



**João Ricardo Cortes Nunes**

**Dispositivo opto-eletrônico na faixa do infravermelho  
para detecção e medição de velocidade de esferas  
utilizadas como artefatos de limpeza de  
trocadores de calor**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

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

Rio de Janeiro, maio de 2018



**João Ricardo Cortes Nunes**

**Dispositivo opto-eletrônico na faixa do infravermelho  
para detecção e medição de velocidade de esferas  
utilizadas como artefatos de limpeza de  
trocadores de calor**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Metrologia. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa**

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia - PUC-Rio

**Prof. Maurício Nogueira Frota**

Coorientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia - PUC-Rio

**Prof. Eduardo Costa da Silva**

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Prof. Igor Braga de Paula**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Epifanio Mamani Ticona**

Instituto de Energia - PUC-RIO

**Prof. Marcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do CTC  
Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 02 de maio de 2018

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **João Ricardo Cortes Nunes**

Graduado em Engenharia de Controle e Automação pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), em 2015. Atualmente Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI) pela PUC-Rio.

#### Ficha Catalográfica

Nunes, João Ricardo Cortes

Dispositivo opto-eletrônico na faixa do infravermelho para detecção e medição de velocidade de esferas utilizadas como artefatos de limpeza de trocadores de calor / João Ricardo Cortes Nunes ; orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa ; co-orientador: Maurício Nogueira Frota. – 2018.

89 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2018.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Metrologia. 3. Sensores opto-eletrônicos. 4. Contador. 5. Esferas abrasivas. 6. Trocadores de calor. I. Barbosa, Carlos Roberto Hall. II. Frota, Maurício Nogueira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. IV. Título.

CDD: 389.1

## Agradecimentos

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Seria necessária uma nova tese para expressar minha gratidão a todas as pessoas que contribuíram com a conclusão deste trabalho. Agradeço aos meus orientadores Carlos Roberto Hall Barbosa e Maurício Nogueira Frota, pela generosidade e confiança. Suas palavras de incentivo foram essenciais para que este trabalho pudesse ser concluído.

Aos membros da Comissão examinadora, por suas sugestões e análise do trabalho.

Aos professores Eduardo Costa da Silva, Luiz Antonio Pereira de Gusmão, Mauro Schwanke da Silva, aos técnicos do Departamento de Engenharia Elétrica Manuel Ramos Martins, Evandro Costa dos Reis e Carlos Afonso Pacheco Campos, pelo apoio e estímulo. A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Metrologia, notadamente aos colegas Engenheiros, Sergio Bragantini Germano e mestrando Jefferson Rios e às secretárias do Programa, Marcia Ribeiro e Paula Molinari.

À equipe da CETEM Automação Industrial Ltda., pela colaboração no desenvolvimento de projetos paralelos, que se complementaram (CONDE e Automação).

À Powerpack por todo o suporte, e ao Fernando de Souza Dantas, amigo e mentor.

Ao Programa regulado de P&D Light/Aneel, pela oportunidade de participar da equipe de pesquisadores do Projeto de P&D Light/Aneel 5161-010/2016, intitulado: *“Cabeça de Série de um sistema inovador de limpeza de trocadores de calor de hidrogeradores”*, cujo desenvolvimento gerou a demanda que motivou o desenvolvimento desta pesquisa de mestrado. Em particular à Equipe de operação da usina Fontes Nova, pelo apoio e acesso aos hidrogeradores para teste.

A minha Mãe Claudia Maria, minha irmã Carolina, minha esposa Barbara Olimpieff e meu filho Gabriel Motta Nunes, por sua compreensão, amor e apoio.

## Resumo

Nunes, João Ricardo Cortes; Hall Barbosa, Carlos Roberto (Orientador); Frota, Maurício Nogueira (Co-Orientador);. **Dispositivo opto-eletrônico na faixa do infravermelho para detecção e medição de velocidade de esferas utilizadas como artefatos de limpeza de trocadores de calor.** Rio de Janeiro, 2018. 89 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação de Mestrado teve por objetivo a concepção, desenvolvimento e validação de um dispositivo opto-eletrônico, que opera na faixa do infravermelho, para detecção e medição da velocidade de esferas em meios turvos. A motivação para desenvolvimento deste tema resultou da necessidade de controlar a circulação de esferas para instrumentar um sistema alternativo de limpeza de trocadores de calor de hidrogeradores, que faz uso de artefatos abrasivos de geometria esférica. O método utilizado fundamenta-se no processamento do sinal eletrônico gerado por um circuito que produz pulsos proporcionais ao tempo de passagem da esfera no interior do contador, a cada interrupção do feixe luminoso. O tratamento do sinal, gerado por pares de sensores opto-eletrônicos perpendiculares entre si e montados transversalmente ao fluxo de água de resfriamento que transporta as esferas, é realizado por um controlador lógico programável, que atribui inteligência ao sistema. Dentre os resultados obtidos, constatou-se que o dispositivo consegue detectar esferas circulantes quando transportadas por fluxos de água com diferentes graus de turbidez (ensaios em laboratório) ou quando em operação no ambiente da usina hidrelétrica, cuja opacidade da água de resfriamento é dada pela incrustação removida durante o processo de limpeza. Como conclusão, pode-se afirmar que o dispositivo opto-eletrônico proposto atende às necessidades do projeto de construção de um sistema alternativo de limpeza por esferas abrasivas, conseguindo descartar falsos positivos na contagem das esferas, a exemplo de bolhas de ar ou partículas de incrustação cujas dimensões críticas diferem daquelas das esferas abrasivas.

## Palavras-chave

Metrologia; Sensores opto-eletrônicos; Contador; Esferas abrasivas; Trocadores de calor.

## Abstract

Nunes, João Ricardo Cortes; Hall Barbosa, Carlos Roberto(Advisor); Frota, Maurício Nogueira (Co-Advisor). **Infrared Opto-electronic device for detection and measuring velocity of balls used as cleaning artifacts of heat exchangers.** Rio de Janeiro, 2018. 89 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation aimed at the design, development and validation of an optoelectronic device, operating in the infrared range, for counting and measuring the velocity of spheres in turbid media. The motivation to develop this theme resulted from the need to control the spheres circulation to implement an alternative system for cleaning heat exchangers used to cool hydrogenerators, which make use of spherical abrasive artefacts. The methodology used is based on the processing of the electronic signal generated by a circuit that produces pulses proportional to the time of passage of the sphere inside the meter, at each interruption of the light beam. The processing of the signal, which is generated by pairs of mutually perpendicular optoelectronic sensors and mounted transversely to the flow of cooling water carrying the spheres, is performed by a programmable logic controller, which provides intelligence to the system. Among the obtained results, it was verified that the device can detect circulating spheres both when transported by water flows with different degrees of turbidity (laboratory tests) and when in operation in the environment of the hydroelectric plant, whose opacity of the cooling water is given by the fouling removed during the cleaning process. As a conclusion, it can be stated that the proposed optoelectronic device meets the needs of the construction of the alternative system of cleaning by abrasive spheres and can eliminate false positives in the counting of the spheres, such as air bubbles or incrustation particles whose critical dimensions differ from those of the abrasive spheres.

## Keywords

Metrology; Optoelectronic Sensors; Counting Device; Abrasive Beads; Heat exchangers.

## Sumário

1 Introdução	15
1.1. Definição e caracterização do problema da pesquisa	17
1.2. Objetivo Geral	18
1.3. Objetivos específicos	19
1.4. Motivação	19
2 Concepção preliminar do contador	21
2.1. Requisitos do projeto CONDE	21
2.2. Especificação dos sensores opto-eletrônicos	24
2.3. Protótipo Microcontrolado	26
2.4. Montagem	28
2.5. Ensaaios realizados	29
2.6. Ensaaios dos sensores expostos a um meio turvo	32
2.7. Características do LED e fototransistor	33
2.8. Bancada experimental de testes.	36
2.9. Novos ensaios de turbidez	37
2.10. Discussão dos resultados	40
3 Projeto e construção do contador opto-eletrônico de esferas	41
3.1. Concepção mecânica do CONDE	41
3.2. Utilização de dois feixes infravermelhos	44
3.3. Circuito eletrônico	44
3.4. Projeto da placa de circuito impresso (PCB)	46
3.5. Confeção do PCB em prototipadora	48
3.6. Montagem final do CONDE	50
4 Ensaaios e validação do CONDE	54

4.1. Ensaaios realizados em laboratório	54
4.1.1. Ensaaios do CONDE em bancada experimental	54
4.1.2. Ensaaios de contagem de esferas em aparato experimental	56
4.1.3. Ensaaios de medição de velocidade em aparato experimental	56
4.2. Ensaaios realizados em campo	58
4.2.1. Montagem do CONDE no SIREA	59
4.2.2. Ensaaios de interferência eletromagnética	60
4.2.2.1. Ensaio de interferência eletromagnética com o Inversor desligado	60
4.2.2.2. Ensaio de interferência eletromagnética (Inversor em 60 Hz)	62
4.2.3. Ensaaios de eficácia de operação do CONDE para gerar pulsos	63
4.2.3.1. Ensaio com única esfera	64
4.2.3.2. Ensaio com esferas justapostas	66
4.2.4. Conclusões dos ensaios realizados na usina Fontes Nova	68
4.2.5. Ensaaios de comparação entre o sinal gerado pelo CONDE e o CLP	68
4.2.5.1. Grupo de Experimentos #1: Vazão média (49,0 m <sup>3</sup> /h)	69
4.2.5.2. Ensaio com os quatro contadores (fluxo: 72,6 m <sup>3</sup> /h)	70
4.2.5.3. Conclusões dos ensaios com o CLP	70
4.3. Conclusão do capítulo	70
5 Conclusão e recomendações	72
5.1. Conclusões	72
5.2. Recomendações para desdobramentos futuros	73
6 Referências Bibliográficas	75
Anexo I – Artigo submetido para o IMEKO 2018	77
Anexo II – Artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Metrologia 2017	82





## Lista de figuras

Figura 1 - Versão preliminar do SIREA	22
Figura 2 - Esferas abrasivas impregnadas após passagem pelo TC	22
Figura 3 - Diagrama elétrico e foto dos sensores Honeywell HOA-6299	25
Figura 4 - Corrente de saída (4a) e tensão de alimentação (4b) do emissor	26
Figura 5 - Arduino MEGA 2560	26
Figura 6 - Shield DFbots LCD	27
Figura 7 - Montagem completa do protótipo	27
Figura 8 - Esquema de ligação do protótipo	28
Figura 9 - Bancada de testes (9a) e montagem dos sensores (9b)	29
Figura 10 - Display LCD, em destaque a contagem das esferas	30
Figura 11 - Simulação de turbidez	31
Figura 12 - Passagem da esfera com concentração de 1,22 ml/L	31
Figura 13 – LED SEP8736 e fototransistor SPD8436, da Honeywell	33
Figura 14 - Resposta relativa do receptor vs. ângulo entre emissor e receptor	34
Figura 15 - Intensidade de radiação vs Corrente direta.	34
Figura 16 - Corrente entre coletor-emissor vs distância entre elementos.	35
Figura 17 - Montagem experimental	36
Figura 18 - Desenho esquemático do circuito de teste	36
Figura 19 – Desenho esquemático da montagem	37
Figura 20 - Amostras nas seis concentrações estudadas	38
Figura 21 - Tensão vs concentração de corante	39
Figura 22 - Tensão (log) vs concentração de corante	40
Figura 23 - Bloco de acrílico do CONDE, modelado em CAD	42
Figura 24 - Tampa do CONDE em CAD	43
Figura 25 - Esquema de detecção com dois feixes infravermelhos	44
Figura 26 - Circuito eletrônico de condicionamento e leitura	45
Figura 27 - Posição inicial dos componentes	47
Figura 28 - Layout final da PCB	48
Figura 29 - Máquina LPKF S103	49
Figura 30 - Circuito impresso final	50
Figura 31 - PCB montado no bloco de acrílico	50
Figura 32 - Partes do conector Weipu	51

Figura 33 - Pinagem entre PCB e conector metálico	51
Figura 34 - Vistas superior, direita, inferior e isométrica da montagem	52
Figura 35 - CONDE duplo	52
Figura 36 - Esferas em queda livre (36a) e saídas digitais (36b) do CONDE	55
Figura 37 - Esferas justapostas em queda livre(37a) e saídas digitais (37b) do CONDE	55
Figura 38 - Posição dos quatro contadores no SIREA	59
Figura 39 - Tensão de alimentação de 24 V (inversor desligado)	60
Figura 40 - Tensões de alimentação de 5 V (inversor desligado)	61
Figura 41 - Sinal de saída do Contador #1	61
Figura 42 - Sinal de saída do Contador #2	61
Figura 43 - Fonte de 5 V, exposta à interferência do inversor	62
Figura 44 - Fonte de 24 V, exposta à interferência do inversor	62
Figura 45 - Sinal de saída do C1, exposto à interferência do inversor	63
Figura 46 - Pulso gerado por C1, pela passagem de uma única esfera	64
Figura 47 - Pulso gerado por C2 pela passagem de uma única esfera	64
Figura 48 - Pulso gerado pelo C3 pela passagem de uma única esfera	65
Figura 49 - Pulso gerado pelo C4 pela passagem de uma única esfera	66
Figura 50 - Contador exposto a duas esferas justapostas	66
Figura 51 - Pulsos gerados pelas esferas justapostas	67
Figura 52 - Pulsos gerados pelo C4 pela passagem de esferas justapostas	67
Figura 53 - Eficácia do CLP na detecção da largura de pulso pelo C1	69

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Dados técnicos do LED SEP8736-003	33
Tabela 2 - Dados técnicos do fototransistor SDP8436-003	35
Tabela 3 - Tensão de saída do fototransistor	37
Tabela 4 - Tensão de saída do fototransistor	39
Tabela 5 - Medições para diferentes frequências do inversor	57
Tabela 6 - Largura de pulso e estimativa da velocidade da esfera no C1	64
Tabela 7 - Largura de pulso e velocidade da esfera no C2	65
Tabela 8 - Largura de pulso e velocidade da esfera no C3	65
Tabela 9 - Largura de pulso e velocidade da esfera no C4	66
Tabela 10 - Largura de pulsos e velocidade pelo C2	67
Tabela 11 - Largura de pulso e estimativa da velocidade pelo Contador #4	67
Tabela 12 - Larguras de pulso dos quatro contadores (fluxo: 49 m <sup>3</sup> /h)	69
Tabela 13 - Larguras de pulso dos quatro contadores (fluxo: 72,6 m <sup>3</sup> /h)	70

## Lista de abreviações

CONDE	Contador de esferas
CLP	Controlador Lógico Programável
LPDE	Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento em Eletrônica
PósMQI	Programa de Pós-graduação em Metrologia
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
SIREA abrasivas	Sistema de injeção e recuperação de esferas abrasivas
TC	Trocador de Calor

*“Com talento ordinário e perseverança extraordinária, todas as coisas  
são possíveis”*

*(Thomas Foxwell )*

# 1

## Introdução

Trocadores de calor (TC) possuem um papel essencial na geração de energia, e sua efetividade de operação constitui fator impactante para o adequado funcionamento dos hidrogeradores. Embora conveniente por sua disponibilidade, a água captada nos canais de fuga das turbinas, e utilizada como fluido de arrefecimento dos TCs, induz a formação de incrustações (*fouling*) no interior dos tubos do TC, já que possui grande quantidade de matéria orgânica e inorgânica. Tais incrustações comprometem os mecanismos de transferência de calor do TC, por sua vez diminuindo a eficiência de geração do hidrogerador. A desobstrução dos trocadores de calor pelas técnicas convencionais requer onerosas e periódicas paradas técnicas de manutenção, que diminuem a produtividade da usina, gerando custos de manutenção e prejuízos por interrupção da geração [1,2].

No contexto do projeto de P&D Light 5161-010/2016, financiado pelo Programa Regulado de P&D Light/Aneel, foi desenvolvido um sistema automatizado de limpeza de trocadores de calor de hidrogeradores (denominado SIREA – acrônimo de Sistema de Injeção e Recuperação de Esferas Abrasivas), que propõe uma alternativa tecnológica, que faz uso de esferas abrasivas como artefatos de limpeza. Este sistema permite a limpeza dos TCs sem que seja necessária a parada dos hidrogeradores, aumentando, assim, a produtividade operacional da usina. O sistema é capaz de inserir e recuperar esferas abrasivas nos tubos de um TC ao qual é acoplado, de forma automatizada, utilizando para tal eletroválvulas comandadas por um controlador lógico programável (CLP), que integra o sistema de automação global do sistema de limpeza proposto.

Um trocador de calor típico (do tipo tubular) utilizado na usina hidrelétrica *locus* do projeto possui 75 tubos aletados (comprimento: 2000 mm; diâmetro: 22,75 mm), montados em chicanas em suas extremidades, que distribuem o fluxo em seis passos. Assim, considerando que cada esfera abrasiva deva passar pelas chicanas e percorrer os tubos do trocador seis vezes em cada ciclo de limpeza,

sempre existe a possibilidade de retenção de uma ou mais esferas durante este percurso.

Não obstante o projeto do sistema de limpeza proposto dispor de mecanismos para mitigar este problema, faz-se necessário um monitoramento contínuo do número de esferas em circulação, notadamente para acionar uma ação de recuperação de esferas sempre que o total de esferas recuperadas for inferior ao total de esferas introduzidas no sistema.

Foi exatamente para atender a esta demanda do projeto de P&D em desenvolvimento pelo Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio que esta pesquisa de mestrado foi motivada. Assim, o objetivo deste trabalho relaciona-se ao desenvolvimento, construção e validação de um sistema opto-eletrônico capaz de monitorar a quantidade de esferas em circulação nos tramos de entrada e de saída do fluido de trabalho (água) do trocador de calor ao qual o SIREA é acoplado durante um processo de limpeza. Além disso, entendendo que a eficácia do processo de limpeza depende da velocidade das esferas no interior dos tubos incrustados (condição considerada eficaz para esferas se movendo com velocidades em torno de 2,0 m/s [3]), o dispositivo foi concebido não apenas para contar as esferas, sempre que estas interrompem o feixe opto-eletrônico durante sua circulação, mas, também, para medir a sua velocidade linear de movimento.

Tendo em vista que cada segmento do SIREA está exposto a uma vazão de água diferente, optou-se por construir quatro unidades independentes do CONDE, para instrumentar os distintos circuitos hidráulicos de operação (circuito de injeção de esferas; circuito de recuperação de esferas e circuito de transposição, sendo que duas unidades instaladas em série foram montadas no circuito de recuperação, assim introduzindo redundância ao sistema e, também, permitindo uma alternativa de medição da velocidade de cada esfera circulante (a velocidade que pode ser medida pela largura de pulso de cada contador, pode, assim, também ser medida com base na distância percorrida pela esfera ao percorrer ambos os contadores).

Ainda, considerando que a eficiência de sistemas de limpeza desta natureza requer automação, que no SIREA é controlada pelo CLP do sistema de automação instalado, as quatro unidades idênticas do sistema opto-eletrônico aqui descrito geram sinais de entrada para este CLP, que assim complementa o sistema de



medição, efetivamente contando as esferas que cruzam cada contador e medindo a sua velocidade linear.

Ou seja, os sinais gerados pelos contadores de esferas geram informações que podem ser utilizadas como fundamento da inteligência do sistema, assim permitindo ao CLP gerar comandos automatizados de abertura e fechamento de eletroválvulas sempre que um determinado fluxo (de acionamento ou de recuperação de esferas abrasivas) seja acionado. Este sistema multifunção, inovador, foi batizado de CONDE (contador de esferas). Cada um dos quatro CONDEs utilizados na versão atual do SIREA é composto por um módulo sensor (circuito opto-eletrônico acondicionado em uma estrutura de acrílico), pelo *hardware* de entrada do CLP e pelo *software*, que interpreta os sinais recebidos.

O projeto CONDE desenvolveu-se segundo quatro etapas complementares, a saber: (i) desenvolvimento e fabricação de um compartimento estanque (bloco de acrílico usinado) para alojar o circuito eletrônico e permitir alinhamento dos sensores e acoplamento do bloco na tubulação do SIREA; (ii) projeto e desenvolvimento do circuito eletrônico e suas conexões elétricas, para conexão ao CLP; (iii) testes e validação do *hardware* do CONDE no ambiente laboratorial e na usina e (iv) desenvolvimento do software e interface de controle com o CLP.

O sistema de automação necessário ao funcionamento do CONDE foi desenvolvido pela empresa subcontratada pelo projeto de P&D (CETEM Automação Industrial Ltda.).

No curso de seu desenvolvimento, esta pesquisa de mestrado já produziu dois artigos científicos [4, 5], incluídos como Anexos I e II desta dissertação.

### 1.1.

#### **Definição e caracterização do problema da pesquisa**

Tendo em vista que a medição da velocidade e contagem das esferas circulantes em um sistema automatizado de limpeza de trocadores de calor é essencial ao seu funcionamento, questiona-se sobre a possibilidade de desenvolver um dispositivo opto-eletrônico que seja capaz de mensurar, com confiabilidade,

tais parâmetros em meios turvos, já que esta é a condição normal do fluido de trabalho de um trocador de calor.

Para responder a tal pergunta, as seguintes questões específicas foram formuladas:

- É possível detectar a passagem das esferas em meios turvos, utilizando elementos opto-eletrônicos na faixa do infravermelho, cujo comprimento de onda em teoria permite a penetração do feixe em meios turvos?
- É possível medir a velocidade das esferas na condição de vazão plena do sistema?
- Qual é a velocidade máxima que o sistema pode medir para a configuração proposta? As velocidades que asseguram eficácia do processo de limpeza incluem-se na faixa de medição de velocidade do CONDE?
- Considerando que esferas tendem a se acumular na vizinhança de constrições do escoamento, é possível distinguir a passagem de duas esferas, muito próximas entre si, quando estas cruzam o feixe óptico?
- Que estratégias devem ser utilizadas para evitar falsos positivos, a exemplo de pacotes de bolhas e pedaços de incrustações que se desprendem das passagens internas do trocador e, também, podem gerar pulsos que não deveriam ser contabilizados como esferas circulantes?

## **1.2. Objetivo Geral**

Esta dissertação de mestrado tem, como objetivo geral, projetar e desenvolver um sistema opto-eletrônico, que opera na faixa do infravermelho e em meios turvos, e que seja capaz de (i) identificar cada esfera que cruza o feixe óptico e (ii) medir a sua velocidade de circulação. Em outras palavras, desenvolver e testar um sistema opto-eletrônico que atenda por completo à demanda e aos desafios tecnológicos impostos pelo projeto de P&D Light/Aneel 5161-010/2016, em desenvolvimento pelo PósMQI/PUC-Rio.

### **1.3. Objetivos específicos**

Dentre os objetivos específicos desta pesquisa de mestrado, destacam-se:

- Conceber, projetar e construir o compartimento estanque de acrílico para alojar o circuito eletrônico e permitir o acoplamento na tubulação do SIREA;
- Projetar, simular e implementar o circuito eletrônico do contador de esferas, tendo como produto final um protótipo que possa ser testado em campo, nas condições reais de operação de uma usina hidrelétrica;
- Realizar ensaios de tolerância à turbidez, com o propósito de avaliar o limiar mínimo de detecção dos sensores opto-eletrônicos sempre que uma esfera interrompa o feixe óptico;
- Validar nos ambientes do laboratório (teste em bancada) e da usina hidrelétrica a contagem de esferas e a medição de sua velocidade, para meios com diferentes graus de turbidez;
- Avaliar a velocidade das esferas, a partir da largura de cada pulso, diferenciando sinais validados de falsos positivos (e.g.: pacotes de bolhas, detritos); e
- Definir estratégias inteligentes capazes de evitar falsos positivos durante um processo de contagem e monitoramento da circulação de esferas.

### **1.4. Motivação**

A motivação para desenvolvimento deste trabalho resultou do desafio técnico-científico imposto por um projeto de P&D em desenvolvimento pelo Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio (projeto de P&D Light-Aneel 5161-0010/2016). Mais especificamente, desenvolver um sistema opto-eletrônico inovador de medição, que opere na faixa do infravermelho, e que seja capaz de (i) detectar, com exatidão, cada esfera (imersa num escoamento de um determinado fluido de trabalho) que atravessa o feixe infravermelho e medir a sua velocidade, ainda que o meio seja turvo; (ii) medir a velocidade linear de tais esferas; e (iii) incorporar mecanismos de redução de falsos positivos.

### **1.5. Justificativa**

O trabalho se justifica pela lógica econômica, que preconiza a absoluta necessidade de racionalização e redução do desperdício dos processos de manutenção e operação dos sistemas de geração, dentre os quais se incluem os sistemas de arrefecimento dos hidrogeradores. A justificativa para o desenvolvimento deste trabalho resulta da materialização dessa percepção. O dispositivo opto-eletrônico proposto não só aumenta a confiabilidade de operação da alternativa tecnológica de limpeza de trocadores de calor proposta pelo Projeto de P&D em desenvolvimento, como permite imprimir escoamentos mais precisos com velocidade controlada das esferas circulantes, assim assegurando maior eficácia do processo de limpeza. E mais, ao identificar esferas abrasivas ainda que em meios turvos, tais quais os comumente encontrados em escoamentos de trocadores de calor de hidrogeradores, aumenta-se o espectro de aplicação e a eficácia do processo de limpeza. Nesse contexto, o projeto do dispositivo opto-eletrônico proposto reduz o tempo de paradas de manutenção corretiva, o que por sua vez aumenta a disponibilidade do hidrogerador e reduz drasticamente os custos de manutenção.

## 2

### Concepção preliminar do contador

Este trabalho teve como ponto de partida a necessidade de construir um dispositivo auxiliar ao sistema alternativo de limpeza de trocadores de calor denominado SIREA (Sistema de Injeção e Recuperação de Esferas Abrasivas). Uma vez definidos os requisitos de sistema, houve sucessivas iterações de desenvolvimento até que se convergisse para uma versão final. A escolha do sensor opto-eletrônico pode ser considerada a etapa mais crítica do projeto, uma vez que todos os componentes do sistema são dimensionados a partir deste elemento. Este capítulo apresenta desenvolvimentos e ensaios preliminares que possibilitaram a construção de um sistema completo e adequado às necessidades do projeto.

#### 2.1.

##### Requisitos do projeto CONDE

Em sua primeira versão concebida, o SIREA (Figura 1) — descrito na dissertação de mestrado [6] que antecedeu este trabalho—, foi idealizado para operação manual, sendo necessária intervenção humana para o acionamento das válvulas. Em ensaios realizados na usina hidrelétrica de propriedade da Light Energia S.A. (usina Fontes Nova) [6], o sistema de injeção de esferas que integra o SIREA mostrou-se eficaz na limpeza de trocadores de calor (remoção do *fouling*), confirmando as vantagens da técnica de limpeza por esferas abrasivas (Figura 1) em relação ao método tradicional (varetagem mecânica e manual e aplicação de jatos de água). As imagens da Figura 2 ilustram a eficácia desta tecnologia alternativa de limpeza.



Figura 1 - Versão preliminar do SIREA



Figura 2 - Esferas abrasivas impregnadas após passagem pelo TC

Em um teste com alto grau de dificuldade, esta técnica alternativa de limpeza (aplicável primariamente a trocadores cuja incrustação ainda se encontra em fase incipiente de formação) foi testado após um longo período de uso (12 meses). Surpreendentemente, mesmo ciente de que grande parte do *fouling* já havia se cristalizado no interior das passagens internas do trocador, o teste foi realizado com razoável sucesso. Durante esses testes realizados, do total de 66 esferas injetadas, 15 não foram recuperadas pelo SIREA, ficando retidas no interior do TC e obstruindo alguns de seus tubos. Nesse caso particular em que o processo de limpeza ocorreu após um longo período decorrido ao processo de “incubação do fouling” [6], fez-se necessária a execução da varetagem manual do TC a fim de remover as esferas que ficaram presas no interior dos tubos. Este foi

o principal motivador para a construção de um dispositivo capaz de monitorar a quantidade de esferas circulantes no sistema, garantindo-se que, ao fim de um ciclo de limpeza, o operador pudesse saber de imediato se o total de esferas injetadas foram de fato recuperadas, podendo assim tomar a decisão sobre o próximo procedimento a ser seguido (e.g.: realizar inversão de fluxo; abrir o trocador para uma operação manual de limpeza ou proceder com outros ciclos de limpeza, na expectativa de que as esferas pudessem retornar).

Em sua segunda versão, o SIREA foi remodelado e sua operação automatizada. A opção de se introduzir um dispositivo CONDE no SIREA surgiu em conjunto com as novas especificações do SIREA, permitindo que o sistema pudesse operar de forma autônoma e inteligente. Foram definidos assim os seguintes requisitos construtivos para cada unidade CONDE:

- Ser autocontida. Ou seja, todo o circuito, conectores e sensores devem ser instalados em uma estrutura solidária à tubulação do SIREA. Tal estrutura deve ser estanque para os componentes eletrônicos e deverá permitir a circulação das esferas no seu interior.
- Permitir a medição da velocidade das esferas que passam pelo contador, já que esta constitui-se em parâmetro crítico para assegurar a eficácia do processo de limpeza de trocadores de calor. Conforme documentado na literatura especializada [7,8], velocidades de circulação das esferas entre 1,5 m/s e 2,5 m/s facilitam o processo de remoção do *fouling*, assim criando oportunidade para que o CONDE possa operar conjuntamente com o CLP para controlar a Bomba hidráulica do SIREA.
- Ser capaz de detectar a passagem das esferas em meios turvos. A água que circula pelo TC pode apresentar certo grau de turbidez dependendo da estação do ano, época de chuvas e outros fenômenos naturais. Portanto é natural conjecturar que o contador deverá ser capaz de detectar as esferas dentro de uma faixa de turbidez do meio que as transportam.
- Ser capaz de distinguir as esferas de bolhas de ar ou de pedaços de incrustação que eventualmente se descolem das paredes internas dos tubos do trocador submetido ao processo de limpeza. Em outras palavras, o CONDE deverá ser imune a falsos positivos, evitando contagens indesejadas de objetos que não sejam as esferas abrasivas.

- Utilizar um CLP como interface de aquisição e processamento de sinal, já que o novo projeto do SIREA possui um CLP que é responsável por executar a automação do sistema. A fim de evitar novas interfaces digitais, o CONDE deverá integrar em seu projeto o mesmo CLP utilizado pelo SIREA.

## 2.2. Especificação dos sensores opto-eletrônicos

A partir dos requisitos de projeto, foram elencados alguns elementos sensores do tipo sem contato, adequados à aplicação: sensores de efeito Hall, sensores ópticos do tipo CCD (*charge-coupled device*, com processamento por visão computacional) e, por fim, sensores do tipo LED/foto-transistores, que operam na faixa do infravermelho.

Os sensores de efeito Hall são capazes de detectar campos magnéticos, e seriam adequados à aplicação se houvesse uma forma de magnetizar as esferas abrasivas. Infelizmente, entretanto, tais esferas, produzidas por poucos fabricantes ao redor do mundo, devem possuir densidade próxima do fluido que as transportam, o que praticamente impede a inclusão de um núcleo metálico em seu interior. Pesquisa de mercado realizada mostrou que esferas com essas características (núcleo ou revestimento magnético) não se encontram disponíveis para compra o que, por sua vez, descartou a possibilidade de utilização do sensor de efeito Hall.

Os sensores do tipo CCD possuem grande versatilidade quando combinados com o processamento digital de imagens, no entanto o custo de um sistema de visão computacional é extremamente elevado, principalmente levando-se em consideração a necessidade da construção de quatro unidades autônomas do mesmo dispositivo de contagem.

Assim, a escolha natural recaiu sobre os sensores do tipo LED/foto-transistor, por possuírem grande variedade de modelos no mercado, baixo custo e ampla faixa de espectros luminosos.

Dado que o sensor deveria ser capaz de detectar esferas sólidas em meios turvos buscou-se no mercado um sensor comercial na faixa do infravermelho com



dimensões, potência e ângulo de abertura compatíveis com as dimensões da esfera.

Os primeiros sensores escolhidos para testes foram os modelos Honeywell da família HOA 6299. São constituídos de um par de elementos LED/foto-transistor, encapsulados em um invólucro plástico, prontos para montagem em suportes. O Modelo HOA-6299-002 é um LED montado em série com uma resistência de 68 ohms, e o Modelo HOA-6299-003 é um foto-transistor associado a uma resistência de 2,4 kilohms entre a saída e VCC e um comparador de tensão, conforme ilustrado na Figura 3. A alimentação do emissor pode variar entre 5 e 7 volts, e a tensão do receptor pode variar entre 5 e 12 volts. A saída do emissor é do tipo TTL 5 V. As características elétricas adicionais podem ser vistas em [9].



Figura 3 - Diagrama elétrico e foto dos sensores Honeywell HOA-6299

O fabricante apresenta os gráficos mostrados na figura 4: corrente de consumo para cada tensão de alimentação (a) e separação entre emissor e receptor para cada tensão alimentação do emissor (b). Nota-se pelo gráfico da figura (b) que idealmente, para cada distância entre os elementos existe uma tensão ótima, no entanto essas medições são feitas sem qualquer barreira ótica entre emissor e receptor. Tendo em vista que o diâmetro do tubo de acrílico possui cerca de duas polegadas e que a parede do tubo funciona como uma lente, foi escolhida uma tensão de alimentação de 5 V, superior à tensão recomendada pela folha de características, afim de compensar as perdas geradas pelo tubo e pela possível turbidez da água. A fonte de alimentação utilizada garantiu os 50 mA necessários ao funcionamento do emissor de acordo com a Figura 4a.

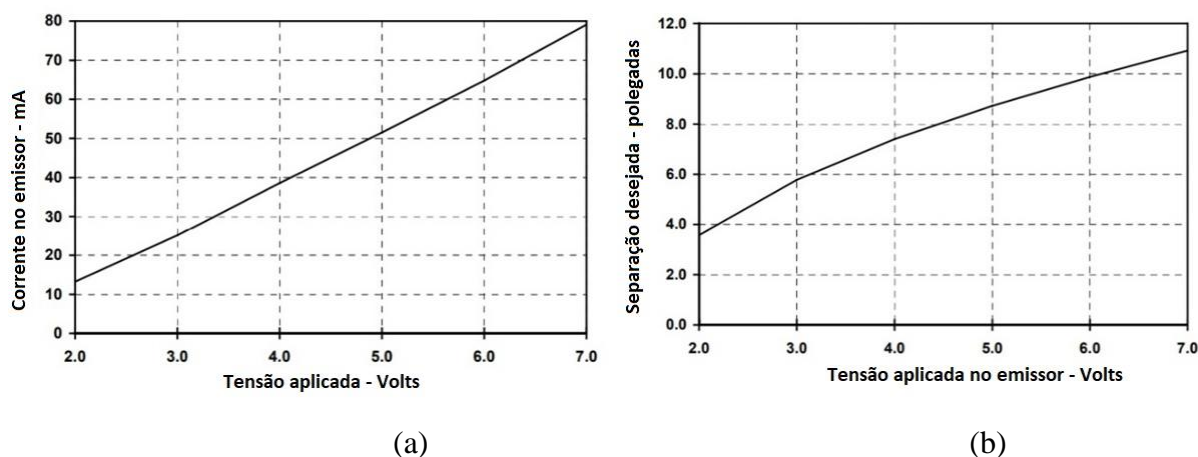


Figura 4 - Corrente de saída (4a) e tensão de alimentação (4b) do emissor

### 2.3. Protótipo Microcontrolado

Com o propósito de testar de forma sistemática o conjunto de sensores, foi construído um protótipo composto por um par de emissor e receptor Honeywell HOA-6299-002 e HOA6299-003, um microcontrolador da família Arduino modelo MEGA 2560 (Figura 5), um *shield* DFbots LCD (Figura 6) e uma caixa plástica à prova d'água.

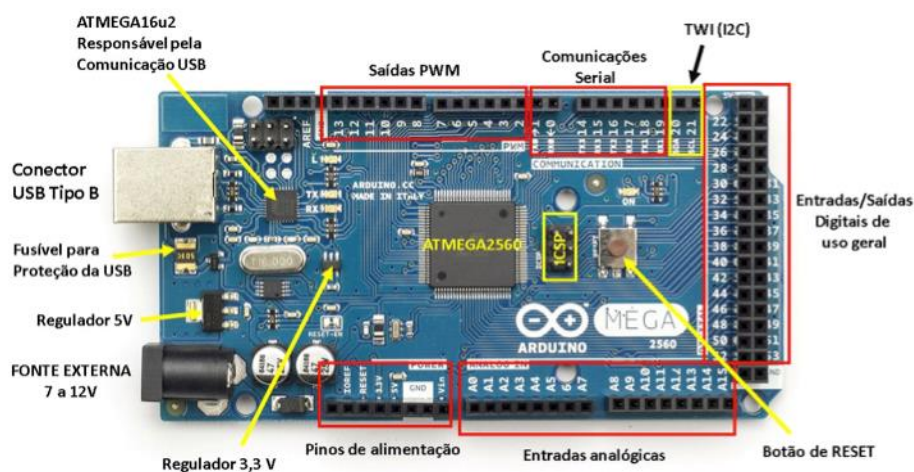


Figura 5 - Arduino MEGA 2560



Figura 6 - Shield DFbots LCD

A Figura 7 mostra o resultado final da montagem física do protótipo.



Figura 7 - Montagem completa do protótipo

O microcontrolador Arduino possui grande versatilidade para prototipagem rápida. Com poucas linhas de código é possível construir uma aplicação funcional. O conjunto foi montado de acordo com o esquemático da Figura 8, valendo-se das portas digitais disponíveis que não são utilizadas pelo módulo de LCD. O emissor e o receptor foram alimentados com 5 volts disponíveis nas portas do Arduino, mas energizados por uma fonte externa. O pino de saída de sinal do receptor foi conectado a uma porta digital do Arduino, configurado como uma entrada.

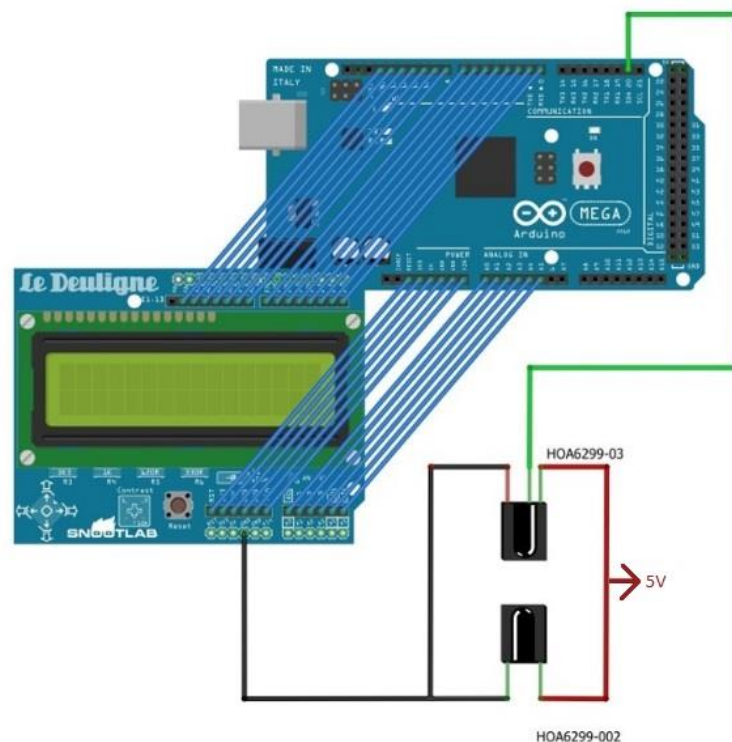


Figura 8 - Esquema de ligação do protótipo

A estratégia utilizada durante a elaboração do código fonte foi o uso de portas com interrupção programável. A utilização de interrupções permite que o código principal possa ser executado sem que haja a necessidade de monitorar as portas de interesse a cada instante (*pooling*). A tarefa de monitoração das portas fica a cargo da rotina interna de interrupções do microcontrolador, chamando partes do código sempre que uma transição de tensão é percebida na porta programada.

Foram implementadas as seguintes funcionalidades no protótipo:

1. Contagem das esferas a cada passagem destas pelo feixe infravermelho; e
2. Estimativa da velocidade das esferas, considerando o diâmetro aproximado das esferas e a largura do pulso entre a ativação e desativação do sensor.

## 2.4. Montagem

O protótipo foi montado e validado em um Projeto Final em Engenharia Mecânica, na PUC-Rio [10]. Fazendo uso de uma bancada de testes (versão

simplificada do SIREA), foi possível, por meio de uma bomba hidráulica (Figura 9a), circular esferas pelo protótipo montado do contador. O par de emissor e detector foi montado na seção de um tubo transparente com abraçadeiras plásticas, conforme ilustrado pelas imagens da Figura 9b.

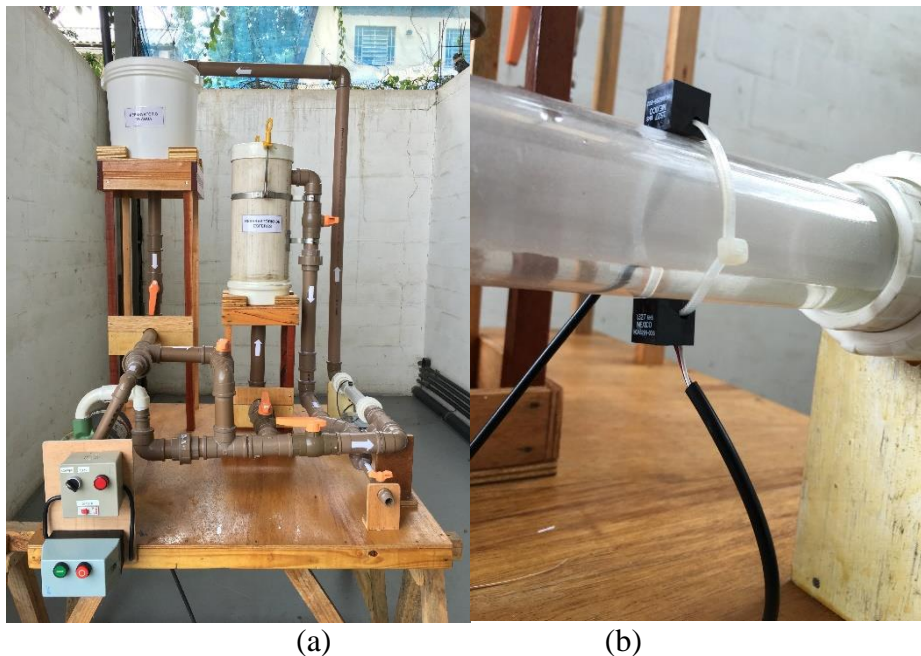


Figura 9 - Bancada de testes (9a) e montagem dos sensores (9b)

## 2.5. Ensaios realizados

Fazendo uso do aparato experimental construído, foram realizados três ensaios:

### a) Validação da contagem das esferas

Com o sistema ativo, foram inseridas 40 esferas abrasivas e deu-se início a um ciclo de operação do aparato montado. Conforme apresentado na Figura 10, o contador foi capaz de contabilizar a passagem de todas as 40 esferas.





Figura 10 - Display LCD, em destaque a contagem das esferas

#### **b) Medição da velocidade das esferas**

Variou-se a vazão da bomba para se simular uma operação compatível com a condição desejável de operação; ou seja, esferas circulando com velocidade entre 1,5 m/s e 2,5 m/s. Este teste foi suficiente apenas para mostrar que o protótipo foi capaz de medir velocidades, mas infelizmente nenhuma calibração foi feita de forma a estimar a incerteza de medição destas velocidades.

#### **c) Testes com meio turvo**

Com o propósito de compreender o comportamento dos sensores quando submetidos a meios turvos, três amostras de água tingida com corante marrom solúvel foram utilizadas, em diferentes concentrações do corante: 0,41 ml/L, 0,82 ml/L e 1,22 ml/L. A Figura 11 ilustra amostras de cada uma dessas concentrações.



Figura 11 - Simulação de turbidez

Para cada concentração, 10 testes foram realizados. Observou-se que o contador foi capaz de medir com 100% de exatidão nas condições de turbidez representadas pelas concentrações de 0,41 ml/L e 0,82 ml/L. Quando utilizada a concentração de 1,22 ml/L o contador perdeu sua capacidade de distinguir entre a passagem das esferas e a passagem da água turva, ou seja, não houve variação de tensão com a passagem das esferas. A Figura 12 apresenta a passagem da esfera pelo contador quando a concentração era de 1,22 ml/L.



Figura 12 - Passagem da esfera com concentração de 1,22 ml/L

### Conclusão sobre os ensaios:

Os ensaios foram realizados com sucesso, permitindo simular de maneira simplificada a operação do modelo substitutivo do SIREA. Alguns dos problemas identificados foram:

- O escoamento em determinados instantes se tornava turbulento, criando bolhas de ar na tubulação. A passagem de bolhas pelo contador era suficiente para ser contabilizada como se fosse a passagem de uma esfera;
- Durante os ensaios de turbidez, o sensor não foi capaz de detectar as esferas na concentração de 1,22 ml /L.

Estes resultados foram suficientes para que se concluísse que seria necessário adotar um sensor capaz de medir não apenas dois estados discretos (TTL), mas sim um sensor com saída analógica proporcional à excitação luminosa, permitindo, assim, ajustes do limiar de detecção. Além da questão da turbidez, notou-se que seria necessária uma estratégia para eliminar os falsos positivos gerados pela passagem de bolhas. As estratégias implementadas serão discutidas no Capítulo 4.

## **2.6.**

### **Ensaio dos sensores expostos a um meio turvo**

No curso da pesquisa dos sensores mais adequados ao projeto do CONDE, foi selecionado um par de LED e foto-transistor dos modelos SEP8736-003 e SDP8436-003, respectivamente, mostrados na Figura 13. Estes elementos são os mesmos utilizados pelo conjunto Honeywell HOA-6299-002 e HOA-6299-003, no entanto estes elementos não são integrados a um circuito adicional e encapsulamento plástico, permitindo utilizá-los em uma montagem personalizada com saída proporcional à intensidade luminosa detectada. Uma vez selecionados os elementos sensores, montou-se em bancada um circuito de excitação e leitura dos elementos, permitindo expor os sensores a meios fluidos com diferentes graus de turbidez.



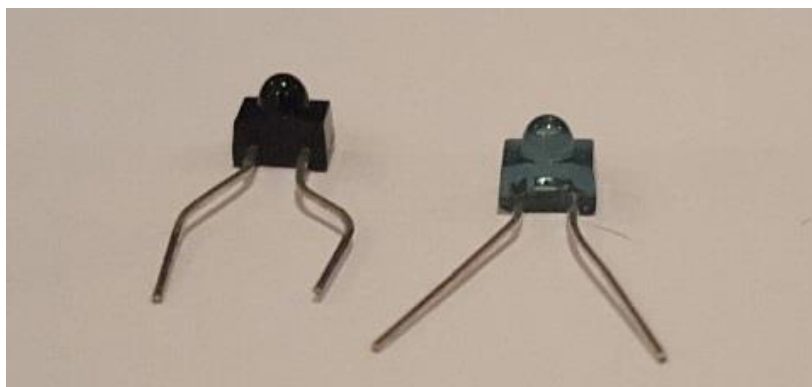


Figura 13 – LED SEP8736 e fototransistor SPD8436, da Honeywell

## 2.7. Características do LED e fototransistor

Este par de sensores (LED SEP9736-003 e fototransistor SDP8436-003) opera na faixa do infravermelho com comprimento de onda de 880 nm. As características elétricas do emissor podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados técnicos do LED SEP8736-003

Parametros	Símbolo	Min	Tipo	Max	Unidade	Cond. de teste
Irradiação	H				mW/cm <sup>2</sup>	If=20 mA
SEP-8736-001		0,5				
SEP-8736-002		1,2		3,0		
SEP-8736-003		1,7				
Tensão direta	Vf			1,7	V	If=20 mA
Tensão de ruptura inversa	Vbr	3			V	Ir=10 µA
Comprimento de onda de pico	λp		880		nm	
largura de banda espectral	Δp		80		nm	
Variação espectral em função da temperatura	Δλp/Δt		0,2		nm/°C	
Ângulo de feixe	Ø		10		graus	If=Constante
Tempo de subida e descida da radiação	tr,tf		0,7		µs	

O LED SEP8736-003 permite uma corrente direta máxima de até 50 mA e dissipação de potência máxima de até 100 mW. O ângulo nominal do feixe luminoso é de 10°. Pode-se retirar da folha de características do emissor duas informações de extrema relevância para o projeto. Na Figura 14, tem-se a variação da radiação luminosa em função do ângulo entre o emissor e o receptor, e na Figura 15 tem-se a variação da radiação luminosa em função da corrente. Conclui-se pelos gráficos que o alinhamento entre os sensores determinará a tensão de

saída do receptor e que, quanto maior a corrente no LED, maior será a intensidade de radiação luminosa, respeitando-se o limite de 50 mA.

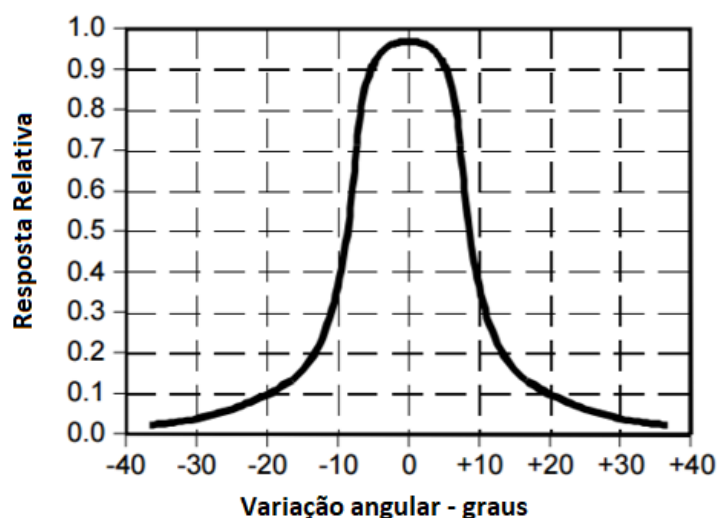


Figura 14 - Resposta relativa do receptor vs. ângulo entre emissor e receptor

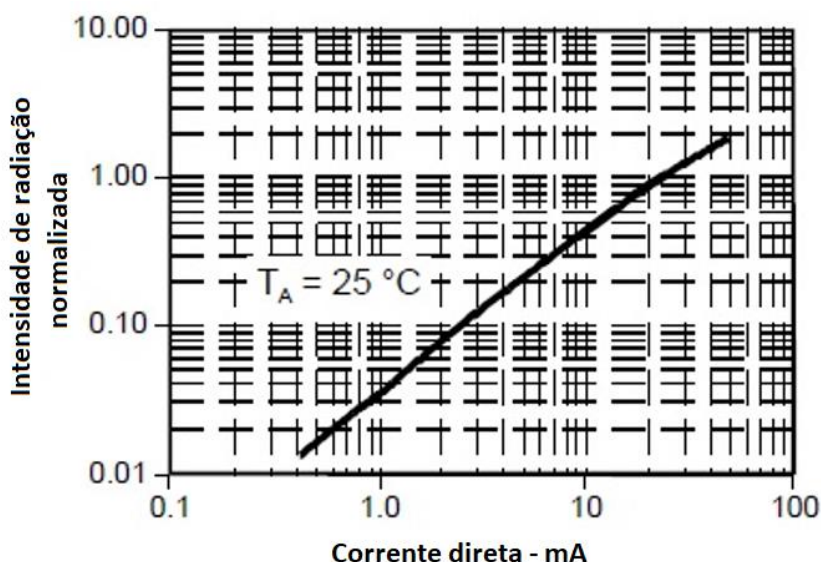


Figura 15 - Intensidade de radiação vs Corrente direta.

O receptor SDP8436-003 é um fototransistor do tipo NPN encapsulado em plástico. Possui tensões máximas entre coletor-emissor de 30 volts e 5 volts para o emissor-coletor. Sua potência de dissipação máxima é de 100 mW e o ângulo nominal de recepção é de  $18^\circ$ . Suas características elétricas podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados técnicos do fototransistor SDP8436-003

Parametros	Símbolo	Min	Tipo	Max	Unidade	Cond. de teste
Corrente de luz	$I_l$				mA	$V_{ce}=5V$
SDP-8436-001		0,50				$H=1 \text{ mW/cm}^2$
SDP-8436-002		4,00		10,0		
SDP-8436-003		7,00		17,5		
SDP-8436-004		12,50				$I_f=20 \text{ mA}$
Corrente escura de coletor	$I_{ceo}$			100	nA	$V_{ce}=15V, H=0$
Tensão de ruptura coletor-emissor	$V(BR)_{ceo}$	30,0			V	$I_c=100\mu A$
Tensão de ruptura emissor-coletor	$V(BR)_{eco}$	5,0			V	$I_e=100\mu A$
Tensão de saturação coletor-emissor	$V_{ce(sat)}$		0,2	0,4	V	$I_c=0,1 \text{ mA}$
Resposta angular	$\phi$		18		graus	$I_f=\text{Constante}$
Tempo de subida e descida	$t_r, t_f$		15		$\mu s$	$V_{cc}=5V, I_l=1 \text{ mA}, R_L=1000$

A Figura 16 apresenta a variação da corrente (normalizada) em função da separação entre as lentes dos elementos SEP8736 e SDP8436. Observando-se o gráfico, fica evidente que existe uma relação exponencial entre a corrente e a distância entre os elementos.

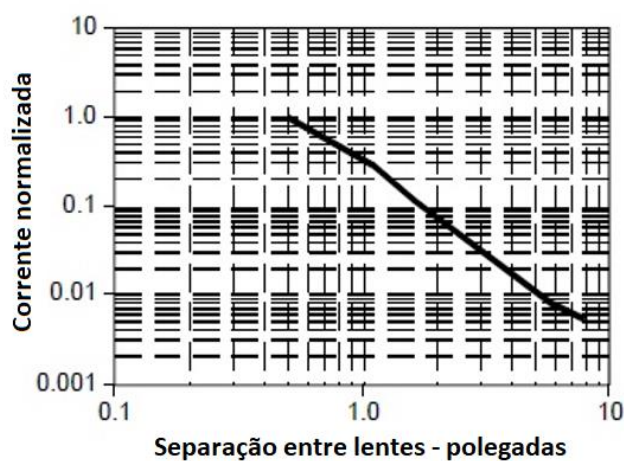


Figura 16 - Corrente entre coletor-emissor vs distância entre elementos.

## 2.8. Bancada experimental de testes.

A Figura 17 ilustra a bancada experimental de testes. O circuito foi montado em *protoboard*, alimentado por uma fonte ICEL PS-4000. O instrumento de medição utilizado foi um multímetro Minipa modelo ET-2042C.

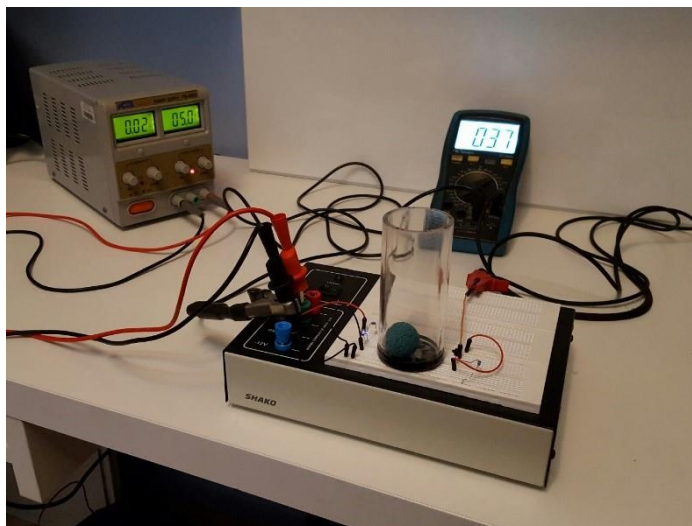


Figura 17 - Montagem experimental

O circuito da montagem pode ser visto na Figura 18, constituído por resistores e o par LED/foto-transistor. O valor do resistor R1 foi calculado de forma a garantir uma corrente em torno de 40 mA no LED. Embora 40 mA seja inferior aos 50 mA (corrente máxima permitida), durante os ensaios notou-se um aumento considerável da temperatura no LED quando a corrente se aproximava da corrente máxima.

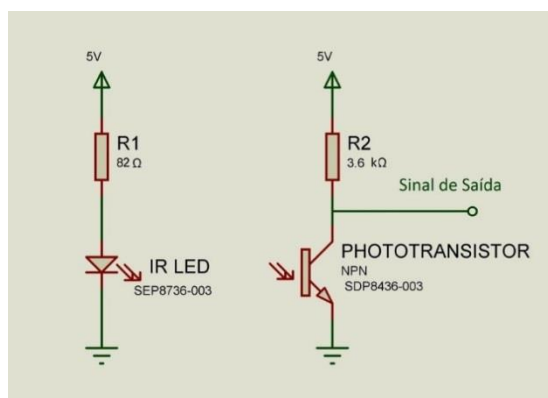


Figura 18 - Desenho esquemático do circuito de teste

## 2.9. Novos ensaios de turbidez

Com o propósito de avaliar a resposta dos sensores quando da passagem de esferas em meios turvos, foram realizados novos ensaios com o sistema operando em meios com diferentes graus de turbidez, experimentos esses realizados como tema de outro Projeto Final de Engenharia Mecânica [11], que se desenvolveu em articulação com esta pesquisa de mestrado. Diferentemente do ensaio anterior, em que a resposta do sensor apresentava apenas saídas de tensão discretas, neste novo ensaio foi possível mensurar a variação de tensão da saída do foto-transistor, em resposta a cada amostra. As medições foram realizadas com o auxílio de um tubo de acrílico de diâmetro interno de 38,4 mm, vedado na sua face inferior. Na face externa deste tubo foram montados o LED e o foto-transistor, diametralmente posicionados (Figura 19).

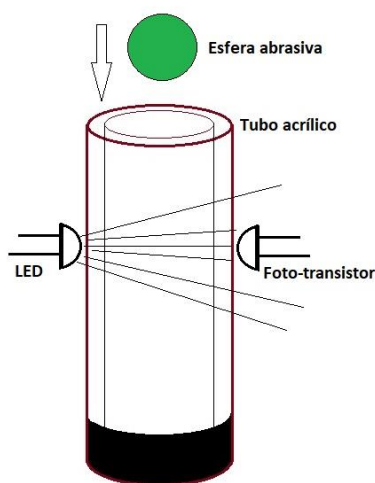


Figura 19 – Desenho esquemático da montagem

Inicialmente mediu-se a tensão de saída do fototransistor com o recipiente preenchido com água límpida, cujos resultados são reportados na Tabela

Tabela 3 - Tensão de saída do fototransistor

Com Água límpida	
4,700 V	4,690 V
4,700 V	4,720 V
4,700 V	4,710 V
4,730 V	4,690 V
Média: 4,705 V	

Esses experimentos serviram de base de comparação para os novos testes de simulação realizados em águas turvas. Para tal, foram utilizadas 16 amostras de água artificialmente contaminadas com corante na cor marrom, nas seguintes concentrações: 0,25 mL/L, 0,50 mL/L, 0,75 mL/L, 1,00 mL/L, 1,25 mL/L, 1,50 mL/L, 1,75 mL/L, 2,00 mL/L, 2,25 mL/L, 2,50 mL/L, 2,75 mL/L, 3,00 mL/L, 3,50 mL/L, 4,00 mL/L, 5,00 e 6,00 mL/L. A título de ilustração, a Figura 21 ilustra seis das 16 amostras testadas.

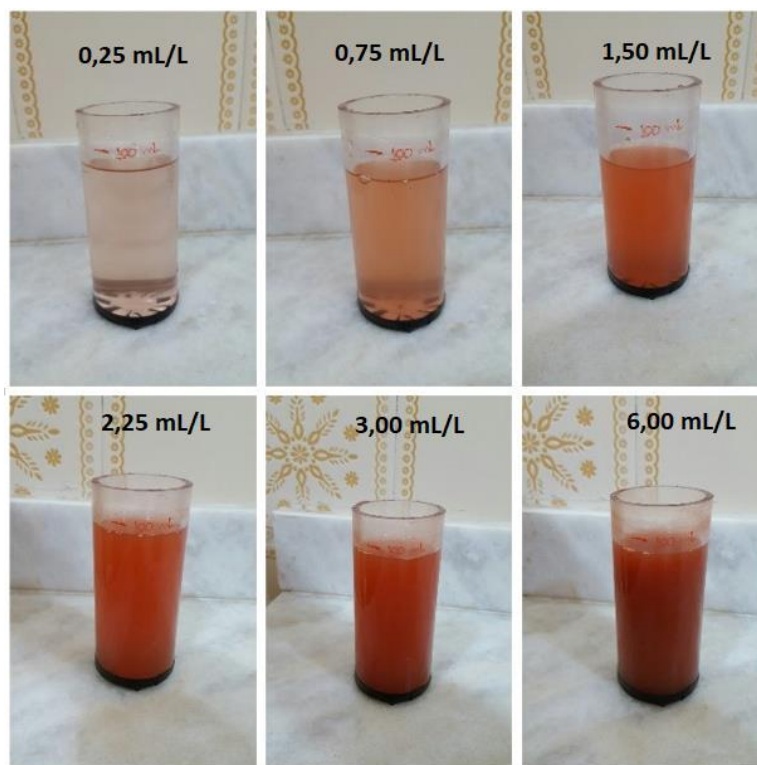


Figura 20 - Amostras nas seis concentrações estudadas

Foram realizadas oito réplicas do mesmo experimento para cada concentração de corante, assim permitindo caracterizar a resposta do fototransistor, simulando a operação em meios turvos. A Tabela 4 apresenta os dados das medições, com suas respectivas médias, e a Figura 21 um gráfico relacionando a tensão de saída com a concentração de corante. Com o intuito de estabelecer uma base de comparação com o *datasheet* do foto-transistor, um gráfico em escala semi logarítmica dos mesmos dados da Tabela 4 é mostrado na Figura 22.

Tabela 4 -Tensão de saída do fototransistor

TENSÕES MEDIDAS (V)									
CONCENTRAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	Média [V]
[ml/l]									
0	4,7	4,69	4,7	4,72	4,7	4,71	4,73	4,69	4,71
0,25	3,69	3,92	3,97	3,16	3,75	3,08	3,11	3,69	3,55
0,50	2,27	2,12	2,09	2,4	2,34	2,39	2,21	2,34	2,27
0,75	1,45	1,49	1,44	1,34	1,38	1,46	1,39	1,26	1,40
1,00	0,72	0,78	0,74	0,74	0,73	0,71	0,64	0,67	0,72
1,25	0,42	0,44	0,42	0,41	0,42	0,43	0,4	0,42	0,42
1,50	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,22	0,23	0,22
1,75	0,14	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13	0,14	0,15	0,14
2,00	0,085	0,089	0,091	0,083	0,088	0,089	0,09	0,085	0,088
2,25	0,058	0,062	0,059	0,057	0,06	0,061	0,058	0,056	0,059
2,50	0,046	0,048	0,047	0,046	0,047	0,047	0,046	0,046	0,047
2,75	0,034	0,036	0,038	0,036	0,037	0,038	0,037	0,037	0,037
3,00	0,026	0,027	0,026	0,025	0,025	0,026	0,025	0,025	0,026
3,50	0,018	0,019	0,019	0,019	0,018	0,018	0,018	0,017	0,018
4,00	0,012	0,012	0,013	0,013	0,012	0,013	0,013	0,012	0,013
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

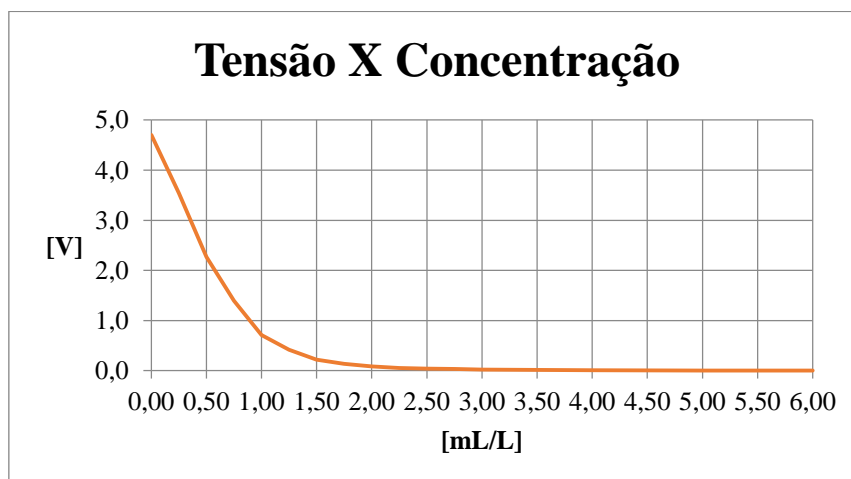


Figura 21 - Tensão vs concentração de corante

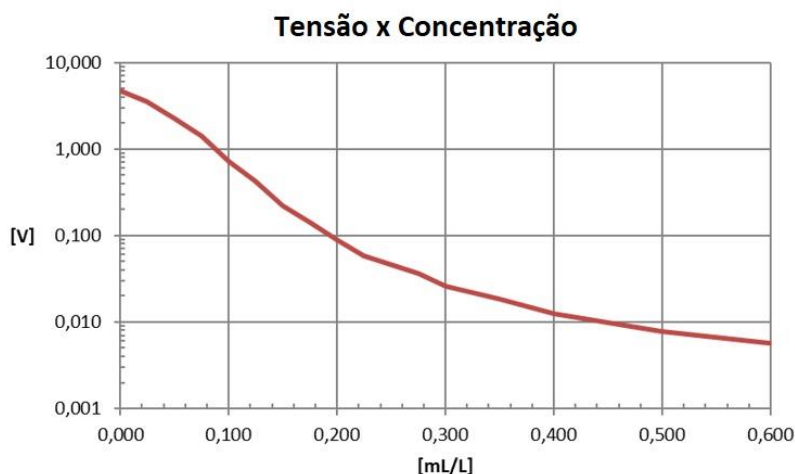


Figura 22 - Tensão (log) vs concentração de corante

## 2.10. Discussão dos resultados

O experimento foi realizado com sucesso, podendo-se notar como a variação da concentração de corante afetou o sinal de saída do foto-transistor. É interessante observar que o efeito do aumento da concentração de corante é semelhante ao efeito do afastamento entre os elementos LED/foto-transistor. Este efeito fica evidente ao se comparar os gráficos das Figuras 16 e 22, ambos mantendo uma relação exponencial entre concentração de corante/afastamento e redução na tensão de saída. Com relação ao limiar de detecção do foto-transistor, notou-se que a partir 1,25 ml/L o decaimento da tensão é acentuado, corroborando a conclusão do primeiro experimento de turbidez, onde o limiar de detecção ficou em torno de 1,22 ml/L.

A construção de protótipos a fim de avaliar e caracterizar os elementos sensores foi de grande valia. Os ensaios serviram para nortear a escolha adequada dos elementos opto-eletrônicos e compreender os limites de operação do CONDE em águas turvas. Os resultados destes ensaios serviram de base para a construção do primeiro protótipo funcional do CONDE, que será apresentado no Capítulo 3 desta dissertação.



### 3

## Projeto e construção do contador opto-eletrônico de esferas

A partir dos requisitos de projeto e dos ensaios preliminares realizados (apresentados no Capítulo 2), chegou-se a uma primeira versão do contador de esferas. A principal modificação introduzida foi a duplicação do par de sensores (emissor/receptor) instalados ortogonalmente entre si, assim criando um mecanismo para descartar eventuais “falsos positivos” de detecção, factíveis de ocorrer quando pacotes de bolhas de ar ou fragmentos de incrustação (*fouling*) de dimensões próximas à da esfera circulante desprendem-se dos tubos do trocador de calor e cruzam o feixe infravermelho. Com esta modificação, o novo circuito eletrônico consegue fazer a distinção entre uma esfera, que deve ser contada, e um corpo estranho, que deve ser descartado no processo de contagem. A estrutura mecânica do CONDE (bloco acrílico) foi desenvolvida previamente ao circuito eletrônico. A placa de circuito impresso (confeccionada no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento em Eletrônica da PUC-Rio) passou por diversas iterações até que se chegasse a uma versão final. Por fim, foi montado todo o cabeamento necessário para interligar a placa de circuito impresso embarcada no bloco de acrílico do CONDE ao controlador lógico programável (CLP) do sistema de automação. Concluída a fase de desenvolvimento no ambiente laboratorial (descrito no Capítulo 4), o CONDE foi embarcado no SIREA para testes em campo, no ambiente da usina hidrelétrica, *locus* de desenvolvimento do projeto de P&D.

### 3.1.

#### Concepção mecânica do CONDE

Esta seção descreve a concepção mecânica do CONDE, que opera integrado a um dispositivo CLP (Controlador Lógico Programável). Foi projetada uma estrutura mecânica de forma a permitir a passagem do fluxo de água em seu interior e ao mesmo tempo abrigar o circuito eletrônico. A Figura 23 ilustra o

corpo do CONDE, construído em resina acrílica (polimetilmetacrilato, PMMA), material escolhido em função das seguintes características: (a) limite de escoamento (25 MPa) e (b) transparência, pré-requisito para propagação do feixe de luz na faixa do infravermelho, o que permite a visualização das esferas circulantes. Assim, após a avaliação da resistência mecânica para suportar as pressões impostas pelo escoamento da água de resfriamento do trocador de calor, a qual é o fluido transportador das esferas abrasivas, este material (conveniente pelas suas propriedades mecânicas e transparência), foi selecionado como material para usinagem do corpo do CONDE.

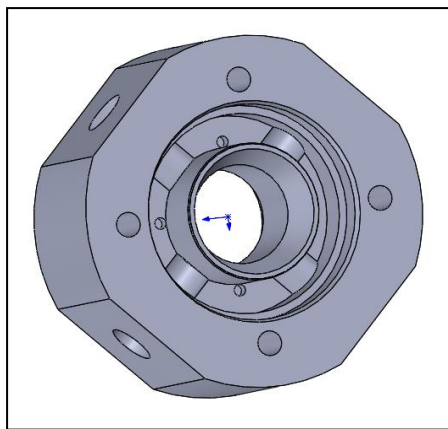


Figura 23 - Bloco de acrílico do CONDE, modelado em CAD

Conforme ilustrado na Figura 23, o corpo do CONDE possui a seguinte furação: (i) quatro furos ( $\phi$  5/8") na face, que permitem a instalação do bloco na tubulação, por meio de dois flanges; (ii) rasgo, para instalação da placa do circuito opto-eletrônico; (iii) 4 furos na borda externa, para passagem dos cabos que interligam os sensores/receptores ao Controlador Lógico Programável; e (iv) 4 furos, não passantes,  $\phi$  6,5 mm, 5 mm de profundidade, para encaixe e fixação dos elementos LED-fototransistor (emissor e receptor).

Dois aspectos críticos surgiram quando da usinagem deste bloco de acrílico (corpo do CONDE), que possui algumas dimensões que requerem exatidão. O primeiro relaciona-se ao dimensionamento da espessura mínima da parede de acrílico que se interpõe entre a face do elemento sensor e a parede interna do espaço tubular, por onde circula a água de resfriamento do trocador de calor que transporta as esferas abrasivas. Se, por um lado, essa espessura de material deve

ser robusta o suficiente para resistir à pressão do escoamento que transporta as esferas abrasivas, por outro, deve ser a menor possível, para evitar a atenuação do feixe luminoso que precisa atravessar o material acrílico e vencer a turbidez da água (usualmente turva pela contaminação do *fouling*) que transporta as esferas. O segundo aspecto crítico resultou da dificuldade de polir as paredes laterais dos 4 furos para encaixe e fixação dos elementos LED-fototransistor (emissor e receptor) na sua posição correta.

Após criteriosa análise das tensões admissíveis,[12] a espessura mínima admissível de parede foi calculada utilizando o critério de vasos de pressão de paredes finas que é expressa por (1)

$$P \left( \frac{D_e}{2t} + 1 \right) = Se/FS, \quad (1)$$

onde  $P$  é a pressão de trabalho (6 bar = 0,5 MPa);  $D_e$  é o diâmetro externo (41 mm);  $t$  é a espessura da parede;  $Se$  é o limite de escoamento (25 MPa) e  $FS$ , o fator de segurança adotado. Considerando a hipótese  $FS = 1$ , consegue-se determinar  $t = 0,51$  mm (espessura mínima de parede). Com larga margem de segurança, a usinagem foi feita mantendo-se um valor de  $t = 3$  mm (o que resulta em  $FS = 5,3$ ), já que 3 mm não causa atenuação significativa para a propagação do feixe óptico.

A Figura 24 mostra a tampa da cavidade onde a eletrônica do contador encontra-se embarcada, tampa essa dotada de anéis de borracha do tipo “O”, para proteger o circuito eletrônico de possível contaminação por água e outros agentes externos.

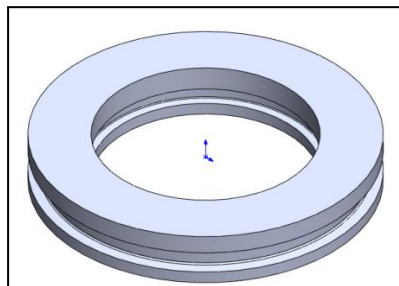


Figura 24 - Tampa do CONDE em CAD

Os desenhos construtivos que orientaram a fabricação mecânica do corpo do CONDE encontram-se no Anexo III. Construídos com a ferramenta computacional *SolidWorks*, que também permite a visualização 3-D da peça

projetada, todos esses desenhos estão em conformidade às normas técnicas aplicáveis.

### 3.2.

#### Utilização de dois feixes infravermelhos

A utilização de dois feixes infravermelhos, defasados de  $90^\circ$  entre si, conforme esquemático mostrado na Figura 25, reduz substancialmente a ocorrência de falsos positivos. O dispositivo considera que a passagem de um objeto ocorre somente se ambos os feixes forem simultaneamente interrompidos, o que implica que um fragmento de pequenas dimensões teria que passar na região central da seção reta do tubo para que pudesse ser contado.

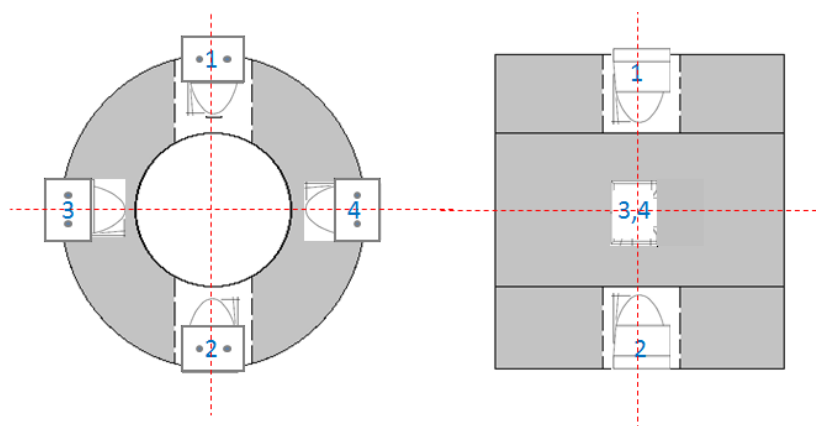


Figura 25 - Esquema de detecção com dois feixes infravermelhos

### 3.3.

#### Circuito eletrônico

A Figura 26 apresenta o circuito eletrônico de excitação e leitura dos dois pares de componentes opto-eletrônicos, que operam na faixa do infravermelho.

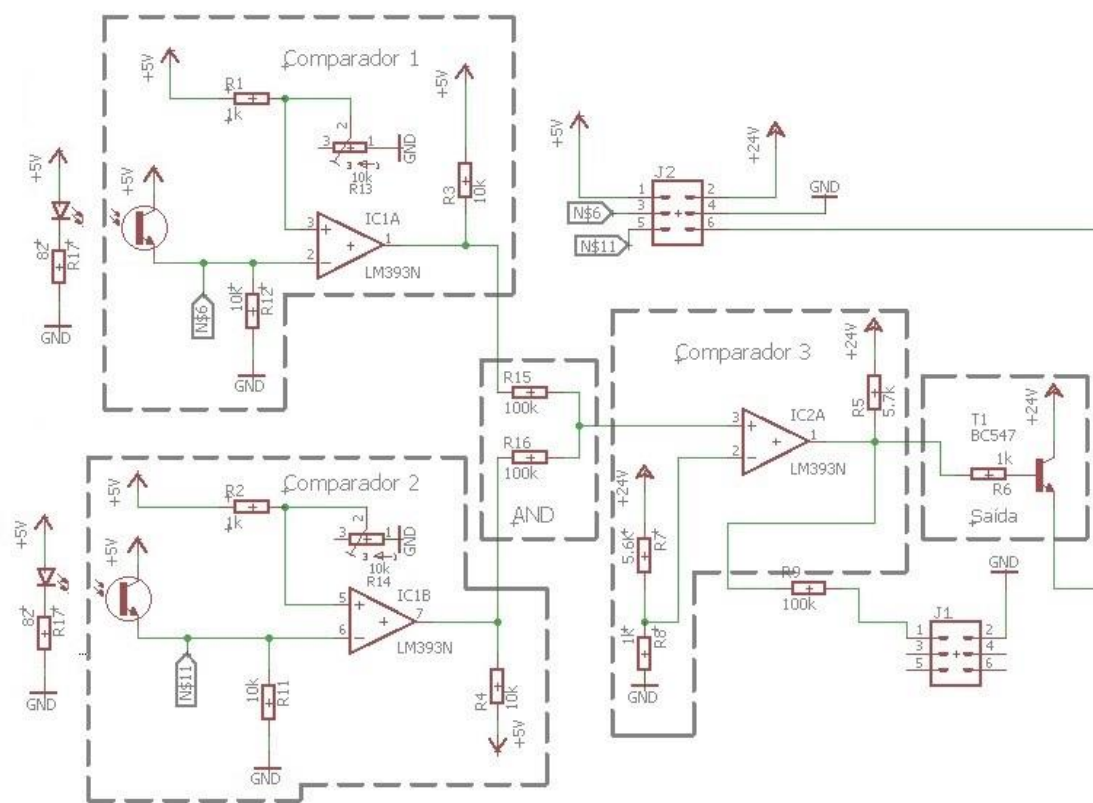


Figura 26 - Circuito eletrônico de condicionamento e leitura

Na parte esquerda da Figura 26, são mostrados os pares LED-foto-transistor, que permitem medir a tensão de emissor de cada LED. Estas tensões são então fornecidas a 2 comparadores diferenciais LM393N, que verificam se as mesmas são maiores ou menores que tensões de limiar, as quais podem ser ajustadas por meio dos potenciômetros R13 e R14. As saídas destes comparadores são ligadas a dois resistores (R15 e R16), formando uma porta do tipo AND. A função deste bloco é garantir que o comparador 3 seja ativado apenas quando ambas as saídas dos comparadores 1 e 2 estiverem ativas. Por fim, o comparador 3 é responsável por chavear o transistor T1, que funciona como uma saída do tipo “*open collector*”, gerando os pulsos de 24 volts necessários ao chaveamento da entrada digital do CLP. Devido à queda de tensão de 0,7 volts entre a base e o emissor do transistor T1, a tensão final de saída do circuito é de 23,3 volts. De acordo com o manual do fabricante, esta tensão é suficiente para acionar a porta digital, que pode ser modelada por um resistor de 4,3 kilohms. Embora o comparador LM393N tenha saída do tipo “*open collector*”, optou-se por utilizar um estágio de saída adicional, a fim de evitar o divisor de tensão entre a saída do comparador e a carga de 4,3 kilohms. Assim, este circuito implementa uma lógica binária,

permitindo o ajuste de sensibilidade a fim de compensar a possível variação de turbidez.

### 3.4.

#### Projeto da placa de circuito impresso (PCB)

O circuito eletrônico em PCB (*printed circuit board* – placa de circuito impresso) foi concebido de tal forma que, ao ser encaixado no rasgo existente no corpo do CONDE, automaticamente aloja nos 4 furos não passantes de  $\phi$  6,5 mm, na posição correta, os quatro elementos sensores (2 LEDs e 2 foto-transistores), estes soldados na PCB. Ou seja, a instalação da PCB força o alinhamento adequado dos elementos sensores, cada conjunto ortogonalmente posicionado no corpo do CONDE.

O projeto do PCB foi concebido no programa Eagle, e pode ser dividido em duas etapas principais: o desenho do esquemático eletrônico e o layout do PCB. O principal desafio vivenciado durante o projeto da placa de circuito impresso foi conseguir alocar os componentes e elementos do circuito (trilhas, vias e *pads*) em uma área de apenas 22 cm<sup>2</sup>. No intuito de maximizar a área total disponível, foi utilizada uma placa cobreada dupla face. O esquemático produzido encontra-se discutido na seção 3.3. Foram escolhidos componentes do tipo “*through hole*” em função da facilidade em soldá-los manualmente. Esta escolha, entretanto, limita o uso de *layout* de placas dupla face já que:

- Não é possível soldar certos componentes na camada superior, pois a área desses componentes (e.g.: LEDs, *chips*, capacitores eletrolíticos) pode ser maior que a área do *pad*, o que impede conexões entre estes componentes na face superior do circuito.
- Componentes do tipo “*through hole*” possuem dimensões maiores do que seus equivalentes SMD (*Surface-mounted device*). No intuito de minimizar a área ocupada pelos resistores, o PCB foi projetado de forma que os resistores fossem montados verticalmente.

Após o desenho do esquemático, foram definidos os conectores e encapsulamento dos componentes para então se definir o posicionamento de cada componente na placa, conforme mostrado na Figura 27.

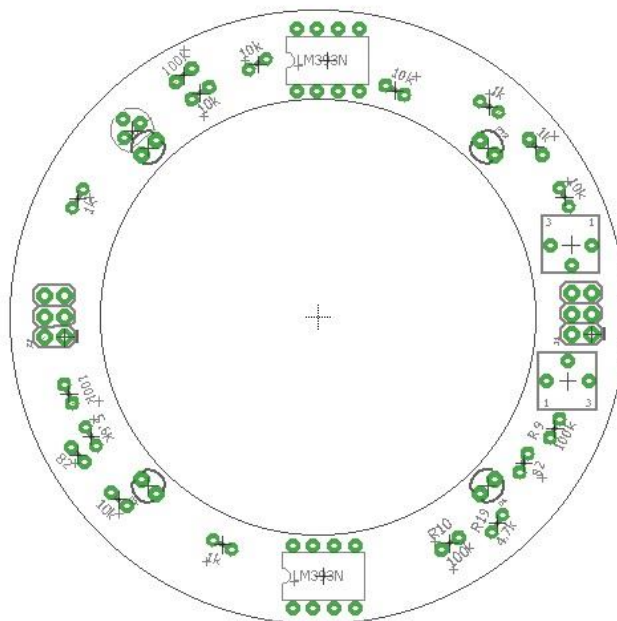


Figura 27 - Posição inicial dos componentes

Enquanto certos componentes possuem uma posição fixa relativa à furação do bloco de acrílico, outros são posicionados de forma a minimizar a distância entre as trilhas.

A próxima etapa foi o roteamento das trilhas (conexões entre os componentes) e a criação das vias (conexão entre a camada superior e inferior). O software Autodesk Eagle 8.11, no modo de utilização gratuito, possui a funcionalidade de roteamento automático. Esta ferramenta permite ao projetista definir os parâmetros e restrições referentes aos tamanhos de trilha, vias, espaçamento mínimo, áreas restritas, entre outros. O software busca então a melhor solução de roteamento com base nas regras definidas pelo projetista e, ao fim do processo, apresenta as soluções encontradas. A Figura 28 mostra o resultado do roteamento da camada superior em vermelho e inferior em azul. As vias são apresentadas em roxo e os *pads* em verde.

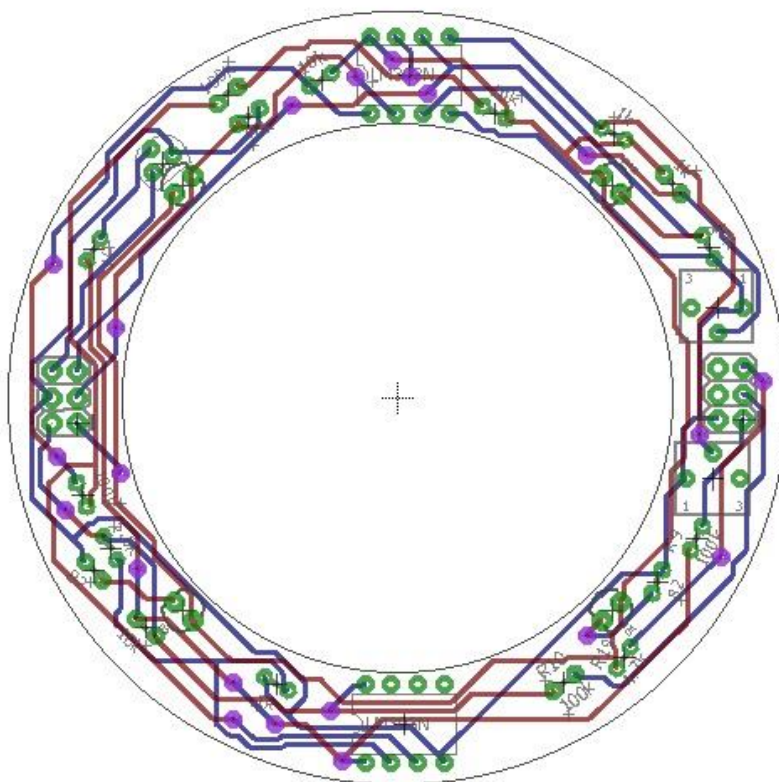


Figura 28 - Layout final da PCB

Após a finalização do layout, foram exportados os arquivos no formato GERBER 247, referentes a cada camada do circuito eletrônico, mais especificamente: camada superior, camada inferior, borda da placa e furação.

### 3.5. Confecção do PCB em prototipadora

Uma vez definido o layout do PCB, procedeu-se à fabricação do primeiro protótipo. Foi utilizada uma máquina CNC modelo S103 do fabricante LPKF, em operação no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento em Eletrônica (LPDE) da PUC-Rio e mostrada na Figura 29.



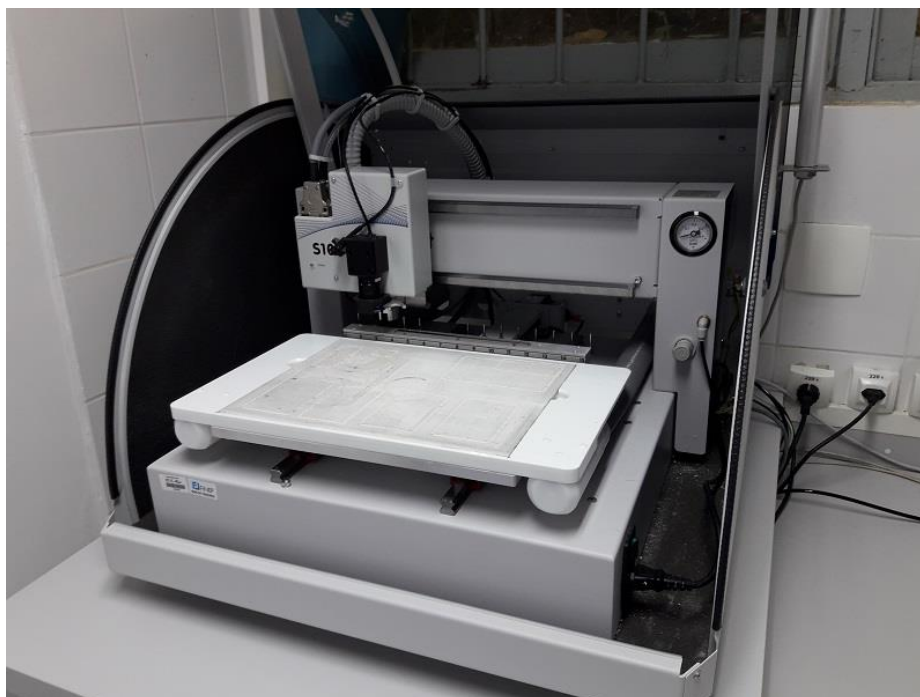


Figura 29 - Máquina LPKF S103

Esta máquina é capaz de furar e fresar a placa de circuito a partir de arquivos GERBER. A primeira etapa para a fabricação é a importação dos arquivos GERBER, previamente exportados pelo programa Eagle, para o programa Circuit Maker. Durante a etapa de importação, devem-se relacionar as camadas importadas com as camadas pré-definidas no programa.

Após a importação são definidos os substratos a serem utilizados. Para este projeto foi utilizada uma placa FR4 dupla face (Placa laminada de fibra de vidro e resina *epoxy*, revestida de uma fina camada de cobre em ambos os lados). A seguir, são criados furos de referência no desenho (*fiducials*), usados como referência para o sistema de visão computacional da máquina após mudança de lado do PCB. Por fim, é definido o quanto de cobre será removido e como será o recorte da borda da placa. Neste projeto foi utilizada a remoção total do cobre e corte completo das bordas. O circuito completo com a montagem dos componentes pode ser visto na Figura 30.

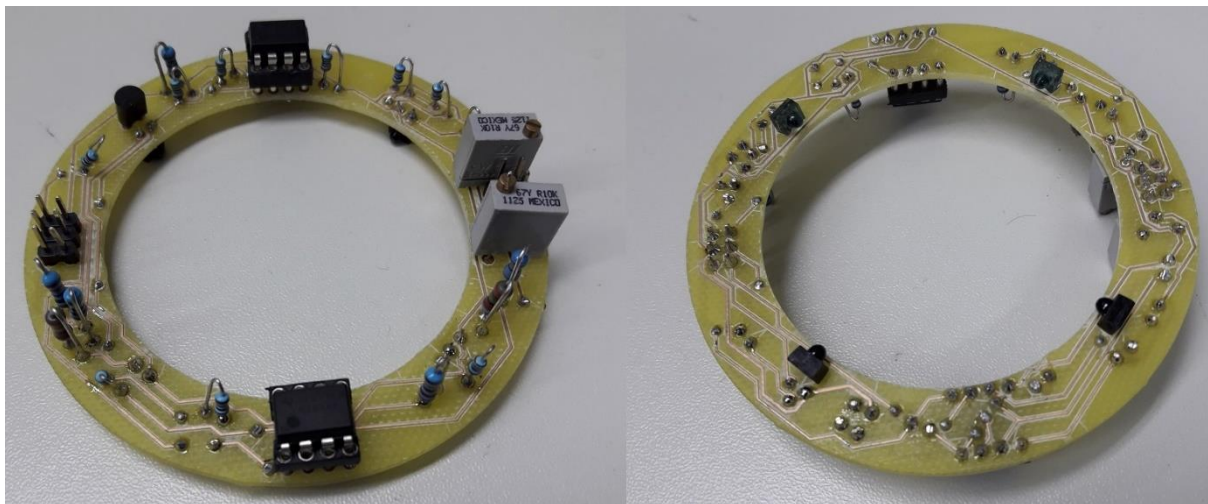


Figura 30 - Circuito impresso final

A Figura 31 apresenta o PCB montado no bloco de acrílico nas vistas superior e inferior. Nota-se que os únicos componentes montados na face inferior são os foto-transistores e os LEDs. Estes ficam inseridos no bloco abaixo da linha do PCB, com o intuito de garantir o auto-alinhamento dos feixes infravermelhos. As vias foram conectadas manualmente utilizando-se a soldagem de fios entre as camadas.

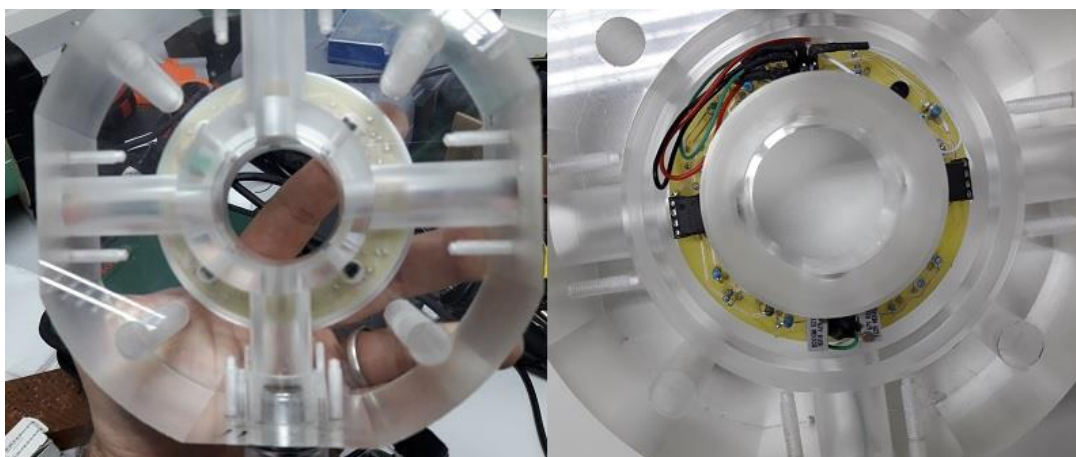


Figura 31 - PCB montado no bloco de acrílico

### 3.6. Montagem final do CONDE

Para se assegurar uma conectorização robusta, foram escolhidos conectores metálicos da marca Weipu, modelos MT20-F7-PRC-S-S e MT20-M7-RQP-S-S. Tais receptáculos e conectores possuem *o-rings* de vedação, são próprios para utilização em ambiente industrial e possuem classificação IP 65. A Figura 32 apresenta as partes necessárias ao funcionamento do conector.



Figura 32 - Partes do conector Weipu

A Figura 33 ilustra a pinagem utilizada entre os conectores metálicos e o PCB, enquanto a Figura 34 mostra a montagem final do PCB, bloco e conectores.



Figura 33 - Pinagem entre PCB e conector metálico

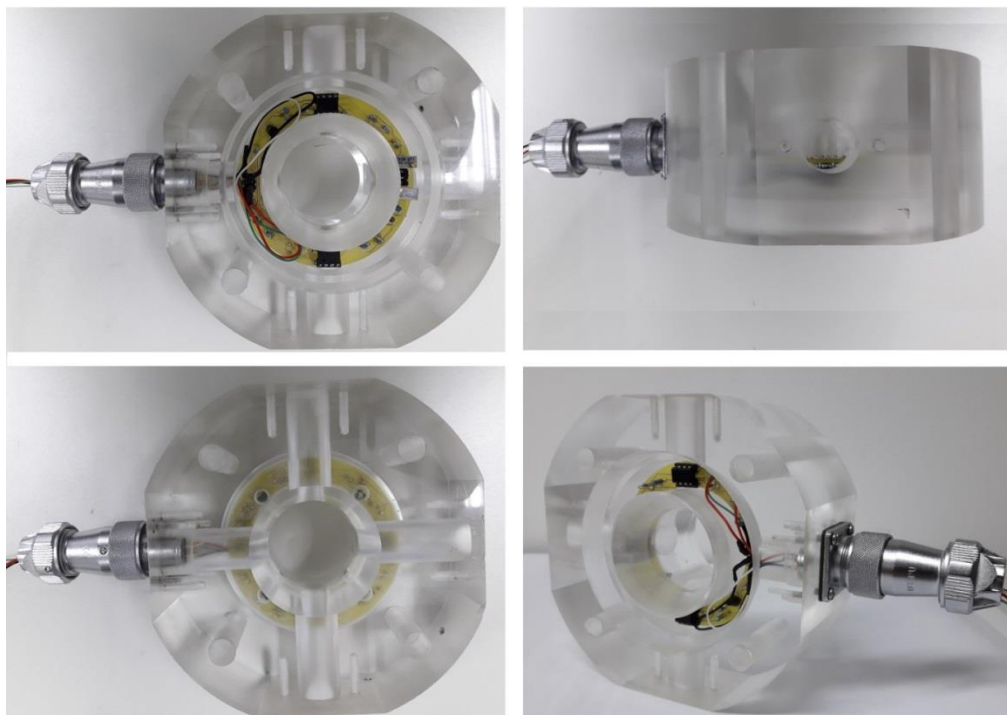


Figura 34 - Vistas superior, direita, inferior e isométrica da montagem

No contexto de desenvolvimento do projeto do CONDE, duas versões foram produzidas: (i) CONDE SIMPLES, com um único circuito eletrônico, que integra dois pares de sensores (emissor/receptor) opto-eletrônicos (4 unidades construídas) e (ii) CONDE DUPLO, que possui duas placas similares de circuitos eletrônicos embarcados (um único protótipo produzido), mostrado na Figura 35.



Figura 35 - CONDE duplo

Ambas as versões foram validadas para desempenhar suas duas funções (contar esferas e determinar a sua velocidade). Enquanto a versão CONDE SIMPLES mede a velocidade pela largura do pulso gerado pelo circuito quando da passagem da esfera, a versão CONDE DUPLO mede a velocidade com maior exatidão, já que utiliza ambos os circuitos para medir o tempo que decorre entre a

passagem da esfera pela distância (espaçamento) entre ambos os planos de medição definidos por ambos os pares de sensores opto-eletrônicos. A partir das informações dos ensaios de turbidez, optou-se por regular os potenciômetros de ajuste de sensibilidade com a tensão de 2 V, a fim de possibilitar uma boa relação tolerância à turbidez/detecção da passagem das esferas.

## **4**

### **Ensaaios e validação do CONDE**

Após a construção do CONDE, cujo projeto construtivo encontra-se descrito no Capítulo 3, foram realizados ensaios em laboratório e em campo. A análise dos dados obtidos permitiu expandir o conhecimento a respeito do sensor, que então pôde ser validado como um instrumento capaz de contar esferas e medir sua velocidade.

#### **4.1.**

##### **Ensaaios realizados em laboratório**

Foram realizados dois grupos de ensaios em laboratório, com o propósito de verificar a funcionalidade do CONDE em bancada, antes de sua exposição às condições de operação no campo. Adicionalmente aos testes elétricos nos circuitos eletrônicos do dispositivo, foram realizados dois ensaios: capacidade de contar esferas e de medir sua velocidade.

##### **4.1.1.**

###### **Ensaaios do CONDE em bancada experimental**

Inicialmente foram realizados testes de continuidade dos contatos com o auxílio de um multímetro digital e, em seguida, as 4 unidades do CONDE SIMPLES e o CONDE DUPLO foram conectadas (uma por vez) a duas fontes de tensão, de +24 V e de +5 V, assim simulando a alimentação a ser implementada pelo CLP quando de seu acoplamento ao SIREA. A Figura 36a ilustra o aparato de testes utilizado para o lançamento das esferas, incluindo um osciloscópio Lecroy, configurado para uma frequência de aquisição de 200 kHz.

O gráfico apresentado na Figura 36b é resultado do processamento dos dados gerados pelo osciloscópio, quando acionado pela saída digital dos circuitos eletrônico do CONDE DUPLO, em resposta à passagem de uma esfera em queda livre. Sabendo-se que a distância entre os contadores é de 50,32 mm e o tempo



decorrido entre o início do primeiro pulso e o segundo pulso é de 27,1 ms, calcula-se uma velocidade média de 1,857 m/s (50,32 mm/27,1 ms, onde a incerteza expandida pode ser estimada por  $\pm 0,12 \text{ mm}/27,1 \text{ ms} = 0,00443 \text{ m/s}$ ; i.e.: 0,24%)

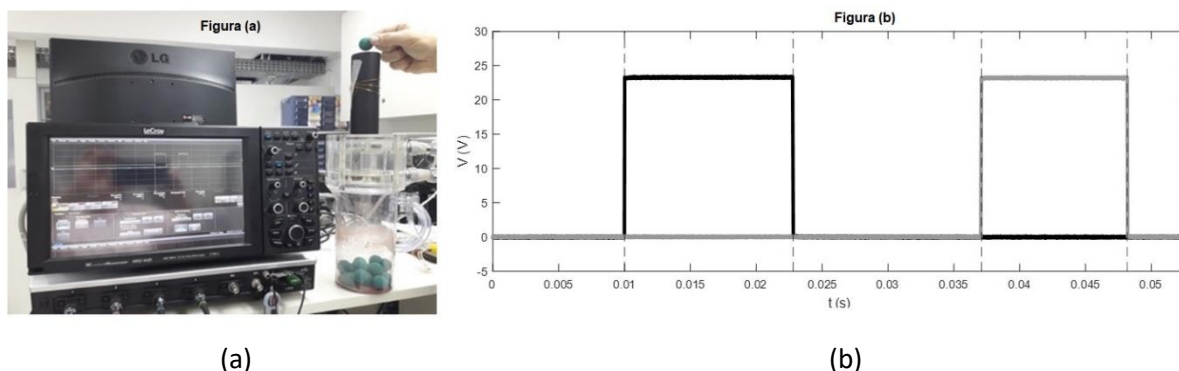


Figura 36 - Esferas em queda livre (36a) e saídas digitais (36b) do CONDE

Similarmente ao experimento inicial, a Figura 37 apresenta o lançamento em queda livre de duas esferas justapostas. Uma vez que o tempo decorrido entre o início do primeiro pulso duplo e o segundo pulso é de 27,5 ms, calcula-se uma velocidade média de 1,830 m/s (50,32 mm/27,1 ms, onde a incerteza expandida pode ser estimada por  $\pm 0,12 \text{ mm}/27,5 \text{ ms} = 0,00436 \text{ m/s}$ ; i.e.: 0,24%)

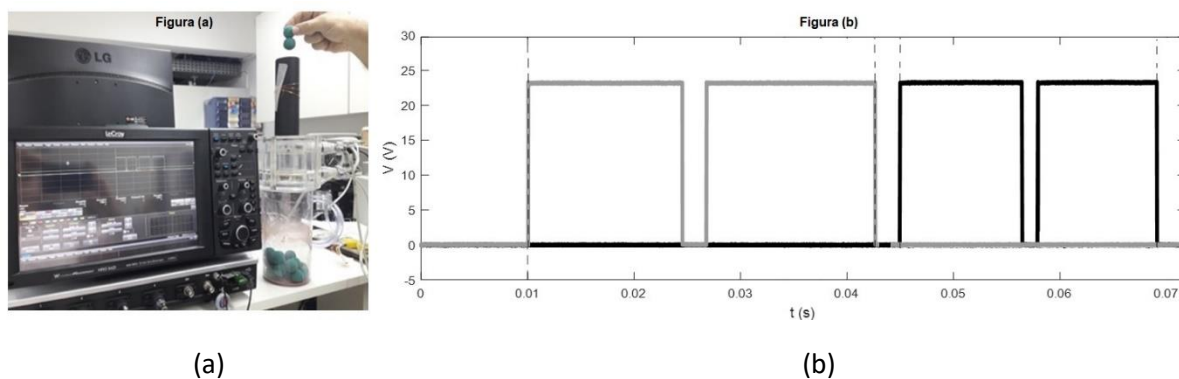


Figura 37 - Esferas justapostas em queda livre(37a) e saídas digitais (37b) do CONDE

#### **4.1.2.**

##### **Ensaio de contagem de esferas em aparato experimental**

Fazendo uso do aparato experimental utilizado para circular esferas foi possível simular, em laboratório, o comportamento do CONDE DUPLO quando exposto a um fluxo de água transportando esferas em suspensão. No contexto de grupos independentes de experimentos, fluxos de água foram repetidos, ora transportando uma única esfera, ora um conjunto de esferas (máximo de 30 esferas) para testar a habilidade de o CONDE conseguir contar as esferas que cruzavam os feixes infravermelhos, quer no fluxo de ida (da câmara de injeção para a de recuperação), quer no fluxo de volta (da câmara de recuperação para a de injeção).

Após repetidos testes, realizados para diferentes frequências de operação da bomba hidráulica (operada por inversor de frequência), de forma inequívoca, o CONDE totalizou com exatidão, para todos os experimentos realizados, as esferas circulantes (entre 0 e 30), independentemente do número de esferas introduzidas. Ou seja, em 100% dos casos investigados, o dispositivo contou adequadamente as esferas introduzidas no escoamento, quer no ciclo de injeção ou de recuperação (ou seja, cruzando o CONDE DUPLO em ambos os sentidos), para todos os sete níveis de frequência testados, o que valida o CONDE como um eficaz dispositivo totalizador de esferas em circulação.

#### **4.1.3.**

##### **Ensaio de medição de velocidade em aparato experimental**

Para testar a capacidade de o dispositivo CONDE medir a velocidade média do escoamento, optou-se por um experimento em que uma única esfera foi introduzida no fluxo que passa pelos elementos sensores do dispositivo CONDE DUPLO. A opção de se utilizar uma única esfera resulta da necessidade de minimizar perturbações no fluxo, para que este possa ser medido pela velocidade de passagem da esfera pelos feixes infravermelhos.

Os dados da Tabela 5, a seguir, documentam resultados de réplicas de grupos de experimentos realizados com o dispositivo contador de esferas (CONDE DUPLO), para avaliar a sua capacidade de medir a velocidade da esfera. Estas velocidades foram estimadas medindo-se o tempo decorrido entre a ativação



de cada conjunto de sensores opto-eletrônicos montados nos dois planos paralelos de medição, espaçados de uma distância ( $d = 50,32 \pm 0,12$  mm) previamente medida com exatidão [4]. O dispositivo utilizado para injetar esferas no escoamento foi adaptado para permitir que as esferas circulassem pelo CONDE DUPLO ambos os sentidos; i.e.: ora entrando pelo circuito da esquerda (fluxo de injeção), ora circulando pelo circuito da direita (fluxo de recuperação), assim permitindo avaliar a resposta do CONDE DUPLO quando exposto a fluxos em sentidos opostos.

Tabela 5 - Medições para diferentes frequências do inversor

Réplicas	f=30 Hz				f=35 Hz				f=40 Hz				f=45 Hz			
	Injeção		Recuperação		Injeção		Recuperação		Injeção		Recuperação		Injeção		Recuperação	
	V(m/s)	Esf <sub>IN</sub>	V(m/s)	Esf <sub>REC</sub>	V(m/s)	Esf <sub>IN</sub>	V(m/s)	Esf <sub>REC</sub>	V(m/s)	Esf <sub>IN</sub>	V(m/s)	Esf <sub>REC</sub>	V(m/s)	Esf <sub>IN</sub>	V(m/s)	Esf <sub>REC</sub>
#1	1,04	1	1,33	1	1,26	1	1,54	1	1,49	1	1,77	1	1,65	1	2,08	1
#2	1,06	1	1,33	1	1,26	1	1,54	1	1,41	1	1,84	1	1,65	1	2,17	1
#3	1,06	1	1,33	1	1,23	1	1,49	1	1,41	1	1,71	1	1,65	1	2,08	1
#4	1,06	1	1,29	1	1,26	1	1,54	1	1,59	1	1,77	1	1,65	1	2,08	1
#5	1,06	1	1,37	1	1,29	1	1,54	1	1,49	1	1,84	1	1,65	1	2,08	1
#6	1,09	1	1,29	1	1,26	1	1,59	1	1,49	1	1,77	1	1,59	1	1,99	1
#7	1,06	1	1,29	1	1,29	1	1,41	1	1,45	1	1,77	1	1,71	1	2,08	1
#8	1,04	1	1,33	1	1,33	1	1,54	1	1,54	1	1,77	1	1,49	1	1,99	1
#9	1,06	1	1,29	1	1,26	1	1,54	1	1,49	1	1,84	1	1,59	1	1,91	1
#10	1,06	1	1,37	1	1,26	1	1,54	1	1,45	1	1,77	1	1,54	1	1,91	1
Vel. Média CONDE	1,059		1,322		1,270		1,527		1,481		1,785		1,617		2,037	
Desvio Padrão	0,014		0,032		0,027		0,047		0,055		0,042		0,065		0,084	
Coef.Variação	1,3%		2,4%		2,1%		3,1%		3,7%		2,4%		4,0%		4,1%	

Réplicas	f=50 Hz				f=55 Hz				f=60 Hz			
	Injeção		Recuperação		Injeção		Recuperação		Injeção		Recuperação	
	V(m/s)	Esf <sub>IN</sub>	V(m/s)	Esf <sub>REC</sub>	V(m/s)	Esf <sub>IN</sub>	V(m/s)	Esf <sub>REC</sub>	V(m/s)	Esf <sub>IN</sub>	V(m/s)	Esf <sub>REC</sub>
#1	1,91	1	2,17	1	2,17	1	2,52	1	2,17	1	2,28	1
#2	1,84	1	2,28	1	2,08	1	2,28	1	2,17	1	2,52	1
#3	1,91	1	2,17	1	2,08	1	2,39	1	2,17	1	2,81	1
#4	1,84	1	2,39	1	1,99	1	2,66	1	2,28	1	2,81	1
#5	1,84	1	2,17	1	1,99	1	2,39	1	2,28	1	2,52	1
#6	1,77	1	2,17	1	2,08	1	2,39	1	2,17	1	2,81	1
#7	1,77	1	2,17	1	1,99	1	2,66	1	2,28	1	2,28	1
#8	1,84	1	2,17	1	1,99	1	2,52	1	2,28	1	2,81	1
#9	1,84	1	2,17	1	2,17	1	2,39	1	2,28	1	2,81	1
#10	1,84	1	2,28	1	2,17	1	2,66	1	2,28	1	2,52	1
Vel. Média CONDE	1,840		2,214		2,071		2,486		2,236		2,617	
Desvio Padrão	0,047		0,077		0,079		0,138		0,057		0,222	
Coef.Variação	2,5%		3,5%		3,8%		5,6%		2,5%		8,5%	

A condição de escoamento com a menor velocidade (1,059 m/s) foi obtida com a bomba hidráulica operando na frequência de 30 Hz, e a maior velocidade (2,617 m/s), com a bomba operando na frequência de 60 Hz. Dez réplicas do mesmo experimento foram realizadas, nos fluxos de ida e de volta, o que permitiu avaliar a repetibilidade de cada conjunto (7 diferentes valores de frequência, entre 30 Hz e 60 Hz) de dados.

Conforme mostrado, por uma particularidade do aparato experimental utilizado, a velocidade da esfera é mais alta (cerca de 24%) na operação de recuperação do que na de injeção das esferas, já que, no fluxo de recuperação, o

equipamento opera com vazão plena do fluido de trabalho (água), diferentemente do ciclo de injeção, em que apenas uma fração da água bombeada é desviada para a câmara de injeção para transportar as esferas. Uma primeira observação desses dados de medição de velocidade já sinaliza para algumas conclusões que podem ser antecipadas:

- Exceto pelas medições realizadas na frequência de 40 Hz, a repetibilidade da medição é sempre melhor quando o dispositivo CONDE atua no fluxo de injeção, afirmativa essa sustentada pelo parâmetro estatístico desvio padrão, fonte relevante da incerteza associada à medição, assim sinalizando que a incerteza associada à medição de velocidade é sistematicamente maior no fluxo de recuperação do que no de injeção.
- A estatística mostrada pelo coeficiente de variação (%) — quociente entre o desvio padrão e a média — permite concluir que, embora a frequência de operação da bomba tenha influência na dispersão dos dados, o aumento da frequência não coincide com o aumento da dispersão dos dados.

#### 4.2.

#### **Ensaio realizados em campo**

Uma vez que os testes em bancada demonstraram que o CONDE era capaz de cumprir com os requisitos de projeto, 4 unidades do CONDE foram instaladas na usina Fontes Nova (Pirai RJ) a fim de testá-los durante a operação do SIREA. Diferentemente dos ensaios em bancada, onde as variáveis são perfeitamente controláveis, o ambiente industrial apresenta um cenário pouco favorável aos dispositivos eletrônicos. Três ensaios independentes foram realizados para avaliar o desempenho do CONDE: (i) Ensaio #1: avaliação do nível de interferência eletromagnética, mantendo-se o grupo Bomba-Inversor desligado; (ii) Ensaio #2: avaliação do nível de interferência eletromagnética, mantendo-se o grupo Bomba-Inversor na condição de operação mais crítica; i.e.: carga máxima, operando na frequência da rede (60 Hz) e (iii) Ensaio #3: eficácia de operação do CONDE quanto a sua capacidade de gerar pulsos para cada esfera que interrompe o feixe infravermelho.

#### 4.2.1. Montagem do CONDE no SIREA

A Figura 38 ilustra as posições em que as quatro unidades CONDE se encontram instaladas no SIREA.

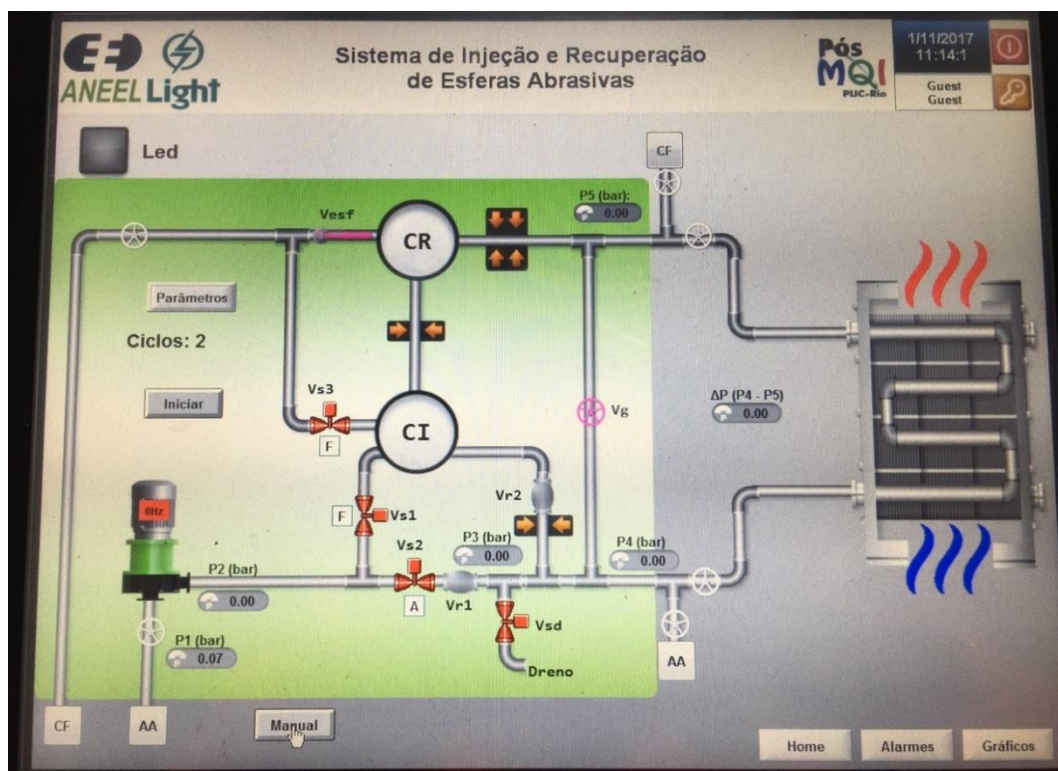


Figura 38 - Posição dos quatro contadores no SIREA

Nessa Figura podem ser observadas as quatro unidades de Contadores instaladas (representadas por dupla seta, na cor amarela); são elas:

- Contador #1, instalado na saída da Câmara de Injeção de esferas, antes do tramo de acesso ao trocador de calor, portanto operando com apenas parte do fluxo de água de resfriamento (fluxo de transporte das esferas);
- Contador #2, instalado no tramo de saída do trocador de calor, portanto operando com a vazão máxima da água de resfriamento recalcada pela bomba hidráulica;
- Contador #3, instalado imediatamente a jusante do Contador #2, portanto operando com o mesmo fluxo de água do Contador #2 (esses dois contadores instalados, um após o outro, visam permitir a medição da

velocidade da esfera ao percorrer o espaço previamente conhecido entre os sensores instalados nesses dois medidores).

- Contador #4, instalado no tramo que interliga a Câmara de Recuperação e de Injeção, portanto operando apenas com parte da vazão da água impulsionada pela bomba (parte substancial do fluxo é descartada para o dreno, já que a transposição das esferas de volta à câmara de Injeção não requer o fluxo de água total).

#### 4.2.2. Ensaio de interferência eletromagnética

As medições abaixo foram realizadas com as pontas de prova do osciloscópio portátil (Rohde Schwarz, Modelo RTH 1002, 5 GSa/s ) diretamente conectadas aos terminais das fontes de alimentação e nos conectores do CLP no caso dos contadores de 1 a 4.

##### 4.2.2.1. Ensaio de interferência eletromagnética com o Inversor desligado

Foram realizadas medições nas fontes de alimentação e nas saídas dos contadores de 1 a 4, mantendo-se o grupo Bomba-inversor desligados. Os resultados de tais medições podem ser vistos nas Figuras 39 a 42.



Figura 39 - Tensão de alimentação de 24 V (inversor desligado)



Figura 40 - Tensões de alimentação de 5 V (inversor desligado)



Figura 41 - Sinal de saída do Contador #1



Figura 42 - Sinal de saída do Contador #2

Conforme documentado nas Figuras 39 a 42, é baixo o nível de interferência eletromagnética associada aos sinais medidos nas fontes de alimentação e nas saídas dos quatro contadores de esferas. As medições referentes aos contadores 3

e 4 possuem característica semelhantes, razão esta que tais foram suprimidas deste trabalho.

#### 4.2.2.2.

#### Ensaio de interferência eletromagnética (Inversor em 60 Hz)

A fim de estudar a influência do grupo Bomba-inversor nos circuitos do CONDE, repetiram-se as medições com o inversor de frequência a 60 Hz, conforme apresentado nas Figuras 43 a 45.



Figura 43 - Fonte de 5 V, exposta à interferência do inversor



Figura 44 - Fonte de 24 V, exposta à interferência do inversor



Figura 45 - Sinal de saída do C1, exposto à interferência do inversor

Conforme exemplo das Figuras 43 a 45, todos os sinais gerados pelos quatro Contadores instalados são contaminados pelo interferência eletromagnética introduzida pelo inversor de frequência que comanda a operação do grupo motor-bomba hidráulica, que gera os fluxos de água de refrigeração no SIREA. Nos contadores, a amplitude do ruído chega a ser até 10 vezes maior do que aquela medida com o conjunto inversor-bomba desligado. Embora indesejada, esta interferência não compromete o funcionamento dos contadores de esferas (CONDE), já que não comprometem a habilidade desses contadores gerarem pulsos sempre que uma esfera interrompe o feixe infravermelho.

#### 4.2.3. Ensaio de eficácia de operação do CONDE para gerar pulsos

O CONDE é composto por dois componentes principais: os sensores optoeletrônicos integrados nas estruturas de acrílico e o sistema digital, responsável pela aquisição e processamento dos pulsos. Os ensaios, a seguir caracterizados, foram realizados com o intuito de medir os pulsos gerados pelo circuito eletrônico de cada contador, sempre que uma esfera interrompe o feixe luminoso. Estes sinais foram medidos nas portas de entrada do circuito lógico programável (CLP), assim garantindo as mesmas condições de aquisição de dados do sistema completo.

Os dados coletados pelo osciloscópio foram exportados e tratados em uma planilha Excel. Para cada conjunto de dados, foi calculada a velocidade da esfera a partir da medição da largura do pulso indicada pelo osciloscópio, de antemão conhecendo-se o diâmetro nominal da esfera (25 mm).



#### 4.2.3.1. Ensaio com única esfera

Neste ensaio, cada um dos quatro contadores foi exposto a uma única esfera introduzida no escoamento monitorado pelos quatro contadores, assim permitindo, por meio da imagem do osciloscópio, medir a largura do pulso gerado pela passagem da esfera em cada contador (C1, C2, C3 e C4). As Figuras 46 a 49, foram geradas a partir dos dados exportados pelo osciloscópio Rohde Schwarz, Modelo RTH 1002. A Tabela 6 apresenta os valores calculados, a partir dos dados fornecidas pelo osciloscópio.

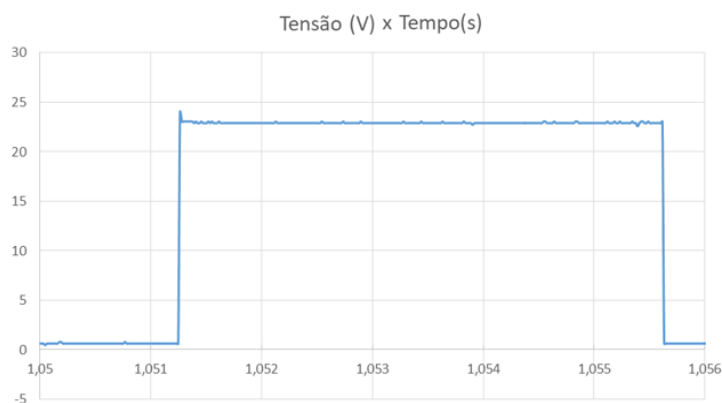


Figura 46 - Pulso gerado por C1, pela passagem de uma única esfera

Tabela 6 - Largura de pulso e estimativa da velocidade da esfera no C1

<b>Largura de pulso</b>	4,352 ms
<b>Diâmetro</b>	25 mm
<b>Velocidade</b>	5,75 m/s

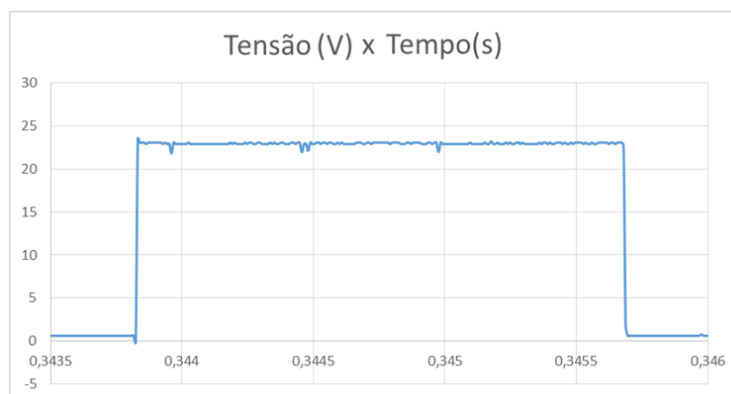


Figura 47 - Pulso gerado por C2 pela passagem de uma única esfera



A Tabela 7 apresenta os valores calculados, a partir dos dados fornecidas pelo osciloscópio.

Tabela 7 - Largura de pulso e velocidade da esfera no C2

Largura de pulso	1,856 ms
Diâmetro	25 mm
Velocidade	13,47 m/s

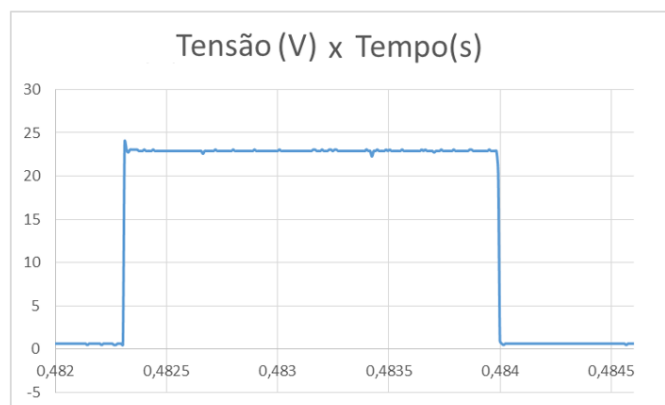


Figura 48 - Pulso gerado pelo C3 pela passagem de uma única esfera

A Tabela 8 apresenta os valores calculados, a partir dos dados fornecidas pelo osciloscópio.

Tabela 8 - Largura de pulso e velocidade da esfera no C3

Largura de pulso	1,688 ms
Diâmetro	25 mm
Velocidade	14,81 m/s

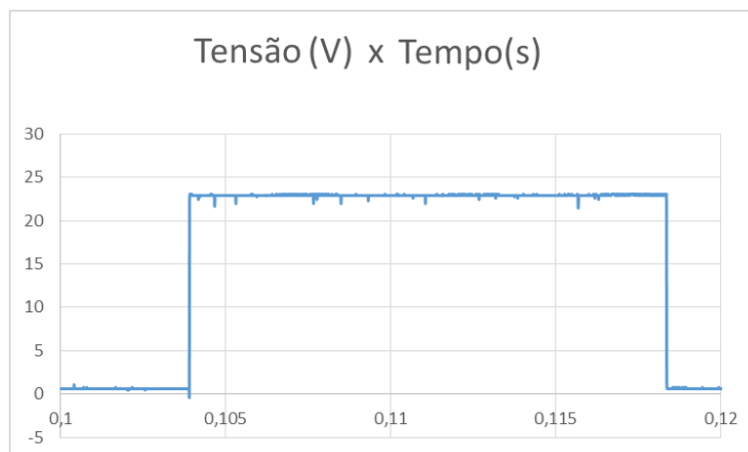


Figura 49 - Pulso gerado pelo C4 pela passagem de uma única esfera

A Tabela 9 apresenta os valores calculados, a partir dos dados fornecidas pelo osciloscópio.

Tabela 9 - Largura de pulso e velocidade da esfera no C4

Largura de pulso	14,438 ms
Diâmetro	25 mm
Velocidade	1,73 m/s

#### 4.2.3.2.

##### Ensaio com esferas justapostas

Com o propósito de simular a condição em que duas esferas passam muito próximas, uma atrás da outra, por um mesmo contador, duas delas foram justapostas por meio de um fio de nylon (Figura 50) e inseridas no escoamento.

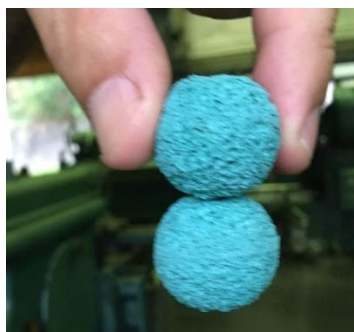


Figura 50 - Contador exposto a duas esferas justapostas

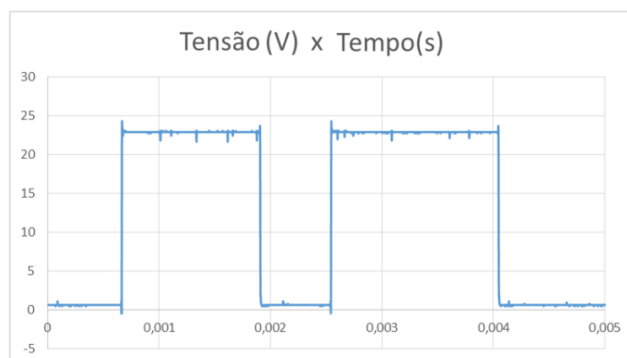


Figura 51 - Pulsos gerados pelas esferas justapostas

A Tabela 10 apresenta os valores calculados a partir da imagem acima, fornecidas pelo osciloscópio.

Tabela 10 - Largura de pulsos e velocidade pelo C2

	<b>Pulso 1</b>	<b>Pulso 2</b>	<b>Intervalo</b>	<b>Total</b>
Largura de pulso	1,2427 ms	1,5036 ms	0,6352 ms	3,382 ms
Distância	25 mm	25 mm	11,67 mm	50 mm
Velocidade	20,12 m/s	16,63 m/s	18,37 m/s	14,79 m/s

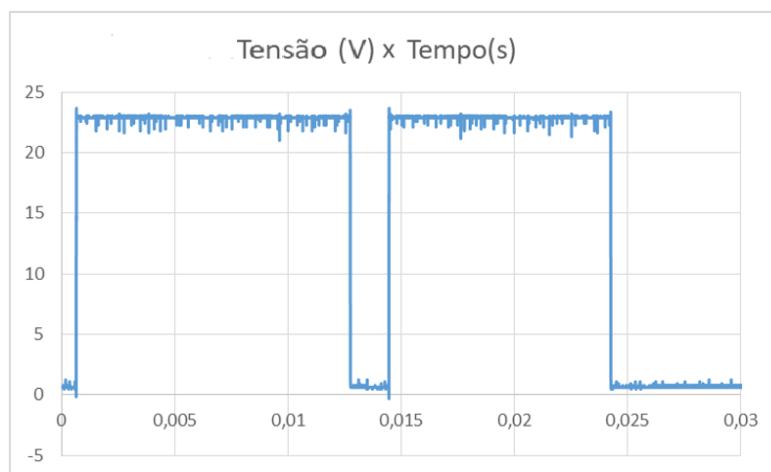


Figura 52 - Pulsos gerados pelo C4 pela passagem de esferas justapostas

A Tabela 11 apresenta os valores calculados a partir da imagem acima, fornecidas pelo osciloscópio.

Tabela 11- Largura de pulso e estimativa da velocidade pelo Contador #4

	<b>Pulso 1</b>	<b>Pulso 2</b>	<b>Intervalo</b>	<b>Total</b>
--	----------------	----------------	------------------	--------------

Largura de pulso	12,1 ms	9,495 ms	2,01 ms	23,604 ms
Distância	25 mm	25 mm	4,716 mm	50 mm
Velocidade	2,07 m/s	2,63 m/s	2,35 m/s	2,12 m/s

#### 4.2.4.

#### Conclusões dos ensaios realizados na usina Fontes Nova

Os resultados dos ensaios realizados conduziram às seguintes conclusões:

- Os sensores opto-eletrônicos do CONDE apresentaram resultados plenamente satisfatórios, quando testados nas condições reais de operação da usina hidrelétrica, onde foram testados já embarcados no SIREA.
- As medições realizadas com as esferas justapostas mostram que o CONDE é capaz de diferenciar duas esferas ainda que estejam muito próximas.
- A diferença de velocidades entre as esferas justapostas sugere que existe uma variação de tamanho considerável entre as esferas. Assim, deve-se adotar a estimativa de velocidade utilizando-se a diferença de tempo de passagem por dois contadores com distância conhecida.

#### 4.2.5.

#### Ensaio de comparação entre o sinal gerado pelo CONDE e o CLP

Para testar a consistência do software de controle do CLP, esferas foram colocadas em circulação no interior do trocador de calor por meio do SIREA operando no modo automático, assim permitindo monitorar a passagem das esferas por cada um dos quatro contadores de esfera instalados. Para servir de padrão para o software, as mesmas esferas em circulação foram monitoradas pelo osciloscópio digital portátil instalado diretamente nas saídas dos CONDEs.

Experimentos similares foram realizados, para dois níveis de vazão de água de resfriamento (fluido transportador das esferas abrasivas) para testar a taxa de amostragem do conversor analógico/digital quanto a sua capacidade de detectar a largura de pulso de cada um dos quatro contadores de esferas instalados no SIREA.

#### 4.2.5.1.

#### Grupo de Experimentos #1: Vazão média (49,0 m<sup>3</sup>/h)

Submetido a um escoamento medido de 49 m<sup>3</sup>/h, as respectivas respostas dos quatro contadores foram avaliadas sempre que uma esfera cruzava o feixe infravermelho.

A Figura 53 mostra duas imagens do mesmo evento, porém registradas no mesmo momento: à esquerda, o registro do sinal do CLP (S1=7,9200 ms) no momento exato em que uma esfera cruzou o feixe infravermelho do Contador C1 e, à direita, o sinal captado pelo osciloscópio portátil, nesse experimento, monitorando os bornes do Contador C4, registrando uma largura de pulso de 7,922 ms. Ou seja, o CLP foi capaz de reproduzir a medida da largura de pulso do osciloscópio (valor padrão) com inquestionável exatidão, assim confirmando a capacidade do CLP de captar eventos com resolução de 0,5  $\mu$ s. Os dados das medições de todos os contadores podem ser vistos na tabela 12



Figura 53 - Eficácia do CLP na detecção da largura de pulso pelo C1

A Tabela 12 apresenta os valores calculados a partir da imagem acima, fornecidas pelo osciloscópio.

Tabela 12 - Larguras de pulso dos quatro contadores (fluxo: 49 m<sup>3</sup>/h)

	Pulso no osciloscópio	Valor na saída do CLP
Contador 1	7,922 ms	7,9200 ms

Contador 2	1,750 ms	1,7500 ms
Contador 3	1,728 ms	1,7275 ms
Contador 4	8,472 ms	8,4700 ms

#### 4.2.5.2.

#### Ensaio com os quatro contadores (fluxo: 72,6 m<sup>3</sup>/h)

Este ensaio foi realizado para testar a taxa de amostragem do CLP, para cada um dos quatro contadores de esferas instalados no SIREA, quanto a sua capacidade de detectar a largura de pulso gerado sempre que uma esfera cruze o feixe infravermelho. Nesse caso, o experimento foi realizado para uma vazão máxima de 72,6 m<sup>3</sup>/h.

Tabela 13 - Larguras de pulso dos quatro contadores (fluxo: 72,6 m<sup>3</sup>/h)

	<b>Pulso no osciloscópio</b>	<b>Valor na saída do CLP</b>
Contador 1	6,642 ms	6,6425 ms
Contador 2	1,100 ms	1,1000 ms
Contador 3	1,728 ms	1,7275 ms
Contador 4	6,111 ms	6,1075 ms

#### 4.2.5.3. Conclusões dos ensaios com o CLP

Com base nos testes realizados, foi possível concluir que os experimentos realizados comprovaram que o software do CLP consegue, de forma adequada e confiável, identificar a largura de pulso gerada, que é proporcional ao tamanho e à velocidade da esfera circulante.

#### 4.3. Conclusão do capítulo

Os ensaios realizados em bancada foram de grande utilidade, permitindo compreender previamente o comportamento do CONDE em ambiente laboratorial. Já no que concerne os testes realizados no ambiente da usina hidrelétrica, foi possível avaliar as fontes de interferência eletromagnética que contaminam o sinal elétrico que emerge do CONDE sempre que uma esfera cruza

o feixe infravermelho. Com base nos experimentos realizados foi possível concluir:

- As interferências eletromagnéticas geradas pelo ambiente da usina hidrelétrica não são perceptíveis diante da nítida interferência introduzida pelo inversor de frequência que opera o grupo motor-bomba hidráulica.
- O nível de interferência introduzida pelo inversor de frequência acoplado ao grupo motor-bomba hidráulica, embora perceptível, não compromete a exatidão da medição da largura de pulso, com resolução de  $0,5 \mu\text{s}$ , do sinal elétrico gerado pelo CONDE sempre que uma esfera cruza o feixe infravermelho.
- A limitação de banda de frequências a 200 kHz, simulando o que ocorre no CLP, já reduz significativamente o nível de interferência, permitindo operar corretamente os contadores de esfera concebidos (CONDE).

Os experimentos realizados comprovaram que o software do CLP consegue, de forma adequada e confiável, identificar a largura de pulso gerada, que é proporcional ao “diâmetro efetivo” da esfera e à sua velocidade. Ou seja, todos os sinais registrados pelo software de controle do CLP conseguem reproduzir o valor da largura de pulso (medida em unidade de tempo, com resolução de  $0,5 \mu\text{s}$ ). Os resultados foram validados pelas imagens do osciloscópio, ou seja, o tempo em que a esfera dispara o sensor do contador de esferas e este aciona a entrada de alta velocidade do CLP. Assim, o teste da função do CLP que permite medir a largura de pulso com resolução de  $0,5 \mu\text{s}$ , encontra-se validado para o desempenho desta função precípua de detectar e registrar a largura dos pulsos gerados. Esses resultados habilitam o SIREA a operar pelo monitoramento do total de esferas inseridas e recuperadas do trocador de calor.

## 5

## Conclusão e recomendações

Este capítulo resume as principais conclusões do trabalho e encaminha sugestões para desdobramentos naturais do trabalho.

### 5.1. Conclusões

No que concerne o objetivo central originalmente formulado, o objetivo central foi plenamente alcançado. Conforme demonstrado, o sistema opto-eletrônico, que opera na faixa do infravermelho, mostrou-se capaz não só de identificar cada esfera que cruza o feixe infravermelho, mas, também, de contar a sua velocidade de circulação, minimizando a presença de falsos positivos, mesmo quando operando em meios turvos, típicos do ambiente industrial. Plenamente atendendo a demanda originalmente imposta, o CONDE foi aprovado e embarcado no cabeça de série do projeto de P&D que motivou o trabalho, hoje gerando os sinais lógicos para o CLP que controla o sistema de automação do sistema.

Os objetivos específicos foram perseguidos, assim contribuindo para que objetivo principal fosse integralmente atingido. Superados os sucessivos problemas enfrentados, os sensores opto-eletrônicos finalmente utilizados mostraram-se plenamente capaz de identificar o limiar de detecção, assim orientando a especificação dos leds e fototransistor com suas saídas analógicas. A utilização de dois feixes ópticos transversais montados num mesmo plano de medição, foi a solução adotada para assegurar a detecção das esferas por meio de medição de largura do pulso gerado pela passagem da esfera pelo feixe infravermelho.

Superadas as dificuldades relatadas para construção da placa de circuito impresso, conseguiu-se produzir, internamente, fazendo-se uso da prototipadora do laboratório, uma placa com qualidade, cujo circuito eletrônico permitiu abrigar todos os componentes eletrônicos em uma pequena área, não comprometendo o



acesso para soldagem dos componentes eletrônicos. A placa inovou ao ser fabricada em duas camadas, o que requereu recursos mais sofisticados da prototipadora LDKF. Uma vez validado para uso no ambiente industrial, o produto final (CONDE) foi também testado contra interferências eletromagnéticas normalmente presentes em uma hidrelétrica ou gerados por equipamentos auxiliares. Claramente identificado como a principal fonte de interferência, foi possível mostrar que a interferência causada pelo inversor de frequência, que opera o grupo motor bomba hidráulica, embora presente, não compromete o adequado funcionamento do CONDE quando a largura de banda do sistema de aquisição de dados é ajustada para operar abaixo de 200 kHz.

Por meio de comparação entre a medição da largura de pulso em osciloscópio e a saída do CLP, demonstrou-se que o CONDE é capaz de medir a largura de pulso com resolução de 0,5  $\mu$ s (i.e.: consegue contar esferas com exatidão) e medir a velocidade de circulação de esferas com exatidão melhor que 1%. Medições de largura de pulso evidenciaram que, embora sensível à passagem de bolhas e detritos, estes falsos positivos podem ser descartados por uma estratégia de contagem de esferas por meio de medição de largura de pulso no software do CLP, desenvolvimentos esses em fase de implementação no âmbito do projeto em desenvolvimento.

## **5.2.**

### **Recomendações para desdobramentos futuros**

Fundamentado na experiência vivenciada nas fases de concepção, construção e validação do dispositivo opto-eletrônico CONDE, é possível encaminhar sugestões para aprimoramentos do sistema e desdobramentos futuros do trabalho.

Especificamente no que concerne ao projeto da placa de circuito eletrônico, sugere-se:

- Eliminar uma das duas fontes de alimentação utilizadas, mantendo-se apenas a tensão de 5 V para alimentação dos componentes ativos do sistema.
- Introduzir melhorias no sistema de conectorização do CONDE: o cabeamento que se conecta à placa poderá ser de mais fácil acesso, utilizando um conector padronizado, ao invés de um conector por fio.

- Implementar um circuito ativo de filtragem, com o propósito de eliminar a interferência causada pelos componentes de automação.

Adicionalmente às mudanças propostas, cabe aqui ressaltar a dificuldade em se utilizar o CLP como equipamento responsável por adquirir e processar os pulsos digitais. Por este motivo, sugere-se uma evolução na concepção do CONDE: um sistema completo microcontrolado, capaz de realizar todas as etapas necessárias ao condicionamento e processamento de sinal, que passariam a ser realizadas por um microcontrolador embarcado no próprio bloco do CONDE. Este microcontrolador seria responsável por avaliar os falsos positivos e informar ao CLP apenas os dados referentes à contagem e medição de velocidade das esferas, deixando o CLP livre para as tarefas de automação do sistema. O desafio deste projeto é a miniaturização de tal sistema, sendo necessária a utilização de técnicas avançadas de confecção de placas de circuito impresso e utilização de componentes *SMD*.

No que se refere a metodologia utilizada para medição de turbidez no capítulo 2, podem ser realizadas novas análises sistemáticas utilizando as normas de unidades nefelométricas SMWW 2ed.

## 6

## Referências bibliográficas

- 1 ABD-ELHADY, M. S.; MALAYERI, M. R. Impact of hardness and surface texture on cleaning action of various projectiles. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 94, p. 153-163, 2015/02/01/ 2015. ISSN 0263-8762. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876214003438> >.
- 2 BOTT, T. R. **Fouling of heat exchangers and its mitigation with special reference to biofouling**. Proceedings of the 2nd European Thermal Science UTI National Heat Transfer Conference, 1996. 115-125 p.
- 3 FROTA, M. N. et al. On-line cleaning technique for mitigation of biofouling in heat exchangers: A case study of a hydroelectric power plant in Brazil. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 53, n. 0, p. 197-206, 2014. ISSN 0894-1777. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177713002860> >.
- 4 NUNES, J. C. et al. **Infrared optoelectronic device for counting and measuring v elocity of abrasive sponge balls used as cleaning artefacts in heat exchangers**. The XXII World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO) 2018.
- 5 \_\_\_\_\_. **Infrared Optoelectronic System for Counting Spheres in Turbid Media**. 2017 9th Brazilian Congress on Metrology (Metrologia 2017): Quality Assurance in a Changing World 2017.
- 6 JÚNIOR, V. H. D. O. **Validação metrológica de alternativa tecnológica para mitigação de incrustação em trocadores de calor**. 2015. (Dissertação - Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- 7 MALAYERI, M. R.; JALALIRAD, M. R. Mitigation of Crystallization Fouling in a Single Heated Tube Using Projectiles of Different Sizes and Hardness. **Heat Transfer Engineering**, v. 35, n. 16-17, p. 1418-1426, 2014/11/22 2014. ISSN 0145-7632. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/01457632.2014.889448> >.
- 8 JALALIRAD, M. R.; MALAYERI, M. R. **A criterion for the selections of projectiles for cleaning tubular heat exchanger**. International conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning, 2013. 332-338 p.
- 9 HONEYWELL. **Folha de características SDP8436**. Disponível em: < <https://sensing.honeywell.com/SDP8436-003-plastic-ceramic-package->

[phototransistors>](#)

- 10 OLIVEIRA, K. C. D. **Projeto e desenvolvimento de um sistema optoeletrônico para contagem automática de esferas abrasivas mitigadoras de incrustações em trocadores de calor.** 2016. (Trabalho de conclusão de curso - Graduação). Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- 11 LUBICZ, S. B. **Projeto e desenvolvimento de contador de esferas abrasivas em meios turvos.** 2016. (Trabalho de conclusão de curso - Graduação). Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- 12 RANGEL RIOS, J. L.; GERMANO, S. B.; FROTA, M. N. **Sistema inteligente para ablução de trocadores de calor.** 9th Brazilian Congress on Metrology (Metrologia 2017): Quality Assurance in a Changing World 2017.

# Anexo I – Artigo submetido para o IMEKO 2018

## Infrared optoelectronic device for counting and measuring velocity of abrasive sponge balls used as cleaning artefacts in heat exchangers

J Nunes<sup>1</sup>, C R Hall Barbosa<sup>1</sup>, M N Frota<sup>1</sup>, G Valente<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Posgraduate Programme in Metrology, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 22541-900, Brazil

<sup>2</sup> Fontes Nova Hydroelectric Power Plant, Light Energia S/A, Piraí, Brazil

E-mail: frota@esp.puc-rio.br

**Abstract.** Operating in the infrared range, an optoelectronic device was designed, fabricated and validated to count and measure the speed of abrasive sponge balls, used as cleaning artefacts in an innovative hydraulic system for cleaning heat exchangers without the need to shut down the turbine-hydrogenerator unit. On the one hand, the totalization of the cleaning artefacts is necessary to ensure that all injected balls have been recovered after their circulation through the inner tubes of the heat exchanger, therefore not obstructing the pathways where heat transfer takes place. On the other hand, the measurement of the velocity is critical to ensure the effectiveness of the cleaning process, proven to occur for cleaning artefacts moving with flow velocity around 2.0 m/s. Lessening false-positive counting and reducing the uncertainty associated with velocity measurements of the moving abrasive balls, the optoelectronic device discussed herein represents a significant improvement of a previous development, now operating with an improved signal-to-noise ratio and incorporating a new pair of optoelectronic sensors, all mounted on a single acrylic block, which ensures self-alignment of the optical beams.

### 1. Introduction

Heat exchangers play an important role in power generation. Their effectiveness is one of the factors that impact the operation of the generators. Water pumped from the turbine discharge channel, used as the cooling fluid of the heat exchanger, can often cause undesirable obstruction of the inner tubes of the exchanger as, usually, it becomes contaminated with organic materials, yielding the formation of biofouling. Such incrustations drastically damage the thermal effectiveness and the hydrodynamic performance of the exchanger, compromising the efficiency of the generator. The conventional periodic maintenance shutdowns required for cleaning heat exchangers used to cool hydrogenerators reduce productivity, causing financial losses due to equipment unavailability [1].

Ingenuously conceived, and operating in cleaning cycles, an on-line fully automated apparatus uses the cooling water of the heat exchanger to transport abrasive sponge balls—cleaning artefacts—to through the tubes of the heat exchanger. Tests performed in a hydroelectric power plant [2, 3] qualified the apparatus as an efficient cleaning stratagem that avoids interruption of the generation, therefore increasing the productivity of the hydroelectric power plant. The automated system (driven by a programmable logic controller, PLC) allows for injection, recovery and washing of the abrasive balls [2] as the hydro generator operates normally.

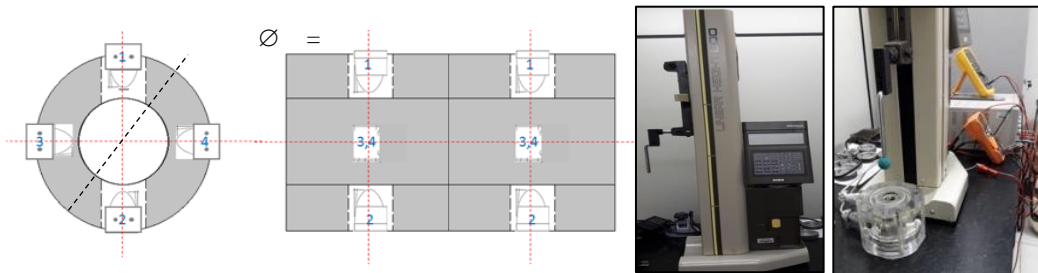
While the alternative cleaning apparatus is discussed elsewhere [2], this paper focuses on the improved version of the optoelectronic device, designed to perform two distinct functions: (i) to generate electronic signals capable of automating the operation of the

cleaning apparatus and (ii) to generate digital signals to empower the programmable logic controller, understood as the intelligence of the optoelectronic device. While the first actuates the electro valves that control the flow of the working fluid transporting the cleaning artefacts through the tubes of the heat exchanger, the latter, not only controls the number of balls introduced and recovered after each cleaning cycle but also measures the velocity of cleaning artefacts.

## 2. The abrasive ball counting device

The abrasive ball counting device is based on two pairs of Howeywell infrared (880 nm) photodiodes/phototransistors (SEP8736 and SDP8436, respectively), integrated in an electronic circuit implemented in a printed circuit board (PCB). Each pair of photodiode/phototransistor (positioned in the same plane but lagged 90° degrees), defines a detection region, as depicted in Figure 1a. This arrangement accounts for detection of false positives (e.g.: air bubbles; fragments of incrustation detached from the inner tube walls) so that only objects that interrupt both infrared beams are counted.

The electronic circuit [3] is responsible for exciting the photodiodes; measuring the collector voltage of the phototransistors; comparing these collector voltages with pre-set thresholds and for combining the outputs of both comparators in one digital (24 V) output that powers the PLC used to control the fully automated cleaning apparatus. As shown in Fig. 1a, this integrated enhanced system consists of two sets of identical PCBs, mounted in two parallel measuring planes of the acrylic structure, apart from a distance  $d$ . Fig. 1b illustrates the Mitutoyo Linear Height Gauge device used and Fig. 1c, the experimental



procedure to measure the cleaning ball travelling effective distance  $d$ .

**Figure 1.** The abrasive balls counting device. (a) acrylic structure housing PCBs; (b) linear height gauge device; (c) measurement of effective distance  $d$

Considering the instants of activation of each digital output —yielding the time of flight of the cleaning ball crossing both beams—, and knowing the distance  $d$  between the infrared beams, it become possible to: (i) compute the velocity of the sponge balls transported by the cooling fluid and (ii) to perform double totalization of the number of cleaning artefacts crossing each optoelectronic beam, thus improving the accuracy of the ball counting device. Regardless the importance of assessing the cleaning ball velocity — a critical parameter to ensure effectiveness of the cleaning process— its measurement allows for rejection of false positives, as any objects with linear velocity too much different from the expected values (typically 2,0 m/s) should be disregarded.

An important aspect to be considered is that the infrared beams are not very narrow. The photodiode and the phototransistor have beam angles of 10° and 18°, respectively, whilst the cleaning balls (typically having 24 mm diameter) pass through a 38.4 mm diameter acrylic duct. Thus, the detection is not based on the interruption of the infrared beam in an exact transversal plane, but rather on a gradual reduction of the infrared beam intensity until the pre-set voltage threshold is reached. This means that the ball travelling distance  $d$  should not be the measure of the distance between both the measuring planes containing the pairs of sensors, but rather the “effective distance  $d$ ”, measured based on the digital outputs of the detectors.

## 3. Static characterization test

The static characterization test aimed at estimating the “effective distance  $d$ ” between the infrared beams mounted in two parallel measuring planes. Fig. 1b illustrates the experimental setup conceived to measure it, making use of a linear height gauge (LH-600, manufactured by Mitutoyo) where one of the cleaning balls was slowly set in motion while the pulses were monitored by means of a digital voltmeter. Taking into account the classical ISO GUM procedures, a statistical analysis of thirty replicates of these measurements carried out for a confidence level of 95%, and a coverage factor given by  $k=2$ , yielded the following results:  $d = (50,32 \pm 0,12)$  mm, as summarized in Table 1, confirming that uncertainty Type A dominates the overall uncertainty budget.

Table 1. Effective distance travelled by the cleaning ball across the optoelectronic beams

Measurement Uncertainty Type A					Measurement Uncertainty Type B					Final Results ( $d = d2 - d1$ )	
Source of Uncertainty	Mean Value (mm)	Standard Deviation (mm)	Standard Uncertainty (mm)	Contribution of the Expanded Uncertainty	Source of Uncertainty	Instrument Resolution (mm)	Rectangular Distribution	Standard Uncertainty (mm)	Contribution of the Expanded Uncertainty	Mean (d) (mm)	Expanded Uncertainty (mm)
d1	395,43	0,2301	0,0767	46,62%	d1	0,01	1,73	0,0058	0,26%	50,32	$\pm 0,12$
d2	445,75	0,2450	0,0817	52,85%	d2	0,01	1,73	0,0058	0,26%	Coverage Factor: $k = 2,0$ Confidence Level = 95,0%	

Once the effective distance is input in the software driving the programmable logic controller hardware, measurements of velocity of the travelling cleaning balls crossing both beams become possible.

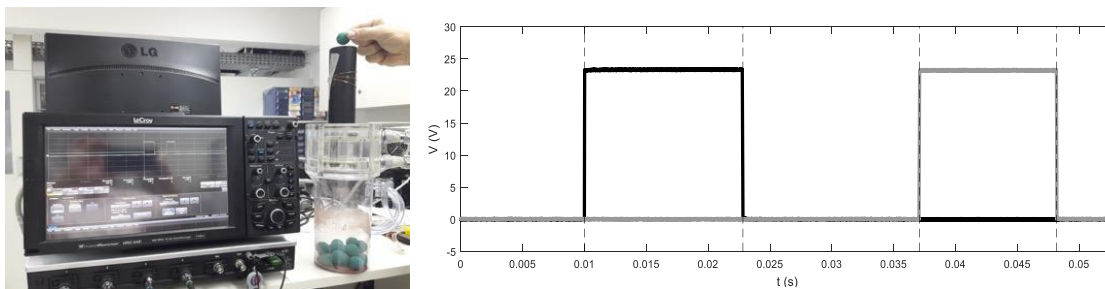
#### 4. Dynamic tests

Two dynamic tests have been performed, in two different environments: (i) in the laboratory, where the cleaning balls were introduced, vertically, into the ball counter by free fall from a height (17.4 cm), capable of ensuring velocity around 2 m/s when crossing the optoelectronic beams and (ii) in the environment of a hydroelectric power plant (Fontes Nova Power Plant), where cleaning balls were forced through the inner tubes of a heat exchanger by means of the proposed automated cleaning apparatus [2]. In both environments, independent experiments were performed to expose the ball counter device to the passage of a single ball and of two juxtaposed balls (connected to one another by means of a fine nylon thread). In both cases, the digital outputs of both measuring circuits have been recorded by a digital oscilloscope (1 MHz sampling rate; time resolution of 1  $\mu$ s). Of course, the further down circuit capture a larger value of the instantaneous velocity as, in free fall, the ball accelerates with  $g = 9.79 \text{ m/s}^2$ . The ball mean velocity crossing the counter device is then taken as the mean of both measures.

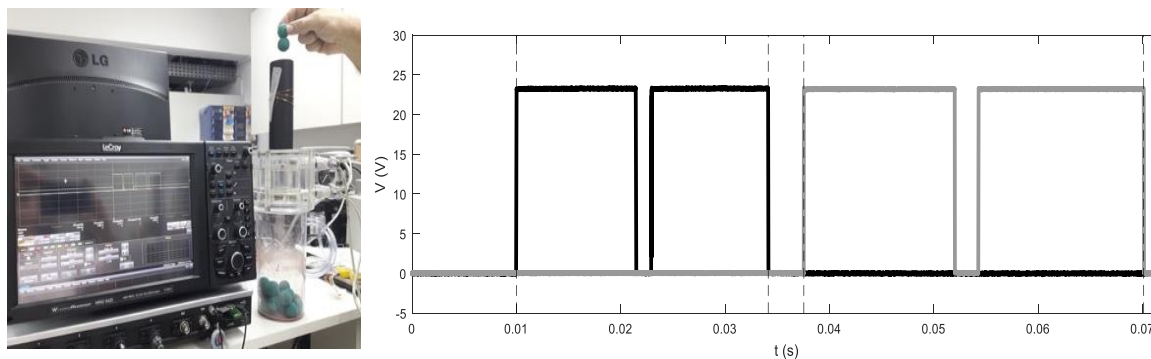
##### 4.1. Measurements in the Laboratory environment

Figure 2a depicts the experiment performed with the single sphere dropped into the counting device (image recorded in the display of the oscilloscope) and Figure 2b shows a more detailed image of the same signals, but after they have been properly processed. In solid black line is the pulse generated by the first circuit and in grey line is the pulse produced by the second circuit (slightly higher velocity). The time lag between the beginning of the first and second pulses is 27.1 ms, yielding an average velocity of 1.857 m/s (50.32 mm/27.1 ms, whose expanded uncertainty can be estimated by the amount  $\pm 0.12 \text{ mm}/27.1 \text{ ms} = 0.00443 \text{ m/s}$ ; i.e.: 0.24%).

Similarly, Figures 3a and 3b characterize the experiment performed with the two juxtaposed balls, following the same experimental procedure. As seen, the time lag between the beginning of the first double pulse and the beginning of the second double pulse is 27.5 m/s, yielding an average velocity of  $1.830 \text{ m/s} \pm 0.00436 \text{ m/s}$ ; i.e.: within 0.24%.



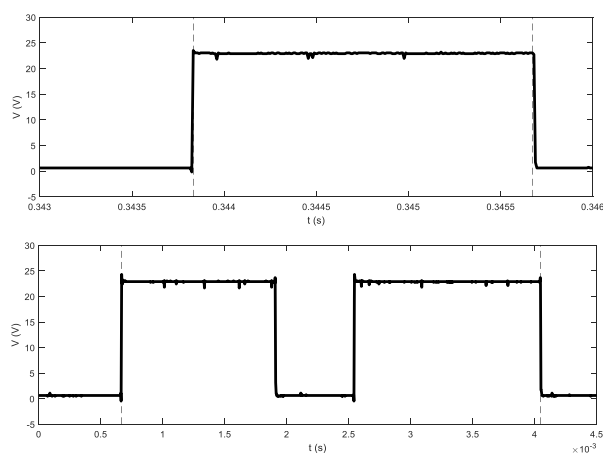
**Figure 2.** Digital outputs generated by both PCBs (one single ball crossing beams)



**Figure 3.** Digital outputs generated in the lab by both PCBs (two juxtaposed balls crossing beams)

#### 4.2. Field measurements performed with the counting device installed in the cleaning apparatus

Figure 4 reproduces electronic signals associated with experiments carried out in the field environment of the hydroelectric, having the counting device installed in the automated cleaning apparatus [2], thus fully fulfilling the original purpose for which it was designed. Similarly, the counting device was able (i) to count the crossing balls without being misled by undesirable air bubbles and fragments of fouling also present in the cooling water flow and also (ii) to measure their associated average velocity. Due to space limitation, only one of the electronic signal output is presented for the field tests, for both experiments, either when just a single ball, and two juxtaposed balls, crossed the optoelectronic beams.



**Figure 4.** Field tests generated by one and two juxtaposed balls crossing the optoelectronic beams.

## 5. Discussion and Conclusions



The proposed ball counter device has proven to operate properly either in the laboratory as well as in the hostile environment of the hydroelectric power plant. Also assessed for possible external disturbances resulting from its operation within the hydroelectric power plant, where electromagnetic fields are always present, the circuits exhibited a reasonably good signal-to-noise ratio, while the overall optoelectronic counter proved to be immune to electromagnetic interference, whose low levels proved not to compromise the overall functioning of the counting device.

## 6. References

- [1] T.R. Bott, Fouling of heat exchangers and its mitigation with special reference to biofouling, in: Proceedings of the 2nd European Thermal Science UTI National Heat Transfer Conference, vol. 1, 1996, pp 115–125.
- [2] Frota M N, Ticona E M, Neves A V, Silva R P M, Braga S L and Valente Junior G P 2014 *Experimental Thermal and Fluid Science* **53** 197.
- [3] Nunes J, Barbosa C R H, Germano S B, Frota M N and Valente G. Infrared Optoelectronic System for Counting Spheres in Turbid Media. 2017 *Proceedings of the IX Brazilian Metrology Conference (Fortaleza)*.

## Anexo II – Artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Metrologia 2017

### Sistema Optoeletrônico na Faixa do Infravermelho para Contagem de Esferas em Meios Turvos

#### Infrared Optoelectronic System for Counting Spheres in Turbid Media

J. Nunes<sup>1</sup>, C. R. Hall Barbosa<sup>1</sup>, M. N. Frota<sup>1</sup>, Gilson Valente<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 22541-900, Brasil; <sup>2</sup> Usina Fontes Nova, Piraí, RJ, Light Energia S/A

E-mail: hall@puc-rio.br

**Resumo:** Este artigo descreve um dos principais sistemas de um equipamento alternativo inovador para limpeza de trocadores de calor de hidrogeradores, que faz uso de esferas abrasivas, sem necessidade de parada das turbinas. Com base em componentes opto-eletrônicos na faixa do infravermelho, implementou-se um contador automático de esferas, que permite identificar a retenção de alguma esfera no interior do trocador de calor, além de estimar a velocidade linear das mesmas. Resultados preliminares confirmam a eficácia do sistema, quando operado com águas turvas de opacidade superior àquela das águas utilizadas na geração da usina Fontes Nova, de propriedade da Light Energia S/A.

**Palavras-chave:** *Arrefecimento de hidrogeradores, Contador de esferas; esferas abrasivas; sistemas de limpeza de trocadores de calor.*

**Abstract:** This manuscript describes one of the main systems of an innovative alternative equipment for cleaning heat exchangers from hydro-generators, which makes use of abrasive spheres without the need to stop the turbines. Based on optoelectronic components in the infrared band, an automatic ball counter was implemented, allowing to identify the retention of spheres inside the heat exchanger tubes, as well as to estimate their linear velocity. Preliminary results confirm the effectiveness of the system when operated with turbid water of opacity higher than that of the waters used in the generation of the Fontes Nova power plant, owned by Light Energia S/A.

**Keywords:** *hydro-generators, sphere counter; abrasive sphere; heat exchanger cleaning system.*

## 1. INTRODUÇÃO

Trocadores de calor (TC) possuem um papel importante na geração de energia. Sua eficiência é um dos fatores que impactam o funcionamento dos hidrogeradores. A água captada nos canais de fuga das turbinas é usualmente utilizada como fluido de arrefecimento nos TC, e por possuir grande quantidade de matéria orgânica, observa-se a formação de incrustações (fouling) no interior dos tubos do TC. Tais incrustações impactam a capacidade do TC em remover calor do sistema, por sua vez diminuindo a eficiência do gerador. As paradas de manutenção periódicas necessárias às limpezas do TC diminuem a produtividade, gerando prejuízos devido à indisponibilidade dos equipamentos [1,2].

No contexto do projeto de P&D LIGHT/5161-0010/2016, foi desenvolvido um sistema automatizado de limpeza de trocadores de calor de hidrogeradores, utilizando um dispositivo para circulação de esferas abrasivas denominado SIREA. Este sistema permite a limpeza dos TC sem que seja necessária a parada de manutenção, aumentando assim a produtividade da usina. O sistema é capaz de inserir esferas abrasivas nos tubos do TC de forma automatizada, utilizando para tal eletroválvulas comandadas por um controlador lógico programável (CLP).

Um típico TC possui uma grande quantidade de tubos e, durante a inserção das esferas, existe a possibilidade de retenção das mesmas no interior do TC. Desta forma, foi necessário desenvolver uma solução para calcular o saldo de esferas circulantes no sistema. Assim, é objeto deste artigo descrever o desenvolvimento e construção de um sistema optoeletrônico capaz de medir a quantidade de esferas inseridas e retornadas pelo sistema. Este sistema inovador foi batizado de CONDE (contador de esferas) [3].

## 2. METODOLOGIA

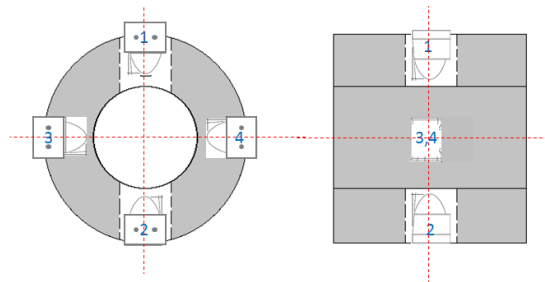
O projeto do CONDE pode ser dividido em duas principais etapas: desenvolvimento e fabricação de um compartimento de acrílico a fim de alojar a interface eletrônica e permitir o acoplamento na tubulação do SIREA, e o desenvolvimento da interface eletrônica e suas conexões elétricas para conexão ao CLP. Este trabalho apresenta apenas a segunda etapa.

A partir das necessidades do projeto, foram escolhidos o par de LED e fototransistor Honeywell, modelos SEP8736 e SDP8436, respectivamente. Ambos operam na faixa do infravermelho com comprimento de onda de 880 nm. Estes componentes permitem a leitura direta da tensão de coletor do fototransistor, o que possibilita ajustar o limiar de detecção e adequar o sistema a meios com maior turbidez. O LED gera um feixe de luz com ângulo de abertura de até 10°, enquanto o fototransistor tem um campo de visão de 18°, assegurando intensidade adequada do sinal para a geometria em questão (esfera abrasiva de 25 mm de diâmetro inserida em um tubo de 38,4 mm de diâmetro).

O sistema foi desenvolvido de forma a possuir robustez em relação a possíveis “falsos positivos” de detecção, que podem ocorrer caso um fragmento de incrustação (*fouling*) de dimensões visíveis despenda-se dos tubos do trocador de calor e cruze o feixe infravermelho, sendo incorretamente contado como uma esfera. Dois mecanismos foram incorporados ao contador de esferas de modo a minimizar este problema, conforme descrito nas subseções a seguir.

### 2.1. Utilização de dois Feixes Infravermelhos

A utilização de dois feixes infravermelhos defasados de 90 graus entre si, conforme ilustrado na Figura 1, reduz substancialmente a ocorrência de falsos positivos.



**Figura 1.** Seção reta e lateral do bloco de acrílico do CONDE, mostrando os dois pares de componentes opto-eletrônicos, defasados de 90°.

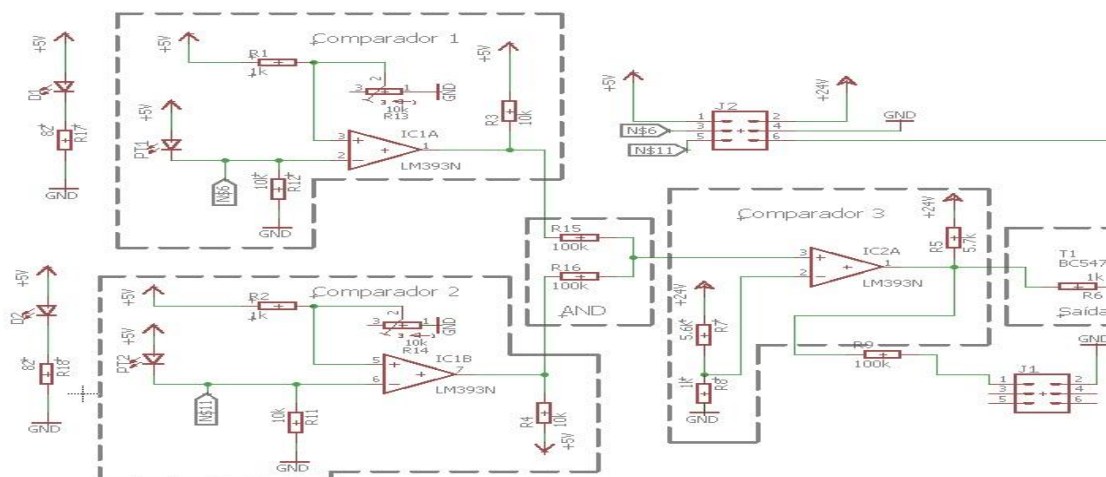
O dispositivo considera que a passagem de um objeto ocorre somente se ambos os feixes forem simultaneamente interrompidos, o que implica que um fragmento de pequenas dimensões teria que passar exatamente no centro da seção reta do tubo para que seja contado.

### 2.2. Estimativa da Velocidade Linear

É possível utilizar o dispositivo contador de esferas para estimar a velocidade linear das mesmas, e então utilizar esta velocidade para descartar falsos positivos que tenham evitado o primeiro mecanismo de robustez. Objetos detectados cujas velocidades lineares sejam muito maiores que a esperada (tipicamente 1 m/s) poderão ser descartados e não contabilizados como esferas.

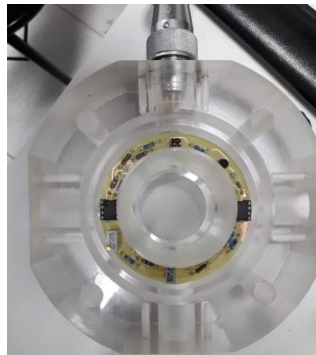
### 2.3. Circuito Eletrônico

A Figura 2 apresenta o circuito eletrônico de excitação e leitura dos 2 pares de componentes optoeletrônicos. O circuito apresenta à esquerda representações



**Figura 2.** Circuito eletrônico do contador de esferas

dos pares LED-fototransistor, medindo-se a tensão de emissor de cada fototransistor. Estas tensões são então fornecidas a 2 comparadores diferenciais LM393, que verificam se as mesmas são maiores ou menores que tensões de limiar, as quais podem ser ajustadas por meio dos potenciômetros R13 e R14. As saídas destes comparadores são ligadas a dois resistores (R15 e R16), formando uma porta do tipo AND. A função deste bloco é garantir que o comparador 3 seja ativado apenas quando ambas as saídas dos comparadores 1 e 2 estiverem ativas. Por fim, o comparador 3 é responsável por chavear o transistor T1, que funciona como uma saída do tipo “*open collector*”. Para fins de inspeção visual da saída do comparador 3, pode-se ligar um LED entre os terminais 1 e 3 de J1. A partir do circuito da figura 2 foi gerada uma placa de circuito impresso com as dimensões necessárias ao encaixe no bloco de acrílico. Esta placa pode ser vista na figura 3 no interior do bloco de acrílico.

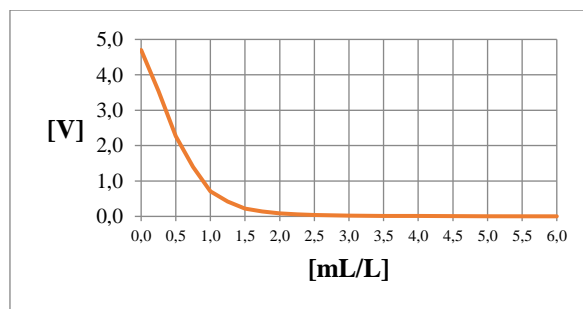


**Figura 3.** Bloco de acrílico do CONDE, mostrando a placa de circuito impresso que contém os componentes optoeletrônicos e o circuito eletrônico da Figura 2.

### 3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1. Simulações de Turbidez

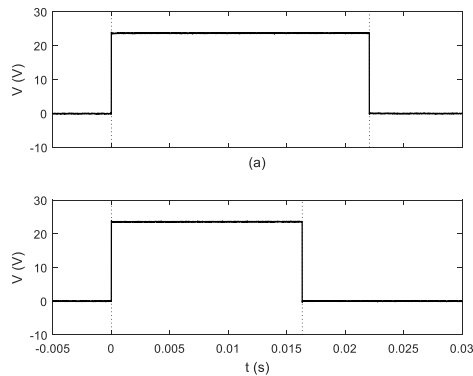
Uma vez que a opacidade da água circulante no interior dos TC afeta o desempenho dos componentes optoeletrônico, a turbidez foi simulada com corante e controlada por meio do percentual em volume adicionado à água limpa durante testes em bancada. Foram testadas concentrações de corante de 0,25 ml/l até 6,0 ml/l em 8 séries de valores de tensão de coletor, permitindo calcular a tensão média para cada concentração, conforme mostrado na Figura 4.



**Figura 4.** Variação da tensão média de coletor em função da concentração de corante.

### 3.2. Ensaio Dinâmico em Bancada

A figura 5 apresenta o resultado de dois ensaios do contador completo, com uma esfera em queda livre a partir de duas alturas distintas, 11 cm e 25,6 cm, estimando-se velocidades médias de 1,53 e 1,13 m/s, respectivamente.



**Figura 5.** Pulsos gerados pelo contador de esferas para 2 velocidades distintas.

## 4. CONCLUSÕES

Os testes em bancada mostraram que o sistema óptico é adequado as necessidades do projeto, no que refere a contagem e medição da velocidade das esferas. Observou-se que a turbidez da água é um fator crítico ao funcionamento do sistema e a sensibilidade do sensor deve ser otimizada de forma a evitar falsos positivos.

Tem-se como meta produzir uma segunda versão do sistema CONDE. Esta nova versão microcontrolada será capaz de executar os cálculos de velocidade e contagem de esfera na própria unidade, dispensando o uso do CLP para esta tarefa. O sistema deverá ser capaz de apresentar os dados, em um visor embarcado no bloco de acrílico.

## 5. AGRADECIMENTOS

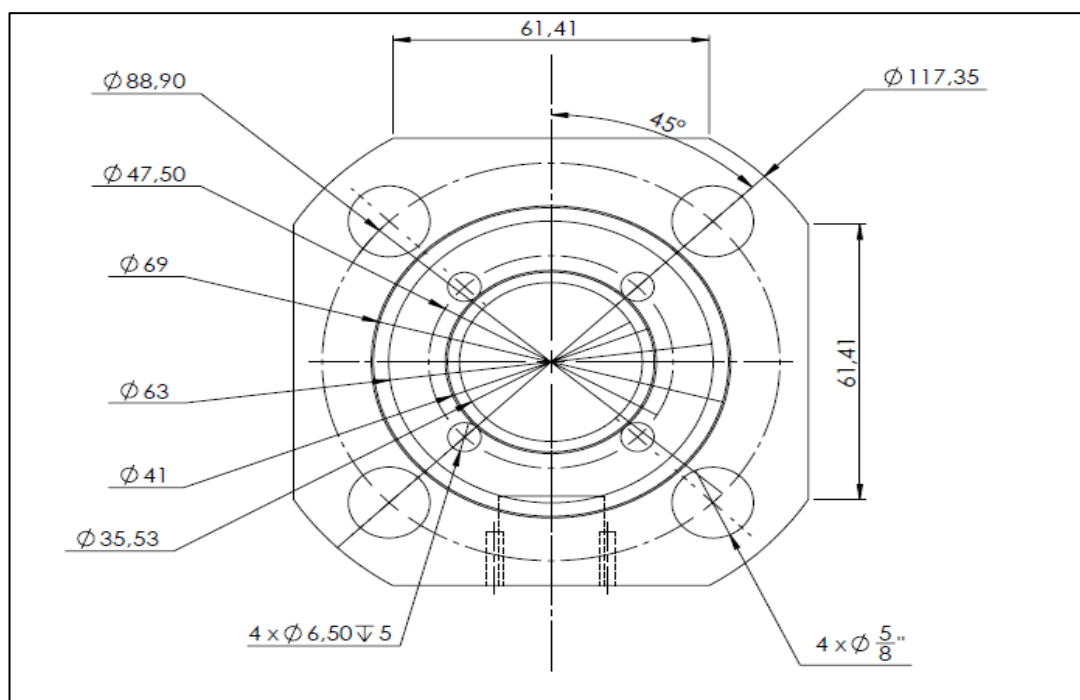
Os autores agradecem pelo apoio financeiro prestado pelo CNPq, FINEP, FAPERJ e Light.

## 6. REFERÊNCIAS

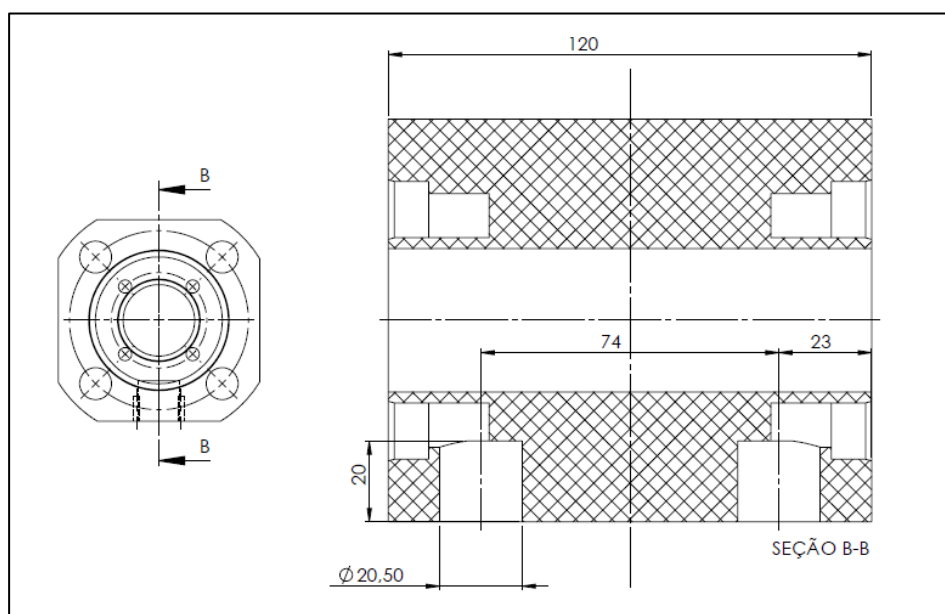
- [1] Frota M N, Braga S L, Ticona E M, Guzman J J M, Ticona J M and Azevedo N J R C, “Avaliação hidrodinâmica e térmica de alternativas tecnológicas para mitigação de incrustações em trocadores de calor de hidro geradores”, *Proc. VI CITENEL 2011* Fortaleza.
- [2] Frota M N, Ticona E M, Neves A V, Silva R P M, Braga S L and Valente Junior G P 2014 *Experimental Thermal and Fluid Science* **53** 197
- [3] Lubicz S B, Oliveira K C, Germano S B, Barbosa C R H, Frota M N and

Valente G, “Automação da circulação de esferas abrasivas: proposição de alternativa tecnológica inovadora de sistema de limpeza de trocadores de calor de hidrogeradores”, *Proc. IX CITENEL 2017* João Pessoa

## Anexo III – Desenhos técnicos do bloco de acrílico

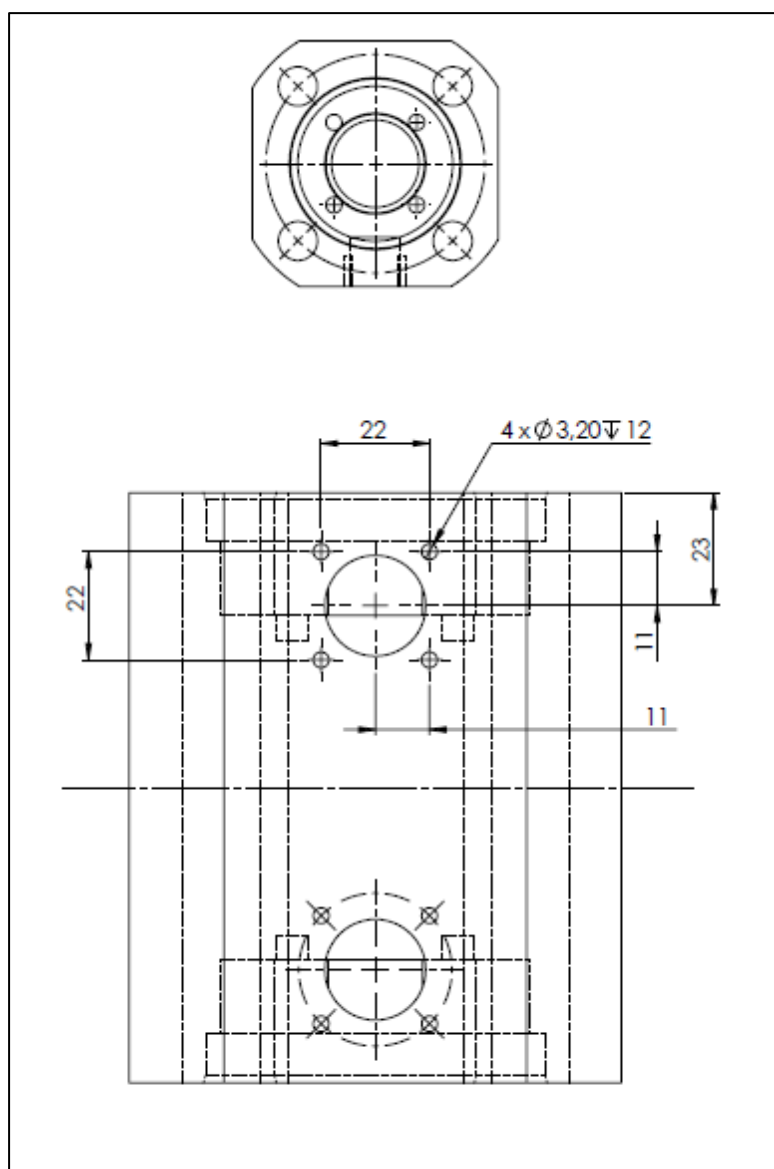


Vista de topo do CONDE 1

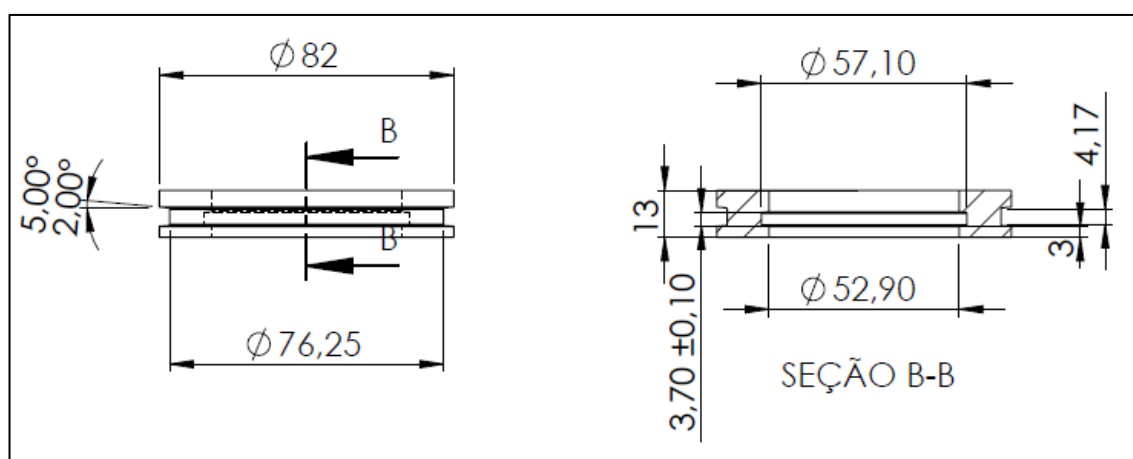


Vista longitudinal do CONDE 2





Vista lateral do CONDE 3



Tampa de vedação do compartimento do circuito do CONDE