Kim Carvalho de Oliveira

**Projeto e desenvolvimento de um sistema opto eletrônico
para contagem automática de esferas abrasivas mitigadoras
de incrustações em trocadores de calor**

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: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa
Co-orientador: Prof. Maurício Nogueira Frota

Rio de Janeiro, junho de 2016.

Kim Carvalho de Oliveira

**Project and development of an optoelectronic system for
automatic counting of incrustation mitigating abrasive balls
in heat exchangers.**

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, June 2016.

Agradecimentos

Ao orientador, Carlos Roberto Hall Barbosa; co-orientador Maurício Nogueira Frota e mestrandos em Metrologia João Ricardo Cortes Nunes, pelos ensinamentos, disponibilidade, ajuda, incentivo e orientação durante esse Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica.

Aos meus pais e irmão, Bárbara, Nelson e Caio, por sempre acreditarem em mim e me apoiarem nos momentos mais difíceis.

Aos funcionários da COMAF, em especial ao Sr. Zé, pela ajuda na construção desse projeto.

Aos meus amigos do curso da PUC-Rio, sem vocês teria sido difícil sobreviver à engenharia.

Kim Carvalho de Oliveira

*“Todos os sonhos podem-se realizar, se
tivermos a coragem de persegui-los”*

Walt Disney

RESUMO

Este trabalho apresenta e discute o desenvolvimento e funcionamento de uma bancada de teste que simula o sistema injetor de esferas abrasivas de um sistema de limpeza dos tubos de um trocador de calor utilizado no arrefecimento de hidrogeradores da Usina Fontes Nova, de propriedade da Concessionária de Energia Light Serviços de Eletricidade SA. Foi desenvolvido um sistema optoeletrônico de contagem automática das esferas que fazem a limpeza, garantindo que todas as esferas sejam coletadas após cada ciclo do processo de limpeza. Fazendo uso de um par de fotodiodo-fotodetector, na faixa do infravermelho, foi desenvolvido um sistema automatizado que funciona como contador das esferas abrasivas imersas no escoamento e medidor da velocidade individual de cada esfera circulante. Esse projeto complementa o desenvolvimento do projeto do sistema injetor de esferas desenvolvido na dissertação de mestrado em Metrologia de Velfe Hollandino de Oliveira Junior (defendida em 2015), cujo protótipo era desprovido dessas funcionalidades.

Palavras chaves: Contador e medidor de velocidade opto eletrônico de esferas, Bancada de teste, Limpeza de trocador de calor, Esferas abrasivas.

ABSTRACT

This project presents and discusses the development and functioning of a test bench that simulates the injection system of abrasive spheres of a heat exchanger tube cleaning system used in hydro generator cooling of the Fontes Novas power plant, property of the Energia Light Serviços de Eletricidade SA dealership. An optoelectronic system has been developed to automatically count the cleaning spheres, ensuring that all spheres are collected after each cleaning cycle. Using a photodiode-photo detector pair, in the infrared band, a automated system was developed that counts the abrasive spheres immersed in the flow and measures individual velocity of each sphere. This project complements the development of the sphere injector system, developed in Velfe Hollandino de Oliveira Junior's master dissertation (defended in 2015), which didn't contain these features.

Key Words: Opto electronic counter and speed meter of spheres, test bench, heat exchanger cleaning, abrasive balls.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 Contextualização do Projeto	9
1.2 Motivação do Projeto	11
1.3 Objetivo do Trabalho	13
1.4 Organização do Trabalho	15
2. BANCADA DE TESTES.....	16
2.1 Conceito.....	16
2.2 Identificação de Necessidades.....	16
2.3 Projeto Hidráulico	18
2.4 Especificação de Equipamentos e Componentes.....	19
2.4.1 Bomba Hidráulica.....	19
2.4.2 Registros, Conexões e Tubulações	21
2.4.3 Microcontrolador.....	21
2.4.3.1 Shield	22
2.4.4 Sensores	23
2.5 Esquema Eletrônico.....	24
2.6 Montagem da Bancada de Testes	25
2.6.1 Montagem dos Equipamentos Opto-Eletrônicos.....	26
2.6.2 Programação do Microcontrolador	28
2.7 Montagem Elétrica	28
2.8 Resultado Final.....	29
2.9 Procedimento de Operação	29
3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	33
3.1 Teste Mecânico e Hidráulico	33
3.2 Teste Eletrônico.....	34
3.3.1 Teste de Velocidade.....	35
3.3.1.1 Teste com Diferentes Velocidades	35
3.3.1.2 Teste da Velocidade Máxima.....	37
3.3.2 Testes com Água Turva	38
4. CONCLUSÃO.....	41
4.1 Conclusões.....	41
4.2 Recomendações para desdobramentos deste trabalho	42
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
6. APÊNDICES	45
6.1 Apêndice I	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema simplificado de uma usina hidrelétrica	9
Figura 2 - Trocador de calor casco e tubo	10
Figura 4 - Corte da esfera abrasiva	12
Figure 8 - Bomba Schneider modelo BC-92S.....	20
Figura 9 - Placa Eletrônica Arduino Mega 2560	22
Figura 10 - Shield LCD Especificado	23
Figura 11 - Sensor Honeywell HOA 6299.....	24
Figura 12 - Diagrama do Esquema Eletrônico	24
Figura 14 - Bancada de testes após montagem.....	26
Figura 15 - Caixa com o microcontrolador e o display LCD.....	27
Figura 16 - Posicionamento dos sensores ópticos.....	27
Figura 17 - Caixa Elétrica de controle.....	28
Figura 18 - Montagem Final da Bancada	29
Figura 19 – Bancada de testes com registros numerados.....	30
Figura 20 - Reservatório de Esferas (carregado com 80% de sua capacidade). ...	31
Figura 21 - Detalhes da tampa do reservatório de esferas	34
Figura 22 - Visor indicando 40 esferas contabilizadas.	35
Figura 24 - Concentrações de tinta utilizadas.....	38
Figura 25 - Comparação entre água limpa e águas turvas.	39
Figura 26 - Tubulação de acrílico com água com corante marrom(concentração: 0,82 mL/L)	39
Figura 27 - Tubulação de acrílico com água com corante marrom (concentração: 1,22 mL/L.	40

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades da Bomba Especificada	21
Tabela 2 - Registros na Configuração Inicial	31
Tabela 3 - Registro na Configuração de Circulação	32

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Projeto

As usinas hidrelétricas são atualmente as principais fontes de energia do sistema elétrico Brasileiro. Cerca de 90% de todo o fornecimento de energia nacional provém destas usinas. Além disso, uma das maiores hidrelétricas do mundo, Itaipu, encontra-se no Brasil, com capacidade de produção de 14000 MW. É de extrema importância que seus equipamentos sejam sempre mantidos em funcionamento, impedindo paradas prolongadas e sobrecargas térmicas resultantes de deficiências do arrefecimento dos hidrogeradores utilizados nesta aplicação.

Usinas hidrelétricas (conforme ilustrado na Fig.1) são sistemas que transformam a energia potencial da água dos rios em energia cinética que será usada para movimentar uma turbina. A turbina (e.g.: do tipo Francis de eixo vertical) é um dispositivo mecânico que permite a conversão da energia hidráulica em trabalho útil de eixo para o gerador. Este, por sua vez, produz energia elétrica, que é fornecida às linhas de transmissão após a passagem por um transformador.

Figura 1 - Esquema simplificado de uma usina hidrelétrica

A adequada operação dos hidrogeradores de uma usina hidrelétrica, assim assegurando condições ótimas de funcionamento, bom desempenho e durabilidade, requer um sistema de arrefecimento do sistema e seus componentes. Um sistema de arrefecimento típico conta com diversos componentes como bomba d'água, válvulas e trocadores de calor.

Trocadores de calor são equipamentos utilizados para efetuar a transferência de calor efetivamente de um fluido a outro, quando estes se encontram em temperaturas diferentes. Os sistemas de geração de energia fazem uso desses equipamentos de auxílio. Portanto, a efetividade do trocador de calor impacta diretamente na eficiência do sistema como um todo.

Existem diversos tipos de trocadores de calor, para diferentes aplicações. A classificação é feita em função do escoamento dos fluidos de trabalho no seu interior, a exemplo dos trocadores dos tipos fluxo paralelo ou contracorrente. Nos de fluxo paralelo, os fluidos quente e frio entram no trocador pelo mesmo lado. Já nos de contracorrente, característica que melhora a eficiência do processo de transferência de calor, os fluidos entram por lados opostos do trocador. Além desta classificação, existem também os trocadores de calor do tipo casco e tubo e de placas verticais, que são os mais utilizados. A Fig. 2 ilustra um sistema do tipo casco e tubo, que opera em regime de fluxo contracorrente.

Figura 2 - Trocador de calor casco e tubo

Um dos principais desafios encontrados pelas empresas geradoras do setor elétrico é encontrar uma maneira de monitorar a eficiência dos hidrogeradores. É importante também que haja o desenvolvimento de métodos de proteção e manutenção preditiva do sistema, assim reduzindo os elevados custos de manutenção e evitando paradas técnicas que interrompem a geração. Ou seja, a queda de efetividade do trocador de calor da usina afeta diretamente a eficiência de geração de energia do hidrogerador.

1.2 Motivação do Projeto

De um modo geral, é a própria água captada das represas das usinas hidrelétricas que são utilizadas como fluido de trabalho do trocador de calor que viabiliza o arrefecimento do hidrogerador. Como há resíduos de natureza orgânica e/ou inorgânica presentes na água da represa, o acúmulo de compostos no interior dos dutos do trocador de calor é agravado, podendo comprometer de forma drástica a eficiência da conversão da energia cinética da água em eletricidade. Esses resíduos formam uma incrustação também conhecida como *fouling* ou *biofouling* (quando o *fouling* for constituído de matéria orgânica viva), afetando a eficiência da operação do trocador e comprometendo a capacidade do sistema de arrefecimento. Essa incrustação dos tubos do trocador pode eventualmente levar a um superaquecimento do hidrogerador, representando perdas de geração e custos de manutenção não programados.

Existem alternativas de limpeza que amenizam o problema do acúmulo de resíduos nos elementos internos do trocador de calor. Uma das maneiras utilizadas para mitigar o efeito do *fouling* nos tubos dos trocadores de calor é a limpeza por esferas abrasivas (Oliveira, 2015). As esferas (circulantes nos tubos com interferência) são revestidas com um material abrasivo macio na sua superfície, o que contribui para a remoção das incrustações nos tubos por meio de um

mecanismo simples de raspagem direta das paredes internas do trocador de calor, conforme ilustrado nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 - Esfera abrasiva no momento da limpeza

Figura 4 - Corte da esfera abrasiva

Durante o processo de limpeza dos dutos do trocador de calor, nem sempre todas as esferas são recuperadas pelo coletor de esferas já que algumas ficam presas dentro dos tubos em regiões de concentração de fouling. Tal fato obstrui a passagem do fluido de trabalho e induz perdas de carga que sobrecarregam a bomba hidráulica utilizada para circular o fluido de trabalho (que movimenta as esferas). Problemas dessa natureza possuem outras consequências ainda mais graves de impacto econômico já que comprometem a efetividade do trocador de calor resultando em redução da geração na usina hidrelétrica. A obstrução severa dos tubos do trocador de calor acarreta na necessidade de uma “varetagem”, e lavagem com jato d’água sob pressão para garantir que todas as esferas sejam recuperadas (conforme mostrado na figura 5). Considerando que durante a operação de um sistema mais sofisticado de limpeza dos trocadores de calor, como é o caso do sistema de limpeza por esferas abrasivas, é difícil para o operador controlar o número de esferas que efetivamente circulam pelos tubos do trocador cumprindo o

seu ciclo de limpeza, desenvolver um sistema de controle dessas esferas mostrou-se de grande interesse prático para o operador. A busca de uma solução para esse problema foi o que motivou este Trabalho de Conclusão de Curso; ou seja: controlar o número de esferas introduzidas no sistema e o número de esferas efetivamente coletadas. Como motivação complementar, o sistema desenvolvido para contar as esferas deveria também medir a sua velocidade já que este é um parâmetro que otimiza a eficácia do sistema de limpeza. Para cumprir o objetivo desejado, optou-se por um sistema opto eletrônico, acoplado a softwares computacionais, já que este dispositivo permite a sua operação em meios turvos, a exemplo do que ocorre no escoamento de água e *fouling*.

Figura 5 - Esferas recuperadas após a limpeza.

1.3 Objetivo do Trabalho

Tendo em vista a importância de uma limpeza eficiente dos tubos do trocador de calor, o aluno de mestrado em Metrologia Velfe Hollandino de Oliveira Júnior projetou um sistema denominado SIREA que injeta/recupera esferas abrasivas nos dutos do trocador de calor para mitigar o *fouling* que se forma nas paredes internas, conforme ilustrado na figura 6. O sistema foi concebido para ter mobilidade, permitindo ser instalado em diversos trocadores de calor da usina

hidrelétrica. O SIREA é um equipamento compacto, que impulsiona as esferas abrasivas por meio de um escoamento da água de resfriamento do trocador; possui duas câmaras (de injeção e de recuperação das esferas) e diversas válvulas que controlam o fluxo das esferas e do fluido de trabalho. Por operação de válvulas, as esferas são transferidas da câmara de recuperação para a de injeção após um ciclo de trabalho.

Figura 6 - Esquema do sistema SIREA

Entendendo a importância do controle da quantidade de esferas injetadas e coletas pelo SIREA nos trocadores de calor, tem-se como objetivo neste Projeto Final o desenvolvimento do contador e medidor de velocidade das esferas abrasivas circulantes, carência entendida como um limitante do projeto original.. Inicialmente foi desenvolvida uma bancada de teste para simular o sistema injetor (SIREA) utilizado no processo de limpeza dos tubos de um trocador de calor com esferas abrasivas, e posteriormente acoplado à bancada hidráulica um sistema opto eletrônico de contagem automática e medição da velocidade das esferas que fazem a limpeza. Esse sistema

garante que todas as esferas sejam coletadas após cada ciclo do processo de limpeza. A detecção das esferas baseia-se em pares fotodiodo-fotodetector na faixa do infravermelho.

1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho é composto por 4 capítulos. Esta introdução, que inclui a descrição dos objetivos e características do trabalho de conclusão de curso (TCC).

O segundo capítulo descreve o projeto e fabricação da bancada de testes, contemplando as seguintes seções: o conceito da bancada, a identificação das necessidades principais da bancada, a apresentação do esquema hidráulico inicial, a apresentação do esquema eletrônico, a especificação dos equipamentos já existentes no mercado a serem comprados e a descrição e apresentação da bancada montada.

O terceiro capítulo descreve e discute os testes realizados. Ele se inicia com uma descrição dos procedimentos experimentais adotados, e do uso do hardware escolhido. Apresenta a execução dos testes, e apresenta os resultados obtidos e sua análise.

Por último, o quarto capítulo apresenta a conclusão do projeto, enfatizando os resultados obtidos pelos testes realizados e características dos processos de projeto e fabricação da bancada de testes.

2. BANCADA DE TESTES

Neste capítulo será descrito todo o processo de projeto e fabricação da bancada de testes. Isto compreende: as especificações necessárias, necessidades identificadas, esquema hidráulico, esquema elétrico, desenho de peças mecânicas, especificação de equipamentos e a montagem da bancada.

2.1 Conceito

A bancada de testes tem como finalidade simular a operação do injetor de esferas abrasivas para limpeza do trocador de calor conforme ocorre na usina hidrelétrica. O projeto foi concebido para reproduzir a velocidade ideal de circulação das esferas, tal qual definido na dissertação de mestrado de Oliveira (2015), que reporta um valor ótimo de velocidade de esferas entre 1, e 1,5 m/s para atender especificidades do *fouling* estudado na Usina Fontes Nova.

A partir da bancada e seus componentes opto eletrônicos foi possível determinar exatamente o número total de esferas circulantes, assim orientando o operador do sistema de limpeza sobre o total de esferas recuperadas após a limpeza. Sem dúvida, uma melhoria desejada do projeto SIREA. A velocidade das esferas circulantes pela tubulação é efetuada com base na largura (banda) do mesmo sinal que viabiliza a sua contagem por meio do sistema opto eletrônico.

2.2 Identificação de Necessidades

Tendo sido feita a análise primária das necessidades, tendo como base a operação de limpeza do trocador do projeto SIREA, foi possível delinear os equipamentos necessários para que seja possível a realização da simulação dentro dos parâmetros adequados e desejados. Esta é

uma análise primária, sem especificação ou detalhes de construção dos equipamentos, que tem como objetivo somente uma delineação do que será necessário para a montagem da bancada.

A partir desse trabalho preliminar foi possível identificar os equipamentos da bancada de testes e, também, especificar cada equipamento objeto de projeto e fabricação, assim orientando a especificação técnica para compra de acordo com a complexidade e necessidades especiais de cada componente em questão.

- a) **Reservatório para armazenamento de água:** tanque com entrada para abastecimento/realimentação de água e saída para o sistema. O equipamento utilizado foi comprado e adaptado para as necessidades específicas.
- b) **Registro Regulador de Pressão:** o sistema foi equipado com um registro regulador de pressão instalado na saída da bomba, para garantir que a pressão de operação esteja dentro dos limites de projeto.
- c) **Bomba Hidráulica:** especificada para elevar a pressão da água até o nível desejado, visando viabilizar a circulação das esferas dentro da faixa de velocidade previamente definida por Oliveira (2015); i.e.: entre 1 e 1,5 m/s. A bomba selecionada é de operação simples e foi adquirida pelo autor do projeto de TCC.
- d) **Tubulação, Conexões e Registros Hidráulicos:** foram especificados e comprados, incluindo a tubulação, conexão e registros hidráulicos necessários para a montagem do sistema hidráulico, especificado em detalhes em seção subsequente deste trabalho.
- e) **Reservatório para esferas:** tanque com entrada para alimentação das esferas e saída para o sistema. O equipamento utilizado foi comprado e adaptado para as necessidades específicas do projeto.

- f) **Componentes Opto-Eletrônicos:** especificados e adquiridos para viabilizar a construção do sistema optoeletrônico concebido para contar e medir a velocidade das esferas. Os elementos sensíveis foram instalados na superfície externa da tubulação, o que permitiu ao sistema detectar cada esfera circulante pela zona de medição..
- g) **Fios e Conexões:** especificados e comprados para permitir a montagem do sistema eletrônico acoplado à bancada hidráulica. O sistema eletrônico será descrito em detalhe mais adiante.
- h) **Estrutura para a bancada:** fabricado um suporte facilitando o transporte da bancada após a sua fabricação. A estrutura foi equipada com suportes para os reservatórios.

2.3 Projeto Hidráulico

Considerando as necessidades da bancada de teste e os componentes necessários identificados na análise da seção anterior, foi possível montar um diagrama hidráulico da bancada de teste. Este diagrama é de extrema importância pois ilustra a montagem e o funcionamento do sistema que movimenta as esferas na tubulação e possibilita a sua contagem. Esse diagrama orientou a construção da bancada.

O diagrama da Figura 7 inclui somente os componentes hidráulicos. Neste diagrama é possível observar os seguintes componentes: bomba hidráulica, reservatório, válvulas, registros, tubos e conexões.

Figure 7 - Diagrama do sistema hidráulico da bancada de teste

2.4 Especificação de Equipamentos e Componentes

Caracteriza-se, a seguir, a especificação de diversos equipamentos (adquiridos comercialmente) para compor a bancada de testes. Estes equipamentos foram especificados para atender às necessidades da operação desejada, permitindo o funcionamento adequado do sistema global. Dentre os equipamentos hidráulicos que foram especificados, destacam-se: bomba, válvula *by-pass*, registro e tubulações. Igualmente foi necessário especificar os equipamentos eletrônicos: microcontrolador, sensor óptico e tela LCD. Cada equipamento foi especificado de acordo com as necessidades de operação e disponibilidade no mercado.

2.4.1 Bomba Hidráulica

A bomba hidráulica é um equipamento que recebe energia elétrica da rede e permite o bombeamento do fluido de trabalho (meio que transporta as esferas abrasivas) no sistema. A

bomba foi especificada para permitir um fluxo de água capaz de impor a velocidade de trabalho das esferas segundo especificado por Oliveira (2015); i.e.: entre 1 e 1,5 m/s. Um sistema de by-pass permitiu controlar a velocidade para operação nessa faixa.

Foi escolhida uma bomba d'água periférica que, segundo o fabricante, é ideal para transferência de água limpa de reservatórios em sistemas que necessitam de maiores pressões. Inicialmente, foi instalada uma bomba de ½ CV na bancada de teste. Porém, os resultados obtidos com essa bomba não foram satisfatórios e optou-se por escolher outra bomba. Foi encontrada então uma bomba com bom custo benefício: modelo BC-92S, do fabricante Schneider. A figura 8 ilustra uma imagem da bomba, e a Tabela 1 apresenta suas características de operação.

Figure 8 - Bomba Schneider modelo BC-92S

Tabela 1 - Propriedades da Bomba Especificada

PROPRIEDADE	VALOR
POTÊNCIA DO MOTOR	2 CV
ROTAÇÃO MÁXIMA	3460 RPM
VAZÃO MÁXIMA	22,8 m ³ /h
ALTURA MANOMÉTRICA MÁXIMA	29 mca
MASSA	8,0 kg

2.4.2 Registros, Conexões e Tubulações

Os registros e conexões foram escolhidos de acordo com as necessidades encontradas de operação e construção. Foram utilizadas tubulações, conexões e registros da Tigre, marca que oferece grande variedade de componentes hidráulicos. Para construção da bancada foram utilizados: 6 uniões, 6 registros, 14 joelhos de 90 graus, 4 conexões em T, 2 conexões em 45 graus, 2 adaptadores rosca-cola. A tubulação reta escolhida foi a de 50 mm, pois esse diâmetro não permitiria que duas esferas passassem juntas. A tubulação de acrílico utilizada foi de 45 mm, pois foi este o diâmetro mais próximo encontrado no mercado.

2.4.3 Microcontrolador

O microcontrolador é um equipamento eletrônico programável utilizado para desempenhar tarefas específicas. O microcontrolador é um circuito integrado que contém um processador, memória e entradas e saídas programáveis. Para um microcontrolador efetuar uma tarefa, é necessário que seja programado utilizando uma linguagem de programação, geralmente C/C++.

Para facilitar a prototipagem, optou-se pela utilização da plataforma Arduino no projeto. O Arduino é uma plataforma de desenvolvimento composta de um hardware e de um ambiente de desenvolvimento integrado. O ambiente de desenvolvimento integrado é responsável por compilar e transferir o código para o microcontrolador. Foi escolhida a placa com micro controlador ATMEGA 2560, ilustrada na figura 9. Essa placa opera a 5 V, e tem 8 bits.

Figura 9 - Placa Eletrônica Arduino Mega 2560

Essa placa é utilizada para projetos mais complexos, sendo composta por 54 pinos digitais e 16 entradas analógicas. O fabricante recomenda essa placa para projetos de impressoras 3D e projetos de robótica.

2.4.3.1 Shield

Shields são placas de circuito utilizadas acoplados à placa eletrônica Arduino para aumentar sua capacidade. Estas placas podem conter sensores, módulos de comunicação e relés, por exemplo.

Para o projeto fez uso de um shield da marca DF Robot, com um visor LCD de 2x16mm e um teclado de botões (conforme figura 10). Este dispositivo permite ajustar o contraste de luz na tela, e determinar diferentes funções para cada botão. Neste projeto, especificamente, os botões não foram utilizados, e a tela foi usada para indicar a contagem das esferas e a velocidade de circulação das esferas na zona em que cruzam os sinais emitidos pelos sensores.

Figura 10 - Shield LCD Especificado

2.4.4 Sensores

Sensor é um dispositivo que responde a um estímulo físico de maneira específica e mensurável analogicamente. O funcionamento de sensores ópticos é baseado na emissão e recebimento de um feixe de luz. O recebimento é feito por um elemento fotossensível.

Para este projeto foi escolhido um sensor óptico da marca Honeywell modelo HOA6299 Series, mostrado na figura 11. Esse sensor opera em par, sendo um diodo emissor e um módulo detector. De acordo com o fabricante esse sensor pode ser utilizado para controle de posição, contagem de peças e detecção de bordas. O diodo emissor lança feixes no infravermelho e pode

ser detectado a uma distancia mínima de 2,5 in. O detector utiliza o padrão TTL (0 ou 5 V), alterando seu sinal de saída quando um objeto opaco interrompe o feixe.

Figura 11 - Sensor Honeywell HOA 6299

2.5 Esquema Eletrônico

Uma vez que os equipamentos eletrônicos foram especificados, foi possível projetar uma esquema eletrônico para o sistema de contagem automática das esferas. O esquema eletrônico é importante para mostrar a ligação dos pinos o sensor e do shield na placa e na fonte de energia. O diagrama da Figura 12 inclui somente os componentes eletrônicos. Neste diagrama é possível observar os seguintes componentes: placa eletrônica Arduino, o shield LCD, e os sensores.

Figura 12 - Diagrama do Esquema Eletrônico

2.6 Montagem da Bancada de Testes

Após a especificação dos equipamentos, foi possível realizar a montagem final da bancada, respeitando-se uma organização ordenada dos equipamentos na base de suporte para a bancada. Tal cuidado assegura fácil acesso aos equipamentos durante eventuais necessidades de manutenção ou alteração da bancada. Desta maneira, foi possível montar a bancada de testes antes da instalação do equipamento eletrônico e elétrico conforme ilustrado nas figuras 12 e 13.

Figura 13 - Bancada de testes após montagem.

Figura 14 - Bancada de testes após montagem.

As figuras 12 e 13 permitem observar a organização dos componentes na base usada como suporte para a bancada, incluindo o posicionamento da bomba, dos reservatórios, das conexões e da tubulação. É importante notar a parte da tubulação em acrílico foi usada para assegurar que os sensores possam contar as esferas.

2.6.1 Montagem dos Equipamentos Opto-Eletrônicos

Após a montagem da bancada, o próximo passo foi fazer a instalação dos equipamentos optoeletrônicos. Para fixar os sensores no perímetro da tubulação foi usada uma abraçadeira de nylon para proteger a placa, o microcontrolador e a tela LCD de eventuais vazamentos na bancada. Para isto, a caixa comprada possui tampa acrílica transparente assim cumprindo ambos os propósitos, proteger os equipamentos e permitir a visualização das indicações mostradas na tela.

Figura 15 - Caixa com o microcontrolador e o display LCD.

Os sensores foram posicionados na vertical, já que esta foi a posição que proporcionou melhor detecção das esferas, sem indicar a presença de bolhas de ar na tubulação. O posicionamento dos sensores pode ser visto na figura 15.

Figura 16 - Posicionamento dos sensores ópticos.

2.6.2 Programação do Microcontrolador

Para que a bancada cumprisse seu objetivo, foi necessário escrever um programa usando a interface de desenvolvimento Arduino. O programa foi escrito em linguagem C/C++. O objetivo do programa é fazer a contagem das esferas e calcular a sua velocidade de passagem pelos sensores. A velocidade é calculada a partir do tempo que o sensor demora para mudar seu sinal de saída. O programa completo está documentado no Anexo 1 deste trabalho.

2.7 Montagem Elétrica

Ao final da montagem eletrônica, foi completada sua instalação elétrica na rede. O sistema elétrico da bancada é controlado por uma caixa que contém a chave geral do sistema, e uma chave para ligar e desligar a bomba, conforme figura 16. A caixa com os botões verde e vermelho é usada para um eventual caso de emergência no qual a bancada necessite ser paralisada.

Figura 17 - Caixa Elétrica de controle.

2.8 Resultado Final

Após a finalização das montagens das partes eletrônica e elétrica, a bancada foi devidamente identificada para que sua operação ficasse mais didática. Portanto, o resultado final da bancada, pronta para os testes, é ilustrada na figura 17.

Figura 18 - Montagem Final da Bancada

2.9 Procedimento de Operação

Para facilitar a descrição da operação, os registros da bancada foram numerados de 1-6, conforme mostrado na figura 18.

Figura 19 – Bancada de testes com registros numerados.

O procedimento de manobra dos registros tem duas configurações: inicial e de circulação das esferas. A configuração inicial é utilizada para encher as tubulações de água e preparar o circuito para receber as esferas. É importante que, antes de começar a operar a bancada, o tanque principal esteja abastecido com água até 100% de sua capacidade e o tanque de esferas esteja abastecido até aproximadamente 80% da sua capacidade com água e com as esferas, conforme figura 19.

Figura 20 - Reservatório de Esferas (carregado com 80% de sua capacidade).

É importante também que o tanque de esferas esteja bem vedado e com a tampa fixada. Antes de iniciar a bomba, os registros devem estar na configuração inicial, conforme documentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Registros na Configuração Inicial

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

No momento que a água começar a retornar ao tanque principal, a bancada está preparada para circular as esferas. Para que isso seja possível, é preciso fazer uma manobra com os registros, conforme indicado na tabela 3.

Tabela 3 - Registros na Configuração de Circulação

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

Com essa configuração será possível visualizar as esferas passando pela tubulação em acrílico na extremidade direita da bancada e chegando ao tanque principal. A abertura do registro 2 controla a velocidade de passagem das esferas. Quanto mais aberto o registro estiver, mais rápido as esferas irão circular pelo sistema. O registro 6 somente será aberto quando for necessário drenar as tubulações da bancada.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após a montagem da bancada, foi possível realizar os testes necessários para validar o seu funcionamento. Primeiramente, a bancada foi testada mecânica e hidraulicamente e posteriormente os componentes eletrônicos foram testados. Essa separação foi importante pois, como a bancada é hidráulica, havia o risco de vazamentos, que poderiam danificar os equipamentos eletrônicos.

3.1 Teste Mecânico e Hidráulico

Após a montagem, porém antes da instalação dos componentes eletrônicos de detecção das esferas, a bancada de teste foi testada para verificar vazamentos, e funcionamento em geral. Logo no primeiro teste foi detectado um grande vazamento na tampa do tanque de esferas, causado pela falta de vedação. Porém, mesmo com o vazamento foi possível confirmar que a bancada estava funcionando e estava cumprido o objetivo de transferir as esferas de um tanque para o outro, passando pela tubulação de acrílico. Para corrigir o vazamento do tanque de esferas, foi necessário fazer uma adaptação na tampa para que esta conseguisse suportar a pressão e a vazão d'água transportada pela bomba. Foi adaptado um anel de vedação na circunferência do tanque de esferas, e um encaixe de espuma de alta densidade na tampa, como pode ser visto na figura 20. Essas adaptações foram suficientes para solucionar o vazamento que foi detectado nos testes. Foi possível então realizar para os testes dos componentes optoeletrônicos, sem risco de danificá-los.

Figura 21 - Detalhes da tampa do reservatório de esferas

3.2 Teste Eletrônico

Uma vez que a bancada já havia sido testada para verificar vazamentos, e o problema encontrado foi resolvido, o próximo passo foi testar os componentes opto eletrônicos da bancada. Logo no primeiro teste percebeu-se que os sensores ópticos não estavam contabilizando as esferas da maneira desejada. Ao invés de detectar apenas as esferas, os sensores estavam também contabilizando as bolhas de ar que passavam pela tubulação. O visor mostrou que o sensor contabilizou um numero extremamente alto de esferas, quando apenas um total de quarenta esferas haviam sido inseridas no sistema.

Para solucionar essa questão, foi feita uma adaptação na tubulação de entrada do reservatório de água de maneira que a água atingisse a superfície do reservatório com menor velocidade e, portanto, turbilhonasse menos a água. Com isso feito, foi possível perceber que havia menos bolhas d'água no sistema.

Após várias tentativas de posicionamento e ajustes na tubulação, foi possível encontrar a montagem que minimizou a turbulência e, conseqüentemente, o indesejável fenômeno de formação de bolhas que prejudicava a operação do contador opto eletrônico de esferas, procedimento que permitiu validar o sistema. A figura 21 ilustra um dos testes em que o sistema corretamente contabilizou as quarenta esferas inseridas no sistema.

Figura 22 - Visor indicando 40 esferas contabilizadas.

3.3.1 Teste de Velocidade

Um importante teste realizado na bancada de teste refere-se à verificação do funcionamento do sistema com diferentes velocidades. Foram efetuados dois tipos de teste: o primeiro com três velocidades diferentes e o segundo para verificar a maior velocidade que o sistema era capaz de detectar.

3.3.1.1 Teste com Diferentes Velocidades

Para confirmar o funcionamento da bancada de teste e especialmente dos sensores, foram escolhidas três diferentes faixas de velocidades das esferas para efetuar testes. É possível mudar

as velocidades de escoamento das esferas por meio do ajuste do registro 2, que funciona como uma válvula by-pass, que regula pressão e vazão.

Para atender as especificações recomendadas por Oliveira (2015), foi testada a faixa de velocidade:

$$1,0 \text{ m/s} \leq v < 1,5 \text{ m/s},$$

e para verificar os limites de funcionalidade do sistema, foram testadas as faixa adicionais de:

$$1,5 \text{ m/s} \leq v < 2,0 \text{ m/s} \text{ e}$$

$$2,0 \text{ m/s} \leq v < 2,5 \text{ m/s}.$$

As faixas de teste foram escolhidas com base na velocidade ótima de operação recomendada por Oliveira (2015), que desenvolveu a pesquisa de mestrado que antecedeu este trabalho. Esse limite de velocidade é importante para assegurar que, para o grau de abrasividade das esferas utilizadas, o *fouling* seja removido ainda durante a sua fase incipiente de formação; ou seja, antes que a incrustação esteja cristalizada nas paredes internas da tubulação. Esse foi o critério que orientou a definição das faixas de velocidade testadas neste trabalho; ou seja, faixas próximas da velocidade ótima de operação que reproduz a condição de operação na Usina Fontes Nova.

Para cada faixa de velocidade foram efetuados dez testes com quarenta esferas cada. O objetivo final do teste era verificar se o sensor óptico apresentaria erro na contagem das esferas com o aumento da velocidade. Nos trinta testes efetuados o sensor funcionou conforme esperado, e fez a leitura correta das quarenta esferas. Pode-se concluir então que, na faixa de operação desejada do equipamento, o sistema de contagem de esferas não apresenta erros, sendo 100% confiável e absolutamente repetitivo.

3.3.1.2 Teste da Velocidade Máxima

O teste de velocidade realizado teve o objetivo de verificar a velocidade máxima de navegação das esferas, realizadas na bancada de teste desenvolvida para reproduzir uma condição de operação na Usina. Esse teste foi importante para avaliar o limite da bancada e também o seu funcionamento em condições simuladas de operação.

Para testar a velocidade máxima, foram colocadas quarenta esferas no sistema e o registro 2 foi aberto totalmente. Dessa maneira, a pressão retirada da bomba de 2 CV é a maior possível, e portanto a velocidade das esferas também. Nessas condições a velocidade máxima de escoamento registrada pelo sensor foi de 6,25 m/s, como pode ser visto na figura 22 abaixo

Figura 23 - Visor indicando a velocidade máxima obtida na bancada de testes desenvolvida.

Pode ser observado que a velocidade atingida pela esfera foi superior ao triplo da velocidade ótima requerida para a limpeza do trocador de calor. Mesmo com essa alta velocidade o sensor foi capaz de fazer a leitura das quarenta esferas inseridas no sistema nos dez testes efetuados, de forma precisa e repetitiva.

3.3.2 Testes com Água Turva

O próximo teste realizado foi para verificar a eficiência dos sensores ópticos com diferentes tonalidades de água, já que essa é a condição real de operação na Usina. Esse teste é necessário pois, na operação de limpeza do trocador de calor na usina hidrelétrica, a água que escoava pelos tubos adquire uma tonalidade marrom devido à sujeira retirada da tubulação.

Para simular a água com barro, foi utilizada tinta guache na cor marrom. Os testes foram realizados aumentando progressivamente a quantidade de tinta diluída na água. A quantidade de água necessária para fazer o sistema funcionar é de quarenta e nove litros, portanto as contas de diluição foram feitas com base neste volume. As figuras 23 e 24 mostram as concentrações utilizadas no teste. A primeira foto mostra as concentrações de tinta em mililitros para cada litro de água. A segunda foto mostra a comparação entre a água limpa usada inicialmente, e as águas tingidas que foram utilizadas nesse teste. As concentrações de tinta utilizadas foram 0,41 mL/L, 0,82 mL/L e 1,22 mL/L.

Figura 24 - Concentrações de tinta utilizadas.

Figura 25 - Comparação entre água limpa e águas turvas.

Assim como nos testes anteriores, foram inseridas quarenta esferas no sistema. Na concentração de 0,82 mL/L já era possível notar uma dificuldade de ver as esferas a olho nu pois estas passavam em alta velocidade e com a água turva. Abaixo está uma foto (figura 25) para demonstrar a cor da água com a concentração 0,82 mL/L.

Figura 26 - Tubulação de acrílico com água com corante marrom(concentração: 0,82 mL/L)

Foi verificado, em dez testes para cada concentração, que tanto para o escoamento com concentração de 0,41 mL/L e 0,82 mL/L, o sensor óptico faz a leitura das esferas com 100% de

acerto. Porém, quando a concentração aumenta para 1,22 mL/L o sensor não é capaz de contabilizar as esferas. Isso ocorre pois a água se torna muito turva, como pode ser visto na Figura 26, condição a partir da qual o sensor já não consegue detectar a passagem das esferas.

Figura 27 - Tubulação de acrílico com água com corante marrom (concentração: 1,22 mL/L.

4. CONCLUSÃO

4.1 Conclusões

O objetivo deste projeto foi plenamente atingido já que desenvolveu e validou um contador e medidor de velocidade de esferas, concebido para aperfeiçoar o sistema de limpeza de trocadores de calor desenvolvido na pesquisa de mestrado em Metrologia desenvolvida por Oliveira (2015). Certamente uma contribuição que simplifica e traz conforto para o usuário do equipamento durante a operação do sistema na Usina, em momentos de grande tensão para a equipe de manutenção que precisa estar atenta a diversos fatores de operação da usina.

O projeto cumpriu, também, os objetivos originalmente formulados de : (i) testar um sensor opto eletrônico na faixa do infravermelho e (ii) validar uma bancada de teste capaz de reproduzir as condições de operação na usina, para diferentes condições de opacidade das águas testadas.

É possível portanto concluir que o desenvolvimento do contador e da bancada resultaram num projeto bem sucedido, pois permitiu resolver uma pendência e a simulação do funcionamento do processo de limpeza do trocador de calor utilizando esferas abrasivas. Esta bancada continuará a ser usada para futuros desenvolvimentos de projetos e aperfeiçoamento do projeto SIREA.

Como conclusão final, pode-se dizer que o projeto tem uma finalidade real para a indústria de geração de energia. O equipamento desenvolvido como tema deste TCC de Engenharia Mecânica pode, em um futuro próximo, ser utilizado para instrumentar o sistema de limpeza de trocadores de calor evitando a parada de funcionamento dos trocadores de calor, assim mantendo a eficácia do arrefecimento dos hidrogenadores. Isso evitará prejuízos para a hidrelétrica, quer econômicos quer em ganhos de geração.

4.2 Recomendações para desdobramentos deste trabalho

Durante a realização dos testes foi possível identificar quais elementos do projeto funcionaram bem e quais podem ser melhorados em desdobramentos futuros deste trabalho. Conforme esperado em qualquer protótipo de medidor, permanecem alguns pequenos focos de vazamentos que embora presentes e incômodos, não prejudicaram a qualidade dos testes realizados.

Melhorias poderão também ser introduzidas no sistema de acionamento da bomba, e de reset do microcontrolador a cada reinício do teste. Procedimentos indevidos mostraram-se capazes de ativar o sensor e induzir falhas na contagem de esferas.

Para adequadamente eliminar diferentes graus de concentração das incrustações, o sistema de leitura precisa ser aperfeiçoado para conseguir captar as esferas em águas mais turvas que as testadas neste trabalho.

Na situação real de operação, no momento que as esferas passam pela tubulação, elas retiram blocos de sujeira que são arrastados pelo escoamento da água e poderão ser indevidamente contabilizados como esferas, problema que, acredita-se, poderá ser solucionado aumentando-se o número de elementos opto eletrônicos sensitivos. Ou seja, utilizar mais pares de sensores, ao invés de apenas um como foi usado nesse projeto. Essa melhoria faria com que fosse possível reduzir a possibilidade de falsos positivos, como ocorreria caso um detrito removido da parede da tubulação escoasse exatamente no centro da tubulação, e então sendo contabilizado como esfera. Nesse caso, seria necessário alterar a programação do micro controlador, de modo que o sistema só contabilizasse como esfera quando todos os sensores fossem acionados.

Outra sugestão de melhoria seria alterar o sensor utilizado, e utilizar o par de sensores SEP8736-003 e SDP8436-003 do fabricante Honeywell. Essa mudança de sensor permitirá

definir o limiar de detecção das esferas, e possivelmente permitir a operação com água mais turvas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOTT, T. R. Heat exchanger design : 2nd Edition. By Arthur P. Fraas. John Wiley, Chichester, 546 pp., £42.80. **Chemical Engineering Science**, v. 45, n. 9, p. 3013, // 1990. ISSN 0009-2509. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000925099080209W>>.

MELO, L. F.; BOTT, T. R. Biofouling in water systems. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 14, n. 4, p. 375-381, 5// 1997. ISSN 0894-1777. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177796001392>>.

Heat exchanger fouling: Mitigation and cleaning strategies. **Heat Transfer Engineering**, v. 32, n. 3-4, p. 189-196, 2011. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-78650652158&partnerID=40&md5=5533aaf713e85e38118b0079cb6155ea>>.

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

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

Datasheet diodo Honeywell SEP8736-003 – Disponível em <<http://datasheet.octopart.com/SEP8736-003-Honeywell-datasheet-17725576.pdf>>

Datasheet phototransistor Honeywell SDP8436-002 – Disponível em <<http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0026/0900766b80026887.pdf>>

6. APÊNDICES

6.1 Apêndice I

```
#include <LiquidCrystal.h> //inclui biblioteca para controlar o Lcd

LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);          // Pinos usados pelo shield do LCD

// Definição de constantes e variáveis Globais

const byte interruptPin = 2;
volatile int bolinha = 0;
const byte sensorPin = 20;
float tempo=0;
float tempoant=0;
int contador =0;
float velocidade=0;

void setup(){
  lcd.begin(16, 2);          // inicia a biblioteca lcd
  lcd.setCursor(0,0);       // posiciona o cursor no inicio do display
  lcd.print("Teste de sensor de luz"); // Mensagem de teste
  pinMode(sensorPin, INPUT); // Configura o pino 20 como uma entrada
  pinMode(18,OUTPUT); // Por falta de linhas de 0 e 5v, utiliza as saidas 18 e 19 como linhas de alimentação.
  digitalWrite(18,HIGH);
  pinMode(19,OUTPUT);
  digitalWrite(19,LOW);

  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensorPin),mudaestado, CHANGE); // Configura o comportamento da interrupção ligada ao pino 20.
  contador = 0;
}

void mudaestado(){ // função que é chamada quando o evento de mudança de estado acontece
  if (tempo == 0){ // Armazena na variavel tempo na primeira entrada
    tempo = millis();
    // Armazena o tempo em milisegundos gerado pelo clock do Microcontrolador (Ele começa a contar a partir do momento em que o microcontrolador inicia)
  }

  contador = contador +1; //incrementa o contador do loop
  if (contador == 2){ // Caso seja a segunda vez que entra no loop, calcula a diferença de tempo entre os dois eventos e reseta a variável tempo.
    tempoant = millis() - tempo ;
    tempo=0;

    bolinha = bolinha + 1; //incrementa o contador de bolinhas
    contador =0;
  }
}

void loop(){

  lcd.setCursor(0,1);

  lcd.print(bolinha); // mostra a variável ligada a contagem das bolinhas

  velocidade = (0.025)/(tempoant/1000.0);
  //calcula a velocidade (Delta s / Delta t) em m/s onde delta S é o diametro da bolinha 2.5 cm e delta t é a diferença de tempo entre os eventos

  lcd.setCursor(9,1);
  lcd.print(velocidade);

}
```