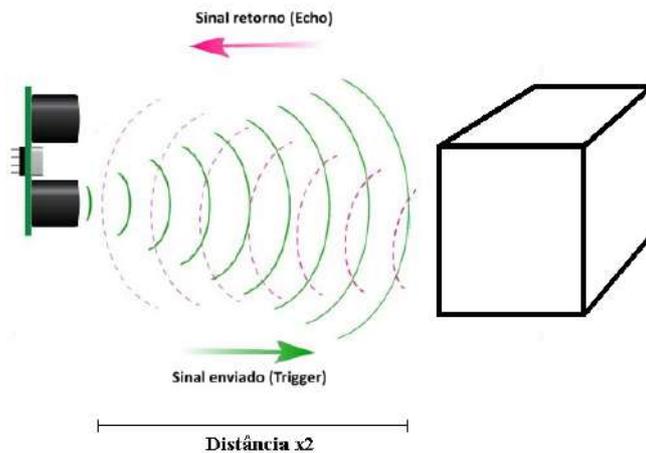


Figura 3-15: Princípio de medição do sensor HC-SR04.

3.5 – Instalação dos Sensores

A localização dos sensores pode ser vista no diagrama P&ID apresentado anteriormente na Figura 3-1.

3.5.1 – Instalação Elétrica

Todas as conexões elétricas necessárias para o funcionamento dos sensores estão listadas a seguir na Figura 3-16. As linhas vermelhas representam os fios de energia, as linhas pretas representam os fios-terra, e as verdes representam os fios de sinal. Foi necessário usar uma “*protoboard*” para a conexão dos fios, pois o Arduino não teria entradas suficientes para todos os sensores:

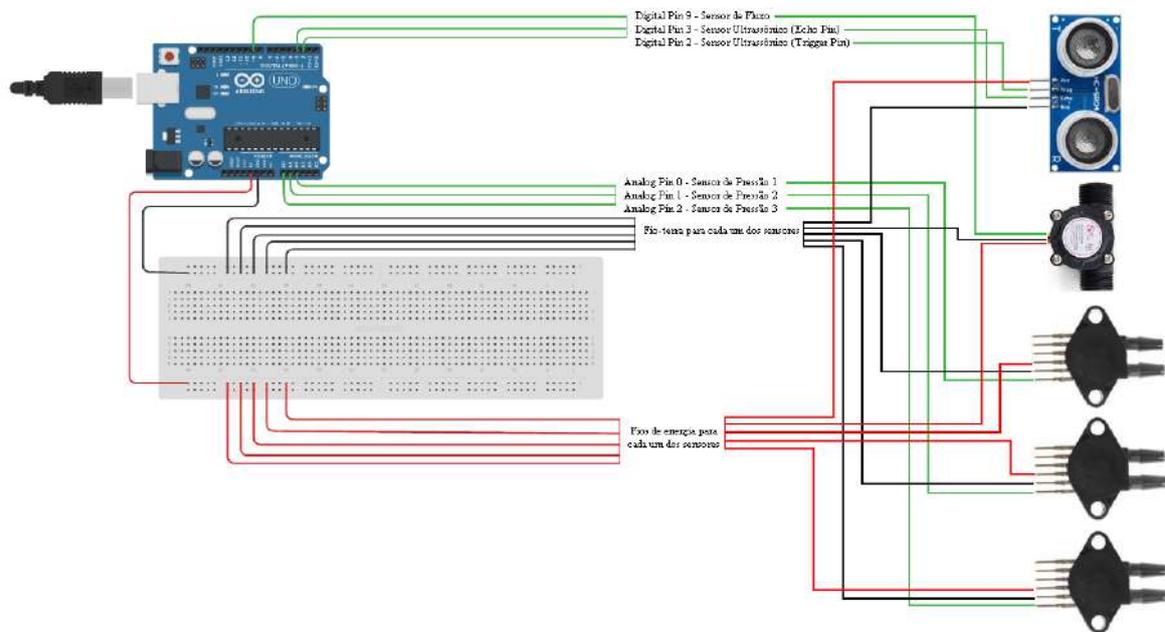


Figura 3-16: Conexões entre os sensores e a placa do Arduino.

Como o Arduino tem que ficar conectado à 5 sensores simultaneamente, e esses sensores estavam fixados em diferentes partes do processo, as distâncias entre a placa do Arduino e os sensores acabaram ficando muito grandes. Por isso, foram feitos fios sob medida para cada sensor, com pelo menos 1 metro de comprimento cada, para permitir que todas as conexões pudessem ser estabelecidas.

3.5.2 – Instalação Física

Com a instalação elétrica feita, bastava posicionar os sensores em cada tanque, de forma que eles pudessem atuar no sistema.

O sensor de fluxo foi o mais simples de todos, bastando encaixá-lo na própria tubulação, não requerendo nenhum cuidado extra, e nenhum tipo de suporte necessário para sustentá-lo. Esse sensor foi instalado logo após a saída da bomba, de forma a medir o fluxo de água enviado ao Tanque 1.



Figura 3-17: Sensor de fluxo acoplado à tubulação.

Como os sensores de pressão e ultrassônico não podem ter contato direto com a água, o sensor de pressão foi acoplado a uma mangueira, que foi conectada a um tubo de aço mergulhado no fundo do tanque. O tubo de aço foi usado para garantir uma melhor sustentação do sensor acima do tanque. Esse tubo foi inserido numa tábua de madeira presa na borda do tanque. Dessa forma, o sensor fica seguro acima do nível máximo de água, além disso, o conjunto “tubo de aço + madeira” mantém o sensor estável no mesmo lugar. Cada um dos três sensores de pressão foi instalado em um tanque diferente.

O sensor ultrassônico foi preso em um suporte e então foi acoplado à mesma tábua de madeira usada pelo sensor de pressão. Dessa forma, o sensor fica acima do nível máximo do tanque, a uma distância segura em caso de transbordamento do tanque. O sensor ultrassônico foi instalado no Tanque 2.

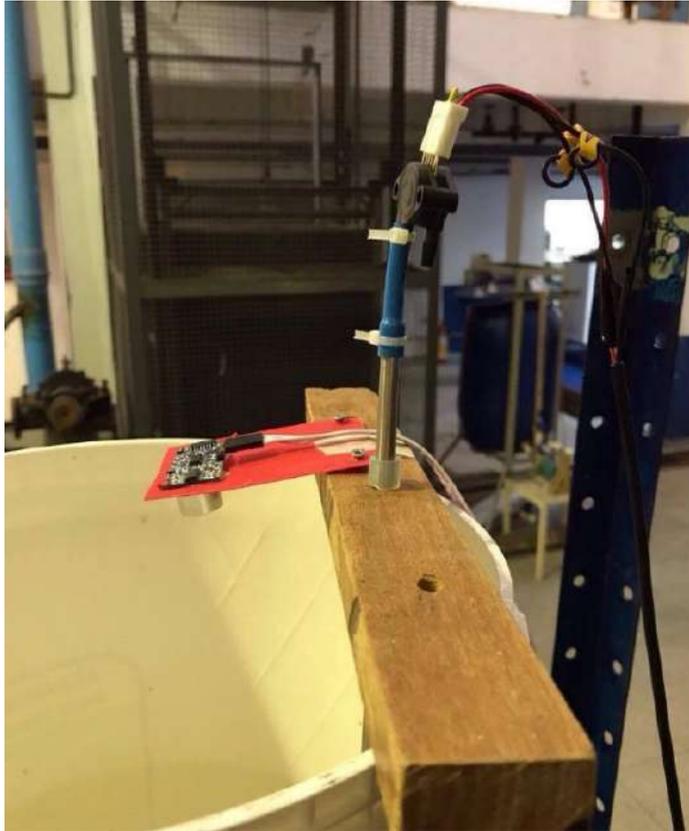


Figura 3-18: Detalhe do suporte criado para acomodar os sensores de pressão e o sensor ultrassônico.



Figura 3-19: Suporte de plástico recortado para manter o sensor ultrassônico no lugar.

3.6 – Sistema Supervisório iFix

Como nenhum dos sensores usados tem comunicação direta com o computador, e nem apresentam uma interface digital, aonde seria possível ler diretamente os valores medidos, foi usado o software de supervisão iFix, no qual foi criado um aplicativo para fins de monitoração da planta de tanques de nível. Para o desenvolvimento deste aplicativo, foi criada uma base de dados (Figura 3-20) que permite a comunicação via OPC com o Arduino, e uma tela de apresentação (Figura 3-21). Nesta tela está reproduzido o projeto, com os três tanques, o tanque de reciclo e a bomba, mostrando em tempo real o valor medido por cada um dos sensores instalados.

Como pode ser visto na Figura 3-21, na tela criada no sistema de supervisão é possível observar cada um dos valores medidos pelos sensores, além de um gráfico mostrando o nível de cada tanque ao longo do tempo, que permite observar a tendência de cada uma das curvas. Para facilitar a visualização imediata do nível de cada tanque, foi adicionada uma “*bargraph*” em cada um deles, que enche na mesma proporção do enchimento real do respectivo tanque. Finalmente, como não existe um sistema de controle automático para impedir que os tanques transbordem devido a algum descuido, sistemas de alarme foram implementados no próprio iFix, alertando o usuário se o nível de algum tanque estiver alto demais.



The screenshot shows the Proficy iFIX Database Manager interface. The title bar reads "Proficy iFIX Database Manager - [EQ_IFIX : 5 rows]". The menu bar includes "Database", "Edit", "View", "Blocks", "Drivers", "Tools", and "Help". The toolbar contains various icons for database operations. The main window displays a table with the following data:

	Tag Name	Type	Descripto	Scan Time	I/O Dev	I/O Addr	Curr Value
1	FLOWRATE	AJ	FT-2001	1	OPC	Arduino,Arduino_Sensors,ArduinoSerial0,FT01,No Access	????
2	LVL_ULTRASONIC	AJ	LT-2001	1	OPC	Arduino,Arduino_Sensors,ArduinoSerial0,LT_ULTRASONIC	????
3	PRESSURE_LVL_1	AJ	PT-2001	1	OPC	Arduino,Arduino_Sensors,ArduinoSerial0,LT01,No Access	????
4	PRESSURE_LVL_2	AJ	PT-2002	1	OPC	Arduino,Arduino_Sensors,ArduinoSerial0,LT02,No Access	????
5	PRESSURE_LVL_3	AJ	PT-2003	1	OPC	Arduino,Arduino_Sensors,ArduinoSerial0,LT03,No Access	????
6							
7							

Figura 3-20: Base de dados criada no iFix para o trabalho.

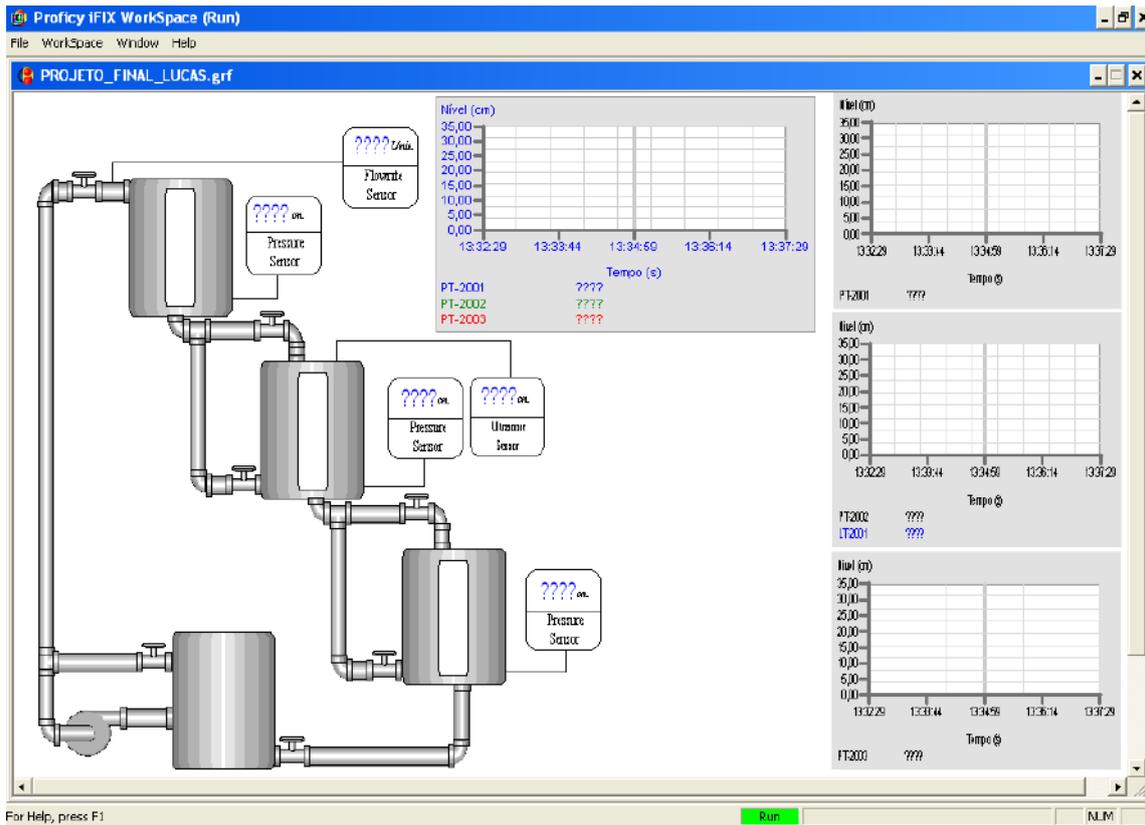


Figura 3-21: Tela criada no iFix, para monitoramento do processo em tempo real.

O iFix armazena os dados enviados pelos sensores, e depois é possível recuperá-los usando o Excel. Com esses dados foi possível plotar os gráficos que foram usados posteriormente nesse trabalho para calcular os parâmetros da modelagem do sistema.

Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Calibração e Avaliação dos Sensores

Depois de instalados, os sensores precisam ser calibrados para garantir uma medição correta de cada um dos valores. Esta calibração foi realizada usando a tela de supervisão desenvolvida para esse projeto, de onde foi possível coletar os valores medidos pelos sensores para compará-los com valores medidos manualmente.

O sensor de fluxo YF-S201 já havia sido calibrado por alunos do mesmo laboratório em trabalhos anteriores [12]. Assim, não foi realizada uma nova calibração para esse sensor.

Os sensores de pressão e ultrassônico foram calibrados usando uma régua e comparando os valores medidos pelo sensor com os medidos manualmente. Os erros calculados representam os valores medidos pela régua diminuídos dos valores medidos pelos sensores.

As tabelas abaixo apresentam esses valores:

Tabela 1: Erro de aferição do sensor de pressão instalado no Tanque 1.

Tanque 1 – Sensor de Pressão 1 MPX5010dp		
Sensor de Pressão 1 MPX5010dp (cm)	Valor Real (cm)	Erro (cm)
3,5	4,0	0,5
6,8	6,3	-0,5
9,0	8,6	-0,4
11,6	11,6	0,0
14,4	14,5	0,1
16,5	16,9	0,4
18,8	19,3	0,5
20,7	21,6	0,9
23,4	24,4	1,0
25,2	26,7	1,2
26,0	27,5	1,5
Erro Médio (cm)		0,5

Tabela 2: Erro de aferição do sensor de pressão instalado no Tanque 2.

Tanque 2 – Sensor de Pressão 2 MPX5010dp		
Sensor de Pressão 2 MPX5010dp (cm)	Valor Real (cm)	Erro (cm)
3,1	4,0	0,9
6,6	6,4	-0,5
9,1	9,0	-0,1
10,9	11,2	0,3
13,1	13,5	0,4
15,6	16,3	0,7
18,3	19,3	1,0
19,9	21,0	1,1
21,7	23,1	1,4
23,0	24,6	1,6
25,1	26,9	1,8
Erro Médio (cm)		0,8

Tabela 3: Erro de aferição do sensor ultrassônico instalado no Tanque 2.

Tanque 2 – Sensor Ultrassônico HC-SR04		
Sensor Ultrassônico HC-SR04(cm)	Valor Real (cm)	Erro (cm)
4,1	4,0	-0,1
6,2	6,4	0,2
8,9	9,0	0,1
11,1	11,2	0,1
13,2	13,5	0,3
16,0	16,3	0,3
18,8	19,3	0,5
21,0	21,0	0,0
22,4	23,1	0,7
24,2	24,6	0,4
26,3	26,9	0,6
Erro Médio (cm)		0,3

Tabela 4: Erro de aferição do sensor de pressão instalado no Tanque 3.

Tanque 2 – Sensor de Pressão 3 MPX5010dp		
Sensor de Pressão 3 MPX5010dp(cm)	Valor Real (cm)	Erro (cm)
5,3	5,6	0,3
7,3	7,9	0,6
10,4	11,3	0,9
12,5	13,6	1,1
15,6	15,5	-0,1
17,7	17,8	0,1
19,0	19,3	0,3
20,9	21,5	0,6
22,1	22,6	1,5
24,2	25,1	0,9
27,0	28,3	1,3
Erro Médio (cm)		0,7

Os resultados mostram que os sensores de pressão apresentam um erro maior que o sensor ultrassônico, quando usados para medir o nível de água de um tanque.

Para correção dos sensores de pressão, eles foram programados adicionando “+1” a todas as medições feitas. Como o erro não é constante e nem apresenta uma tendência, foi escolhido um valor que estivesse próximo à média obtida pelos três sensores.

Após devidamente calibrados, os sensores foram testados com o sistema em funcionamento. Diferentemente das medições feitas anteriormente, o sistema agora irá variar de estado ao longo do tempo, com água entrando e saindo de cada um dos tanques. Dessa forma, foi possível avaliar o comportamento dos sensores em um sistema dinâmico e medir a quantidade de ruídos gerada por cada sensor.

Para esse teste, os tanques foram enchidos e esvaziados separadamente. O Tanque 1 foi enchido com a corrente de água enviada pela bomba, e seu esvaziamento representa o enchimento do Tanque 2. Analogamente, o esvaziamento do Tanque 2 representa o enchimento do Tanque 3.

- Avaliação dos Sensores de Pressão:

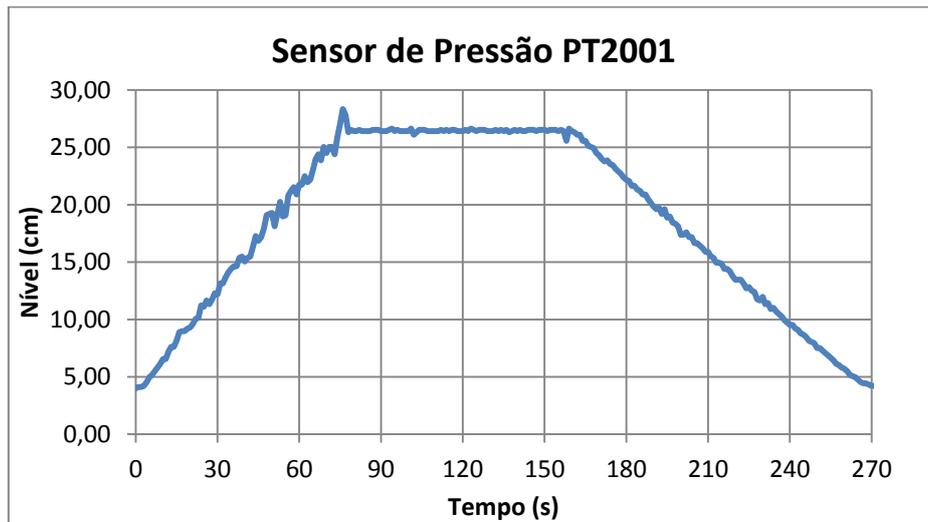


Figura 4-1: Avaliação do primeiro sensor de pressão, PT2001.

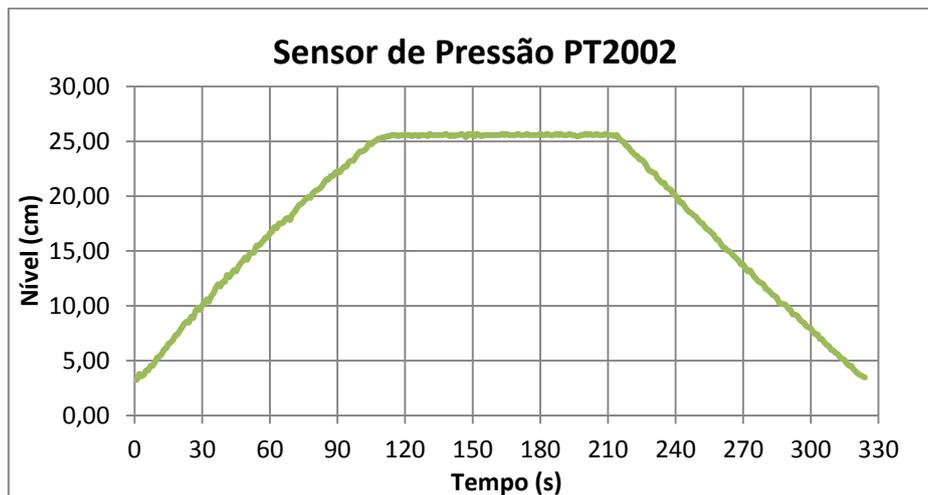


Figura 4-2: Avaliação do Segundo sensor de pressão, PT2002.

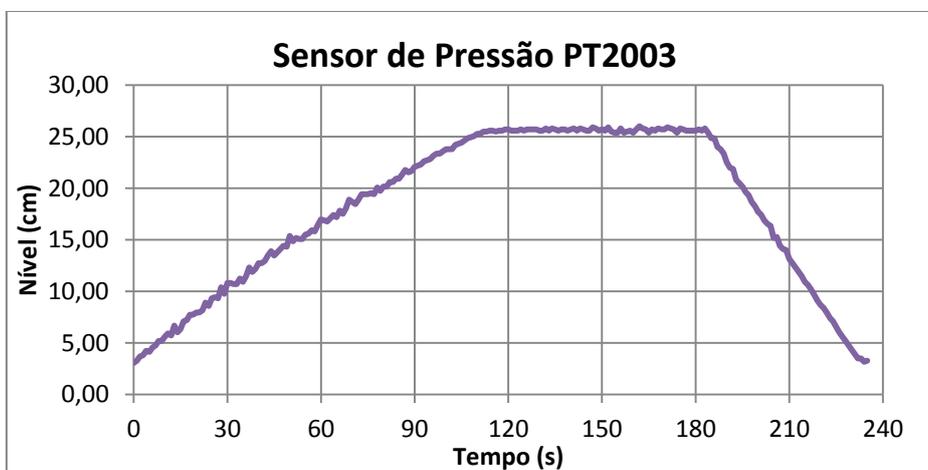


Figura 4-3: Avaliação do terceiro sensor de pressão, PT2003.

Os sensores de pressão apresentaram pequenas flutuações ao longo das medições. Nota-se que, no processo de enchimento dos tanques, a quantidade de ruído é consideravelmente maior que no processo de esvaziamento. Isso ocorre provavelmente porque, no enchimento, existe uma corrente de água entrando por cima, tornando turbulenta a água que está no tanque, e causando os ruídos nas medições. No primeiro tanque esse efeito é ainda mais acentuado porque a corrente que entra no Tanque 1 sai diretamente da bomba, e apresentava uma vazão maior que a dos outros tanques.

- Avaliação do Sensor Ultrassônico:

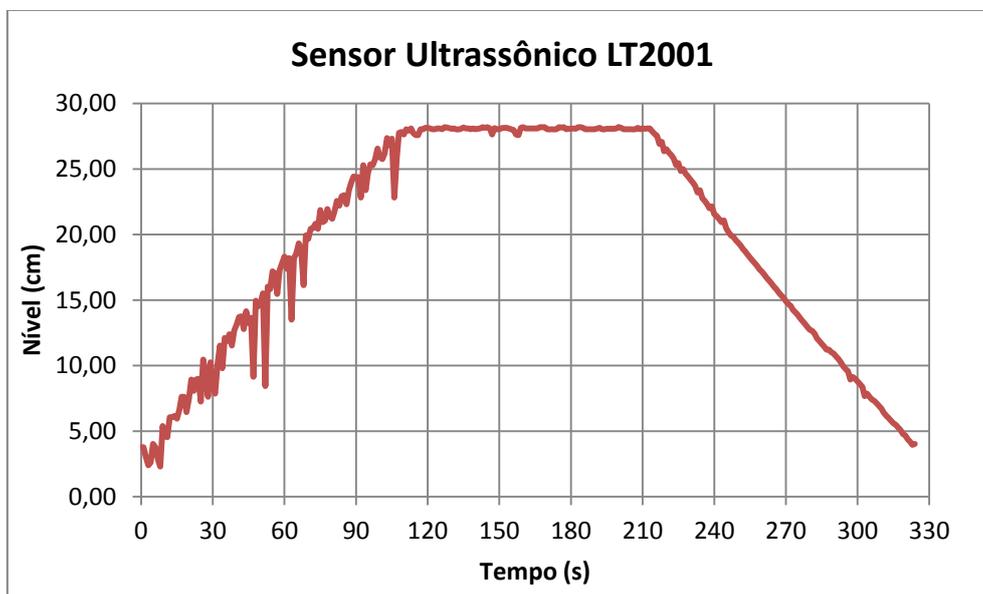


Figura 4-4: Avaliação do sensor ultrassônico instalado no segundo tanque.

Como já era esperado, o sensor ultrassônico apresentou uma quantidade de ruído bastante alta durante o enchimento do tanque. Apesar de medir a altura com maior precisão que o sensor de pressão, a flutuação nos valores medidos pode vir a ser um problema.

A partir do momento que existe uma corrente de alimentação de água entrando por cima dos tanques, a superfície da água torna-se turbulenta, e existe a chance de respingar água na trajetória de medição do sensor, ou até mesmo no próprio sensor.

- Avaliação do Sensor de Fluxo:

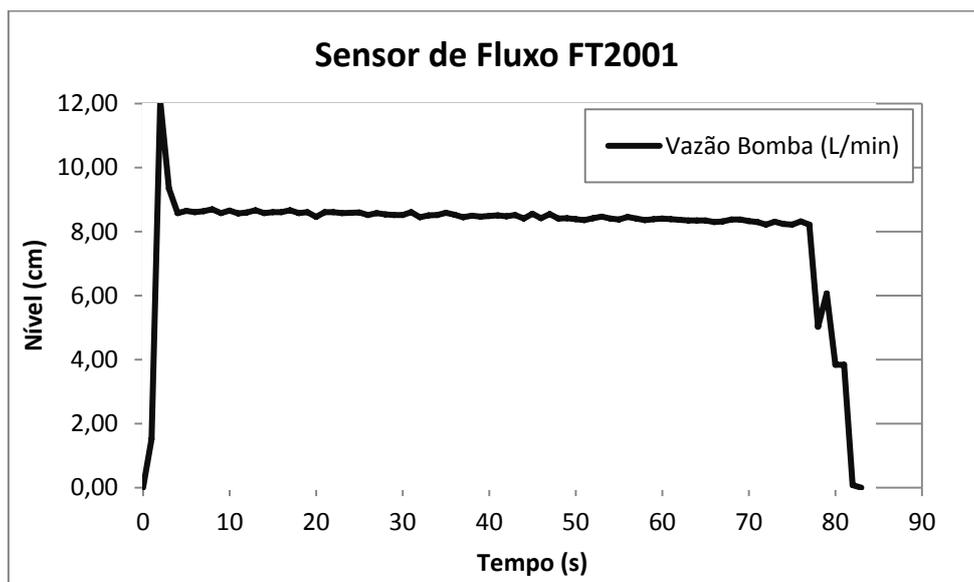


Figura 4-5: Avaliação do Sensor de fluxo instalado.

O sensor de fluxo mede sem muito ruído o fluxo de água da bomba. O pico visto inicialmente ocorre devido ao mecanismo de “start” da bomba, e é normal.

4.2 – Testes e Resultados

Nessa seção serão apresentados todos os testes feitos, e os resultados serão discutidos juntamente.

O objetivo dos testes era modelar o sistema empiricamente, usando os dados coletados pelos sensores instalados. Os testes propostos foram os seguintes:

- **TESTE 1 – Definição da Faixa de Vazão em Estado Estacionário**

O primeiro teste tem como objetivo avaliar como a vazão de saída de cada tanque se comporta em função da altura da coluna d’água do mesmo. Esse teste é feito individualmente em cada tanque. Para tal avaliação, cada tanque será enchido separadamente, e a válvula de saída será aberta completamente. O resultado obtido vai ser um gráfico de variação da altura da água no tanque com relação ao tempo. Com a inclinação da reta desse gráfico é possível estimar o fluxo de água que sai de cada tanque.

Sabendo que a vazão de saída de cada tanque é função da altura da coluna d'água do mesmo, e também da resistência da válvula, quanto menor for essa altura, menor será a vazão. O resultado esperado não é uma reta, mas uma curva cuja inclinação vai diminuindo conforme o nível de água vai caindo. Com os resultados obtidos no Teste 1, teremos uma faixa de vazões em que é possível atingir um estado estacionário. O degrau aplicado no Teste 2 deverá estar dentro dessa faixa de vazões, para que o sistema saia de um estado estacionário e atinja outro.

- **TESTE 2 – Definição dos Parâmetros do Modelo do Processo**

O segundo teste tem como objetivo modelar o sistema. Esse teste é feito com o sistema operando em estado estacionário. Um degrau será aplicado na vazão de entrada do primeiro tanque (dentro da faixa de vazão pré-estabelecida pelo Teste 1), e a resposta do sistema será usada para descobrir os parâmetros necessários para a modelagem dos tanques (como ganhos e constantes de tempo).

Todos os valores mostrados nos gráficos a seguir foram coletados pelos sensores de pressão MPX5010dp, por estes apresentarem uma menor quantidade de ruído durante as medições.

4.2.1 – Testes – Configuração Inicial

Na Figuras a seguir estão apresentados os resultados do Teste 1:

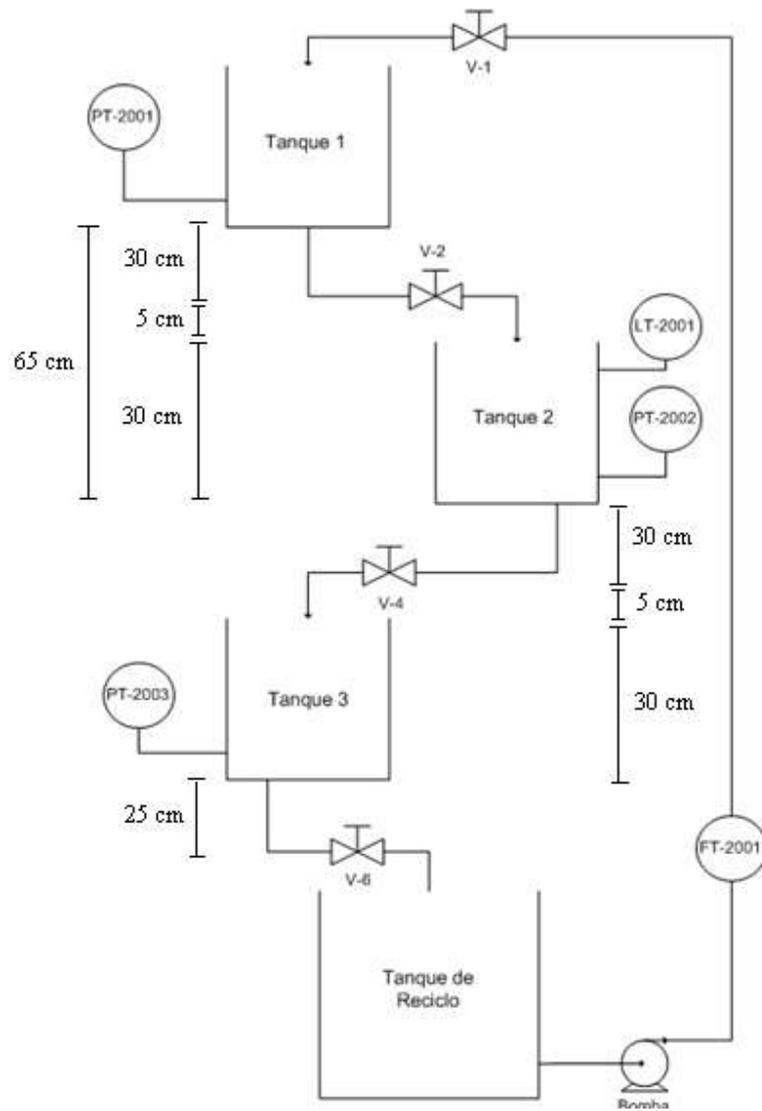


Figura 4-6: Representação da configuração inicial do sistema.

- Teste 1 – Definição da Faixa de Vazão em Estado Estacionário – Configuração Inicial – Resultados:

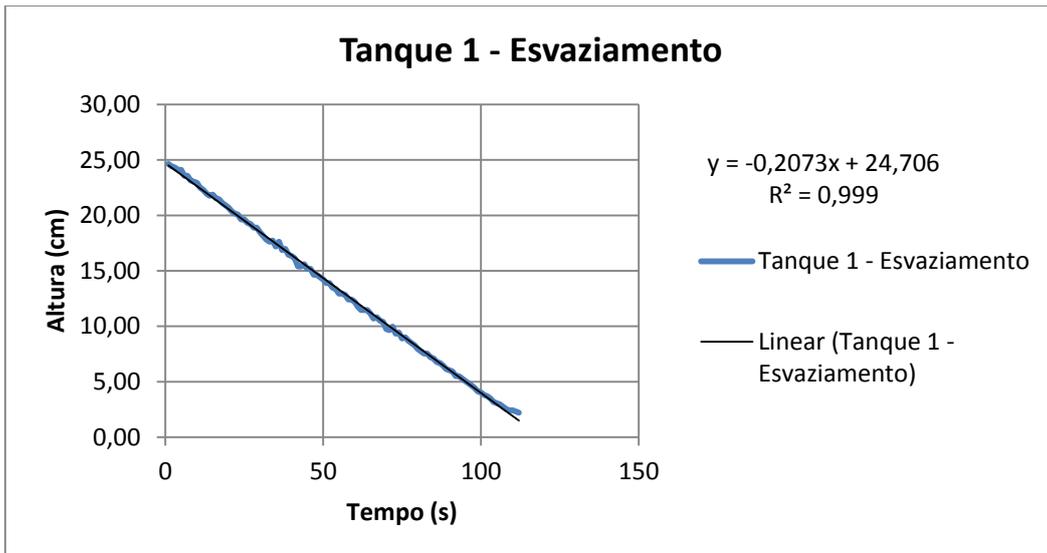


Figura 4-7: Teste para medir a vazão de esvaziamento do Tanque 1, na configuração inicial.

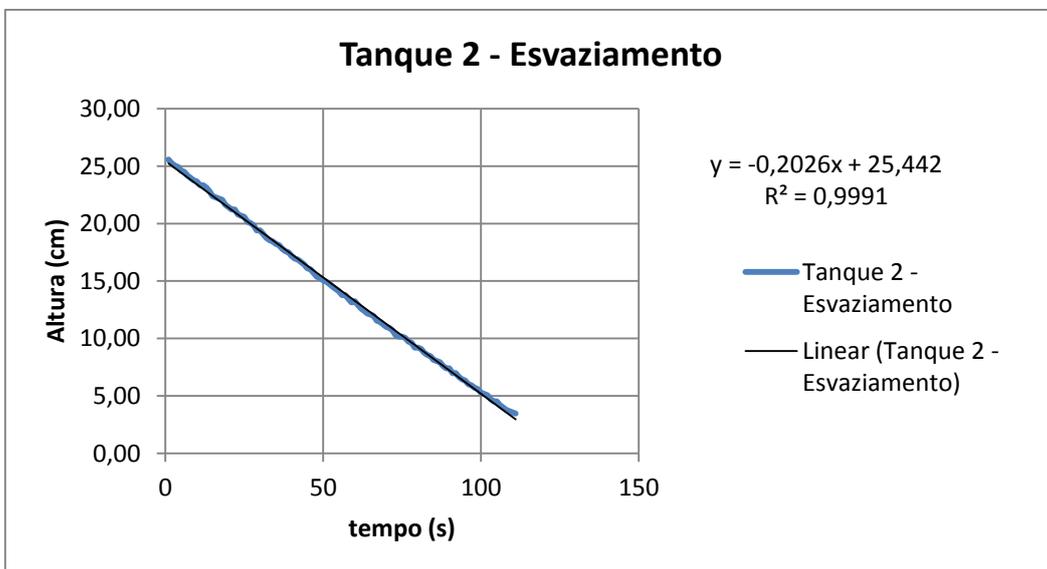


Figura 4-8: Teste para medir a vazão de esvaziamento do Tanque 2, na configuração inicial.

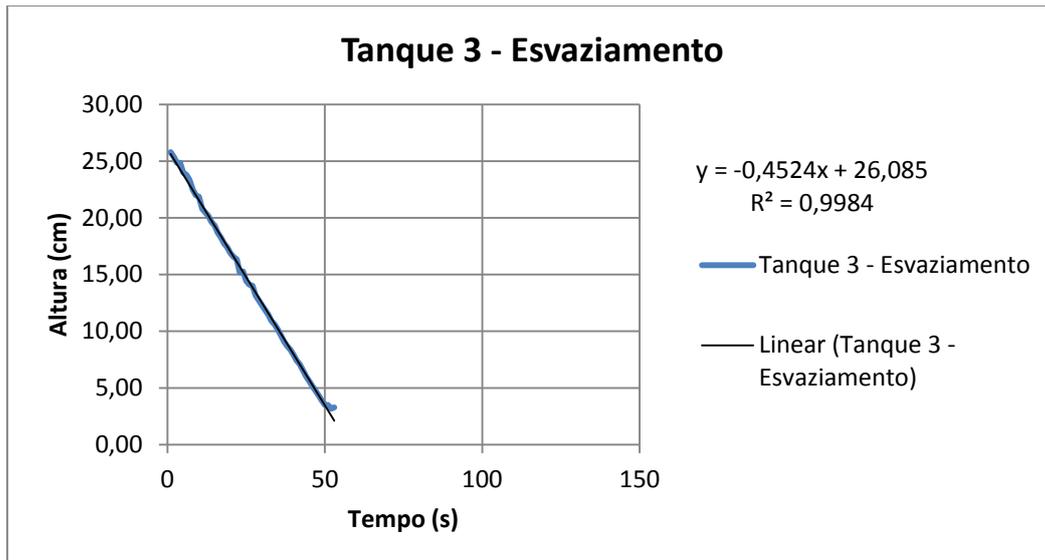


Figura 4-9: Teste para medir a vazão de esvaziamento do Tanque 3, na configuração inicial.

A escala de tempo foi mantida constante nos três gráficos para mostrar a diferença no tempo de esvaziamento entre os Tanques 1, 2 e 3.

A vazão pode ser calculada utilizando o coeficiente angular de cada reta e alguns fatores de conversão:

Do gráfico podemos deduzir que:

$$\text{Coeficiente Angular} = \alpha = \frac{\text{Altura [cm]}}{\text{Tempo [s]}}$$

Para tanques circulares, sabemos que o volume é dado por:

$$\text{Volume} = \pi R^2 h$$

O que nos leva a um fator de conversão de:

$$\frac{\text{Volume [cm}^3\text{]}}{\text{Altura [cm]}} = \pi (12,5)^2 [\text{cm}^2] = 490,8738$$

A vazão em [L/min] pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\text{Vazão [L/min]} = \alpha \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}} \right] \times 490,8738 \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}} \right] \times \frac{1}{1000} \left[\frac{\text{L}}{\text{cm}^3} \right] \times \frac{60}{1} \left[\frac{\text{s}}{\text{min}} \right]$$

A primeira coisa que se pode notar nos gráficos é a grande diferença no tempo de esvaziamento do tanque 3 em relação aos outros 2 tanques. Isso acontece porque a válvula na saída do tanque 3 é diferente, e provavelmente gera uma perda de carga bem

menor. Essa grande diferença nas vazões de saída dificulta que o tanque 3 atinja um estado estacionário, visto que sua válvula de saída deve ser ajustada de forma manual.

As vazões médias calculadas para os 3 tanques estão apresentadas na Tabela 5:

Tabela 5: Vazões calculadas a partir do Teste 1

	Coefficiente Angular (α)	R²	Vazão Média (L/min)
Tanque 1	0,2073	0,9990	6,10
Tanque 2	0,2026	0,9991	5,97
Tanque 3	0,4524	0,9984	13,32

Os 3 gráficos ficaram extremamente parecidos com retas, vide o valor de R² muito próximo de 1. Isso indica que a vazão praticamente não varia com relação a altura da coluna d'água, o que é algo não desejável. Sem uma faixa de vazão para se trabalhar, fica impossível aplicar um degrau na vazão de entrada e conseguir chegar a um novo estado estacionário.

A faixa de vazão citada algumas vezes acima é calculada usando a parte inicial e final do gráfico, como será feito a seguir. O gráfico de esvaziamento do Tanque 1 será dividido em 2 partes com alturas diferentes. A maior vazão de operação possível será dada pela parte do gráfico com maior altura da coluna d'água. De forma análoga, a menor vazão possível de operação será dada pela parte do gráfico com o menor valor da altura de coluna d'água. Qualquer vazão fora desse intervalo indicará que os tanques irão encher/esvaziar indefinidamente, sem atingir um estado estacionário.

O gráfico do Tanque 1 foi dividido em 2 faixas, uma na qual o nível de água estava acima de 20 cm, e outra na qual o nível de água estava abaixo de 8 cm. Ambas as faixas escolhidas têm aproximadamente o mesmo tamanho (cerca de 5 cm de coluna d'água), e podem ser visualizadas nas Figuras 4-10 e 4-11.

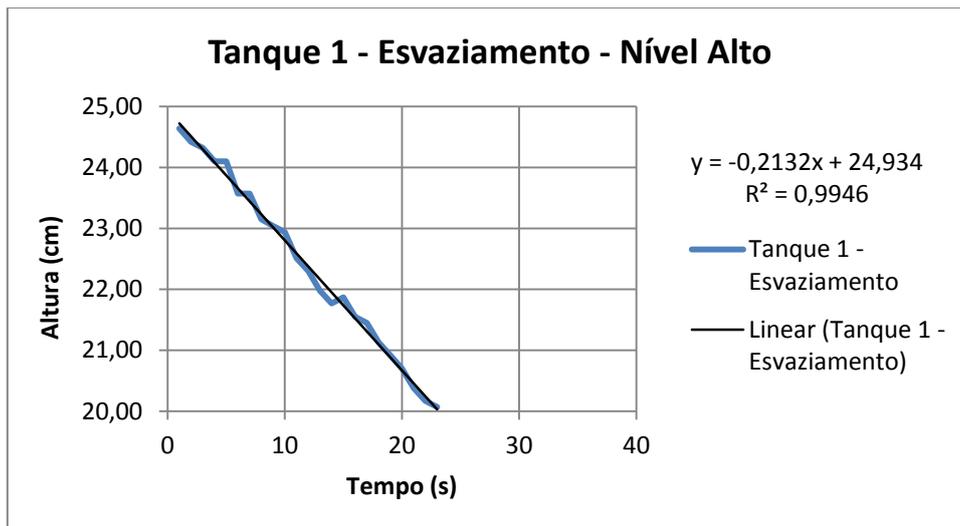


Figura 4-10: Detalhe do gráfico do Tanque 1 quando o nível está alto.

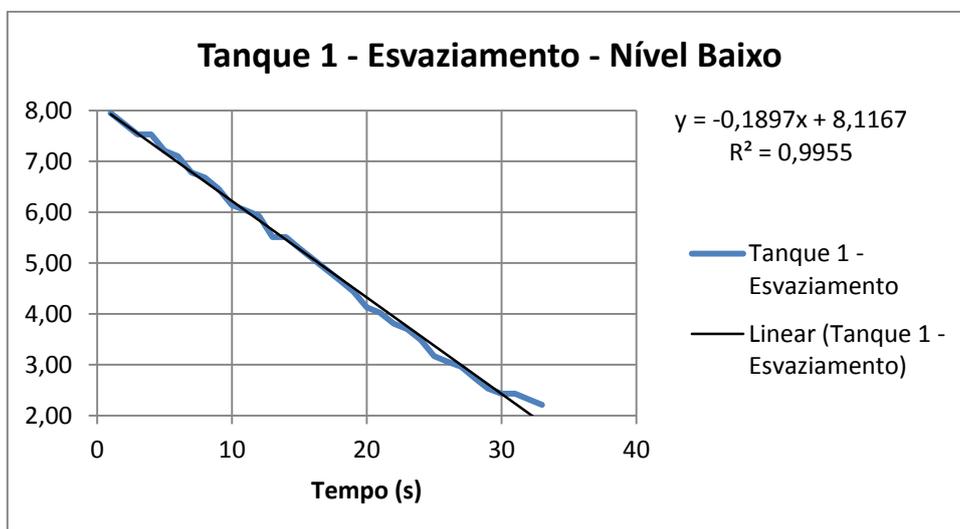


Figura 4-11: Detalhe do gráfico do Tanque 1 quando o nível está baixo.

Com os coeficientes angulares obtidos, as vazões de operação máxima e mínima foram calculadas, e encontram-se apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Faixa de vazão de operação do sistema, na configuração inicial

Vazão de Operação	Coefficiente Angular (α)	R^2	Vazão Calculada (L/min)
Vazão Mínima	0,1897	0,9955	5,59
Vazão Máxima	0,2132	0,9946	6,28

A faixa de operação para o Tanque 1 é de 5,6 L/min até 6,3 L/min, aproximadamente. Como o Tanque 2 tem um comportamento basicamente igual ao do Tanque 1, vamos assumir que a faixa de vazões calculada se aplique tanto para o primeiro quanto para o segundo tanque. Essa variação de 0,7 L/min, apesar de suficiente, ainda é bastante pequena para se aplicar um degrau. Devido a isso foi decidido diminuir o máximo possível a altura do sistema, de forma a aumentar essa janela de operação. Como o sistema foi montado em uma estrutura de prateleiras metálicas desmontáveis, existia uma certa folga para se aumentar ou diminuir a distância entre os tanques.

A fim de se aumentar a faixa de operação, a altura total do sistema foi diminuída em cerca de 40 cm. Isso foi conseguido diminuindo as alturas relativas entre os Tanques 1 e 2, e os Tanques 2 e 3 em 20 cm cada. A menor altura altera a coluna hidrostática gerada pela tubulação de saída/alimentação dos tanques. Dessa forma, o Teste 1 foi refeito usando a nova configuração para verificar se as alterações seriam suficientes.

4.2.2 – Testes – Configuração Modificada

A seguir estão apresentados os resultados obtidos no Teste 2, e também uma nova imagem (Figura 4-12) do sistema mostrando as novas alturas relativas entre o tanques.

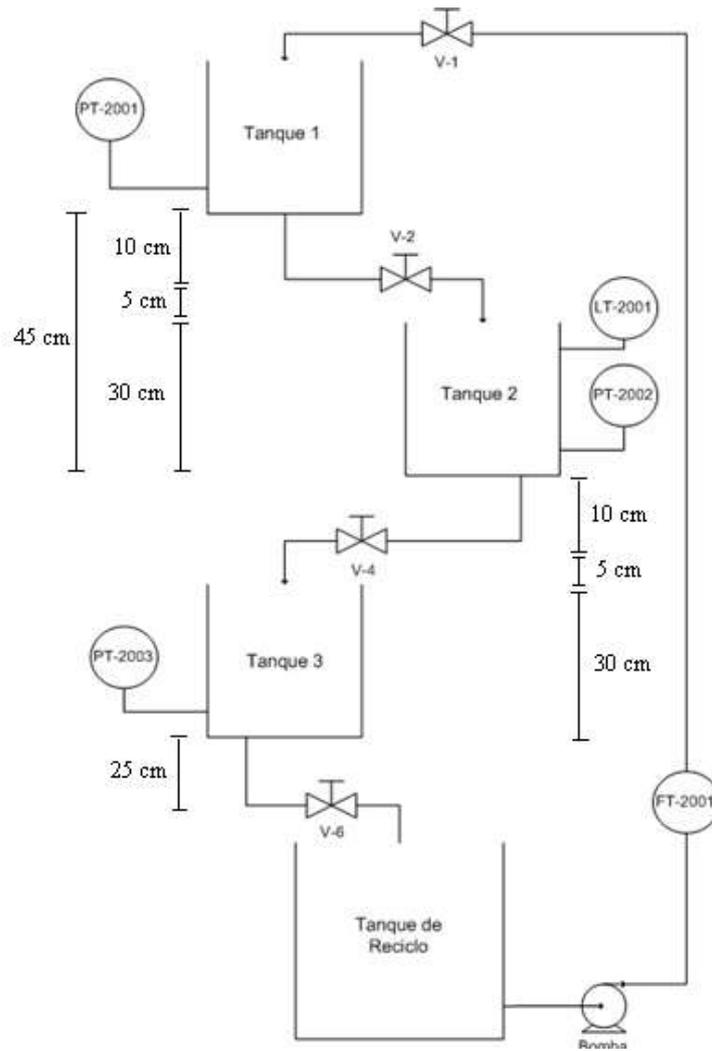


Figura 4-12: Nova configuração do sistema após mudanças.

- Teste 1 – Definição da Faixa de Vazão em Estado Estacionário – Configuração Modificada – Resultados:

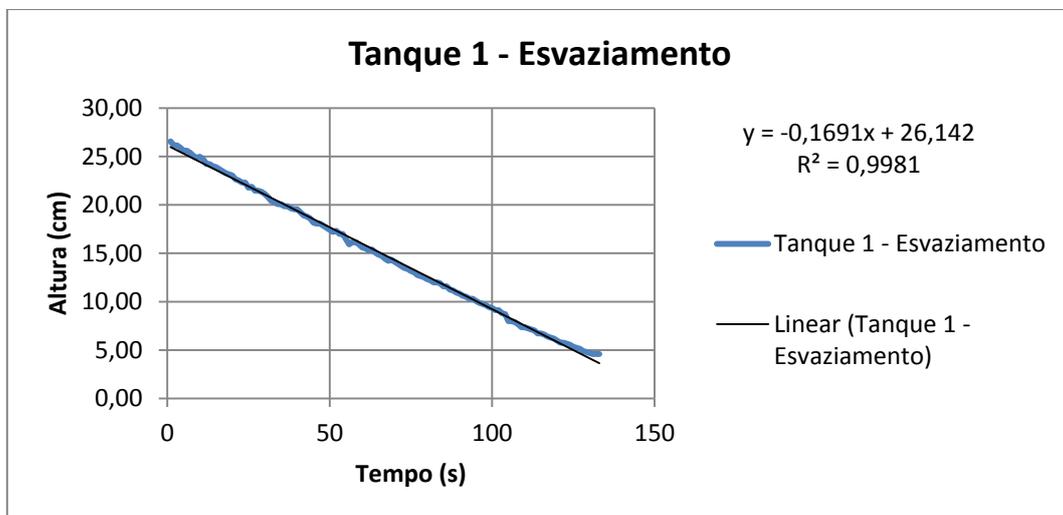


Figura 4-13: Teste para medir a nova vazão de esvaziamento do Tanque 1.

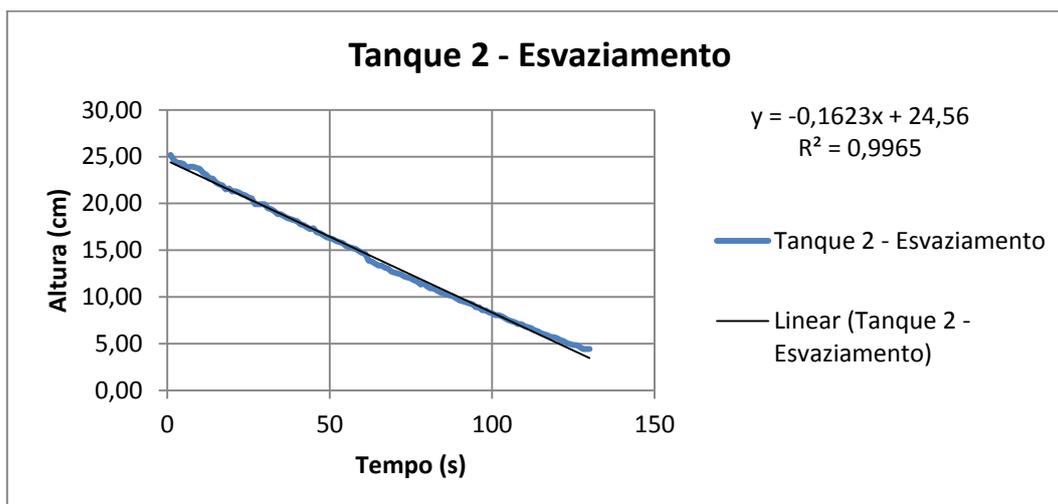


Figura 4-14: Teste para medir a nova vazão de esvaziamento do Tanque 2.

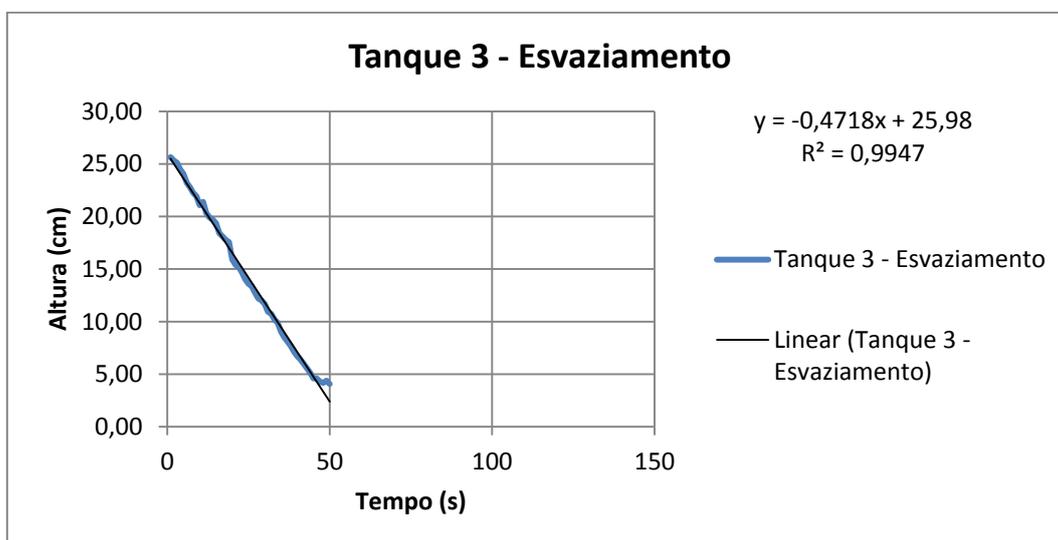


Figura 4-15: Teste para medir a nova vazão de esvaziamento do Tanque 3.

Tabela 7: Novas vazões médias após diminuição da altura do sistema.

	Coeficiente Angular (α)	R²	Nova Vazão Média (L/min)
Tanque 1	0,1691	0,9981	4,98
Tanque 2	0,1623	0,9965	4,78
Tanque 3	0,4718	0,9947	13,90

Para o cálculo da nova faixa de operação da vazão, foi feito o mesmo procedimento descrito anteriormente. O gráfico do Tanque 1 foi dividido em 2 áreas, uma aonde o nível da coluna d'água era alto, e a outra aonde o nível da coluna d'água

era baixo. As vazões deduzidas serão respectivamente a maior e a menor vazão de operação.

Como o Tanque 1 e o Tanque 2 apresentam um comportamento quase idêntico, os resultados obtidos para o tanque 1 podem ser considerados verdadeiros para o tanque 2.

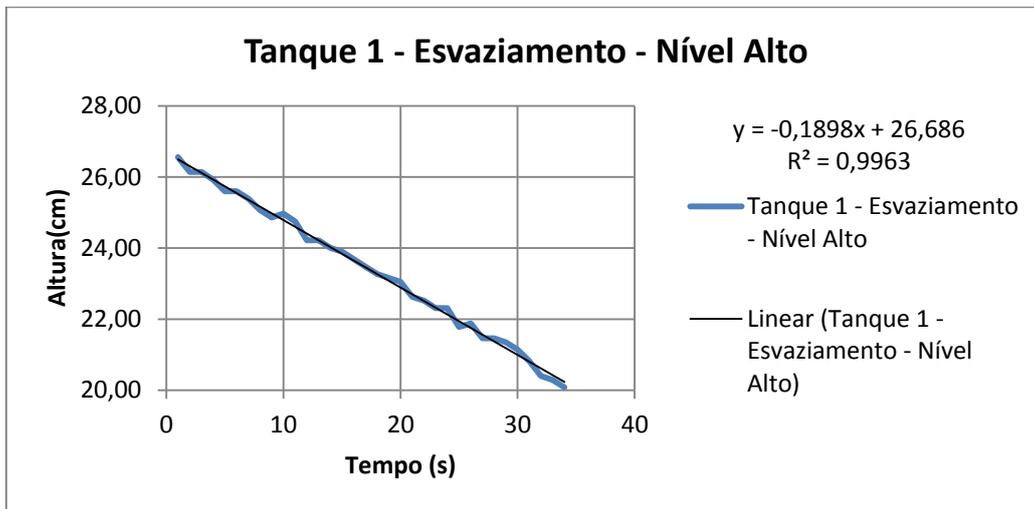


Figura 4-16: Zoom no novo gráfico do Tanque 1 quando o nível está alto.

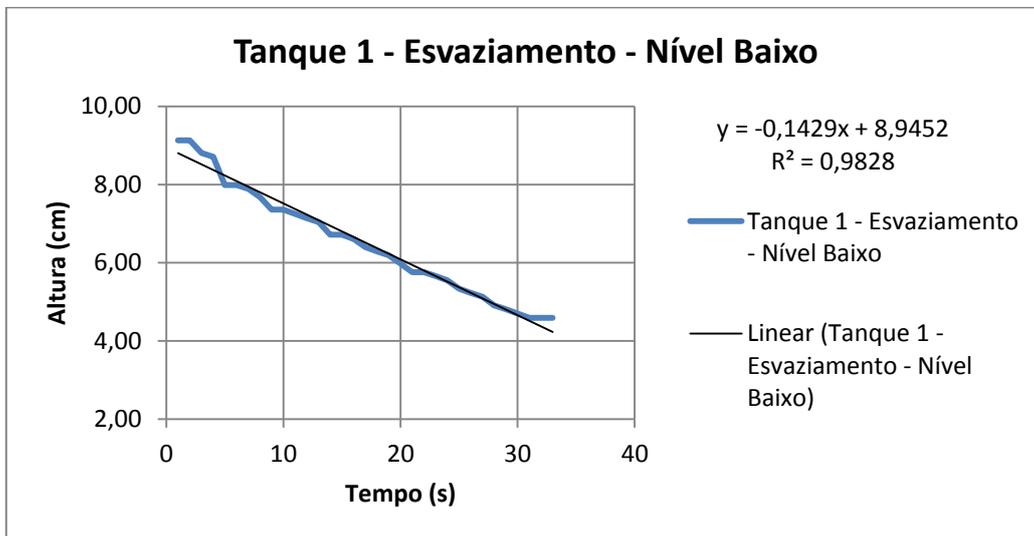


Figura 4-17: Zoom no novo gráfico do Tanque 1 quando o nível está baixo.

A nova faixa de operação da vazão foi calculada e encontra-se apresentada na Tabela 8.

Tabela 8: Nova faixa de operação calculada.

Vazão de Operação	Coefficiente Angular (α)	R²	Vazão Calculada (L/min)
Vazão Mínima	0,1429	0,9828	4,21
Vazão Máxima	0,1898	0,9963	5,59

Antes da mudança, o sistema permitia uma variação de até 0,7 L/min na vazão. Com a nova configuração essa faixa aumentou em 100% e ficou em 1,4 L/min, permitindo variar a vazão de 4,2 até 5,6 L/min e ainda chegar a um estado estacionário.

Mesmo parecendo pequena, essa mudança irá permitir uma maior liberdade na escolha do degrau aplicado no Teste 2.

- Testes 2 – Definição dos Parâmetros do Modelo do Processo – Resultados:

Durante a realização do Teste 2, um dos sensores de pressão, que estava conectado ao primeiro tanque (PT2001), parou de funcionar. Dessa forma, não foi possível monitorar todos os tanques durante o teste. O sensor de pressão PT2003 que estava instalado no Tanque 3 foi transferido para o Tanque 1. O sensor ultrassônico também foi transferido para o Tanque 1. Sendo assim, o Tanque 3 não tinha como ser monitorado e foi descartado desse teste. Sua válvula de saída ficou 100% aberta para evitar transbordamentos. As mudanças realizadas estão demonstradas na Figura 4-18.

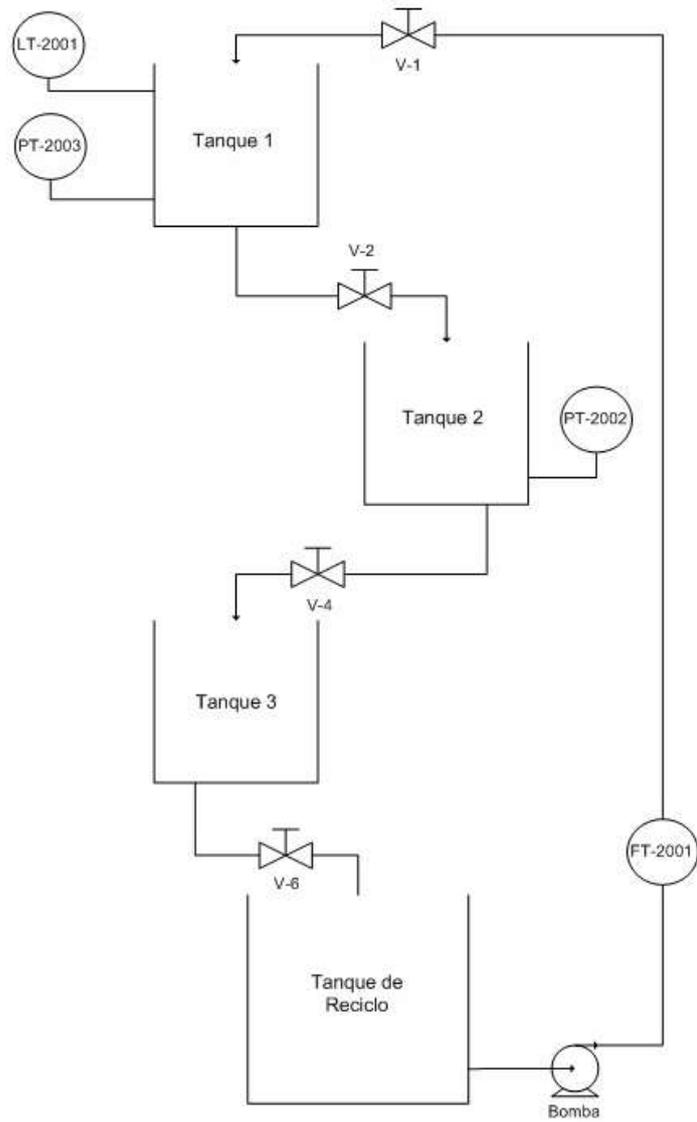


Figura 4-18: Novo posicionamento dos sensores após um dos sensores de pressão parar de funcionar.

A seguir estão representados os resultados obtidos durante a realização do Teste 2:

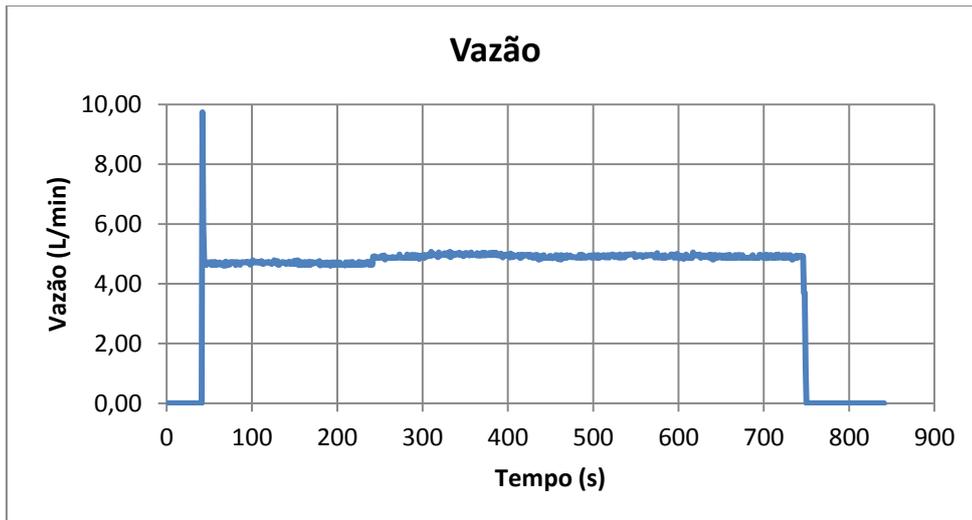


Figura 4-19: Degrau aplicado na vazão.

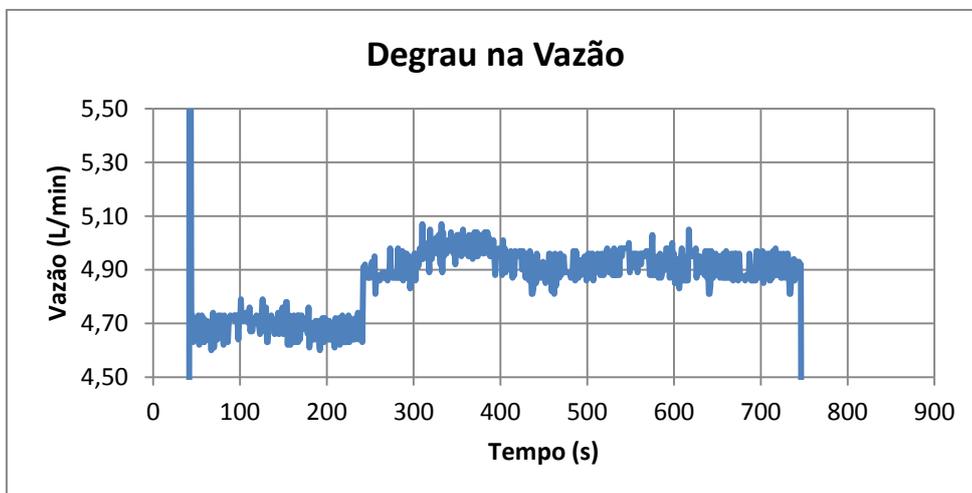


Figura 4-20: Detalhe do degrau aplicado na vazão.

A vazão do sistema foi aumentada de aproximadamente 4,7 L/min para 4,9 L/min. A resposta do sistema pode ser vista nos gráficos das Figuras 4-21 a 4-23 abaixo:

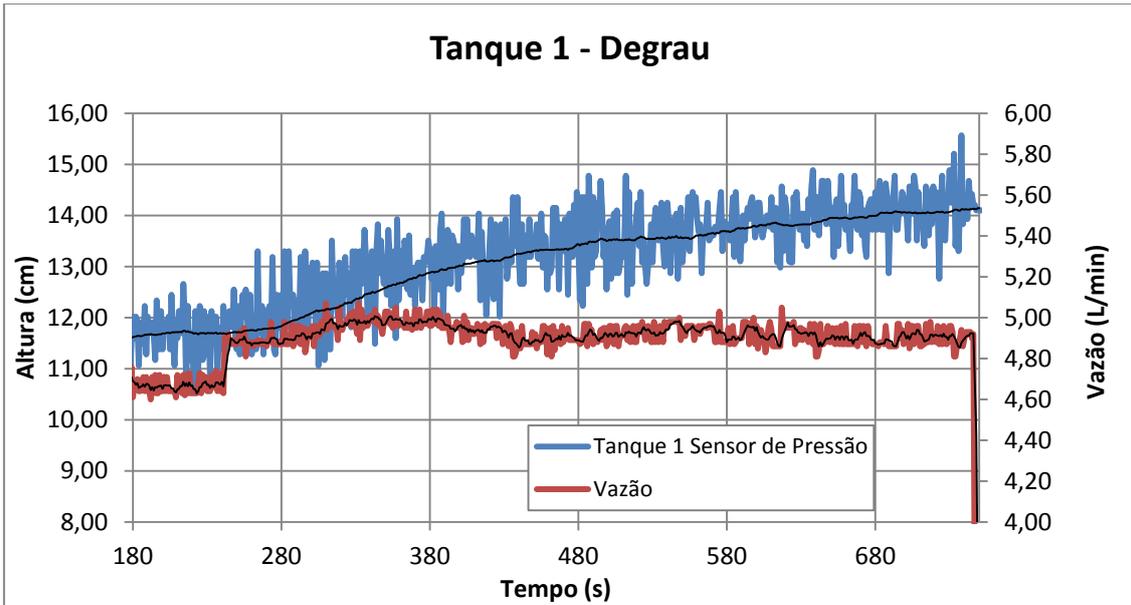


Figura 4-21: Resposta do Tanque 1 ao degrau aplicado na vazão de entrada, medida pelo sensor de pressão PT2003.

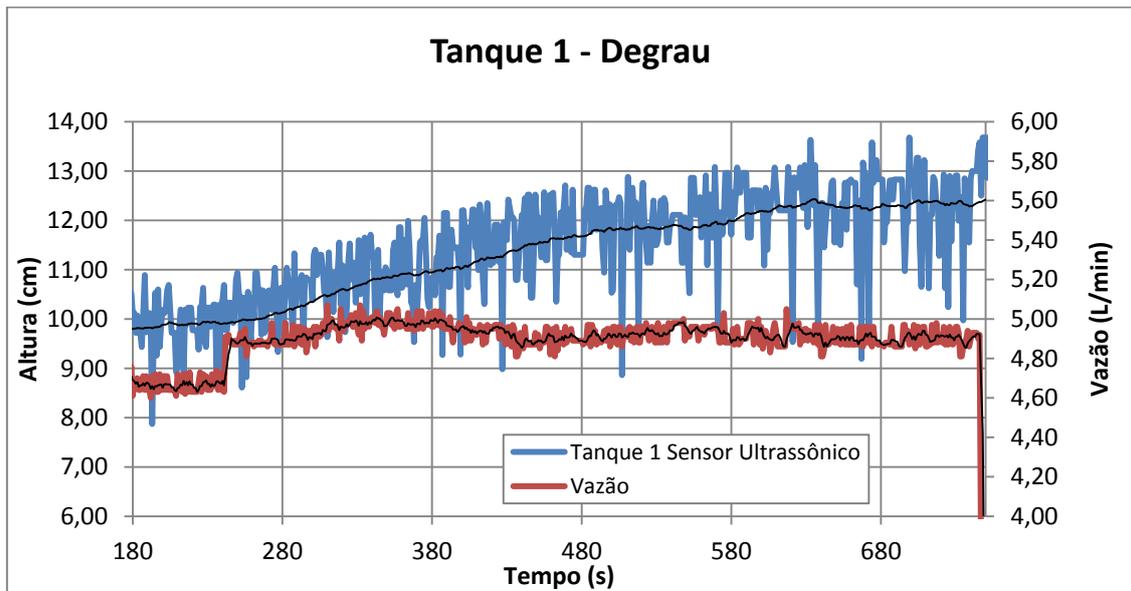


Figura 4-22: Resposta do Tanque 1 ao degrau aplicado na vazão de entrada, medida pelo sensor ultrassônico LT2001.

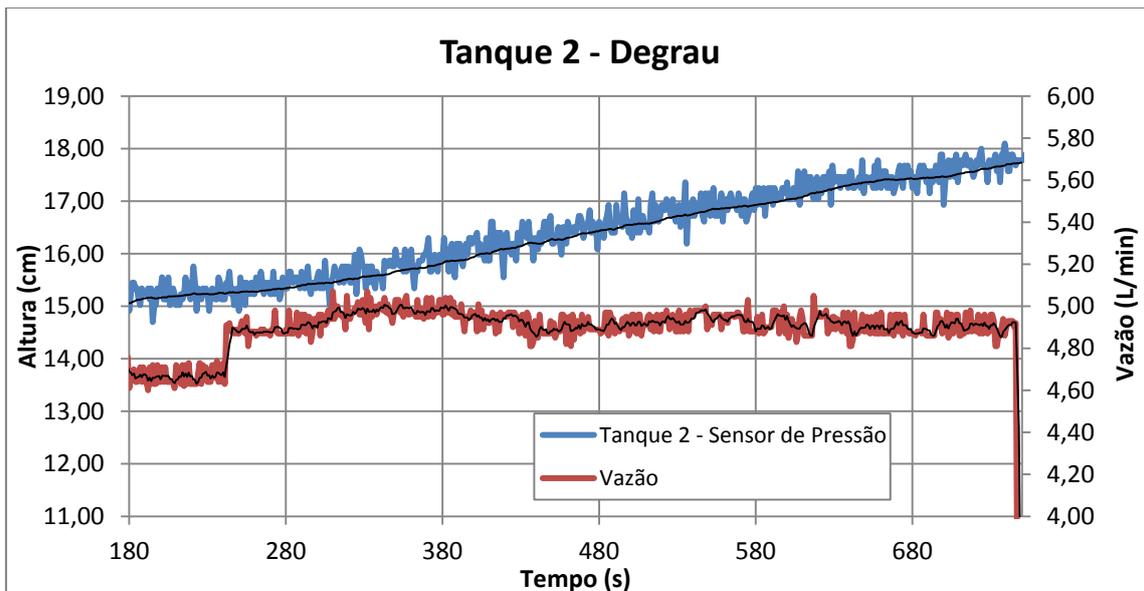


Figura 4-23: Resposta do Tanque 2 ao degrau aplicado na vazão, medida pelo sensor de pressão PT2002.

A primeira coisa que se pode notar é a diferença na quantidade de ruídos entre os Tanques 1 e 2. Uma possível explicação para isso acontecer é que o primeiro tanque, por estar numa posição mais alta, sofra mais com as vibrações do sistema, gerando uma quantidade maior de ruído durante as medições. Além do que, a válvula que alimenta o primeiro tanque encontra-se a uma altura ligeiramente maior em relação ao Tanque 1, do que as outras válvulas em relação aos outros tanques.

Para eliminar o ruído e obter uma curva mais limpa, a média móvel das curvas foi aplicada, e pode ser vista como a linha preta nos gráficos anteriores. A seguir elas são apresentadas sozinhas, a fim de se facilitar a visualização. Novamente, as medições do sensor pressão serão usadas, ao invés das obtidas pelo sensor ultrassônico, devido à menor quantidade de ruído obtida.

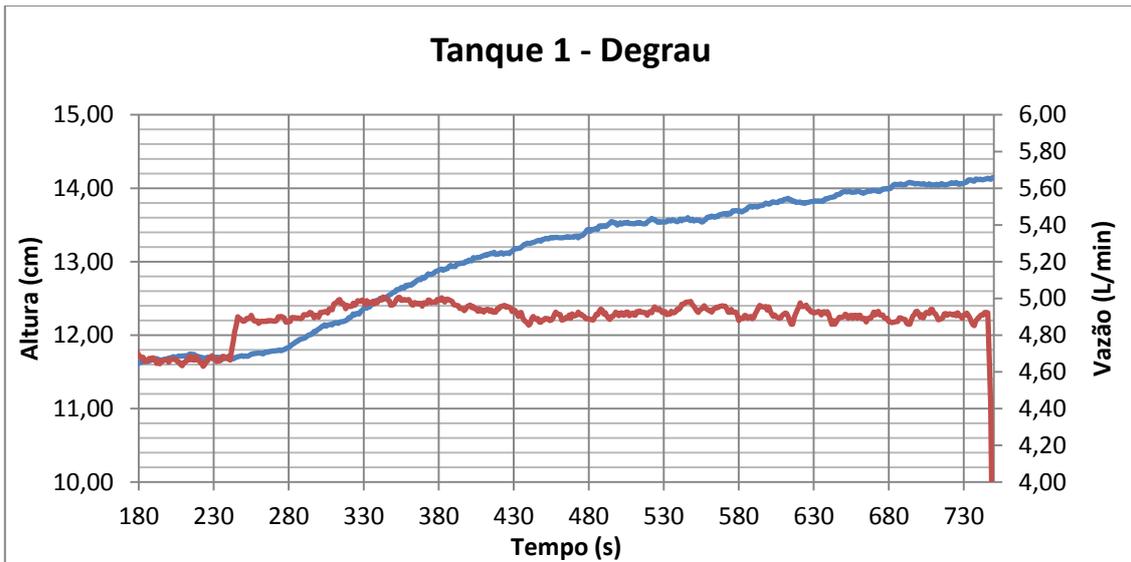


Figura 4-24: Detalhe da resposta do Tanque 1 ao degrau aplicado, medida pelo sensor de pressão PT2003.

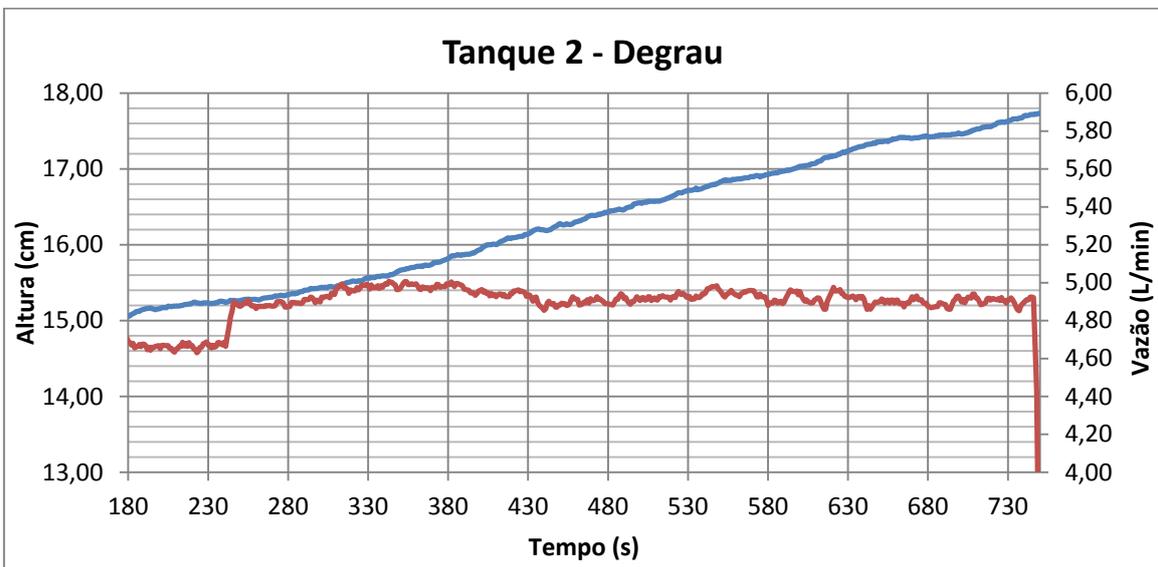


Figura 4-25: Detalhe da resposta do Tanque 2 ao degrau aplicado, medida pelo sensor PT2002.

Da modelagem feita no capítulo 3, sabemos que a dinâmica do Tanque 1 é uma função de primeira ordem, enquanto que a do segundo tanque é de segunda ordem.

Sendo assim, os gráficos das Figuras 4-21 e 4-23 serão usados para estimar os parâmetros de cada tanque, e descobrir a resistência característica das válvulas usadas.

Da Equação (4), temos a função de transferência do Tanque 1:

$$\frac{H_1'(s)}{F_0'(s)} = \frac{R}{(ARs + 1)}$$

E juntando as equações (4) e (5) temos a função de transferência do Tanque 2 em relação à vazão inicial “F₀”:

$$\frac{H'_2(s)}{F'_0(s)} = \frac{R}{(ARs + 1)^2}$$

O ganho dos dois tanques é dado pela resistência da válvula, portanto, a variação na altura do Tanque 1 deve ser igual à variação na altura do Tanque 2. O degrau aplicado, mostrado na Figura 4-20, é de aproximadamente 0,2 L/min, que equivale a 3,33 mL/s. A conversão de unidades foi feita para manter a coerência com as unidades mostradas na modelagem da Seção 3.1.

A variação de altura obtida nos Tanques 1 e 2 foi de aproximadamente 2,5 cm. Com esse dado e sabendo o valor do degrau aplicado na vazão, é possível calcular o ganho das duas funções de transferência citadas logo acima (que também é a resistência da válvula “R”).

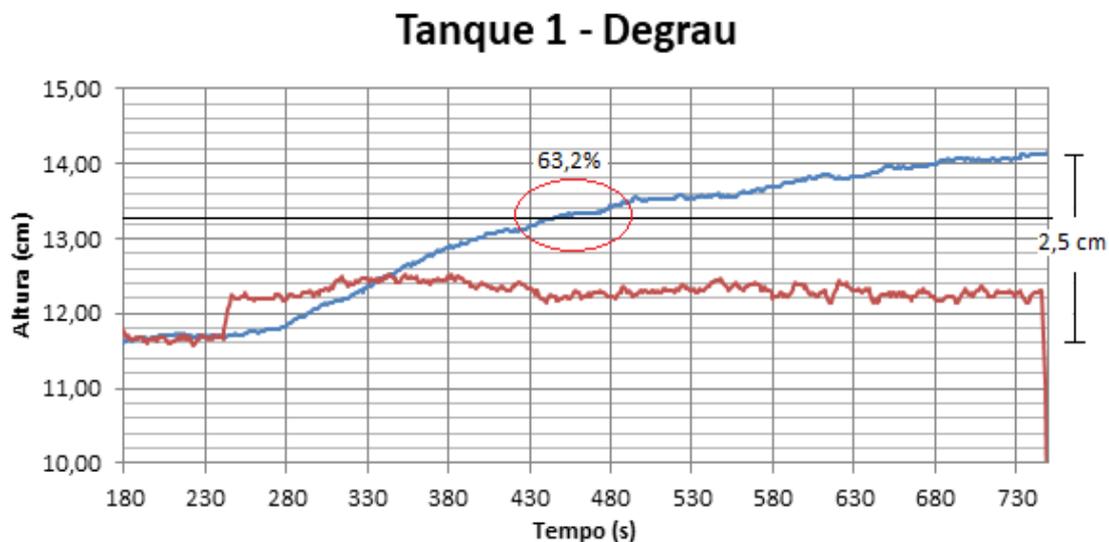


Figura 4-26: Estimação dos parâmetros dos tanques 1 e 2 a partir dos dados obtidos no Teste 2.

$$\Delta = \text{Ganho} \times (\text{Magnitude do Degrau})$$

$$2,5 = R \times 3,33$$

$$R = 0,75 \frac{\text{cm}}{\text{cm}^3/\text{s}}$$

A constante de tempo dos tanques também pode ser estimada pelo gráfico, sendo representada graficamente pelo tempo na qual a altura atinge 63,2% da altura máxima. Como se pode observar na Figura 4-26, a constante de tempo do Tanque 1 é aproximadamente 210 s.

$$\tau_1 \cong 210 \text{ s}$$

As funções de transferência para os tanques 1 e 2, calculadas a partir de dados experimentais, são:

$$\frac{H'_1(s)}{F'_0(s)} = \frac{0,75}{(210 \text{ s} + 1)}$$

$$\frac{H'_2(s)}{F'_0(s)} = \frac{0,75}{(210 \text{ s} + 1)^2}$$

Não foram obtidos resultados para o Tanque 3 porque a válvula instalada na sua saída era completamente diferente das outras válvulas do processo, além dele estar instalado com Alturas diferentes dos Tanques 1 e 2.

Capítulo 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES

O objetivo desse trabalho era criar uma planta automatizada de baixo custo, na qual sensores provenientes da plataforma Arduino pudessem ser instalados e testados.

A montagem da planta foi concluída sem problemas, fazendo uso de uma estrutura metálica que permite mudar a altura do sistema dependendo da necessidade. Essa liberdade de escolha na altura relativa dos tanques pode ser útil em futuras modificações que venham a ser feitas no sistema, assim como foi útil nesse trabalho.

Tanto a instalação física quanto a instalação elétrica dos sensores, apesar de simples, apresentaram alguns desafios. A sensibilidade que alguns dos sensores apresentam à água e a distância até o Arduino fez com que algumas medidas tivessem que ser tomadas, como o uso do tubo de aço e da madeira como suporte para os sensores de pressão e ultrassônico.

Usando a tela de supervisão para avaliar os dados obtidos na calibração dos sensores, foi possível concluir que o sensor ultrassônico HC-SR é mais preciso que o sensor de pressão MPX5010dp na sua medição, porém, a menos que o sistema esteja estático, esse sensor gera uma quantidade de ruído muito maior.

A partir do resultado dos dois testes realizados, ficou claro que todos os sensores conseguiram se comunicar sem problemas com o iFix via OPC. E, com os gráficos plotados, pôde-se notar que o sensor ultrassônico, mesmo sendo mais preciso, é menos apropriado que o sensor de pressão para realizar as medições de nível em um projeto de dinâmica.

Apesar dos sensores terem sido instalados e colocados para funcionar corretamente, o ambiente em que eles estavam inseridos não era ideal, ocorrendo eventuais contatos entre os sensores e as fiações com a água dos tanques. Com isso, um dos sensores de pressão parou de funcionar, e alguns mau contatos começaram a acontecer, principalmente com a fiação do sensor de vazão. Sendo assim, o uso da plataforma Arduino e de seus sensores em sistemas que envolvam água é válido, porém requer alguns cuidados extras, que devem ser seguidos para evitar problemas.

Finalmente, a partir da experiência adquirida nesse trabalho foi criado um tutorial de como conectar o Arduino ao iFix via OPC, incluindo um passo a passo e alguns comentários sobre os principais problemas enfrentados, visto que existe pouco/nenhum material sobre isso disponível na internet. Além disso, também foi feito

um suporte para escrever os códigos usados pela biblioteca OPC, que requerem comandos específicos e muitas vezes confusos para quem nunca utilizou. Esses materiais de apoio poderão ajudar futuros alunos que venham a utilizar a comunicação Arduino-iFix, e também ajudar os alunos do EQ Hands-On, que fazem uso do iFix em seus projetos.

5.1 – Sugestões Para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, para melhorar o projeto e torná-lo mais completo, ficam:

- Implementar um sistema de controle de nível no próprio Arduino, cujos parâmetros possam ser modificados em tempo real pelo sistema supervisorio.
- Encapar melhor as fiações dos sensores, e, se possível, protegê-los também, visto que quase todos eles são sensíveis à água.
- Colocar a bica de saída de cada tanque encostada na parede, de forma que a água escorra pela parede e gere menos interferência ao cair no tanque.
- Trocar a bomba de lugar, com intuito de diminuir vibração no sistema.

Capítulo 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANÔNIMO. “How Well Are We Preparing ChE Students for Industry?”. **Chemical Engineering Progress**, v.110, n.4, pp. 4-5, 14-15, Apr. 2014.
- [2] STEPHANOPOULOS, G. **Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice**. First Edition, New Jersey, Prentice Hall, 1984.
- [3] COUGHANOWR, D. R., LEBLANC, S. E. **Process Systems Analysis and Control**. Third Edition, Boston, McGrawHill, 2009.
- [4] MORRIS, A. S. **Principles of Measurement and Instrumentation**. Second Edition, New York, Prentice Hall, 1993.
- [5] SECCHI, A. R. **Notas de aula da disciplina de Modelagem e Simulação de Processos**. Disponível em: <http://www2.peq.coppe.ufrj.br/Pessoal/Professores/Arge/COQ790/Modelagem_Processos.pdf>. Acessado em: 03 maio 2017, 11:19:51.
- [6] BOYER, S. A. **SCADA Supervisory Control and Data Acquisition**. Instrument Society of America. 1993
- [7] ARDUINO. “**Language Reference**”. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Reference/HomePage>>. Acessado em: 08 março 2017, 09:27:00.
- [8] “Datasheet” do Sensor de Pressão MPX5010dp (disponível em anexo).
- [9] CIRCUITS4YOU. **Water Level Measurement Using Arduino**. Disponível em: <<http://circuits4you.com/2016/05/13/water-level-measurement-arduino/>>. Acessado em: 01 abril 2017, 09:19:00
- [10] “Datasheet” do Sensor de Fluxo YF-S201 (disponível em anexo).
- [11] “Datasheet” do Sensor Ultrassônico HC-SR04 (disponível em anexo).

[12] MENEZES, A. P. N., SILVA, V. R., SOUZA, N. M., *et al.* “EQ Hands-On: Automação de Baixo Custo para Plantas Piloto”. In: **XXXVIII JIC - Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Tecnológica, Artística e Cultural**, p.91-101, Rio de Janeiro.

[13] OMEGA TM. **Diferença Entre Medidores de Vazão Ultrassônicos por Efeito Doppler e Tempo de Transito**. Disponível em: <<http://br.omega.com/artigos-tecnicos/dif-between-doppler-transit-time-ultrasonic-flow-meters.html>>. Acessado em: 11 maio 2017, 08:00:50.

[14] DIYHACKING. **Flow Rate Sensor Interfacing: How to Measure Liquid with an Arduino**. Disponível em: <<https://diyhacking.com/arduino-flow-rate-sensor/>>. Acessado em: 09 março 2017, 10:44:00.

[15] ARDUINO. “**Arduino – ArduinoBoardUno**”. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>. Acessado em: 08 março 2017, 11:00:00

Anexo 1 – Código Usado no Arduino

```
// Include OPC Libraries.
#include <OPC.h>
#include <Bridge.h>
#include <Ethernet.h>
#include <SPI.h>

// Include FlowHall Sensor Library.
#include <flowHall.h>

// Declaring the name of the OPC object.
OPCSerial aOPCSerial;

// WORKAROUND for collect2.exe: error: ld returned 5 exit status
byte a = 0;byte b = 0;byte c = 0;byte d = 0;byte e = 0;byte f = 0;byte g = 0;byte h = 0;byte i = 0;

// ULTRASONIC SENSOR VARIABLES
float duration; // This variable tells how long it takes for the sonic wave to travel and come back.
float distance; // Measure the distance between the sensor and the obstacle (cm).
float level_ultras; // Measures the level of the tank (cm).
byte triggerPin = 2; // Connect the Trigger PIN to PIN 2.
byte echoPin = 3; // Connect the Echo PIN to PIN 3.

// PRESSURE SENSOR VARIABLES
float level_1; // Variable that will measure the water level of the first tank (cm), it's data comes from
ANALOG PIN 0.

float pressure_1; // Variable that will measure the difference in pressure between the 2 entrances.

float level_2; // Variable that will measure the water level of the second tank (cm), it's data comes
from ANALOG PIN 1.

float pressure_2; // Variable that will measure the difference in pressure between the 2 entrances.

float level_3; // Variable that will measure the water level of the third tank (cm), it's data comes from
ANALOG PIN 2.

float pressure_3; // Variable that will measure the difference in pressure between the 2 entrances.

// FLOWRATE SENSOR VARIABLES (EXCLUSIVE LIBRARY)
flowHall sensor0(9, 6.3); // Define a 'sensor0' in the flowHall library, which is connected to PIN 9, and
uses a constant o 6,3 to calculate the Flowrate.

// OPC Routines

// ULTRASONIC LEVEL ROUTINE
float callback_ultrasonic(const char *itemID, const opcOperation opcOP, const float value)
{
  if (opcOP == opc_opread)
  {
    digitalWrite(triggerPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(triggerPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(triggerPin, LOW);
    duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
    distance = (duration * 340 * 0.0001)/2;
    level_ultras = 33 - distance - (2);
  }
}
```

```

    return level_ultras;
}

else {}
}

// PRESSURE LEVEL ROUTINES
float callback_pressure_1(const char *itemID, const opcOperation opcOP, const float value)
{
    if (opcOP == opc_opread)
    {
        pressure_1 = analogRead(A0)- 32;
        level_1 = ((pressure_1 * 100)/941) + (3);
        return level_1;
    }

    else {}
}

float callback_pressure_2(const char *itemID, const opcOperation opcOP, const float value)
{
    if (opcOP == opc_opread)
    {
        pressure_2 = analogRead(A1)- 32;
        level_2 = ((pressure_2 * 100)/941) + (3);
        return level_2;
    }

    else {}
}

float callback_pressure_3(const char *itemID, const opcOperation opcOP, const float value)
{
    if (opcOP == opc_opread)
    {
        pressure_3 = analogRead(A2)- 32;
        level_3 = ((pressure_3 * 100)/941) + (3);
        return level_3;
    }

    else {}
}

// FLOWRATE ROUTINE
float callback_flowrate(const char *itemID, const opcOperation opcOP, const float value)
{
    return sensor0.getFlowLmin();
}

// RANDOM ROUTINE
bool callback_bool(const char *itemID, const opcOperation opcOP, const bool value)
{
    if (opcOP == opc_opwrite) { }
    else {
        if (!strcmp(itemID, "item_bool_true")) return true;
        else if (!strcmp(itemID, "item_bool_false")) return false;
        else if (!strcmp(itemID, "item_bool_random")) return random(0,2);
    }
}

```

```

// SETUP
void setup()
{
  Serial.begin(9600);      // Sets the serial data transmission.

  pinMode(triggerPin, OUTPUT); // Sets the Trigger PIN as an OUTPUT (ULTRASONIC SENSOR).
  pinMode(echoPin, INPUT);    // Sets the Echo PIN as an INPUT (ULTRASONIC SENSOR).

  // flowHall library 'sensor0'
  sensor0.begin(); // Flow = Freq/constant constant = 6.30

  // Open OPC.Serial
  aOPCSerial.setup();

  // Declare your OPC Items
  aOPCSerial.addItem("LT_ULTRASONIC", opc_read, opc_float, callback_ultrasonic);
  aOPCSerial.addItem("FT01", opc_read, opc_float, callback_flowrate);
  aOPCSerial.addItem("LT01", opc_read, opc_float, callback_pressure_1);
  aOPCSerial.addItem("LT02", opc_read, opc_float, callback_pressure_2);
  aOPCSerial.addItem("LT03", opc_read, opc_float, callback_pressure_3);
  aOPCSerial.addItem("BOOL", opc_read, opc_bool, callback_bool);
}

// LOOP
void loop()
{
  // Necessary for the OPC to work
  aOPCSerial.processOPCCommands();
}

```

Anexo 2 – Datasheet Sensor de Pressão MPX5010dp

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

Order this document
by MPX5010/D



Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated

The MPX5010 series piezoresistive transducer is a state-of-the-art monolithic silicon pressure sensor designed for a wide range of applications, but particularly those employing a microcontroller or microprocessor with A/D inputs. This patented, single element transducer combines advanced micromachining techniques, thin-film metallization, and bipolar processing to provide an accurate, high level analog output signal that is proportional to the applied pressure.

Features

- 5.0% Maximum Error over 0° to 85°C
- Ideally Suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems
- Patented Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Durable Epoxy Unibody Element
- Temperature Compensated over -40° to +125°C

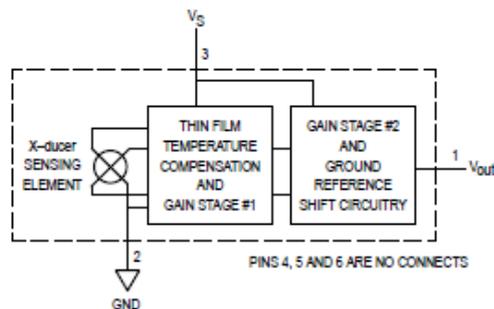


Figure 1. Fully Integrated Pressure Sensor Schematic

MAXIMUM RATINGS(1)

Parameters	Symbol	Value	Unit
Overpressure ⁽²⁾ (P1 > P2)	P _{max}	75	kPa
Burst Pressure ⁽²⁾ (P1 > P2)	P _{burst}	100	kPa
Storage Temperature	T _{stg}	-40 to +125	°C
Operating Temperature	T _A	-40 to +125	°C

1. T_C = 25°C unless otherwise noted.

2. Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

Senseon and X-ducer are trademarks of Motorola, Inc.

REV 2

© Motorola, Inc. 1997

MPX5010 SERIES

INTEGRATED
PRESSURE SENSOR
0 to 10 kPa (0 to 1.45 psi)
0.2 to 4.7 V OUTPUT



BASIC CHIP
CARRIER ELEMENT
CASE 867-08, STYLE 1



DIFFERENTIAL
PORT OPTION
CASE 867C-05, STYLE 1

PIN NUMBER			
1	V _{out}	4	N/C
2	Gnd	5	N/C
3	V _S	6	N/C

NOTE: Pins 4, 5, and 6 are internal device connections. Do not connect to external circuitry or ground. Pin 1 is noted by the notch in the Lead.



MPX5010 SERIES

OPERATING CHARACTERISTICS ($V_S = 5.0$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, $P_1 > P_2$)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range ⁽¹⁾	P_{OP}	0	—	10	kPa
Supply Voltage ⁽²⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	Vdc
Supply Current	I_o	—	7.0	10	mAdc
Minimum Pressure Offset ⁽³⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{off}	0	0.2	0.425	Vdc
Full Scale Output ⁽⁴⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{FSO}	4.475	4.7	4.925	Vdc
Full Scale Span ⁽⁵⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{FSS}	—	4.5	—	Vdc
Accuracy ⁽⁶⁾	—	—	—	± 5.0	% V_{FSS}
Sensitivity	V/P	—	450	—	mV/kPa
Response Time ⁽⁷⁾	t_R	—	1.0	—	ms
Output Source Current at Full Scale Output	I_{O+}	—	0.1	—	mAdc
Warm-Up Time ⁽⁸⁾	—	—	20	—	ms
Offset Stability ⁽⁹⁾	—	—	± 0.5	—	% V_{FSS}

MECHANICAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Weight, Basic Element (Case 867)	—	—	4.0	—	Grams
Common Mode Line Pressure ⁽¹⁰⁾	—	—	—	690	kPa

NOTES:

- 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.
- Device is ratiometric within this specified excitation range.
- Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
- Full Scale Output (V_{FSO}) is defined as the output voltage at the maximum or full rated pressure.
- Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
- Accuracy (error budget) consists of the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C .
 - ToSpan: Output deviation over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .
 - ToOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .
 - Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of V_{FSS} , at 25°C .
- Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
- Warm-up is defined as the time required for the product to meet the specified output voltage after the Pressure has been stabilized.
- Offset stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.
- Common mode pressures beyond what is specified may result in leakage at the case-to-lead interface.

ON-CHIP TEMPERATURE COMPENSATION, CALIBRATION AND SIGNAL CONDITIONING

Figure 2 illustrates the Differential/Gauge Sensing Chip in the basic chip carrier (Case 867). A fluorosilicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the sensor diaphragm.

The MPX5010 series pressure sensor operating characteristics, and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media, other than dry air, may have adverse effects on sensor performance and long-term reliability. Contact the factory for information

regarding media compatibility in your application.

Figure 3 shows a typical decoupling circuit for interfacing the integrated sensor to the A/D input of a microprocessor. Proper decoupling of the power supply is recommended.

Figure 4 shows the sensor output signal relative to pressure input. Typical, minimum, and maximum output curves are shown for operation over a temperature range of 0° to 85°C using the decoupling circuit below. (The output will saturate outside of the specified pressure range.)

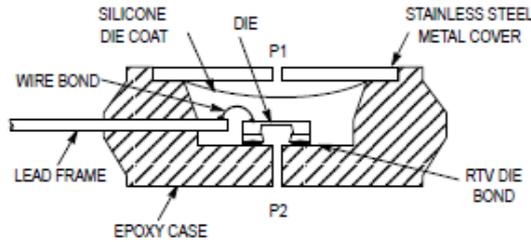


Figure 2. Cross-Sectional Diagram (Not to Scale)

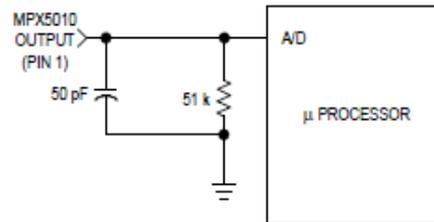


Figure 3. Typical Decoupling Filter for Sensor to Microprocessor Interface

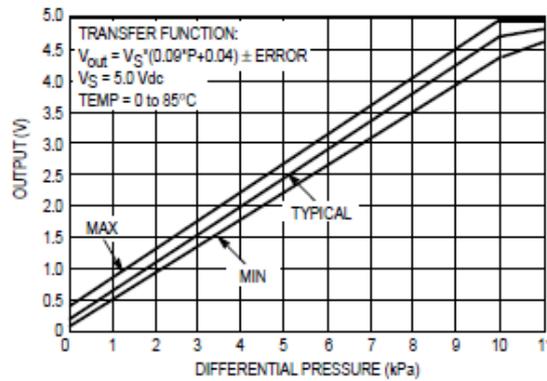


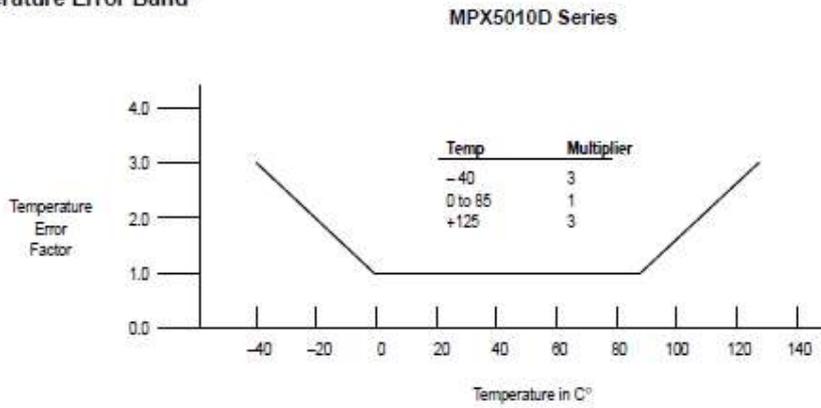
Figure 4. Output versus Pressure Differential

MPX5010 SERIES

Transfer Function (MPX5010D)

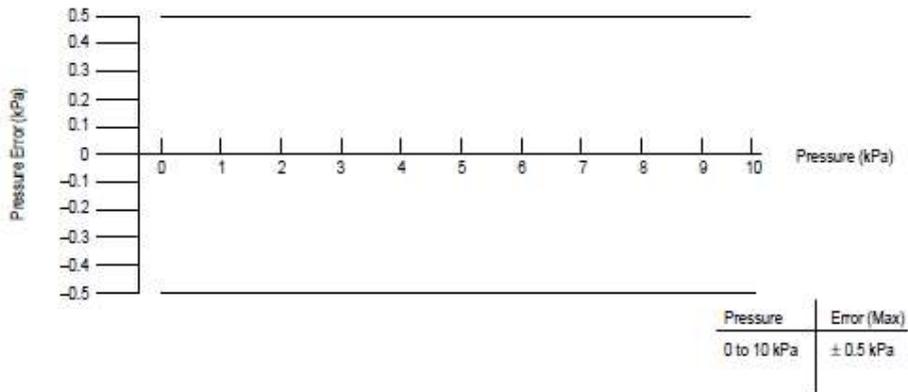
Nominal Transfer Value: $V_{out} = V_S \times (0.09 \times P + 0.04)$
 $\pm (\text{Pressure Error} \times \text{Temp. Factor} \times 0.09 \times V_S)$
 $V_S = 5.0 \text{ V} \pm 0.25 \text{ Vdc}$

Temperature Error Band



NOTE: The Temperature Multiplier is a linear response from 0° to -40°C and from 85° to 125°C.

Pressure Error Band



MPX5010 SERIES**PRESSURE (P1)/VACUUM (P2) SIDE IDENTIFICATION TABLE**

Motorola designates the two sides of the pressure sensor as the Pressure (P1) side and the Vacuum (P2) side. The Pressure (P1) side is the side containing fluoro silicone gel which protects the die from harsh media. The Motorola MPX

pressure sensor is designed to operate with positive differential pressure applied, $P1 > P2$.

The Pressure (P1) side may be identified by using the table below:

Part Number	Case Type	Pressure (P1) Side Identifier
MPX5010D	867-08	Stainless Steel Cap
MPX5010DP	867C-05	Side with Part Marking
MPX5010GP	867B-04	Side with Port Attached
MPX5010GVP	867D-04	Stainless Steel Cap
MPX5010GS	867E-03	Side with Port Attached
MPX5010GVS	867A-04	Stainless Steel Cap
MPX5010GSX	867F-03	Side with Port Attached
MPX5010GVSX	867G-03	Stainless Steel Cap

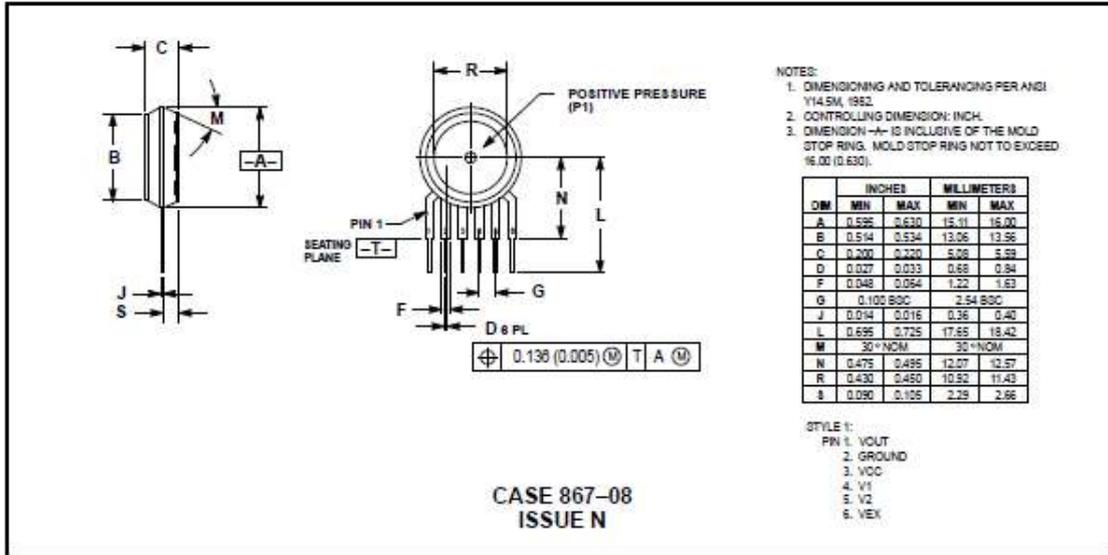
ORDERING INFORMATION

The MPX5010 pressure sensor is available in differential and gauge configurations. Devices are available in the basic element package or with pressure port fittings that provide printed circuit board mounting ease and barbed hose pressure connections.

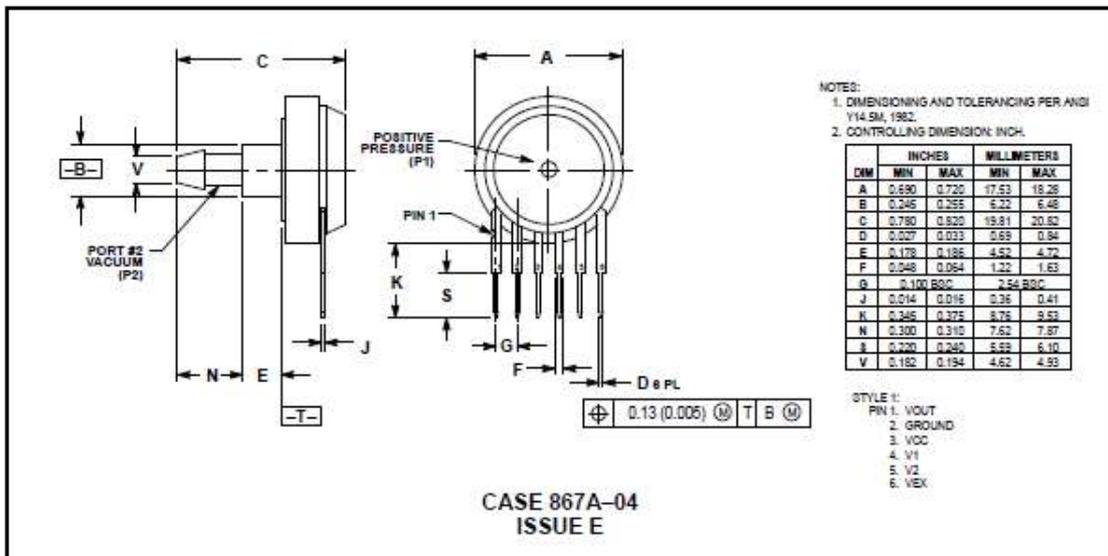
Device Type	Options	Case Type	MPX Series	
			Order Number	Device Marking
Basic Element	Differential	867-08	MPX5010D	MPX5010D
Ported Elements	Differential Dual Ports	867C-05	MPX5010DP	MPX5010DP
	Gauge	867B-04	MPX5010GP	MPX5010GP
	Gauge Vacuum Port	867D-04	MPX5010GVP	MPX5010GVP
	Gauge, Axial	867E-03	MPX5010GS	MPX5010D
	Gauge Vacuum Axial	867A-04	MPX5010GVS	MPX5010D
	Gauge, Axial PC Mount	867F-03	MPX5010GSX	MPX5010D
	Gauge Vacuum Axial PC Mount	867G-03	MPX5010GVSX	MPX5010D

MPX5010 SERIES

PACKAGE DIMENSIONS

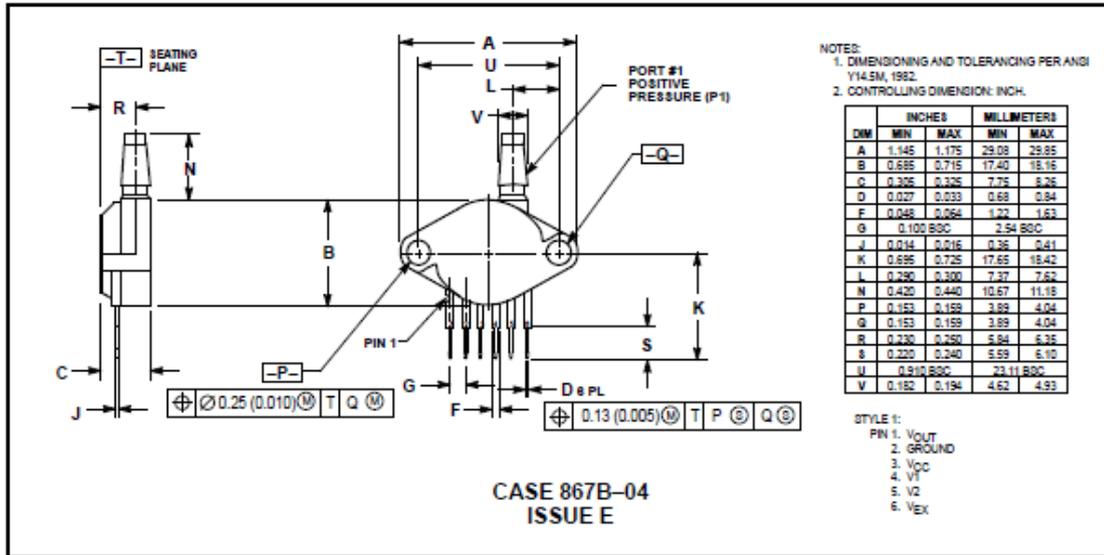


BASIC ELEMENT (D)

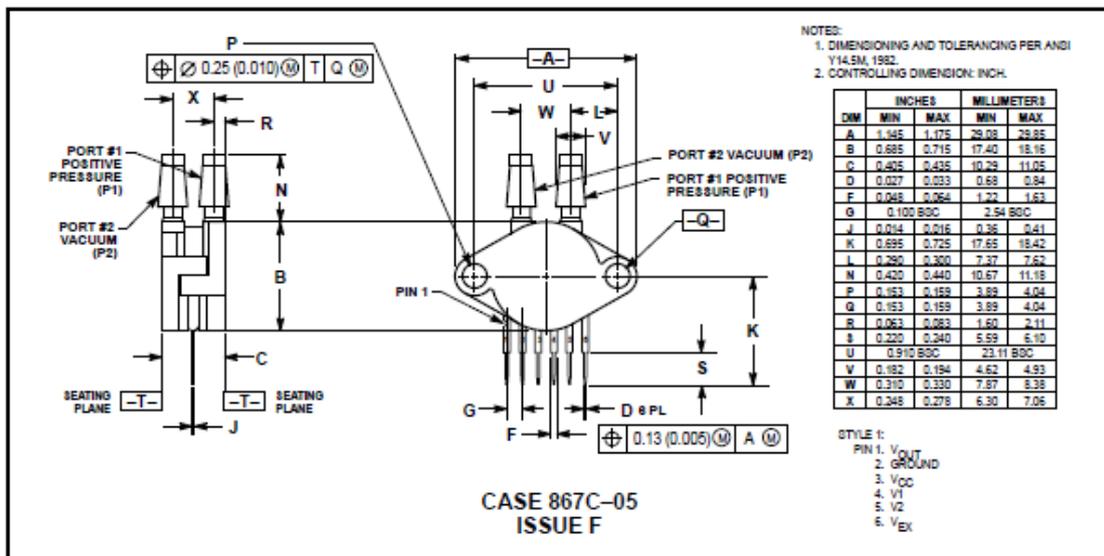


VACUUM SIDE PORTED (GVS)

PACKAGE DIMENSIONS—CONTINUED



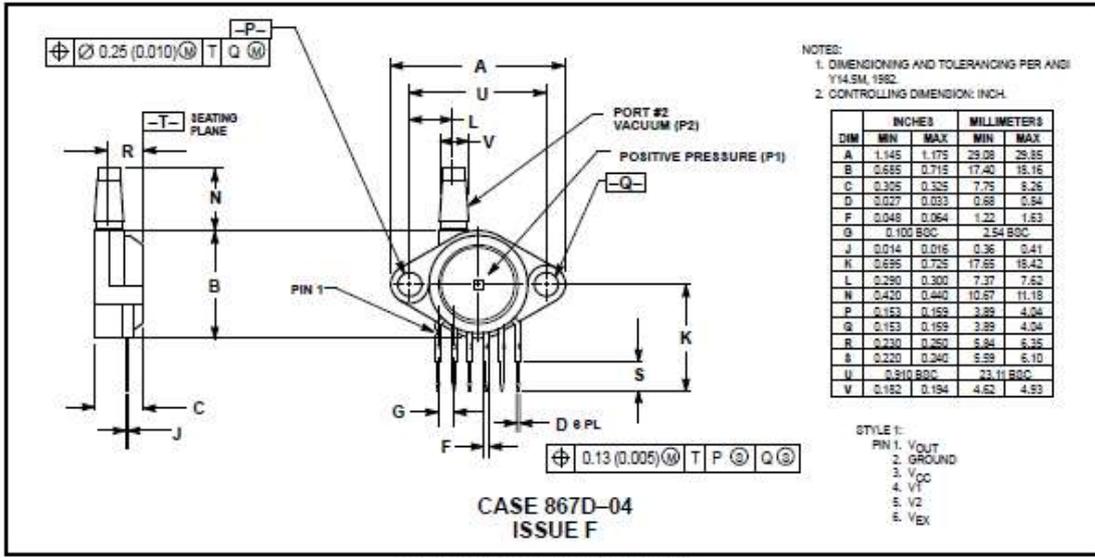
PRESSURE SIDE PORTED (GP)



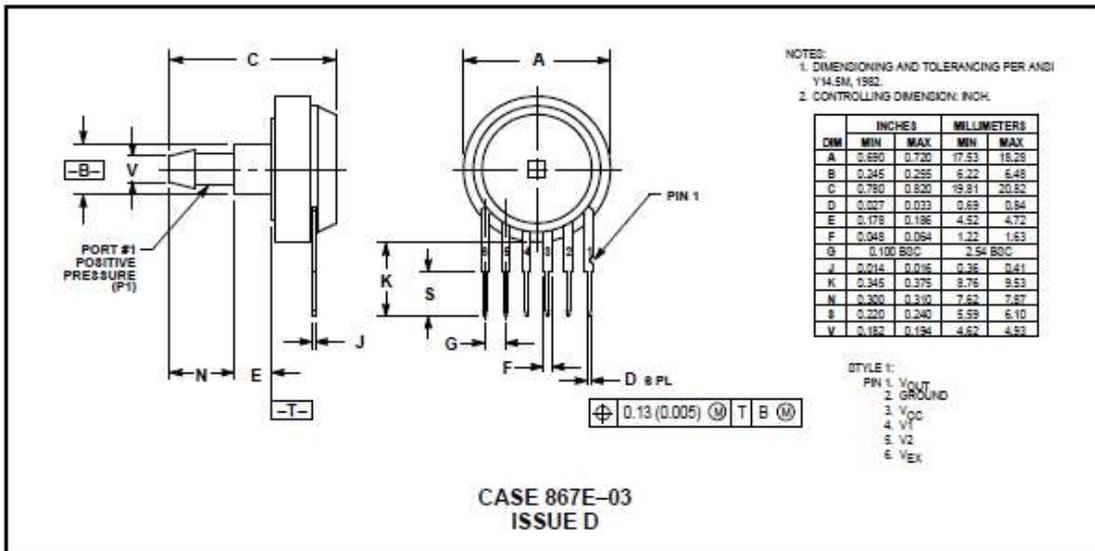
PRESSURE AND VACUUM SIDES PORTED (DP)

MPX5010 SERIES

PACKAGE DIMENSIONS—CONTINUED

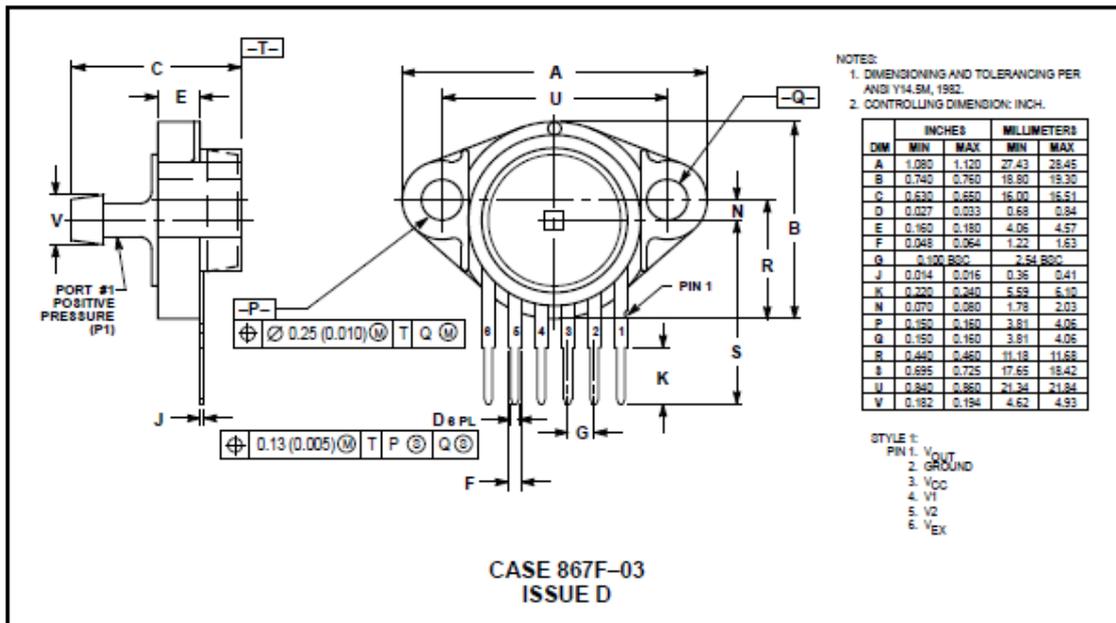


VACUUM SIDE PORTED (GVP)

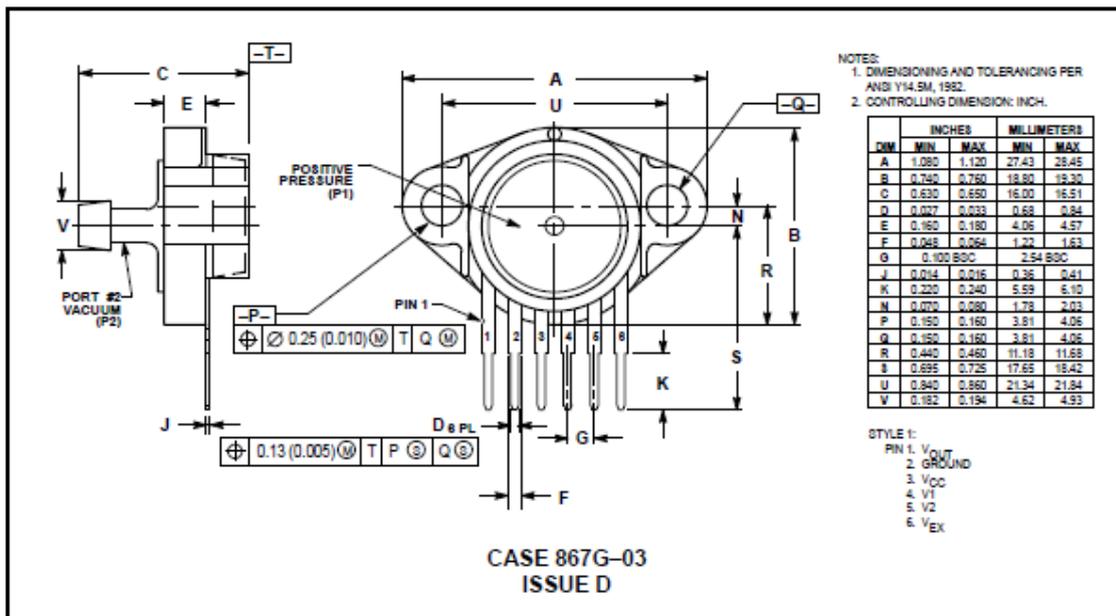


PRESSURE SIDE PORTED (AS, GS)

PACKAGE DIMENSIONS—CONTINUED



PRESSURE SIDE PORTED (GSX)



VACUUM SIDE PORTED (GV SX)

MPX5010 SERIES

Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in Motorola datasheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and  are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

Mfax is a trademark of Motorola, Inc.

How to reach us:

USA/EUROPE/Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution;
P.O. Box 5405, Denver, Colorado 80217. 303-675-2140 or 1-800-441-2447

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi-SPD-JLDC, 6F Setbu-Butsuryu-Center,
3-14-2 Tatsumi Koto-Ku, Tokyo 135, Japan. 81-3-3521-8315

Mfax™: RMFAX0@email.sps.mot.com – TOUCHTONE 602-244-6609
– US & Canada ONLY 1-800-774-1848

ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 88 Tai Ping Industrial Park,
51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629298

INTERNET: <http://motorola.com/sps>



MOTOROLA



MPX5010/D

Anexo 3 – Datasheet Sensor Ultrassônico HC-SR04



Tech Support: services@elecfreaks.com

Ultrasonic Ranging Module HC - SR04

Product features:

Ultrasonic ranging module HC - SR04 provides 2cm - 400cm non-contact measurement function, the ranging accuracy can reach to 3mm. The modules includes ultrasonic transmitters, receiver and control circuit. The basic principle of work:

- (1) Using IO trigger for at least 10us high level signal,
- (2) The Module automatically sends eight 40 kHz and detect whether there is a pulse signal back.
- (3) IF the signal back, through high level , time of high output IO duration is the time from sending ultrasonic to returning.

Test distance = (high level time×velocity of sound (340M/S) / 2,

Wire connecting direct as following:

- 5V Supply
- Trigger Pulse Input
- Echo Pulse Output
- 0V Ground

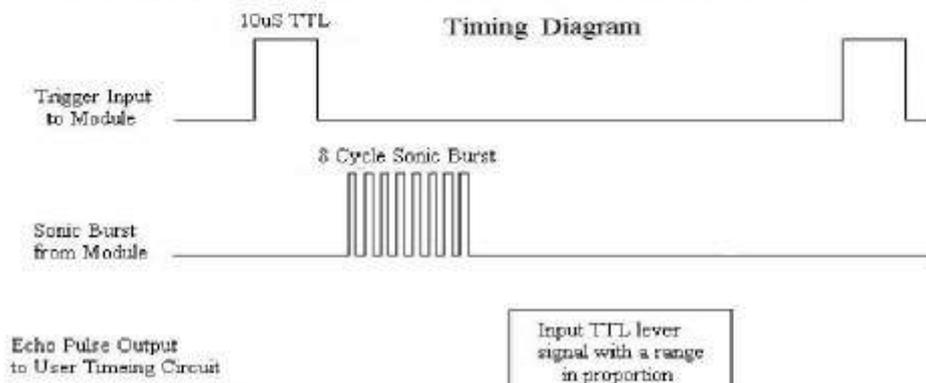
Electric Parameter

Working Voltage	DC 5 V
Working Current	15mA
Working Frequency	40Hz
Max Range	4m
Min Range	2cm
Measuring Angle	15 degree
Trigger Input Signal	10uS TTL pulse
Echo Output Signal	Input TTL lever signal and the range in proportion
Dimension	45*20*15mm



Timing diagram

The Timing diagram is shown below. You only need to supply a short 10uS pulse to the trigger input to start the ranging, and then the module will send out an 8 cycle burst of ultrasound at 40 kHz and raise its echo. The Echo is a distance object that is pulse width and the range in proportion. You can calculate the range through the time interval between sending trigger signal and receiving echo signal. Formula: $\mu\text{s} / 58 = \text{centimeters}$ or $\mu\text{s} / 148 = \text{inch}$; or: the range = high level time * velocity (340M/S) / 2; we suggest to use over 60ms measurement cycle, in order to prevent trigger signal to the echo signal.



Attention:

- The module is not suggested to connect directly to electric, if connected electric, the GND terminal should be connected the module first, otherwise, it will affect the normal work of the module.
- When tested objects, the range of area is not less than 0.5 square meters and the plane requests as smooth as possible, otherwise ,it will affect the results of measuring.

www.ElecFreaks.com

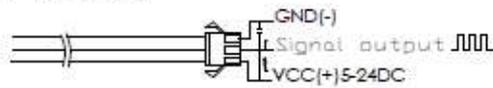


Anexo 4 – Datasheet Sensor de Fluxo YF-S201

Flow-Pulse	Flow-Curve	Connection method																
→.Flow Range:100L/H-/1800H-L/H																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Flow (L/H)</th> <th>Frezq.(HZ)</th> <th>Erro range</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>120L/H</td> <td>16</td> <td rowspan="6">±10</td> </tr> <tr> <td>240L/H</td> <td>32.5</td> </tr> <tr> <td>360L/H</td> <td>49.3</td> </tr> <tr> <td>480L/H</td> <td>65.5</td> </tr> <tr> <td>600L/H</td> <td>82</td> </tr> <tr> <td>720L/H</td> <td>90.2</td> </tr> </tbody> </table>			Flow (L/H)	Frezq.(HZ)	Erro range	120L/H	16	±10	240L/H	32.5	360L/H	49.3	480L/H	65.5	600L/H	82	720L/H	90.2
Flow (L/H)	Frezq.(HZ)	Erro range																
120L/H	16	±10																
240L/H	32.5																	
360L/H	49.3																	
480L/H	65.5																	
600L/H	82																	
720L/H	90.2																	
<p>Connection method:</p>																		

YIFA the plastics Ltd Product Introduction

1. Model: YF-21
2. Product Name: Hall sensor
3. Flow Range: 1-30L/MIN
4. (1) Connection Method



- (2) Voltage Range 3.5-24VDC, Pulse Characteristic: $F=7Q(L/MIN)$
- (3) Extent of error: $\pm 5\%$.
- (4) Flow-Pulse
 $2L/MIN=16HZ$ $4L/MIN=32.5HZ$ $6L/MIN=49.3HZ$
 $8L/MIN=65.5HZ$ $10L/MIN=82HZ$

5. Bom

No.	Item	Material	Qty.
1	Connection wire		1
2	Bonnet	PA	1
3	Screw		4
4	Valve body	PA	1
5	Leak press valve		1
6	Magnet		1
7	Hall		1
8	Impeller	POM	1
9	Rustless steel axis	SUS304	1
10			
11			

