

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Manuel Calçada de Sousa**

**Automação e programação da interface homem-  
máquina de um sistema hidráulico para limpeza  
de trocadores de calor**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Maurício Nogueira Frota  
Coorientador: Carlos Roberto Hall Barbosa

Rio de Janeiro

Julho de 2018

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Manuel Calçada de Sousa**

**Automation and programming of the human-  
machine interface of a hydraulic system for  
cleaning heat exchanger**

**Undergraduate Paper**

Manuscript presented to the Mechanical Engineering Department of  
PUC-Rio

Advisor: Maurício Nogueira Frota  
Co-advisor: Carlos Roberto Hall Barbosa

Rio de Janeiro

July, 2018

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são devidos:

Ao meu orientador Maurício Nogueira Frota e coorientador Carlos R. Hall Barbosa pela orientação e suporte durante a realização deste trabalho.

Ao Programa Regulado de P&D Light/Aneel, pela oportunidade de associar o desenvolvimento deste Projeto Final em Engenharia Mecânica ao desenvolvimento do Projeto de P&D Light/Aneel 5161-0010/2016, intitulado: *Cabeça de Série do Sistema de um sistema inovador de limpeza de trocadores de calor de hidro geradores*, em desenvolvimento no âmbito do esforço de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Metrologia.

À competente Equipe de profissionais do CETEM-Automação, pelo acesso à versão 1.0 do software de controle e automação do SIREA.

Ao Projeto FESP e ao ProUni sem os quais não poderia ter ingressado e me mantido nesta universidade.

Aos amigos que fiz durante o curso, cujos quais o apoio e companheirismo foram fundamentais durante minha trajetória nele.

Em especial, à minha família. À minha mãe Ana, avó Dilza, tia Rita e à memória de meu avô Manuel, que me incentivaram a chegar até aqui, fornecendo a base necessária à minha formação em todas as áreas da vida. À Nicolle, companheira de toda a jornada, sempre me auxiliando e tornando tudo mais leve, sem a qual este trabalho não seria possível.

## **RESUMO**

### **Automação e programação da interface homem-máquina de um sistema hidráulico para limpeza de trocadores de calor**

Sistemas de controle e acionamento de dispositivos mecânicos são comuns em todos os tipos de usinas e fábricas. Este projeto final tem como objetivo introduzir uma interface homem-máquina em um sistema de automação de eletroválvulas e controle de processo de um sistema de limpeza de trocadores de calor utilizado para arrefecimento de hidro geradores em usinas hidrelétricas e capacitando-o para operar em modo manual e automático e fornecendo instruções de uso do mesmo.

A motivação para o desenvolvimento deste tema resulta de uma demanda específica gerada pelo projeto de P&D Light/Aneel 5161-0010/2016 desenvolvido pela PUC-Rio e faz parte de uma sequência de projetos que resultarão na entrega final à empresa.

Palavras chaves: Automação. Metrologia. Trocador de Calor. Hidrelétrica. Sistema de Limpeza. SCADA.

## **ABSTRACT**

### **Automation and programming of the human-machine interface of a hydraulic system for cleaning heat exchanger**

Mechanical device control and actuation systems are used in all types of power plants and factories. This work aims to introduce a human-machine interface in an electro valves system and process control of a heat exchanger cleaning system used for cooling hydro generators in hydroelectric power plant, enabling it to operate in manual or automatic mode and also developing a user's guide.

The motivation for the development of this project results from a specific demand generated by R&D Light/Aneel 5161-0010/2016 project developed by PUC-Rio and it is part of a sequence of projects that leads to the final delivery to the company.

Key-words: Automation. Metrology. Heat Exchanger. Hydroelectric. Cleaning Systems. SCADA.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	10
1.1 Objetivo	12
1.2 Metodologia	12
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	13
2.1 Fundamentos sobre a operação de uma usina hidrelétrica	13
2.2 Trocador de calor	16
2.2 Sistemas tradicionais de limpeza	18
<b>3 AUTOMAÇÃO DO SISTEMA INJETOR E RECUPERADOR DE ESFERAS</b>	20
3.1 Sistema de automação do equipamento de limpeza dos trocadores de calor	20
3.2 Sistema de controle do equipamento de limpeza dos trocadores de calor	22
<b>4 SISTEMA DE SUPERVISÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS</b>	
<b>DESENVOLVIDO PARA O SIREA</b>	23
4.1 Elementos do software desenvolvido	24
4.1.1 Variáveis do sistema	24
4.1.2 Telas do supervisório do sistema de automação: Interface IHM	28
<b>5 MANUAL DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO</b>	41
5.1 Modo automático de operação	41
5.2 Modo manual de operação	45
<b>6 ADAPTAÇÃO DO SISTEMA SCADA</b>	47
<b>7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>	52
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	53

## Lista de figuras

2.1 Moinho de água e seus mecanismos	13
2.2 Conversão de energia mecânica em elétrica	14
2.3 Esquema de funcionamento de uma hidrelétrica	15
2.4 Gerador acoplado ao eixo de uma turbina	15
2.5 Esquema de funcionamento de um trocador de calor	17
2.6 Trocador de calor de tubos aletados	18
2.7 Processo manual de lavagem do trocador obstruído pelo seu uso	18
2.8 Eficácia do método alternativo de limpeza, que faz uso de esferas como artefato de limpeza	19
3.1 Sistema injetor e recuperador de esferas abrasivas [4]	20
3.2 Esquemático elétrico do sistema de automação	21
3.3 Quadro de automação do SIREA	21
3.4 PC Industrial Advantech utilizado no SIREA	23
4.1 Esquemático das interfaces do supervisório	28
4.2 Tela Home do supervisório do SIREA (Interface IHM)	29
4.3 Representação de uma válvula solenoide no sistema	29
4.4 Representação no sistema do inversor de frequência acoplado ao motor da bomba e da própria bomba	30
4.5 Representação de um contador no sistema	30
4.6 Representação da leitura de um dos sensores de pressão no sistema	30
4.7 Representação das câmaras de injeção (CI) e de recuperação (CR) com seus respectivos mostradores da quantidade de esferas contidas na câmara	31
4.8 Representação do contador duplo e o tempo de passagem da esfera abrasivo no mesmo	31
4.9 Representação da condição de funcionamento da bomba	31
4.10 Representação da condição de acionamento das válvulas solenoides, e indicação de sua condição logo abaixo de sua representação	31

4.11 Representação da parada de emergência, posicionada na lateral da Caixa-painel do sistema de automação	32
4.12 Representação da velocidade das esferas no sistema	32
4.13 Representação da diferença de pressão no TC	32
4.14 Representação da contagem de ciclos de limpeza no sistema	33
4.15 Representação do interruptor do LED no sistema	33
4.16 Representação do botão responsável por zerar os contadores no sistema	33
4.17 Janela para parametrização do supervisor do SIREA	34
4.18 Teclado virtual para inserção dos parâmetros	35
4.19 Janela de Tempos	36
4.20 Janela de Configurações do inversor	36
4.21 Tela Alarmes do supervisor do SIREA	37
4.22 Alarmes reconhecidos	38
4.23 Tela Gráficos do supervisor do SIREA	38
4.24 Barra de configurações da janela gráfica	39
4.25 Cabeçalho do supervisor do SIREA	41
5.1 Tela Home em modo automático	42
5.2 Janela de parametrizações em modo automático	43
6.1 Tela Home do supervisor do SIREIA (Interface IHM)	51

## **Lista de tabelas**

4.1 Variáveis do sistema SCADA.	25
4.2 Funções da barra de configuração gráfica.	39
6.1 Variáveis do sistema SCADA adaptado.	47

## 1 INTRODUÇÃO

O termo Automação —derivado do latim, *Automatus*—, é usado para denominar a aplicação de técnicas que visam diminuir o uso de mão de obra em processos e agregar vantagens, a exemplo da padronização, controle do processo, eficiência de operação e redução de custos.

O desenvolvimento da automação permitiu ao homem empregar seu tempo e força em outras áreas, levando ao desenvolvimento de novas ciências e ao seu avanço em benefício da sociedade. Teve início com o uso de força animal e da natureza (e.g.: fluxos de água, vento) para mover sistemas mecânicos, drasticamente evoluindo para outras aplicações industriais com o advento da eletricidade.

Em particular no que concerne a usinas hidrelétricas (foco de estudo do presente Projeto Final), a automação industrial ocorre em diversos processos de operação do hidro gerador. Dispositivos automatizados são empregados para abrir e fechar válvulas que controlam o fluxo de água que alimenta as turbinas, manter constante a rotação de seu eixo, dentre outras aplicações.

Uma usina hidrelétrica transforma energia potencial gravitacional da água em energia elétrica pela queda de água de um reservatório superior para um inferior (usualmente o leito de um rio que foi interrompido) fazendo girar turbinas acopladas ao eixo de geradores. Esse processo de transformação de energia gera, também, energia térmica em partes móveis dos sistemas que integram o hidro gerador, em especial nos mancais que suportam os eixos da turbina. Indesejável, esse componente da energia térmica gerada por atrito compromete a eficiência de operação do sistema hidro gerador como um todo. Para não comprometer a integridade física dos materiais desses componentes afetados pelo inevitável calor gerado por atrito, trocadores de calor são usualmente empregados para manter a temperatura dentro das tolerâncias de engenharia definidas em projeto.

Trocadores de calor, como subentendido no próprio nome, cumprem essa função de resfriar os mancais e outros dispositivos móveis auxiliares, assim impedindo o seu superaquecimento além dos limites toleráveis durante sua operação, transferindo (ou “trocando”) o calor dessas estruturas para algum fluido de arrefecimento. No caso da usina hidrelétrica estudada no âmbito deste Projeto Final, a própria água utilizada como força motriz da usina hidrelétrica é utilizada como fluido de trabalho do trocador de calor. Contudo, dependendo da qualidade da água de abastecimento da usina, ocorre a obstrução dos tubos internos dos trocadores de calor, resultado de deposição de matéria orgânica e inorgânica presentes na água de resfriamento (fluido de trabalho do trocador de calor). Tal indesejável obstrução, chamada *fouling* ou *biofouling*, que pode ser parcial ou total, drasticamente compromete o funcionamento do hidro gerador, colocando em risco a sua integridade caso o problema não seja resolvido [1]. Por essa razão, trocadores de calor requerem limpeza periódica para desobstruir suas passagens internas.

Não obstante o elevado grau de automação de subsistemas de uma usina hidrelétrica, a limpeza dos trocadores de calor continua sendo feita da forma tradicional, por meio de um oneroso e demorado processo manual de varetagem mecânica, que requer a parada técnica do hidro gerador. Tal procedimento de limpeza resulta em perdas econômicas, já que interrompe a geração e mobiliza cerca de três a quatro funcionários, por dois dias, para remover o trocador de calor (cerca de uma tonelada de massa) para o pátio externo onde a limpeza é realizada.

Dada as dificuldades vivenciadas no dia-a-dia da equipe de manutenção de uma usina hidrelétrica, um sistema alternativo de limpeza mais inteligente foi concebido. Este Projeto Final discute a automação de um processo de limpeza de trocadores de calor do tipo tubular, processo esse extremamente atraente para um país como o Brasil, cuja matriz energética é essencialmente composta por usinas hidrelétricas. Segundo dados oficiais do Ministério de Minas e Energia de 2017, 67,9% da energia elétrica gerada no Brasil provém de hidro geração.

## 1.1 Objetivo

Este trabalho, produzido para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica, tem por objetivo (i) o desenvolvimento de um software em linguagem *Ladder*, de uso industrial, para operar o Controlador Lógico Programável (PLC) do sistema de automação concebido para operar a alternativa tecnológica de limpeza de trocadores de calor de hidro geradores que é objeto do projeto de P&D Light/Aneel 5161-0010/2016 e (ii) a adaptação deste software para operar uma unidade móvel e simplificada do sistema de limpeza concebido. Este desenvolvimento ocorre em sintonia com a construção do protótipo do sistema de limpeza alternativo, que faz uso de esferas abrasivas, utilizadas como artefatos de limpeza do trocador de calor [2, 3, 4].

## 1.2 Metodologia

Trabalhando em sintonia com a empresa CETEM-Automação, e sob a orientação de dois pesquisadores (orientadores) da Equipe PUC-Rio do projeto de P&D Light/Aneel 5161-0010/2016, este Projeto Final desenvolveu-se segundo os seguintes preceitos metodológicos: (i) estudo dos relatórios internos e das publicações já produzidas pelo mencionado projeto de P&D [2, 3, 4, 5, 6], (ii) pesquisa bibliográfica sobre técnicas de automação disponíveis na literatura especializada [1, 7, 8]; (iii) estudo da ferramenta computacional *SCADA* (*plataforma* vastamente utilizado no ambiente industrial pela sua simplicidade de programação) e (iv) concepção e desenvolvimento do *software* de automação a ser embarcado no sistema de limpeza móvel em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários ao desenvolvimento do Projeto Final, descrevendo, de forma sucinta, o funcionamento de uma usina hidrelétrica e o problema proposto, relacionado à proposição de uma alternativa totalmente automatizada para limpeza dos trocadores de calor do hidrogênador.

### 2.1 Fundamentos sobre a operação de uma usina hidrelétrica

O uso da energia proveniente da água não é algo recente na história, datando do século I a.C., na Grécia antiga, pioneira na produção de energia mecânica fazendo uso de rodas d'água, assim permitindo o funcionamento automatizado de moinhos (figura 2.1) e outros equipamentos necessários para o desenvolvimento humano da época.

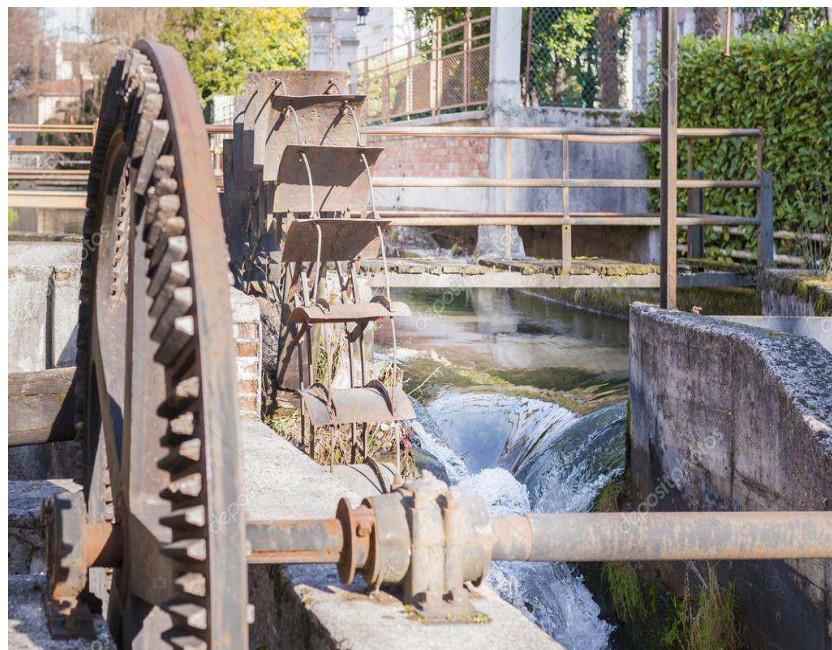


Figura 2.1. Moinho de água e seus mecanismos

Fonte: depositphotos.com

Já bem mais tarde, M. Faraday, em 1831, construiu o primeiro gerador elétrico, também conhecido como dínamo, um dispositivo que permitia a geração de corrente elétrica pela variação do campo magnético, conforme a Lei da Indução de Faraday, ou seja, um campo magnético variável próximo a uma bobina induz a geração de corrente elétrica, que pode ser detectada por um galvanômetro conectado à bobina. É constituído basicamente por um ímã, com seus polos continuamente invertidos, assim permitindo gerar uma variação do campo magnético a partir de uma bobina, variação essa indutora de uma corrente elétrica (figura 2.2), portanto, transformando a energia mecânica (movimento do ímã) em energia elétrica.

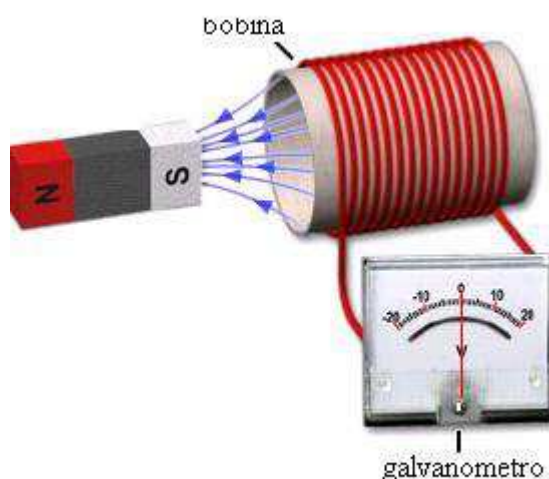


Figura 2.2. Conversão de energia mecânica em elétrica

Fonte: Adaptado de scuolab.it

Com esse advento, tornou-se possível a produção de energia elétrica a partir da queda de água; i.e.: da energia potencial da água armazenada em reservatórios (ou proveniente de rios posicionados em nível mais elevado que a casa de máquinas da usina geradora). O princípio de operação de uma usina hidrelétrica é mostrado, de forma esquemática, na figura 2.3.

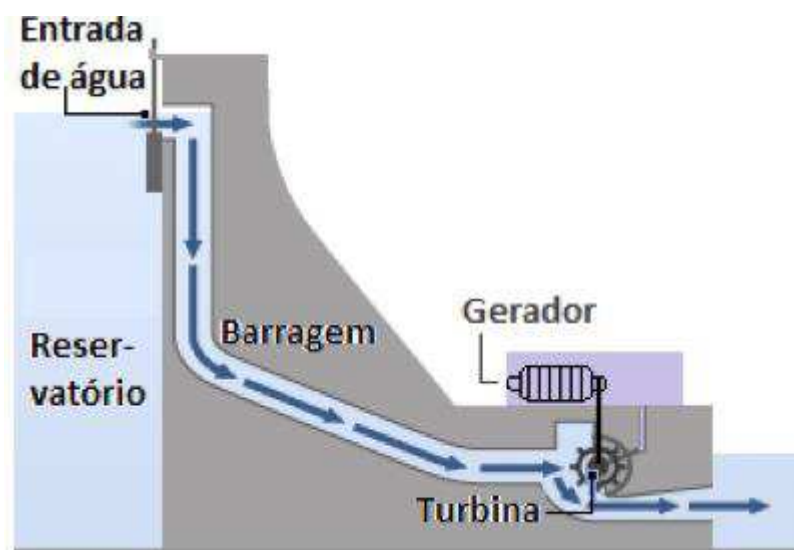


Figura 2.3. Esquema de funcionamento de uma hidrelétrica

Fonte: iesb.blackboard.com

A água, originária do reservatório, flui pela tubulação até a casa de máquinas das turbinas, girando os seus respectivos eixos, cada um acoplado ao seu gerador, assim gerando energia elétrica, conforme esquematicamente ilustrado na figura 2.4.

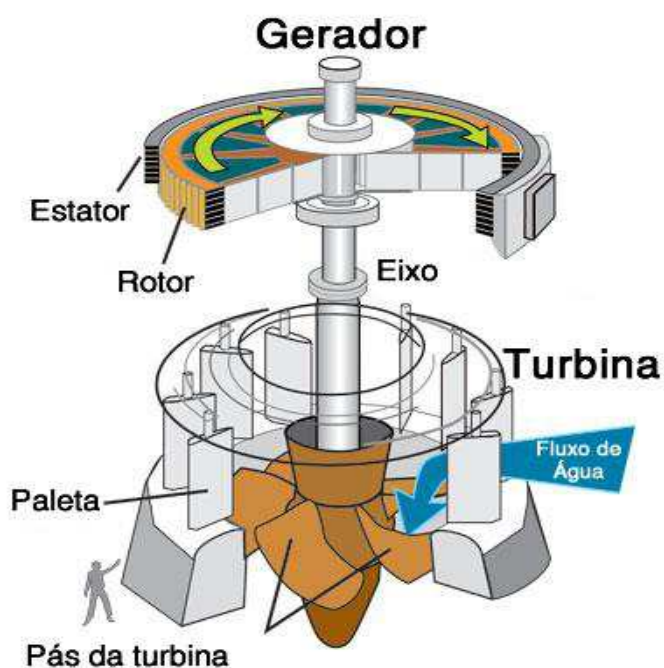


Figura 2.4. Gerador acoplado ao eixo de uma turbina

Fonte: infoescola.com

Usinas hidrelétricas são classificadas segundo o seu porte. No Brasil, a capacidade de geração hidroelétrica instalada, por tipo de instalação, é a seguinte:

- PCH (Pequenas Centrais Hidroelétricas), com capacidade de geração entre 1,1 MW a 30 MW de potência, responsáveis por cerca de 3,5% da produção de energia nacional;
- UHE (Usina Hidrelétrica de Energia), com produção superior a 30 MW; e
- CGH (Centrais Geradoras Hidrelétricas), com produção inferior a 1 MW.

Por tratar-se de sistema mecânico em rotação, a dissipação da energia mecânica gerada por atrito em calor nos mancais que suportam o eixo é altamente indesejável, devendo, portanto, ser evitada, já que pode danificar ou prejudicar a eficiência de operação e reduzir a vida útil dos equipamentos envolvidos. Para mitigar este problema, trocadores de calor são empregados para arrefecer os equipamentos afetados, tema que será abordado na próxima seção.

## **2.2 Trocador de Calor**

Um trocador de calor é um dispositivo que permite a transferência eficiente de energia térmica entre dois meios, mais especificamente, os fluidos de trabalho do trocador. Trocadores de calor são classificados de diversas maneiras, de acordo com sua construção, modo de troca de calor, fluidos, fases dos fluidos de trabalho, dentre outras. A mais usual é a sua denominação por construção, podendo ser do tipo placas aletadas ou tubular, com ou sem aletas (tubo carcaça, serpentina, tubo duplo).

O princípio de funcionamento é o mesmo para todos: troca de calor entre os fluidos de trabalho, usualmente denominados de “fluido quente”, que é o fluido que se deseja esfriar e “fluido frio”, que é o fluido utilizado para resfriar o primeiro. A figura 2.5 ilustra a nomenclatura usualmente utilizada para denominar esses fluidos de trabalho do trocador.

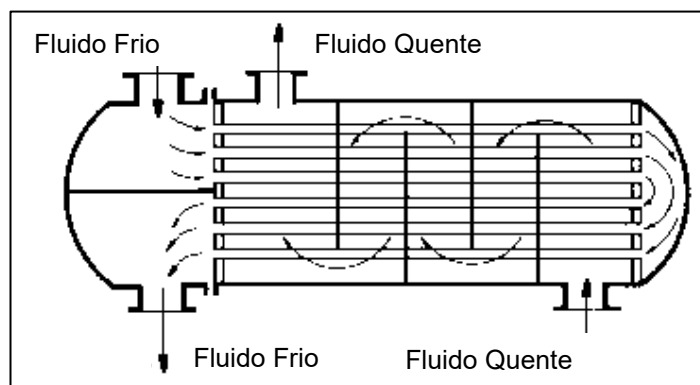


Figura 2.5. Esquema de funcionamento de um trocador de calor

Fonte: Adaptado de me1065.wikidot.com

Trocadores de calor são largamente empregados em equipamentos de todos os portes, desde máquinas de calor (para aquecer ou resfriar), motores e dissipadores de energia térmica em processadores. A figura 2.6 ilustra o tipo de TC utilizado (tubos aletados, montados em passes múltiplos) para arrefecer os hidros geradores da usina Fontes Nova (objeto do Projeto de P&D em desenvolvimento). Neste trocador, a água, que circula pelo interior dos tubos aletados, é o fluido de trabalho utilizado para resfriar o ar que circulou pelo cabeçote do gerador, que é o fluido de trabalho quente do trocador, circulando por fora dos tubos e perpendicularmente a esses. A imagem da direita da figura 2.6 reproduz uma foto do trocador de calor do tipo tubular, água-ar, equipado com 75 tubos de 23 mm de diâmetro interno, 2000 mm de comprimento, utilizado na operação da usina Fontes Nova e selecionado para orientar o desenvolvimento do dispositivo de limpeza que é objeto deste Projeto Final.

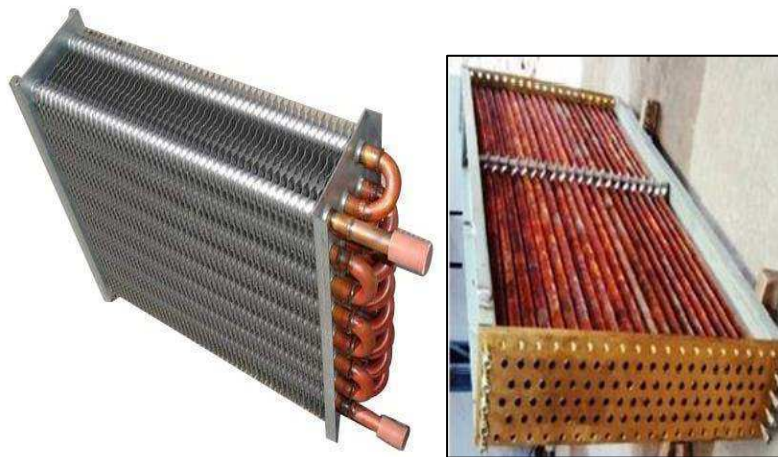


Figura 2.6. Trocador de Calor de tubos aletados (*finned tubes*)

Fonte: indiamart.com

### 2.3 Sistemas tradicionais de limpeza

Com o tempo de uso, materiais de natureza orgânica e inorgânica depositam-se nas paredes internas dos tubos aletados do trocador, obstruindo-os parcialmente, fortemente comprometendo a vazão do fluido de trabalho do trocador e demandando maior potência da bomba que mantém o escoamento.

A figura 2.7 ilustra um desses trocadores de calor após a sua remoção da casa de máquinas da usina e sua desmontagem no pátio externo de trabalho para ser submetido ao trabalhoso processo de limpeza manual.



Figura 2.7. Processo manual de lavagem do trocador obstruído pelo seu uso

Para contornar essa dificuldade, um dispositivo alternativo que faz uso de esferas abrasivas como artefatos de limpeza foi desenvolvido e construído para realizar a limpeza *on-line* dos trocadores, sem o inconveniente de remover e desmontar o trocador e, portanto, sem a necessidade de interromper a geração. Esse equipamento é descrito na referência [2], e a eficácia das esferas como artefatos de limpeza é mostrada na figura 2.8.



Figura 2.8. Eficácia do método alternativo de limpeza, que faz uso de esferas como artefatos de limpeza

Ensaio realizados no ambiente da usina confirmam ser esta uma alternativa tecnológica de limpeza dos tubos do trocador de calor ecológica e inteligente.

Nas seções subsequentes do Relatório serão discutidos os aspectos relacionados à automação desse sistema (descrito na referência [2]), que tem o objetivo de injetar e recuperar as esferas abrasivas responsáveis pela limpeza dos tubos do trocador; i.e.: a automação de um conjunto de válvulas solenoides que permitem abrir e fechar válvulas que controlam o escoamento do fluido de trabalho (água) do trocador, fluido esse que transporta as esferas abrasivas para dentro dos tubos do trocador.

### 3 AUTOMAÇÃO DO SISTEMA INJETOR E RECUPERADOR DE ESFERAS

As imagens da figura 3.1 ilustram, à esquerda, o projeto de concepção e, à direita, o equipamento construído para injetar e recuperar esferas abrasivas no interior dos tubos do trocador de calor, que constituiu objeto de um Projeto Final em Engenharia Mecânica [9], e que está sendo aprimorado no âmbito da Dissertação de Mestrado do mesmo autor, em desenvolvimento no Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio [10]. Este capítulo deste Projeto Final se concentra nas melhorias implementadas no sistema de automação desenvolvido para automatizar o equipamento previamente construído.

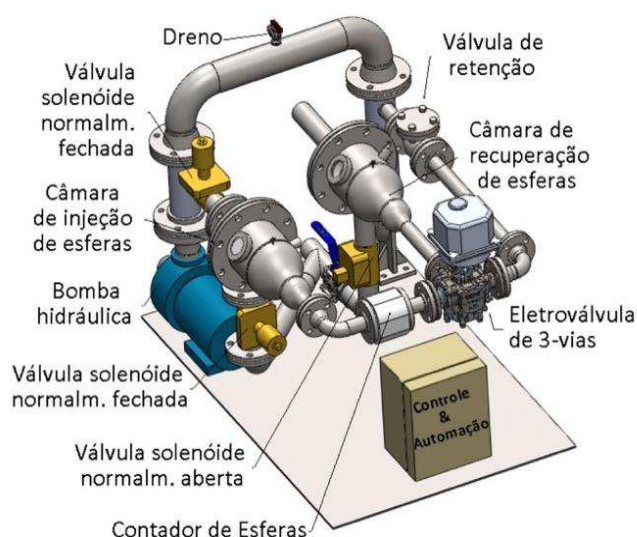


Figura 3.1. Sistema Injetor e recuperador de esferas abrasivas [4]

#### 3.1 Sistema de automação do equipamento de limpeza dos trocadores de calor

A figura 3.2 ilustra o diagrama elétrico do sistema de automação, que inclui um Inversor de Frequência para controlar a frequência (portanto a rotação) do motor acoplado à bomba hidráulica, responsável pelo bombeamento do fluido de trabalho do trocador, que se constitui no fluido de transporte das esferas abrasivas. O esquemático mostra, também, os respectivos comandos das eletroválvulas instaladas no sistema.

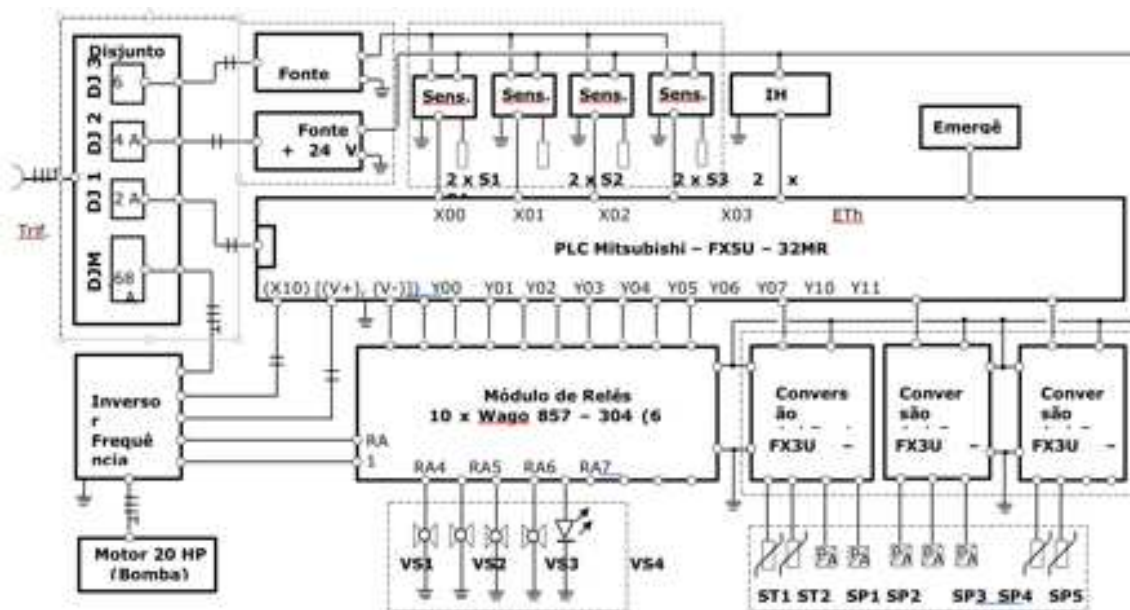


Figura 3.2. Esquema elétrico do Sistema de Automação

Já na figura 3.3 abaixo, é possível ver a automação do Sistema Injetor e Recuperador de Esferas (SIREA) no interior do quadro instalado na usina de Fontes Nova.



Figura 3.3. Quadro de automação do SIREA

Conforme ilustrado, este sistema de limpeza de trocadores de calor constitui-se em um dispositivo servo hidráulico comandado por eletroválvulas que controlam o fluxo de água de resfriamento do trocador de calor a ele acoplado.

No que concerne ao bloco de Comando e Controle, a figura 3.2 mostra os detalhes das conexões elétricas das entradas digitais do PLC, um equipamento projetado para controlar e comandar aplicações e processos, assim como os pontos de alimentação elétrica e a informação, vinda do Inversor de Frequência, informando se este encontra-se ativado ou desativado. São igualmente mostradas as conexões das saídas do PLC, conectadas ao bloco de relés, responsáveis pelo acionamento direto das quatro válvulas solenoides, que são válvulas eletromecânicas controladas, sendo duas normalmente fechadas (NF, i.e., quando recebem um sinal, permitem a passagem de fluidos) e duas normalmente abertas (NA, i.e., quando recebem um sinal, interrompem o escoamento do fluido), que integram o sistema de automação.

### **3.2 Sistema de controle do equipamento de limpeza dos trocadores de calor**

Fazem parte do sistema de controle do Sistema Injetor e Recuperador de Esferas (SIREA) proposto cinco sensores de pressão, quatro contadores de esferas, sendo dois utilizados como contador duplo e a Interface Homem-Máquina, a qual se constitui na tela do Sistema Supervisório de comando e controle do sistema de automação (*Supervisory Control and Data Acquisition* - SCADA), que será abordado em detalhe no próximo capítulo.

Os sensores de pressão, de diafragma faceado ao processo, próprio para meios aquosos com partículas sólidas, da marca Wika modelo S-11, têm suas localizações: (i) na entrada da bomba (P1) recebendo a água vinda do anel de alimentação (AA), (ii) na saída da bomba (P2) antes da câmara de injeção, (iii) logo após o injetor (P3), (iv) pouco antes do trocador de calor (P4) e (v) na saída do TC (P5) anteriormente à câmara de recuperação.

Já os contadores de esferas, tema de outra dissertação de mestrado em Metrologia [11], estão instalados: (i) no tramo do fluxo de saída da câmara de injeção (S1); (ii) no tramo do fluxo de entrada da câmara de recuperação (S2 e S3) e (iii) no tramo que interliga as câmaras de recuperação e de injeção (S4), sinalizando assim quantas esferas foram transpostas de uma câmara à outra. Mais especificamente, as esferas que retornam à Câmara de Recuperação são as esferas que já circularam pelos tubos internos do trocador durante um ciclo de limpeza e as esferas transpostas são as esferas recuperadas e reposicionadas na câmara de injeção para cumprirem mais um ciclo de limpeza.

O sistema dispõe, também, de um botão de comando para paradas de emergência, que aborta a operação do equipamento quando acionado.

A interface homem-máquina (IHM) utilizada como supervisor do sistema de automação do SIREA é responsável pelo monitoramento das operações realizadas pelo software SCADA, permitindo a supervisão e controle do sistema de controle e automação em tempo real por meio de uma interface gráfica. Interfaces Homem-Máquina requerem um sistema embarcado dedicado à execução desses softwares sob plataforma Windows para melhor desempenho, necessitando assim de um computador industrial, já que estes contam também com protocolos de comunicação mais seguros e rápidos, como *Modbus* e TCP/IP, além do tradicional *Ethernet*, para troca de dados com o PLC.

O modelo utilizado neste projeto, executando o SCADA Indusoft Web Studio, é um PC industrial da marca Advantech modelo TPC-1251T (figura 3.4), com comunicação via *Modbus* e *Ethernet*, conectado com o PLC Mitsubishi FX5U-32MR.



Figura 3.4. PC Industrial Advantech utilizado no SIREA

Fonte: [advantech.com](http://advantech.com)

#### **4 SISTEMA DE SUPERVISÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS DESENVOLVIDO**

O SCADA, também chamado de supervisor, é a interface gráfica de controle e monitoramento, trabalhando diretamente com o PLC para a automação do sistema por meio de comunicação *Modbus*. O software para o SIREA foi desenvolvido em parceria com a equipe do CETEM Automação Industrial em linguagem *Ladder* e se divide em duas interfaces: uma de programação e outra de *run-time*, dedicada à execução do programa.

A plataforma SCADA utilizada para o desenvolvimento da automação do SIREA foi o Indusoft Web Studio. O desenvolvimento deste Projeto Final foi viabilizado por uma versão de estudante, gentilmente cedida, sem custos, à PUC-Rio, permitindo não só a programação e criação de interfaces, mas, também, a execução das mesmas durante as diferentes fases de testes empreendidas.

#### 4.1 Elementos do software desenvolvido

Como já definido, o sistema SCADA atua **recebendo e enviando informações de, e para**, o PLC, por meio de protocolos de comunicação, traduzindo os conteúdos, graficamente, para o usuário final. Na sua parte de programação, este software se subdivide nos seguintes quatro módulos funcionais, complementares entre si: **Global**, que congrega as variáveis do sistema e outras informações de segurança; **Gráficos**, responsável pelas telas do programa; **Tarefas**, que executam as transformações de dados e programados alarmes e *scripts*; e **Comunicação**, responsável pela definição dos protocolos de comunicação, *drivers* e conexões do sistema.

##### 4.1.1 Variáveis do sistema

O módulo Global, como mencionado, engloba as variáveis do sistema, i.e., os *inputs*, *outputs* e suas transformações, descrevendo um objeto genérico em seus atributos.

Também chamadas de *tags*, essas variáveis são vetores que podem tomar as formas: real (números reais), inteira (números inteiros), *booleana* (falso/0 e verdadeiro/1) e *string* (com caracteres alfanuméricos), podendo ser enviadas pelo PLC para o sistema supervisório com registros dos outros componentes do sistema, assim como enviadas do sistema supervisório para o PLC, inserindo informação no mesmo.

As variáveis fundamentais para o funcionamento do programa desenvolvido para o SIREA são exibidas na tabela 4.1, abaixo, juntamente com sua forma e descrição.

Tabela 4.1. Variáveis do sistema SCADA

Variável	Forma	Descrição
nCiclosProgramados	Inteira	Número de ciclos de limpeza programados pelo usuário (modo automático)
nCiclosRealizadosAtual	Inteira	Números de ciclos de limpeza realizados até o momento (modo automático)
nIntervaloCiclos	Inteira	Intervalo, em segundos, entre os ciclos consecutivos (modo automático)
nCI	Inteira	Contagem de esferas na câmara de injeção
nCR	Inteira	Contagem de esferas na câmara de recuperação
nTempo	Inteira	Vetor que armazena os tempos correspondentes a cada fase da operação (modo automático)
nVelocidadeMaxima	Inteira	Frequência definida pelo usuário para o inversor da bomba (modo automático)
nEsferas	Inteira	Quantidade de esferas inseridas no sistema (modo automático)
nInversorHz	Inteira	Frequência definida pelo usuário para o inversor da bomba (modo manual)
nInfoHz	Inteira	Valor atual da frequência do inversor da bomba
rVelocidade	Real	Velocidade da esfera no contador duplo
E_S1_ms	Real	Vetor contendo as 10 últimas larguras de pulso geradas pela passagem das esferas no contador S1
E_S2_ms	Real	Vetor contendo as 10 últimas larguras de pulso geradas pela passagem das esferas no contador S2
E_S3_ms	Real	Vetor contendo as 10 últimas larguras de pulso geradas pela passagem das esferas no contador S3

Tabela 4.1. Variáveis do sistema SCADA (cont.)

Variável	Forma	Descrição
E_S4_ms	Real	Vetor contendo as 10 últimas larguras de pulso geradas pela passagem das esferas no contador S4
E_Esfera_mm	Real	Diâmetro nominal das esferas abrasivas
E_S1_controle_ms	Real	Variação aceitável da largura de pulso para que o contador S1 reconheça o objeto como uma esfera abrasiva
E_S2_controle_ms	Real	Variação aceitável da largura de pulso para que o contador S2 reconheça o objeto como uma esfera abrasiva
E_S3_controle_ms	Real	Variação aceitável da largura de pulso para que o contador S3 reconheça o objeto como uma esfera abrasiva
E_S4_controle_ms	Real	Variação aceitável da largura de pulso para que o contador S4 reconheça o objeto como uma esfera abrasiva
rP1	Real	Pressão do sensor P1 em bar
rP2	Real	Pressão do sensor P2 em bar
rP3	Real	Pressão do sensor P3 em bar
rP4	Real	Pressão do sensor P4 em bar
rP5	Real	Pressão do sensor P5 em bar
rDeltaP	Real	Diferença de pressão entre o sensor P4 e P5 em bar
nTeste[4]	Real	Largura do pulso gerado pela passagem da esfera no contador duplo (i.e., entre S2 e S3)
bManualVs1	Booleana	Acionamento da válvula Vs1 (modo manual)
bManualVs2	Booleana	Acionamento da válvula Vs2 (modo manual)
bManualVs3	Booleana	Acionamento da válvula Vs3 (modo manual)
bManualVs4	Booleana	Acionamento da válvula Vsd (modo manual)

Tabela 4.1. Variáveis do sistema SCADA (cont.)

Variável	Forma	Descrição
bBomba	Booleana	Acionamento do inversor da bomba (modo manual)
bEmergencia	Booleana	Estado de acionamento do botão de emergência do sistema
bLedManual	Booleana	Acionamento do LED manual do sistema
bLedAuto	Booleana	Acionamento do LED automático do sistema
bContagem	Booleana	Aciona a operação em modo contagem
bAuto	Booleana	Alterna entre os modos automático e manual de operação
bIniciar	Booleana	Inicia a operação de limpeza (modo automático)
bCarregar	Booleana	Envia os parâmetros inseridos pelo usuário para o PLC (modo automático)
cSirea[0].bStatusBomba	Booleana	Estado de funcionamento da bomba
cSirea[0].bStatusVs1	Booleana	Estado da válvula solenoide Vs1
cSirea[0].bStatusVs2	Booleana	Estado da válvula solenoide Vs2
cSirea[0].bStatusVs3	Booleana	Estado da válvula solenoide Vs3
cSirea[0].bStatusVs4	Booleana	Estado da válvula solenoide Vsd

No ambiente **Tarefas**, estão programados os alarmes (a serem parametrizados pelo usuário final na IHM) com base em informação dos sensores de pressão do sistema, além das variáveis de transformação, obtidas por operações matemáticas sobre as outras variáveis.

Cada variável exibida na tabela 4.1, exceto as de transformação, que são geradas pelo sistema para uso nele próprio (no caso específico do SIREA), é lida e/ou gravada no PLC por meio de conexão RS-422.

Com isso, o módulo de Comunicação do software está associado a um *driver* compatível com esse protocolo e com os equipamentos utilizados, assim como o endereço de cada componente do sistema. O endereço da estação (PLC), com as ações (ler - somente receber dados ou ler+escrever - receber e enviar dados) permitidas a cada uma e sua taxa de *scan* (i.e., obtenção dos dados) também se fazem presentes nesta associação.

#### 4.1.2 Telas do supervisor do sistema de automação: interface IHM

A interface do supervisor em modo *run-time*, a ser operado pelo usuário final, faz parte do módulo **Gráficos** do software de programação do Indusoft, que é constituído por três telas principais e mais três acessíveis, em formato de janela sobreposta, conforme esquematizado na figura 4.1.

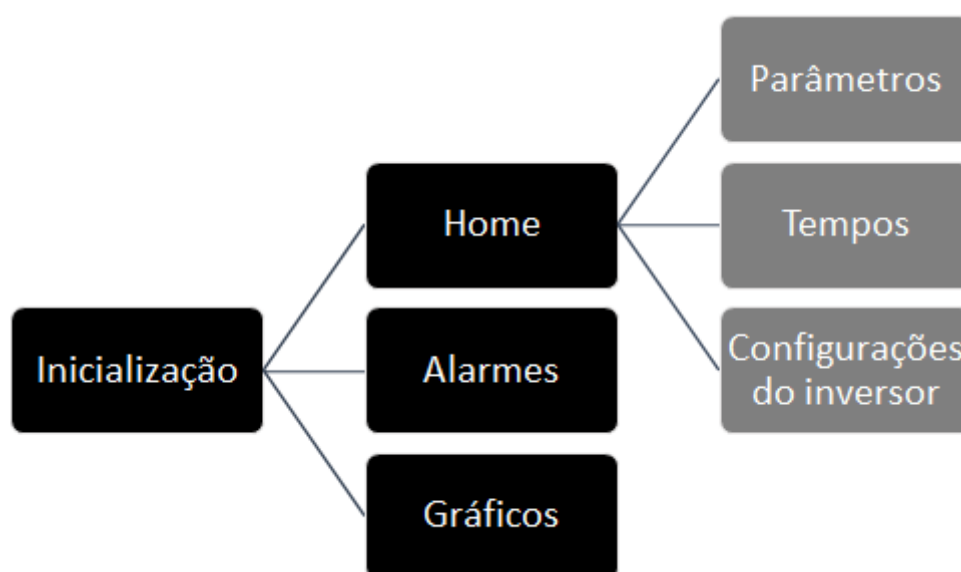


Figura 4.1. Esquemático das interfaces do supervisor

A primeira tela, **Home** (figura 4.2), apresentada ao usuário na inicialização do supervisor, constitui-se na interface principal da IHM. Apresenta os parâmetros de controle do sistema em tempo real e permite a operação do sistema em dois modos de operação: manual e automático, este último comandado pela parametrização de controle implementada pelo operador. A tela principal, permite, ainda, acesso a outras telas, que serão posteriormente detalhadas.

É nesta interface IHM que o usuário poderá ver um esquema representativo do SIREA, com todos os seus componentes, acompanhando também o passo-a-passo de seu funcionamento.

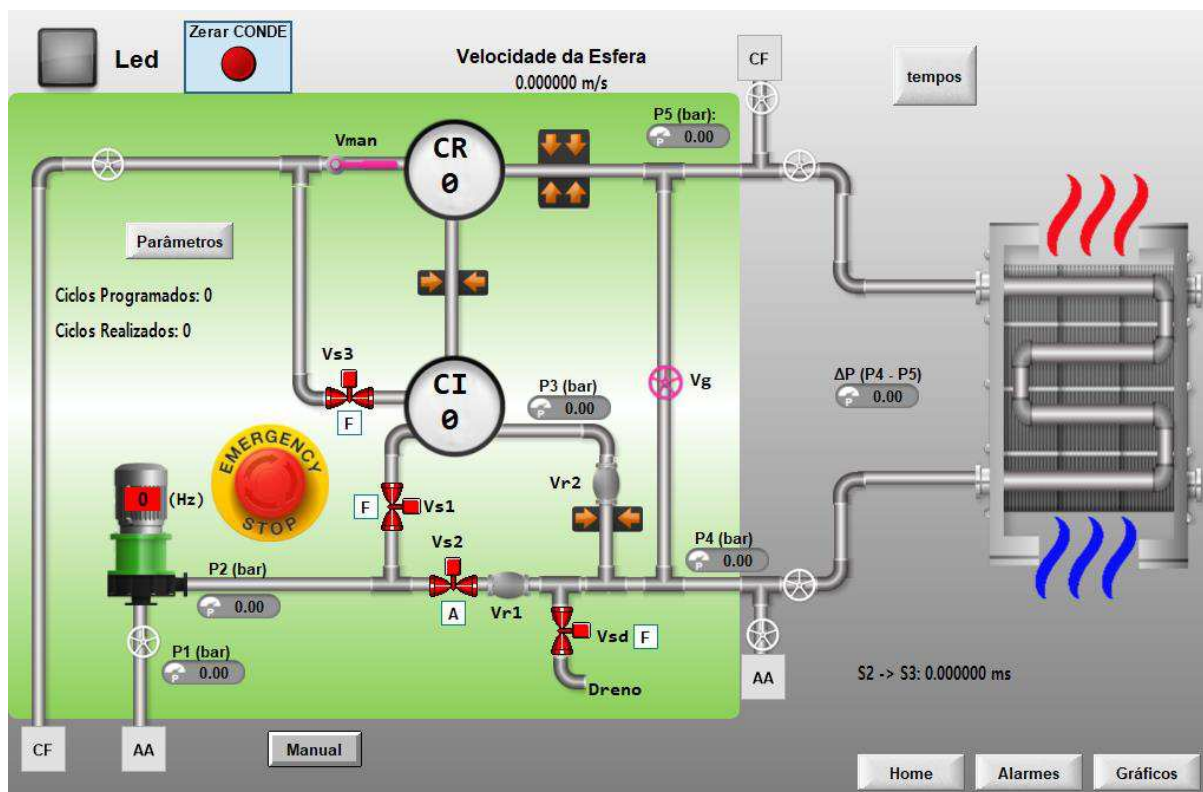


Figura 4.2. Tela Home do supervisório do SIREA (Interface IHM)

Dos componentes do sistema presente na interface IHM acima, que podem ser controlados pela IHM, destacam-se: (i) as quatro válvulas solenoides (Vs1, Vs2, Vs3, Vsd), cuja representação no diagrama está destacada na figura 4.3 abaixo; (ii) o inversor de frequência, que comanda o motor da bomba (figura 4.4) e (iii) os quatro contadores (figura 4.5), sendo dois utilizados como contador duplo.



Figura 4.3 – Representação de uma válvula solenoide no sistema



Figura 4.4 – Representação no sistema do inversor de frequência acoplado ao motor da bomba e da própria bomba



Figura 4.5 – Representação de um contador no sistema

Conforme anteriormente abordado, a instrumentação do SIREA permite a aquisição de dados pelo PLC, que, por sua vez, se comunica com a IHM, exibindo-os.

Os chamados *dados somente de leitura* (i.e., factíveis de serem lidos, mas não de serem escritos no PLC), são exibidos na interface como parâmetros do sistema. São eles: Transdutores de pressão (figura 4.6), instalados em cinco posições distintas da instalação, ilustrados no diagrama da figura 4.2; contagem das esferas na câmara de recuperação e de injeção por meio dos quatro contadores instalados (figura 4.7); tempo de passagem nos dois contadores instalados lado-a-lado (figura 4.8); estado de funcionamento da bomba (figura 4.9); situação das válvulas solenoides (“A” denota válvula aberta e “F” válvula fechada) (figura 4.10) e do acionamento do botão manual de emergência (figura 4.11), acessível na bancada do sistema.

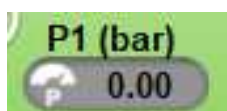


Figura 4.6. Representação da leitura de um dos sensores de pressão no sistema

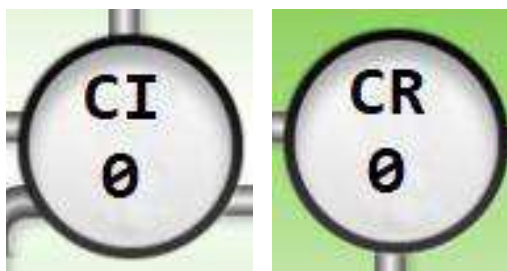


Figura 4.7. Representação das câmaras de injeção (CI) e de recuperação (CR) com seus respectivos mostradores da quantidade de esferas contidas na câmara

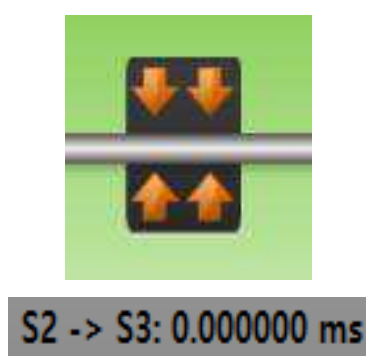


Figura 4.8. Representação do contador duplo (acima) e o tempo de passagem (em baixo) da esfera abrasiva no mesmo

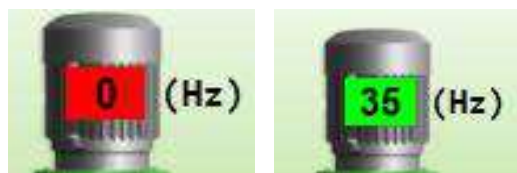


Figura 4.9. Representação da condição de funcionamento da bomba, desligada (à esquerda) e ligada (à direita)

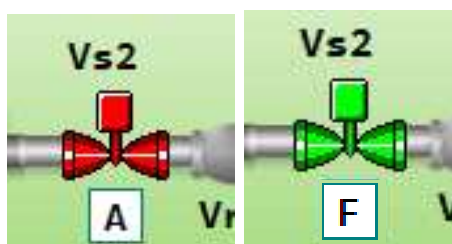


Figura 4.10. Representação da condição de acionamento (vermelha para não-acionada e verde para acionada) das válvulas solenóides, e indicação de sua condição (aberta ou fechada) logo abaixo de sua representação



Figura 4.11. Representação da parada de emergência, posicionada na lateral da Caixa-painel do Sistema de Automação

A tela do IHM apresenta, também, os registros de comando manual (R); o canal de fuga (CF); o anel de alimentação da água de resfriamento do trocador (AA) e o próprio trocador de calor a ser submetido ao processo de limpeza pela técnica de esferas abrasivas, esquematicamente apresentado. Estes elementos não estão sob controle do supervisor ou do PLC, assim servindo somente de grafismo para a visualização completa do sistema.

É possível, também, medir a velocidade individual de cada esfera que cruza o feixe infravermelho do dispositivo opto-eletrônico concebido para contar esferas [11], ilustrado na figura 4.12 (a velocidade é medida pela largura do pulso gerado pela passagem de uma esfera de diâmetro conhecido).

**Velocidade da Esfera**  
0.000000 m/s

Figura 4.12. Representação da velocidade das esferas no sistema

Já a diferença de pressão no TC (figura 4.13), constitui-se noutra transformada do sistema, utilizada para medir a perda de carga imposta pela incrustação no trocador de calor. A medição desta queda de pressão diferencial é requerida para se calcular o Fator de Incrustação do trocador de calor.

$\Delta P$  (P4 - P5)  
0.00

Figura 4.13. Representação da diferença de pressão no TC

Outro parâmetro importante de controle é a contabilização do total de esferas inseridas na Câmara de Injeção (CI) e o total de esferas que retornam à Câmara de Recuperação (CR). Esta informação é importante para programar a contagem dos ciclos programados e dos realizados (i.e., número de vezes que as esferas partiram do injetor e foram recolhidas no recuperador), conforme ilustrado na figura 4.14. O interruptor LED mostrado na figura 4.15 aciona a iluminação do interior das câmaras, facilitando a observação das esferas.

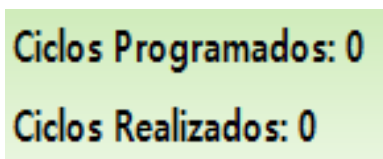


Figura 4.14. Representação da contagem de ciclos de limpeza no sistema




Figura 4.15. Representação do interruptor do LED no sistema

A figura 4.16 ilustra o controle que permite zerar os contadores de esferas (em modo manual).



Figura 4.16 Representação do botão responsável por zerar os contadores no sistema

O sistema oferece uma alternativa para operação em modo automático, que pode ser previamente programado ao acessar as telas **Pârametro**, **Tempos** e **Configurações** do Inversor. Dando prosseguimento, a janela **Parâmetros** (figura 4.17), acessável pela tela **Home**, e utilizada para implementar a parametrização, pelo usuário, assim orientando o funcionamento do sistema em modo automático.

 Parâmetros

### Configurações

Número de Ciclos: 0

Intervalo entre Ciclos: 0 seg

Hz Máximo: 0

Número de Esferas: 0

Manual

Operação Contagem

Iniciar

Carregar

Varição em S1 +/-: 0.000 ms

Varição em S2 +/-: 0.000 ms

Varição em S3 +/-: 0.000 ms

Varição em S4 +/-: 0.000 ms

Distância S2<->S3: 0.000 mm

Rampa	$V_{s1} > V_{s2}$	Injeção	Transição Inj / Rec	$V_{s2} > V_{s1}$	Recuperação	Transposição
0		0	0		0	0

Figura 4.17. Janela para parametrização do supervisor do SIREA

Nessa tela, pode ser definido o modo de operação (manual ou automático, abordados nos próximos capítulos), além de alternar entre o modo de operação comandado pelos pulsos gerados pelo Contadores de esferas ou modo de funcionamento por tempos críticos pré-determinados (somente para o modo automático). Devem ser inseridos, também no modo automático, os parâmetros do ciclo, ou seja, o número total de ciclos e seus intervalos entre ciclos, frequência máxima do inversor da bomba, quantidade de esferas inseridas, tempos em cada etapa do sistema e variações para os contadores (a fim de que reconheçam o sinal gerado como uma das esferas abrasivas). Ao selecionar um destes parâmetros editáveis, uma janela com teclado virtual (figura 4.18) será aberta, possibilitando a operação.



Figura 4.18. Teclado virtual para inserção dos parâmetros

Resumidamente, no modo de contagem de esferas, a operação avança se uma das duas condições forem satisfeitas, a saber: (i) todas as esferas já deixaram a Câmara Injetora ou retornaram à Câmara Recuperadora de esferas; (ii) o tempo máximo para cada etapa foi completado. Já no modo de operação por tempos críticos, o tempo máximo inserido é sempre respeitado nos processos de abertura e fechamento de eletrovalvulas.

Na janela **Tempos** (figura 4.19) é exibido um histórico da duração de acionamento de cada um dos quatro contadores, gerado pela passagem das esferas, contendo os dez últimos registros.

Tempos			
S1	S2	S3	S4
Ultima: 0.000 ms	Ultima: 0.000 ms	Ultima: 0.000 ms	Ultima: 0.000 ms
Ultima -1: 0.000 ms	Ultima -1: 0.000 ms	Ultima -1: 0.000 ms	Ultima -1: 0.000 ms
Ultima -2: 0.000 ms	Ultima -2: 0.000 ms	Ultima -2: 0.000 ms	Ultima -2: 0.000 ms
Ultima -3: 0.000 ms	Ultima -3: 0.000 ms	Ultima -3: 0.000 ms	Ultima -3: 0.000 ms
Ultima -4: 0.000 ms	Ultima -4: 0.000 ms	Ultima -4: 0.000 ms	Ultima -4: 0.000 ms
Ultima -5: 0.000 ms	Ultima -5: 0.000 ms	Ultima -5: 0.000 ms	Ultima -5: 0.000 ms
Ultima -6: 0.000 ms	Ultima -6: 0.000 ms	Ultima -6: 0.000 ms	Ultima -6: 0.000 ms
Ultima -7: 0.000 ms	Ultima -7: 0.000 ms	Ultima -7: 0.000 ms	Ultima -7: 0.000 ms
Ultima -8: 0.000 ms	Ultima -8: 0.000 ms	Ultima -8: 0.000 ms	Ultima -8: 0.000 ms
Ultima -9: 0.000 ms	Ultima -9: 0.000 ms	Ultima -9: 0.000 ms	Ultima -9: 0.000 ms

Figura 4.19. Janela de Tempos

Ao clicar sob a representação do inversor da bomba (figura 4.4), uma janela (figura 4.20) permite alternar entre os modos de operação automático e manual . No modo manual, permite ligar e desligar a bomba, além de inserir um valor de frequência para o seu inversor.



Figura 4.20. Janela de configurações do inversor

Na tela Alarmes (figura 4.21) é possível definir os limites de normalidade para acionamento dos alarmes de cada um dos cinco sensores de pressão instalados no SIREA, permitindo, também, definir limites automáticos destes limites com base na regra 100-80-30-10% em cada estágio, i.e., define-se um valor para estágio criticamente alto em cada sensor e, ao pressionar este botão, o sistema automaticamente preenche os limites de operação das outras fases usando 80% do valor inserido para Alto, 30% para Baixo e 10% para criticamente baixo.

**Configurações de Limites**

	P1 (bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	P5 (bar)
<b>Critico Alto</b>	4.00	10.00	10.00	5.00	10.00
<b>Alto</b>	3.20	8.00	8.00	4.00	8.00
<b>Baixo</b>	1.20	3.00	3.00	1.50	3.00
<b>Critico Baixo</b>	0.40	1.00	1.00	0.50	1.00

Limites Automáticos  
 100%  
  
 80%  
  
 30%  
  
 10%

Mensagem	Valor	Hora de ativação ▾	Hora de reconhecimento
Pressão1 Baixa	0.000000	06/21/2018 10:08:23	
Pressão1 Crítico Baixa	0.000000	06/21/2018 10:08:23	
Pressão2 Baixa	0.000000	06/21/2018 10:08:23	
Pressão2 Crítico Baixa	0.000000	06/21/2018 10:08:23	
Pressão3 Baixa	0.000000	06/21/2018 10:08:23	
Pressão3 Crítico Baixa	0.000000	06/21/2018 10:08:23	
Pressão4 Baixa	0.000000	06/21/2018 10:08:23	
Pressão4 Crítico Baixa	0.000000	06/21/2018 10:08:23	
Pressão5 Baixa	0.000000	06/21/2018 10:08:23	
Pressão5 Crítico Baixa	0.000000	06/21/2018 10:08:23	

Reconhecer Todos

Home Alarmes Gráficos

Figura 4.21. Tela Alarmes do supervisório do SIREA

Abaixo dessas configurações, encontra-se uma lista com todos os alarmes acionados, até o momento, no sistema, juntamente com os seus valores e hora da ativação. O botão “Reconhecer Todos” reconhece todos os alarmes exibidos, modificando sua coloração de vermelho para verde, retirando seu aviso de emergência e registrando, também, o horário de seu reconhecimento (figura 4.22).

Mensagem	Valor	Hora de ativação	Hora de reconhecimento
✓ Pressão3 Crítico Baixa	0.000000	06/23/2018 18:46:07	06/23/2018 18:47:41
✓ Pressão5 Baixa	0.000000	06/23/2018 18:46:07	06/23/2018 18:47:41
✓ Pressão4 Crítico Baixa	0.000000	06/23/2018 18:46:07	06/23/2018 18:47:41
✓ Pressão4 Baixa	0.000000	06/23/2018 18:46:07	06/23/2018 18:47:41
✓ Pressão3 Baixa	0.000000	06/23/2018 18:46:07	06/23/2018 18:47:41
✓ Pressão5 Crítico Baixa	0.000000	06/23/2018 18:46:07	06/23/2018 18:47:41
✓ Pressão2 Baixa	0.000000	06/23/2018 18:46:07	06/23/2018 18:47:41
✓ Pressão1 Crítico Baixa	0.000000	06/23/2018 18:46:07	06/23/2018 18:47:41
✓ Pressão1 Baixa	0.000000	06/23/2018 18:46:07	06/23/2018 18:47:41
✓ Pressão2 Crítico Baixa	0.000000	06/23/2018 18:46:07	06/23/2018 18:47:41

Reconhecer Todos

Home Alarmes Gráficos

Figura 4.22. Alarmes reconhecidos

Por último, na tela de **Gráficos** (figura 4.23), podem ser observadas as pressões do sistema numa janela gráfica. É dividida em duas partes: uma superior com o gráfico e suas configurações de exibição e outra inferior com a janela temporal exibida e as legendas do mesmo.

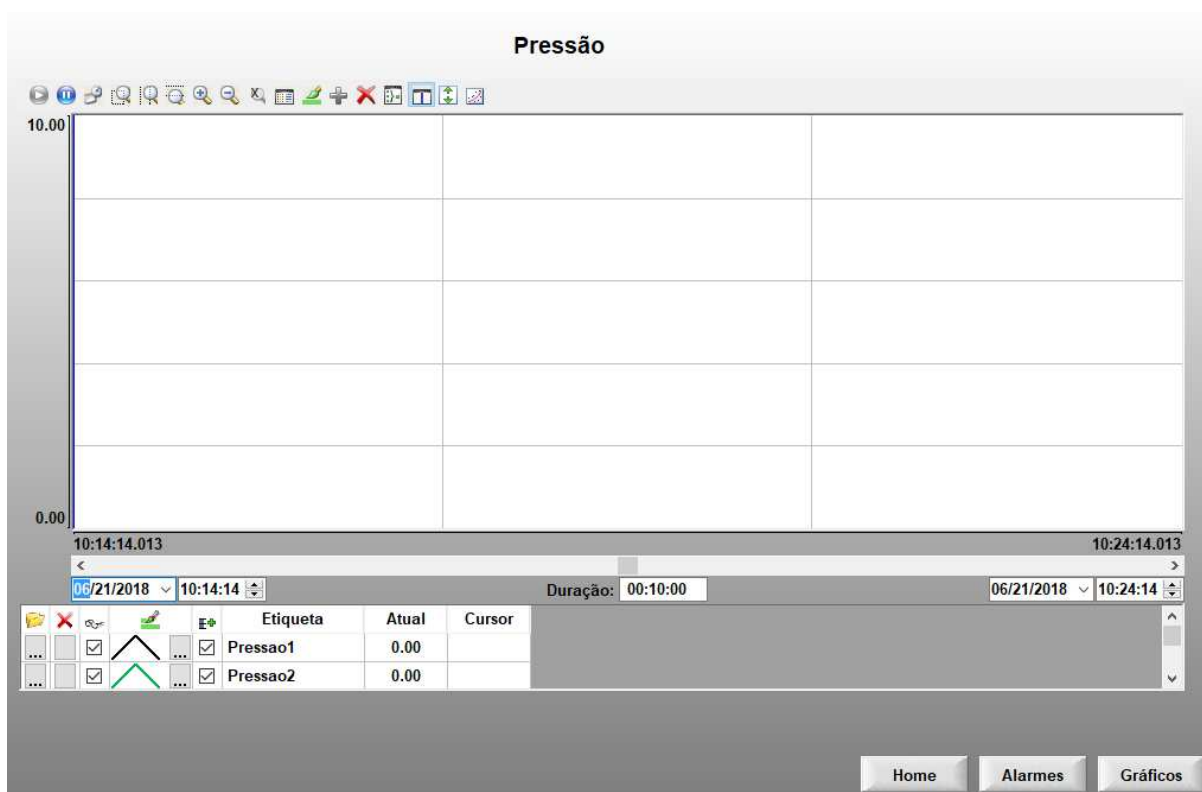


Figura 4.23. Tela Gráficos do supervisor do SIREA

O significado dos ícones, sequencialmente da esquerda para a direita, exibidos na barra de configuração (figura 4.24) está detalhado na tabela 4.1 abaixo.



Figura 4.24 – Barra de configuração da janela gráfica

### Tabela 4.2. Funções da barra de configuração gráfica

Função	Descrição
Executar	Inicia a aquisição gráfica dos registros de pressão
Parar	Interrompe a aquisição gráfica dos registros de pressão
Período	É aberta uma janela em que pode-se definir o período de duração da janela gráfica, com três opções de definição: Hora antes de agora, definindo um período anterior ao atual, Início Data/Hora, inserindo a data e hora de início e Automático, deixando a cargo do sistema
Zoom janela	Permite o desenho com o cursor sobre a janela gráfica em área para aplicação de zoom, levando assim a uma melhor visualização dos pontos medidos
Zoom vertical	Aplica zoom numa seção vertical
Zoom horizontal	Aplica zoom numa seção horizontal
Ampliar	Amplia o zoom do gráfico de forma automática
Reduzir	Reduz o zoom do gráfico de forma automática
Cancelar zoom	Cancela as modificações aplicadas retornando à configuração original
Propriedades da legenda	É aberta uma janela em que podem ser adicionados ou removidos campos exibidos na legenda dos gráficos

Tabela 4.2. Funções da barra de configuração gráfica (cont.)

Função	Descrição
Propriedades da legenda	É aberta uma janela em que podem ser adicionados ou removidos campos exibidos na legenda dos gráficos
Estilo de pena	Ao selecionar, com o cursor, uma linha de pressão na legenda, este campo permite a edição de seu estilo gráfico
Adicionar pena	Quando houverem pressões não exibidas na janela gráfica, uma janela é aberta com as pressões disponíveis para exibição
Remover pena	O mesmo do anterior, só que removendo as pressões do gráfico
Múltiplas seções	Divide a seção vertical da janela gráfica para que os gráficos das pressões possam ser exibidos de forma não-sobreposta
Cursor	Permite exibir ou ocultar um cursor vertical na janela gráfica para demarcações
Auto escala	Muda a escala do gráfico para visualização total
Controle estatístico do processo	É aberta uma janela em que é possível habilitar a exibição da média, valores mínimos e máximos e o desvio padrão de forma gráfica juntamente com as linhas de pressão

Na legenda dos gráficos, nesta mesma tela, são exibidas as linhas de pressão que compõem o gráfico, além de alguns parâmetros escolhidos pelo usuário anteriormente.

Além das telas anteriormente mencionadas, o cabeçalho (figura 4.25), com alguns controles como troca de usuário e desligamento do supervisor, está presente em todas as telas, além de conter informações de data e hora.

Figura 4.25. Cabeçalho do supervisório do SIREA

## 5 MANUAL DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO

O sistema de automação do SIREA permite que a operação ocorra em dois modos distintos, a saber: (i) no modo automático e (ii) no modo manual. No primeiro, o sistema se encarrega de todo o processo, controlando todos os componentes necessários a seu funcionamento, cabendo ao operador (i.e., usuário final) a inserção de parâmetros, e no segundo, o usuário se encarrega do acionamento manual de cada componente, tornando, assim, o funcionamento menos eficiente e com maiores chances de danos caso os tempos de normalização do escoamento sejam desrespeitados (o que poderia gerar um efeito de golpe de aríete, diminuindo a vida útil das válvulas), porém com a vantagem de ser totalmente personalizado, podendo ser usado para testes.

Independentemente do modo de operação, exceto para algum fim específico, as válvulas manuais presentes no sistema, exibidas na IHM do supervisório (figura 4.2), devem estar configuradas de modo que permitam o fluxo necessário para a limpeza dos TC.

Os modos podem ser alternados em várias telas do supervisório: (i) **Home**, (i) **Parâmetros** e (iii) **Configurações do inversor**, por meio de um botão, que exibe em seu interior o modo acionado no momento.

### 5.1 Modo automático de operação

Como mencionado, o modo automático de operação é o mais automatizado de todos, tornando-se, então, mais fácil para o operador e mais seguro para o sistema, já que ele comandará seu próprio funcionamento com base na parametrização feita pelo usuário, tornando mais baixas as chances de ocorrência de efeitos danosos aos subsistemas e seus componentes.

Ao iniciar o programa supervisorio, o usuário verá primeiramente a tela Home, figura 5.1 abaixo, anteriormente abordada, na qual deverá se certificar se o modo de operação automática está de fato acionado, no controle indicado pelo número 1 (um) na mesma figura.

Estando em modo correto, é necessário agora prosseguir à configuração dos parâmetros, pressionando o controle indicado pelo número 2 (dois) da figura 5.1.

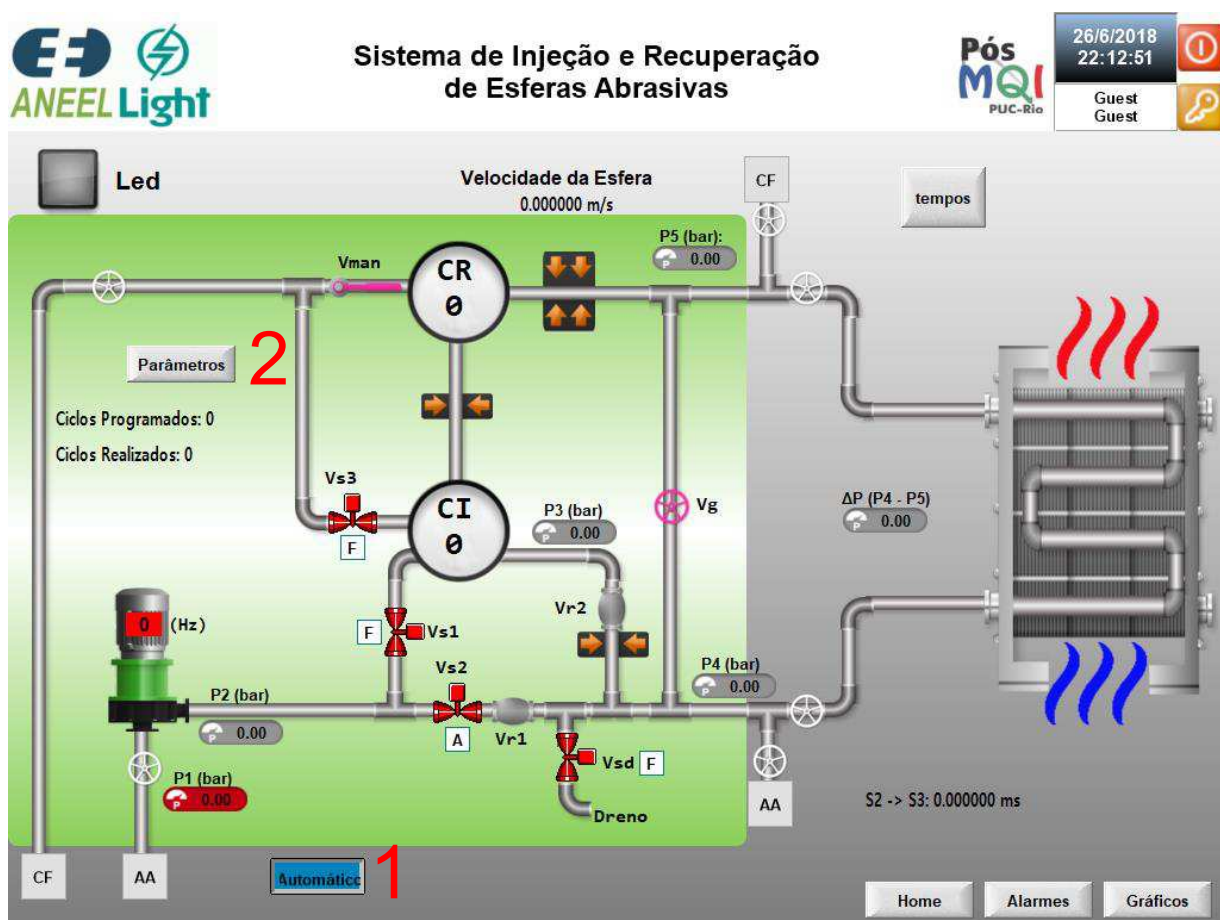


Figura 5.1. Tela Home em modo automático

Na janela aberta (figura 5.2), o usuário deverá inserir as configurações pertinentes ao processo, i.e., sua parametrização, indicando:

1. Número de ciclos: quantidade dos ciclos de limpeza a serem realizados
2. Intervalo entre ciclos: intervalo entre o final de um ciclo e o início do outro em segundos.
3. Hz máxima: frequência máxima a ser inserida, pelo sistema, no inversor de frequência da bomba durante a operação, definindo assim a sua vazão.
4. Número de esferas: quantidade de esferas abrasivas inseridas no sistema.

As parametrizações anteriores deverão ser inseridas na área indicada pelo número 3 (três) da figura 5.2.

Parâmetros

**Configurações**

Número de Ciclos: 0

Intervalo entre Ciclos: 0 seg

Hz Máximo: 0

Número de Esferas: 0

Automático

Operação Contagem

Iniciar

Carregar

Variação em S1 +/-: 0.000 ms

Variação em S2 +/-: 0.000 ms

Variação em S3 +/-: 0.000 ms

Variação em S4 +/-: 0.000 ms

Distância S2<->S3: 0.000 mm

**Tempos (s)**

Rampa

Injeção

Transição Inj / Rec

Recuperação

Transposição

0

0

0

0

0

Figura 5.2. Janela de parametrizações em modo automático

Em seguida, devem ser inseridos, na área 4 da figura acima, os tempos de execução, em segundos, de cada etapa do processo (obtidos experimentalmente), sendo:

1. Rampa: Tempo de normalização da vazão após acionamento da bomba e retirada das bolhas do sistema, abrindo a válvula solenoide de dreno Vsd.
2. Vs1->Vs2, Vs2->Vs1: Tempo seguro de comutação entre as válvulas Vs1 e Vs2 para impedir o golpe de aríete.
3. Injeção: Tempo necessário para que a câmara de injeção permaneça aberta até que todas as esferas abrasivas saiam para a tubulação.
4. Transição Inj/Rec: Tempo de transição entre a injeção das esferas e seu recolhimento.
5. Recuperação: Tempo necessário para que a câmara de recuperação permaneça aberta a fim de recolher todas as esferas do sistema.
6. Transposição: Tempo de viagem das esferas entre as câmaras de recuperação e de Injeção.

Logo após, na área 5 da mesma figura, colocam-se os dados de variação do tempo programado para que o contador reconheça uma esfera, a fim de evitar falsos positivos com outras partículas e bolhas, já que as mesmas podem variar de velocidade e forma em cada região do ciclo de limpeza, sendo obtidos, também, de forma experimental. Deve-se também inserir a distância, em milímetros, entre os contadores S2 e S3.

Por fim, o usuário poderá escolher se a operação se dará em modo contagem ou não (já abordado em capítulo anterior). Ao final dessa parametrização, o mesmo deverá carregar as informações, isto é, enviá-las ao PLC, por meio do botão sinalizado com o número 6 da figura 5.2. A operação terá início, conforme programada pelo operador, quando o botão iniciar (número 7) for pressionado.

Com o processo iniciado, a tela Home (figura 4.2) passa a exibir um botão de parar, além de mostrar informações atuais do ciclo e dos componentes. Caso o operador deseje, o mesmo poderá acompanhar o gráfico das pressões no sistema, além de definir alarmes para tais, nas outras telas do supervisão, também abordadas no capítulo anterior em mais detalhes.

Quando o sistema igualar o número de ciclos realizados com os programados, o inversor da bomba será desativado e o sistema voltará ao seu estado inicial, não realizando mais ciclos, marcando assim o fim da operação.

## **5.2 Modo manual de operação**

No modo manual de operação, o sistema é completamente operado pelo usuário, deixando de ser automatizado, mas ainda com suas informações de controle, ou seja, contadores de esferas e pressões em diversos pontos. Isto permite uma grande personalização de seu funcionamento, sendo ideal para testes dos mais variados tipos, porém requerendo grande conhecimento do sistema, por parte do usuário, além de um extremo cuidado para evitar efeitos como golpe de aríete, que reduzem a vida útil dos componentes.

Dito isto, o ponto de partida é o mesmo para o modo manual, inicializando o sistema na tela Home (figura 4.2), na qual deve ser conferido se o modo de operação selecionado é o manual, na mesma área indicada pelo número 1 (um) da figura 5.2.

Se os contadores forem utilizados, o usuário deverá inserir, na janela de parâmetros acessada pelo botão indicado pelo número 2 (dois) da mesma figura, a quantidade de esferas e as variações para o acionamento dos contadores, melhores explicados no guia de operação automática, que em seguida deve ser carregado para o PLC, pelo botão carregar, e iniciada a operação, pelo botão iniciar.

Finalizado isto, o processo está iniciado, ficando então o operador responsável pela execução do seguinte roteiro de ativação dos componentes (por meio de chave virtual no supervisório, para a bomba, ou por cliques na sua representação, para válvulas solenoides) para funcionamento normal do sistema:

## **1. Drenagem do ar do sistema e normalização da vazão**

A válvula solenoide de dreno, Vsd, do tipo normalmente fechada, deve ser acionada, abrindo-se para drenar bolhas de ar do sistema hidráulico. Em seguida o mesmo deve ser feito com a bomba, na vazão inserida pelo operador no sistema, em configuração do inversor (figura 4.20).

Este passo é importante para remover as bolhas de ar do sistema, evitando falsos positivos no contador, e normalizar a vazão da bomba, afogando, assim, o SIREA.

## **2. Injeção das esferas**

Deve-se então acionar Vs1, abrindo-a, enquanto Vs2 continua aberta, a fim de evitar golpe de aríete nesta transição. Normalizado o escoamento, Vs2 pode ser acionada, fechando-se e forçando o fluxo de água para dentro da câmara de injeção, assegurando assim que as esferas sejam impulsionadas do injetor para o trocador de calor.

Quando todas as esferas tiverem deixado a câmara de injeção, a válvula Vs2 pode ser desativada, abrindo-se.

As esferas acompanham o escoamento até serem recolhidas na câmara de recuperação.

## **3. Transposição das esferas**

Nesta etapa, as esferas devem ser transpostas do recuperador para o injetor pelo acionamento de Vs3, abrindo-a e direcionando o escoamento para o canal de fuga (CF), gerando um fluxo que transporta as esferas para a câmara de injeção, finalizando, assim, um ciclo completo de limpeza.

Completado um ciclo de limpeza, o usuário pode, se assim o desejar, iniciar um novo ciclo, ou encerrar o sistema.

Da mesma forma, o operador poderá acompanhar a evolução das pressões pelo gráfico em sua respectiva tela, assim como definir alarmes para tal.

## 6 ADAPTAÇÃO DO SISTEMA SCADA

Por fim, como último objetivo deste trabalho, foi adaptado o sistema SCADA originalmente desenvolvido para o SIREA a fim de operar uma unidade móvel e simplificada do mesmo, cuja construção ocorreu em sincronismo com a execução deste projeto, com o desenvolvimento da dissertação de mestrado anteriormente mencionada [10].

A principal diferença desta nova unidade, denominada SEREIA, para a anterior, é seu desenvolvimento direcionado à automação, sendo concebido desde o começo com este propósito e com as soluções testadas anteriormente no SIREA, resultando em uma alternativa mais tecnológica para o mesmo.

Este sistema conta com componentes de controle e automação diferentes de seu anterior, e se resumem a quatro sensores de pressão (sendo um deles diferencial, localizado próximo ao trocador de calor, um na entrada de água pelo anel de alimentação até a bomba, outro na saída da mesma e, por fim, um na saída da câmara de injeção), um sensor de temperatura PT100 na entrada do TC, cinco eletroválvulas (sendo uma de três vias) e um contador opto eletrônico duplo (possui dois sistemas de medição independentes montados no mesmo bloco de acrílico).

Para esta adaptação, foram, primeiramente, criadas variáveis no sistema para armazenamento dos dados provenientes dos novos sensores, além de seu redirecionamento ao PLC, com base em um endereço *Modbus*, conforme abordado no capítulo 4. As variáveis correspondentes a este sistema estão registradas na tabela 6.1, com destaque para as novas, adicionadas especialmente para este sistema, sublinhadas.

Tabela 6.1. Variáveis do sistema SCADA adaptado

Variável	Forma	Descrição
nCiclosProgramados	Inteira	Número de ciclos de limpeza programados pelo usuário (modo automático)
nCiclosRealizadosAtual	Inteira	Números de ciclos de limpeza realizados até o momento (modo automático)
nIntervaloCiclos	Inteira	Intervalo, em segundos, entre os ciclos consecutivos (modo automático)
nCI	Inteira	Contagem de esferas na câmara de injeção

Tabela 6.1. Variáveis do sistema SCADA adaptado (cont.)

Variável	Forma	Descrição
nCI	Inteira	Contagem de esferas na câmara de injeção
nCR	Inteira	Contagem de esferas na câmara de recuperação
nTempo	Inteira	Vetor que armazena os tempos correspondentes a cada fase da operação (modo automático)
nVelocidadeMaxima	Inteira	Frequência definida pelo usuário para o inversor da bomba (modo automático)
nEsferas	Inteira	Quantidade de esferas inseridas no sistema (modo automático)
nInversorHz	Inteira	Frequência definida pelo usuário para o inversor da bomba (modo manual)
nInfoHz	Inteira	Valor atual da frequência do inversor da bomba
rVelocidade	Real	Velocidade da esfera no contador duplo
<u>E S1 ms</u>	<u>Real</u>	<u>Vetor contendo as 10 últimas larguras de pulso geradas pela passagem das esferas no contador S1</u>
<u>E S2 ms</u>	<u>Real</u>	<u>Vetor contendo as 10 últimas larguras de pulso geradas pela passagem das esferas no contador S2</u>
E_Esfera_mm	Real	Diâmetro nominal das esferas abrasivas
<u>E S1 controle ms</u>	<u>Real</u>	<u>Variação aceitável da largura de pulso para que o contador S1 reconheça o objeto como uma esfera abrasiva</u>
<u>E S2 controle ms</u>	<u>Real</u>	<u>Variação aceitável da largura de pulso para que o contador S2 reconheça o objeto como uma esfera abrasiva</u>
<u>rP1</u>	<u>Real</u>	<u>Pressão do sensor P1 em bar</u>
<u>rP2</u>	<u>Real</u>	<u>Pressão do sensor P2 em bar</u>
<u>rP3</u>	<u>Real</u>	<u>Pressão do sensor P3 em bar</u>

Tabela 6.1. Variáveis do sistema SCADA adaptado (cont.)

Variável	Forma	Descrição
<u>rDeltaP</u>	<u>Real</u>	<u>Pressão do sensor diferencial na entrada e saída do TC</u>
<u>nTeste[4]</u>	<u>Real</u>	<u>Largura do pulso gerado pela passagem da esfera no contador duplo (i.e., entre S1 e S2)</u>
<u>cSirea[0].rTae</u>	<u>Real</u>	<u>Temperatura da água de entrada no TC</u>
<u>bManualVs1</u>	<u>Booleana</u>	<u>Acionamento da válvula Vs bypass (modo manual)</u>
<u>bManualVs2</u>	<u>Booleana</u>	<u>Acionamento da válvula Vs inj (modo manual)</u>
<u>bManualVs3</u>	<u>Booleana</u>	<u>Acionamento da válvula Vs desc (modo manual)</u>
<u>bManualVs4</u>	<u>Booleana</u>	<u>Acionamento da válvula Vs trans (modo manual)</u>
<u>bManualVs5</u>	<u>Booleana</u>	<u>Acionamento da válvula Vs 3way (modo manual)</u>
bBomba	Booleana	Acionamento do inversor da bomba (modo manual)
bEmergencia	Booleana	Estado de acionamento do botão de emergência do sistema
bLedManual	Booleana	Acionamento do LED manual do sistema
bLedAuto	Booleana	Acionamento do LED automático do sistema
bContagem	Booleana	Aciona a operação em modo contagem
bAuto	Booleana	Alterna entre os modos automático e manual de operação
bIniciar	Booleana	Inicia a operação de limpeza (modo automático)
bCarregar	Booleana	Envia os parâmetros inseridos pelo usuário para o PLC (modo automático)
<u>cSirea[0].bStatusBomba</u>	Booleana	Estado de funcionamento da bomba
<u>cSirea[0].bStatusVs1</u>	<u>Booleana</u>	<u>Estado da válvula solenoide Vs bypass</u>

Tabela 6.1. Variáveis do sistema SCADA adaptado (cont.)

Variável	Forma	Descrição
<u>bManualVs2</u>	<u>Booleana</u>	<u>Acionamento da válvula Vs inj (modo manual)</u>
<u>bManualVs3</u>	<u>Booleana</u>	<u>Acionamento da válvula Vs desc (modo manual)</u>
<u>bManualVs4</u>	<u>Booleana</u>	<u>Acionamento da válvula Vs trans (modo manual)</u>
<u>bManualVs5</u>	<u>Booleana</u>	<u>Acionamento da válvula Vs 3way (modo manual)</u>
bBomba	Booleana	Acionamento do inversor da bomba (modo manual)
bEmergencia	Booleana	Estado de acionamento do botão de emergência do sistema
bLedManual	Booleana	Acionamento do LED manual do sistema
bLedAuto	Booleana	Acionamento do LED automático do sistema
bContagem	Booleana	Aciona a operação em modo contagem
bAuto	Booleana	Alterna entre os modos automático e manual de operação
bIniciar	Booleana	Inicia a operação de limpeza (modo automático)
bCarregar	Booleana	Envia os parâmetros inseridos pelo usuário para o PLC (modo automático)
cSirea[0].bStatusBomba	Booleana	Estado de funcionamento da bomba
<u>cSirea[0].bStatusVs1</u>	<u>Booleana</u>	<u>Estado da válvula solenoide Vs bypass</u>
<u>cSirea[0].bStatusVs2</u>	<u>Booleana</u>	<u>Estado da válvula solenoide Vs inj</u>
<u>cSirea[0].bStatusVs3</u>	<u>Booleana</u>	<u>Estado da válvula solenoide Vs desc</u>
<u>cSirea[0].bStatusVs4</u>	<u>Booleana</u>	<u>Estado da válvula solenoide Vs trans</u>
<u>cSirea[0].bStatusVs5</u>	<u>Booleana</u>	<u>Estado da válvula solenoide Vs 3way</u>

Para a inserção da válvula de 3 vias foi adaptada a simbologia referente a uma válvula de duas vias, e em sua representação de condicionamento (figura 4.10) foram inseridos dois estados: 1 – correspondente à abertura vertical da válvula, i.e., o fluxo consegue seguir reto pelo seu caminho, e 2 – correspondente à abertura angulada da válvula, onde o fluxo é redirecionado 90°.

A nova Interface Homem-Máquina pode ser visualizada na figura 6.1, contendo os componentes anteriormente mencionados e o circuito lógico do sistema de automação.

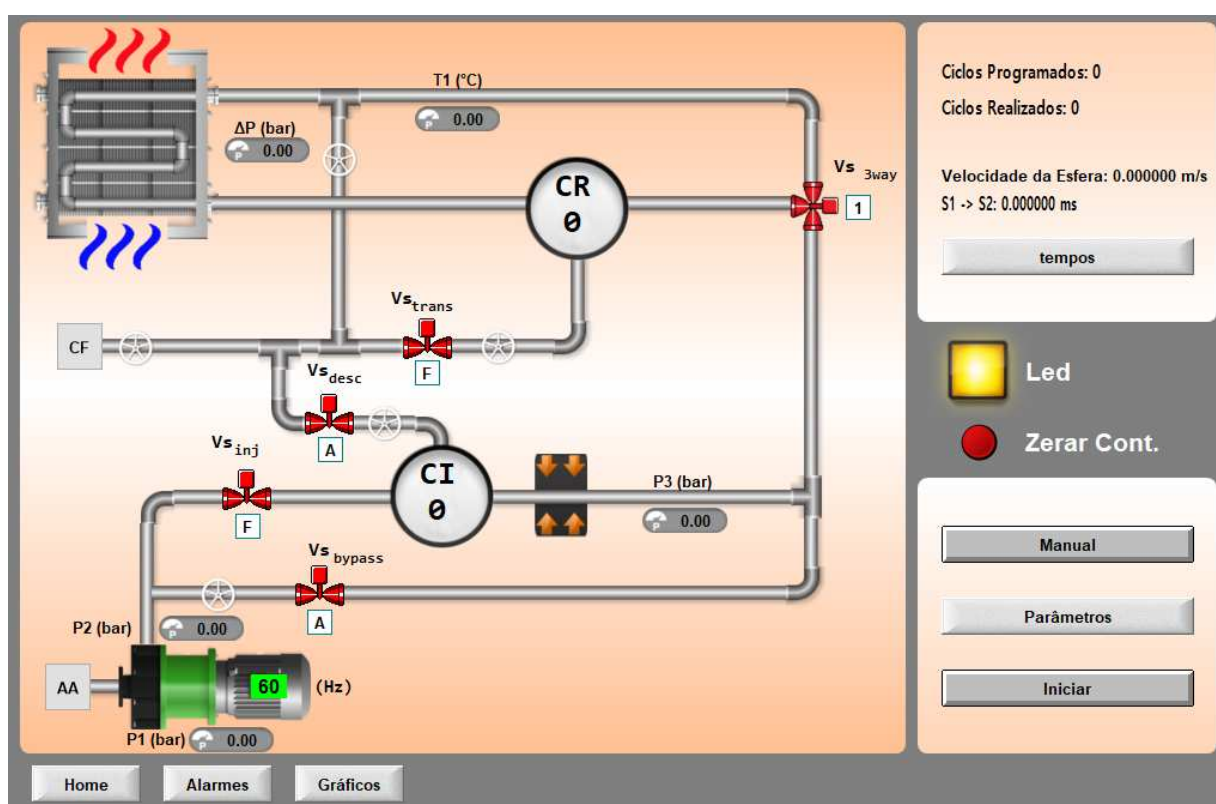


Figura 6.1 - Tela Home do supervisor do SEREIA (Interface IHM)

O sistema adaptado foi validado no SEREIA, que ainda prossegue em desenvolvimento, podendo necessitar, assim, de pequenos ajustes em sua forma final.

A operação deste sistema também pode ocorrer de forma manual ou automática, conforme detalhado no capítulo anterior, não sendo necessária uma nova transcrição de seu funcionamento.

## **7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

O objetivo deste Projeto Final foi totalmente atingido, já que desenvolveu e validou o sistema de controle e automação pela Interface Homem-Máquina do SIREA, gerando uma detalhada explicação sobre seus componentes eletrônicos, de controle e sua funcionalidade, assim como seu manual de operação, a ser empregado quando o sistema for liberado para operação pelo usuário final a que se destina.

Foi plenamente cumprido, também, o objetivo secundário de adaptação e validação deste supervisório à unidade móvel e simplificada de alternativa tecnológica de limpeza de TC em desenvolvimento [10].

Este projeto faz parte de uma sequência de outros trabalhos, expostos nas referências bibliográficas, com base no projeto de P&D Light/Aneel 5161-0010/2016 e contribuiu controlando a automação do mesmo por uma IHM, estando assim mais próximo da conclusão do projeto.

Com isso, pode-se dizer que este trabalho contribui com uma etapa de desenvolvimento do projeto à Light/Aneel, pois orienta a operação deste sistema de automação por qualquer operador qualificado para tal, que passa a dispor de um manual de operação do sistema.

Este projeto de P&D é de suma importância para as empresas, já que este sistema automatizado neste Projeto Final será utilizado para aumentar a eficiência do trocador de calor, mantendo a eficácia dos hidro geradores, além de não necessitar de paradas para limpeza, gerando ganhos econômicos por meio da redução de pausas, constante limpeza, melhora da logística de operação e menor número de operadores envolvidos no processo.

Para trabalhos futuros recomenda-se a validação em campo deste sistema desenvolvido, a fim de que o seu controle atenda de forma plena às necessidades de automação da alternativa tecnológica de limpeza proposta. A incorporação de uma versão executiva do Manual de Operação desenvolvido dentro do programa poderá, também, facilitar o seu acesso aos operadores do sistema, assim fornecendo informações em tempo real. Cabe também o desenvolvimento de um simulador, sem a necessidade de operar na programação do sistema como é feito atualmente, assim oferecendo um módulo de treinamento do operador antes de submetê-lo à operação em campo do sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [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. and Valente G. **Relatório interno submetido ao Programa Regulado de P&D Light/Aneel**, Projeto no. 5161-010/2016), intitulado: Cabeça de série de um sistema inovador de limpeza de trocadores de calor de hidrogeradores. Março 2018.
- [3] 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.
- [4] J.L. Rangel Rios; M.N. Frota. **Intelligent system for ablution of heat exchangers. Congresso Brasileiro de Metrologia (CBM) - Fortaleza**, 2017.
- [5] J. Nunes, C. R. Hall Barbosa, M. N. Frota, G. Valente. **Infrared optoelectronic device for counting and measuring velocity of abrasive sponge balls used as cleaning artefacts in heat exchangers**. Submetido ao IMEKO World Congress, Belfast, Sept.2018.
- [6] 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).
- [7] Relatório [3] United States Patent Office. Josef Taprogge. **Self -Cleaning Heat-Exchanger**. 3,021,117, 23 jul. 1957.
- [8] ATCS - **Automatic Tube Cleaning System**. Israel: CQM, 2007. Disponível em: <[www.cqm-tech.com](http://www.cqm-tech.com)> Acesso em: 15 jun. 2018.
- [9] J.L. Rangel Rios. J.L. Rangel Rios. **Dispositivo servo-hidráulico para introdução e recuperação de partículas em escoamentos internos de interesse industrial**. Trabalho de Fim de Curso de Engenharia (TCC) do Departamento de Engenharia Mecânica, Semestre 2017.2
- [10] J.L. Rangel Rios. Dissertação de Mestrado em desenvolvimento.
- [11] J.R. Cortes Nunes. **Dispositivo optoeletrônico na faixa do infravermelho para contagem e medição de velocidade de esferas utilizadas como artefatos de limpeza de trocadores de calor**. Dissertação de Mestrado – PUC-Rio. Semestre 2018.1