SIDNEY BRAKARZ LUBICZ

**Projeto e desenvolvimento de contador de esferas
abrasivas em meios turvos**

Projeto de Graduação

Trabalho apresentado ao final do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica PUC – Rio como parte dos requisitos à conclusão do curso de Engenharia Mecânica

Orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa
Co-orientador: Maurício Nogueira Frota

Rio de Janeiro, Dezembro de 2016.

SIDNEY BRAKARZ LUBICZ

**Project and development of a counter for cleaning spheres
in cloudy waters.**

Undergraduate Paper

Paper presented at the end of Mechanical Engineering undergraduate degree at PUC - Rio Mechanical Engineering Department as part of the requirements for completing the Mechanical Engineering degree

Tutor: Carlos Roberto Hall Barbosa

Co-Tutor: Maurício Nogueira Frota

Rio de Janeiro, December 2016.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Carlos Roberto Hall Barbosa, ao co-orientador Maurício Nogueira Frota, e ao aluno de mestrado em Metrologia João Ricardo Cortes Nunes pelos ensinamentos, disponibilidade, ajuda, incentivo e orientação durante esse projeto.

Aos meus pais e irmão, Eytan, Lia e Edgar, por sempre acreditarem em mim e me apoiarem nos momentos mais difíceis.

Aos funcionários do CTPRJ, que auxiliaram na parte inicial deste projeto.

Aos meus amigos do curso da PUC-Rio, sem vocês não conseguiria chegar ao fim do curso.

RESUMO

Neste projeto, foram avaliadas as possibilidades de melhoria na contagem de esferas abrasivas, cuja finalidade é a limpeza de dutos de um trocador de calor. Ensaios foram feitos por meio de uma bancada de testes desenvolvida como Projeto Final em Engenharia Mecânica pela PUC-Rio de Kim Carvalho Oliveira, que simula o sistema injetor desse processo de limpeza. Para o funcionamento adequado do sistema, todas as esferas inseridas devem ser coletadas ao final do processo e, para isso, foi desenvolvido um sistema opto-eletrônico para uma contagem automática das mesmas. O objetivo do presente projeto foi aperfeiçoar o sistema previamente desenvolvido para a contagem das esferas, permitindo a operação em meios muito turvos.

Palavras chaves: Bancada de teste, limpeza trocador de calor, esferas abrasivas, detecção, limiar de tensão.

ABSTRACT

In this project, the possibilities of improvement in the counting of cleaning spheres, whose purpose is the cleaning of the ducts of a heat exchanger, were evaluated. Tests were done through a test bench developed as a Final Project in Mechanical Engineering by PUC-Rio by Kim Carvalho de Oliveira that simulates the injector system of this cleaning process. For the proper functioning of the system, all the spheres inserted must be collected at the end of the process and, for this reason, an opto-electronic system was developed for an automatic counting of the spheres. The objective of this project was to improve the previously developed system for counting the spheres, allowing the operation in very cloudy waters.

Key Words: Test bench, heat exchanger cleaning, detection voltage, cleaning spheres.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Contextualização do Projeto	9
1.2. Motivação do Projeto.....	13
1.3. Objetivo do Trabalho	15
1.4. Organização do Trabalho	16
2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	18
2.1. Bancada de Testes	18
2.2. Instalação Inicial e Funcionamento.....	20
2.2.1. Parte Hidráulica	20
2.2.2. Parte Eletrônica	22
2.2.2.1. Microcontrolador	23
2.2.2.2. Sensores Ópticos.....	25
2.3. Adaptação da Bancada de Testes	26
2.4. Bancada em Laboratório.....	27
2.4.1. Preparação para o Experimento	28
2.4.1.1. Sensores SDP8436	30
2.4.2. Teste com Janela do SIREA	32
2.4.3. Testes com LabVIEW (Potencialização dos Sensores).....	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
3.1. Curva de Resposta	39
3.2. Ensaios com Maior Potência de Emissão.....	42
4. CONCLUSÕES	49
5. REFERÊNCIAS	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Usina Hidrelétrica de Itaipu	9
Figura 2 - Esquema de Funcionamento de uma Hidrelétrica.....	5
Figura 3 - Turbina Conectada a um Gerador.....	6
Figura 4 – Classificações de Trocadores de Calor.	12
Figura 5 – Corte de Seção da Esfera Abrasiva.	13
Figura 6 – Forma de Atuação da Esfera dentro do Duto.	14
Figura 7 – Esferas Recuperadas Após Realizada Limpeza.	14
Figura 8 – Esquema do Sistema SIREA.....	15
Figura 9 – Montagem Final da Bancada.....	19
Figura 10 – Diagrama do Sistema Hidráulico da Bancada de Testes.....	20
Figura 11 – Bancada de testes com registros numerados.	21
Figura 12 – Placa Eletrônica ATMEGA 2560.....	23
Figura 13 – Shield LCD Especificado.....	24
Figura 14 – Caixa com Microcontrolador e Display de LCD.	24
Figura 15 – Sensor Honeywell HOA 6299.	
Figura 16 – Esquema do	
Circuito Eletrônico do Par de Sensores.	25
Figura 17 – Dados do Sensor Honeywell HOA6299.	25
Figura 18 – Diagrama do Circuito Eletrônico Montado na Protoboard.	29
Figura 19 – Bancada Experimental Montada sem Obstrução do Feixe.	29
Figura 20 – Bancada Experimental Montada com DutoTubo vedado e a Esfera Inserida.....	30
Figura 21 – Sensores SDP8436 (Emissor e Receptor)	31
Figura 22 – Resposta do Sensor em Relação ao Ângulo Vertical.	31
Figura 23 – Diodo-Emissor em Funcionamento.	32
Figura 24 – Bancada Experimental: Testes com Janela do SIREA.....	32
Figura 25 – Diagrama do Circuito Montado na Protoboard Após PotencializaçãoAumento da Potência do Emissor.	33
Figura 26 – Nova Bancada Experimental Montada.....	34
Figura 27 – Discretização de um Sinal em Conversão A/D.	35
Figura 28 – Discretização de um Sinal em Conversão A/D (2).	35
Figura 29 – Adaptação para Fixação dos Sensores no DutoTubo de acrílico.	36
Figura 30 – Progressão de Concentrações Utilizadas no Experimento (0,25 mL/L, 0,75 mL/L, 1,50mL/L, 2,25 mL/L, 3,00 mL/L 6,00 mL/L).	40
Figura 31 – Queda de Tensão Devidao à Adição Parcial de Corante.....	41
Figura 33 – Ruído do Sinal de Tensão para Média de 1 Ponto por Intervalo de Tempo.	43
Figura 35 – Ruído do Sinal de Tensão para Média de 50 Pontos por Intervalo de Tempo.....	44
Figura 37 – Ruído do Sinal de Tensão para Média de 200 Pontos por Intervalo de Tempo....	45
Figura 38 – Pulsos Causados pela Passagem da Esfera em Concentração Igual a 6,0 mL/L...47	
Figura 39 – Pulsos Causados pela Passagem da Esfera em Concentração Igual a 7,0 mL/L...47	
Figura 40 – Pulsos Causados pela Passagem da Esfera em Concentração Igual a 7,6 mL/L...48	

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Registros na Configuração Inicial.....	17
Tabela 2 - Registros na Configuração de Circulação.....	18
Tabela 3 - Dados Iniciais Prévios às Medições.....	37
Tabela 4 – Comparação de Valor Medidos Medições com e sem Vedação.....	38
Tabela 5 – Medições [mV] com Oito Esferas Distintas nas Três Posições de Interesse.....	38
Tabela 6 – Testes Realizados com Água dentro do duto.....	39
Tabela 7 – Medições Realizadas com Diferentes Concentrações de Corante Diferentes e suas Respectivas Tensões associadas.....	40
Tabela 8 – Médias de Diferentes Quantidades de Pontos.....	43
Tabela 9 – Respostas dos Sensores Após Potencialização Aumento da Potência de emissão.....	46

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização do Projeto

A energia gerada a partir da água já era utilizada desde o século I a.C., época do Império Romano e da Dinastia Han, na China. Nesta época, utilizavam-se rodas d'água (ou noras), que consistem em um sistema acionado diretamente por uma queda d'água gerando, dessa forma, energia mecânica para desempenhar determinadas tarefas, tais como produção de farinha e açúcar.

Em 1753, Bernard Forest de Bélidor publicou uma de suas grandes obras, *Architecture hydraulique*, em que descreveu tudo o que era conhecido até então sobre engenharia hidráulica. Com isso, no final do século XIX, a partir da criação dos geradores elétricos, desenvolvidos por uma equipe liderada por Jacob S. Gibbs e Brinsley Coleberd, foi possível grande avanço na área de geração de energia durante a primeira Revolução Industrial. Em 1895, foi inaugurada a maior e mais importante hidrelétrica da época em Niagara Falls, Nova Iorque.

Atualmente, há diversos métodos de gerar energia a partir de hidrelétricas, sendo as represas as mais comuns, existindo inúmeras espalhadas por todo o mundo. Pode-se separá-las em categorias de acordo com a sua capacidade de geração de energia: Pico, Micro, Pequena e Grande, sendo esta, qualquer uma capaz de produzir uma quantidade de energia acima de 100 MW.

No Brasil, começou-se a adotar esse tipo de produção de energia, de forma relevante, a partir da segunda guerra mundial, e em 1984 foi inaugurada a segunda maior usina hidrelétrica do mundo (Itaipu), sendo capaz de produzir até 14000 MW (Fig. 1).

Figura 1 - Usina Hidrelétrica de Itaipu

As usinas hidrelétricas são responsáveis por gerar cerca de 90% da energia distribuída em todo o território brasileiro. Isso explica a razão de se investir tanto tempo e dinheiro para mantê-las em pleno funcionamento, de modo a evitar ao máximo o surgimento de problemas e situações indesejadas.

O funcionamento deste tipo de usina (conforme mostrado no esquema da Fig. 2) consiste em causar uma queda d'água a partir de um reservatório criado artificialmente por meio da construção de represas. Dessa forma, quanto mais alta a barragem, maior a capacidade de produzir energia elétrica devido à grande energia potencial armazenada.

Figura 2 – Esquema de Funcionamento de uma Hidrelétrica.

Fonte: <http://water.usgs.gov/edu/wuhy.html>.

Assim, conduz-se água a canais estrategicamente posicionados com o intuito de produzir energia cinética para realizar a movimentação de turbinas hidráulicas (Fig. 3) localizadas no final dos dutos da represa. Esses equipamentos estão conectados a geradores (especialmente projetados para este tipo de aplicação) através de eixos que produzem energia mecânica e a transformam em eletricidade. Isto se dá devido aos princípios da indução eletromagnética que, a partir da variação do fluxo magnético, produz uma força eletromotriz. Por fim, pode-se abastecer as cidades com energia elétrica via cabos de alta tensão que, ao chegarem às residências, contam com aparelhos chamados transformadores, que ajustam a tensão necessária aos estabelecimentos.

Figura 3 – Turbina Conectada a um Gerador.

Fonte: <http://www.infoescola.com/energia/usina-hidreletrica/>.

Conhecendo o funcionamento das hidrelétricas e sabendo de sua complexidade, conclui-se que é de extrema importância manter em dia a manutenção de seus equipamentos, de forma a manter um bom desempenho e durabilidade. Para isso, os hidrogeradores, um de seus principais equipamentos, contam com um sistema de arrefecimento para que os mesmos não sofram superaquecimento, que poderia comprometer o funcionamento da usina como um todo. Tal sistema é constituído por vários componentes, dentre eles os trocadores de calor.

Estes consistem em equipamentos responsáveis por transferir calor de um fluido a outro, de forma a rejeitar calor para o ambiente, aproveitando o fluido frio para que se possa efetuar a refrigeração desejada. Tais mecanismos são bastante comuns e facilmente encontrados em eletrodomésticos, como por exemplo geladeiras, condicionadores de ar, bebedouros, etc. Porém, em se tratando de máquinas de alto desempenho, há necessidade de um equipamento específico para esta aplicação.

Existem diversos tipos de trocadores de calor, que podem ser classificados de diferentes formas. Duas delas estão representadas de acordo com a Fig. 4.

Figura 4 – Classificações de Trocadores de Calor.

Fonte: http://www.ufjf.br/washington_irrazabal/files/2014/05/Aula-23_Trocadores-de-Calor.pdf.

Em geral, independente da classificação de acordo com a construção, esses equipamentos de auxílio são encontrados com maior frequência no mercado na forma de contato indireto, na qual os fluidos em diferentes temperaturas não se misturam. Para cada tipo de trocador de calor há uma aplicação específica, de forma a apresentar variações na eficiência, disponibilidade de espaço, recursos financeiros, etc.

Outros exemplos de classificações comuns são:

- Fluxo paralelo
- Contracorrente
- Correntes cruzadas

Os dois primeiros tipos mencionados funcionam com tubos montados longitudinalmente, diferenciando, apenas, no sentido do fluxo de cada um dos fluidos. Já o último é projetado para que a troca ocorra quando os fluidos se encontram perpendicularmente, como é no caso do Tubo e Carcaça.

É impossível falar de transmissão de calor sem mencionar um importante componente nessa área: a aleta. Sem ela, a transferência de calor não seria tão eficiente, devido ao fato da mesma proporcionar um aumento da superfície de contato em que ocorre a troca de calor. É comum o seu uso principalmente quando se utiliza o ar como fluido de troca, como por exemplo em condensadores para sistemas de refrigeração, radiadores de automóveis, dentre outros.

Sabendo-se que manter o interior dos tubos de trocadores de calor limpo e livre de incrustações é um desafio constante para as usinas hidrelétricas, seja qual for a sua capacidade de produção de energia, há grande necessidade de realizar limpezas periódicas para que seu funcionamento não seja comprometido.

1.2. Motivação do Projeto

Parte da água captada dos rios para a geração de energia é desviada para realizar o arrefecimento dos equipamentos em que há possibilidade de superaquecimento. Como há impurezas contidas nessa água, pode ocorrer o chamado *fouling*: os resíduos, que podem ser de natureza orgânica ou inorgânica, formam uma incrustação no interior dos tubos de trocadores de calor, fazendo com que o fluxo seja diminuído de forma que o sistema não funcione como deveria. Essa situação é extremamente indesejada, uma vez que, impedida de passar, a água deixa de cumprir seu papel de refrigeração, podendo ocasionar danos permanentes aos hidrogeradores, que certamente resultariam em prejuízos consideráveis.

Existem alguns tipos de limpeza para o interior de tubos de trocadores de calor, porém alguns requerem um grande investimento financeiro, além da necessidade de manter os equipamentos de geração fora de uso durante esse processo. Há, contudo, uma maneira alternativa de realizar esse procedimento de uma forma mais simples, que é a inserção de esferas abrasivas mitigadoras de incrustação, como a ilustrada na Fig. 5.

Figura 5 – Corte de Seção da Esfera Abrasiva.

Este método consiste em injetar, periodicamente, esferas na linha de circulação de água do sistema para que possa ser feita a remoção dos resíduos depositados nas paredes internas dos tubos. Elas são feitas de um material esponjoso e possuem cavidades em sua superfícies de forma a obter a maior capacidade de absorção possível. A ideia é que as esferas

inseridas trabalhem com uma pequena interferência para que se tenha uma garantia maior de que a incrustação seja removida de forma eficiente a cada passagem das mesmas pelo local crítico, como indicado na Fig. 6.

Figura 6 – Forma de Atuação da Esfera dentro do Duto.

A Figura 7 ilustra o estado das esferas após passarem por um ciclo de limpeza de um trocador de calor.

Figura 7 – Esferas Recuperadas Após Realizada Limpeza.

Todavia, um fato que deve ser levado em consideração é a possibilidade de as esferas ficarem presas dentro da tubulação. Isso pode ocorrer, dentre algumas razões, caso haja uma camada espessa de resíduos em determinado local, que impeça a passagem das esferas, bloqueando todas as outras que vierem atrás. Este é o pior cenário, uma vez que a vazão de água dentro dos dutos do sistema estaria comprometida e, em vez de proporcionar uma melhora nas condições de operação, estaria pondo em risco a saúde dos equipamentos. Seja qual for o caso, um procedimento chamado “varetagem” teria de ser realizado, auxiliado por uma lavagem interna com um jato sob alta pressão para que possa ser feita a retirada e coleta das esferas.

Tendo isso em vista, é nítida a necessidade de um processo de contagem desses instrumentos de limpeza para que se garanta o retorno de todas as esferas inseridas no trocador de calor. Dessa forma, requer-se a utilização de sensores e softwares computacionais para que tal procedimento possa ser feito de forma automática.

1.3. Objetivo do Trabalho

Com o intuito de eliminar o *fouling* no interior de dutos de trocadores de calor, foi desenvolvido pelo aluno de mestrado em Metrologia Velfe Hollandino de Oliveira Júnior, um sistema chamado SIREA, que tem como objetivo inserir e recuperar as esferas de limpeza. Esse mecanismo foi projetado de forma que fosse possível fácil locomoção e adaptação a diversos tipo de trocadores de calor. Conforme ilustrado na Fig. 8, consiste em uma bomba centrífuga, um lançador de esferas, uma unidade coletora e diversas válvulas, que controlam o fluxo das esferas e do fluido.

Figura 8 – Esquema do Sistema SIREA.

Para auxiliar no processo de desenvolvimento de um sistema de contagem automático das esferas, a formanda em engenharia mecânica Kim Carvalho de Oliveira desenvolveu uma bancada de testes para simular o SIREA. Desta forma, experimentos puderam ter sido feitos para aprender mais sobre o comportamento do equipamento optoeletrônico antes que fosse desenvolvido o sistema final a ser colocado em prática na indústria.

O objetivo do presente Projeto Final foi proporcionar melhorias no sistema de detecção das esferas abrasivas, realizada por sensores ópticos. Uma vez que esses instrumentos de limpeza se encontram em um meio turvo, a captação do sinal infravermelho se torna menos eficiente, chegando a um ponto em que deixa de funcionar devido à turbidez excessiva.

Devido a este fato, duas possibilidades foram consideradas inicialmente:

- a) Inserção de material ferromagnético nas esferas abrasivas e troca dos sensores ópticos por sensores magnéticos; ou
- b) Ajuste do limiar de detecção dos sensores ópticos.

A primeira opção consiste em tornar as esferas “visíveis” a sensores magnéticos. Sabendo que a turbidez da água de refrigeração é causada pela poluição provinda das incrustações presentes no tubo, esta seria uma boa opção para que o processo de contagem não fosse afetado. Desta forma, o problema da não detecção das esferas em meios turvos estaria resolvido, uma vez que sensores magnéticos independem dessa variável, estando relacionados, apenas, à presença de material ferromagnético para que a contagem seja possível. Porém, para que esta se tornasse uma opção viável, seria ideal que as esferas fossem fabricadas já com esse material, pois a princípio, qualquer outro meio para injetá-lo depois de prontas, poderia fazer com que as mesmas fossem danificadas. Já que a comunicação com um possível fornecedor brasileiro não pôde ser concretizada em tempo para realização deste projeto final, foi adotada a opção (b).

Os sensores instalados na bancada de testes hidráulica são de resposta binária, ou seja, retornam para a um microcontrolador acoplado ao sistema 0 V ou 5 V. Portanto, foram realizados testes de caracterização da resposta desses sensores para que fosse possível ajustá-los, de forma que os mesmos apresentassem melhorias em sua capacidade de detecção das esferas abrasivas mitigadoras de incrustação.

1.4. Organização do Trabalho

- **Introdução:** Este presente capítulo consiste em apresentar aplicações práticas do tema do projeto junto com a motivação para a realização do mesmo.
- **Procedimento Experimental:** Aqui serão mencionados todos os procedimentos (prévios e atuais), bem como as dificuldades encontradas ao longo do projeto. Será descrita, com detalhes, a forma de manuseio dos equipamentos necessários e o porquê de sua utilização.

- **Resultados e Discussões:** Após a descrição e preparação do procedimento, serão discutidos e analisados os resultados obtidos para uma melhor compreensão da aplicação dos métodos descritos.
- **Conclusão:** Enfim, será relatado se, a partir dos dados encontrados, é possível a utilização do equipamento testado em empresas interessadas na aplicação do mesmo.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este é um projeto que dá sequência a um desenvolvimento que já estava em andamento. Desse modo, será explicado neste capítulo o que foi feito até a data de início do mesmo, bem como conclusões relevantes dos testes realizados por Kim Carvalho de Oliveira em seu projeto de graduação. Assim, pode-se compreender melhor as razões e necessidades da realização de testes com diferentes equipamentos em águas turvas.

Antes de iniciar os experimentos com a bancada de testes hidráulica, foram analisados os testes realizados com três concentrações diferentes. Utilizou-se tinta guache como corante de modo a ser possível estimar a concentração na qual os sensores parariam de detectar as esferas abrasivas. Contudo, a quantidade de concentrações usadas não foi o bastante para se ter certeza de que a última concentração usada era, de fato, a maior possível para que isso acontecesse.

Inicialmente, planejou-se realizar mais testes com o equipamento para que se pudesse obter resultados mais exatos com relação à resolução dos sensores instalados. Para isso, a ideia era utilizar concentrações diferentes das já experimentadas, de forma a descobrir uma concentração mais exata com a qual os sensores parariam de detectar as esferas.

Iniciamente, alguns problemas tiveram que ser enfrentados com relação à adaptação do equipamento em um local diferente. Antes de prosseguir, a subseção a seguir apresenta em detalhes todos os componentes utilizados na montagem inicial, além da forma de operação.

2.1. Bancada de Testes

Como mencionado no projeto final de Kim Carvalho de Oliveira [1], foram necessários alguns componentes para que o sistema pudesse funcionar com êxito e realizar sua função de simular o sistema de injeção e contagem de esferas abrasivas:

- a) **Reservatório para Armazenamento de Água:** Um tanque com entrada para abastecimento/realimentação de água e saída para o sistema. O equipamento utilizado foi comprado e adaptado para atender às necessidades específicas. Sua adaptação é de relativa facilidade de fabricação.
- b) **Registro Regulador de Pressão:** Garante que a pressão de operação esteja dentro dos limites na saída da bomba.

- c) **Bomba Hidráulica:** Eleva a pressão da água no interior dos dutos até atingir a vazão desejada. Esta bomba é de operação simples e teve que ser comprada.
- d) **Tubulação, Conexões e Registros hidráulicos:** Necessários para controlar a vazão quando necessário. Para a montagem do sistema hidráulico, o mesmo requereu diversas conexões, já que foram usados comprimentos de tubos diferentes e 14 joelhos de 90 graus.
- e) **Reservatório para Esferas:** Tanque com entrada para alimentação das esferas e saída para o sistema. O equipamento utilizado foi comprado e adaptado para atender às necessidades específicas. Sua adaptação é de relativa facilidade de fabricação.
- f) **Componentes Opto-Eletrônicos:** Responsáveis pela contagem das esferas. Estes deverão operar na parte externa da tubulação, que é transparente. São capazes de realizar sua função na vazão utilizada pela bancada.
- g) **Fios e Conexões:** Foram especificados e comprados todos os fios e conexões necessários para a montagem do sistema eletrônico acoplado à bancada hidráulica.
- h) **Estrutura para a Bancada:** Foi necessária a fabricação de um suporte para que a bancada possa ser transportada e movimentada após a sua fabricação. A estrutura necessita de suportes para os reservatórios.

A Fig. 9 apresenta o sistema final desenvolvido por Kim Carvalho de Oliveira.

Figura 9 – Montagem Final da Bancada.

Vale ressaltar que este sistema tem a função de testar somente o procedimento de contagem e inserção das esferas, pois sabe-se que o *fouling* não ocorrerá durante os testes.

Além disso, o diâmetro interno dos tubos é consideravelmente maior do que o das esferas, o que elimina a possibilidade de que alguma esfera fique presa.

Dessa forma, todas as esferas detectadas pelos sensores e registradas no display do microcontrolador devem ser recolhidas no reservatório de água para que se tenha certeza de que o sistema está funcionando adequadamente.

2.2. Instalação Inicial e Funcionamento

Para que fossem realizados os testes com esse sistema, a bomba teve que ser ligada em uma tomada de alimentação trifásica em 220 V. Para o acionamento do equipamento, foi instalada uma caixa contendo a chave geral e o botão liga/desliga.

Com a energia fornecida pelo disjuntor, foi possível colocar um ponto de energia para que fosse possível conectar o controlador e mantê-lo perto da bancada sem maiores problemas. Como o risco de vazamento é iminente, vedações foram necessárias para preservar a integridade dos componentes eletrônicos.

2.2.1. Parte Hidráulica

A Fig. 10 apresenta um diagrama hidráulico da bancada de testes, e a Fig. 11 uma foto da mesma com a identificação dos diversos registros.

Figura 10 – Diagrama do Sistema Hidráulico da Bancada de Testes.

Tendo a parte elétrica devidamente conectada, basta encher o reservatório de água para que a linha fique cheia. Feito isso, deve-se encher o reservatório de esferas com

aproximadamente 80% de sua capacidade. Isso porque, quando abertos os registros para que a água flua por ele, trabalha-se com alta pressão e há possibilidade de ocorrer vazamento.

É importante mencionar que, para que a bancada fique completamente cheia, as válvulas devem estar na configuração inicial, indicada na Tabela 1.

Figura 11 – Bancada de testes com registros numerados.

Tabela 1 – Registros na Configuração Inicial.

REGISTROS	SITUAÇÃO
1	ABERTO
2	ABERTO
3	FECHADO
4	ABERTO
5	FECHADO
6	FECHADO

Dessa forma é possível ligar o sistema para observar se, em princípio, está tudo funcionando corretamente, já que os registros que permitem que as esferas abrasivas sejam inseridas estão fechados. Em seguida, ajustam-se os registros para a configuração de circulação, definida na Tabela 2, para que se dê início à injeção dos mecanismos de limpeza.

Tabela 2 – Registros na Configuração de Circulação.

REGISTROS	SITUAÇÃO
1	ABERTO
2	ABERTO
3	ABERTO
4	FECHADO
5	ABERTO
6	FECHADO

Um detalhe importante a relatar é que, na medida que o registro 3 vai sendo aberto, o registro 4 deve ser fechado simultaneamente, ambos de forma gradativa. Dessa maneira, obtém-se um controle da vazão quando as esferas estão sendo inseridas na linha de circulação, de forma que as mesmas não passem muito rápidas nem muito próximas umas das outras. Caso isso aconteça, as chances de os sensores não captarem as mesmas da forma correta é maior.

2.2.2. Parte Eletrônica

Como dito anteriormente, foram utilizados equipamentos opto-eletrônicos (sensores ópticos e um microcontrolador) para coletar os dados em questão. Conforme cada esfera passa pelos sensores, a contagem, bem como a velocidade do objeto detectado, são indicados em um display de LCD do controlador Arduino utilizado como sistema digital.

Os sensores foram posicionados em uma seção da tubulação onde, em vez de tubo PVC, há um trecho de acrílico que permita o acoplamento do feixe infravermelho. Deve-se, ainda, desconsiderar a contagem de bolhas de ar que passam pelos tubos no início do escoamento. Contudo, a partir do momento em que o equipamento se mantém ligado por um certo tempo, a linha de circulação passa a trabalhar completamente cheia, eliminando essas bolhas.

Para reiniciar a contagem do microcontrolador, deve-se desconectá-lo da alimentação e em seguida realimentá-lo, pois não há nenhuma chave de acionamento acessível, uma vez que o mesmo se encontra inserido em uma caixa de acrílico vedada para evitar danos devido a eventuais vazamentos.

2.2.2.1. Microcontrolador

O microcontrolador é um equipamento eletrônico programável utilizado para desempenhar tarefas específicas. Ele conta com um circuito integrado que contém um processador, memória e entradas e saídas programáveis. Para que seja desempenhada a tarefa desejada, é necessário que esse equipamento receba instruções através de uma linguagem de programação, geralmente C/C++.

Para facilitar a prototipagem, optou-se pela utilização da plataforma Arduino neste projeto. Esta consiste em uma plataforma de desenvolvimento composta de um hardware e de um ambiente de desenvolvimento integrado, que é responsável por compilar e transferir o código para o microcontrolador. Foi escolhida a placa com microcontrolador ATMEGA 2560 (ilustrada na figura 12), que opera a 5 V e 8 bits.

Figura 12 – Placa Eletrônica ATMEGA 2560.

Este equipamento é comumente encontrado em projetos de impressoras 3D e robótica, sendo composto por 54 entradas digitais e 16 entradas analógicas.

Além das características mencionadas, o microcontrolador também dispõe de um aparato chamado Shield. Este consiste em um circuito acoplado à placa eletrônica Arduino para aumentar sua capacidade. Equipamentos desse tipo podem conter sensores, módulos de comunicação e relés, por exemplo.

Foi escolhido utilizar um Shield da marca DF Robot, com um visor LCD de 2x16 mm e um teclado de botões (conforme Figura 13). É possível ajustar o contraste de luz na tela, e determinar diferentes funções para cada botão. A tela usada indica a contagem das esferas e a velocidade com qual as mesmas passam pelos sensores.

Para que esta grandeza fosse mostrada pelo microcontrolador, foi necessário inserir o diâmetro da esfera em uma linha de programação da placa eletrônica. Uma vez que o pulso gerado pela interrupção do feixe infravermelho ultrapasse o limiar de detecção, um temporizador é acionado até que os sensores voltem a medir a mesma tensão de antes da descontinuidade do sinal. Dessa forma, é obtido o tempo de passagem das esferas, sendo portanto possível calcular facilmente a velocidade.

Figura 13 – Shield LCD Especificado.

O dispositivo pode ser alimentado tanto por uma fonte comum, quanto por um cabo USB. Como se pode observar na Figura 14, o equipamento está montado, com os sensores acoplados e devidamente vedado dentro da caixa com tampa de acrílico e acabamentos em silicone. Nesta ocasião, a placa está sendo alimentada por uma fonte de alimentação de 9 V e corrente contínua, 1 A.

Figura 14 – Caixa com Microcontrolador e Display de LCD.

2.2.2.2. Sensores Ópticos

Foram montados na bancada de testes sensores Honeywell HOA6299, indicados nas Figuras 15 e 16. Tais componentes funcionam no espectro infravermelho e dispõem de um diodo emissor (HOA6299-002) e um módulo receptor (HOA6299-003). Esse tipo de mecanismo funciona quando qualquer tipo de objeto opaco interrompe a trajetória do feixe, fazendo com que o receptor tenha seu sinal de saída alterado, gerando um pulso negativo.

Figura 15 – Sensor Honeywell HOA 6299.

Figura 16 – Esquema do Circuito Eletrônico do Par de Sensores.

Um grande problema desse equipamento, que será tratado com mais detalhes adiante, é o fato da tensão de resposta do receptor ser binária. Isso significa que é retornada uma tensão de 0 V ou 4,5 V para o microcontrolador, caso o feixe infravermelho esteja interrompido ou não, respectivamente.

De acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, esse sensor é capaz de detectar qualquer objeto opaco, desde que o sinal de saída tenha uma tensão de pelo menos 0,4 V. Esta é uma situação bastante desfavorável, sabendo-se que há necessidade de operar em meios turvos, o que gera uma grande queda na tensão de resposta do receptor, mesmo sem qualquer objeto interrompendo o feixe. Ou seja, qualquer pulso gerado na saída do receptor insuficiente para ultrapassar este limiar, fará com que a contagem não seja registrada. Na Figura 14 pode-se observar algumas informações do equipamento.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (25 °C unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Test Condition
Operating Supply Voltage	V_{CC}	4.5		12	V	$T_A=25\text{ }^{\circ}\text{C}$
Low Level Output Voltage	V_{OL}			0.4	V	$V_{CC}=5\text{ V}$, $I_{OH}=10\text{ mA}$ Light path blocked (Note 1)
High Level Output Voltage	V_{OH}	4.5			V	$V_{CC}=5\text{ V}$, $I_{OH}=0\text{ mA}$ Light path not blocked (Note 1)
Output Sink Current	I_{OL}	10			mA	$V_{CC}=5\text{ V}$, $V_{OL}=0.4\text{ V}$
Response Time	t_{ON}		5		μs	$V_{CC}=5\text{ V}$

Figura 17 – Dados do Sensor Honeywell HOA6299.

2.3. Adaptação da Bancada de Testes

Conhecendo com detalhes o funcionamento do sistema de simulação, foi possível instalá-la em outro local para que se pudesse dar sequência aos experimentos. Uma dificuldade encontrada logo no início da montagem foi a forma com a qual deveria ser feita a ligação à rede elétrica, podendo ser realizada de duas formas:

- 1) Utilização de um Plug;
- 2) Ligação direta ao disjuntor.

A primeira é mais simples e rápida, já que havia a tomada requerida para a conexão. Com isso, seria possível realizar a instalação de forma prática, podendo-se mover o equipamento com facilidade, se necessário. Porém, esse conector é do tipo 3P + T (três pinos que conduzem o sinal trifásico e um para o aterramento), que não é tão fácil de ser encontrado no Rio de Janeiro. Como não havia tempo hábil para encomendar este Plug em outros estados, foi adotada a segunda opção, que consiste em conectar as três fases diretamente no disjuntor trifásico através de fios.

Para que isto fosse feito, foi solicitada ajuda de um técnico eletricista presente no local escolhido para a utilização equipamento. Dessa forma, o procedimento seria feito com mais eficiência e com menos riscos de acidentes.

Os fios da bomba foram conectados arbitrariamente com as fases do disjuntor. Assim, ao acionar o equipamento já preenchido com água, seria possível saber se o procedimento foi feito da forma correta. Se a bomba impulsionasse a água no sentido desejado, não seria necessária nenhuma alteração, caso contrário, bastaria inverter quaisquer duas fases para corrigir o sentido do escoamento.

Com a bancada hidráulica funcionando perfeitamente, foi possível testar, em seguida, os componentes eletrônicos. Porém, ao ligar o microcontrolador, foi observado um comportamento atípico, não indicando nada em seu display de LCD. Após rápidos testes feitos com um multímetro, foi possível concluir que a fonte de alimentação estava com problemas. Este empecilho foi de fácil solução, uma vez que se sabia que o equipamento dispunha de uma forma alternativa de fonte de energia (via USB). Tendo feito isso, o procedimento descrito pôde ser realizado para que fossem feitos mais testes com concentrações diferentes utilizando o corante.

Ao testar o sistema de injeção de esferas, o registro 4 foi sendo fechado na medida que o registro 3 foi sendo aberto, de forma que se pudesse ter um controle sobre a vazão de água que passaria pelo reservatório em questão. Dessa forma, as esferas foram inseridas aos poucos, sendo feita a contagem das mesmas como esperado.

Mesmo tendo sido relatado por Kim Oliveira que o problema de vazamento pela tampa do reservatório havia sido solucionado, observou-se um volume considerável de água escorrendo pelo recipiente. Esta é uma situação um tanto quanto desfavorável, uma vez que haveria a necessidade de se saber a quantidade exata de água inserida no sistema para que alterações de turbidez fossem realizadas. Após tentativas falhas de solucionar o problema, aceitou-se o fato de que os testes deveriam ser feitos de forma rápida, para que o volume desperdiçado fosse o menor possível, evitando imprecisões no controle de densidade.

Infelizmente, antes que se pudesse adicionar novas quantidades de corante para obter concentrações diferentes, o equipamento apresentou defeito na caixa elétrica que contém a chave geral. Um forte cheiro de queimado foi sentido e observou-se fumaça vindo do equipamento. Como medida de precaução, a chave magnética foi desligada e os experimentos com a bancada hidráulica, encerrados.

Portanto, devido aos diversos contratemplos mencionados, não foi possível chegar a resultados conclusivos em relação à bancada de testes que simula o SIREA. Todavia, o ocorrido não foi tão prejudicial ao andamento do projeto, já que os dados desejados com este experimento serviriam, apenas, para mera comparação com os obtidos anteriormente por Kim Oliveira, utilizando os novos componentes optoeletrônicos que seriam testados logo em seguida.

2.4. Bancada em Laboratório

Com o intuito de conseguir realizar testes com as esferas abrasivas em altos níveis de turbidez, ensaios foram feitos em uma bancada experimental montada em laboratório. Para isso, foi necessária a aquisição de novos sensores, sendo estes mais sensíveis, podendo trabalhar com maiores distâncias e ângulos. Também, um pedaço de tubo de acrílico, idêntico ao montado na bancada hidráulica foi utilizado neste experimento. Dessa forma, pôde-se realizar os testes com corante e simular a passagem das esferas em um ambiente controlado. O objetivo destes ensaios era caracterizar a resposta do novo sensor infravermelho em relação à concentração de corante (que simula a turbidez da água), além de determinar a concentração para a qual a detecção deixa de ser possível.

2.4.1. Preparação para o Experimento

Para a montagem, os seguintes equipamentos foram utilizados:

- a) **Protoboard PL 553KS:** Placa de ensaio que contém orifícios e conexões condutoras que permitem a preparação de circuitos elétricos experimentais. A grande vantagem é o fato de não precisar de soldagem para a fixação dos componentes. Este modelo possui 1650 pontos e 4 Bornes, podendo ser de 5 V ou 12 V e a corrente máxima de saída para ambas de 0,6 A. De qualquer forma, qualquer Protoboard convencional serviria para o experimento.
- b) **Multímetro Digital Minipa ET-2042C:** Aparelho que mede grandezas referentes à eletricidade, como tensão elétrica, resistência, corrente elétrica, etc. Neste caso, este instrumento foi utilizado para medir a queda de tensão causada pelas diferentes concentrações de corante.
- c) **Fonte de Alimentação ICEL PS-4000:** Responsável por fornecer tensão elétrica em corrente contínua à placa de ensaio. Este equipamento tem a capacidade de regular a corrente e tensão em até 3 A e 30 V, respectivamente. Para esta, há dois potenciômetros, sendo um de ajuste grosso e o outro, fino. Para este sistema optoeletrônico foi utilizada a alimentação de 5 V, sendo que a corrente demandada pelos componentes foi de aproximadamente 20 mA.

Sabendo que haveria a necessidade de trabalhar com um recipiente cheio d'água em cima de um circuito elétrico, foi feita a vedação de uma das extremidades. Como o tubo é aberto em ambos os lados, muito cuidado teve de ser tomado para que não houvesse vazamentos e se estragasse o equipamento. Dessa forma, utilizou-se três camadas de papel filme PVC, fita isolante e Silver Tape para realizar esse procedimento de vedação.

Devido ao comprimento dos terminais dos componentes eletrônicos, as medições tiveram que ser realizadas perto da base, onde foi vedado. Dessa forma, testes foram feitos para ter certeza de que isso não afetaria o resultado das medições, interrompendo o feixe de forma indesejada. Mais detalhes sobre isso serão comentados no capítulo 3.

A instalação dos componentes eletrônicos na Protoboard foi feita conforme o diagrama feito pelo aluno de mestrado em Metrologia João Ricardo Cortes Nunes, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Diagrama do Circuito Eletrônico Montado na Protoboard.

Para que medições pudessem ser realizadas por um voltímetro, conectou-se uma “garra” no fio que continha o sinal de saída (positivo) do receptor e outra no Borne de 0 V, conforme ilustrado na Fig. 19. Dessa forma, quando qualquer objeto que passasse entre os sensores, interrompendo o feixe infravermelho, seria possível observar a queda de tensão com o voltímetro.

Figura 19 – Bancada Experimental Montada sem Obstrução do Feixe.

Para obter resultados mais próximos da aplicação real do equipamento, o ideal era que os sensores estivessem encostados no tubo, já que eles teriam que ser anexados ao mesmo.

Porém, após o início dos ensaios percebeu-se que esta não seria uma configuração prática nem segura. A cada vez em que houvesse a necessidade de retirar o tubo e colocá-lo de volta em posição de teste, as chances de esbarrar em um dos componentes sensores era grande, podendo causar um desalinhamento dos mesmos, gerando imprecisão nos resultados obtidos. Dessa forma, a distância utilizada para as medições foi de 62 mm, podendo fazê-las com uma certa folga, como ilustrado na Fig. 20.

Figura 20 – Bancada Experimental Montada com DutoTubo vedado e a Esfera Inserida.

Apesar de não conseguir chegar a uma densidade tal que a detecção não pudesse mais ser realizada, a partir desses testes foi possível medir a variação de tensão para diferentes concentrações, de forma a gerar um gráfico com a resposta dos sensores para cada densidade experimentada. Detalhes dos dados obtidos serão analisados e discutidos no capítulo 3.

2.4.1.1. Sensores SDP8436

De forma a aprimorar a detecção das esferas abrasivas, novos sensores foram adquiridos, mostrados na Fig. 21. A forma com que realizam a emissão e detecção do feixe de infravermelho é mais eficiente devido ao formato de suas capas. Assim, o diodo-emissor pode enviar raios em ângulos de até 10° e o fototransistor recebê-los em até 18° . Com isso, é possível trabalhar com distâncias maiores, além do fato de serem mais sensíveis.

Figura 21 – Sensores SDP8436 (Emissor e Receptor)

Diferente do ângulo lateral de receptividade do feixe, a eficiência do equipamento cai bastante quando o mesmo está desalinhado com relação ao ângulo vertical. Para que se obtenha máxima exatidão dos sensores, eles não devem estar defasados em mais do que 2° em relação ao eixo vertical, como ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Resposta do Sensor em Relação ao Ângulo Vertical.

Um fato interessante é que, apesar dos raios infravermelhos serem invisíveis ao olho humano, ao capturar uma foto com uma câmera digital, é possível enxergar uma luz vinda do diodo-emissor, como ilustrado na Fig. 23. Isso porque este tipo de câmera contém sensores com sensibilidade de amplo espectro. Dessa forma, caso ocorresse algum problema em que o sinal parasse de ser detectado pelo receptor, seria fácil concluir se o problema estaria no diodo-emissor.

Figura 23 – Diodo-Emissor em Funcionamento.

2.4.2. Teste com Janela do SIREA

Sabendo que, na prática, os sensores serão montados em uma janela do equipamento de SIREA, utilizou-se uma desta para fazer testes com a Protoboard, como ilustrado na Fig. 24. Tal equipamento dispõe de uma camada espessa de acrílico, diferente do tubo testado na bancada. Dessa forma, a fim de saber se este fato atrapalharia nas medições dos sensores, uma das janelas foi desmontada do sistema para que pudesse ser feito o experimento.

Figura 24 – Bancada Experimental: Testes com Janela do SIREA.

Para tanto, o foto-transistor e o diodo-emissor tiveram que ser posicionados em pontos da placa mais distantes, pois as paredes espessas do material tornam o diâmetro da peça consideravelmente maior do que a do tubo testado anteriormente. Contudo, apesar do

espaçamento diferente, os sensores trabalham igualmente eficientes quando comparado com os ensaios prévios.

Mesmo com a montagem feita, testes com água inserida na peça não foram realizadas, não podendo, portanto, concluir se sua estrutura afetaria nas medições com corante. Contudo, deu-se início à nova etapa do projeto, buscando-se definir a viabilidade de se obter melhores resultados a partir da utilização dos novos equipamentos.

2.4.3. Testes com LabVIEW (Aumento da Potência do Emissor)

A água com a última concentração utilizada no procedimento descrito na seção 2.4.1 foi coletada em um recipiente para que os testes pudessem continuar sendo feitos com o mínimo de imprecisão possível. Com dados suficientes para gerar um gráfico de resposta de tensão do sinal em função da concentração do corante, o próximo passo foi o ajuste do limiar de detecção. Dessa forma, foi possível encontrar a concentração exata (levando em consideração as resoluções dos instrumentos utilizados e possíveis erros experimentais) em que os sensores não captavam mais as esferas.

Para isso, uma nova configuração da Protoboard foi realizada de forma a aumentar a potência do emissor, de modo a permitir a detecção em águas ainda mais turvas. Foi utilizado um resistor de menor valor para permitir passagem de uma maior corrente pelo diodo-emissor. O componente, que antes tinha resistência de $150\ \Omega$, foi trocado por um de $82\ \Omega$, conforme indicado na Fig. 25, de modo que a potência do emissor fosse aproximadamente quadruplicada (visto que $P = \frac{U}{R^2}$). Neste caso, a corrente do circuito emissor passou de 20 mA a aproximadamente 40 mA.

Figura 25 – Diagrama do Circuito Montado na Protoboard Após Aumento da Potência do Emissor.

Como mencionado, foi necessário dispor de novos equipamentos para que esta fase do projeto pudesse ser realizada com sucesso, conforme ilustrado na Fig. 26. Foram eles:

- a) **Programa Computacional LabVIEW:** Ambiente de desenvolvimento integrado baseado na linguagem de programação gráfica G. Nele, é possível desenvolver códigos funcionais a partir de um layout visual de forma mais intuitiva e prática, sem se preocupar com regras de sintaxe e poupando tempo.
- b) **Conversor Analógico/Digital NI USB-6229:** Aparelho com resolução de 16 bits responsável por capturar o sinal analógico de tensão gerado pelo foto-transistor e torná-lo em digital, de forma que fosse possível para o LabVIEW processar tais informações.

Figura 26 – Nova Bancada Experimental Montada.

A conversão consiste na “discretização” de um sinal contínuo. Este procedimento se dá tanto no tempo quanto na amplitude, para que o software seja capaz de processar tais grandezas. Dessa forma, as mesmas são quantizadas de modo que ocorre uma separação em intervalos (Figuras 27 e 28).

Figura 27 – Discretização de um Sinal em Conversão A/D.

Figura 28 – Discretização de um Sinal em Conversão A/D (2).

Nos exemplos, ilustra-se como é feita a conversão. Ao capturar o sinal analógico (em azul), a quantização se dá em forma de “degraus” (em vermelho), de forma a representar a resolução do equipamento: os chamados bits. Estes consistem em números binários de maneira que a quantidade de subdivisões é de 2^b , portanto, 3 bits resultam em 8 intervalos discretos possíveis (caso da Fig. 28). Desse modo, sabendo que a resolução de um sinal digital é dada por $R = \frac{M}{2^b}$, sendo M o valor máximo do sinal analógico, a resolução do conversor A/D utilizado é de $76 \mu\text{V}$, fazendo com que os resultados obtidos sejam muito mais exatos quando comparados com os medidos com o multímetro.

A utilização destes equipamentos tornou possível realizar ensaios com a finalidade de encontrar a concentração limite para que a resolução dos sensores em questão fosse estimada.

Dessa vez, os mesmos foram anexados ao tubo de acrílico de uma forma improvisada (Fig. 29) para obter resultados ainda mais realistas, condizentes com a realização de sua função na prática. Assim, simulações da passagem das esferas abrasivas puderam ser feitas e os resultados salvos, para que se pudesse analisá-los para uma posterior comparação.

Figura 29 – Adaptação para Fixação dos Sensores no DutoTubo de acrílico.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, após a montagem do circuito eletrônico na protoboard, foi feita uma estimativa do limiar de detecção do instrumento de medição, no caso, o voltímetro. Com o equipamento ligado, criou-se uma barreira de forma que se tivesse certeza de que o feixe de infravermelho estivesse sendo interrompido por completo. Além disso, o alinhamento dos sensores foi ajustado para que a tensão medida, sem obstrução alguma, fosse a maior possível.

A fim de ter uma noção de perda de eficiência devido à dispersão do feixe no ar, os sensores foram posicionados na menor distância possível, de forma que o diodo-emissor e o foto-transistor ficassem praticamente encostados. Dessa forma, foi possível obter dados iniciais para uma possível comparação com relação à distância de operação.

A Tabela 3 apresenta dados iniciais para que se pudesse proceder com as medições.

Tabela 3 – Dados Iniciais Prévios às Medições.

Dados	
Limiar de Detecção do Voltímetro	3.4 mV
Distância entre Sensores	62 mm
Tensão Medida com Sensores Livres	4,68 V
Tensão Medida com Sensores Próximos	4,80 V

Sabendo que o circuito opera com alimentação de 5 V, os valores medidos sem interrupção do feixe foram bastante razoáveis, uma vez que também há perda de tensão devido ao material de condução de corrente elétrica utilizado para o circuito. A diferença de 0,12 V entre as medições com os sensores encostados um no outro e com os mesmos na distância de operação, em princípio não afetaria drasticamente os resultados.

Como mencionado, uma vedação do recipiente utilizado foi necessária para que o mesmo trabalhasse com água em segurança. Dessa forma, não se sabia se o material utilizado afetaria as medições, uma vez que os sensores estavam bem próximos da base do tubo de acrílico. Com isso, alguns testes rápidos foram realizados para garantir que isso não ocorreria. Para isso, oito marcações foram feitas no topo do tubo de maneira que fossem feitas medições nessas diferentes posições e calculada a média dos resultados. A motivação para estas medições foi o fato de que, na borda do recipiente, a fita isolante utilizada apresentava irregularidades em relação à altura que cobria o acrílico, podendo obstruir o feixe de formas diferentes, dependendo da posição angular em que fosse posicionado. Este mesmo

procedimento foi adotada para todas as outras medições, já que não se pode ter certeza de que a densidade do material com a qual o tubo foi fabricado é uniforme em todo o recipiente.

A Tabela 4 apresenta comparações das medições feitas com e sem a vedação.

Tabela 4 – Comparação de Valor Medidos Medições com e sem Vedação.

Medidas Com Vedação (V)	Medidas Sem Vedação (V)
3,67	3,81
3,58	3,77
3,66	3,57
3,79	3,64
3,60	3,86
3,87	3,85
3,74	3,84
3,50	3,35
3,68	3,71

Após análise do resultado das medições, conclui-se que o procedimento realizado para que o recipiente possa trabalhar cheio d'água com segurança não afetou a trajetória do feixe, visto que a diferença foi de somente 30 mV. Porém, nota-se que houve uma queda considerável da tensão nestes testes quando comparado com os feitos sem obstrução alguma. Isso mostra que, como esperado, o acrílico gera uma atenuação do feixe infravermelho, resultando em uma queda de 1 V na tensão medida.

Sabendo que o diâmetro interno do duto tem 38,4 mm (medido com paquímetro) e cada esfera, 25 mm, pode-se afirmar que a mesma provavelmente será detectada em posições diferentes durante o escoamento. Considerando o pior caso, que seria a esfera tangenciar a parede do tubo, com a maior distância possível em relação ao posicionamento dos sensores, foram feitos testes para comparar com o que seria o melhor caso (passando exatamente no centro da seção reta do tubo), assim interrompendo o feixe por completo. Tais ensaios foram realizados com o recipiente vazio, somente com o intuito de analisar a queda de tensão devido à passagem das esferas em diferentes posições. Com a disponibilidade de oito esferas abrasivas diferentes, chegou-se aos resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Medições [mV] com Oito Esferas Distintas nas Três Posições de Interesse.

Posições	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	Média [V]
P1	10,7	10,5	9,8	10,6	7,5	8	7,9	10	9,38
P2	3,3	3,5	3,3	3,6	3,3	3,3	3,2	3,4	3,36
P3	8,5	12,1	9,4	8,5	6,3	7,8	5,5	5,7	7,98

Na Tabela 5, P1 e P3 são as posições em que a esfera tangencia a parede do tubo, portanto mais afastada do centro da seção reta, onde os sensores estão posicionados. Observou-se que isso gera uma queda de tensão chegando à ordem de grandeza de 10 mV. Este dado será útil quando se obtiver uma curva de decaimento da voltagem devido à turbidez da água. Já na posição P2, com as esferas passando exatamente no centro do tubo, a tensão medida foi aproximadamente o limiar de detecção do voltímetro, o que era esperado, uma vez que o objeto está bloqueando 100% da emissão do sinal.

Por fim, um último teste foi realizado antes dos ensaios utilizando diferentes concentrações de corante, com o intuito de analisar o comportamento de resposta dos sensores após inserida água no recipiente.

A Tabela 6 apresenta as tensões medidas com o recipiente cheio d'água para avaliar a flutuação do sinal.

Tabela 6 – Testes Realizados com Água dentro do duto.

Com Água	
4,70 V	4,69 V
4,70 V	4,72 V
4,70 V	4,71 V
4,73 V	4,69 V
Média: 4,705 V	

Com uma média de aproximadamente 4,7 V, em vez de causar uma atenuação, o fluido fez com que o feixe de infravermelho fosse melhor direcionado. Dessa forma, pode-se dizer que a perda devida à atenuação gerada pelo acrílico foi compensada pela água, sendo que o valor medido foi ainda maior do que a tensão registrada sem nenhuma obstrução à distância de 62 mm.

3.1. Curva de Resposta

Feitos os testes iniciais, foi possível dar início aos ensaios com corante. Para tanto, utilizou-se uma vasilha com capacidade de um litro, de maneira que se pudesse ter um maior controle sobre a adição da tinta guache para novas concentrações. Dispôs-se, também, de uma seringa de insulina com capacidade de 1 mL para que parcelas de 0,25 mL fossem adicionadas aos poucos na vasilha, preenchida com 1 L de água. Dessa forma, foi possível analisar a resposta dos sensores a partir do acréscimo de pequenas variações na concentração de corante.

Figura 30 – Progressão de Concentrações Utilizadas no Experimento
(0,25 mL/L, 0,75 mL/L, 1,50mL/L, 2,25 mL/L,3,00 mL/L 6,00 mL/L).

Assim, a partir da média de medições realizadas em oito posições angulares diferentes, foi possível caracterizar a resposta dos sensores devido às diferentes concentrações de corante. A Tabela 7 apresenta as quedas de tensão do sinal de detecção referente a diversas concentrações de corante.

Tabela 7 – Medições Realizadas com Diferentes Concentrações de Corante Diferentes e suas Respectivas Tensões associadas.

Densidade [mL/L]	Tensões Medidas (V)								Média [V]
	1	2	3	4	5	6	7	8	
0,00	4,7	4,69	4,7	4,72	4,7	4,71	4,73	4,69	4,7050
0,25	3,69	3,92	3,97	3,16	3,75	3,08	3,11	3,69	3,5463
0,50	2,27	2,12	2,09	2,4	2,34	2,39	2,21	2,34	2,2700
0,75	1,45	1,49	1,44	1,34	1,38	1,46	1,39	1,26	1,4013
1,00	0,72	0,78	0,74	0,74	0,73	0,71	0,64	0,67	0,7163
1,25	0,42	0,44	0,42	0,41	0,42	0,43	0,4	0,42	0,4200
1,50	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,22	0,23	0,2225
1,75	0,14	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13	0,14	0,15	0,1400
2,00	0,085	0,089	0,091	0,083	0,088	0,089	0,09	0,085	0,0875
2,25	0,058	0,062	0,059	0,057	0,06	0,061	0,058	0,056	0,0589
2,50	0,046	0,048	0,047	0,046	0,047	0,047	0,046	0,046	0,0466
2,75	0,034	0,036	0,038	0,036	0,037	0,038	0,037	0,037	0,0366
3,00	0,026	0,027	0,026	0,025	0,025	0,026	0,025	0,025	0,0256
3,50	0,018	0,019	0,019	0,019	0,018	0,018	0,018	0,017	0,0183
4,00	0,012	0,012	0,013	0,013	0,012	0,013	0,013	0,012	0,0125
5,00	0,0076	0,0077	0,0078	0,0078	0,0078	0,0077	0,0076	0,0079	0,0077
6,00	0,0055	0,0057	0,0056	0,0056	0,0058	0,0058	0,0058	0,0055	0,0057

Nota-se que, a partir da densidade 3 mL/L, as adições de corante passaram a ser feitas em maiores parcelas, visto que a variação na tensão medida passou a variar em valores cada vez menores. Portanto, apesar da incerteza de medição dos instrumentos utilizados e da decantação do corante em meio à água, concluiu-se que os resultados encontrados foram suficientes para gerar um gráfico com a resposta dos sensores em função da concentração de cada ensaio realizado. Vale ressaltar que, para todos os ensaios realizados, a esfera ainda pôde ser detectada com sucesso pelos sensores.

A Figura 31 apresenta o comportamento da curva de queda de tensão causada pela adição progressiva de corante.

Figura 31 – Queda de Tensão Devidao à Adição Parcial de Corante.

É interessante observar a forma da curva de decaimento, uma vez que não se tinha noção sobre como os sensores responderiam durante os testes. Agora sabe-se que a queda de tensão é brusca, sendo bastante perceptível em até 1 mL/L, diminuindo a tensão medida de 4,7 V para 0,71 V. A maior parte dos valores observados foi na escala dos décimos e milésimos de volt, mostrando a importância do investimento em novas pesquisas para aprimorar a contagem de esferas em meios turvos, ajustando o limiar de detecção.

Sabendo-se que nos testes feitos por Kim Oliveira a detecção deixou de ser realizada com uma concentração de 1,22 mL/L, o gráfico da Figura 31 indica o motivo. A tensão de resposta referente a essa concentração é aproximadamente 0,41 V, consistente com a especificação dos sensores utilizados no projeto anterior, que têm um limiar de detecção de 0,4 V.

Para uma melhor leitura do gráfico, o gráfico da Figura 31 foi refeito com escala logarítmica na tensão, conforme apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Queda de Tensão em Escala Logarítmica.

3.2. Ensaios com Maior Potência de Emissão

Para esta parte do projeto, coletou-se uma amostra da água com concentração de 0,6 mL/L, com o objetivo de encontrar o limite de detecção das esferas. Uma vez dispondo de equipamentos mais sofisticados e tendo sido aumentada a potência de emissão do diodo, conforme descrito na seção 2.4.3, o próximo passo foi diminuir o ruído do sinal. Para isso, a frequência de aquisição foi ajustada de forma a obter uma média de pontos no tempo, em vez de um ponto por vez.

Em princípio, não havia necessidade de uma alta frequência de aquisição de dados, já que neste momento a velocidade com a qual a esfera passa pelos sensores não é importante. Dessa forma, a fim de descobrir qual seria a redução máxima de ruídos com este procedimento de cálculo de média, iniciaram-se os ensaios com uma frequência de 100 Hz, ou seja, um ponto do gráfico gerado era obtido a cada 10 ms. Esta proporção foi mantida durante todo o processo variando, somente, a média de pontos obtidos nesse mesmo intervalo de tempo. Desse modo, a frequência de aquisição foi aumentada na mesma proporção que a quantidade de pontos, fazendo a média dos mesmos posteriormente, como representado na Tabela 8.

Tabela 8 – Médias de Diferentes Quantidades de Pontos.

Média	
Frequência	Ponto(s)
100 Hz	1
1 kHz	10
2,5 kHz	25
10 kHz	100
20 kHz	200

As figuras 33 a 37 apresentam sinais típicos medidos com cada tipo de média, para demonstrar a diferença da amplitude do ruído do sinal de tensão emitido pelo foto-transistor.

Figura 33 – Ruído do Sinal de Tensão para Média de 1 Ponto por Intervalo de Tempo.

No caso do Gráfico 3, está representado o ruído do sinal obtendo um ponto a cada 10 ms, ou seja, não houve cálculo de média do sinal. Observa-se uma amplitude de pouco menos do que 10 mV, que é considerável, uma vez que a queda de tensão para 6,0 mL/L estava na faixa de 20 mV e a esfera ainda poderia ser detectada.

Figura 34 – Ruído do Sinal de Tensão para Média de 25 Pontos por Intervalo de Tempo.

Realizando a média de 25 pontos em 2,5 kHz, pôde-se observar pela amplitude máxima do gráfico gerado, uma redução para até 2 mV, uma melhor significativa em relação ao caso da Figura 33.

As Figuras 35 e 36 apresentam o ruído do sinal digital referente às médias de 50 e 100 pontos, respectivamente.

Figura 35 – Ruído do Sinal de Tensão para Média de 50 Pontos por Intervalo de Tempo.

Figura 36 – Ruído do Sinal de Tensão para Média de 100 Pontos por Intervalo de Tempo.

Para ambos os casos, de médias feitas com 50 e 100 pontos, notou-se uma melhora considerável com relação ao sinal gerado a partir da média de 25 pontos em 20 ms, com amplitude de pouco menos que 1 mV. No entanto, observa-se pouca diferença entre os gráficos das Figuras 35 e 36, o que significa que provavelmente foi alcançada a máxima capacidade de melhoria do sinal utilizando esse método de cálculo de médias.

Para comprovar esta hipótese, fez-se a média com 200 pontos em 20 kHz para ter certeza que não haveria mais como melhorar a qualidade do sinal, conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – Ruído do Sinal de Tensão para Média de 200 Pontos por Intervalo de Tempo.

Assim, foi definida como ótima a média de 100 pontos em 10 kHz.

Na sequência, novos ensaios foram realizados, aumentando a concentração de corante em passos de 0,2 mL/L, para permitir avaliar a resposta dos sensores com a maior potência de emissão. Tais resultados estão apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Respostas dos Sensores Após Potencialização Aumento da Potência de emissão.

Concentração [mL/L]	Tensão [V]
0,0	4,71
6,0	0,050
6,2	0,034
6,4	0,027
6,6	0,023
6,8	0,011
7,0	0,008
7,2	0,004
7,4	0,004
7,6	0,003
7,8	0,002

Com o limiar de detecção ajustado em 1,6 mV, os ensaios foram realizados até que não fosse mais possível realizar a detecção das esferas por parte dos sensores. Este fato ocorreu para uma concentração de 7,8 mL/L, que gerou uma queda de tensão do sinal para 2 mV.

Para cada concentração testada, foram simuladas dez passagens das esferas para analisar o pulso do sinal causado pela obstrução do feixe infravermelho nos meios turvos. Para tanto, a esfera foi inserida no recipiente com os sensores acoplados (Fig. 27) contendo a concentração em questão e forçada para baixo para que passasse pela trajetória do feixe emitido pelo diodo-emissor. Dessa forma, foi possível analisar graficamente o comportamento do sinal de tensão para o experimento realizado. Nota-se que a tensão observada nos gráficos 8 a 10, antes da interrupção do sinal, não condizem com o relatado na Tabela 9. Isso acontece devido à sombra que a esfera faz ao flutuar na superfície da água turva, obstruindo parcialmente o feixe captado pelo foto-transistor. Porém, isso não atrapalhou a obtenção de resultados conclusivos, visto que já se sabia a parcela da queda de tensão causada somente pela turbidez da água.

Figura 38 – Pulsos Causados pela Passagem da Esfera em Concentração Igual a 6,0 mL/L.

Observa-se que para esta concentração as detecções são feitas com facilidade, visto que o valor da tensão medida é consideravelmente maior do que o limiar de detecção e do que a amplitude do ruído.

Figura 39 – Pulsos Causados pela Passagem da Esfera em Concentração Igual a 7,0 mL/L.

Para o caso da água com concentração elevada a 7,0 mL/L, nota-se que os pulsos tiveram amplitude menor e os ruídos do sinal medido já são facilmente percebidos. Todavia, a detecção ainda pode ser realizada com sucesso.

Figura 40 – Pulsos Causados pela Passagem da Esfera em Concentração Igual a 7,6 mL/L.

A última densidade de corante inserida na água em que foi possível a detecção das esferas abrasivas foi de 7,6 mL/L. Para esta concentração, é possível perceber que a atenuação causada pela turbidez torna a tensão medida já muito próxima do limiar utilizado e a amplitude do ruído é bastante relevante para tais medições. Com a próxima concentração de corante testada (7,8 mL/L), não foi possível um ajuste do limiar de detecção para que tornasse o equipamento capaz de registrar a contagem. Dessa forma, pode-se dizer que a resolução do sensor foi alcançada, sendo impossível detectar as esferas em meios turvos o suficiente para causar uma queda de tensão equivalente a 3 mV.

4. CONCLUSÕES

Este foi um projeto que visou proporcionar melhorias a um desenvolvimento que já estava em andamento, tendo sido previamente construída uma bancada de testes para que simulações de um sistema de injeção/recuperação de esferas abrasivas (SIREA) fossem realizadas. Com isso, o objetivo deste trabalho foi concentrar a pesquisa na contagem das mesmas em águas turvas, visto que os sensores utilizados deixavam de realizar sua função com um grau de turbidez pouco elevado. A partir do gráfico gerado após os testes feitos em bancada de laboratório, foi possível conhecer a forma de resposta dos sensores devido a diversas concentrações de corante na água.

Apesar de ensaios não terem sido feitos com a janela do SIREA em águas turvas, ao analisar a queda de tensão somente devido à espessa camada de acrílico, em princípio, isso não afetaria o desempenho do equipamento. Sabendo que a tensão lida para este caso foi de aproximadamente 3,2 V, não foi percebida uma diferença crítica quando comparado com o tubo com parede mais fina (3,7 V). Dessa forma, espera-se que a eficiência do sensor seja corrigida devido à adição de água no sistema, como ocorreu nos testes com o primeiro recipiente.

Por fim, após análise do comportamento do sinal de detecção, tendo sido aumentada a potência de emissão do feixe infravermelho, é possível afirmar que se chegou a resultados bastante próximos do que deve, de fato, ser a resolução do sistema de contagem. Possivelmente, um melhor condicionamento do sinal (amplificação e filtragem, por exemplo) permitiria ajustar o limiar de detecção para realizar a contagem das esferas abrasivas em meios ainda mais turvos. Mesmo assim, com os resultados encontrados neste projeto, pode-se dizer que a utilização de um par diodo-emissor e foto-transistor para a detecção destes mecanismos de limpeza é um método viável levando-se em consideração a possibilidade de se operar em meios com alto grau de turbidez.

5. REFERÊNCIAS

[1] Carvalho, O. K, Projeto e desenvolvimento de um sistema optoeletrônico para contagem automática de esferas abrasivas mitigadoras de incrustação em trocadores de calor. Projeto de Graduação, PUC-RIO, Rio de Janeiro, Junho de 2016.

[2] Oliveira, H. V, Uso de esferas abrasivas como alternativa tecnológica para mitigação de incrustação em trocadores de calor de hidrogeradores. Dissertação de Mestrado em Metrologia, PUC-RIO, Rio de Janeiro, Maio de 2015.

[3] Datasheet sensor óptico Honeywell HOA 6299 – Disponível em < <http://datasheet.octopart.com/HOA6299003-Honeywell-datasheet-17723521.pdf>>

[4] Datasheet sensor óptico Honeywell SDP8436 – Disponível em < <http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Sdp8436>>