UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

FRANCIS MASSASHI HORIGOSHI

Uso de sensor efeito Hall para medição da vazão de fluidos no processo de produção de palatabilizantes à base de proteína animal em escala piloto

Pirassununga
2016

FRANCIS MASSASHI HORIGOSHI

Uso de sensor efeito Hall para medição da vazão de fluidos no processo de produção de palatabilizantes à base de proteína animal em escala piloto

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Mestrado Profissional Gestão e Inovação na Indústria Animal

Área de concentração: Gestão e Inovação na Indústria Animal

Orientador: Prof. Dr. Ernane José Xavier Costa

Pirassununga
2016

Ficha catalográfica elaborada pelo
Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Horigoshi, Francis Massashi

H819u Uso de sensor efeito Hall para medição da vazão de fluidos no processo de produção de palatabilizantes à base de proteína animal em escala piloto / Francis Massashi Horigoshi ; orientador Ernane José Xavier Costa. -- Pirassununga, 2016.

58 f.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Mestrado Profissional Gestão e Inovação na Indústria Animal) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo.

1. medidor de vazão. 2. efeito Hall. 3. palatabilizantes. 4. hardware livre. 5. otimização.

I. Costa, Ernane José Xavier, orient. II. Título.

Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte - o autor

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todo apoio nessa longa jornada, pelo suporte, pelo amor e carinho, pela educação dada e por acreditarem em mim.

À minha grande família pela amizade, cumplicidade e por terem sempre me apoiado.

À todos meus amigos que acreditaram que tudo isso fosse possível.

À toda equipe da SPF do Brasil, pela oportunidade e pelo apoio.

À toda equipe do LAFAC pelo companheirismo, apoio e amizade.

Ao meu orientador e amigo Ernane, por todos os ensinamentos, conselhos e orientação, que foi fundamental para a execução deste trabalho.

“ Inteligência é a capacidade de se adaptar a mudança.”

Stephen Hawking

RESUMO

HORIGOSHI, F.M. **Uso de sensor efeito Hall para medição da vazão de fluidos no processo de produção de palatabilizantes à base de proteína animal em escala piloto**. 2016. 58p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

Os medidores de vazão contribuem de forma significante para a otimização industrial onde o deslocamento contínuo de massa é parte integrante do sistema produtivo, sendo, portanto, cruciais para a indústria permitindo assim padronizar produtos e automatizar ações reduzindo a força de trabalho humana e minimizando erros. Este é o caso da produção de palatabilizantes, substâncias produzidas a partir da hidrólise enzimática da proteína animal para conferir aroma e sabor aos alimentos, onde existe um deslocamento continuo de massa com dosagem de fluidos acionadas em várias etapas do processo. Podem-se destacar duas etapas principais: a etapa onde ocorre a dosagem de soluções alcalinas para a hidrólise enzimática e a etapa onde ocorre a acidificação para garantir a segurança microbiológica do produto.

No trabalho em questão foi desenvolvido e analisado um medidor de vazão de turbina por sensoriamento via efeito Hall, para determinar a vazão volumétrica de fludos no processo produtivo de palatabilizantes. O sistema utilizado na avaliação do medidor de vazão foi desenvolvido em escala piloto.

A calibração do medidor permitiu-se calcular o fator K (coeficiente do medidor) tanto para água, onde o coeficiente foi de 5,5, quanto para palatabilizantes, onde o coeficiente calculado foi de 7. A partir dos dados obtidos pelo medidor de vazão pode-se observar um alto nível de correlação dos dados.

O medidor de vazão apresentou-se eficaz para os fluidos testados (água e palatabilizante); e, com uma precisão de ± 2%, mostra-se uma alternativa viável para o processo de produção de palatabilizantes.

Palavras-chave: medidor de vazão, efeito Hall, palatabilizantes, otimização, harware livre

ABSTRACT

HORIGOSHI, F.M. **Using Hall-effect sensor for measuring the fluid flow in the production process palatability animal protein based on a pilot scale**. 2016. 58p. Masters dissertation – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, University of São Paulo, Pirassununga, 2016.

Flowmeters contribute significantly to the industrial optimization where mass continuous displacement is an integral part of the production system, is therefore crucial for the industry allowing standardize products and automate actions reducing human labor and minimizing errors. This is the case of the production of flavors, substances produced from the enzymatic hydrolysis of animal protein to impart flavor and aroma to food, where there is a continuous mass displacement with fluids dosage triggered in several process steps. They can point out two main steps: a step where dosing occurs alkaline solutions for enzymatic hydrolysis and acidification stage which takes place to ensure the microbiological safety of the product.

At work in question was developed and analyzed a turbine flowmeter for sensing via Hall effect to determine the volumetric flow fludos in the production of palatability process. The system used to assess the flow meter was developed on a pilot scale.

The meter calibration allowed to calculate the K factor (the ratio meter) for both water where the ratio was 5.5, and for palatability, where the coefficient was calculated 7. From the data obtained by the flowmeter one can observe a high degree of correlation of the data.

The flowmeter is made effective for the tested fluids (water and palatability); and with an accuracy of ± 2%, there is shown a viable alternative for the production of flavors process.

Keywords: flowmeter, Hall effect, palatability, optimization, free hardware

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Medidores de Vazão.....15
Figura 2 - Distribuição dos medidores de vazão.....18
Figura 3 – Sensor hall captando pulsos proporcionais a vazão 20
Figura 4 - Medidor de Vazão Tipo Turbina.....21
Figura 5 - Fluxograma do processo de produção de palatabilizantes.....24
Figura 6 - Esquema para prótotipo do sistema 30
Figura 7 - Sistema em escala reduzida.....31
Figura 8 - Sensor de efeito acoplado a uma turbina na tubulação.....32
Figura 9 – Interface do *software* utilizado na programação do algoritmo 37
Figura 10 - Vazão x frequência dos pulsos para água 38
Figura 11 - Dispersão média entre vazão calculada e observada.....39
Figura 12 - Gráfico vazão x frequência dos pulsos para palatabilizante.....40
Figura 13 - Dispersão entre vazao calculada e observada para palatabilizante.....41
Figura 14 –Display do medidor de vazão por sensoriamento Hall 42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores comparativos de desempenho.....19
Tabela 2 - Dados experimentais do medidor de vazão por sensoriamento Hall para água....37
Tabela 3 - Custo dos materiais para desenvolvimento do protótipo 43
Tabela 4 - Estimativa de custos para o medidor de vazão industrial 44

LISTA DE SÍMBOLOS

k	Coeficiente do medidor
x	Coordenada x
y	Coordenada y
m^3	Metros cúbicos
h	Horas
m	Metros
mm	Milímetros
V	Vazão volumétrica
f	Frequência dos pulsos
q	Carga do elétron
B	Vetor campo magnético
v	Vetor velocidade da carga q
d	Espessura do material
i	Modulo corrente conduzida
B	Módulo do campo magnético aplicado
RH	Constante Hall do material
VHALL	Tensão Hall
IDE	*Integrated Development Enviroment*
Q	Vazão mássica(m^3/h)
ϑ	Velocidade (m/h)
A	Área da secção transversal (m^2)
V	Vazão volumétrica
f	Frequência dos pulsos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ROM	*Read Only Memory*
WFM	*Weight Finite Method*
FVM	*Finite Volume Method*
AWWA	*American Water Works Association*

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1 Introdução 12

2 Objetivos 14

3 Revisão Bibliográfica 15

3.1 Medidores de vazão 15

3.2 Sensor de efeito Hall 21

3.3 Palatabilizantes 23

3.4 Escalabilidade 24

3.7 Processos industriais 28

4 Materiais e Métodos 29

4.1 Materiais 29

4.1.1 Escala Reduzida 33

4.2 Métodos 34

5 Resultados 36

5.1 Resultados – medição de vazão 36

5.2 Estimativas de custo do protótipo 42

5.3 Impactos da medição de vazão por sensoriamento Hall do processo produtivo de palatabilizantes 44

6 Conclusão 46

7 Sugestões para trabalhos futuros 47

8 Referências bibliográficas 48

9 Apêndice 53

Apêndice I – Algoritmo para a medição da vazão para água 53

Apêndice II – Algoritmo para a medição da vazão para água.....56

1 Introdução

Com o aumento da capacidade computacional à um custo acessível e com boa usabilidade, sistemas como o Arduino, baseado na tecnologia Atmega®, e Galileu, baseado na tecnologia intel®, vem sendo cada vez mais utilizados na fase de prototipação de diversos tipos de sistemas eletrônicos. Com o aparecimento destes sistemas o ato de projetar em escala piloto tornou-se uma tarefa que depende exclusivamente da concepção funcional do projeto. Isto ocorre devido a forma como estes sistemas são concebidos que pode ser, modularizados e com blocos funcionais claros e bem definidos ou por uma vasta documentação de apoio dentro do conceito de software e hardware livres. Outro aspecto importante é a conectividade que tais sistemas apresentam com os diversos tipos de sensores existentes no mercado, permitindo uma integração do sensor com o sistema computacional de forma modular e direta.

Esta nova era da eletrônica vem de encontro com a crescente necessidade das industrias de desenvolver tecnologia a baixo custo e de otimizar sistemas. Tudo isso surge no momento em que os processos industriais são cada vez mais complexos e inteligentes, dependendo cada vez mais de um número maior de variáveis que necessitam ser medidas e controladas. Desta necessidade, desenvolveram-se modelos matemáticos capazes de representar os processos industriais, de forma que as características estáticas ou dinâmicas destes processos possam ser reproduzidas em sistemas eletrônicos e computacionais (RODRIGUES, 2000).

Na indústria, problemas relacionados com a vazão de fluidos são deparados com frequência nas operações e, a medida desta variável, auxilia na otimização dessas operações. Entretanto, entre as medidas, a vazão é a que necessita dos recursos tecnológicos mais diversos para a concepção de medidores e atuadores (ANDERSON, 1998; BEGA et al, 2006).

Atualmente o controle da vazão de fluidos no processo produtivo de palatabilizantes é feito pelo método gravimétrico, utilizando uma célula de carga instalada no reator e o controle supervisório atua abrindo e fechando a válvula em função da diferença de peso. Porém, este mecanismo não apresenta uma precisão

satisfatória, tendo em vista que, durante o processo, inúmeros fatores alteram o valor da célula de carga; como a circulação de vapor para aquecimento e água fria para resfriamento, a dosagem de outros tipos de ingredientes e matérias primas, a agitação, emulsificação e recirculação do palatabilizantes em linhas de trocadores de calor e filtros. No entanto, estas operações são fundamentais para as reações e processos responsáveis pela formação dos precursores que irão conferir sabor e aroma ao produto; portanto o controle da vazão do palatabilizante deve ser em uma etapa anterior à sua entrada no reator.

A alternativa para o controle da vazão de fluidos seria a utilização de medidores mássicos, entretanto, devido ao alto poder de corrosão de alguns fluidos, a utilização de medidores de vazão convencionais se torna inviável, uma vez que na sua concepção é necessária a utilização de materiais especiais o que geraria um equipamento de alto custo.

O controle de vazão no processo de produção de palatabilizantes resulta em um ganho no tempo de processo, pois neste processo industrial a vazão de fluidos e consequentemente o seu controle é fundamental para sua perfeita execução. Estima-se também que além do ganho de tempo tenha-se um ganho de precisão e exatidão, pois a resposta de um medidor de vazão é mais rápida e mais precisa que a da diferença da célula de carga. Além do ganho em tempo de processo, o método permitirá uma minimização de erros oriundos e propagados desde a dosagem até a ação do operador humano no processo.

Nesta dissertação será apresentada a tecnologia do medidor de turbina com sensoriamento por efeito Hall de hardware livre e *open source* (código aberto) como opção para o controle da vazão no processo de produção de palatabilizantes a um custo acessível. A opção por este tipo de medidor é devido a sua facilidade de calibração para diferentes fluidos, sua simplicidade, além de ser compacto e possibilitar o monitoramento eletrônico em tempo real.

2 Objetivos

O presente trabalho desenvolveu um medidor de vazão para um sistema de escoamento em escala reduzida para, em sequência, propor uma solução ao problema de medir vazão em um sistema em escala real na indústria de palatabilizantes à base de proteína animal, cuja utilização é muito específica. Devido à dificuldade de medição de vazão em tempo real e à falta de medidores de vazão desenvolvidos para esta utilização, o desenvolvimento de um sistema de medição de vazão capaz de atender a necessidade dessa indústria substituindo o sistema baseado em carga, está amplamente justificado.

Para atingir o objetivo de desenvolver e testar um sistema em escala piloto para medir a vazão no processo produtivo de palatabilizantes, o sistema desenvolvido foi testado e os resultados foram avaliados com foco na utilização industrial do sistema desenvolvido.

Os objetivos específicos compreendem:

- Desenvolvimento de um protótipo em escala reduzida das instalações industriais;
- Desenvolvimento de medidores de vazão por sensoriamento Hall,
- Desenvolvimento da lógica de conversão dos pulsos em vazão,
- Testes com palatabilizantes;
- Avaliação dos resultados com foco na utilização industrial.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Medidores de vazão

De acordo com relatos históricos, as primeiras medições de vazão de água foram realizadas pelos egípcios e romanos em torno de 2000 a.C., cujas obras de adução de água ficaram famosas. Em 90 d.C., o governador e engenheiro romano Julius Frontinus (30 – 103 d.C.) faz referências precisas sobre o uso de medidores de vazão (MECATRÔNICA, 2005).

Vazão pode ser entendida como o volume de fluido que escoa por uma secção transversal por um determinado período de tempo; podendo ser vazão volumétrica quando tem-se o volume escoado pelo tempo ou mássica, quando tem-se a quantidade em massa escoada por um determinado período de tempo (DELMÉE, 2003).

Os medidores de vazão ganharam maiores espaços nas indústrias devido a necessidade de se controlar a vazão, pois a medida e o controle dessa variável é muito importante para processos que envolvem fluxo contínuo de fluidos. Existem várias modos de operação desses instrumentos, como os que medem usando a pressão e, consequentemente, pela conservação da energia mecânica, os que medem a vazão pela medida da velocidade e a área da secção transversal, calculada pela equação de Bernoulli, ou os medidores que medem diretamente, como os orifícios, rotâmetros, vertedor ou medidor de Venturi (FIALHO, 2006).

Figura 1 - Medidores de Vazão

Fonte: Ribeiro, 2002

Os medidores deprimogênios são os mais antigos e os mais utilizados no mundo e usam o do principio do diferencial de pressão e são fundamentadas em leis físicas conhecidas, como a equação de Bernoulli. Neste grupo se encontram as placas de orifício, os medidores tipo cunha, os bocais de vazão, os medidores especiais por diferença de pressão como os centrífugos ou capilares e os medidores diferenciais de inserção como o tubo de Pitot. Este tipo de medidores é extremamente versátil e de fácil aplicação em qualquer tipo de processo, entretanto, para eles existem algumas limitações, como processos com baixa diferença de pressão e os limites inferiores do número de Reynolds (BEGA et al, 2006).

Os medidores lineares fornecem uma reposta diretamente proporcional a vazão e com fator de proporcionalidade constante, e diferentemente dos deprimogênios, são mais complexos. Neste grupo, encontram-se os medidores de área variável como os rotâmetros, os medidores de efeito Coriolis, os eletromagnéticos, os medidores de turbina, os de vortex, os térmicos e os ultrassônicos (BEGA et al, 2006).

Os medidores especiais integram um conjunto de medidores utilizados em casos específicos, como os medidores à base de força e os lasers. Os medidores volumétricos baseiam na medida do volume, entretanto manipulando as medidas matematicamente é possível chegar a um valor de vazão como os rotores. Os medidores em canais abertos são os únicos que não necessitam que a tubulação esteja completamente cheia do fluido (CAMPAGNA et al, 2015).

Os medidores de vazão são classificados em dois tipos, segundo a NBR 10396 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988). Volumétricos ou mássicos, onde o fluido a ser medido alterna entre enchimento e esvaziamento de câmaras com volume determinado, e os instantâneos, onde o fluido não depende do enchimento de câmaras para a medição da vazão.

Segundo a NBR10396 (1988), os medidores de vazão se agrupam, de acordo com a perturbação que o elemento transdutor introduz na medida, da seguinte maneira:

- Volumétrico
- Rotor semi submerso
- Pistão recíproco

- Pistão rotativo
- Palheta
- Diafragma
- Multi rotor
- Lóbulo
- Engrenagem
- Disco de nutação
- Vazão instantânea
- Vórtice
- Eletromagnético
- Térmico
- Força
- Canal aberto
- Pressão diferencial
- Resistência linear
- Tubo de Pitot
- Centrífugo
- Placa de orifício
- Tubo de Venturi
- Bocal
- Tubo multi furos
- Área Variável
- Turbina
- Hélice
- Anemômetros
- Ultra-sônico
- Coriólis

Para esta classificação pode se considerar que os medidores intrusivos são aqueles que o fluido tem contato direto como o elemento transdutor, e que em alguns casos ocorrem a perda de carga e uma possível deposição de materiais, o que limita o uso em operações específicas. Os não intrusivos são aqueles que o fluido escoado não tem contato nenhum com o elemento transdutor, entretanto

possui algumas limitações, como por exemplo os que funcionam apenas pela indução magnética.

Desta forma, o medidor de vazão estudado sugere que tenha-se uma turbina intrusiva ao escoamento do fluido e um sensor medidor de efeito Hall, como transdutor de forma não intrusiva, captando o campo magnético induzido gerado pela turbina (GRUBELNIK, 2005).

Os medidores de vazão eletromagnéticos são um dos mais utilizados atualmente como mostra a figura 2, que explica o interesse neste tipo de tecnologia.

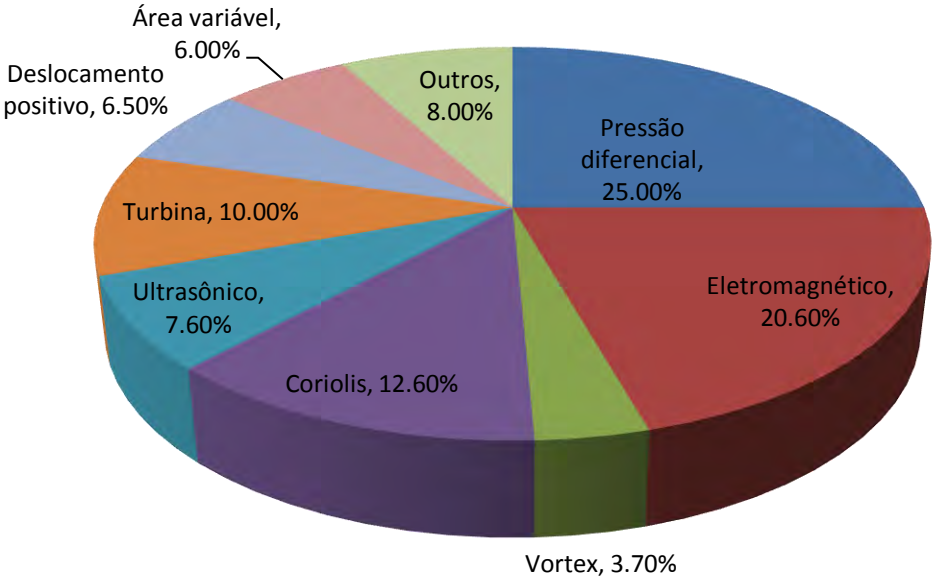

Figura 2 - Distribuição dos medidores de vazão

Fonte: Bortoni, 2006

De acordo com Yorder (2005) o mercado de medidores eletromagnéticos tem crescido muito nos últimos anos e este tipo de tecnologia está substituindo medidores que utilizam de tecnologias convencionais como os de pressão diferencial, turbina e deslocamento positivo.

Os medidores de vazão eletromagnéticos possuem vantagens sobre os demais medidores, pois apresentam alta precisão e exatidão, perda de carga desprezível, ausência de partes móveis em contato com o fluido e ampla faixa de operação (MOLINA, 2008).

A tabela 1 apresenta os desempenhos para cada tipo de medidor.

Os medidores lineares são medidores onde a vazão medida é proporcionalmente linear ao sinal captado, com fator de proporcionalidade constante na faixa de medição. Estes tipos de medidores são fornecidos por empresas especializadas, pois o elemento primário que interage com o fluido e o elemento transmissor constitui em um único elemento. Os medidores de turbina, apresentado na figura 4, são considerados lineares que é o caso do medidor desenvolvido neste projeto (DELMÉE, 2003).

Tabela 1 - Valores comparativos de desempenho

Medidor	Exatidão (%) da vazão	repetibilidade	Rangebilidade	Diâmetros
Venturi	± 0,75	± 0,25	4:1 até 10:1	25mm - 3m
Placa de orificio	± 0,25 a ± 2,0	± 0,25	4:1	Todos
Eletromagnético	± 0,50	± 0,25	10:1	2,5mm - 3m
Turbina	± 0,25 a ± 2,0	± 0,25	10:1	5 - 600 mm
Ultrasônico	± 1,0 a ± 2,5	± 0,25	20:1	3,1mm - 3m
Pitot	± 0,25 a ± 5,0	± 0,50	4:1	13 mm - 2,4m

Fonte: AWWA, 1989

Para medidores com princípio de diferencial de pressão, a curva de calibração não é linear, alterando-se o fator K (equação 1 - fator de calibração) conforme se altera a vazão. Sendo que K é o fator que relaciona a diferença de pressão medida e a vazão escoada, conforme equação 1.

$$Q = K\ x\ (\frac{\Delta P}{2}) \qquad (1)$$

Onde ΔP é a diferença de pressão entre as tomadas de montante e de jusante, e Q é a vazão escoada. Para os medidores eletromagnéticos isso não ocorre, sendo a relação entre a vazão e a tensão, linear.

Os pulsos são captados por um sensor de efeito Hall, cuja amplitude do campo magnético é proporcional a velocidade de escoamento do fluido, conforme figura 3.

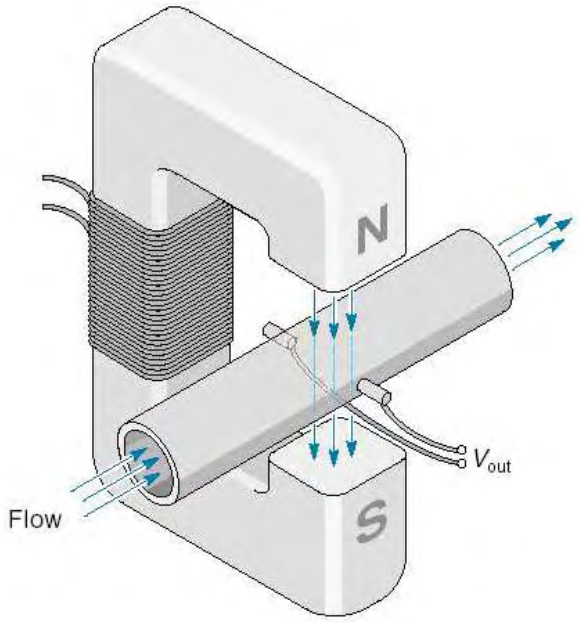

Figura 3 – Sensor hall captando pulsos proporcionais a vazão

Fonte: KILIAN, 2004.

O medidor de turbina é um sensor rotativo, onde o movimento do rotor ou turbina é proporcional à velocidade do fluido. Entretanto, estes tipos de medidores, medem a velocidade do fluido escoando apenas em um único sentido. O cálculo da velocidade é feito por meio da leitura dos sinais digitalizados e convertidos em velocidade, por meio de um processo de calibração (KILIAN, 2004).

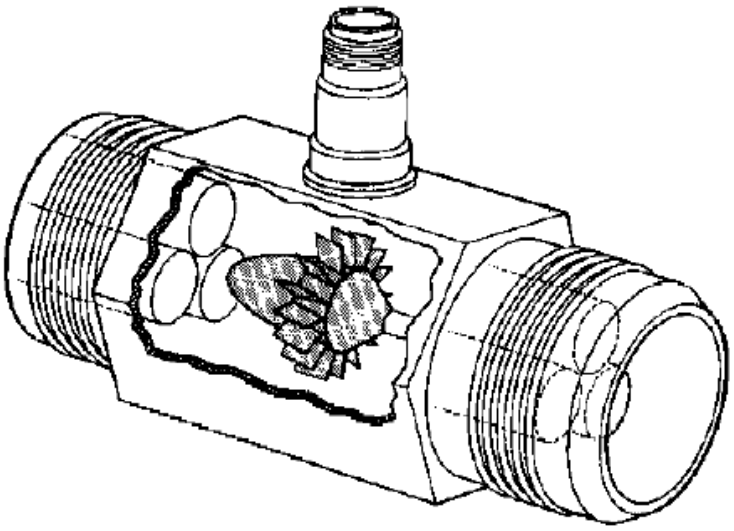

Figura 4 - Medidor de Vazão Tipo Turbina

Fonte: DELMÉE, 1983

A medição de vazão não é mais apenas um parâmetro para a operação de sistemas hidráulicos, sem a preocupação com a precisão. Já que atualmente, se faz cada vez mais necessária a exatidão das medições para garantir a dosagem correta de insumos, reagentes e a qualidade operacional do processo (MARTIM, 2005). Esta mudança ocorreu em decorrência ao grande crescimento de processos contínuos em diversos setores da indústria, que impulsionaram o desenvolvimento de diversos tipos de medidores de vazão durante o século XX (DELMEE, 2003).

Sendo assim, esta dissertação insere-se neste contexto inovador e necessário de usar tecnologia eletrônica para medir vazão

3.2 Sensor de efeito Hall

Em 1879, Edwin Hall descobre, no movimento de elétrons sujeito a um campo magnético, um efeito resultado da força de Lorentz. Ele percebeu que as linhas equipotenciais que cruzam perpendicularmente um fluxo de corrente, de um material que não está exposto a um campo magnético, são linhas retas.

A força de Lorentz no movimento de elétrons no material é descrita pela equação 2:

$$\boldsymbol{F} = (q \ * \ \boldsymbol{v}) \ x \ \boldsymbol{B} \qquad (2)$$

onde:

q: carga do elétron

B: vetor campo magnético

v: vetor velocidade da carga q

O produto vetorial indica que a força tem uma direção mutuamente perpendicular ao fluxo de corrente e ao campo magnético.

Entretanto, ao depararmos com um fluxo de corrente de um material exposto a um campo magnético perpendicular, o ângulo do fluxo da corrente alterado pelo campo magnético é chamado de ângulo Hall, sendo que este ângulo é intrínseco ao material, o qual é determinado pela mobilidade dos elétrons que determinam o coeficiente Hall. Neste caso, as linhas equipotenciais ao longo do comprimento do material são inclinadas, e isso nos leva a tensão de Hall medida ao longo do material, ou seja, tem-se uma tensão proporcional ao campo magnético aplicado (HASANUSTA, 2016 ; MECATRÔNICA, 2013).

Equacionando a teoria do funcionamento do sensor Hall, tem-se a equação 3 para determinar a tensão Hall:

$$VHALL = \left(\frac{RH}{d}\right) x \ i \ x \ B \qquad (3)$$

Onde:

d = espessura do material

i = módulo corrente conduzida

B = módulo do campo magnético aplicado

RH = constante Hall do material

VHALL = tensão Hall

Nesta dissertação o efeito Hall é parte integrante do sensor usado para medir a vazão de palatabilizantes

3.3 Palatabilizantes

Os palatabilizantes são aditivos regulamentados pela legislação brasileira através da Instrução Normativa N° 13, de 13 de novembro de 2004, enquadrado nos aditivos sensoriais estes são classificados como substâncias adicionadas a produtos destinados a alimentação animal para melhorar ou modificar suas propriedades organolépticas ou as características visuais. Neste grupo encontram-se os corantes que modificam ou intensificam a cor dos alimentos, os aromatizantes que conferem ou intensificam o aroma dos alimentos e os palatabilizantes que podem ser obtidos por processos físicos, químicos, enzimáticos ou microbiológicos a partir de matérias de origem vegetal ou animal, ou substâncias químicas, cuja adição aos alimentos aumentam a sua palatabilidade e aceitabilidade (BRASIL, 2004).

Os palatabilizantes são produzidos a partir da hidrólise da proteína animal, formando pequenos peptídeos e aminoácidos para a utilização em alimentos como agentes flavorizantes. O processo de hidrólise se dá pelo uso de enzimas proteolíticas capazes de melhorar as características organolépticas do produto final (SCHIMIDT, 2009).

O processo, ilustrado na figura 5, utiliza-se de matérias-primas de origem animal como fonte de proteínas para a hidrólise. Entretanto para uma otimização da atividade enzimática, há a necessidade de correção do pH. Sendo assim, durante o processo, ocorre a dosagem de ingredientes líquidos como soluções alcalinas para a manutenção do pH ótimo da enzima e soluções ácidas para a acidificação do produto.

Como o palatabilizante usado no processo de interesse desta dissertação é líquido, o desafio deste projeto é propor um sistema para medir sua vazão.

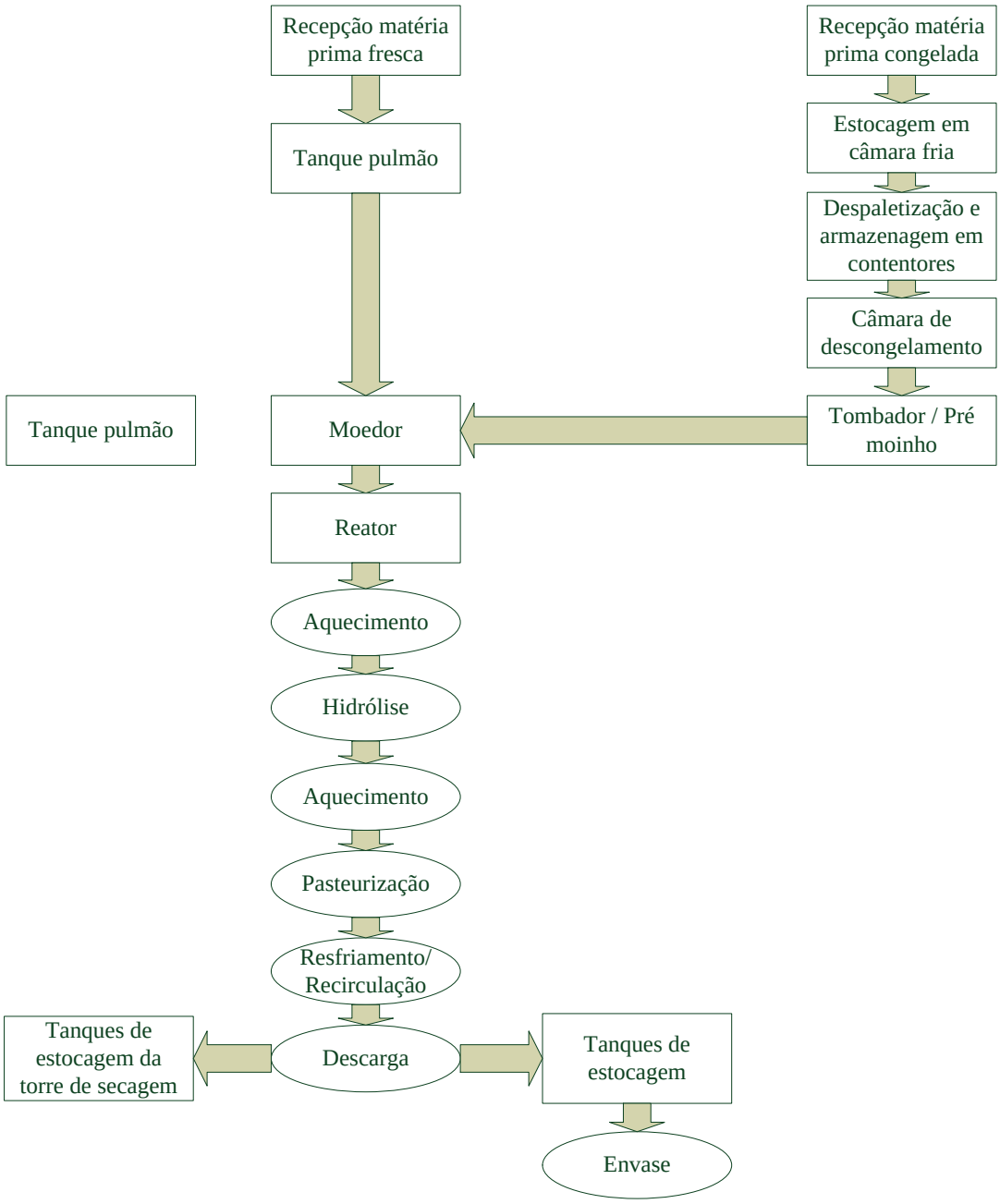

Figura 5 - Fluxograma do processo de produção de palatabilizantes

3.4 Escalabilidade

A escalabilidade é a variação no fator de escala que permite variar o volume de objetos mantendo-se a proporcionalidade da métrica inicial. Na indústria é utilizada a escalabilidade, tanto aumentando quanto reduzindo a escala para desenvolver novos projetos e adaptar equipamentos. Este processo viabiliza economicamente o projeto e permite fazer alterações e criação em protótipos a custo reduzido com eficácia e qualidade (JOGALEKAR, 2000).

Na economia a escalabilidade é de extrema importância para a redução dos custos médios de produção, devido a um aumento dos custos totais de produção proporcionalmente menor que o aumento da produção de produtos. Esta expansão da capacidade de produção é possível graças à escalabilidade de seus processos, antes do aumento, para averiguar os impactos no aumento da escala, sem interferir nos processos (BANNOCK et al, 2003).

A escalabilidade tem como objetivo uma adaptação de novas tecnologias relacionadas às operações industriais, tanto para a automação de processos quanto para o apoio em projetos de engenharia (TORRES, 1995).

O conceito de escalabilidade fundamenta-se no aumento de escala de um sistema ou processo e a capacidade dos mesmos de absorvê-las. Observa-se a necessidade da escalabilidade no sistema ou processo, quando, em sua concepção, há a suscetibilidade e capacidade deste aumento ocorrer, de modo que haja uma expansão em seu volume (BONDI, 2000).

Nesta dissertação o sistema desenvolvido usa o conceito de escalabilidade para o seu desenvolvimento.

3.5 Medidas de vazão usando indução magnética

Em 1832 Faraday, após publicar as leis da indução, tentou medir a vazão do rio Tamisa instalando eletrodos na ponte de Waterloo; entretanto as interferências fotoelétricas e termoquímicas derivaram resultados discrepantes, no entanto esta foi umas das primeiras tentativas de medir a vazão usando indução magnética. Na década de 60, Smith e Sleptina obtiveram a patente de um esquema eletrônico para medição da velocidade relativas dos navios em relação ao mar. A medição consistia na tensão elétrica induzida nos eletrodos fixados no casco do navio na presença de um campo magnético gerado (SHERCLIFF, 1962).

Estudos realizados em 1930 relataram que a velocidade de escoamento não era uniforme, pois a aderência do fluido na parede do tubo fazia com que o fluido no centro do tubo escoasse mais rápido que o em contato com a parede, sendo assim a força eletromotriz induzida também não era uniforme. Nestes trabalhos, utilizou-se uma solução de sulfato de cobre como fluido escoante em uma tubulação circular e transversal a um campo magnético uniforme. Na década seguinte Thurlemann

(1941) evidência que a tensão elétrica através de um tubo circular é a mesma para uma dada vazão, desde que as paredes não sejam condutivas e a velocidade do fluido seja uniforme, independente do perfil de velocidade.

Cheremisinoff (1979) relatou que os medidores de vazão eletromagnéticos são usados para medir todos os tipos de líquidos corrosivos, ácidos fortes, bases, materiais granulados e viscosos. Inclusive alguns usos específicos de medição de fluidos como, ácido nítrico, soda cáustica, poliestireno, látex butadieno, cloreto de alumínio, vários sais orgânicos, ácidos férricos e hidróxido de amônia.

Lim e Chung (1998) realizaram um estudo utilizando diferentes configurações de células para o calculo, tanto para escoamento laminar quanto para escoamento turbulento. O trabalho evidenciava os erros relativos no sinal de medidores eletromagnéticos de vazão quando simulados utilizando o método ponderado (WFM – Weight Function Method) ou o método de volumes finitos (FVM – Finite Volume Method). Concluíram que a configuração das células influi decisivamente na precisão do resultado final, principalmente quando o escoamento é turbulento e utilizando-se o WMF, pois a velocidade varia bruscamente próximo a camada limite.

Bates e Turner (2003) demostraram que um aumento na velocidade, decorrente da redução do diâmetro de um tubo tem como consequência uma maior precisão na medição da vazão. Para isto eles utilizaram um medidor de vazão eletromagnético dotado de um tubo convergente e um tubo divergente, gerando assim uma maior precisão do medidor.

A indução magnética é o fenômeno que governa a atividade do sensor usado no sistema de medida proposto nesta dissertação.

3.6 Microcontrolador programável

Ferdoush e Li (2014) utilizaram da tecnologia de hardaware livre integrando uma plataforma em um módulo transmissor usando pacotes de software livre para desenvolver uma rede sem fio para monitoramento ambiental; o presente trabalho propõe a utilização deste tipo de tecnologia para a medição de vazão; utilizando a plataforma arduino como hardware livre.

O microcontrolador é um sistema computacional de chip único que possui uma menor capacidade de processamento e armazenamento de memória o que o

torna eficiente em relação à arquitetura computacional mais complexa em aplicações específicas (FATEHNIA, 2016). Dentre as diversas aplicações contemplam a utilização embarcada em tratores, e circuitos que envolvam o controle de uma determinada tarefa no processo, como será realizada neste trabalho referente ao controle da medição de vazão (VOLTAN, 2015).

O microcontrolador é responsável pelo processamento das informações coletadas por periféricos conectados às suas portas de comunicação e convertidas de sinais analógicos para digitais através de um conversor analógico-digital integrado uma vez que a sinal de saída do sensor é de natureza analógica (VOLTAN, 2015).

O Arduino é uma plataforma é habilitada para desenvolvimento livre e permite uma interação com o ambiente externo, comunicando-se com computadores e outros periféricos de forma simples. Possui um o software de desenvolvimento de programas, o IDE (*Interface Development Enviroment)* ou ambiente de desenvolvimento integrado para implementação de programas (BANZI e SHILOH, 2015)

Um microcontrolador do tipo Arduino foi utilizado para o desenvolvimento de uma interface gráfica com um computador, como o Matlab e o LabView, entretanto a linguagem utilizada foi o *Phyton*. O presente trabalho utiliza a linguagem *Processing,* que assim como o *Phyton*, trata-se de uma linguagem livre e é a linguagem nativa d a plataforma Arduino (KOENKA et. al, 2014).

O Arduino é um hardware livre que consiste em uma placa com um microcontrolador Atmel AVR de 8 bits, pinos digitais e analógicos de entrada e saída e entrada USB que permite a conexão com computadores para a sua programação. O Arduino aceita Windows, Linux e Mac OS X para carregar o firmware ou programa executável. Além de executar o programa, o Arduino possui uma memória ROM (Read Only Memory) e um *bootloader* ou mini sistema operacional (SOARES, 2013).

O Arduino é considerado uma plataforma de hardware e software livre, pois apresenta a licença aberta para uso de hardware e software, o que é uma vantagem em relação a outros controladores (RIBEIRO, 2014).

O movimento *open source* preconiza a abertura, compartilhamento e democratização dos conhecimentos, bem como esquemas lógicos e solução de problemas, sendo assim uma rede de cooperativismo e solidariedade entre os

usuários. Diante deste movimento a plataforma Arduino destaca-se por ser composta de hardware e softwares livres (DA SILVEIRA, 2012) o que permite que o projeto desta dissertação seja facilmente compartilhado com a comunidade que utiliza a tecnologia *open hardware* e *open software*.

3.7 Processos industriais

Os processos industriais são caracterizados pela sua grande variedade e quantidade de processos distintos e não lineares, além das múltiplas entradas e saídas, atrasos de tempo e restrições de entrada. Além disso, os processos possuem grandes interações entre eles e suas entradas e saídas. Dentre os processos industriais é comum encontrarmos elementos que possuem funções múltiplas dentro do processo, como por exemplo um tanque encamisado que pode operar simultaneamente como um aquecedor, reator e separador de um processo químico. Sendo assim, os controladores de processos devem ser projetados para garantir o máximo de desempenho nas diversas operações, levando em conta as incertezas e perturbações, e permitir que os parâmetros sejam ajustáveis para alterar o comportamento e uma melhor sintonia do controlados para as diversas aplicações nas quais ele é submetido (BEQUETTE e OGUNNAIKE, 2001).

Com intuito de aprimoramento em controle e automação, o gerenciamento de processos e estrutura de engenharia de processos deve utilizar o software e hardware capazes de otimizar a malha de controle da planta (JAYAMANT, 1988). A seleção de sensores, manutenção de tratamento analítico do dados é extremamente significante para o controle de processos (BEQUETTE e OGUNNAIKE, 2001). Por estas razões expostas desenvolver um sistema em escala piloto é fundamental para que a seleção dos dispositivos sensores e atuadores possam ser avaliados previamente.

O controle automático de processos melhora a qualidade dos produtos e rendimentos dos processos, resultando em economia de tempo e dinheiro. Tal controle viabiliza operações complexas de execução os quais seriam dispendiosas com apenas o controle manual (OGATA, 2005, RIBEIRO, 2011). Neste contexto o sistema em escala piloto desenvolvido será avaliado quanto a sua capacidade de

fornecer os dados necessários para que o controle automático da vazão seja implementado em escala industrial.

4 Materiais e Métodos

4.1 Materiais

O experimento foi realizado no Departamento de Ciências Básicas da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, localizada no campus de Pirassununga. O protótipo foi construído mantendo em escala as dimensões originais dos tanques em tamanho real.

Foi desenvolvido um sistema de transporte de fluido palatabilizante em escala reduzida (1:8) para testar a instrumentação de medição de vazão usando indução magnética, conforme esquema ilustrado na figura 6.

O equipamento foi composto por:

- Dois tanques de alumínio
- Bomba shuster peristáltica
- Válvula esfera para controle de vazão
- Turbina com magneto
- Sensor de efeito Hall
- Arduino uno r2.1
- Visor de cristal líquido

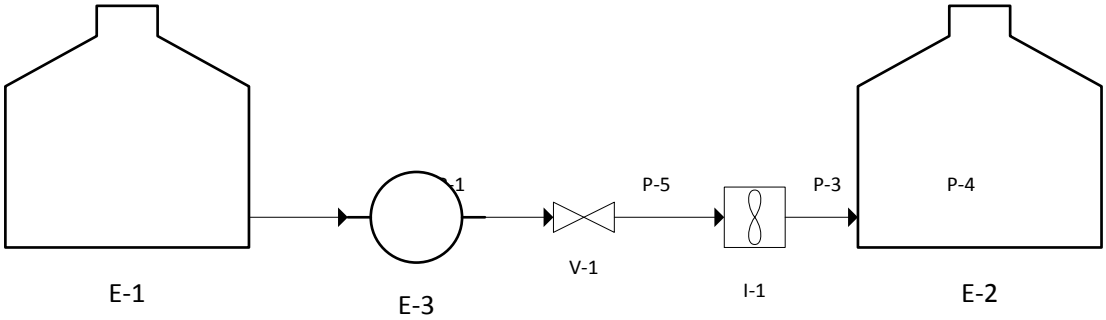

Figura 6 - Esquema para prótotipo do sistema

E1 = Tanque de saída

E2 = Tanque receptor

E3 = Bomba

V1 = Válvula esfera

I1 = Turbina

Foram utilizados dois tanques de 20 litros para a simulação do escoamento do fluido de um tanque para outro, sendo eles, um tanque reservatório onde foi acoplado uma flange na parte inferior para a sucção do fluido e outro tanque com uma conexão de um niple na parte superior onde foi encaixado o tubo flexível por onde o fluido escoa. No flange do tanque reservatório foi conectada uma tubulação rígida de PVC cuja outra extremidade foi conectada a saída da bomba, a entrada da bomba foi conectada a um tubo de PVC cuja outra extremidade foi conectada a uma válvula tipo esfera. Na adjacência desta válvula, foi conectado o medidor de vazão cuja saída foi conectada a um tubo flexível cuja extremidade adjacente foi conectado ao tanque receptor, conforme esquema apresentado na figura 7.

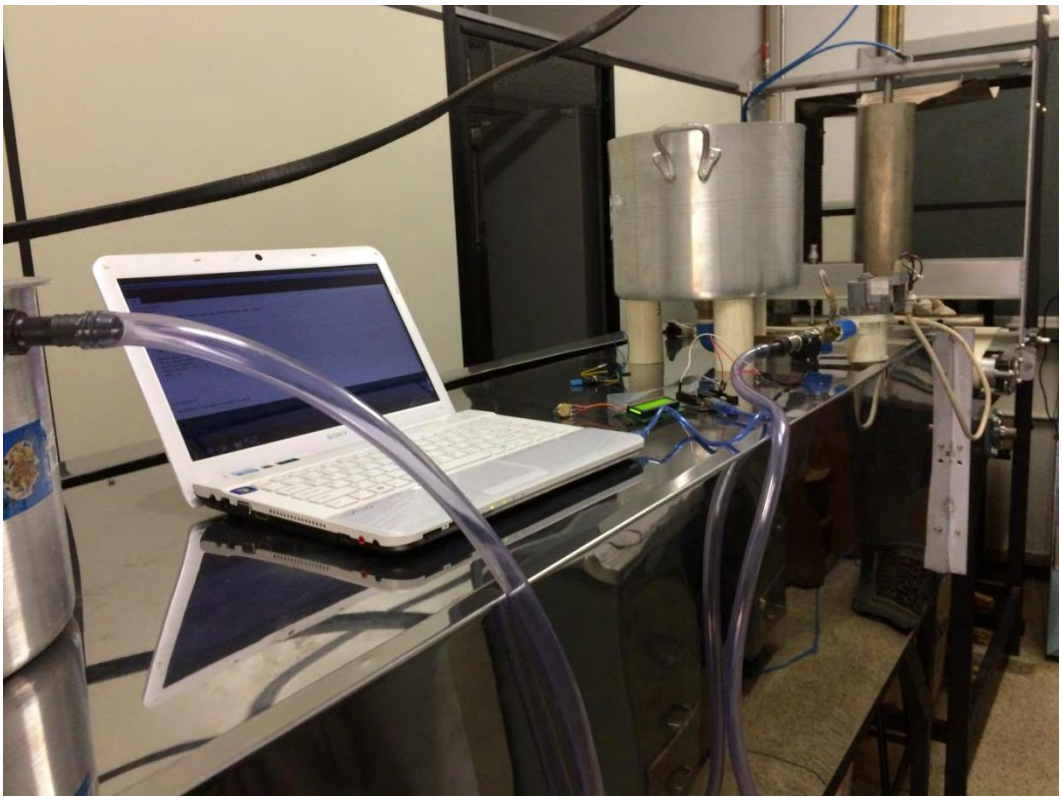

Figura 7 - Sistema em escala reduzida

O medidor de vazão possui um diâmetro de ½ polegada e é constituído de um corpo de plástico, um rotor dotado de um corpo magnético em seu eixo e um sensor de efeito Hall.

Foram realizados ensaios para determinar a geometria das pás da turbina do rotor, pois esta geometria influencia diretamente à vazão escoada e consequentemente, no número de rotações por minuto e assim na frequência dos pulsos captados pelo sensor de efeito Hall.

O fluxo de água faz com que o rotor gire e a variação do magneto posicionado no eixo induza uma tensão elétrica captada pelo sensor de efeito Hall. Este tensão elétrica é gerada em forma pulsada em função do número de giros do rotor e consequentemente, é proporcional a vazão de fluido por unidade de tempo.

O medidor possui roscas nas duas extremidades, o que o torna facilmente adaptável a qualquer tubulação.

O sensor de efeito Hall e a tela de cristal líquido foram conectados a uma placa Arduíno que possui um firmware, ou algoritmo de controle, que realiza a contagem dos pulsos gerados em um determinado período de tempo, a seguir o algoritmo realiza a conversão da frequência dos pulsos em vazão medida e o volume

acumulado. O consumo (volume) é encontrado através da integração da vazão volumétrica (quantidade de material transportado através de uma tubulação em litros) em função do tempo (segundos).

O sensor de efeito Hall usado no protótipo mede a diferença de potencial elétrica gerada por indução pelo campo magnético da turbina com magneto acoplado. A tensão elétrica gerada possui direção perpendicular ao campo magnético e proporcional ao campo magnético, ou seja, ela varia a sua tensão de saída em resposta a variação do campo magnético. Esta diferença de tensão é chamada de tensão Hall, cuja amplitude varia de acordo com a amplitude do campo magnético.

Sendo assim, tem-se que a frequência dos pulsos de tensão elétrica medida pelo algoritmo é proporcional a velocidade com que o fluido ao escoar movimenta a turbina. Tendo-se esta velocidade, a viscosidade do liquido e a geométrica pelo qual ocorre o escoamento, o algoritmo calcula a vazão.

O sensor Hall é instalado na parte externa da tubulação logo acima do ponto geométrico onde se encontra a turbina, ilustrado na figura 8, desta forma o sensor capta os pulsos gerados pela variação do campo magnético o magneto instalado na hélice da turbina.

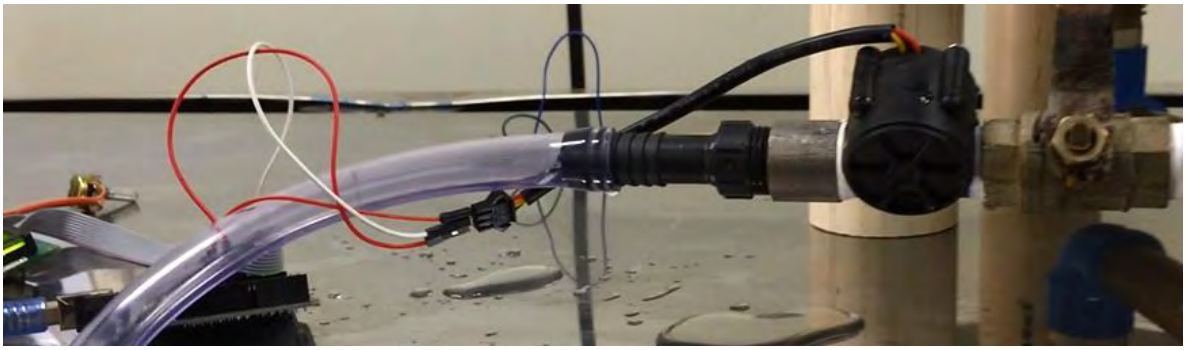

Figura 8 - Sensor de efeito acoplado a uma turbina na tubulação

O Arduino experimental usado consistiu em uma placa microcontrolada, que possui uma comunicação serial padrão USB (Universal Serial Bus) que implementa o protocolo RS232. Esta comunicação é usada para que os programas ou firmware do microcontrolador, possam ser implementados em um computador externo e a seguir enviado ao microcontrolador. Esta comunicação também pode ser utilizada como entrada e saída de dados com outros sistemas digitais externos ao Arduino e

que reconheçam o protocolo RS232. A placa Arduino possui um barramento de dados de entrada e saída conectado ao pinos do microcontrolador. Algumas entradas são analógicas (MCROBERTS, 2011) e podem ser configuradas como entrada do conversor analógico-digital (ADC) do Arduino que possui uma resolução de 10 bits. A configuração do ADC do Arduino neste projeto estabeleceu uma resolução em tensão elétrica de 4mV. A placa Arduino opera com uma tensão elétrica de 9 VDC e fornece ao microcontrolador e sistemas periféricos tensões de 3.3V e 5V.

O algoritmo que controla o sistema foi implementado no ambiente de desenvolvimento integrada (*Integrated Development Enviroment* - IDE) do Arduino onde usando a linguagem Processing o programa foi compilado e a seguir enviado ao microcontrolador Atmega da placa Arduino. O microcontrolador Atmega usado na placa foi o AT328P.

4.1.1 Escala Reduzida

O sistema em escala reduzida tem como objetivo avaliar o uso do medidor de vazão via sensoriamento Hall nos processos industriais de produção de palatabilizantes e propor uma alternativa para otimização do processo no controle da vazão de fluidos.

Foi criado um protótipo dos tanques e da tubulação em uma escala de 1:8, em relação sistema industrial de produção de palatabilizantes.

Entre um tanque e outro do modelo reduzido está inserida uma tubulação de 1/2 polegada. Nesta tubulação está inserida uma válvula de esfera, para permitir um acionamento rápido, com boa estanqueidade e perda de carga desprezível; está inserida também uma turbina na forma de um rotor, com 4 pás montadas perpendicularmente ao fluxo e um corpo magnético anexado ao eixo capaz de gerar um campo magnético de aproximadamente 30 Gauss a um distância linear de 3 cm, que será responsável para gerar o campo magnético que escitará o sensor de efeito Hall.

O desenvolvimento de um protótipo em escala reduzida, respeitando as dimensões reais, permite simular o transporte de fluidos em uma planta industrial e, consequentemente, permite que seja possível avaliar a eficácia do uso da

instrumentação eletrônica desenvolvida baseada no efeito Hall e em hardware livre, para a medição da vazão do fluido.

4.2 Métodos

O escoamento do fluido pela tubulação faz com que a turbina gere um movimento rotacional com velocidade proporcional à velocidade de escoamento. Este movimento rotativo faz com que o corpo magnético no eixo gere pulsos elétricos com frequência proporcional a velocidade de escoamento, e a frequência destes pulsos é captada pelo sensor de efeito Hall, calculada e convertida pelo microcontrolador em uma medida de vazão.

A equação do medidor foi determinada, obtendo valores da frequência do pulso magnético gerado pela velocidade de escoamento do fluido e comparando com um medidor padrão, o fator K do medidor será o inverso do coeficiente angular da reta. Sendo assim, foi usada a equação 4, uma vez que a frequência dos pulsos gerados e a velocidade são linearmente proporcionais. Ainda que o modelo físico-matemático não seja linear, é possível traçar uma curva de tendência linear para simplificação do sistema (RIBEIRO, 2002).

$$y = ax + b \qquad (4)$$

Onde:

Y = velocidade (m/h)

X = frequência dos pulsos

A = Coeficiente angular da reta

B = Coeficiente linear da reta

O método volumétrico de medida de vazão é equacionado a partir da variação volumétrica por uma determinada variação de tempo. Esta metodologia foi utilizada como método padrão para calibração do medidor de vazão por sensoriamento Hall. Desta forma, tem-se a equação 5, de cálculo de vazão volumétrica pelo método volumétrico.

$$V = \frac{\Delta\, volume}{\Delta\, tempo} \qquad (5)$$

Onde:

V = Vazão volumétrica

A vazão é proporcional à velocidade do fluido, sendo que ao multiplicar a velocidade pela área de secção transversal tem-se a vazão volumétrica (FOX et al, 2010). Assim, utilizando a equação 6, onde com os valores de velocidade obtidos na equação 4, obtém-se a vazão:

$$\mathrm{Q} = \vartheta \text{ x } \mathrm{A} \qquad (6)$$

Onde:

Q = vazão mássica(m^3/h)

ϑ = velocidade (m/h)

A = área da secção transversal (m^2)

No medidor de turbina, a velocidade de escoamento do fluido é proporcional a velocidade de rotação das hélices, mesmo que em regimes transientes. Neste tipo de medidores, também se tem o coeficiente de vazão K, utilizado na equação da vazão (equação 7). O coeficiente K é calculado particularmente para cada equipamento pela calibração e depende da vazão e da viscosidade do fluido (DELMEÉ, 1983).

$$V = \frac{f}{K} \qquad (7)$$

Onde:

V = vazão volumétrica

f = frequência dos pulsos

K = constante K do medidor

Devido à viscosidade do fluido e a rugosidade do tubo, uma força de atrito surge entre o fluido e a parede do tubo nos vetores de velocidade gerando um perfil de velocidade diferente para cada tipo de fluido (newtoniano ou não newtoniano). Isso por que as lâminas de fluido são desaceleradas em virtude da ação das forças viscosas e esse efeito prolonga-se à massa de fluido gerando uma camada limite próxima a parede do tubo (GEANKÓPOLIS, 2003).

O sistema de aquisição de dados do medidor de vazão será desenvolvido para receber o sinal de saída do sensor eletromagnético e convertê-lo em vazão e será provido de rotinas para medidas instantâneas da vazão. O sistema de aquisição de dados baseado no Arduino será acoplado a uma tela LCD onde os valores medidos serão mostrados ao usuário.

5 Resultados

5.1 Resultados – medição de vazão

O protótipo corresponde, em escala reduzida, as instalações industriais o que permitiu avaliar a medição de vazão por sensoriamento Hall neste sistema e a sua aplicabilidade perante a necessidade industrial.

O medidor de vazão foi submetido ao escoamento de fluido palatabilizante e água e sua vazão foi calculada convertendo os sinais captados pelo sensor de efeito Hall em vazão, conforme algoritmo implementado na linguagem *Processing* no Arduino. Estes algoritmos estão indicados no apêndice I para água e no apêndice II para palatabilizantes.

O algoritmo foi inserido no software do arduíno conforme interface apresentado na figura 9.

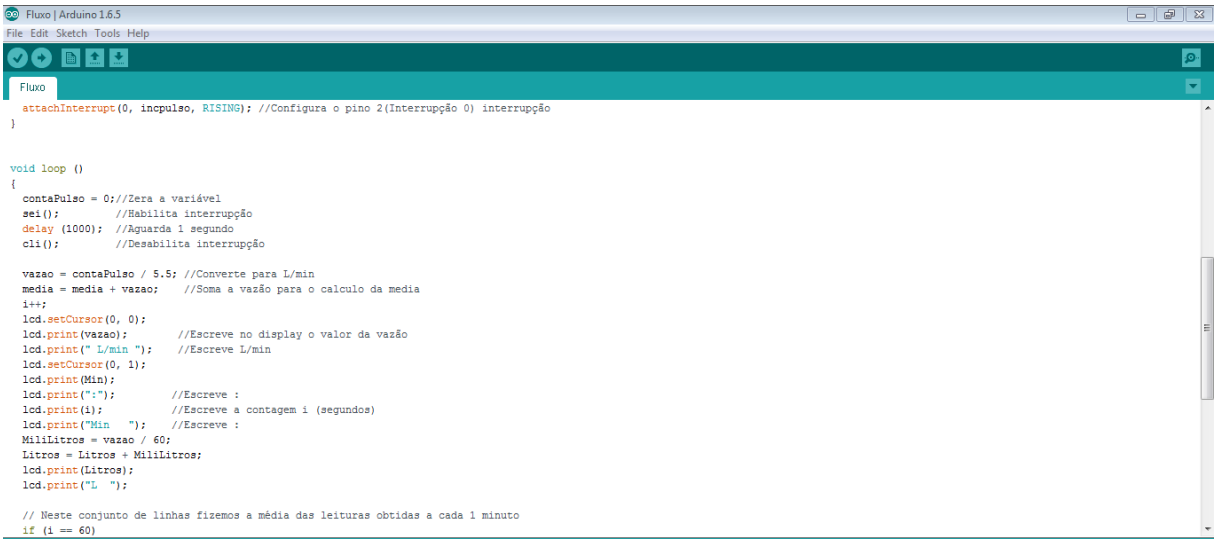

Figura 9 – Interface do *software* utilizado na programação do algoritmo

O medidor de vazão foi submetido a uma vazão entre 1 a 8 litros por minuto para água e para palatabilizantes.

A tabela 2 mostra os dados de vazão calculados, para o escoamento de água, de acordo com o sinal elétrico captado, utilizando a equação 8.

Tabela 2 - Dados experimentais do medidor de vazão por sensoriamento Hall para água

Vazão (L/min)	Pulsos
1,09	6,00
1,16	7,00
1,89	11,00
2,54	14,00
3,00	17,00
3,13	18,00
3,73	21,00
4,07	23,00
4,20	23,00
4,83	27,00
6,41	35,00
6,57	36,00
6,99	39,00
7,07	39,00

Estes valores obtidos mostram que a disposição geométrica do sensor de efeito Hall contribui para a medição do campo conforme observado por Hasanusta (2016).

A partir dos dados da tabela 2, plotou-se o gráfico ilustrado na fígura 10, e através de uma regressão linear foi possível obter a equação que correlaciona o número de pulsos captados durante um intervalo de tempo e a vazão volumétrica do fluido. Esta equação 8 representa a correlação dos dados que apresentaram um coeficiente de correlação de 0,9992.

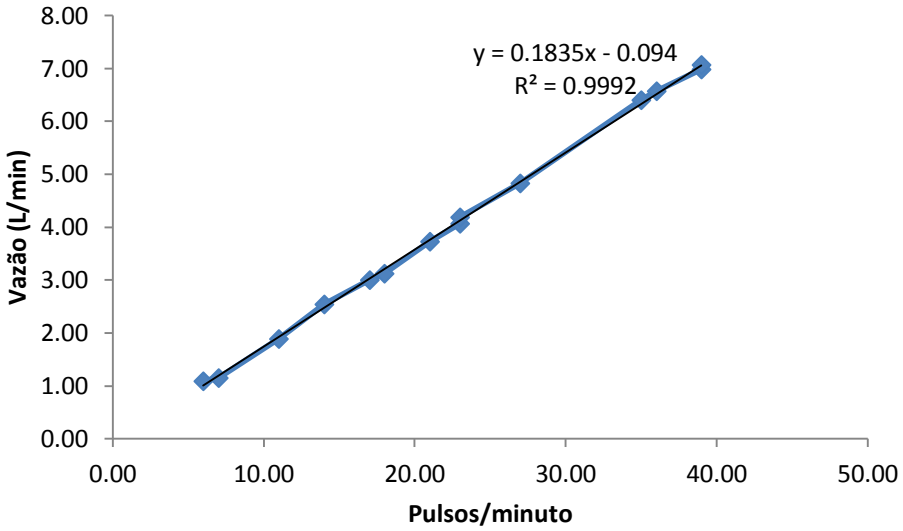

Figura 10 - Vazão x frequência dos pulsos para água

$$y = 0{,}1835x - 0{,}094 \qquad (8)$$

Onde:

Y é a vazão em litros por minuto
X é a quantidade de pulsos por minuto

A regressão linear aplicada permitiu a definição da constante K do medidor de vazão, sendo ele o coeficiente angular da reta elevado a menos um. A constante K é uma constante particular de cada medidor e dependente da viscosidade do fluido e necessário para a conversão do sinal captado em vazão. Para o modelo em estudo o coeficiente K é de 5,5 para o fluido água.

Na calibração do medidor de vazão, para o fluido água, foram utilizados os dados de vazão calculados através da vazão volumétrica real determinada a partir do tempo necessário para o escoamento de 9 litros de água e os calculados através dos sinais elétricos captados pelo sensor de efeito Hall pelo algoritmo programado no Arduíno. A figura 11 indica a dispersão entre o calculado pelo método proposto (eixo da vazão calculada no gráfico) e o calculado pelo método volumétrico, indicado pela equação 6 (eixo da vazão observada no gráfico). O gráfico obtido na figura 10 corrobora com o que foi observado nos relatos de Delmée (1983).

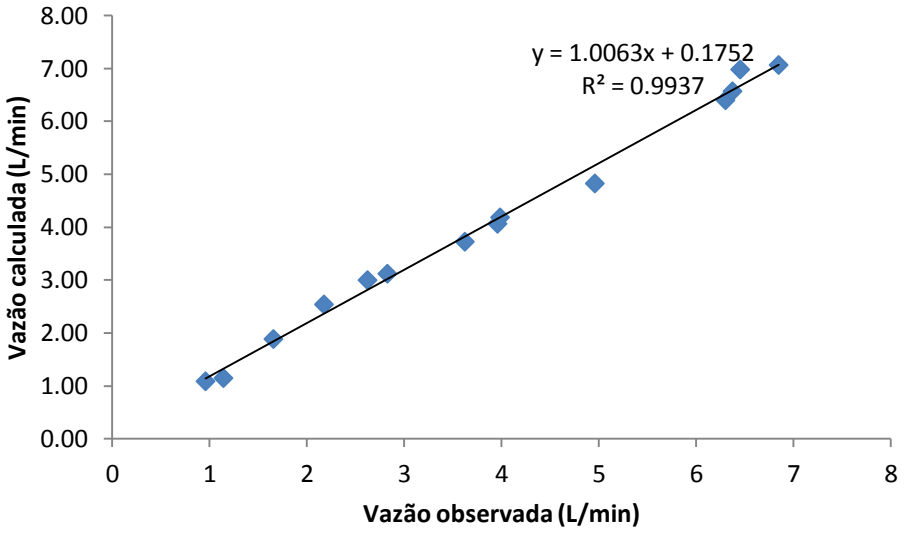

Figura 11 - Dispersão média entre vazão calculada e observada

Através da dispersão entre a vazão real e teórica foi gerado o gráfico ilustrado na figura 11, onde pôde-se determinar o coeficiente de determinação (R^2) de 0,9937 e o coeficiente de descarga de 1,0063. A dispersão com coeficiente de descarga próximo a um, indica uma boa precisão do medidor, sendo que parte desta dispersão provém da aproximação para um valor inteiro da constante K. O erro de fundo de escala foi calculado em ± 1% para este procedimento.

Foi plotada, através de dados experimentais, o gráfico ilustrado na figura 12 que correlaciona a vazão em litros por minuto e o número de pulsos captados pelo sensor de efeito Hall por minuto para o fluido palatabilizante. O comportamento linear observado e os valores obtidos estão de acordo com o que é esperado para este tipo de medidor e corrobora com os relatos de Ribeiro (2002).

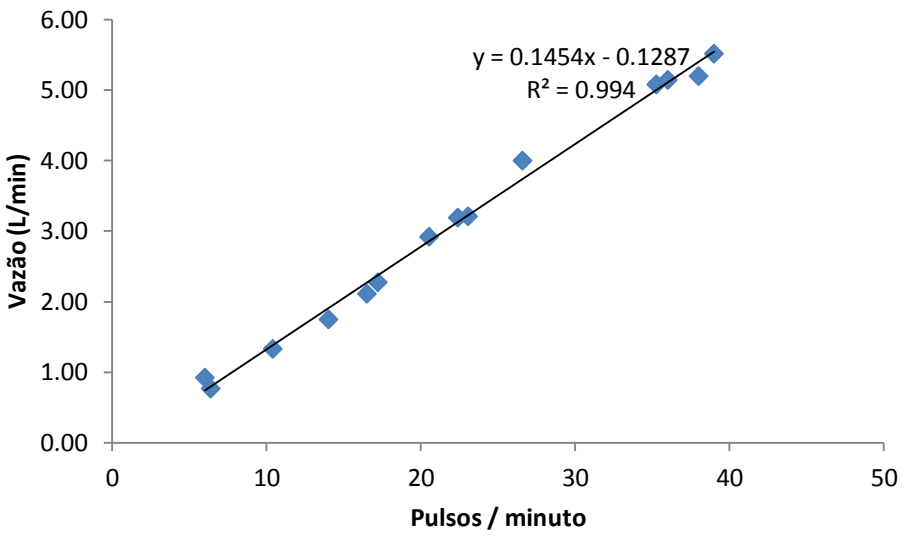

Figura 12 - Gráfico vazão x frequência dos pulsos para palatabilizante

Aplicando uma regressão linear foi determinada a equação 9.

$$y = 0{,}1454x - 0{,}1287 \qquad (9)$$

Onde:

Y é a vazão em litros por minuto

X é a quantidade de pulsos por minuto

Pelaa equação 9 foi possível se determinar a constante K do medidor em estudo para o fluido palatabilizante. O valor calculado da consantante K nessas condições é de 7.

Na calibração do medidor de vazão, para o fluido palatabilizantes, foram utilizados os dados de vazão calculados pelo método volumétrico e pelo sensoriamento Hall. O gráfico ilustrado na figura 13 indica a dispersão entre o calculado pelo método proposto (eixo da vazão calculada no gráfico) e o calculado pelo método volumétrico, indicado pela equação 6 (eixo da vazão observada no gráfico).

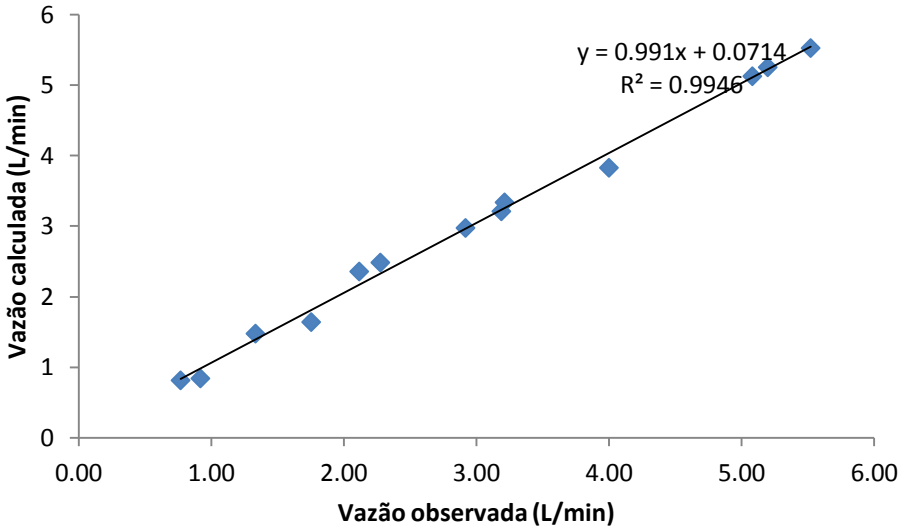

Figura 13 - Dispersão entre vazao calculada e observada para palatabilizante

Pela dispersão entre a vazão real e teórica, gerou-se o gráfico ilustrado na figura 13, onde pode se determinar o coeficiente de determinação (R^2) de 0,9946 e o coeficiente de descarga de 0,9910. A dispersão com coeficiente de descarga próximo a um, indica uma boa precisão do medidor, sendo que parte desta dispersão provém da aproximação para um valor inteiro da constante K. Neste procedimento o erro de fundo de escala foi estimado em ± 2 %.

O sistema em escala reduzida permitiu visualizar e com isso projetar como seria o sistema de medição baseado em campo magnético. Desta forma, foi possível medir a vazão utilizando um sensor de efeito Hall, captando pulsos de um campo magnético de 30 Gauss gerada pela rotação da turbina.

Na figura 14 apresenta-se a foto do display do medidor com o arduíno acoplados em uma carcaça, onde todo o processamento ocorre e as informações de vazão instantânea, volume acumulado e tempo de fluxo de fluido são mostrados no visor de cristal líquido.

Figura 14 –Display do medidor de vazão por sensoriamento Hall

No display, apresentado na figura 14, foi programado para apresentar a vazão calculada entre a vazão instantânea e a média da vazão, o volume acumulado que fluiu pelo medidor e o tempo de funcionamento de medição de vazão.

5.2 Estimativas de custo do protótipo

O custo foi dividido em duas partes o custo do medidor de vazão e o custo do sistema em escala piloto para avaliação do medidor de vazão, conforme tabela 3. É importante que ambos sejam avaliados separadamente, pois ao analisarmos os custos grande parte foram atribuídos a construção do sistema em escala piloto e em sistemas já construídos o que necessita-se para implementação é o medidor de vazão por sensoriamento Hall estudado nesta dissertação.

Embora tenha-se levantado os custos dos materiais para desenvolvimento do medidor de vazão, há também o custo de mão de obra e custo intelectual do projeto o qual não foi mensurado e é aplicado comercialmente nos medidores encontrados no mercado.

Tabela 3 - Custo dos materiais para desenvolvimento do protótipo

Custos de desenvolvimento		
Item	Especificação	Preço
Caixa para acoplamento da turbina	Polietleno	R$ 50,00
Sensor de efeito Hall	CI US 1881	R$ 7,00
Adaptador Bluetooth	Módulo bluetooth HC-05	R$ 50,00
Potenciometro	ESP 8266 Nodemcu	R$ 6,00
Display	LCD 16x2 Hitachi FH44780 - 5V	R$ 15,00
Arduino	UNO R3 SMD AT MEGA 328P	R$ 25,00
Total Medidor de vazão		R$ 153,00
Válvula esfera	Válvula esfera passagem plena 150 libras	R$ 17,00
Tubulação de 1/2 polegada	Mangueira cristal 1/2	R$ 8,00
Tanques	Recipientes em aluminio 18L	R$ 250,00
Flange	Flange Anel 40 mm	R$ 27,00
Conexões PVC diversos	curva, cotovelo, niple, redução	R$ 15,00
Bomba	Bomba para recirculação	R$ 105,00
Total protótipo sistema em escala piloto		R$ 422,00
Custo total		R$ 575,00

Entretanto, visando a utilização industrial desta tecnologia para medição da vazão no processo de produção de palatabilizantes, devem ser realizados algumas adaptações no medidor para se adequar as necessidades particulares da empresa e do processo produtivo de palatabilizantes. Dentre as modificações mais significantes estão a construção do corpo do medidor em aço inoxidável 304, pois trata-se de uma exigência sanitária o que eleva significativamente a estimativa de custo do projeto em relação ao protótipo testado conforme apontado na tabela 4. Embora haja alteração no material do corpo do medidor, este não altera a concepção do uso da tecnologia para o processo no qual foi testado.

Além destes valores foi levantado um custo de R$ 15.000,00 para a elaboração de um projeto industrial deste medidor.

Tabela 4 - Estimativa de custos para o medidor de vazão industrial

Item	Especificação	Preço
Caixa para acoplamento da turbina	Aço Inox 304	R$ 350,00
Sensor de efeito Hall	SS495A	R$ 15,00
Adaptador Bluetooth	Módulo bluetooth HC-05	R$ 50,00
Potenciometro	ESP 8266 Nodemcu	R$ 6,00
Display	LCD 16x2 Hitachi FH44780 - 5V	R$ 15,00
Total Medidor de vazão		R$ 436,00

A estimativa de custo do projeto do medidor de vazão demonstrou que trata-se de um medidor de vazão de baixo custo quando comparados com os medidores de vazão encontrados atualmente no mercado para este modelo de utilização e economicamente viável, levando em consideração o custo-benefício do medidor, visto que apesar do custo estar abaixo quando comparado com outras tecnologias, a sua precisão e eficiência no processo de medição de vazão é equivalente as demais tecnologias.

5.3 Impactos da medição de vazão por sensoriamento Hall do processo produtivo de palatabilizantes

A alternativa apresentada para otimização do processo de produção de palatabilizantes que envolveu o desenvolvimento de um medidor de vazão por sensoriamento Hall permite o controle da vazão em tempo real e o controle da quantidade de fluido acumulada que escoou pelo medidor e consequentemente foi integrado ao processo produtivo.

Desta forma, seria possível conseguir um ganho de aproximadamente 10 % no tempo de processo de produção de palatabilizantes o que viabiliza a utilização da tecnologia neste processo. Como já discutido anteriormente o controle de fluidos no processo de produção de palatabilizantes se-dá pela observação da célula de carga e que para evitar interferências nesta medição deve-se dedicar um tempo específico do processo para esta observação, ao tempo que com o medidor de vazão a dosagem pode se dar simultaneamente com outros processos como aquecimento e

recirculação de produto, ou seja, não dependemos mais da estabilidade da célula de carga e economiza-se este tempo.

Entretanto, o ganho com a implementação da tecnologia apresentada vai além do ganho em tempo de processo, mas tem-se também a redução de desperdícios por conta da otimização e agilidade na medição de vazão, onde não depende-se mais da estabilização da célula de carga para a observação do peso real dosado, uma vez que o medidor desenvolvido fornece uma resposta imediata, evitando o risco de dosar de forma desnecessária algum ingrediente ou palatabilizante.

Além disso, o medidor de vazão por sensoriamento Hall trará como benefício uma maior padronização do produto devido a sua alta precisão em medição.

6 Conclusão

O protótipo em escala reduzida permitiu a avaliação e calibração do medidor de vazão por sensoriamento Hall, com resultados desejáveis para uma aplicação industrial. O medidor de vazão por sensoriamento Hall se mostrou uma alternativa viável para a medição de vazão de fluidos.

Apesar de existirem outras tecnologias mais complexas para medir vazão, como por exemplo a tecnologia desenvolvida por Campagna et al (2015) o sistema desenvolvido nesta dissertação é simples e eficiente. A medição de vazão por sensoriamento Hall, dentro deste contexto, pôde ser avaliada e o sistema foi eficiente para medição tanto para vazão de água quanto para o fluido palatailizante com uma exatidão de ± 2 %.

Conclui-se que o medidor de vazão por sensoriamento Hall possui precisão desejável e atende as necessidades levantadas pela indústria de palatabilizantes e as respectivas expectativas sobre a medição de vazão por sensoriamento Hall.

Conclui-se também que a prototipação em escala piloto é um eficiente método para desenvolver e testar sistemas industriais. Por fim pôde-se concluir que o sistema desenvolvido pode ser adaptado na escala real da indústria de palatabilizantes.

7 Sugestões para trabalhos futuros

Seguindo a linha de trabalho utilizando o sensoriamento Hall e visando otimizar os processos na indústria de palatabilizantes a partir de proteína animal, como sugestão de trabalho futuro tem-se a medição do grau de agitação do fluido palatabilizante dentro de um reator nos processos de hidrólise, pasteurização e mistura. Isto pode ser possível utilizando a mesma técnica utilizada com a adaptação do equipamento para a geração do campo magnético induzido para avaliação do grau de agitação dentro de um reator.

8 Referências bibliográficas

ANDERSON, N. A. **Istrumentation for process measurement control**. 3ª ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10396 – Medidores de vazão de fluidos**. Rio de Janeiro, 13p, 1988.

AWWA, **Flowmeters in Water Supply**. 1ª edição, Denver, American Water Works Association, 1989.

BANNOCK, G., R. E. Baxter, and E. Davis. 2003. The Penguin dictionary of economics. Penguin Books Ltd. 7 Rev Ededition. 416 pp

BANZI, M.; SHILOH, M. **Make - Getting Started with Arduino: The Open Source Electronics Prototyping Platform**. 2. ed. United States: O'Reilly Media, 2015.

BATES, C.J.; TURNER, R.B., **Fluid flow studies associated with a new eletromagnetic flowmeter, Measurement**, 33, 2003, 85-94.

BEQUETTE, W., OGUNNAIKE, B.A. - **Chemical process control education and practice** - IEEE Control System Magazine, pp.10-17, 2001.

BRASIL. **Instrução Normativa N° 13**, de 13 de novembro de 2004. Aprova o Regulamento Técnico sobre Aditivos Destinados a Alimentação Animal. Brasília. 2004.

BONDI, A.A.. Characteristics of scalability and their impact on performance. Proceedings of the 2nd international workshop on Software and performance, pag 195-203, Nova York, 2000.

BEGA, E. A.; DELMÉE, G.J.; COHN, P.E.; BULGARELLI, R.; KOCH, R.; FINKEL, V.S. **Instrumentação Industrial**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2006.

CAMARGO, Antonio Pires de et al . **Load cell adoption in an electronic drag force flowmeter**. Sci. agric. (Piracicaba, Braz.), Piracicaba , v. 68, n. 3, June 2011 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162011000300002&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 04 de outubro de 2013. http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162011000300002.

CAMPAGNA, M. M. DINARDO, G. FABBIANO, L. VACCA, G. **Fluid flow measurements by means of vibration monitoring**. Measurement Science and Technology, v 26, n 11, 2015.

CHEREMISINOFF, N.P., **Applied fluid flow Measurement – Fundamentals and Thecnology**. 1ª edição, Nova Iorque, MARCEL DEKKER INC., 1979.

DA SILVEIRA, S. A. **Inclusão digital, software livre e globalização contra-hegemônica. Software Livre e Inclusao Digital-Organizadores: Sergio Amadeu de Silveira e Joao Cassino**, v. 7, p. 11, 2003.

D'AUSILIO, A. **Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment**. Behavior Research Methods, v. 44, n. 2, p. 305–313, 25 out. 2011.

DELMÉE, Gerard Jean, 1983, "**Manual de medição de vazão**" 2ª Edição, Edgard Blücher

FATEHNIA, M. PARAN, S. KISH, S. TAWFIQ, K. **Automating double ring infiltrometer with Arduino controller**. Geoderma, v 262, p 133-139, 2016.

FERDOUSH, S.; LI, X. **Wireless Sensor Network System Design Using Raspberry Pi and Arduino for Environmental Monitoring Applications**. Procedia Computer Science, v. 34, p. 103–110, 2014.

FIALHO, A. B. **Instrumentação Industrial: Conceitos, Aplicações e Análises**. 4ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2006.

FOX, R.W., PRITCHARD, P.J., McDONALD, A.T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7ª Ed. LTC Editora, 2010.

GEANKOPOLIS, C. J. **Transport Processes and Separation Processes Principles**. 4ª ed., NY. Prentice Hall, 2003.

GRUBELNIK, V.; MARHL, M.. **Drop Formation in a Falling Stream of Liquid**, American Journal of Physics. 73 (5) May 2005, pp. 415-419

HASANUSTA, K. SERTELLER, N. F. O. BIRBIR, Y. **The optimal hall sensor's position for brushless direct current machine: Experimental study**. Revista Tecnica de ka Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia, v 39, n1, p218-225, 2016.

JAYAWANT, B.V.- **Are we in control?** – IEE Proceedings, vol. 135, Pt. D, no. 1, January 1988.

JOGALEKAR, P. **Evaluating the scalability of distributed system.** Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions On. Vol 11, p. 589-603, 2000.

KILIAN, Christopher. Modern Control Technology: Components & Systems, Capítulo 6. Delmar, 2a Ed., 2004.

KOENKA, I. J.; SÁIZ, J.; HAUSER, P. C. **Instrumentino: An open-source modular Python framework for controlling Arduino based experimental instruments**. Computer Physics Communications, v. 185, n. 10, p. 2724–2729, out. 2014.

LIM, K.W., CHUNG, M. K., **Relative errors in evaluating the electromagnetic flowmeter signal using the weight function method and the finite volume method,** Flow Measurement and Instrumentation. vol. 9, p. 229-235, 1998.

MARTIM, A. L. S. S. **Avaliação do desempenho de um Medidor de Vazão Eletromagnético em Situações Práticas Reais de Instalação.** 2005. 199p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Pós graduação da faculdade de engenharia civil, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

MCROBERTS, Michael. **Arduino Básico**. [tradução. Rafael Zanolli]. 1a ed. São Paulo: Editora Novatec, 2011.

MECATRÔNICA Atual, **Sensor Hall, A tecnologia dos posicionadores inteligentes**, 2013. Disponível em: http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1684-sensor-hall-a-tecnologia-dos-posicionadores-inteligentes, Acesso em: 14 de abril e 2015.

MECATRÔNICA Atual, **Medidor de vazão tipo magnético**, Ed. 020, Editora Saber. 2005

OGATA, K. (2005). **Engenharia de controle moderno**, 3 ed., Pearson Prentice-Hall, Rio de Janeiro.

RIBEIRO, J. M. et al., 2014. **Sistema de moitoramento e controle de um processo de distribuição de água usando Arduino e protocolo GSM**.. Florianópolis: Congresso Brasileiro de Engenharia Quimica.

RIBEIRO, M. A., 7ª edição. **Controle de Processos: Teoria e Aplicações**. Salvador: 2011.

RIBEIRO, M.A. **Instrumentação**, 9ª edição, Salvador. Tek Treinamento e Consultoria Ltda, 2002.

RODRIGUES, G.G. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Não-Lineares Utilizando Modelos NARMAX Polinomiais - Aplicação a Sistemas Reais**, Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

SHERCLIFF, J.A., **The Theory of Electromagnetic Flowmeasurement**. 1ª edição, Londres, Ed. Cambridge Univ., 1962.

SCHMIDT, C.G.; SALAS-MELLADO, M. **Influência da ação das enzimas alcalase e flavourzyme no grau de hidrólise das proteínas de carne de frango**. Quím. Nova, São Paulo, v. 32, n. 5, 2009 .

SOARES, K., 2014. TechTudo. [Online] Disponível em: http://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2013/10/o-que-e-um-arduino-e-o-quepode- ser-feito-com-ele.html. Acesso em: 10/07/2016.

SOUZA, Z.; BORTONI, E. C., **Instrumentação para sistemas energéticos e industriais**, Editora Novo Mundo, Brasil, 2006.

THÜRLEMANN, B., **Methode zur Elektrischen Geschwindigkeitsmessung in Flüssigkeiten, Helv. Phys. Acta**, pp. 383-419 3, 1941.

TORRES, Norberto (1995)A. Competitividade Empresarial com a Tecnologia dInformação. São Paulo. Makron Books

VOLTAN, D. A. **Desenvolvimento de um Sistema computacional integrado para monitoramento de parâmetros físico-quimicos da água e análise óptica de gotejadores.** 81 p**.** Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2015.

YODER, J., **The Global Market for Magnetic Flowmeters**, Flow Research Inc., Wakefield, MA, 2005..

9 Apêndice

Apêndice I – Algoritmo para a medição da vazão para água

```
#include <LiquidCrystal.h>
float vazao;          //Variável para armazenar o valor em L/min
float media = 0;      //Variável para fazer a média
int contaPulso;       //Variável para a quantidade de pulsos
int i = 0;            //Variável para segundos
int Min = 00;         //Variável para minutos
float Litros = 0;     //Variável para Quantidade de agua
float MiliLitros = 0; //Variavel para Conversão

LiquidCrystal lcd(8, 7, 6, 5, 4, 3);

void setup()
{
  Serial.begin(9600);

  lcd.begin(16, 2);
  lcd.setCursor( 0, 0);
  lcd.print("Sensoriamento de");
  lcd.setCursor( 0, 1);
  lcd.print(" fluxo de Agua  ");
  delay(3000);
  lcd.clear();

  pinMode(2, INPUT);
  attachInterrupt(0, incpulso, RISING); //Configura o pino 2(Interrupção 0) interrupção
}

void loop ()
{
```

```
contaPulso = 0;//Zera a variável
sei();        //Habilita interrupção
delay (1000);  //Aguarda 1 segundo
cli();        //Desabilita interrupção

vazao = contaPulso / 5.5; //Converte para L/min
media = media + vazao;    //Soma a vazão para o calculo da media
i++;
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(vazao);        //Escreve no display o valor da vazão
lcd.print(" L/min ");    //Escreve L/min
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(Min);
lcd.print(":");         //Escreve :
lcd.print(i);           //Escreve a contagem i (segundos)
lcd.print("Min   ");    //Escreve :
MiliLitros = vazao / 60;
Litros = Litros + MiliLitros;
lcd.print(Litros);
lcd.print("L  ");

// Neste conjunto de linhas fizemos a média das leituras obtidas a cada 1 minuto
if (i == 60)
{
  Min++;
  lcd.print(Min);

  if (Min >= 60)
  {
    Min = 0;
  }

  media = media / 60;                    //faz a média
  Serial.print("nMedia por minuto = "); //Imprime a frase Media por minuto =
```

```
    Serial.print(media);                //Imprime o valor da media
    Serial.println(" L/min - ");        //Imprime L/min
    media = 0;                          //Zera a variável media para uma nova contagem
    i = 0;                              //Zera a variável i para uma nova contagem
  }
}

void incpulso ()
{
  contaPulso++; //Incrementa a variável de pulsos
}
```

Apêndice II – Algoritmo para a medição da vazão para água

```
#include <LiquidCrystal.h>
float vazao;          //Variável para armazenar o valor em L/min
float media = 0;      //Variável para fazer a média
int contaPulso;       //Variável para a quantidade de pulsos
int i = 0;            //Variável para segundos
int Min = 00;         //Variável para minutos
float Litros = 0;     //Variável para Quantidade de agua
float MiliLitros = 0; //Variavel para Conversão

LiquidCrystal lcd(8, 7, 6, 5, 4, 3);

void setup()
{
  Serial.begin(9600);

  lcd.begin(16, 2);
  lcd.setCursor( 0, 0);
  lcd.print("Sensoriamento de");
  lcd.setCursor( 0, 1);
  lcd.print("fluxo de palatabilizantes");
  delay(3000);
  lcd.clear();

  pinMode(2, INPUT);
  attachInterrupt(0, incpulso, RISING); //Configura o pino 2(Interrupção 0) interrupção
}

void loop ()
{
  contaPulso = 0;//Zera a variável
  sei();        //Habilita interrupção
```

```
delay (1000);  //Aguarda 1 segundo
cli();         //Desabilita interrupção

vazao = contaPulso / 7.0; //Converte para L/min
media = media + vazao;    //Soma a vazão para o calculo da media
i++;
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(vazao);        //Escreve no display o valor da vazão
lcd.print(" L/min ");    //Escreve L/min
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(Min);
lcd.print(":");          //Escreve :
lcd.print(i);            //Escreve a contagem i (segundos)
lcd.print("Min   ");    //Escreve :
MiliLitros = vazao / 60;
Litros = Litros + MiliLitros;
lcd.print(Litros);
lcd.print("L  ");

// Neste conjunto de linhas fizemos a média das leituras obtidas a cada 1 minuto
if (i == 60)
{
  Min++;
  lcd.print(Min);

  if (Min >= 60)
  {
    Min = 0;
  }

  media = media / 60;                  //faz a média
  Serial.print("nMedia por minuto = "); //Imprime a frase Media por minuto =
  Serial.print(media);                 //Imprime o valor da media
  Serial.println(" L/min - ");         //Imprime L/min
```

```
    media = 0;                          //Zera a variável media para uma nova contagem
    i = 0;                              //Zera a variável i para uma nova contagem
  }
}

void incpulso ()
{
  contaPulso++; //Incrementa a variável de pulsos
}
```