



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

MARCUS MARINHO BEZERRA

**CONTROLE DO CONSUMO DE ENERGIA EM UMA PLATAFORMA  
DE DETECÇÃO DE INCRUSTAÇÕES**

Campina Grande, Paraíba  
Junho de 2016

MARCUS MARINHO BEZERRA

# CONTROLE DO CONSUMO DE ENERGIA EM UMA PLATAFORMA DE DETECÇÃO DE INCRUSTAÇÕES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Informação

Orientador:

Professor Jaidilson Jó da Silva, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Junho de 2016

MARCUS MARINHO BEZERRA

# CONTROLE DO CONSUMO DE ENERGIA EM UMA PLATAFORMA DE DETECÇÃO DE INCRUSTAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Jaidilson Jó da Silva, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, Claudenor e Eliane, aos meus irmãos, Claudenor Júnior e Patrícia, e ao meu sobrinho Humberto que está por vir. A eles dedico com amor.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter sempre guiado meu caminho.

Aos meus pais, Claudenor e Eliane, por minha vida.

Aos meus irmãos, Patrícia e Claudenor Júnior, e ao meu cunhado Thiago, pelo incentivo e pela força.

À minha grande amiga e namorada, Layssa Melo, por todo apoio.

Aos professores José Sérgio e Jaidilson pela orientação e ajuda, sem a qual este trabalho não seria realizado.

Ao pessoal do LIEC, em especial à Thamiles, Andrei e Simões, pelo apoio recebido.

Bem como a todos que contribuíram de forma direta e indireta para realização deste trabalho.

Agradeço a todos.

*“Você pode encarar um erro como uma besteira a ser esquecida,  
ou como um resultado que aponta uma nova direção.”*

Steve Jobs.

## RESUMO

Um dos problemas enfrentados pelas indústrias petrolífera, alimentícia, química e farmacêutica é o surgimento das incrustações no interior dos equipamentos, que vão gradativamente reduzindo a eficiência global do processo e degradando a vida útil dos equipamentos. A existência da incrustação pode afetar de maneira significativa o uso da energia fornecida a um sistema de transporte fluídico, que nesse caso provém de uma máquina elétrica. Com foco na eficiência energética, neste trabalho se propõe uma melhoria para sistemas de transportes fluídicos. O objetivo deste trabalho é encontrar o melhor ponto de operação no que diz respeito o uso da energia fornecida a um sistema de transporte fluídico, além de também estabelecer qual a relação existente entre o fornecimento de energia e a presença de incrustação nos ductos. Para tal fim, foi desenvolvida uma interface utilizando o *software LabVIEW* com a finalidade de agrupar as informações fornecidas por meio dos sensores, monitorar as grandezas físicas associadas ao processo em questão e enviar sinais de comando para que os atuadores possam modificar o estado de operação de tais grandezas. Com a aquisição dos dados foi possível realizar a identificação em malha aberta do sistema dinâmico e após isso aplicar técnicas de sintonia de controladores com a finalidade de escolhermos aquele que apresentasse respostas satisfatórias para o comportamento em malha fechada da plataforma. Também foi possível encontrar uma relação entre o aumento da potência elétrica fornecida ao sistema conforme o aumento do volume de incrustações no interior das tubulações.

**Palavras-chave:** Incrustações, Eficiência Energética, Aquisição de Dados, Modelagem de Sistemas.

## ABSTRACT

One of the problems faced on the oil, food, chemistry and pharmaceutical industries is the appearance of fouling into the equipments, wich gradually reduces the overall efficiency of the process and degrade the lifecycle of the equipments. The existence of fouling can significantly affect the efficient use of energy supplied to the system, which in this case comes from an electric machine. Focusing on energy efficiency, this work proposes an improvement for fluidic transport systems. The objective of this study is to find the best operating point regarding the use of the energy supplied to a fluid transportation system, and also establish the relationship between the power supply and the presence of fouling in the ducts. For this purpose, an interface was developed using LabVIEW software in order to group the information provided by the sensors, monitor the physical quantities associated with the process in question and send commands to the actuators to modify these quantities. With the data's acquisition it was possible to identify the dynamic open loop system and thereafter applying controller tuning techniques in order to choose one to produce satisfactory responses to the closed loop behavior of the platform. It was also possible to find a relationship between the increase in the power supplied to the system as the increased of fouling inside the pipes.

**Keywords:** Fouling, Energy Efficiency, Data Acquisition, Systems Modeling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1: a) Esboço de uma seção transversal de um tubo industrial com a ocorrência dos processos de incrustação e de corrosão (SILVA, LIMA e ROCHA NETO, 2008); b) Fotografia de uma tubulação de descarte de água (PATRICIO, 2006).....	18
Figura 2-2: Representação das etapas de formação de incrustação e alguns fatores que influenciam o processo.	19
Figura 2-3: Fotografia de um PIG instrumentado cedido .....	20
Figura 3-1: a) Fotografia do Sensor de vazão por turbinas (Signet, mod. 8550-1) b) Fotografia do transmissor de vazão (FLOWMETERS.COM, LCC, 2003). .....	24
Figura 3-2: Fotografia do sensor de pressão do tipo StrainGauge (Ashcroft, mod. 2274 XAO).....	25
Figura 3-3: Fotografia do sensor de temperatura LM35(NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2000).....	25
Figura 3-4: Fotografia do sensor de Corrente SCT013-020 (YHDC,2014).....	26
Figura 3-5: Fotografia do sensor de Tensão (Transformador) (PATSKO,2006).....	26
Figura 3-6: a) Fotografia da válvula de controle completa da marca Belimo;.....	27
Figura 3-7: a) Fotografia do inversor de frequência da série CFW-08 da WEG; b) Fotografia do motor bomba P 500T da KSB. ....	28
Figura 3-8: Representação da estrutura básica de um CLP .....	29
Figura 3-9: Representação do ciclo de Processamento dos CLPs .....	30
Figura 3-10: Representações a) Contato Normalmente Aberto;.....	31
Figura 3-11: Fotografia do CLP modelo S7-200 da marca Siemens. ....	32
Figura 3-12: Representação do Arduino Mega 2560 (SOUZA, 2014). ....	33
Figura 6-1: Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada típico (MELO, 2014) .....	40
Figura 7-1: Fotografia da Plataforma de Detecção de Incrustação (MELO, 2014). ....	44
Figura 7-2: Fotografia da Plataforma de Detecção de Incrustação. ....	44
Figura 7-3: Planta Baixa da Plataforma.....	45
Figura 8-1: Tela principal da função Ident (BEZERRA, 2015).....	47
Figura 8-2: Respostas ao degrau e percentuais dos modelos matemáticos (BEZERRA, 2015). ....	48
Figura 8-3: Resposta da Planta ao Degrau e Identificação de Sistemas .....	49
Figura 8-4: Resposta ao degrau do sistema em malha fechada projetado com o controlador PI (BEZERRA, 2015) .....	51

Figura 8-5: Resposta ao degrau do sistema em malha fechada projetado com o controlador PID (BEZERRA, 2015).....	52
Figura 8-6: Diagrama elétrico do circuito de condicionamento do sensor de tensão. ....	53
Figura 8-7: Diagrama elétrico do circuito de condicionamento do sensor de corrente.....	54
Figura 8-8: IHM - Painel Principal -Estimativas.....	56
Figura 8-9: IHM - Painel Principal - Controle dos Atuadores e Modo de Operação.....	56
Figura 8-10: IHM - Painel Principal - Sensores e Atuadores. ....	57
Figura 8-11: IHM - Painel Principal - Grandezas Elétricas.....	57
Figura 8-12: Gráfico da Pressão versus Frequência obtido experimentalmente.....	58
Figura 8-13: Gráfico da Vazão versus Frequência obtido experimentalmente.....	59
Figura 8-14: Gráfico da Potência versus Frequência obtido experimentalmente. ....	59
Figura 8-15: Gráfico da Potência (Estimada) versus Frequência. ....	60
Figura 8-16: Consumo Relativo em função da Frequência. ....	61
Figura 8-17: Eficiência em função da Frequência.....	62
Figura 8-18: VI MathScript Node implementada para calcular as Potências de Referência. ....	63
Figura 8-19: VI Formula Node implementada para estimar o valor de Incrustação.....	64
Figura 8-20: Simulação para Controle de Vazão em Malha Aberta.....	64
Figura 8-21: Simulação para Controle de Vazão em Malha Fechada.....	65
Figura 8-22: Simulação para Controle de Vazão em Malha Aberta.....	65
Figura 8-23: Simulação para Controle de Vazão em Malha Fechada.....	66
Figura 8-24: VI MathScript Node implementada para calcular a máxima Eficiência.....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de modelos de primeira ordem para os experimentos realizados (BEZERRA, 2015).....	49
Tabela 2 - Controladores PI propostos e o índices de desempenho (BEZERRA, 2015).....	51
Tabela 3– Atalhos implementados na IHM.....	55

# SUMÁRIO

1	Introdução.....	14
1.1	Justificativa .....	15
1.2	Objetivos	15
2	Processo de Formação de Incrustação .....	17
2.1	Definição	17
2.2	Mecanismos de Incrustação .....	18
2.3	Prevenção e Controle .....	19
2.4	Técnicas de Detecção.....	21
3	Plataforma de Detecção de Incrustação.....	23
3.1	Características Estruturais.....	23
3.2	Sensores	23
3.2.1	Sensor de Vazão.....	23
3.2.2	Sensor de Pressão.....	24
3.2.3	Sensor de Temperatura .....	25
3.2.4	Sensor de Corrente .....	26
3.2.5	Sensor de Tensão .....	26
3.3	Atuadores .....	27
3.3.1	Válvula de Controle .....	27
3.3.2	Inversor de Frequência e Motor-Bomba .....	28
3.4	Controlador Lógico Programável.....	29
3.4.1	Princípios de Funcionamento.....	29
3.4.2	Programação em <i>Ladder</i> .....	30
3.4.3	Siemens Simatic S7-200 .....	31
3.4.4	Sistema de Comunicação .....	32
3.5	Arduino	33
3.5.1	Arduino Mega 2560 .....	33
4	Comportamento Hidrodinâmico de Sistemas Fluídicos .....	34
4.1	Perda de Carga .....	34
5	Potência Instantânea, Potência Ativa e Potência Reativa .....	37
6	Sistemas De Controle Em Malha Fechada .....	39
6.1	Definição	39
6.2	Estratégia de controle.....	40
6.3	Classificação De Controladores .....	41
6.3.1	Controladores Proporcional e Integral (PI) .....	41
6.3.2	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID).....	42
7	Materiais e Metodologia.....	43
7.1	Materiais	43

7.2	Metodologia.....	43
8	Resultados e Discussões .....	47
8.1	Identificação dos Modelos Matemáticos das Plantas .....	47
8.2	Projeto e Implementação do Controlador .....	49
8.3	Projeto e Implementação do Sistema de Aquisição de Dados para Medição de Potência Elétrica.....	53
8.4	Interface Homem Máquina .....	54
8.4.1	Painel principal .....	55
8.5	Estimativa das Potência em Função da Incrustação.....	57
8.6	Consumo Relativo de Potência e Eficiência .....	61
8.7	Estimativa da Incrustação no LabVIEW .....	62
8.8	Estimativa do Ponto de Máxima Eficiência e Frequência de Máxima Eficiência.....	67
9	Conclusões.....	68
10	Referências Bibliográficas .....	70

# 1 INTRODUÇÃO

A incrustação é um processo que consiste na deposição de materiais orgânicos pesados e de outros sólidos dissolvidos ou em suspensão no sistema de transporte fluídico e é vista como um problema que ocorre nas indústrias (podendo-se destacar as indústrias química, petrolífera, alimentícia e farmacêutica), pois causa prejuízos devido à queda de produtividade e ao tempo despedido em operações de limpeza do equipamento (SILVA, 2008).

No tocante ao contexto energético, pode-se destacar a existência de perdas (perdas de carga) que estão associadas com a presença da incrustação no interior das tubulações. Essa consideração remete à diminuição do diâmetro interno dos tubos que podem apresentar reduções na eficiência energética dos sistemas de transporte fluídico.

Levando em consideração que a eficiência de um sistema de transporte de fluidos depende muitas vezes da dissipação de potência nas máquinas transformadoras de energia elétrica e que a eficiência de um motor elétrico depende fundamentalmente do seu regime de funcionamento, considera-se que estudar a relação entre a energia necessária para transportar determinado fluido por meio de um motor-bomba e a presença da incrustação pode apresentar sua relevância para um melhor uso da energia.

Para aperfeiçoar o uso de energia nas máquinas elétricas assim como nos sistemas de transporte de fluidos, pode-se enxergar este como um problema de controle supervisão. Sendo assim, pretende-se buscar o ponto de operação que minimize as perdas de energia do sistema. Considera-se, ainda, que o objetivo de estudo é controlar o consumo de energia elétrica fornecida a uma bomba (responsável pelo transporte fluídico na plataforma em questão) baseando-se no volume de incrustação existente no interior da tubulação.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A presença da incrustação e o uso de máquinas elétricas na indústria petrolífera, farmacêutica, química e alimentícia se dá principalmente no transporte de líquidos. Nas aplicações de bombeamento de líquidos, os motores de indução são largamente utilizados pelo seu baixo custo e robustez mecânica. Cada ponto percentual de aumento de eficiência do motor de indução em aplicações de bombeamento corresponde a uma economia de 70US\$ por kWh consumido (MORENO, CIPOLLA, et al., 1997). Sendo assim, estabelecer a relação entre a energia consumida e a presença de incrustações e encontrar soluções para controlar o uso da energia elétrica em sistemas de transporte de fluidos traz benefícios interessantes para as indústrias em questão.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste projeto é controlar o consumo de energia elétrica baseado no volume de incrustação no interior da tubulação e na eficiência energética em uma plataforma de detecção de incrustações.

Na formulação do problema, estamos em busca do ponto ideal de operação do sistema (ponto de maior eficiência energética). Sendo assim pretende-se desenvolver um sistema que seja capaz de detectar a presença da incrustação e atuar de modo que forneça informações suficientes para o mesmo operar em um ponto de máxima eficiência energética.

Como objetivos específicos têm-se: *(i)* realizar a modelagem matemática da plataforma; *(ii)* implementar um controlador para a malha de vazão; *(iii)* realizar experimentos para estabelecer uma relação entre o volume de incrustação no consumo de energia elétrica; *(iv)* analisar a influência do aumento no volume de incrustação no consumo de energia elétrica e *(v)* definir uma nova lei de controle responsável por manter o consumo de energia mais eficiente possível.

Para alcançar esses objetivos, foi desenvolvida uma bancada de simulação controlada via supervisor para comparação da demanda de potência elétrica em um sistema de bombeamento hidráulico, utilizando dois diferentes métodos de controle de vazão na presença ou não de incrustações: (a) atuando diretamente na frequência do Inversor de Frequência (malha aberta) e (b) Controlando o Inversor de Frequência em função da vazão desejada (malha fechada).

Desse modo, o presente trabalho se mostra importante pelo fato de que os resultados aqui apresentados possam servir de subsídio para a realização de investimentos na utilização de acionamentos eletrônicos em sistemas de bombeamento no setor industrial, além de evitar desperdícios de energia provenientes da presença de incrustação.

## 2 PROCESSO DE FORMAÇÃO DE INCRUSTAÇÃO

### 2.1 DEFINIÇÃO

Podemos definir incrustações, conhecidas também pelo termo *fouling* em inglês, como compostos químicos de natureza orgânica ou inorgânica na superfície interna das tubulações (MARQUES, PEREIRA *et al.*, 2001). Este é um processo que ocorre nas indústrias química, alimentícia, farmacêutica e petrolífera, causando vários problemas devido ao acúmulo das substâncias que provocam a redução no diâmetro interno das tubulações (SILVA, 2008).

Fatores químicos ou físicos, como concentração do soluto e variações em grandezas físicas tais como vazão, pressão e temperatura, podem influenciar na precipitação na superfície dos equipamentos e tubulações de sais pouco solúveis em água, como por exemplo, o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ ). Dessa forma é de fundamental importância o conhecimento do seu mecanismo de formação, do tipo e quantidade de deposição e sua localização para se tomar medidas preventivas e/ou corretivas.

A incrustação apresenta-se sob a forma de uma camada não uniforme de sais, óxidos e hidróxidos sobre a superfície metálica. Essa deposição irregular pode gerar o processo de corrosão devido à diferença de potencial eletroquímico ou pelo superaquecimento do metal (SALVADOR, 2010).

Um esboço de uma seção transversal de um tubo industrial com tais processos está ilustrado na Figura 2-1a, onde a corrosão está relacionada ao encolhimento da espessura da parede interna do tubo, enquanto a incrustação refere-se ao aumento da camada depositante (SILVA, LIMA e ROCHA NETO, 2008). Na Figura 2-1b, podemos observar uma linha de descarte de água que sofreu uma grande diminuição em seu diâmetro interno devido à deposição de incrustação (PATRICIO, 2006).

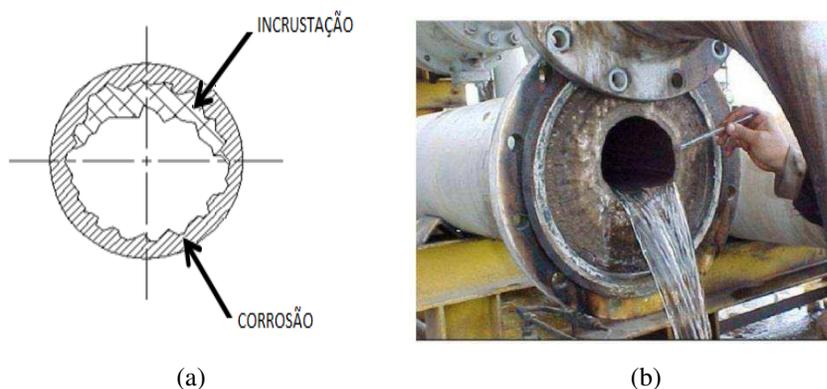


Figura 2-1: a) Esboço de uma seção transversal de um tubo industrial com a ocorrência dos processos de incrustação e de corrosão (SILVA, LIMA e ROCHA NETO, 2008); b) Fotografia de uma tubulação de descarte de água (PATRICIO, 2006)

## 2.2 MECANISMOS DE INCRUSTAÇÃO

De acordo com (SALVADOR, 2010), os principais mecanismos responsáveis pelo problema da incrustação são:

- **Sedimentação:** Este processo é provocado pela ação da força da gravidade sobre as partículas suspensas no meio líquido.
- **Cristalização ou solidificação:** Formação de cristais na superfície fria do trocador de calor quando há resfriamento de hidrocarbonetos de origem parafínica. Deve haver um grau de supersaturação para a solução, antes que a precipitação ocorra, para que seja iniciada a cristalização;
- **Efeito da solubilidade:** O petróleo apresenta em sua constituição uma mistura de vários componentes dispersos. O que o torna estável é o equilíbrio de solubilidade entre todos estes componentes. Uma mudança neste equilíbrio pode causar a precipitação de um ou mais componentes levando a formação da incrustação.
- **Agregação ou floculação:** Ocorre quando a diminuição da polaridade no meio do óleo causa a agregação e a floculação das moléculas de asfaltenos presentes no petróleo;
- **Efeito coloidal:** Ocorre quando há combinação de asfaltenos floculados com as resinas presentes no óleo;
- **Reações Químicas:** geram incrustação por corrosão e por polimerização;

- Crescimento Biológico: ocorre quando há crescimento de micro organismos (bactérias, fungos ou algas), aeróbios e anaeróbios, na superfície de transferência de calor;
- O efeito interfacial: ocorre em duas fases – o período de indução e o período de incrustação. Pesquisas atuais buscam aumentar o período de indução que pode ser compreendido como o período em que a variação da resistência da incrustação é mínima.

As etapas de formação da incrustação bem como as variáveis que influenciam este fenômeno podem ser definidas como mostra a Figura 2-2.

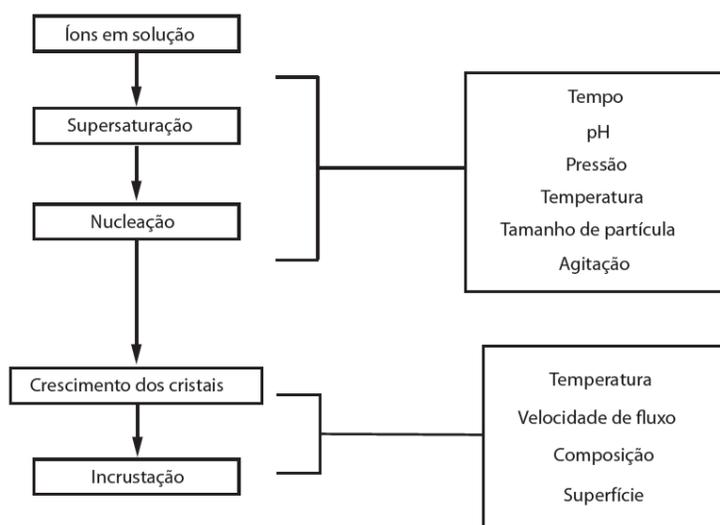


Figura 2-2: Representação das etapas de formação de incrustação e alguns fatores que influenciam o processo (MELO, 2014).

## 2.3 PREVENÇÃO E CONTROLE

O estudo de como ocorre o processo de formação de incrustação é um dos pontos principais para a solução no controle e prevenção do processo. Conhecer as variáveis operacionais envolvidas e analisar o potencial incrustante dos sais presentes no meio é de fundamental importância para que estas soluções sejam válidas.

Segundo (SALVADOR, 2010), controlar a supersaturação é de suma importância na prevenção da incrustação e, para tanto, é preciso atentar para alguns procedimentos, tais como:

- Controle das condições termodinâmicas: O desequilíbrio químico provocado pelas mudanças termodinâmicas (pH, pressão, temperatura, agitação), bem como a mistura de poços com diferentes composições de água produzida farão que espécies insolúveis apareçam, potencializando a precipitação. Sendo assim, o controle da ocorrência de incrustações pode ser realizado, pois será possível identificar os poços mais críticos e aplicar os tratamentos corretivos e preventivos mais adequados.
- Remoção de elementos potencialmente incrustantes: Quando há mistura de águas incompatíveis nos campos de petróleo, torna-se necessária a instalação de membranas seletivas para remoção de sulfato da água do mar, deixando passar os íons menores e retendo os maiores. Ao mesmo tempo, na Petrobrás é utilizado um *PIG instrumentado* (Figura 2-3), dispositivo que se desloca pelo interior dos dutos, sendo aplicado à limpeza e inspeção interna dos mesmos.



Figura 2-3: Fotografia de um PIG instrumentado cedido pela Petrobrás (SILVA,2008).

- Aplicação de inibidores de incrustação: Os inibidores são produtos químicos que interferem na formação de incrustações, podendo agir na precipitação, impedindo completamente ou reduzindo a extensão deste fenômeno. O mecanismo de atuação destes produtos é determinado pela natureza química, bem como pelas propriedades da solução a ser tratada. As classes químicas dos inibidores mais utilizados na indústria do petróleo são os polímeros, fosfonatos, e mais recentemente os poliaminoácidos e polissacarídeos carboxilados, que apresentam caráter menos agressivo ao meio ambiente.

Desse modo, um dos fatores considerados para redução e prevenção do processo de incrustação é a monitoração de um sistema de transporte fluídico baseado nas variáveis, de forma a compreender e quantificar o papel das várias condições operacionais no sistema com incrustação (MANSOORI, 2001).

## 2.4 TÉCNICAS DE DETECÇÃO

O processo de formação de incrustação é caracterizado de maneira irregular no interior das tubulações, podendo, assim, estar presente ou não em um determinado local do duto. Dessa maneira é preciso que existam técnicas para detecção deste fenômeno.

Resumidamente, podemos classificar as técnicas de detecção de incrustação e/ou corrosão em duas categorias: métodos invasivos ou não invasivos. Utilizar métodos invasivos requer a realização de paradas nas plantas industriais para averiguação da presença destes fenômenos. Em contrapartida, nos métodos não invasivos é possível detectar a incrustação sem que exista a necessidade de parar o processo de produção.

Pode-se dar destaque dentre os métodos não invasivos o método de ondas guiadas e o método de vibrações. Rose (LOHR e ROSE, 2002) utilizou o método de ondas guiadas observando as variações das amplitudes dos sinais ultrassônicos para detecção de incrustação; além disso, utilizou o método de vibrações, com o uso do impacto do martelo, observando a velocidade dos sinais para detecção de corrosão nos dutos. Apesar de não invasivos, tais métodos requererem cuidados quanto à aplicação destes na estrutura física dos sistemas.

O cupom de perda de massa é o mais conhecido dentre os métodos invasivos existentes. Neste método, uma placa instalada no interior do tubo é submetida às mesmas condições operacionais deste, sendo retirada periodicamente para ser pesada. A diferença entre o peso original do cupom e o peso medido quando retirado permite calcular a taxa de corrosão presente no tubo (SILVA, 2008). Contudo, este tipo de método acarreta grandes custos operacionais na manutenção dos sistemas.

## 3 PLATAFORMA DE DETECÇÃO DE INCRUSTAÇÃO

### 3.1 CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS

Com o objetivo de realizar estudos mais aprofundados sobre o processo de incrustação, foi projetada e montada uma plataforma de detecção de incrustação, caracterizada como um sistema de monitoramento distribuído com tubos de aço galvanizado de diferentes diâmetros (1", 1 ½", 2"), cada um com seus sensores de vazão e de pressão, respectivamente. Os tubos de 2" são considerados como tubos principais do sistema, enquanto que os demais são utilizados para geração de distúrbios (MELO, 2014).

O fluido utilizado no processo é armazenado em um reservatório de 100 litros e tem sua temperatura medida por meio do sensor de temperatura submerso. Há também um módulo de controle da temperatura associado ao par de resistências e a malha de refrigeração interna do reservatório.

Além de válvulas manuais e de uma válvula de controle, há um inversor de frequência que controla a velocidade de rotação do rotor da bomba centrífuga.

### 3.2 SENSORES

Na plataforma, é possível medir as grandezas físicas inerentes à formação de incrustação por meio de sensores. Sendo estes os sensores de vazão, temperatura e pressão. Além disso, foram implementados os sensores de corrente e tensão para medição da potência elétrica na entrada do inversor de frequência.

#### 3.2.1 SENSOR DE VAZÃO

O sensor de vazão (Figura 3-1a) por turbinas, também conhecido como *turbineflow sensor*, mede a velocidade de escoamento do fluido através da frequência de pulsos gerados nos

terminais do sensor de efeito Hall devido à rotação das pás da hélice instaladas na direção da vazão (FLOWMETERS.COM, LCC, 2003). Esse sensor apresenta um transmissor (Figura 3-1b) da medida e painel de visualização, que fornece leituras exatas na escala de vazão de 0,8 a 10 gpm (conversão métrica: 3 a 38 LPM). Este transmissor, que possui três entradas para conexão de cabos do sensor e é alimentado por uma fonte de 24 V DC, consegue converter o sinal proveniente do sensor em um sinal de corrente de 4-20 mA para conectar com o CLP (GEORG FISCHER SIGNET LLC, 2011).



Figura 3-1: a) Fotografia do Sensor de vazão por turbinas (Signet, mod. 8550-1) b) Fotografia do transmissor de vazão (FLOWMETERS.COM, LCC, 2003).

### 3.2.2 SENSOR DE PRESSÃO

O sensor de pressão, conforme ilustrado na Figura 3-2, do tipo *StrainGauge* baseia-se no princípio de variação da resistência de um fio, em que através da interligação das quatro tiras extensiométricas constituintes em um circuito tipo ponte de *Wheatstone* ajustada e balanceada para condição inicial, consegue medir a pressão por meio do desbalanceamento proporcional à variação da resistência de cada fita (WILSON, 2003). Este instrumento oferece indicação digital em 9 unidades de pressão: psi, mmHg, Pol Hg, ftH<sub>2</sub>O, MPa, KPa, kgf/cm<sup>2</sup> e Bar. Além disso, possui conexão direta para saída de corrente de 4-20 mA para interligar ao CLP (ASHCROFT, 2006).



Figura 3-2: Fotografia do sensor de pressão do tipo StrainGauge (Ashcroft, mod. 2274 XAO).

### 3.2.3 SENSOR DE TEMPERATURA

O sensor de temperatura LM35 (Figura 3-3) de encapsulamento TO-92 é um sensor de temperatura, fabricado pela *National Semiconductor*, que apresenta uma saída de tensão linear relativa à temperatura em que ele se encontrar no momento em que for alimentado por uma fonte de tensão simples (4-20V DC) ou simétrica. Ou seja, a cada 10 mV equivale a 1°C medido. Além disso, este sensor não precisa de qualquer calibração externa para fornecer com exatidão suas medições, tendo valores de temperatura com variações de  $\frac{1}{4}^{\circ}\text{C}$  ou até mesmo  $\frac{3}{4}^{\circ}\text{C}$  dentro da faixa de temperatura de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$  (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2000).



Figura 3-3: Fotografia do sensor de temperatura LM35(NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2000)

### 3.2.4 SENSOR DE CORRENTE

O sensor SCT-013-020 (Figura 3-4) é um sensor de corrente não invasivo, fabricado pela *YHDC*, que apresenta uma saída de tensão linear de 0 a 1V relativa à corrente que circula no seu núcleo ferromagnético. Este sensor é capaz de medir correntes de até 20A (YHDC, 2014).



Figura 3-4: Fotografia do sensor de Corrente SCT013-020 (YHDC,2014).

### 3.2.5 SENSOR DE TENSÃO

O sensor de tensão utilizado é um transformador monofásico de 220V/5V (Figura 3-5). Como a finalidade deste é apenas de medição da tensão elétrica na entrada do inversor, a corrente necessária para esta finalidade não é muito alta. Para o trabalho em questão, a corrente do transformador é de 200 mA.

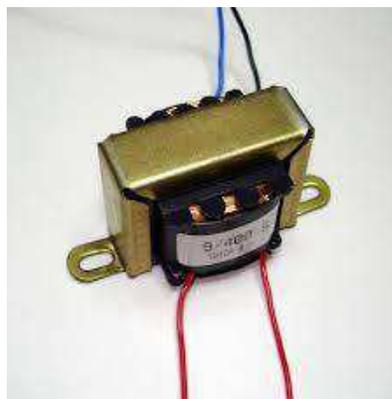


Figura 3-5: Fotografia do sensor de Tensão (Transformador) (PATSKO,2006)

### 3.3 ATUADORES

A plataforma apresenta dois tipos de atuadores, que estão associados ao controle da vazão do sistema. São eles a válvula de controle e o conjunto inversor de frequência e motor-bomba.

#### 3.3.1 VÁLVULA DE CONTROLE

A válvula de controle escolhida para o fechamento da malha de controle da plataforma de testes foi o modelo G250 da marca *Belimo* (Figura 3-6a).

Quanto ao corpo da válvula, esta pode ser especificada como uma válvula de globo de 2 vias com sede simples e diâmetro nominal de 2". Por ser uma válvula tipo globo, esta pertence ao grande grupo das válvulas de controle com movimento linear ou *sliding-stem* (Figura 3-6b), pois possui um obturador (*plug*) preso a uma haste que se desloca linearmente até a sede, variando a área de passagem do fluido (RODRIGUES, 2011).

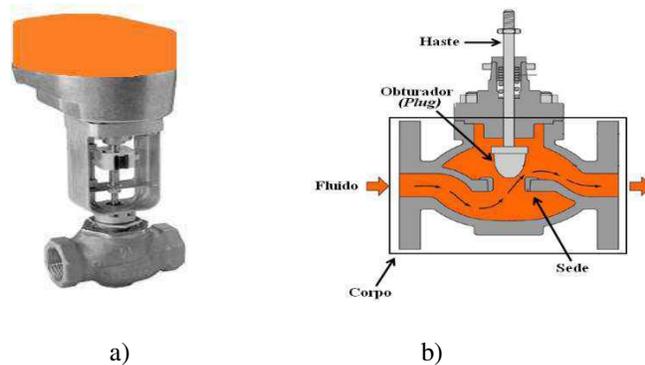


Figura 3-6: a) Fotografia da válvula de controle completa da marca *Belimo*;  
b) Principais partes da válvula de controle *sliding-stem* tipo globo sede simples (RODRIGUES, 2011).

Já em relação ao atuador, o modelo escolhido foi o NVF24-MTF-E-US, também pertencente à marca *Belimo*. Este tipo de atuador é classificado como um atuador elétrico, devido converter a energia elétrica fornecida pelo controlador na entrada (sinal em 4-20 mA) em energia mecânica, alterando a posição relativa entre o *plug* e a sede. Além disso, este atuador apresenta

retorno por mola, movendo a haste em sentido oposto ao exercido pelo solenoide, e em condição de falha, assume a posição totalmente fechada, de forma a garantir a segurança do processo. Quanto à alimentação, utiliza-se uma fonte de 24 V AC ou DC, com potência de 5,5 W para operar normalmente.

### 3.3.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA E MOTOR-BOMBA

O inversor de frequência da série CWF-08 (Figura 3-7a) proporciona ao usuário as opções de controle vetorial ou escalar, ambas programáveis de acordo com a aplicação. O modo V/F (escalar) é recomendado para aplicações mais simples como o acionamento da maioria das bombas e ventiladores, ou quando mais de um motor é acionado por um inversor simultaneamente (aplicações multimotores) (WEG, 2009).

A versão utilizada do inversor é a *standard*, com alimentação monofásica 200 - 240V e corrente de 2,6 A, potência de 0,5 CV, 4 polos com saída trifásica em 220V. Além disso, apresenta 4 entradas digitais e 1 entrada analógica (0 - 10V, 0 - 20 mA ou 4 - 20 mA), e uma resolução de 0,01 Hz para frequências até 100 Hz. Além disso, possui uma IHM local para configuração das funções e parâmetros de programação do dispositivo (P000 a P599), como também permite acesso remoto via CLP.

O motor acionado pelo inversor é uma bomba centrífuga modelo P 500 T hydrobloc do fabricante KSB (Figura 3-7b). Ela apresenta potência 0,5 CV em 3500 rpm, 2 Polos e alimentação trifásica com frequência típica de operação em 60 Hz.



Figura 3-7: a) Fotografia do inversor de frequência da série CWF-08 da WEG; b) Fotografia do motor bomba P 500T da KSB.

## 3.4 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL

Os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) são equipamentos eletrônicos utilizados em sistemas de automação flexível. São ferramentas de trabalho muito úteis e versáteis para aplicações em sistemas de acionamentos e controle, e por isso são utilizados em grande escala no mercado industrial. Permitem desenvolver e alterar facilmente a lógica para acionamento das saídas em função das entradas. Desta forma, podemos associar diversos sinais de entrada para controlar diversos atuadores ligados nos pontos de saída.

### 3.4.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Podemos apresentar a estrutura de um CLP dividida em três partes: entrada, processamento e saída como pode ser visto na Figura 3-8.



Figura 3-8: Representação da estrutura básica de um CLP

Os sinais de entrada e saída dos CLPs podem ser digitais ou analógicos. Existem diversos tipos de módulos de entrada e saída que se adequam as necessidades do sistema a ser controlado. Os módulos de entrada e saídas são compostos de grupos de *bits*, associados em conjunto de *8bits* (1 *byte*) ou conjunto de *16 bits*, de acordo com o tipo da CPU.

As entradas analógicas são módulos conversores A/D, que convertem um sinal de entrada em um valor digital, normalmente de *12 bits* (4096 combinações). As saídas analógicas são módulos conversores D/A, ou seja, um valor binário é convertido em um sinal analógico.

Os sinais dos sensores são aplicados às entradas do controlador e a cada ciclo (varredura) todos esses sinais são lidos e transferidos para a unidade de memória interna denominada memória imagem de entrada. Estes sinais são associados entre si e aos sinais internos. Ao término do ciclo de varredura, os resultados são transferidos à memória imagem de saída e então aplicados aos terminais de saída. Este ciclo está representado na Figura 3-9.

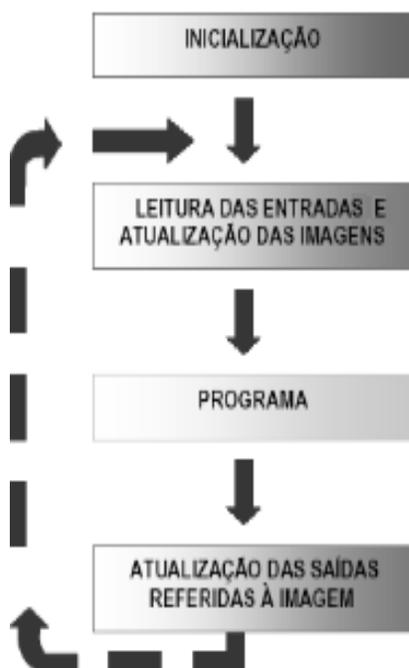


Figura 3-9: Representação do ciclo de Processamento dos CLPs

### 3.4.2 PROGRAMAÇÃO EM *LADDER*

O diagrama de *Ladder* utiliza lógica de relé, com contatos (ou chaves) e bobinas, e por isso é a linguagem de programação de CLP mais simples de ser assimilada por quem já tenha conhecimento de circuitos de comando elétrico.

Compõe-se de vários circuitos dispostos horizontalmente, com a bobina na extremidade direita, alimentados por duas barras verticais laterais. Por esse formato é que recebe o nome de *Ladder* que significa escada, em inglês.

Cada uma das linhas horizontais é uma sentença lógica onde os contatos são as entradas das sentenças, as bobinas são as saídas e a associação dos contatos é a lógica. Os símbolos são apresentados na Figura 3-10.

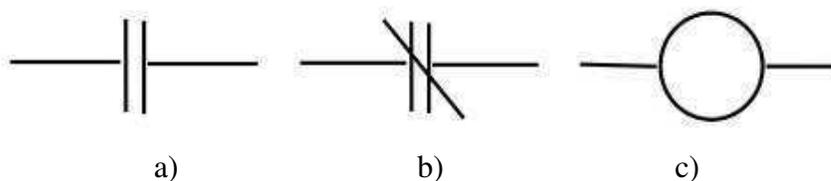


Figura 3-10: Representações a) Contato Normalmente Aberto; b) Contato Normalmente Fechado; c) Bobina.

### 3.4.3 SIEMENS SIMATIC S7-200

O CLP utilizado para o processamento das informações dos sensores e dos comandos de controle para válvula globo foi o modelo S7-200 micro CLP da marca Siemens.

O sistema básico S7-200 engloba um módulo com a CPU 226, um microcomputador, o *software* de programação STEP 7-Micro/WIN SP9 versão 4.0, optando-se pela linguagem de contatos *Ladder* como linguagem de programação, e um cabo de comunicação PC/PPI. Além disso, há um conjunto de módulos de expansão adicionais, sendo os módulos EM231, EM232 e EM235 para leitura e acionamento das entradas/saídas analógicas e o módulo de comunicação ASI CP243-2 (SIEMENS AG, 2000).

O módulo da CPU é um dispositivo compacto e autônomo que contém a unidade de processamento, fonte de alimentação (que alimenta a CPU e os demais módulos com uma baixa tensão DC), duas portas de comunicação (portas 0 e 1) e pontos de I/O discretos, sendo visualizado o atual estado da CPU através dos LEDs RUN e STOP, e o estado da última informação processada por meio dos 24 LEDs de entrada e os 16 LEDs de saída.

O CLP utilizado da plataforma de testes pode ser observado na Figura 3-11.

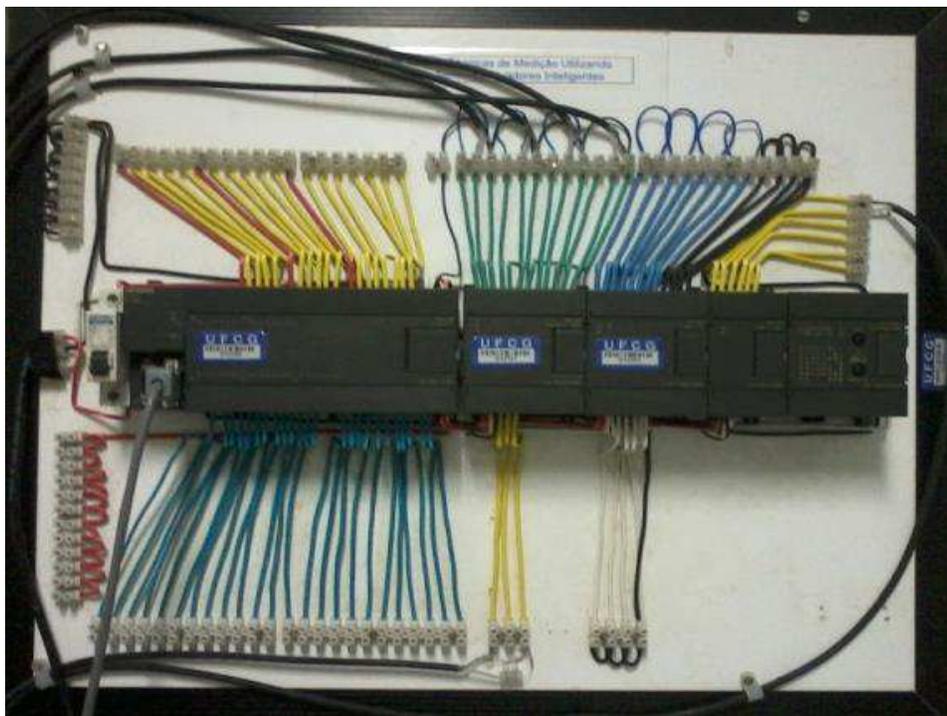


Figura 3-11: Fotografia do CLP modelo S7-200 da marca Siemens.

#### 3.4.4 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

No sistema de comunicação desenvolvido em (MELO, 2014), tem-se que os dados adquiridos pelos sensores são enviados as entradas do módulo EM235 por meio do padrão de comunicação 4-20 mA. Estes dados são processados pela CPU do CLP em um programa escrito em *Ladder* e são visualizados no microcomputador através de uma *interface* homem-máquina (IHM), que foi implementada no *software LabVIEW* e funcionando via padrão OPC. Este padrão, através da relação servidor-cliente, permite que o *LabVIEW* tenha pleno acesso às variáveis de interesse do código em *Ladder*, desde que o servidor OPC seja configurado corretamente com as especificações do CLP.

Quanto aos atuadores, a frequência de operação do motor-bomba pode ser definida via IHM, enviando-se ao inversor de frequência um sinal na faixa de 0-10 V pela saída do módulo EM232 do CLP, correspondente ao valor de frequência especificado.

## 3.5 ARDUINO

O Arduino consiste em uma plataforma de prototipagem eletrônica e tem como objetivo facilitar o desenvolvimento de projetos, desde os mais simples aos mais complexos. Com esta plataforma é possível controlar diversos sensores, motores, LEDs, dentre vários outros componentes eletrônicos (ELETROGATE, 2013).

### 3.5.1 ARDUINO MEGA 2560

A placa Arduino Mega 2560 (Figura 3-12) é uma placa da plataforma Arduino que possui recursos bem interessantes para prototipagem e projetos mais elaborados. Baseada no microcontrolador ATmega2560, possui 54 pinos de entradas e saídas digitais onde 15 destes podem ser utilizados como saídas PWM. Possui 16 entradas analógicas, 4 portas de comunicação serial. Além da quantidade de pinos, ela conta com maior quantidade de memória quando comparada ao Arduino UNO, sendo uma ótima opção para projetos que necessitem de muitos pinos de entradas e saídas além de memória de programa com maior capacidade.



Figura 3-12: Representação do Arduino Mega 2560 (SOUZA, 2014).

A utilização do Arduino foi necessária pela indisponibilidade de entradas analógicas do CLP. Sua função é a de aquisição dos dados de corrente e tensão na entrada do inversor de frequência e transmissão para o computador por meio da interface de comunicação USB. Optou-se por esse dispositivo pela sua facilidade de implementação e interface de comunicação, quando comparado a outros tipos de sistemas microcontrolados.

## 4 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE SISTEMAS FLUÍDICOS

Esse tópico foi proposto em (MELO, 2014) e o entendimento desse tópico é de fundamental importância para o trabalho em questão, pois este está relacionado às perdas de carga. Consequentemente, para melhor trabalhar a eficiência energética do sistema, é necessário compreender onde as perdas podem ser reduzidas ou até eliminadas, quando possível.

### 4.1 PERDA DE CARGA

O fluido, ao escoar em um duto, dissipa parte de sua energia, principalmente sob a forma de calor, decorrente de forças cisalhantes exercidas pela face interna da parede do conduto na camada limite do fluido, que por sua vez reduzem a capacidade de fluidez ao longo do escoamento. Essa perda de energia hidráulica é denominada de *perda de carga*, que pode ser dividida em:

- Perda localizada (devido à presença de acessórios em pontos particulares do conduto, tais como ampliações, reduções, curvas, válvulas com área transversal não constante);
- Perda distribuída (devido ao atrito do fluido com as paredes do conduto, ao longo de toda a sua extensão, com área transversal constante) (MAUREN ELL e TRABACHINI, 2011).

Desse modo, a perda de carga total do sistema fluídico  $h_{l_T}$  resulta da soma das perdas distribuída ( $h_l$ ) e localizada ( $h_{l_m}$ ) na tubulação, podendo ser expressa pela Equação (4.1) (FOX, MCDONALD e PRITCHARD, 1998).

$$h_{l_T} = h_l + h_{l_m} = \left( f \cdot \frac{L}{D} + \sum k_i \right) \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (4.1)$$

onde:  $h_{l_T}$  é a perda de carga total [*m.c.a = metros de coluna d'água*];  $f$  é o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach [*adimensional*];  $L$  é o comprimento da tubulação [*m*];  $D$  é o diâmetro da

tubulação [m];  $k_i$  é o coeficiente de perda de carga cinética característico do acessório [adimensional];  $g$  é a aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ] e  $\bar{V}$  é a velocidade média de escoamento [ $m/s$ ] obtida pela Equação (4.2).

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi R^2} \quad (4.2)$$

onde:  $Q$  é a vazão medida [ $m^3/s$ ] e  $R$  é o raio do tubo [m].

O escoamento de um fluido pode ocorrer em regime laminar ou turbulento, existindo diferenças qualitativas e quantitativas entre eles. Quantitativamente, o parâmetro que determina o tipo de regime de escoamento é o número de Reynolds, calculado através da Equação (4.3).

$$Re = \frac{\rho D \bar{V}}{\mu} \quad (4.3)$$

onde:  $Re$  é o número de Reynolds [adimensional];  $\rho$  é a massa específica do fluido [ $kg/m^3$ ]; e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido [ $Pa \cdot s$ ].

Dependendo de qual seja o regime de escoamento, o coeficiente de atrito é obtido pelas Equações (4.4) ou (4.5):

- Regime laminar (FOX, MCDONALD e PRITCHARD, 1998):

$$f_{laminar} = \frac{64}{Re} \quad (4.4)$$

- Regime turbulento: Descrita pela equação de *Colebrook-White* na forma explícita, proposta por *Haaland* em 1983 e com desvios relativos a inferiores a  $\pm 1,5\%$  (SÁ MARQUES e SOUSA, 1997):

$$\frac{1}{\sqrt{f_{turbulento}}} = -1,8 \cdot \log \left[ \frac{6,9}{Re} + \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} \right] \quad (4.5)$$

onde:  $\varepsilon/D$  = rugosidade relativa do fluido.

Entre as regiões laminar e turbulenta existe uma zona de transição, na qual o escoamento tem características alternadamente laminares e turbulentas. A gama de valores de número de Reynolds correspondentes a esta região de transição pode ser muito extensa, variando entre 2300 (valor usualmente aceito para projetos com condutos de superfície rugosa) a 4000. Além disso, o coeficiente  $f$  é impreciso nessa faixa, não podendo ser predito, devendo ser usada a solução gráfica. Para fluidos Newtonianos, emprega-se o Diagrama de *Moody* para estimar tal valor (LOPES, LAPA e OLIVEIRA, 2006), (ORTEGA, 2007).

O valor adequado do *setpoint* proposto no trabalho de (MELO, 2014) está associada à determinação experimental da *zona de transição* do regime laminar para o regime turbulento durante o escoamento do fluido na plataforma. E para a plataforma em questão, os valores de vazão maiores do que 0 LPM e menores ou iguais a 5,489 LPM ou maiores ou iguais a 9,563 LPM e menores que o fundo de escala são *set-points* adequados para o sistema de controle a ser implementado, pois caso tomado valores de vazão dentro da zona de transição, o valor de referência do sistema estará numa região de instabilidade hidrodinâmica da planta, e não será conveniente usá-lo quando o sistema estiver em regime permanente (BEZERRA *et al*, 2012).

## 5 POTÊNCIA INSTANTÂNEA, POTÊNCIA ATIVA E POTÊNCIA REATIVA

Dados dois sinais senoidais  $v(t)$  (Equação 5.1) e  $i(t)$  (Equação 5.2) onde,  $v(t)$  representa a tensão elétrica e  $i(t)$ , a corrente elétrica, em regime estacionário, a potência em qualquer instante de tempo é dada pela Equação (5.3).

$$v(t) = V_m \cdot \cos(\omega t + \theta_v) \quad (5.1)$$

$$i(t) = I_m \cdot \cos(\omega t + \theta_i) \quad (5.2)$$

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (5.3)$$

onde:  $\theta_v$  = ângulo de fase da tensão

$\theta_i$  = ângulo de fase da corrente

A potência calculada com o auxílio da Equação (5.3) é a potência instantânea. A potência instantânea é medida em watts quando a tensão é dada em volts e a corrente em ampères.

Ao fazermos manipulações matemáticas com as Equações (5.1), (5.2) e (5.3), é possível constatar que  $p(t)$  pode ser dada pelas Equações (5.4), (5.5) e (5.6).

$$p(t) = P + P \cos(2\omega t) - Q \sin(2\omega t) \quad (5.4)$$

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (5.5)$$

$$Q = \frac{V_m I_m}{2} \sin(\theta_v - \theta_i) \quad (5.6)$$

Desse modo,  $P$  (Equação 5.5) representa a Potência Média ou Potência Ativa e  $Q$  (Equação 5.6), a Potência Reativa. É possível demonstrar matematicamente que o valor médio da Potência Instantânea representa a Potência Ativa. Isso se dá pelo fato de que o valor médio de uma função senoidal é igual a zero. A demonstração completa pode ser encontrada em (NILSSON E RIEDEL, 2003).

É importante ressaltar que a medição da Potência Ativa será feita por meio da medição do valor médio da Potência Instantânea obtida pelo produto no tempo dos valores de tensão e corrente lidos pelos seus respectivos sensores.

## 6 SISTEMAS DE CONTROLE EM MALHA FECHADA

### 6.1 DEFINIÇÃO

Segundo (DORF e BISHOP, 2009), um sistema de controle pode ser definido como a interconexão de componentes formando uma configuração de sistema que produzirá uma resposta desejada para o próprio sistema.

Dentre tais componentes, segundo (FRANKLIN, POWELL e EMAMI-NAEINI, 2002), podemos destacar:

- **Processo:** é o componente central, que pode causar transformações e/ou variações de propriedades físicas do sistema.
- **Atuador:** é o dispositivo ou elemento que tem influência sobre o Processo.
- **Planta:** é a combinação do processo com o atuador.
- **Controlador:** é um dispositivo eletrônico, pneumático, hidráulico ou mecânico que produz um *signal de controle* para o sistema.
- **Sensor:** é usado para medir a variável do processo e fornecer informações para o sistema de controle por meio de uma medida adicional da saída do processo, i.e., o *signal de realimentação*.
- **Erro de rastreamento:** é a diferença entre a variável de processo e a referência.
- **Distúrbio:** é um sinal que tende a afetar de maneira adversa o valor da variável de saída de um sistema.

Essa configuração de sistema é chamada de sistema de controle em malha fechada, pois, com base no princípio de realimentação, tende a manter uma relação pré-determinada entre duas variáveis do sistema, usando a diferença como um meio de controle (DORF e BISHOP, 2009). Na Figura 6-1 é representado um sistema de controle em malha fechada típico.

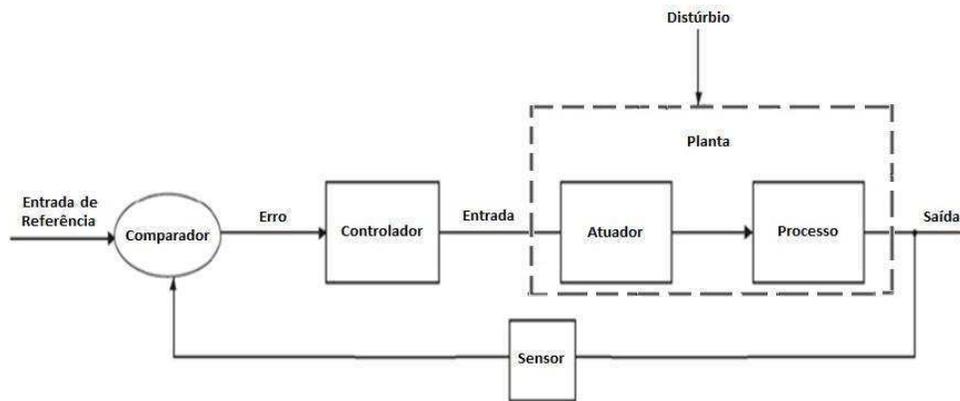


Figura 6-1: Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada típico (MELO, 2014)

A teoria de controle analógico consiste na utilização de técnicas de análise e projeto de sistemas de controle que podem ser representados por modelos matemáticos *contínuos* no tempo (OGATA, 2003). Para prever o desempenho de um sistema de forma mais prática e simplificada, a ferramenta matemática largamente utilizada é a transformada de *Laplace*.

Essa transformada é um operador funcional -  $\mathcal{L}(\cdot)$ - usado para resolver de forma sistemática equações diferenciais lineares que representam sistemas dinâmicos, mapeando-os em funções de transferência. Através desta, as funções no tempo são transformadas e passam a ser representadas em função de uma variável  $s$  conhecida como frequência complexa. Por convenção, representa-se a dinâmica em função do tempo com letras minúsculas ( $y(t)$ ,  $x(t)$ ,  $g(t)$ ,  $f(t)$ ), e suas transformadas por letras maiúsculas ( $Y(s)$ ,  $X(s)$ ,  $G(s)$ ,  $F(s)$ ) (CARRARA, 2011).

Estando o sistema sujeito à entrada de referência  $R(s)$  e à entrada de distúrbio  $D(s)$ , logo pode-se analisar a saída do processo  $Y(s)$  com relação aos efeitos por cada uma dessas entradas individualmente.

## 6.2 ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A maneira pela qual o controlador produz o sinal de controle em um sistema é denominada *ação de controle* ou *estratégia de controle*. No controle manual, o operador é o controlador do sistema, no qual baseia-se em sua observação no medidor para realizar a ação

manual de manter a variável do processo no valor desejado. Já no controle automático, onde o controlador é um equipamento microprocessado, ações mais robustas podem ser implementadas na malha de controle, conforme abordadas nos controladores clássicos descritos a seguir (MELO, 2014).

## 6.3 CLASSIFICAÇÃO DE CONTROLADORES

Os controladores podem ser classificados, de acordo com a ação de controle, como:

- Controladores de duas posições ou liga-desliga (*on-off*)
- Controladores proporcionais (P)
- Controladores do tipo integral (I)
- Controladores do tipo proporcional e integral (PI)
- Controladores do tipo proporcional e derivativo (PD)
- Controladores do tipo proporcional, integral e derivativo (PID)

Neste trabalho foram realizados testes com os controladores PI e PID, desse modo serão mostradas as estratégias de controle apenas para esses dois tipos de controladores.

### 6.3.1 CONTROLADORES PROPORCIONAL E INTEGRAL (PI)

Uma forma padrão de melhorar a acurácia de controle sem recorrer a um  $K_p$  extremamente elevado, é introduzir uma *ação integral* no controlador (FRANKLIN, POWELL e EMAMI-NAEINI, 2002).

Dessa forma, a lei de controle pode ser representada como:

$$u(t) = k_p e(t) + \int_{t_0}^t k_i e(\tau) d\tau$$

$$\stackrel{\mathcal{L}}{\Rightarrow} U(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) E(s) \therefore G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (6.1)$$

onde:  $K_p$  é o ganho proporcional do controlador [adimensional] e  $K_i$  é o ganho integral.

### 6.3.2 CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO (PID)

A ação *Proporcional-Integral-Derivativo* é a mais usado na indústria e tem sido utilizada em todo o mundo para sistemas de controle industrial. A popularidade de controladores PID pode ser atribuída em parte ao seu desempenho robusto em uma ampla gama de condições de funcionamento e em parte à sua simplicidade funcional (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011).

O controlador PID pode ser representado em Laplace da forma

$$u(t) = k_p e(t) + \int_{t_0}^t k_i e(\tau) d\tau + k_d \frac{d}{dt} e(t)$$

$$\stackrel{\mathcal{L}}{\Rightarrow} G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (6.2)$$

ou equivalente nos processos industriais

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (6.3)$$

onde:  $K_p$  é o ganho proporcional do controlador [*adimensional*],  $K_i$  é o ganho integral,  $K_d$  é o ganho derivativo do controlador,  $T_i$  é a constante de tempo integral [*segundos*] e  $T_d$  é a constante de tempo derivativa [*segundos*].

## 7 MATERIAIS E METODOLOGIA

### 7.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesse trabalho consistem em livros, revistas, sites e artigos como fontes de referências bibliográficas. Além disso, foi necessário a utilização de *software* tais como *Matlab e toolboxes*, *LabVIEW*, *SIMATIC Step7-200* e *Arduino IDE*.

Foi utilizada uma plataforma que é designada para a realização de ensaios relacionados com a formação, identificação e controle de parâmetros associados às incrustações desenvolvida no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Essa plataforma é caracterizada como um sistema de monitoramento distribuído e é composta por tubos de aço galvanizado, válvulas manuais, uma bomba centrífuga que é controlada por um inversor de frequência e uma válvula eletrônica de controle do tipo globo. Outros dispositivos integrantes da plataforma foram previamente descritos no Capítulo 3.

Para o controle e monitoração dos parâmetros de interesse, foi realizada a instrumentação da plataforma por meio de sensores de vazão, pressão, temperatura, tensão e corrente. A aquisição dos dados provenientes dos sensores foi feita através do Arduino e por meio de um Controlador Lógico Programável (CLP) que estabelece uma comunicação com o *software LabVIEW* por meio de um servidor OPC. Além disso, o CLP é o responsável por receber os dados de controle, processados no *LabVIEW*, e enviá-los para os atuadores (inversor de frequência e válvula eletrônica de controle). Uma fotografia da plataforma de testes é apresentada nas Figuras 7-1, 7-2 e 7-3 (BEZERRA, 2015).

### 7.2 METODOLOGIA

A metodologia de trabalho proposta consiste na realização de uma sequência de atividades onde, a cada novo conhecimento adicionado, há um *feedback* que permite reavaliar os resultados anteriores e assim otimizar continuamente o projeto.

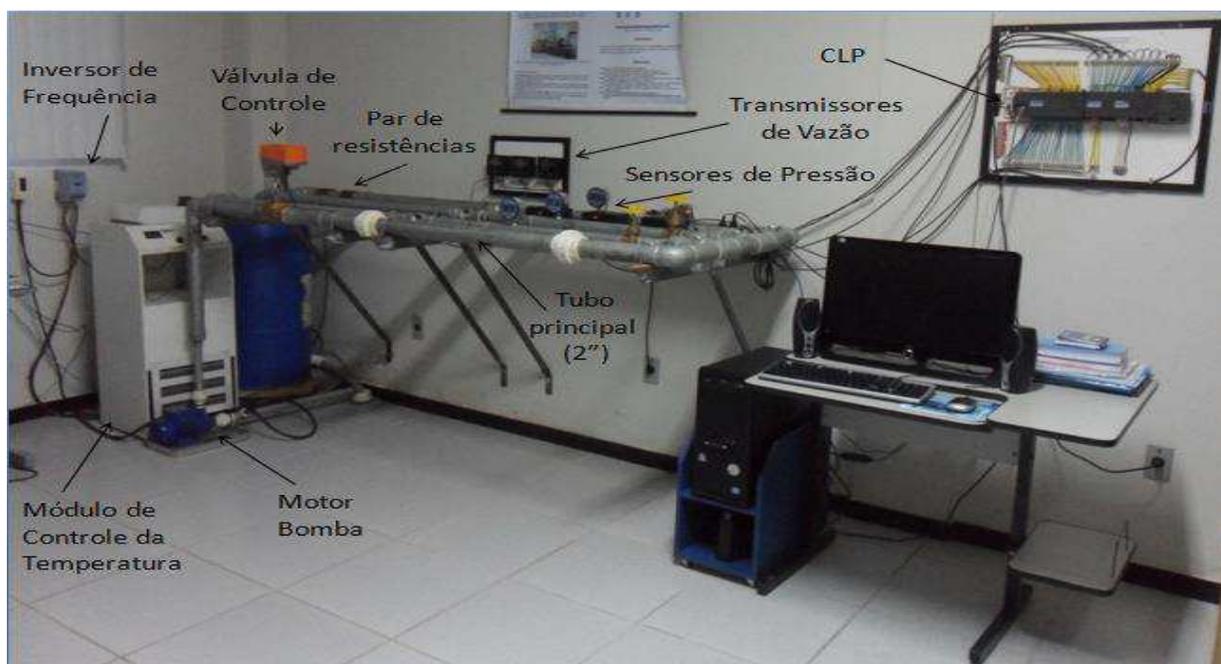


Figura 7-1: Fotografia da Plataforma de Detecção de Incrustação (MELO, 2014).



Figura 7-2: Fotografia da Plataforma de Detecção de Incrustação.

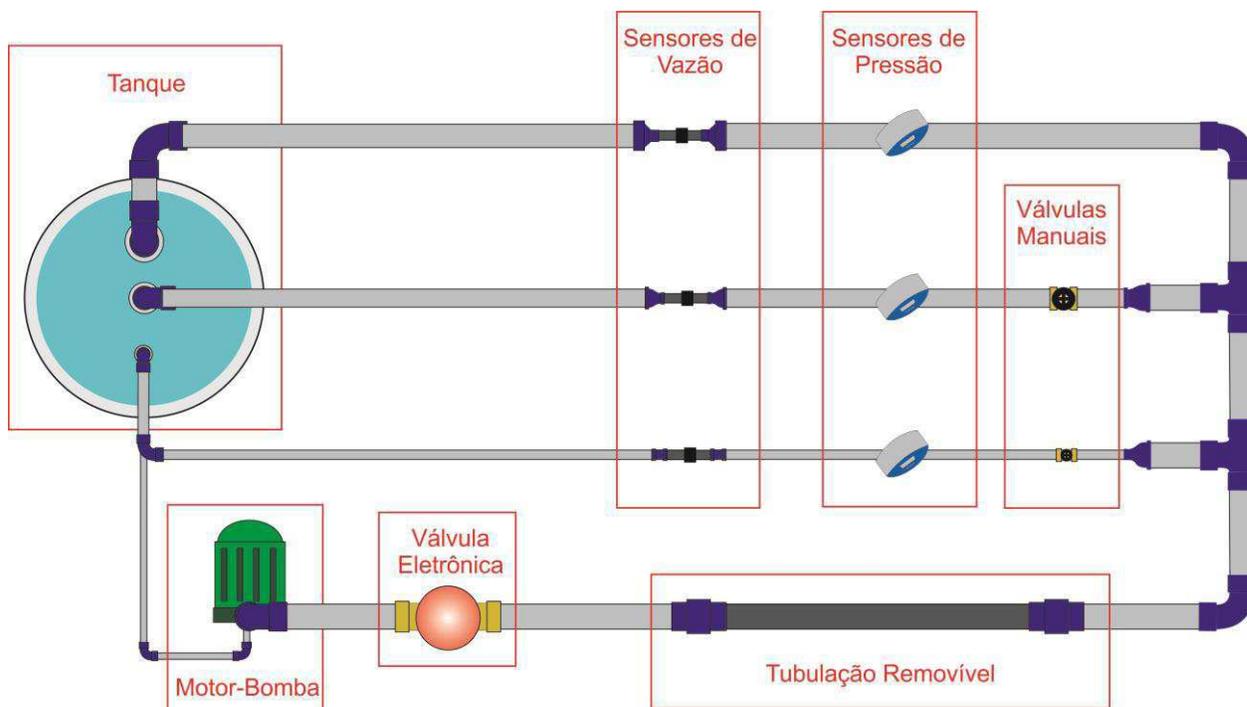


Figura 7-3: Planta Baixa da Plataforma.

Para a consecução dos objetivos, na **Etapa I** foi realizada uma revisão bibliográfica, não sendo um passo exclusivo desta etapa, onde foi necessário recorrer a várias fontes de pesquisa referenciadas nesse trabalho ao deparar-se por situações problemas ao longo da pesquisa. Nessa etapa foram estudados o fenômeno da incrustação, os dispositivos e/ou equipamentos presentes na plataforma estudada, *software* que auxiliaram no desenvolvimento do problema sendo estes *LabVIEW* (usado na implementação da IHM) e *SIMATIC Step7-200* (necessário para a implementação do código *Ladder*).

Na **Etapa II**, estudou-se a influência dos inversores de frequência e das válvulas de estrangulamento nos sistemas de bombeamento de fluidos. Este passo foi necessário, pois foi verificado em alguns artigos referentes a sistemas de bombeamento e eficiência energética que a utilização de válvulas de estrangulamento geram perdas de carga e aumentam o consumo de energia. Além disso, surgiram novas ideias inerentes a como chegar a uma solução do problema. Essa consistiu em simular incrustações no sistema por meio de tubos com parafinas no seu interior.

Após isso, a **Etapa III** consistiu em implementar uma Interface Homem-Máquina para servir como ferramenta para obtenção dos dados necessários para a modelagem matemática da plataforma. Vale destacar que a implementação de interfaces já desenvolvidas em trabalhos anteriores facilitou significativamente no desenvolvimento e conclusão desta etapa.

Após a modelagem do sistema e implementação do sistema de controle supervisório, na **Etapa IV**, foi necessário desenvolver um sistema para aquisição de dados da tensão e corrente elétrica na entrada do inversor de frequência, sendo esta uma etapa de projeto e desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados.

Com o sistema devidamente instrumentado, foi possível realizar ensaios com tubos incrustados em dois níveis de incrustação na **Etapa V**.

Na **Etapa VI**, com a obtenção dos dados experimentais, foi possível realizar tratamentos matemáticos para analisar a relação entre a energia do sistema e a incrustação e consequentemente encontrar maneiras de aumentar a sua eficiência.

Por fim, a conclusão do trabalho e elaboração do relatório do Trabalho de Conclusão de Curso na **Etapa VII**.

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 8.1 IDENTIFICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS DAS PLANTAS

Para o fechamento de cada malha de controle, é essencial encontrar o modelo respectivo da planta. Como a grande maioria dos sistemas reais podem ser satisfatoriamente representados por modelos de primeira ou segunda ordem com atraso de transporte (FOPDT ou SOPDT), visto a facilidade de explicitar a dinâmica da planta de maneira simplificada, utilizou-se então, da teoria de identificação de sistemas em malha aberta para obter os modelos das plantas em estudo (MELO,2014), sendo este o método de resposta ao degrau.

Com a aquisição dos dados obtidos da resposta da vazão no tubo principal (tubo de 2") a alguns estímulos do tipo degrau por meio do inversor de frequência (que por sua vez atua diretamente na bomba centrífuga), foi possível realizar a identificação em malha aberta do sistema dinâmico. De posse dos valores obtidos, importou-se os dados coletados para o *software Matlab* por meio do *Toolkit System Identification Tool* (Figura 8-1), onde foi possível fazer a estimação dos parâmetros do modelo da planta no domínio da frequência, obtendo assim um modelo de primeira ordem com atraso (BEZERRA, 2015).

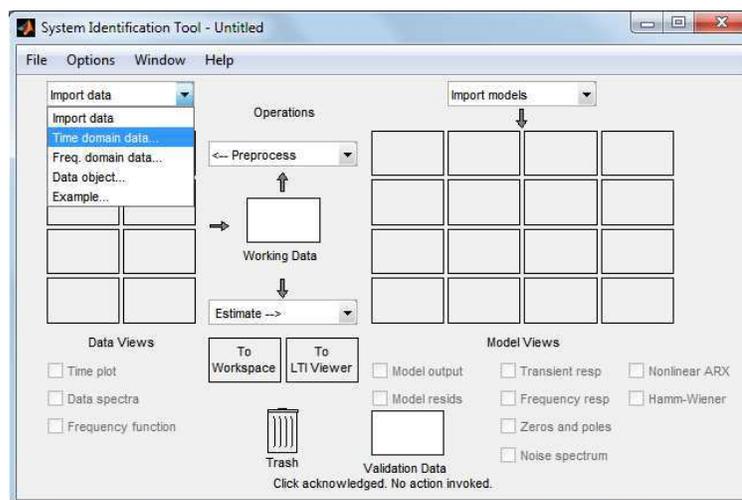


Figura 8-1: Tela principal da função Ident (BEZERRA, 2015).

Como pode-se observar na Figura 8-2, o *Ident* apresenta o valor percentual das curvas com relação à curva original, obtida experimentalmente. Sendo assim, o modelo que apresentou maior percentual (94,15%) foi o escolhido. Na Tabela 1 estão apresentados os resultados dos modelos matemáticos obtidos (BEZERRA, 2015).

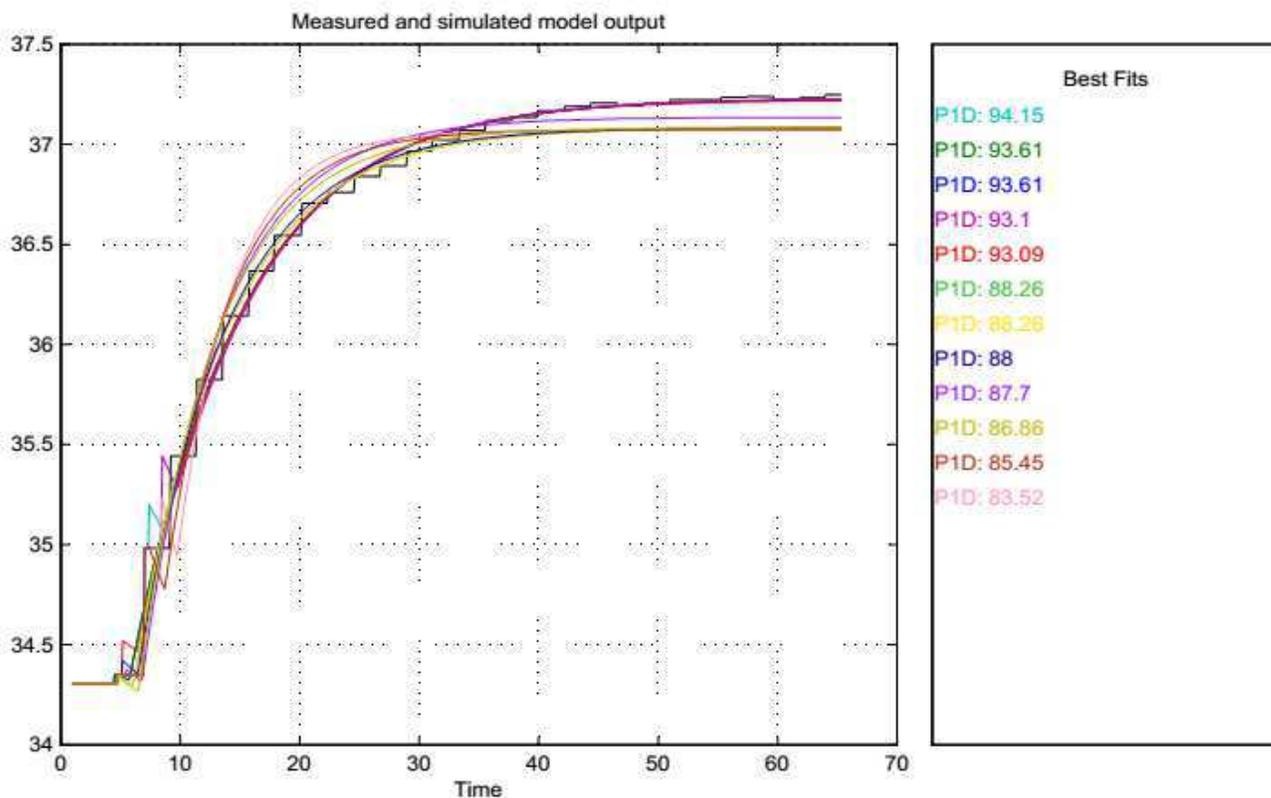


Figura 8-2: Respostas ao degrau e percentuais dos modelos matemáticos (BEZERRA, 2015).

Conforme mostrado na Figura 8-3a, a modelagem matemática da plataforma foi aproximada por um modelo de primeira ordem com atraso, onde os parâmetros podem ser na Figura 8-3b.

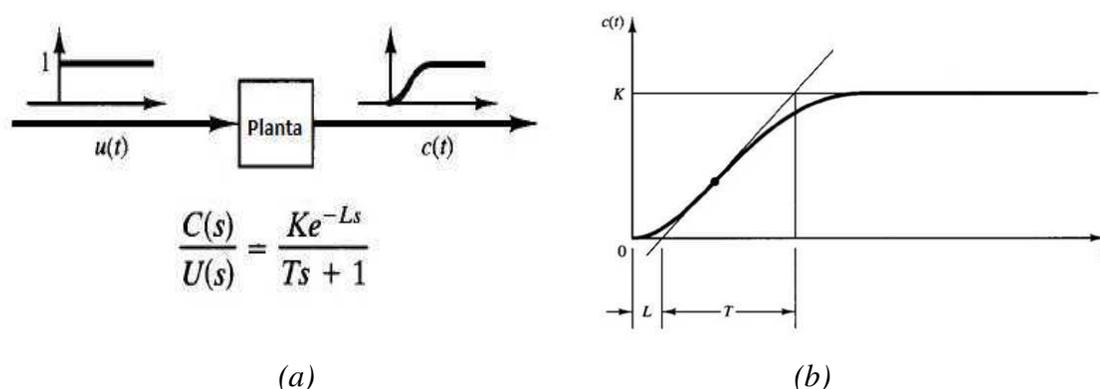


Figura 8-3: Resposta da Planta ao Degrau e Identificação de Sistemas

Tabela 1 - Dados de modelos de primeira ordem para os experimentos realizados (BEZERRA, 2015)

Percentual [%]	K	L	$\tau$
83,52	0,61782	4,6580	7,4518
85,45	0,61789	5,4429	6,4000
86,86	0,61807	6,6158	4,1687
87,70	0,61889	6,6158	4,4774
88,00	0,61804	7,3266	4,1500
88,26	0,61806	7,6925	3,7407
93,09	0,62037	9,0826	4,1500
93,10	0,62049	9,2267	7,4518
93,61	0,62046	9,3682	3,4418
94,15	0,62044	9,1766	6,4000

## 8.2 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR

Com o modelo matemático definido, foi possível aplicar técnicas de sintonia de controladores com a finalidade de escolhermos aquele que apresentasse respostas satisfatórias para a análise do comportamento da plataforma.

Dentre as técnicas de sintonia baseadas em aproximação de modelos de plantas para sistemas de primeira ordem com atraso, foram escolhidas sete técnicas. São elas:

- Método da Curva de Reação, proposto por Ziegler-Nichols (ZN);
- Método de Cohen-Coon (CC);

- Método de Chien, Hrones e Reswick (CHR), para 0% de sobressinal
- Método de Chien, Hrones e Reswick (CHR), para 20% de sobressinal;
- Métodos de Otimização IAE, como o proposto por Rovira, para variação do sinal de referência;
- Métodos de Otimização ITAE, como o proposto por Rovira, para variação do sinal de referência;
- InternalModelControl (IMC);

Na Tabela 2 estão representados os parâmetros encontrados para cada método de sintonia e seus respectivos índices de desempenho para rastreamento do sinal de referência (SR). Os índices de desempenho escolhidos para realizar-se uma análise comparativa entre os controladores foram: tempo de subida ( $t_r$ ), tempo de estabilização ( $T_s$ ), sobressinal ( $M_p$ ), tempo de pico ( $t_p$ ), Integral do Erro Absoluto (IAE), Integral do Tempo multiplicado pelo Erro Absoluto (ITAE) e Integral Quadrática do Erro (ISE). Sendo assim, o método de Otimização ITAE proposto por Rovira foi a técnica de sintonia escolhida por apresentar menor tempo de estabelecimento, além de apresentar um sobressinal aceitável (menor que 5%).

Foram testadas três sintonias de controladores: Métodos de Otimização ITAE, como o proposto por Rovira para variação do sinal de referência (que apresentou uma resposta oscilatória), Método da Curva de Reação, proposto por Ziegler-Nichols (ZN) (que apresentou um alto sobressinal) e *Internal Model Control* (IMC) (que foi a técnica que apresentou respostas satisfatórias).

Na Figura 8-4 são apresentadas as respostas ao degrau dos sistemas em malha fechada com os controladores PI. Pode-se perceber que nos controladores PID (Figura 8-5) a ação derivativa torna mais agressivo o sinal de controle sobre o sistema ao analisar-se a resposta ao degrau dos sistemas em malha fechada, sendo assim, optou-se por usar o controlador PI (BEZERRA, 2015).

Tabela 2 - Controladores PI propostos e o índices de desempenho (BEZERRA, 2015).

Técnica de Sintonia	Parâmetros				Índices de Desempenho				
	Kc	Ti	tr	Ts	Mp	tp	IAE	ITAE	ISE
ZN	2,0799	21,1200	7,4347	90,0241	1,4581	18,7467	16,4141	355,1003	9,6769
CC	2,2137	8,8795	5,2931	71,5512	48,1568	19,6177	18,0391	313,0708	10,8041
CHR 0% (SR)	0,8089	11,0119	34,3176	73,5738	0,0000	234,6581	21,9417	380,5908	14,0051
CHR 20% (SR)	1,3866	9,1766	9,2558	36,3914	11,6589	24,9402	13,4567	121,8231	10,1128
Otimização (Rovira - IAE)	1,6662	11,5468	8,1469	45,7319	9,5200	22,0376	12,6041	109,7675	9,5898
Otimização (Rovira - ITAE)	1,3139	10,0299	10,7236	32,7152	4,2603	26,5675	13,0975	105,2487	10,3145
IMC	0,6622	6,4000	18,4040	63,6367	6,3690	44,0257	18,5446	242,1265	13,2623

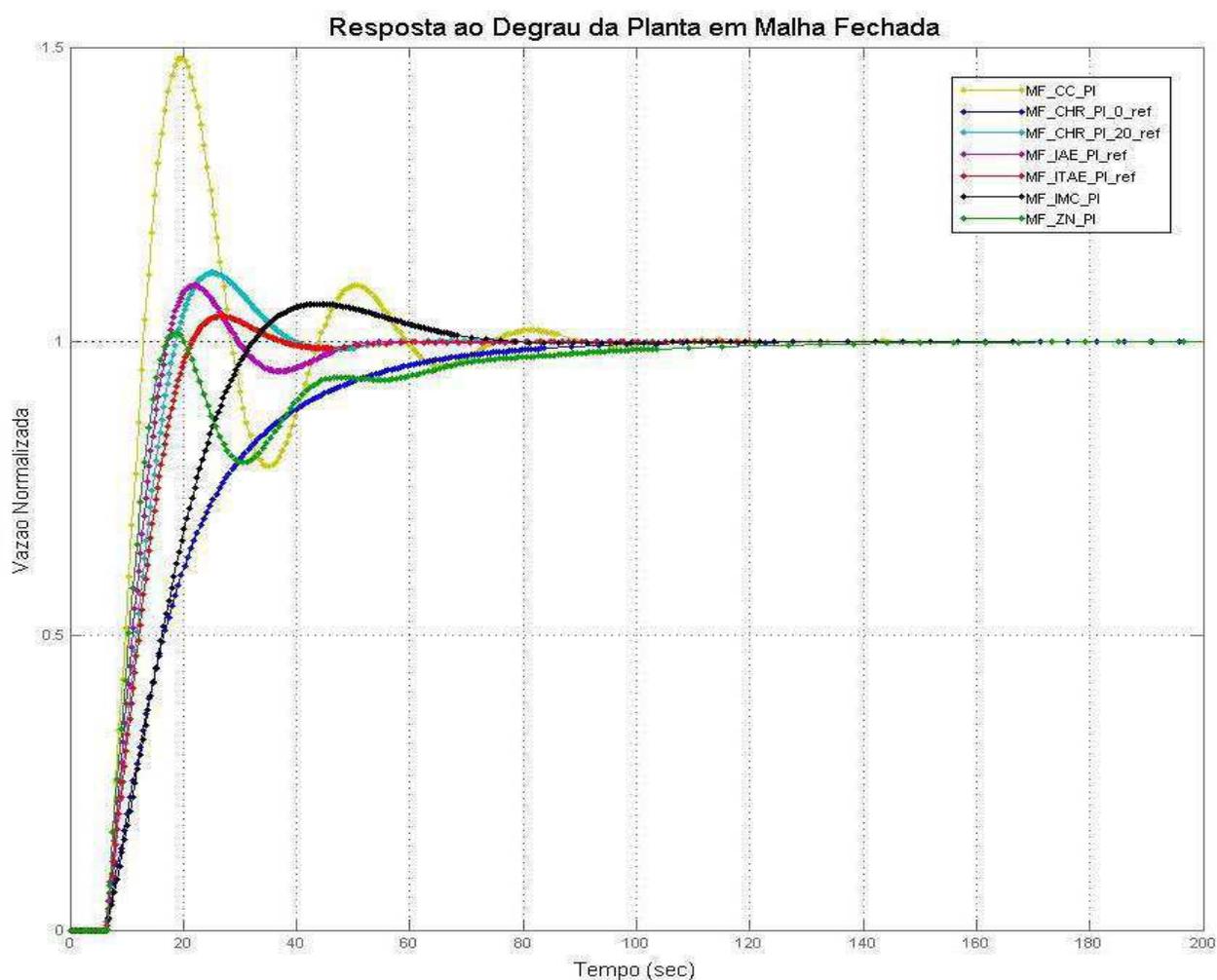


Figura 8-4: Resposta ao degrau do sistema em malha fechada projetado com o controlador PI (BEZERRA, 2015)

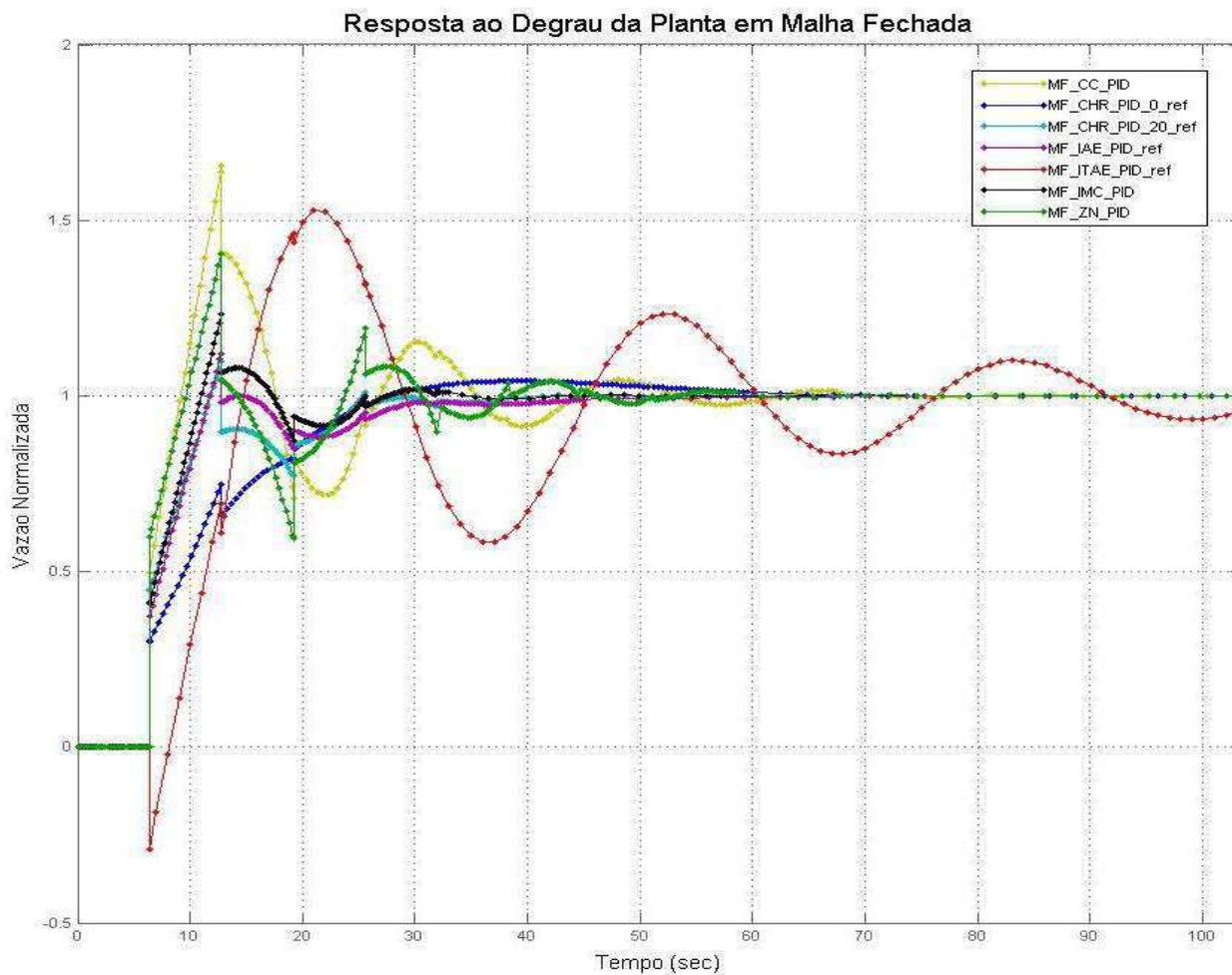


Figura 8-5: Resposta ao degrau do sistema em malha fechada projetado com o controlador PID (BEZERRA, 2015).

A implementação do controlador se deu por meio do *Toolkit PID and Fuzzy Logic* do software *LabVIEW*. Um detalhe importante que vale ser ressaltado é que as constantes de tempo dos controladores foram projetadas na unidade de tempo “segundos” e na VI PID do *Toolkit* utilizado a unidade de tempo é dada em “minutos” sendo necessária, assim, a conversão entre as unidades.

### 8.3 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA

Por limitações técnicas do CLP utilizado, foi necessária a utilização de outro hardware (Arduino Mega 2560) capaz de realizar a aquisição dos dados referentes à tensão e corrente elétrica consumidas pelo conjunto inversor de frequência mais bomba.

Para ser possível medir os sinais de corrente e tensão por meio dos sensores citados nos tópicos 2.3.2.4 e 2.3.2.5, foi necessário realizar o condicionamento dos sinais para a faixa de tensão de 0 a 5V, pois esta é a faixa de tensão permitida para as entradas analógicas do Arduino. O diagrama elétrico utilizado para o circuito de condicionamento do sensor de tensão está apresentado na Figura 8-6. Já na Figura 8-7, é mostrado o diagrama elétrico do circuito de condicionamento do sensor de corrente.

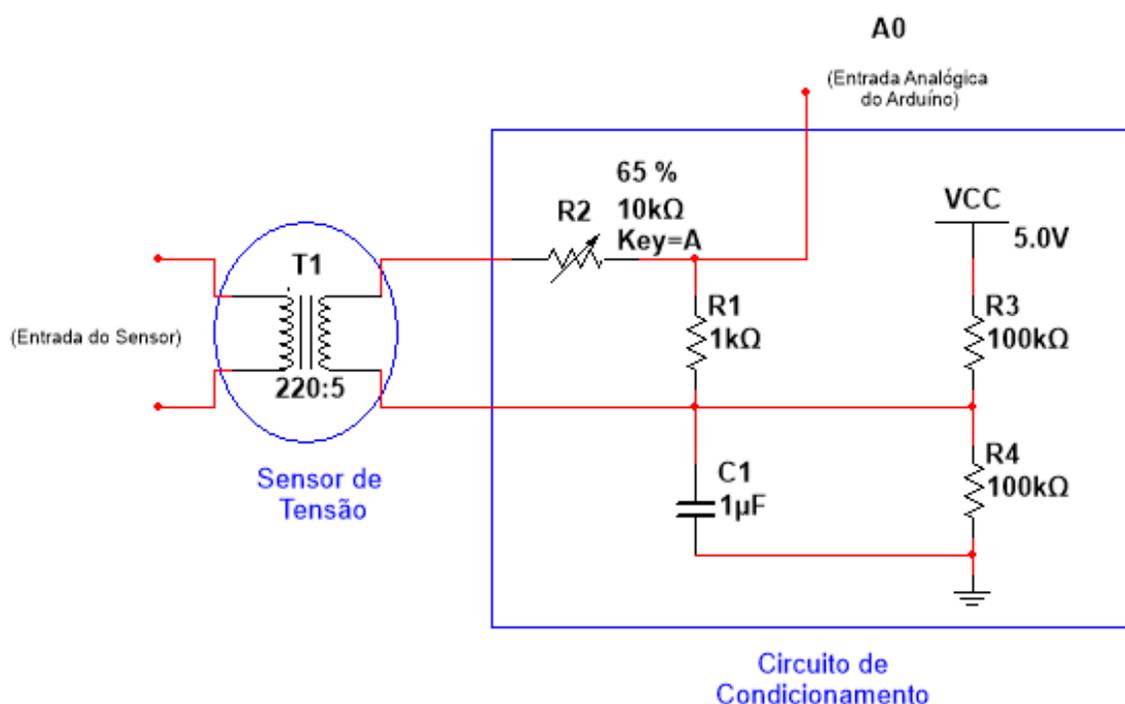


Figura 8-6: Diagrama elétrico do circuito de condicionamento do sensor de tensão.

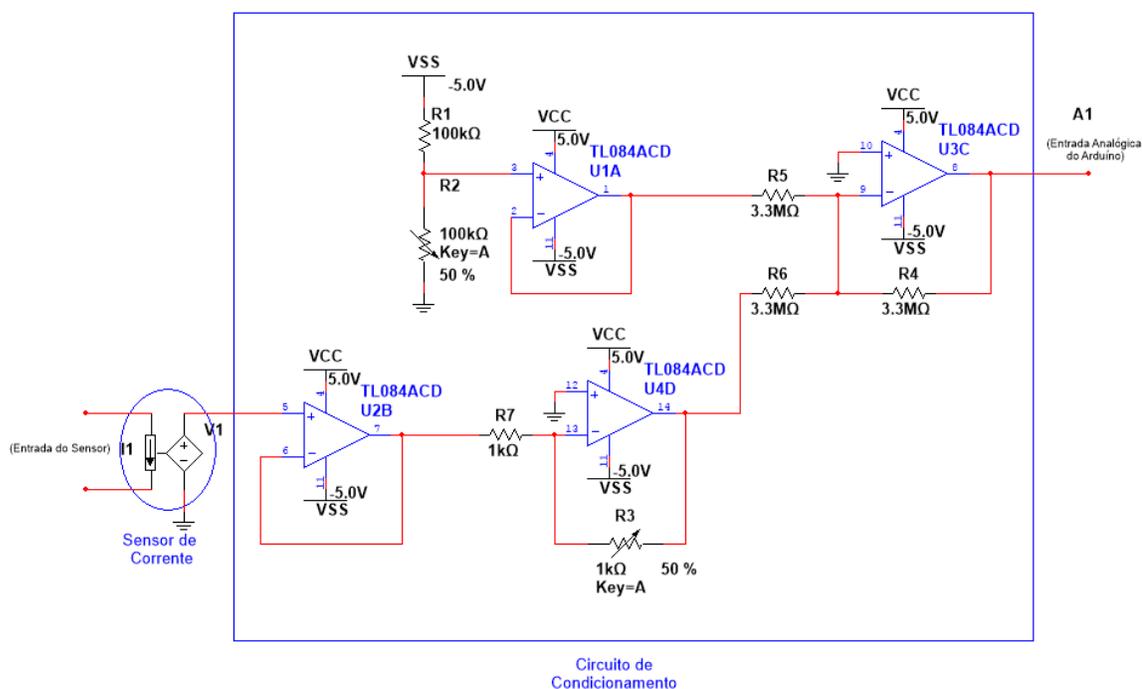


Figura 8-7: Diagrama elétrico do circuito de condicionamento do sensor de corrente

## 8.4 INTERFACE HOMEM MÁQUINA

A IHM desenvolvida tem a finalidade de mostrar os valores das leituras dos sensores, mostrar informações inerentes à quantidade de incrustações no interior da tubulação, assim como atuar na plataforma por meio de sinais de comandos enviados aos atuadores.

Com o agrupamento de todas essas informações, a interface ficou consideravelmente grande, desse modo, será mostrada em partes para facilitar o entendimento da mesma. Além disso, optou-se por separar as informações em abas sendo estas:

- Painel Principal: onde serão mostrados as principais informações para o estudo em questão.
- Gráficos: onde serão mostrados os gráficos de todas as variáveis medidas e manipuladas na plataforma.
- Configurações: responsável por algumas configurações pertinentes aos protocolos de comunicação utilizados.

Foram criados atalhos para facilitar o manuseio da IHM. Estes estão listados na Tabela 3.

*Tabela 3– Atalhos implementados na IHM.*

Tecla	Função
F1	SetPoint da Válvula Eletrônica
F2	Controle de Vazão: Malha Aberta/Malha Fechada
F3	SetPoint Vazão
F4	Modo de Operação: SetPoint Frequência/Passo Automático
F5	SetPoint Frequência
F8	Liga/Desliga Passo Automático
F9	Frequência Inicial
F10	Frequência Final
F11	Tempo de Passo
F12	Passo
Insert	Ganho Proporcional
Home	Tempo Integral
Page Up	Tempo Derivativo

#### 8.4.1 PAINEL PRINCIPAL

O painel principal foi subdividido em quatro partes: (1) Sensores e Atuadores, (2) Controle dos Atuadores e Modo de Operação, (3) Estimativas e (4) Grandezas Elétricas. As suas respectivas funções são as seguintes:

- Sensores e Atuadores – Mostrar os valores dos sensores de vazão, pressão e temperatura, além dos estados atuais dos atuadores (Inversor de Frequência e Válvula Eletrônica). Esta subdivisão está mostrada na Figura 8-10.
- Controle dos Atuadores e Modo de Operação – Controlar os atuadores em malha aberta e modificar o modo de operação para o inversor de frequência para Malha fechada onde o controle será feito por meio da vazão e não diretamente na frequência. Além disso, foi implementado um modo de operação denominado “Passo Automático”, onde é possível realizar uma rampa de subida ou de descida na frequência para análises experimentais. Esta subdivisão está mostrada na Figura 8-9.

- Estimativas – Mostra as potências estimadas para seis níveis de incrustações em função da frequência atual. Além de mostrar a Incrustação estimada, a máxima eficiência possível de obter-se com esse volume de incrustação e a frequência de trabalho do inversor de frequência que levará o sistema a esse ponto de eficiência máxima. Esta subdivisão está mostrada na Figura 8-8.
- Grandezas Elétricas – Mostra os gráficos e os valores da tensão, corrente, potência instantânea e da potência ativa. Esta subdivisão está mostrada na Figura 8-11.

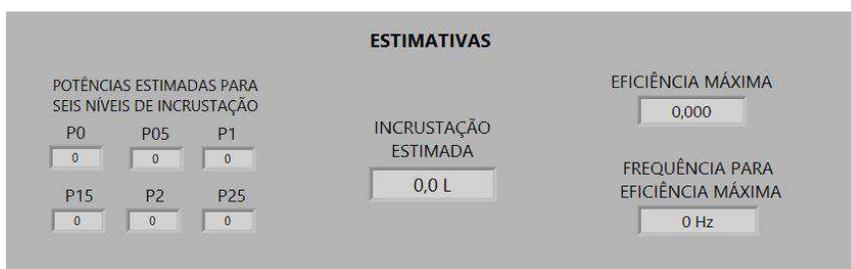


Figura 8-8: IHM - Painel Principal -Estimativas.

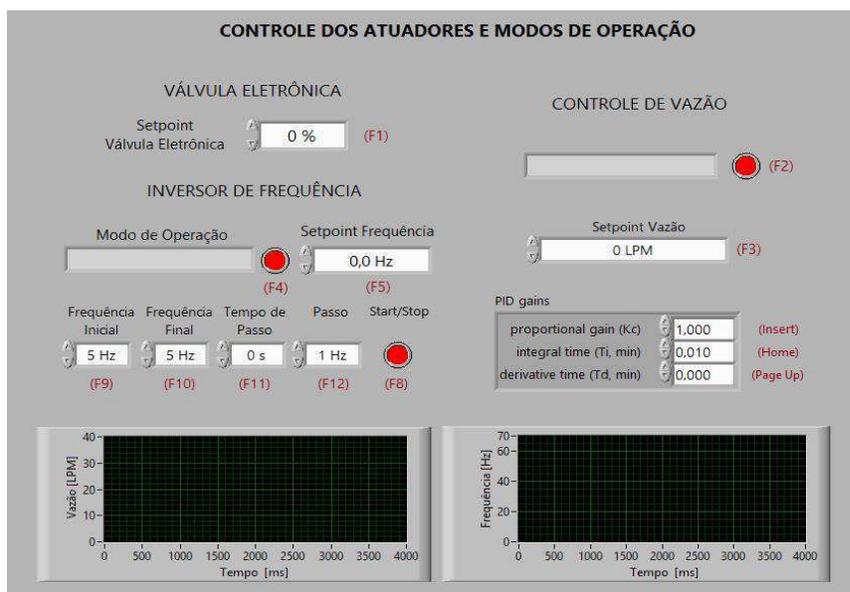


Figura 8-9: IHM - Painel Principal - Controle dos Atuadores e Modo de Operação

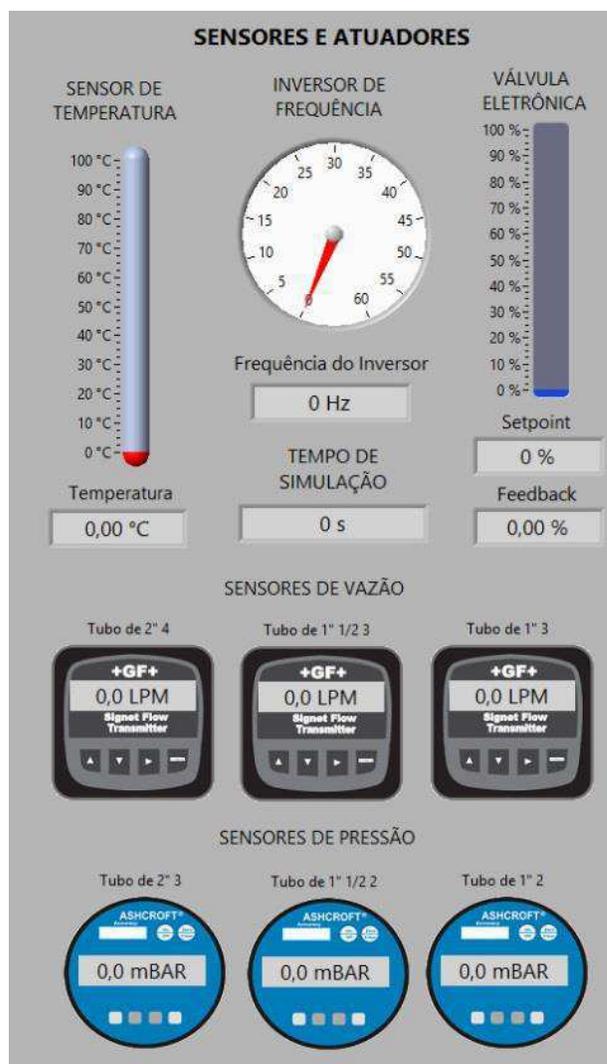


Figura 8-10: IHM - Painel Principal - Sensores e Atuadores.

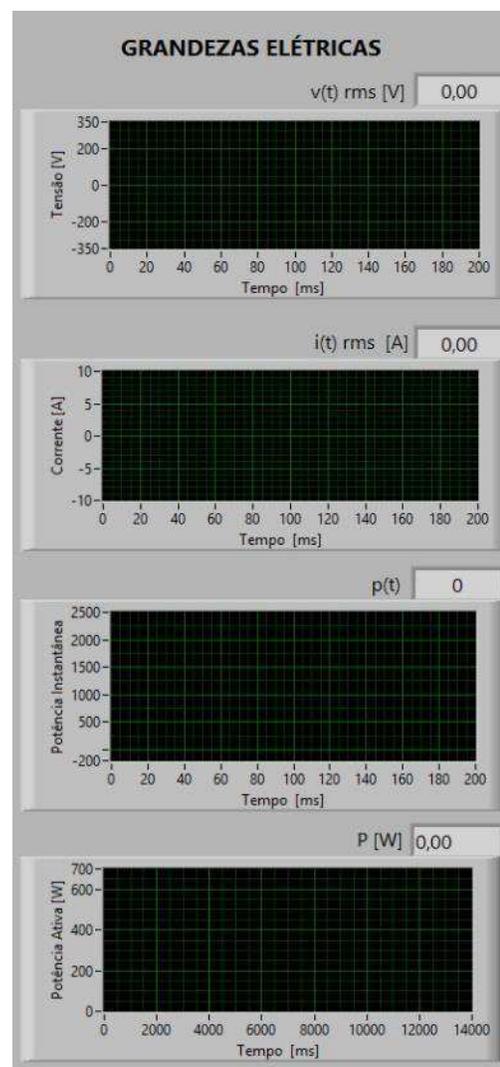


Figura 8-11: IHM - Painel Principal - Grandezas Elétricas.

## 8.5 ESTIMATIVA DAS POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA INCRUSTAÇÃO

Com a finalidade de estudar a relação da incrustação com a potência elétrica consumida pelo motor-bomba, foram realizados testes experimentais aumentando o volume de incrustação no interior da tubulação. Isso foi possível, pois no projeto da plataforma foi levado em consideração o tempo gasto para gerar incrustações no interior das tubulações, além do custo com

manutenção da plataforma que seria necessário caso as incrustações fossem geradas e após os experimentos deveriam ser removidas para não danificar os equipamentos presentes na plataforma.

Desse modo, com a utilização de flanges, foi possível remover uma parte do tubo da plataforma e inserir parafina no interior do mesmo. Os volumes de incrustação trabalhados foram de um e dois litros.

Os gráficos de pressão, vazão e potência elétrica em função da frequência obtidos experimentalmente estão mostrados nas Figuras 8-12, 8-13 e 8-14, respectivamente.

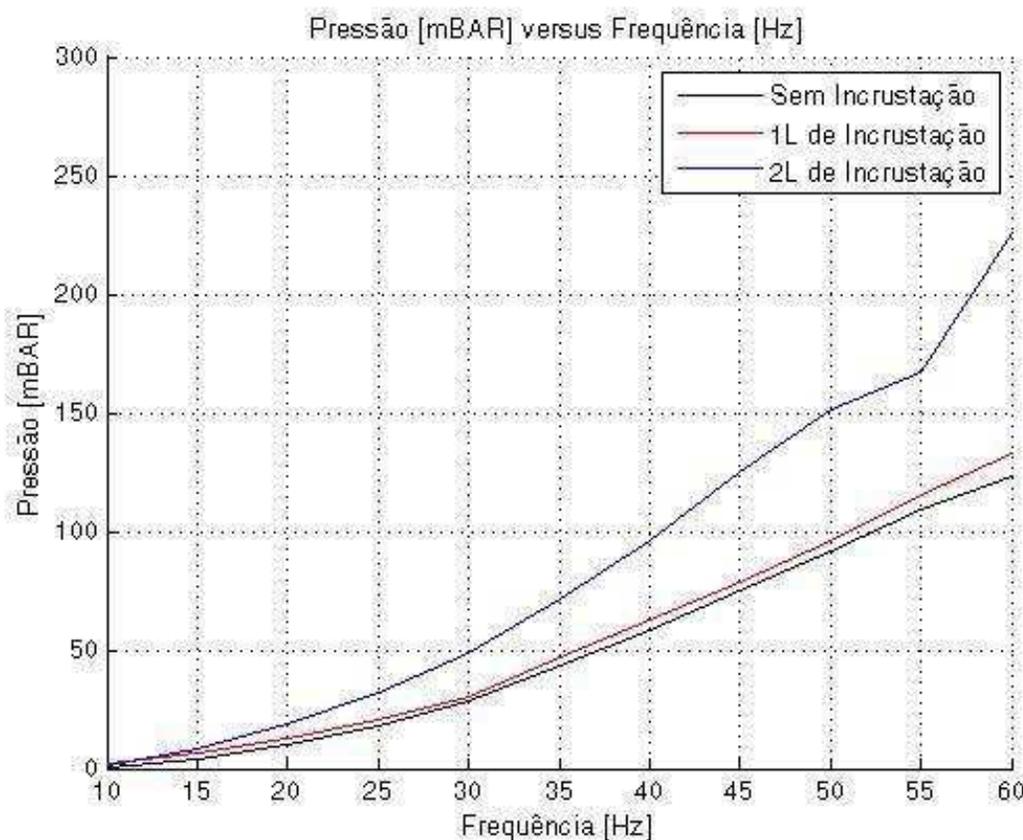


Figura 8-12: Gráfico da Pressão versus Frequência obtido experimentalmente.

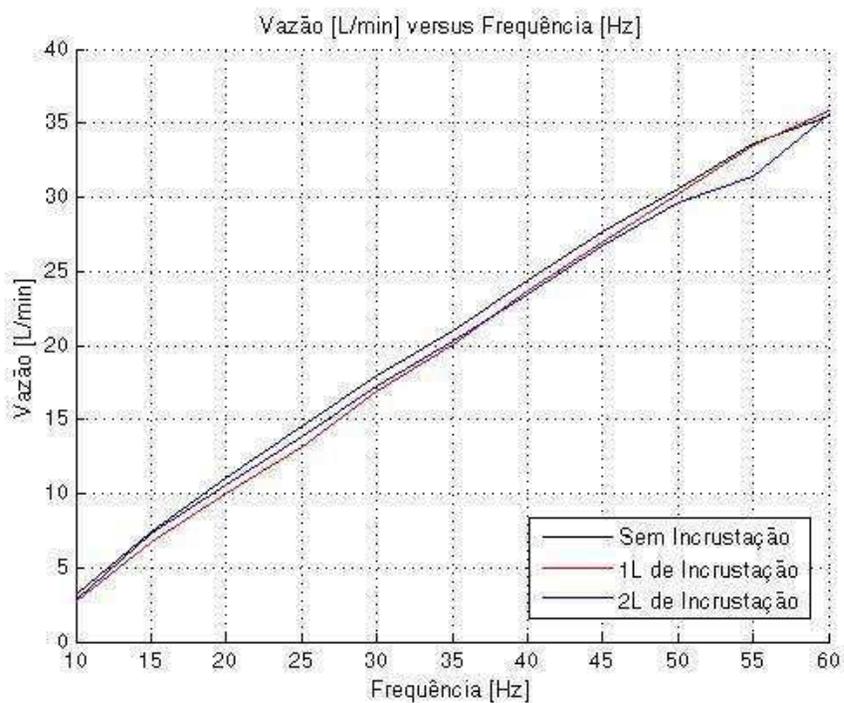


Figura 8-13: Gráfico da Vazão versus Frequência obtido experimentalmente.

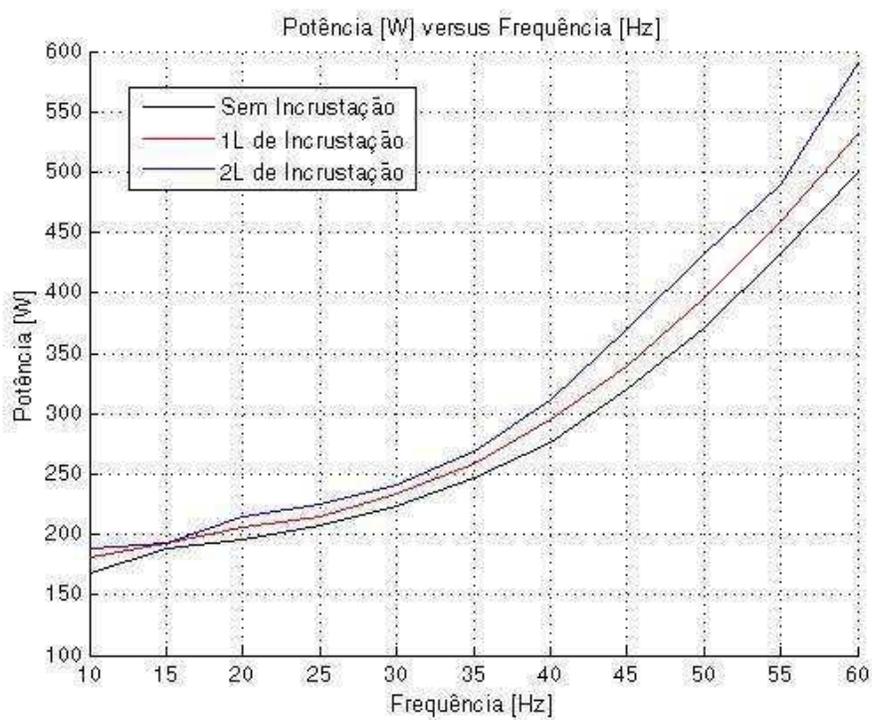


Figura 8-14: Gráfico da Potência versus Frequência obtido experimentalmente.

As funções obtidas por meio das curvas experimentais para os coeficientes foram as seguintes:

$$\begin{aligned}
 p5(\text{inc}) &= 9.305e-007*\text{inc}^2 - 2.585e-007*\text{inc} + 5.242e-006 \\
 p4(\text{inc}) &= -1.352e-004*\text{inc}^2 + 1.660e-005*\text{inc} - 9.764e-004 \\
 p3(\text{inc}) &= 6.935e-003*\text{inc}^2 + 6.150e-004*\text{inc} + 6.995e-002 \\
 p2(\text{inc}) &= -1.445e-001*\text{inc}^2 - 4.850e-002*\text{inc} - 2.230e+000 \\
 p1(\text{inc}) &= 1.060e+000*\text{inc}^2 + 7.400e-001*\text{inc} + 3.331e+001 \\
 p0(\text{inc}) &= -2.076e+000*\text{inc}^2 + 7.047e+000*\text{inc} + 3.056e+000
 \end{aligned}$$

A partir daí, foi possível estimar curvas de potência para vários níveis de incrustação. Estimou-se então para  $\text{inc} = 0.5L$ ,  $\text{inc} = 1.5L$  e  $\text{inc} = 2.5L$ . As curvas obtidas para os seis níveis de incrustação são mostradas na Figura 8-15.

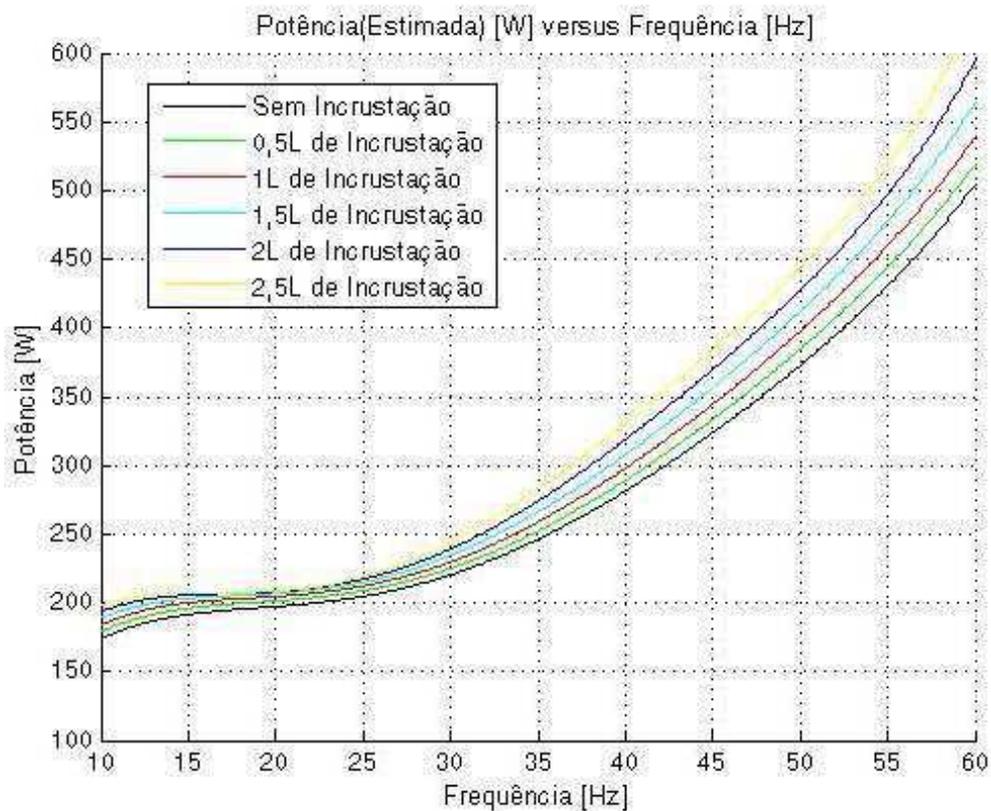


Figura 8-15: Gráfico da Potência (Estimada) versus Frequência.

## 8.6 CONSUMO RELATIVO DE POTÊNCIA E EFICIÊNCIA

Por meio das curvas de Potência obtidas, utilizou-se o tubo sem incrustação como referência para calcular-se o consumo relativo de potência. Sendo assim, foi possível traçar as curvas de consumo relativo que são mostradas na Figura 8-16.

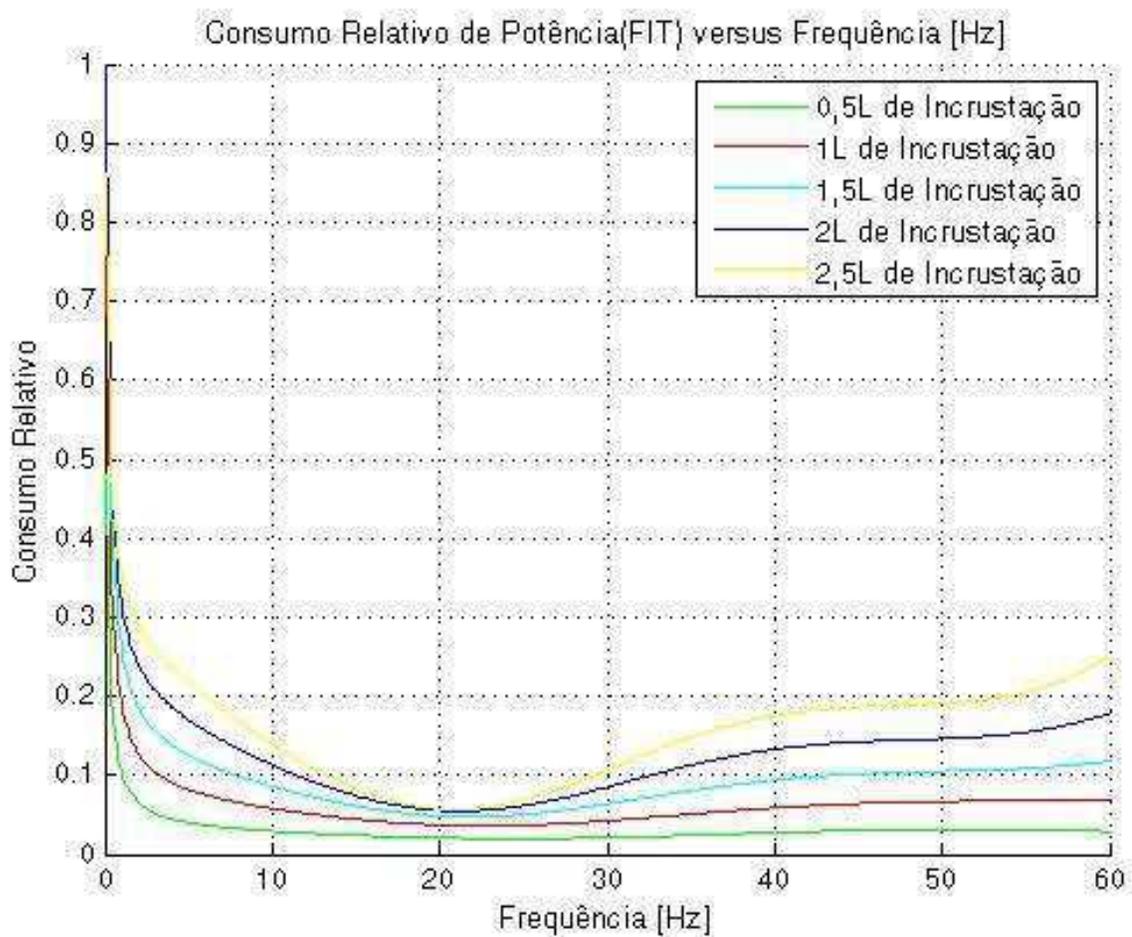


Figura 8-16: Consumo Relativo em função da Frequência.

Com as curvas de Consumo Relativo de Potência, foi possível calcular as curvas de Eficiência mostradas na Figura 8-17.

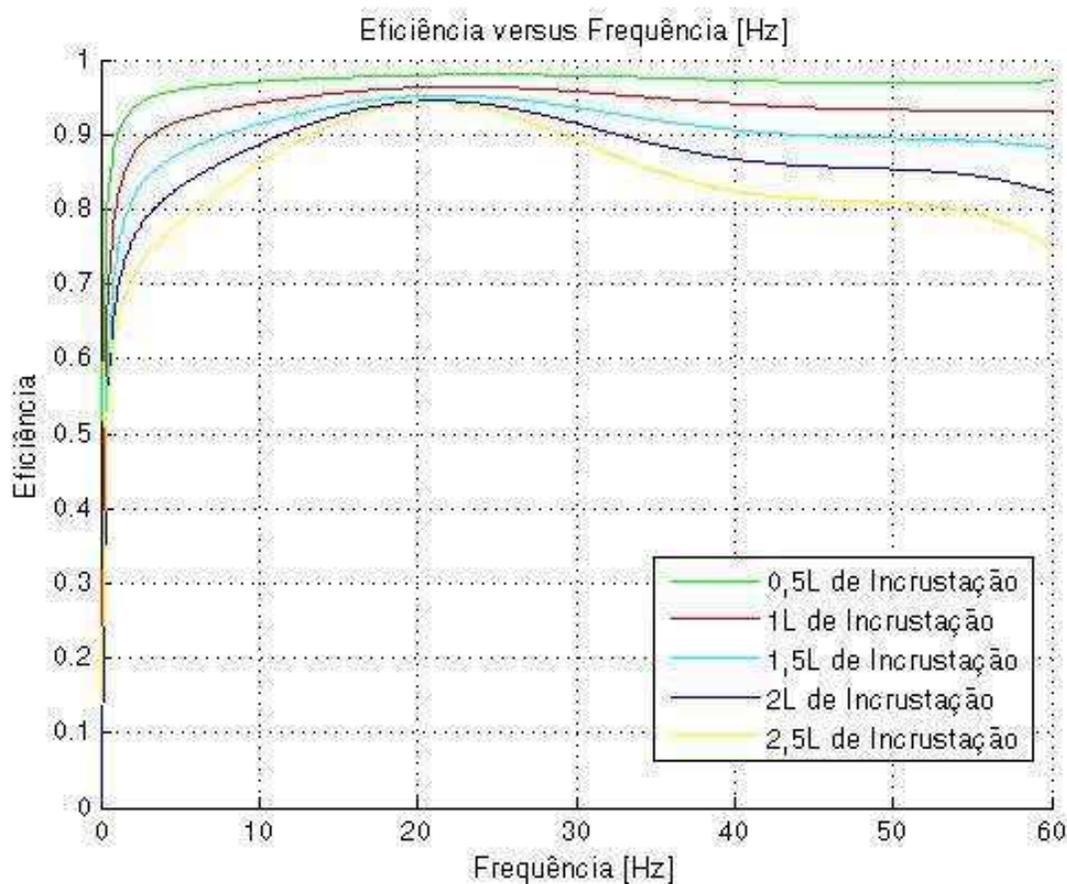


Figura 8-17: Eficiência em função da Frequência

## 8.7 ESTIMATIVA DA INCRUSTAÇÃO NO LABVIEW

Para identificar qual o ponto de maior eficiência na plataforma, é necessário saber o valor da frequência do inversor e do volume de incrustação. Para identificar o volume de incrustação, utilizou-se as curvas de potência em função da frequência. Foi medida a potência do inversor e a frequência correspondente, desse modo, o volume de incrustação foi estimado por meio de uma interpolação linear levando em consideração as curvas conhecidas calculadas na estimativa de Potência para vários níveis de incrustações.

Para obter os valores de Potência de referência (P0, P05, P01, P15, P2 e P25), utilizou-se a *VI MathScript Node*, onde é possível incluir entradas e saídas, além da implementação de códigos desenvolvidos na linguagem de programação do *Matlab*. Na Figura 8-18 é mostrada a VI implementada para calcular-se as Potências de Referência tendo com entrada o valor de Frequência (F).

```

1
2 P0= (5.2420e-006)*(F^5) + (-9.7640e-004)*(F^4) +(6.9950e-002)*(F^3) + (-2.2300e+000)*(F^2) + (3.3310e+001)*(F) + (3.0560e+000)
3
4 P05= (5.3453e-006)*(F^5) + (-1.0019e-003)*(F^4) +(7.1991e-002)*(F^3) + (-2.2903e+000)*(F^2) + (3.39450e+001)*(F) + (6.0604e+000)
5
6 P1= (5.9140e-006)*(F^5) + (-1.0950e-003)*(F^4) +(7.7500e-002)*(F^3) + (-2.4230e+000)*(F^2) + (3.51100e+001)*(F) + (8.0270e+000)
7
8 P15= (6.9478e-006)*(F^5) + (-1.2557e-003)*(F^4) +(8.6476e-002)*(F^3) + (-2.6278e+000)*(F^2) + (3.68050e+001)*(F) + (8.9554e+000)
9
10 P2= (8.4470e-006)*(F^5) + (-1.4840e-003)*(F^4) +(9.8919e-002)*(F^3) + (-2.9050e+000)*(F^2) + (3.90300e+001)*(F) + (8.8460e+000)
11
12 P25= (1.0411e-005)*(F^5) + (-1.7799e-003)*(F^4) +(1.1483e-001)*(F^3) + (-3.2543e+000)*(F^2) + (4.17850e+001)*(F) + (7.6985e+000)

```

Figura 8-18: VI MathScript Node implementada para calcular as Potências de Referência.

A interpolação foi implementada por meio da *VI Formula Node* onde também é possível incluir entradas e saídas e a implementação do código em C. Na Figura 8-19 é mostrada a VI implementada para obter a incrustação estimada tendo como entradas as Potências de Referências e a Potência Medida. E como saída, é dada a Incrustação Estimada.

Foram feitos experimentos com o Controle de Vazão em Malha Aberta (escolhendo-se o Setpoint da Frequência) (Figura 8-20) e em Malha Fechada (escolhendo-se o Setpoint da Vazão) (Figura 8-21). Também foram simuladas perdas de carga por meio da Válvula Eletrônica com o objetivo de verificar o aumento do volume incrustação decorrente da perda de carga total presente na tubulação. A Figura 8-22 mostra o sistema com Controle de Vazão em Malha Aberta para um setpoint de 20% para a Válvula Eletrônica. E a Figura 8-23 mostra o sistema com controle de Vazão em Malha Fechada para um setpoint de 20% para a Válvula Eletrônica.

```

float64 Inc;
float64 Px, Py, Incx, Incy;
float32 k;
if(P>P05)
  if(P>P1)
    if(P>P15)
      if(P>P2){ Px = P2; Py = P25; Incx = 2; Incy = 2.5; }
      else { Px = P15; Py = P2; Incx = 1.5; Incy = 2; }
      else {Px = P1; Py = P15; Incx = 1; Incy = 1.5;}
    else {Px = P05; Py = P1; Incx = 05; Incy = 1; }
  else {Px = P0; Py = P05; Incx = 0; Incy = 0.5;}

k= 10000;
Px = Px*k;
Py = Py*k;
Incx = Incx*k;
Incy = Incy*k;

Inc = (((k*P - Px)*(Incy-Incx)/(Py-Px)) + Incx)/k;

```

Figura 8-19: VI Formula Node implementada para estimar o valor de Incrustação.

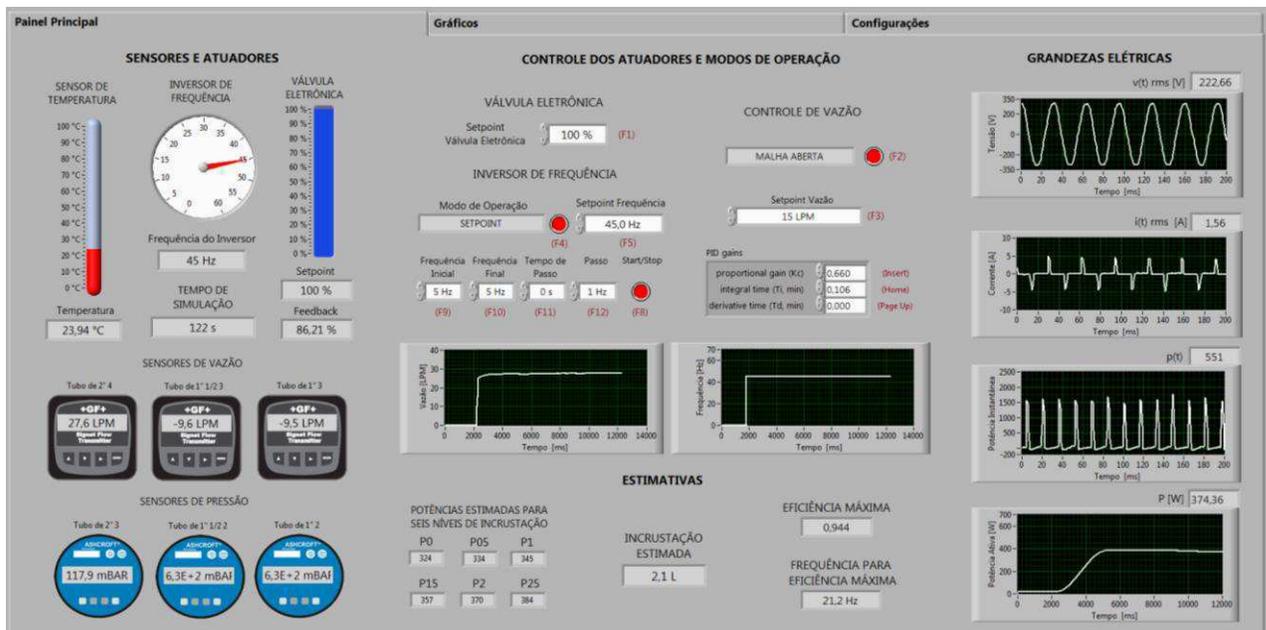


Figura 8-20: Simulação para Controle de Vazão em Malha Aberta 2L de Incrustação – Válvula Eletrônica 100% Aberta

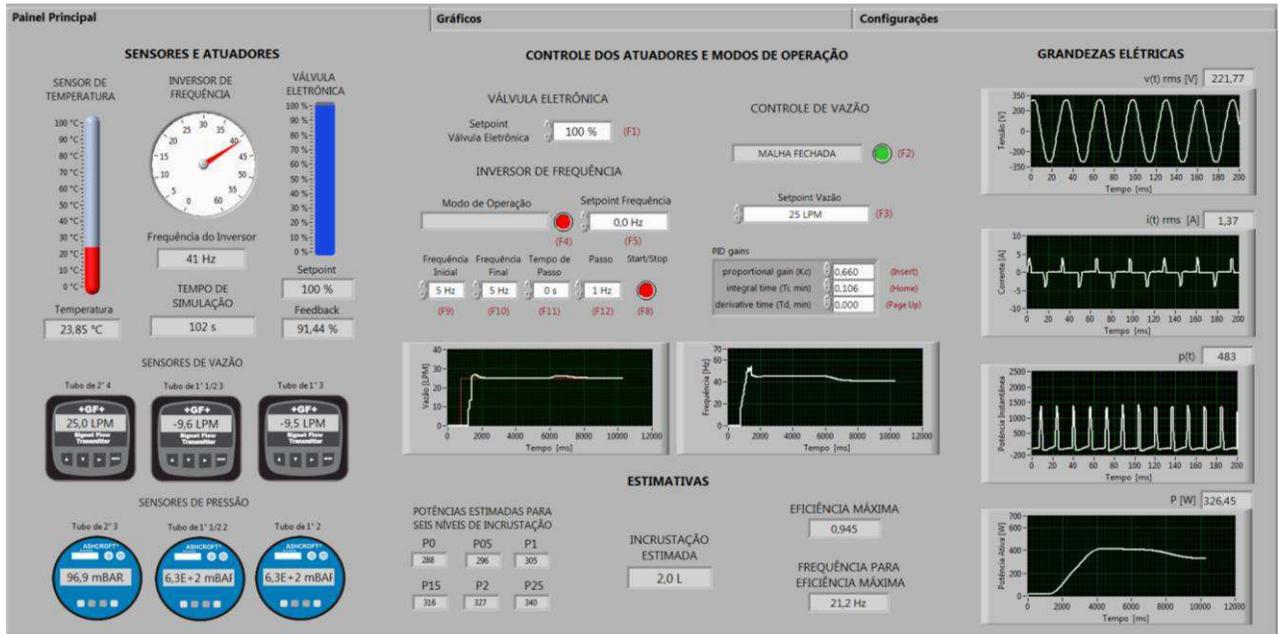


Figura 8-21: Simulação para Controle de Vazão em Malha Fechada 2L de Incrustação – Válvula Eletrônica 100% Aberta

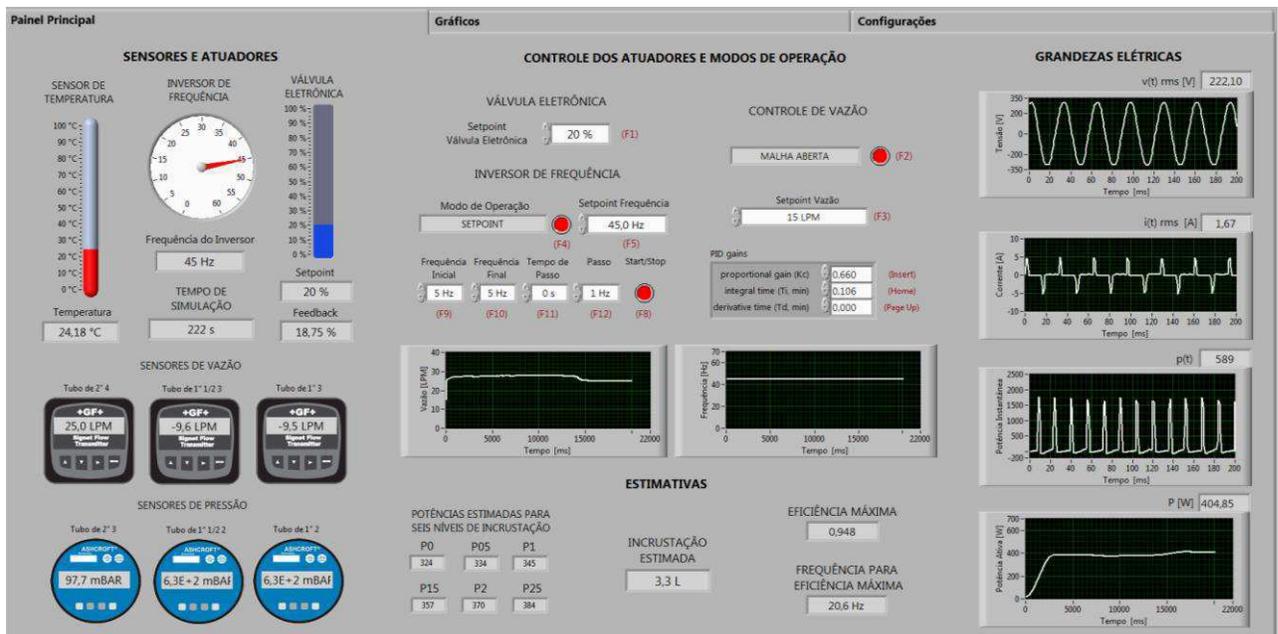


Figura 8-22: Simulação para Controle de Vazão em Malha Aberta 2L de Incrustação – Válvula Eletrônica 20% Aberta

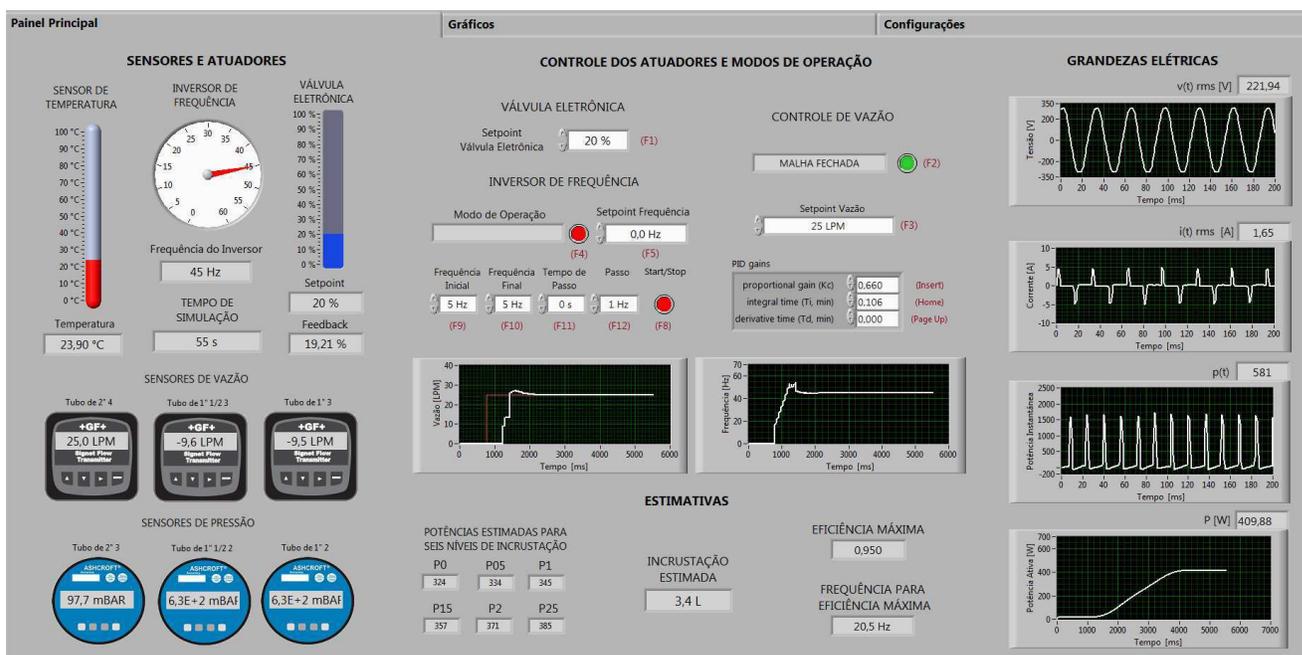


Figura 8-23: Simulação para Controle de Vazão em Malha Fechada 2L de Incrustação – Válvula Eletrônica 20% Aberta

O método escolhido para estimar o volume de incrustações se apresentou de forma satisfatória, onde em Malha Aberta com a válvula 100% aberta, o volume de incrustação estimado foi de 2,1L podendo-se estimar um erro de 5% na detecção, o que não apresenta muitos prejuízos para a estimativa do ponto de operação eficiente. Para o sistema operando em Malha Fechada e com a válvula 100% aberta, o volume de incrustação estimado coincidiu com o esperado. Já para uma abertura de 20% da válvula, as estimativas em Malha Aberta e em Malha Fechada foram de 3,3L e 3,4L, respectivamente. Isso se justifica com o fato de, ao diminuir-se a abertura da válvula, é gerada uma perda de carga, desse modo, a incrustação estimada apresentará um maior valor, pois as perdas serão maiores e quantitativamente proporcionais ao aumento da incrustação.

## 8.8 ESTIMATIVA DO PONTO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA E FREQUÊNCIA DE MÁXIMA EFICIÊNCIA

Com o valor do Volume de Incrustação, utilizou-se a *VI MathScript Node* para calcular-se a eficiência máxima passível de ser obtida para a quantidade de incrustação estimada. Além disso, é calculada a frequência necessária para atingir-se esse ponto de operação. A implementação dessa VI está mostrada na Figura 8-24.

```

1  a1 = 9.305e-007; a2 = -2.585e-007; a3 = 5.242e-006; b1= (a1)*(inc^2) + (a2)*(inc) + (a3);
2  a1 = -0.0001352; a2 = 1.66e-005; a3 = -0.0009764; b2= (a1)*(inc^2) + (a2)*(inc) + (a3);
3  a1 = 0.006935; a2 = 0.000615; a3 = 0.06995; b3= (a1)*(inc^2) + (a2)*(inc) + (a3);
4  a1 = -0.1445; a2 = -0.0485; a3 = -2.23; b4= (a1)*(inc^2) + (a2)*(inc) + (a3);
5  a1 = 1.06; a2 = 0.74; a3 = 33.31; b5= (a1)*(inc^2) + (a2)*(inc) + (a3);
6  a1 = -2.076; a2 = 7.047; a3 = 3.056; b6= (a1)*(inc^2) + (a2)*(inc) + (a3);
7
8  x = [0.1:0.1:60];
9
10 FITP= (b1).*(x.^5) + (b2).*(x.^4) + (b3).*(x.^3) + (b4).*(x.^2) + (b5).*(x) + (b6);
11 FITP0= (5.242e-006).*(x.^5) + (-9.764e-004).*(x.^4) + (6.995e-002).*(x.^3) + (-2.23e+000).*(x.^2) + (3.331e+001).*(x) + (3.056e+000)
12
13 CRPP0 = (FITP-FITP0)/FITP0; %Consumo Relativo de Potência com relação ao tubo Sem Incrustação
14
15 EFP = 1 - CRPP0; %Eficiência com relação ao tubo Sem Incrustação
16
17 EFMAX = max(EFP);
18
19 for i= 1: length(x)
20     if( EFP(i) == EFMAX)
21         FEFMAX = x(i);
22     end
23 end

```

Figura 8-24: VI MathScript Node implementada para calcular a máxima Eficiência e a Frequência de Máxima Eficiência.

O algoritmo de estimativa de máxima eficiência e frequência de máxima eficiência baseia-se na comparação da curva de potência para o tubo sem incrustação com a curva de potência estimada. De posse dessas curvas, é possível obter a curva de consumo relativo e, posteriormente, a curva de eficiência. Desse modo, é obtido o máximo ponto da curva de eficiência e com esse ponto, encontra-se a maior frequência referente ao ponto de maior eficiência energética.

## 9 CONCLUSÕES

Neste trabalho abordou-se sobre o projeto e a implementação de sistemas de controle de supervisão para uma Plataforma de Detecção de Incrustação, no qual foi implementada uma malha de controle de vazão por meio do inversor de frequência. Através de estudos relacionados a sistemas de bombeamento de fluidos, foi possível perceber que a eficiência energética desses tipos de sistemas está diretamente relacionada com o tipo de malha de controle que é implementada, sendo o sistema mais eficiente aquele que utiliza um inversor de frequência para ajuste de vazão quando comparado a sistemas que utilizam válvula de estrangulamento como atuadores para controle de vazão.

Para aumentar a eficiência energética da plataforma, foi estudada a influência da incrustação no consumo de energia fornecida a um motor-bomba que é responsável pela energia hidráulica para transporte fluídico. Após encontrar essa relação, utilizou-se o caminho inverso para estimar a presença da incrustação no interior das tubulações para o cálculo da maior eficiência passível de ser atingida na plataforma, onde fica por opção do usuário trabalhar em um ponto de máxima eficiência ou não, que pode apresentar grandes vantagens econômicas dependendo da produção desejada de petróleo.

Quanto aos trabalhos futuros, em termos energéticos não sabe-se a viabilidade de migração para um controle do tipo cascata, de forma que houvesse ação simultânea dos atuadores em uma única planta, visto que a utilização de válvulas de estrangulamento não apresentam bons resultados na melhor utilização da eficiência energética. Existe ainda a possibilidade de aplicar a teoria de controle adaptativo, uma vez que o processo de formação de incrustação altera ao longo do tempo os parâmetros da planta.

O melhoramento na precisão do sistema de aquisição de potência elétrica trará benefícios na estimativa das curvas de potência, pois para valores de potência estimadas muito próximos, as estimativas de volume de incrustação apresentaram algumas variações de mais ou menos 5% em torno do valor esperado.

Uma proposta também interessante é a de utilizar métodos não invasivos desenvolvidos em (SILVA, 2008) para ter-se um valor real de incrustações no interior das tubulações e estimar-se valores cada vez mais precisos referentes ao consumo de energia.

Um outro ponto que pode ser melhorado é com relação aos experimentos com mais níveis de incrustação, pois quanto mais informações tivermos sobre o volume de incrustações e consumo de energia elétrica, melhores serão as estimativas a serem calculadas no sistema proposto.

Além disso, o sensor de vazão utilizado apresentou algumas limitações quanto à presença de incrustação no interior das tubulações devido à suspensão de sólidos (parafina) no fluido e por se tratar de um sensor que utiliza hélices para medição da vazão, essas partículas em alguns casos impediram o giro das hélices. A troca por outros tipos de sensores pode tornar o sistema mais eficiente.

Por fim, pode-se afirmar que os objetivos propostos neste presente trabalho foram alcançados.

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMÉRICO, M. **Guia Avançado de Bombas**. Procel Indústria. Rio de Janeiro, RJ. 2004.
- AQUINO, R. R. B. D. et al. Eficiência energética em métodos de controle de vazão. **Eletricidade Moderna**, p. 84-93, Agosto 2009. ISSN 0100-2104.
- ASHCROFT®. **ASHCROFT Digital Industrial Gauge – Operating Instructions**, 2006.
- BEZERRA, M. M. et al. **Investigação de Set-Points para Controle de uma Plataforma de Detecção de Incrustação**. In: Congresso Brasileiro de Automática, Campina Grande, 2012.
- BEZERRA, M. M.; SILVA, J. J.; ROCHA NETO, J. S. **Otimização do uso de Energia em Plataforma de Detecção de Incrustações**. In: VIII Congresso Brasileiro de P&G em Petróleo e Gás, Curitiba, 2015.
- BOMBARDELLI, C. et al. **Processo de Incrustação por Coque na Indústria de Petróleo: Uma Revisão**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná; Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Curitiba, PR; Toledo, PR. 2004.
- CARRARA, V. **Apostila sobre Análise e Controle de Sistemas Lineares**, 2011. Disponível em: <[http://www2.dem.inpe.br/val/cursos\\_inpe/Carrara\\_controle\\_ap.pdf](http://www2.dem.inpe.br/val/cursos_inpe/Carrara_controle_ap.pdf)>. Acesso em: Dezembro 2013.
- CFW-08 (Manual do Inversor de Frequência). WEG, 2009.
- CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS SIEMENS SIMATIC S7-200. ESCOLA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL SENAI “VISCONDE DE MAUÁ”. [S.l.]. 2013.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**, Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- ELETROBRÁS. **Manual de racionalização de energia Brasília**, 2006. Disponível em: <[www.elektrobras.com/procel](http://www.elektrobras.com/procel)>. Acesso em: Abril 2015.
- ELETROGATE. **Apostila Arduino Básico**, 2013. Disponível em: <[www.eletrogate.com](http://www.eletrogate.com)>. Acesso em: Junho 2015.
- FERREIRA, R. A. et al. **Metodologia para a Utilização de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento sob o Enfoque da Eficiência Energética**, In: V CEEL, Uberlândia, MG, 26-28 Setembro 2007.
- FLOWMETERS.COM, LCC. **Turbine Flowmeters**, 2003. Disponível em: <<http://www.flowmeters.com/ufm/index.cfm?task=turbine>>. Acesso em: Novembro 2013.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Feedback Control of Dynamic Systems**. 4th. ed. New JersEy: Prentice Hall, 2002.
- GEORG FISCHER SIGNET LLC. **Signet 8550-1 Flow Transmitter (Manual)**, 2011.

LOHR, K. R.; ROSE, J. L. **Ultrasonic Guided Wave and Acoustic Impact Methods for Pipe**, Journal of food engineering. Elsevier Science, March, 2002.

MANSOORI, G. A. **Deposition and Fouling of Heavy Organic Oils and Other Compounds**. In: 9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROPERTIES AND PHASE EQUILIBRIA FOR PRODUCT AND PROCESS DESIGN. Japão: no. 2001.

MARQUES, L. C. C. et al. **How Petrobras Has Faced Oilfield Scale Problems: Evolution of Concepts and Lessons Learned in Campos Basin, Brazil**, SPE paper 68327 apresentado em SPE International Symposium on Oilfield Scale sediado em, 30-31 Janeiro 2001.

MAUREN ELL, S.; TRABACHINI, A. **Perda de Carga em Conduitos Forçados**, 2011. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/72710149/Perda-de-Carga-Tubulacao-Singular-Ida-Des>>. Acesso em: Janeiro 2012.

MELO, T. R. **Projeto e Implementação de Sistemas de Controle em Malha Fechada para uma Plataforma de Detecção de Incrustação**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, p. 96. 2014.

MORENO, J. et al. **Fuzzy logic based improvements in efficiency optimization of induction motor drives**, Fuzzy Systems, 1997., Proceedings of the Sixth IEE International Conference, vol.1 no., 1-5 Jul 1997.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Explicando a Teoria PID**, 2011. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3782/pt>>. Acesso em: Maio 2013.

NATIONAL SEMICONDUCTOR. **LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors**, 2000. Disponível em: <<http://www.national.com/ds/LM/LM35.pdf>>. Acesso em: Julho de 2013.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos Elétricos**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: Performa, 2003.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. São Paulo: Prentice-Hall, 2003.

PATRICIO, F. M. R. **Modelagem Analítica para Reinjeção de Água Produzida com Efeitos na Incrustação de Sulfato De Bário**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Macaé, RJ, p. 79. 2006.

PATSKO, L.F. **Fonte Estabilizada de 5V**, 2006. Disponível em: <[http://www.artmec.com.br/download/documentos/electronica/mec1000/fonte\\_regulada\\_de\\_5\\_volts.pdf](http://www.artmec.com.br/download/documentos/electronica/mec1000/fonte_regulada_de_5_volts.pdf)>. Acesso em: Março de 2016.

PROCEL. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Rio de Janeiro, RJ, p. 36-63. 2005.

RODRIGUES, D. L. V. **Seleção e Dimensionamento de Válvula de Controle**. In: VII SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO. Salvador, BA. 2011.

SÁ MARQUES, J. A. A.; SOUSA, J. J. O. **Fórmula de Colebrook - White - Velha mas actual. Soluções explícitas**, In: III SILUSBA, SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PASÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, Maputo, Moçambique, Edição em CD, 1997.

SALVADOR, A. **Noções de Corrosão e Incrustação (Apostila de treinamento - Petrobrás)**, 2010. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/95878654/No-es-de-Corros-o-e-Incrusta-o-1>>. Acesso em: Setembro 2011.

SCARCELLI, R. D. O. C. et al. **Economia de Energia com Uso de Inversor de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água para Perímetro Irrigado**, Viçosa, MG, 16 Setembro 2009.

SIEMENS AG. **SIMATIC S7-200 Programmable Controller (System Manual)**. 2nd ed. 2000.

SILVA, J. J. **Desenvolvimento de uma Plataforma para Detecção de Incrustação em Dutos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina, Campina Grande, PB. 2005.

SILVA, J. J. **Desenvolvimento de Técnicas de Detecção de Incrustação Utilizando Métodos Não-invasivos.** 2008. 166f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento da Informação) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2008.

SILVA, J. J.; LIMA, A. M. N.; ROCHA NETO, J. S. **Fouling Detection Based on Parameter Estimation. In: Systems, Structure and Control.**, In-Teh Education and Publishing. Viena, Áustria, 2008. 129-148.

SOUSA, E. C.; SILVA, V. P. **Inversor de frequência e a sua contribuição para a eficiência energética em sistemas de bombeamento.** Faculdade de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG. 2012.

SOUZA, F. **Arduino MEGA 2560**, 2014. Disponível em: <<http://www.embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>>.

WILSON, J., 2003. *Pressure Measurement: Principles and Practice.* Disponível em: <<http://www.sensorsmag.com/sensors/pressure/pressure-measurement-principles-and-practice-969>>. Acesso em: Nov. 2013.

YHDC. **Spilit-Core Current Transformer SCT-013-020.** 2014. Disponível em: <<https://nicegear.co.nz/obj/pdf/SCT-013-datasheet.pdf>>. Acesso em: Julho 2015.