

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

REINALDO SÉRGIO GUCHTAIN JUSTINIANO

**PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO DE BANCADAS EXPERIMENTAIS
DE ESCOAMENTO BIFÁSICO EM TUBULAÇÕES**

MONOGRAFIA – ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2012

REINALDO SÉRGIO GUCHTAIN JUSTINIANO

**PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO DE BANCADAS EXPERIMENTAIS
DE ESCOAMENTO BIFÁSICO EM TUBULAÇÕES**

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Especialista em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, Programa de Pós-Graduação, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Rigoberto E. M. Morales

Co-Orientador: Prof. Dr. Marco José da Silva

CURITIBA
2012

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me permitiu chegar até aqui.

Ao Professor Rigoberto Morales pela orientação no decorrer do desenvolvimento deste trabalho em mecânica dos fluidos.

Ao Professor Marco José da Silva pela ajuda na área de eletrônica.

Ao aluno de Mestrado Fernando Castillo, pela colaboração.

A Professora Faimara do Rocio e Fausto Barbuto pelo auxílio no processo de análise e correção da Monografia.

Também aos colegas Eliane Dziadzio , Samuel Marashini e Eduardo Drosczacka.

Acima de tudo, aos nossos familiares, cujo apoio foi de fundamental importância.

RESUMO

JUSTINIANO, Reinaldo Sérgio Guchtain. **Proposta de automação de bancadas experimentais de escoamento bifásico em tubulações.** 2012. 76 f. Monografia (Especialização) – Programa de Pós-graduação em Automação Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba 2012.

O presente trabalho visa à automação de bancadas experimentais de escoamento multifásico em tubulações. Trata-se de uma pesquisa de caráter experimental, na qual será proposto um sistema de automação da vazão de gás e líquido de uma bancada existente no Laboratório de Ciências Térmicas, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Esse sistema é composto de um programa de computador para supervisionar e controlar as vazões, contendo alarmes e rotinas para salvar os dados em arquivo. Também será efetuada a montagem de uma válvula elétrica para controle da vazão do gás e um circuito eletrônico para o controle da vazão de líquido via um inversor de frequência comercial. Para medir a vazão de líquido vai ser usado o medidor comercial com tecnologia Coriolis e, para medir a vazão de gás, vai ser montado um medidor de vazão por placa de orifício com medidores de pressão comercial. O trabalho propõe também usar componentes de fácil aquisição no mercado, fácil montagem e de baixo custo.

Palavras-chave: Escoamento bifásico. Instrumentação. Vazão de gás. Aquisição de dados.

ABSTRACT

JUSTINIANO, Reinaldo Sérgio Guchtain. **A proposal for the automation of two-phase flow in pipes experimental facilities.** 2012. 76 s. Monograph (Specialist) - Graduate Program in Industrial Automation, Federal Technological University of Paraná, Curitiba 2012.

This work is aimed at the automation of experimental facilities for multiphase flow in pipes. The research herein presented possesses an entirely experimental character. An automation system for the flow of gas and liquid in an existing experimental rig at the Laboratory of Thermal Sciences, in Federal Technological University of Paraná will be proposed. The aforementioned system is composed of a computer program to monitor and control an experiment, as well as alarms and routines to save data in files. An electric valve to control the flow of gas will be mounted, and an electronic circuit to control the flow of fluid using a commercial frequency inverter will be assembled. The flow of liquid will be measured with a commercial Coriolis flow meter, whilst the gas flow will be measured by means of regular orifice plates. The present work also proposes the use of low-cost, easy-to-install components that can be readily found and purchased in our local market.

Keywords: Two-phase flows. Instrumentation. Gas flow. Data acquisition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Balanço Energético Nacional em 2007	13
Figura 2 – Matriz energética mundial em 2006	13
Figura 3 – Maiores reservas de petróleo no mundo	14
Figura 4 – Bancada de escoamento bifásico	17
Figura 5 – Tela do supervisor do LabView™	18
Figura 6 – Pirâmide de automação e seus diversos níveis	20
Figura 7 – Tipos de pressão e sua relação	22
Figura 8 – Correlação da f.e.m versus temperatura para os termopares	26
Figura 9 – Diferentes formatos da placa de orifício	27
Figura 10 – Medidor de vazão tipo turbina	28
Figura 11 – Medidor de vazão tipo Coriolis	29
Figura 12 – Padrões de rede industrial	32
Figura 13 – Tendência de evolução das redes industriais	33
Figura 14 – Inversor de frequência comercial	36
Figura 15 – Diagrama de blocos de um inversor de frequência	37
Figura 16 – Esquema do inversor IGBT	38
Figura 17 – Medidor Coriolis	43
Figura 18 – Tubo de placa de orifício	43
Figura 19 – Medidor de pressão diferencial	44
Figura 20 – Gráfico do medidor de vazão de gás tipo rotâmetro	44
Figura 21 – Medidor de vazão de gás tipo rotâmetro	45
Figura 22 – Esquema dos rotômetros utilizados nos projetos do LACIT.	45
Figura 23 – Manômetro de coluna de água	46
Figura 24 – Medidor de pressão diferencial	47
Figura 25 – Termopar ligado ao transmissor de temperatura	49
Figura 26 – Bomba de líquido	50
Figura 27 – Válvula reguladora de pressão de saída de ar	51
Figura 28 – Compressor de ar	51
Figura 29 – Painel de controle do compressor com botoeiras	52

Figura 30 – Máquina de extrusão.	53
Figura 31 – Válvula controle vazão de gás	54
Figura 32 – Tomada de pressão comercial e já incorporada à bancada	54
Figura 33 – Circuito eletrônico de potência ponte H	55
Figura 34 – Protótipo do painel de controle da válvula.	56
Figura 35 – Circuito eletrônico com amplificador operacional	57
Figura 36 – Conjunto fonte e eletrônica	58
Figura 37 – Verificação da calibração de vazão	59
Figura 38 – Calibração do sensor de pressão	60
Figura 39 – Reta da equação de calibração do sensor de pressão	61
Figura 40 – Calibrador de medidores de Pressão	62
Figura 41 – Banho térmico para calibração de temperatura	63
Figura 42 – Bancada experimental do LACIT.	64
Figura 43 – Placa NI-USB 6008	65
Figura 44 – Placa PCI NI-FBUS/2	66
Figura 45 – Esquema da ligação da rede Fieldbus	66
Figura 46 – Esquemático da rede Fieldbus Foundation	67
Figura 47 – <i>Tag Editor</i> mostrando os parâmetros dos dispositivos da rede	68
Figura 48 – Diagrama de blocos no LabVIEW.	68
Figura 49 – PID e saída digital vazão gás	69
Figura 50 – PID e saída digital vazão líquido	70
Figura 51 – PID e saída digital vazão gás	70
Figura 52 – Gráfico das velocidades em m/s j_G de gás e líquido	71
Figura 53 – Gráfico da velocidade do líquido	71
Figura 54 – Gráfico da velocidade j_G de gás	72

LISTA DE SIGLAS

UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
LACIT	Laboratório de Ciências Térmicas
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLP	Controladores Lógicos Programáveis
CNC	Controle Numérico Computadorizado
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
IHM	Interface Homem-Máquina
PC	Computador Pessoal (<i>Personal Computer</i>)
A/D	Analógico/Digital
D/A	Digital/Analógico
IVs	Instrumentos Virtuais
I/Os	Entradas e Saídas (<i>Input/Output</i>)
PID	Controlador Proporcional Integrativo Derivativo
P/V	Variável de Processo

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidades
α	Coeficiente Resistência-Temperatura	[1/°C]
F_c	Força de Coriolis	[N]
R	Resistência	[Ω]
R_0	Resistência a 0°C	[Ω]
T	Temperatura	[°C]
V	Velocidade	[m/s]
ω	Velocidade angular	[rad/s]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTO	13
1.2 PROBLEMA	16
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 JUSTIFICATIVA	16
1.5 MÉTODO DE PESQUISA	17
1.6 CONTEÚDO DO TRABALHO	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	19
2.1.1 Medição de Pressão	22
2.1.2 Medição de temperatura	24
2.1.3 Medição de Vazão	27
2.1.4 Aquisição de Dados	30
2.1.5 Redes Industriais	31
2.2 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS	36
2.3 INVERSORES DE FREQUÊNCIA	38
2.5 ESCOAMENTOS BIFÁSICOS	40
3 DESENVOLVIMENTO	42
3.1 INSTRUMENTAÇÃO	42
3.1.1 Medidores de Vazão	42
3.1.1.1 Medidor de Vazão Tipo Coriolis	42
3.1.1.2 Medidor de vazão de gás Tipo Placa de Orifício	43
3.1.1.3 Medidor de vazão de gás Tipo Rotâmetro	44
3.1.2 Medidores de Pressão	46

3.1.2.1 Manômetro Diferencial de Coluna de Líquido	46
3.1.2.3 Medidor de Pressão Capacitivo Tipo Fieldbus	46
3.1.3 Medidor de Temperatura	48
3.1.4 Aspectos Gerais de Instrumentação	49
3.1.4.1 Bomba de Líquido	49
3.1.4.3 Compressor de Ar	50
3.1.4.4 Sistema Elétrico de Acionamento	52
3.1.4.5 Confeção dos Tubos Corrugados	53
3.1.4.6 Tomadas de Pressão	54
3.1.4.7 Confeção de Registros de Pressão	55
3.1.4.8 Circuito eletrônico para controle do inversor de frequência	57
3.2 CALIBRAÇÃO	58
3.2.1 Calibração de Vazão	58
3.2.2 Calibração de Pressão	61
3.2.2 Calibração de Pressão	63
3.3 BANCADA DE ESTUDO DO ESCOAMENTO EM GOLFADAS	64
3.4 AQUISIÇÃO E CONTROLE	64
3.4.1 A placa NI USB-6009	64
3.3.2 Aquisição de sinais Fieldbus pela placa NI PCI-FBUS/2	65
3.4.2.1 Programando no LabView	67
4 RESULTADOS	71
5 CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo será apresentado um estudo prévio sobre o cenário de extração de petróleo no Brasil e no mundo, levando em conta a importância estratégica dessa matéria-prima para os rumos do planeta no atual momento histórico, no qual se questiona a deterioração do meio ambiente, os problemas dos processos produtivos e a sustentabilidade ou não de nossos elevados padrões de consumo. Na sequência, será introduzido o problema a ser estudado, bem como o objetivo do projeto e sua justificativa, para finalmente apresentar a estrutura do trabalho.

1.1 CONTEXTO

O petróleo faz parte de diversos produtos do nosso dia-a-dia. Além dos combustíveis, ele também está presente em fertilizantes, plásticos, tintas, borracha, entre outros. Na Figura 1 o uso do petróleo é comparado com o de outras fontes de energia em âmbito nacional.

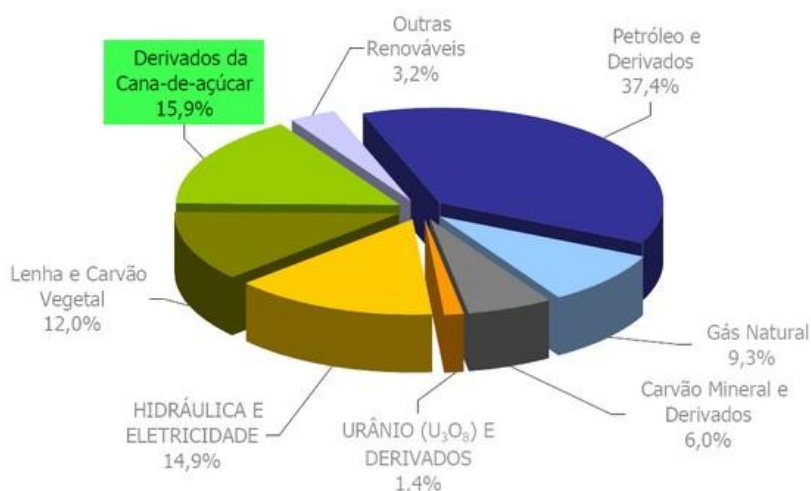


Figura 1 - Balanço Energético Nacional 2007. (Fonte: MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA, 2008).

A importância do petróleo como matriz energética na sociedade contemporânea é indiscutível, conforme mostra o gráfico da Figura 2

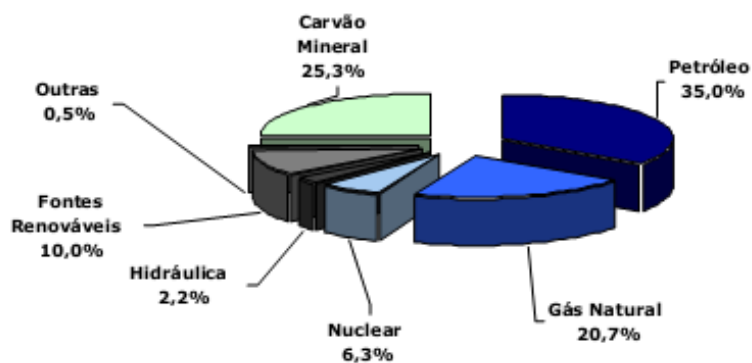


Figura 2 – Matriz Energética Mundial em 2006. (Fonte : MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2008).

O Brasil é hoje o 15º país em reservas de petróleo, de acordo com a Figura 3

Valores de Reservas em 2009, em bilhões de barris de óleo equivalente:
















1.	 Arábia Saudita ¹	266,71
2.	 Canadá	178,09
3.	 Irã ¹	136,15
4.	 Iraque ¹	115,00
5.	 Kuwait ¹	104,00
6.	 Venezuela ¹	99,38
7.	 Emirados Árabes Unidos ¹	97,80
8.	 Rússia	60,00
9.	 Líbia ¹	43,66
10.	 Nigéria ¹	36,22
11.	 Cazaquistão	30,00
12.	 Estados Unidos	19,12
13.	 República Popular da China	16,00
14.	 Catar ¹	15,21
15.	 Brasil ²	12,62
16.	 Argélia ¹	12,20
17.	 México	10,50
18.	 Angola ¹	9,04
19.	 Azerbaijão	7,00
20.	 Noruega	6,68

Figura 3- Maiores reservas de petróleo no mundo. (Fonte: Departamento de Estatística dos E.U.A, 2009)

Pelas estatísticas mostradas nas figuras acima, pode-se depreender a importância da pesquisa tecnológica e de engenharia aplicada neste setor pelas universidades.

A PETROBRAS, uma empresa de alta tecnologia e com grandes investimentos em otimização e inovação de processos e sistemas, requer uma fase prévia de P&D de soluções tecnológicas tanto nos aspectos técnicos quanto gerenciais.

A mão-de-obra especializada nesses processos é suprida pelas universidades, na formação de engenheiros e tecnólogos e técnicos e também pelo próprio departamento de P&D da PETROBRAS.

O Laboratório de Ciências Térmicas da UTFPR, por meio de seus professores da Engenharia Mecânica, mostrou capacidade para desenvolver projetos de estudo de fenômenos prejudiciais à prospecção e produção de petróleo. Tais fenômenos causam problemas operacionais, e a PETROBRAS tem interesse em conhecê-los mais aprofundadamente para poder contorná-los. Neste contexto, a PETROBRAS firmou convênio com o LACIT

(Laboratório de Ciências Térmicas) da UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) visando pesquisar o comportamento de escoamento bifásico gás-líquido em tubulações. Este trabalho de monografia sobre a automatização das vazões de gás e líquido na tubulação via programa computacional tem como objetivo auxiliar acadêmicos e estudantes destes fenômenos da mecânica dos fluidos, para que eles possam ganhar tempo e focar somente no seu objetivo de estudo.

1.2 PROBLEMA

No Laboratório de Ciências Térmicas existe uma bancada de escoamento bifásico com comprimento de 10 metros e tubulações de uma polegada (2,54 cm), compreendendo também um reservatório de 310 litros de água, compressor de ar e reservatório de 500 litros a 8 bar de pressão, um medidor de vazão mássica de líquido com tecnologia Coriolis e sinal de dados digital no padrão *Fieldbus Foundation*. Esta bancada também conta com medidores de pressão, rotâmetro para gás, bomba aço inox de 3 c.v. comandada por inversor de frequência, e um computador com uma placa de aquisição de dados para a tecnologia de rede industrial *Fieldbus Foundation*. Este computador conta com o programa comercial LabView™ da NATIONAL INSTRUMENTS e módulos de controle PID.

A vazão de líquido é regulada através do giro de um resistor variável que comanda o inversor de frequência com sinal de 0 a 10 V e pela supervisão, no terminal do computador, da variável de processo através do programa de aquisição de dados, até que o valor desejado seja atingido. A vazão do gás é feita abrindo-se ou fechando-se uma válvula agulha e também pela visualização do valor no terminal do computador.

Este procedimento toma um tempo considerável do acadêmico que esteja estudando o escoamento bifásico, pois o ajuste da vazão de líquido requer outro ajuste para a vazão de gás, e vice-versa. Também há o problema de que quando o vaso de pressão esta esvaziando a vazão vai decaindo, e para os testes a vazão deve se manter constante.

1.3 OBJETIVOS

Montar uma válvula elétrica, elaborar um circuito eletrônico para controlar esta válvula e desenvolver um programa de computador para o controle das vazões de ar e líquido, com controle PID.

1.3.1 Objetivo Geral

Através de uma bancada com instrumentos e sensores confiáveis e um controle das vazões de ar e líquido, auxiliado por um programa de computador supervisor de fácil entendimento, estudantes e pesquisadores poderão fazer testes e trabalhos de validação de modelagens numéricas com a certeza de seus resultados.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Montagem de um circuito eletrônico (fonte e amplificador operacional) com entrada de 0 a 5 V e saída proporcional de 0 a 10 V, para controlar o inversor de frequência.
- Usinagem de conector em aço, para uso com um motor e uma válvula agulha.
- Montagem mecânica de um motor de corrente contínua com caixa de redução em uma válvula agulha.
- Montagem de um circuito eletrônico de potência (ponte H) para controle do motor de corrente contínua.
- Instalação da válvula montada, na bancada.
- Montagem de um sensor de vazão por placa de orifício.
- Levantamento da curva de calibração da placa de orifício com rotâmetro.
- Desenvolver um programa em LabView™, para controle PID automático das vazões de ar e de líquido, com alarmes de fundo de escala para proteção dos sensores, botão de aquisição de dados em arquivo, e supervisão das variáveis de processo da bancada, vazão, temperatura e pressão.

1.4 JUSTIFICATIVA

Como mostrado anteriormente, as pesquisas voltadas para a indústria petrolífera são muito importantes, devido aos aspectos financeiros envolvidos. Tais pesquisas são feitas em grande parte com programas de simulação computacional, mas para validar esses modelos é imprescindível a vertente experimental. Outras universidades também estão pesquisando os

mesmos fenômenos, daí a urgência em desenvolver essa ferramenta de automação, para acelerar o estudo experimental do escoamento bifásico.

Uma bancada experimental confiável significa que ela representa bem o comportamento de um fluido (como, por exemplo, num poço de perfuração ou em uma tubulação submarina), em escala menor, e que os dados adquiridos não contenham erros que possam afetar os resultados. Acredita-se que com a criação deste projeto de automatização do escoamento e padronização da aquisição de dados dos testes das bancadas do Laboratório de Ciências Térmicas, o processo será rapidamente otimizado e resultados que atinjam seus objetivos de inovação, aprendizagem, custo e confiabilidade dos resultados sejam obtidos pelo laboratório.

1.5 MÉTODO DA PESQUISA

Como já anteriormente explanado, o estudo do escoamento bifásico exige uma confiabilidade nos dados adquiridos pelos sensores assim como nos procedimentos e cálculos do sistema de aquisição de dados da bancada. A técnica de aprendizagem desta forma foi experimental, fazendo o uso de um programa comercial de computador, o LabView™. A Figura 4 mostra a bancada que foi automatizada e na Figura 5 a área de trabalho do programa, o supervisor.



Figura 4: Bancada de escoamento bifásico

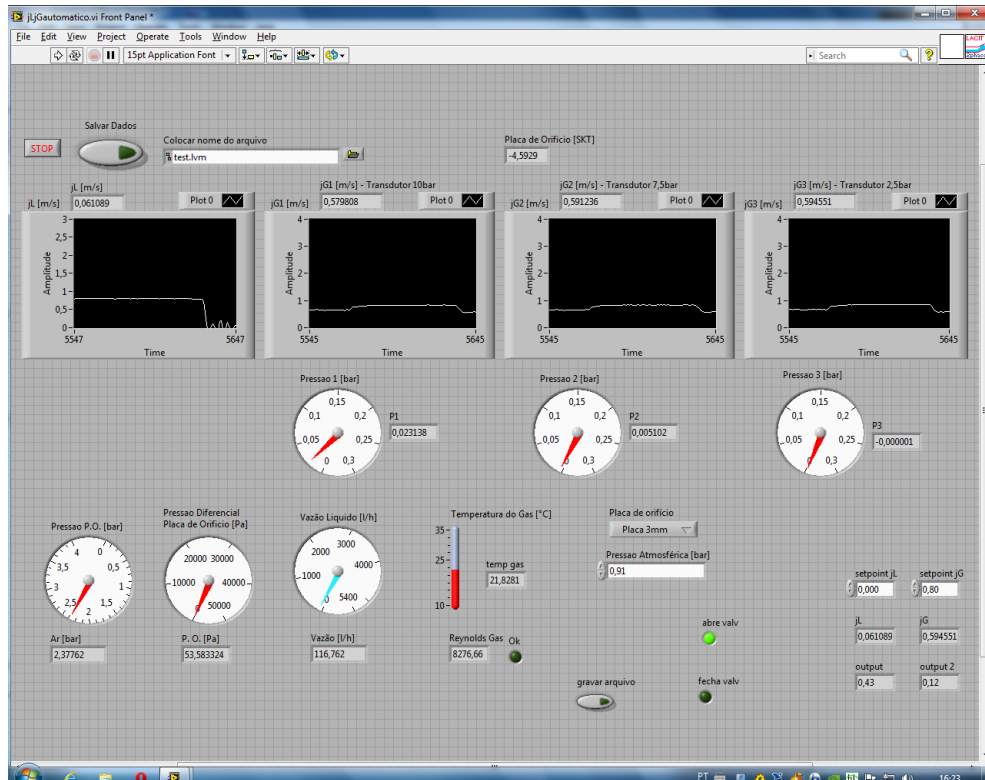


Figura 5: Tela do supervisor do LabView™

O modo de pesquisa é a leitura dos manuais do inversor de frequência, do LabView™ e das placas de orifício, que estão disponíveis na internet em sítios da National Instruments, da Foundation Fieldbus, da Weg e na literatura de mecânica de fluidos.

1.6 CONTEÚDO DO TRABALHO

O trabalho está escrito em quatro capítulos que são os seguintes.

O primeiro capítulo contém, de modo sucinto, a definição do problema, os objetivos gerais e específicos, a justificativa e finalmente a metodologia da pesquisa.

No segundo capítulo é abordada uma fundamentação teórica relevante e adequada à execução do projeto, incluindo tópicos de programação, instrumentação industrial, rede industrial *Fieldbus Foundation*, inversor de frequência, placa de aquisição, sensor de vazão por placa de orifício e rotâmetro.

O terceiro capítulo mostra o desenvolvimento do projeto, tais como os procedimentos de montagem dos circuitos eletrônicos, montagem de um sensor placa de orifício, a programação do LabView™ e a montagem da válvula.

O quarto capítulo contém a conclusão final do projeto, os resultados obtidos da automação da bancada e considerações para projetos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo está reservado para uma introdução aos aspectos teóricos relacionados ao projeto. Aqui, ater-se-á às placas de orifício, aos rotômetros, ao LabView™, ao inversor de frequência e à automação industrial.

2.1 INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Entende-se por automação como qualquer sistema apoiado em computadores, o qual substitui o trabalho humano em favor da segurança das pessoas, da qualidade dos produtos, da rapidez da produção ou da redução de custos, assim aperfeiçoando os complexos objetivos das indústrias e dos serviços (MORAES; CASTRUCCI, 2007).

É comum pensar que a automação resulta tão somente do objetivo de reduzir custos de produção. Isso não é verdade: ela decorre mais de necessidades tais como maior nível de qualidade, expressa por especificações numéricas de tolerância, maior flexibilidade de modelos para o mercado, maior segurança pública e dos operários, menores perdas materiais e de energia, mais disponibilidade e qualidade da informação sobre o processo e melhor planejamento e controle da produção. (MORAES; CASTRUCCI, 2007)

A vantagem de utilizar sistemas que envolvam diretamente a informatização é a possibilidade da expansão utilizando recursos de fácil acesso. Nesse contexto, é possível citar como importante exemplo os controladores lógicos programáveis (CLPs), que tornaram a automação industrial uma realidade onipresente.

A pirâmide de automação mostrada na Figura 6 representa os diferentes níveis de automação encontrados em uma planta industrial (BORDIM, 2006). A base da pirâmide representa o nível de chão de fábrica, no qual se encontram os sensores, transmissores, atuadores, conversores, inversores, sistemas de partida suave de motores e as máquinas de produção propriamente ditas, como máquinas de embalagem, esteiras, serras, ou seja, a linha de montagem ou manufatura.

O segundo nível, o de dispositivos, é aquele onde estão os equipamentos que executam o controle automático das atividades da planta, como CLP's, PC's industriais, módulos de CNC e SDCD. Esses dispositivos recebem as informações provenientes dos dispositivos de campo, as

condicionam e processam, administrando tarefas de automação e módulos de regulação. É o nível onde temos os dados em tempo real.

O terceiro nível permite a supervisão, controle e regulação do processo produtivo da planta. Normalmente é constituído por bancos de dados com informações de índices de qualidade da produção, relatórios e estatísticas de processo, índices de produtividade e algoritmos de otimização da operação produtiva. Os sistemas geram e armazenam uma grande quantidade de dados sobre as máquinas, as operações, a produção e a qualidade. É o nível dos chamados sistemas supervisórios, com *workstations*, PCs e IHMs.

O último nível (de topo) é o gerencial, das decisões estratégicas da empresa, envolvendo quantitativos de produção, estratégias empresariais, administração dos recursos da empresa e outros. É o nível responsável pela programação e pelo planejamento da produção, realizando o controle e a logística de suprimentos. Também são encontrados nesse patamar *softwares* de gestão de vendas e gestão financeira; é onde se realizam a decisão e o gerenciamento de todo o sistema.

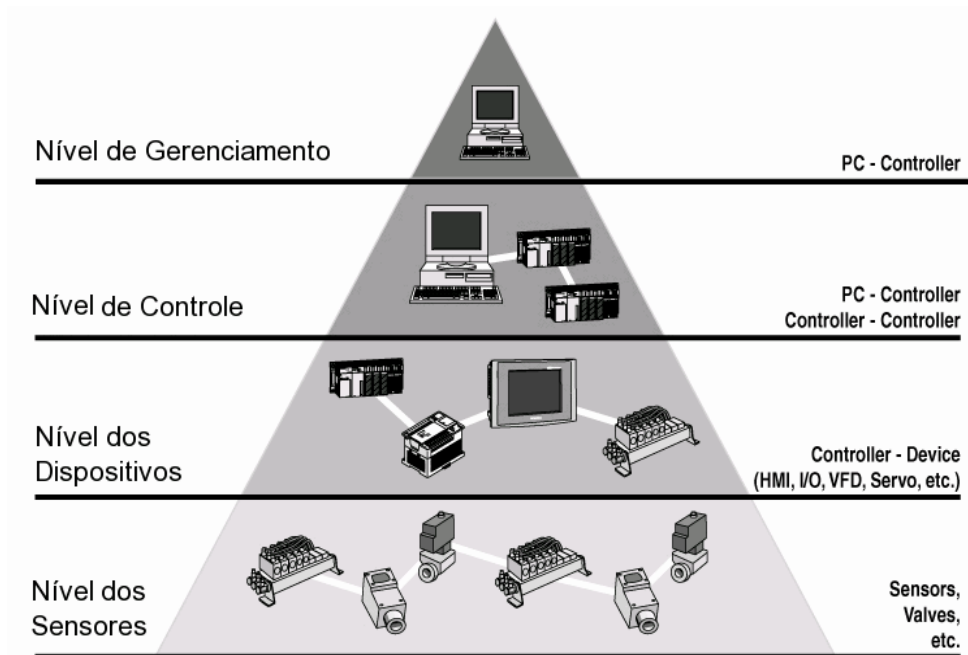


Figura 6: Pirâmide de Automação e seus diversos níveis
(Fonte: Adaptado de MITSUBISHI ELECTRIC AUTOMATION, 2009)

No projeto, foi necessária a utilização de instrumentos capazes de ler e transmitir os dados relativos à temperatura, vazão e pressão diretamente do processo de escoamento. Nesse contexto, algumas especificações técnicas concernentes aos parâmetros dos instrumentos são de suma importância para o desempenho e a confiabilidade dos sistemas de automação

industrial. Abaixo seguem definições de alguns desses aspectos (PROFESSOR AQUINO, 2009).

A) Faixa de Medida ou *Range*: Conjunto de valores da variável medida que estão compreendidos dentro do limite superior e inferior da capacidade de medida ou de transmissão do instrumento, e se expressa determinando os valores extremos. Exemplo: 100 a 500m³ => 0 a 20 psi.

B) Alcance ou *Span*: É a diferença algébrica entre o valor superior e inferior da faixa de medida do instrumento. Exemplo: um instrumento com range de 100 – 500m³. Seu *span* é de 400m³.

C) Exatidão: Podemos definir como sendo a aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro. A exatidão pode ser descrita de três maneiras:

- Percentual do Fundo de Escala (% do F.E.);
- Percentual do *Span* (% do *span*);
- Percentual do Valor Lido (% do V.L.).

D) *Rangeabilidade* ou Largura de Faixa: É a relação entre o valor máximo e o valor mínimo, lidos com a mesma exatidão na escala de um instrumento. Exemplo: para um sensor de vazão cuja escala é 0 a 300 GPM (galões por minuto), com exatidão de 1% do *span* e *rangeabilidade* 10:1, a exatidão será respeitada entre 30 e 300 GPM.

E) Zona Morta: É a máxima variação que a variável pode ter sem que provoque alteração na indicação ou sinal de saída de um instrumento. Exemplo: um instrumento com range de 0 a 200°C e com zona morta de 0,1% terá uma variação máxima de ±0,2°C, conforme a fórmula abaixo:

$$0,1\% = 0,1 * (200/100) = \pm 0,2^{\circ}\text{C}$$

F) Sensibilidade: É a mínima variação que a variável pode ter, provocando alteração na indicação ou sinal de saída de um instrumento. Exemplo: um instrumento com range de 0 a 500°C e com sensibilidade de 0,05% terá valor de ±0,25°C, conforme a fórmula abaixo:

$$0,05\% = 0,1 * (500/100) = \pm 0,25^{\circ}\text{C}$$

G) Histerese: É o erro máximo apresentado por um instrumento para um mesmo valor em qualquer ponto da faixa de trabalho, quando a variável percorre toda a escala nos sentidos ascendente e descendente. Se expressa em porcentagem do *span* do instrumento.

Exemplo: num instrumento com range de -50°C a 100°C , sendo sua histerese de $\pm 0,3\%$, o erro será $0,3\%$ de $150^{\circ}\text{C} = \pm 0,45^{\circ}\text{C}$.

H) Repetibilidade: É a máxima diferença entre diversas medidas de um mesmo valor da variável, adotando sempre o mesmo sentido de variação. Se expressa em porcentagem do *span* do instrumento. O termo “repetibilidade” não inclui a histerese.

I) Linearidade: É o desvio máximo da indicação obtida tornando com referência a reta que une os pontos referentes a 0% e 100% da escala.

2.1.1 Medição de Pressão

As medidas de pressão estão entre as mais importantes feitas na indústria. A variedade dos equipamentos que realizam tais medidas é muito grande. A pressão pode ser medida em pressão relativa (em relação à atmosfera) e pressão absoluta (força total). A Figura 7 mostra os tipos de pressão e sua relação:

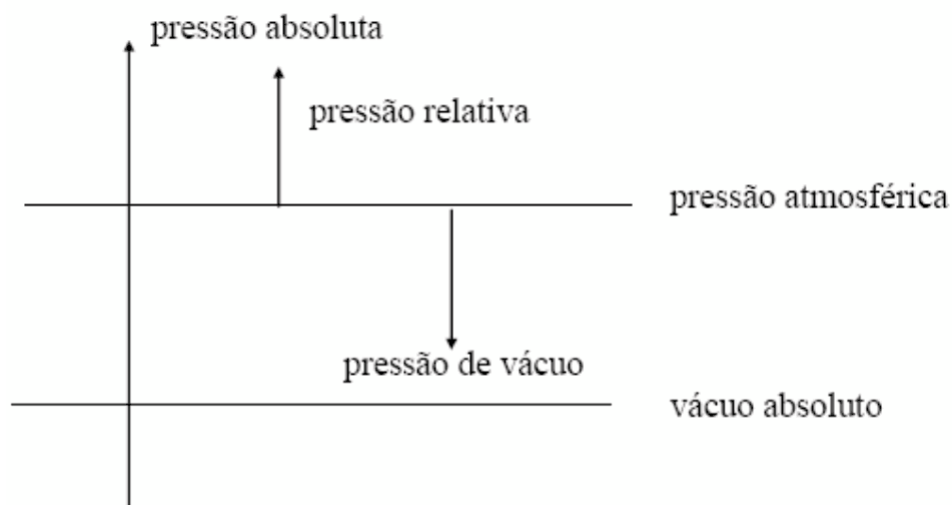


Figura 7: Tipos de pressão e sua relação (Fonte: CEFET/RJ,2009)

Como a pressão usualmente pode facilmente ser traduzida para força associando-a a uma área conhecida, os métodos básicos de medida de força e pressão são essencialmente iguais, exceto para a região de alto-vácuo, onde uma variedade de métodos especiais, não necessariamente vinculados à medida de força, é necessária (DOEBELIN, 2004).

Em geral a maioria das técnicas de medida de pressão é baseada numa comparação com um “peso-morto” conhecido agindo sobre áreas mensuradas ou na deflexão de elementos elásticos sujeitos a uma pressão desconhecida (DOEBELIN, 2004). Os métodos de “peso-

morto” são exemplificados por manômetros, enquanto os dispositivos de deflexão elástica tomam diversas formas, bastante variadas.

Os manômetros podem funcionar por meio de colunas líquidas ou leitura em escalas graduadas. Do primeiro tipo podemos citar o manômetro em U, em L, o coluna reta e o coluna reta inclinada. O barômetro, um tipo especial de manômetro L, é bastante utilizado em previsões atmosféricas e faz a leitura da pressão absoluta. Para tanto, sua extremidade superior é esvaziada completamente, ficando no vácuo absoluto. Já os manômetros que mostram a pressão em escalas graduadas atuam por meio de elementos elásticos que se flexionam sob a ação da pressão a ser medida (DOEBELIN, 2004).

Dentre os elementos sensíveis pode-se citar o fole, a membrana ou diafragma e o Tubo de Bourdon. O princípio de funcionamento de todos esses elementos sensíveis é o mesmo. Quando submetido à ação da pressão, o elemento sensível enche-se de ar e flexiona-se, sendo esse movimento transmitido ao ponteiro que vai indicar a medida de pressão.

Há também os manômetros capacitivos, dos tipos *strain-gauge* e piezoelétrico. O *strain-gauge* opera por meio do princípio de que a resistência de um material varia de acordo com suas dimensões. Assim, deformando-se um fio ligado a uma base, temos uma variação de resistência proporcional à pressão deformadora. Já os transdutores piezoelétricos são compostos de cristais que produzem um sinal elétrico quando são deformados fisicamente por pressão. Por sua vez, quando carregados eletricamente, sofrem uma deformação física. Os dois cristais mais importantes usados são o quartzo e o titanato de bário (PROFESSOR AQUINO, 2009).

O padrão de funcionamento dos sensores de pressão industriais circunscreve-se a esses modelos de medidores, ressaltando-se é claro os refinamentos de ordem técnica e operacional. Geralmente estes transmissores já vêm adaptados ao tipo de rede ao qual estarão ligados, ou seja, possuem saída elétrica padronizada para, por exemplo, analógico 4 a 20mA, protocolo Hart™, Profibus™ ou Fieldbus™. Possuem também *firmwares* internos que permitem ajuste de uma série de parâmetros, seja por meio do comando direto no dispositivo ou através de configuradores. As variáveis controladas incluem, por exemplo, a seleção entre as diversas unidades de engenharia, o ajuste do transmissor para o *range* de trabalho e a configuração do controlador PID interno (para os que têm).

2.1.2 Medição de Temperatura

Nos diversos segmentos da indústria (química, petroquímica, siderúrgica, cerâmica, farmacêutica, alimentícia, hidrelétrica, nuclear entre outras) a monitoração da variável temperatura é fundamental para a obtenção do produto final especificado (SENAI/SC, 2003).

Para a maior parte das aplicações, a Lei Zero da Termodinâmica oferece um conceito útil para o entendimento do princípio da medição de temperatura: para dois corpos terem a mesma temperatura, eles devem estar em equilíbrio térmico. Nessa condição, nenhuma mudança nas coordenadas térmicas ocorre entre os dois corpos. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007)

Os medidores de temperatura podem ser divididos em dois grandes grupos: um é o sistema físico, que se baseia na dilatação do material, e o outro é o sistema elétrico, cuja alteração dá-se em alguma variável elétrica do material.

No sistema físico têm o termômetro de líquido, a pressão e tensão de vapor e termômetro bimetálico. Já os termômetros de resistência, termopares, termistores, termômetros de radiação e óticos são exemplos do sistema elétrico. Os mais utilizados em aplicações industriais são os termistores (PTC's e NTC's), os termômetros de resistência ou termorresistências (o mais conhecido é o PT100) e os termopares.

Os termistores baseiam-se na propriedade de alguns materiais variarem sua resistência elétrica em função da temperatura à qual estão submetidos. No caso dos termistores, essa variação dá-se não de forma linear, mas exponencial. São fabricados com materiais semicondutores como óxido de magnésio ou cobalto. Existem dois tipos: *NTC* (do inglês *Negative Temperature Coefficient*) – termistores cujo coeficiente de variação de resistência é negativo: a resistência diminui com o aumento da temperatura; e o *PTC* (do inglês *Positive Temperature Coefficient*) – termistores cujo coeficiente de variação de resistência com a temperatura é positivo: a resistência aumenta como aumento da temperatura. Essa variação é dada por uma curva característica do fabricante. Termistores são utilizados para baixas temperaturas, geralmente a ambiente. O *range* varia de -50°C até aproximadamente 150°C (DOEBELIN, 2004).

Os termômetros de resistência ou termorresistências baseiam-se na mesma propriedade da variação da resistência do material em função da temperatura. Só que nesse caso a variação é linear dentro do *range* de aplicação. Platina, níquel e cobre são os materiais mais comumente usados. A platina, por exemplo, é linear dentro de $\pm 0,4\%$ da faixa de -300 para -100°F e -100 para $+300^{\circ}\text{F}$, $\pm 0,3\%$ de 0 para 300°F , $\pm 0,25\%$ de -300 para -200°F , $\pm 0,2\%$

de 0 para 200°F e $\pm 1,2\%$ de 500 para 1500°F. Uma vez que as necessidades de medição industrial e calibrações variam grandemente, uma enorme quantidade de termômetros de platina com diferentes níveis de acurácia estão disponíveis (DOEBELIN, 2004).

As termorresistências mais utilizadas industrialmente são as de platina, com destaque para a PT-100 Ω (cuja resistência é 100 Ω a 0°C). Sua faixa de uso vai de -200 a 650°C, conforme a norma ASTM E1137; entretanto, a norma DIN IEC 751 padronizou sua faixa de -200 a 850°C (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007). Para os casos em que a precisão de medida não é uma exigência muito crítica, pode-se definir o comportamento dessas termorresistências da seguinte forma:

$$R = R_0 [1 + \alpha (t-t_0)]$$

Onde R é a resistência do condutor na temperatura t; R_0 é a resistência na temperatura t_0 e α é o coeficiente resistência-temperatura do material.

As termorresistências são muito utilizadas, face à sua boa linearidade, por suportar temperaturas de até 600°C e pelos dispositivos eletrônicos que as monitoram serem de fácil desenvolvimento, ao contrário dos termopares. O PT100 também possui todos os seus parâmetros pré-definidos e bastante confiáveis, facilitando validações de técnicas e processos (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007). O único inconveniente do PT100 é seu preço, um tanto elevado.

Se dois fios de materiais diferentes A e B são conectados a um circuito, com uma junção à temperatura T_1 e a outra à temperatura T_2 , sendo $T_1 \neq T_2$, então um voltímetro de resistência infinitesimal detectará uma força eletromotriz (f.e.m) E. A magnitude de E dependerá dos materiais e das temperaturas. Esse princípio, conhecido como efeito termoelétrico de Seebeck, é explorado pelos termopares para medição de temperatura. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007).

Enquanto muitos materiais exibem o efeito termoelétrico em algum grau, somente um pequeno número de pares é usado na fabricação de termopares. São eles: Platina/Ródio (tipos R, S e B), Chromel/Constantan (tipo E), Chromel/Alumel (tipo K), Cobre/Constantan (tipo T) e Ferro/Constantan (tipo J) (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007). Cada um desses pares apresenta uma curva característica de relação temperatura versus tensão, conforme mostra a Figura 8:

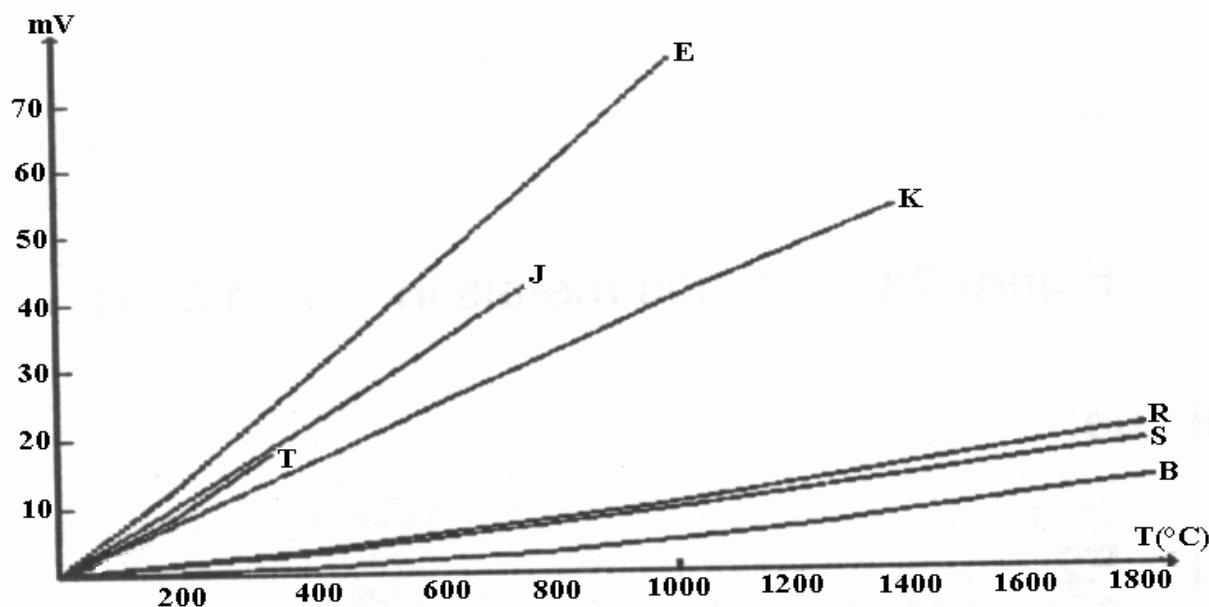


Figura 8: Correlação da f.e.m versus temperatura para os termopares (Fonte: SENAI, 2003)

A sensibilidade dos termopares varia com a temperatura. A máxima sensibilidade é de cerca de $60\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ para o tipo T a 350°C . Platina/Platina-Ródio é o de menor sensibilidade: cerca de $6\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ entre 0 a 100°C . Quanto à acurácia, o melhor é o Platina/Platina-Ródio, com erro da ordem de $\pm 0,25\%$ do valor lido (DOEBELIN, 2004).

A junta que é colocada junto ao processo e vai efetivamente fazer a leitura da temperatura chama-se junta quente ou de medição. A outra extremidade, conhecida como junta fria ou de referência, geralmente é considerada nos terminais do instrumento receptor, ou seja, à temperatura ambiente, diferente de 0°C e variável com o tempo. Como as tabelas existentes da f.e.m gerada em função da temperatura fixam a temperatura da junta de referência a 0°C , é necessária uma compensação.

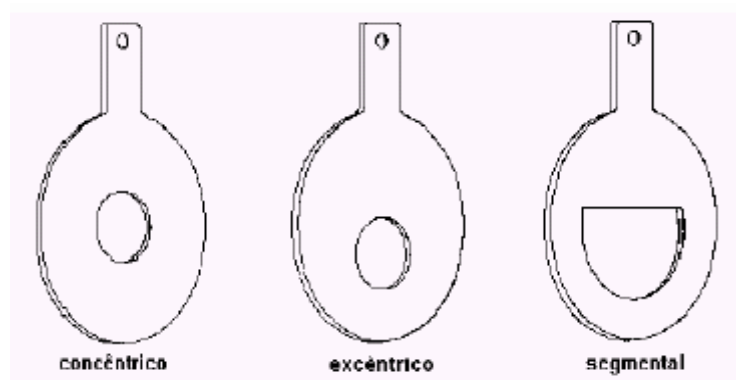
Para realizar esse procedimento, os instrumentos utilizados para medição de temperatura nas plantas industriais medem a temperatura nos terminais do instrumento através de circuito eletrônico, sendo que este circuito adiciona à tensão que chega aos terminais uma tensão correspondente à diferença de temperatura entre 0°C e a temperatura ambiente (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007). Esse processo é conhecido como Correção da Junta de Referência.

2.1.3 Medição de Vazão

A vazão pode ser medida como volume no tempo ou quantidade de massa no tempo. A importância de realizar tal medida pode ser ilustrada por aplicações como o controle de processo industrial, sistemas de abastecimento de uma cidade, sistemas de dutos petrolíferos e sistemas de irrigação. Os fluidos envolvidos podem ser líquido, gás ou uma mistura dos dois. O fluxo pode ser confinado ou fechado (como em um duto), semiconfinado (como em um rio ou um canal aberto), ou não confinado (como em um jato de líquido) (AQUINO, 2009). Em cada um dos casos, muitos instrumentos (medidores de vazão) têm sido desenvolvidos para atender às demandas do mercado.

Fundamentalmente, os dispositivos são divididos em medidores de quantidade e medidores volumétricos. Os medidores de quantidade são aqueles que, a qualquer instante, permitem saber que quantidade de fluxo passou, mas não a vazão do fluxo que está passando (SENAI, 2003). Exemplo: bombas de gasolina, hidrômetros, balanças industriais, e outros.

Os medidores volumétricos são aqueles que exprimem a vazão como volume fluindo no tempo. Aquele que é talvez o princípio mais amplamente utilizado nesses medidores envolve a colocação de uma restrição de área constante no duto em que o fluido escoar. Esses medidores são classificados como medidores por pressão diferencial. A restrição à circulação do fluido (chamada de elemento primário) causa uma queda de pressão que varia de acordo com a taxa de vazão. Os elementos primários mais comuns são a placa de orifício, o bocal de vazão, o tubo *venturi* e o tubo *pitot* (DOEBELIN, 2004). A Figura 9 ilustra alguns formatos da placa de orifício.



Figura

Figura 9: Diferentes formatos da placa de orifício (Fonte: PROFESSOR AQUINO, 2009)

Outros dispositivos, ao invés de área fixa e queda de pressão variável, utilizam a técnica de variação da área: são os rotâmetros. Um rotâmetro consiste de um tubo vertical dentro do qual está alocado um flutuador. A posição do flutuador dependerá do seu próprio

peso e da vazão. Quando maior a vazão, maior o empuxo, o que fará o flutuador subir na tubulação. Cada posição do flutuador corresponde a uma vazão determinada.

Além dos medidores por pressão diferencial e dos rotâmetros, existem também os medidores especiais: eletromagnéticos, tipo turbina, medidor Coriolis, vórtex, ultra-sônicos e por temperatura. Dentre estes, abordaremos apenas o tipo Turbina, o Coriolis e o Vortex, pois foram os utilizados nesse projeto.

O medidor tipo turbina pode ter seu funcionamento descrito da seguinte maneira. Se um rotor provido de aletas é colocado axialmente numa tubulação, ele irá girar quando um fluido passar pelo duto. Uma bobina captadora com um ímã permanente é montada externamente fora da trajetória do fluido. Quando este se movimenta através do tubo, o rotor gira a uma velocidade determinada pela velocidade do fluido e pelo ângulo das lâminas do rotor. À medida que cada lâmina passa diante da bobina e do ímã, ocorre uma variação da relutância do circuito magnético e no fluxo magnético total a que está submetida a bobina. Verifica-se então a indução de um ciclo de tensão alternada. A frequência dos pulsos gerados desta maneira é proporcional à velocidade do fluido e a vazão pode ser determinada pela medição/totalização de pulsos (AQUINO, 2009). A Figura 10 ilustra um modelo de sensor de vazão tipo turbina.



Figura 10: Medidor de vazão tipo turbina (Fonte: INCONTROL, 2007)

Quanto ao medidor Coriolis, ele indica a vazão mássica do fluido e pode ser usado tanto para líquidos quanto para gases. Seu funcionamento é baseado na força de Coriolis, que está indicada na fórmula abaixo:

$$F_c = 2m (\omega \times v)$$

Onde: F_c = força de Coriolis, m = massa do fluido em movimento, ω = velocidade angular e v

= velocidade radial em um sistema em rotação ou oscilação.

A força de Coriolis depende, então, além das velocidades angular e radial, do fluxo mássico do fluido no sistema. A Figura 11 ilustra um dos modelos possíveis de construção para o medidor Coriolis, em forma de U. Na sequência segue explicação de seu funcionamento.

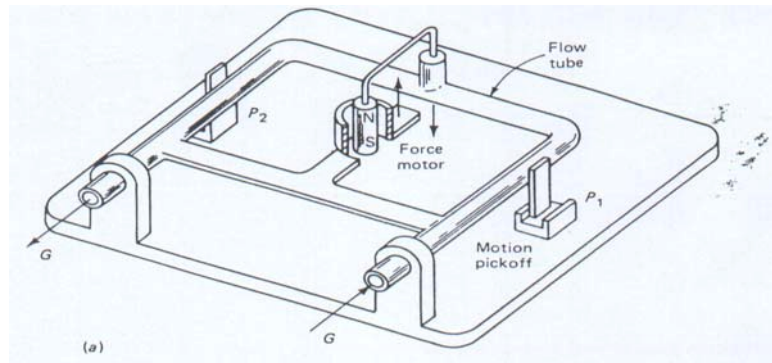


Figura 11: Medidor de vazão tipo Coriolis (Fonte: DOEBELIN, 2004)

A tubulação dentro da qual circula o fluido é mantida em vibração senoidal estacionária por meio de um sistema eletromagnético (a frequência geralmente gira em torno de 50 a 80Hz, imperceptível a olho nu). Quando um fluido passa pela tubulação, a força de Coriolis induz uma torção na tubulação, da seguinte forma:

- A) Quando o fluxo é zero, ambos os tubos oscilam em fase;
- B) Quando há fluxo, a oscilação do tubo é desacelerada na entrada do tubo e acelerada na saída, devido ao efeito Coriolis.

Essas oscilações são captadas por sensores magnéticos na entrada e na saída dos tubos. Esses sensores geram uma tensão em forma de ondas senoidais, proporcional ao atraso entre os dois lados, o que indicará a vazão mássica (DOEBELIN, 2004).

O medidor de vazão Coriolis é um instrumento de grande sucesso no momento, pois tem grande aplicabilidade nas indústrias alimentícia, farmacêutica, química, papel, petróleo, etc. Um de seus principais benefícios é independência das variáveis do processo - densidade, viscosidade, condutibilidade, pressão, temperatura e perfil do fluido. Diferentemente de muitos modelos, o medidor Coriolis não exige que o escoamento a ser medido tenha características satisfatoriamente laminares nos comprimentos de entrada e saída.

Já o medidor vortex é um medidor de vazão mássica que se baseia no fenômeno conhecido como Karman Vortex e se caracteriza pela ausência de partes móveis em contato com o fluido, baixas perdas de carga e boa exatidão. Quando um fluido passa por um pequeno objeto estático que cruza o interior do tubo, ocorre o fenômeno de formação de vórtices conhecido como Cinturão de Vórtices de Von Karman. A formação de vórtices é proporcional à velocidade do fluido, eles criam uma pequena pressão negativa, que é detectada por um sensor de pressão que pode ser piezoelétrico, ultrassônico ou capacitivo, e que o converte em

pulso elétrico. Um transmissor converte o sinal de pulso para um sinal de saída padrão. Uma vez que se conhece a secção transversal do tubo e tendo o valor da velocidade, a vazão pode ser determinada (NIVETEC, 2009).

Medidores tipo vortex constituem uma boa alternativa às placas de orifício, porém são limitados a fluidos de baixa viscosidade (≤ 10 cP) e velocidades mínimas de escoamento, ou número de Reynolds > 10000 . A *rangeabilidade* é normalmente de 8:1 e a acurácia de $\pm 2\%$ do fundo de escala.

O medidor vortex, à semelhança do medidor tipo turbina, deve ser instalado com um mínimo de dez diâmetros (D) de tubulação na entrada e cinco diâmetros (D) de tubulação na saída, garantindo o regime laminar. Em geral recomenda-se medição de escoamento monofásico, ou seja, sem mistura líquido/gás ou líquido/sólido (NIVETEC, 2009).

2.1.4 Aquisição de Dados

Quando se lida com experimentos simples, envolvendo pequeno número de variáveis, sendo essas de fácil manipulação, pode ser mais fácil gravar ou manipular os dados por meio de voltímetros, osciloscópios e outros dispositivos, ou interconectar equipamentos simples. No entanto, quando os experimentos ou outras funções experimentais tornam-se mais complexos e/ou envolvem uma extensa manipulação de dados, um sistema digital de aquisição de dados usando um computador pessoal e um *software* específico frequentemente é a melhor escolha (DOEBELIN, 2004). Esse sistema irá coletar os dados do processo e disponibilizá-los para a atuação no processo, para a visualização ou para o embasamento de projetos e pesquisas.

Algumas características são de especial interesse no que se refere às placas de aquisição de dados e seus respectivos programas. A placa irá prover um número definido de canais, sendo que a cada canal só pode ser ligado um sensor/transmissor. Os canais podem ser conectados na forma simples ou diferencial. Tipicamente, as placas provêm oito (8) canais se usados diferencialmente ou dezesseis (16) se usados da forma simples. Se os sensores de campo somente entregam sinais de baixo nível (isto é, com tensão na faixa de mV) e/ou utilizam cabos de extensão longa, então será necessário utilizar os canais de forma diferencial (reduzindo o número total de canais disponíveis), uma vez que esse modo tem uma melhor taxa de supressão de ruídos.

A resolução da placa (número de *bits*) influencia a menor alteração na tensão dos sensores que será reconhecida. Se a escala completa de um conversor A/D na placa for de $\pm 10V$, um cartão de 12 *bits* irá dividir isso em 4.096 sub-ranges, ou seja, o menor *bit* significativo será igual a $20 V/4.096 = 0,004883V$. Assim, uma alteração de tensão de saída

do sensor menor do que aproximadamente 5 mV poderá não resultar em nenhuma mudança no sinal digitalizado pela placa de aquisição. É por isso que comumente essas placas vêm dotadas de um módulo de amplificação antes do conversor A/D.

Se por um lado os sistemas digitais de aquisição de dados possuem muitas vantagens em relação aos sistemas analógicos, uma desvantagem mais clara é a necessidade de coletar amostras, isto é, os sensores somente são “interrogados” a cada 1ms, por exemplo, fazendo com que aquilo que tenha ocorrido dentro desse intervalo seja totalmente negligenciado. Geralmente é utilizada uma taxa de 7 a 10 amostragens por ciclo da maior frequência presente nos dados adquiridos, para superar esse problema. A taxa de amostragem algumas vezes é selecionada no *hardware* e noutras no *software*. Placas multifuncionais incluem não somente conversores A/D como também conversores D/A, saídas e entradas digitais e entradas para contadores.

2.1.5 Redes Industriais

Redes industriais são basicamente sistemas que consistem de diversos elementos trabalhando de forma simultânea e conjunta com o intuito de supervisionar e controlar um determinado processo. Estes elementos (sensores, atuadores, CLP's, CNC's, PC's) precisam estar interligados e trocando informações de forma rápida e precisa. As primeiras redes industriais utilizavam sinal de pressão padronizado de 3 a 15 psi para monitoramento e controle dos processos.

Os sistemas de controle industrial tendem a tornarem-se complexos, com um grande número de variáveis, ações e controles. Assim, dividir o sistema em uma série de partes controláveis individualmente pode ser interessante por uma série de motivos, como maior facilidade de desenvolvimento, operação, administração, confiabilidade e fácil detecção de problemas e manutenção (WATANABE, 2006).

Os sistemas digitais de controle distribuído (SDCD's) são utilizados desde meados da década de 70 com bastante sucesso, tendo por base a utilização de terminais remotos conectados aos dispositivos no campo, interligados entre si e com um elemento central, como um CLP, um PC industrial ou outro equipamento dedicado (WATANABE, 2006). Nesse modelo, os sensores de campo mais difundidos eram os de saída 4 a 20mA, um padrão que vigorou durante muitos anos e ainda é bastante utilizado devido em grande parte à sua imunidade a interferências eletromagnéticas.

Com o passar dos anos e o aumento da demanda da indústria por processos automatizados, eficientes, rápidos e pouco dispendiosos, sensores/atuadores inteligentes passaram a ser desenvolvidos. Estes elementos já eram capazes de efetuar processamentos e

operações. Dessa forma, barramentos digitais foram amplamente difundidos no ambiente fabril. Com eles, a responsabilidade pela funcionalidade da rede passou a ser de todos os dispositivos, e não apenas de um elemento central. Dessa forma, as interfaces elétricas analógicas foram abandonadas e abriram caminho para as redes de dispositivos trafegando dados digitalizados de acordo com seu próprio protocolo, o que simplificou a rede sensivelmente, tornou sua operação mais fácil, bem como adição/remoção de nós, exigindo menos fiação e tornando o sistema como um todo mais flexível (WATANABE, 2006).

Assim, iniciou-se uma briga entre diversos órgãos e comitês, com o intuito de padronizar qual seria o novo padrão de comunicação de dispositivos de campo nas plantas fabris. A Figura 12 ilustra o enorme número de protocolos que passaram a buscar seu espaço nesse tipo de mercado:

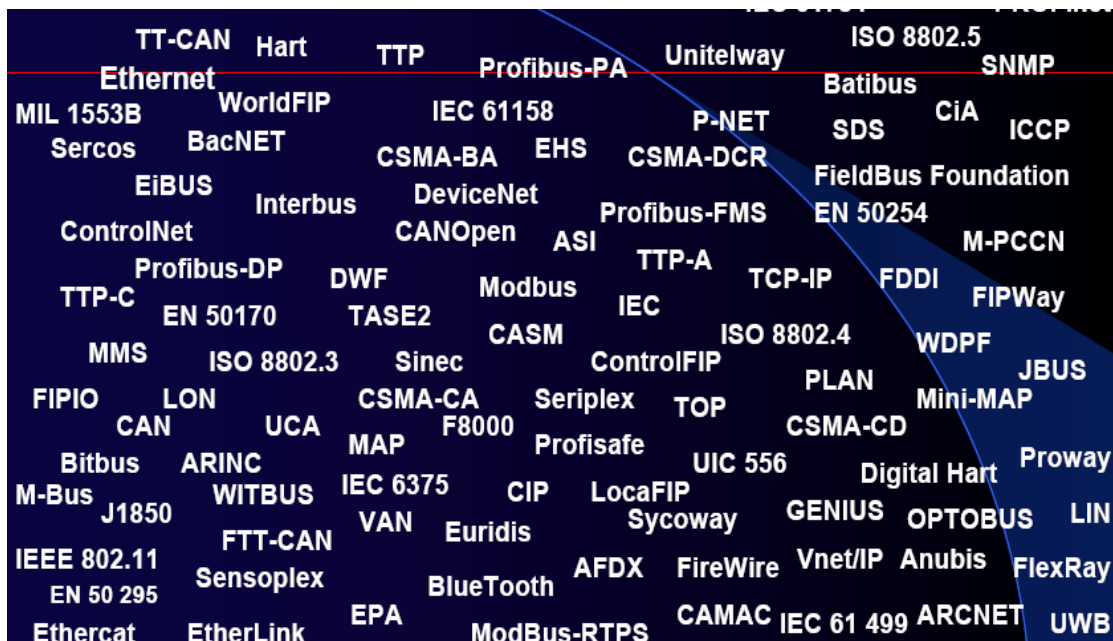


Figura 12: Padrões de Rede Industrial (Fonte: PUC-RS, 2007)

Como projetos de padronização de redes mais importantes citam-se os projetos PROWAY, IEEE 802, MAP (MAP/EPA e MINI-MAP), TOP e FIELDBUS. Esses projetos previam arquitetura, topologia, protocolo, meio físico, condições de segurança intrínseca, codificação, taxa de transmissão, padrões de alimentação, quadros e outros importantes atributos das redes.

Como exemplos de redes comerciais desenvolvidas com base nesses projetos e com substancial sucesso temos a HART® (rede de transição sistemas analógico/digital), CAN® (aplicação em sistemas embarcados), DeviceNet® (evolução da CAN®), Interbus-S® (de ampla aceitação industrial), ASI-BUS® (para interligação de elementos periféricos binários), ModBus® (rede proprietária da Schneider Automation ®), Ethernet Industrial, entre outras. A Figura 13 mostra como os sistemas evoluíram, passando do

analógico para o digital e do centralizado para o descentralizado.

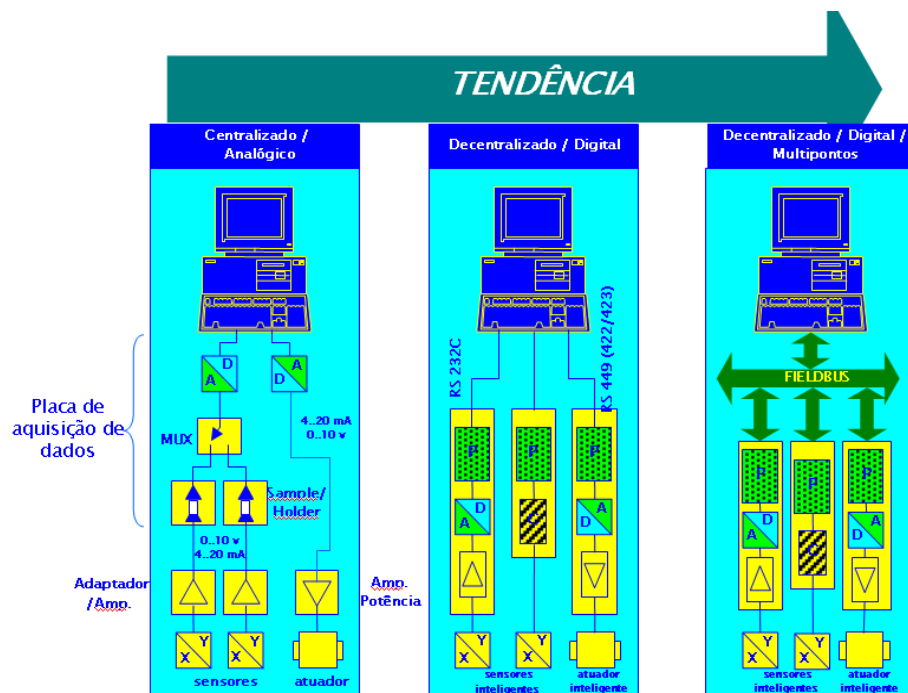


Figura 13: Tendência de evolução das redes industriais (Fonte: UFSC, 2008)

O padrão Hart® consiste numa codificação Manchester inserida sobre o sinal analógico 4 a 20 mA tradicional. Neste esquema os pulsos elétricos enviados só têm significado aos pares: a cada par de pulsos enviados, se o primeiro for mais forte que o segundo, indica a transmissão de um 1. Inversamente, se o primeiro for mais fraco que o segundo, indica a transmissão de um 0. Assim, quando não houver transmissão, todos os pulsos serão fracos ou simplesmente inexistentes (POLITEC, 2007). Essa codificação tem a função de comunicar sinais discretos de abertura e fechamento de válvulas, relés e outros elementos que atuam apenas no esquema abre-e-fecha, seja no sentido processo/controle ou vice-versa.

O Projeto Fieldbus basicamente circunscreve-se à tentativa de definição de um padrão de interligação de instrumentos de campo inteligentes. O padrão desenvolvido integra os diferentes tipos de instrumentos de controle, proporcionando uma interface para a operação de diversos dispositivos simultaneamente e um conjunto de protocolos de comunicação para todos eles. A rede Fieldbus interliga equipamentos de I/O mais inteligentes e cobre distâncias maiores. Os equipamentos acoplados à rede possuem inteligência para desempenhar funções específicas de controle tais como *loops* PID, controle de fluxo de informações e processos. Os tempos de transferência podem ser longos e a rede deve ser capaz de comunicar-se por vários tipos de dados (BORDIM, 2006).

Algumas vantagens desse sistema são: redução do cabeamento (sistema multiponto requer 1/5 menos cabo que o ponto-a-ponto), facilidade de instalação, manutenção e detecção de falhas, maior modularidade e flexibilidade (alguns algoritmos e procedimentos de controle

ficam no próprio dispositivo de campo), integração entre vários fabricantes de soluções (sistema aberto ou não-proprietário), menores custos de instalação e manutenção, redundância na rede, instrumentação de ponta (é a rede de maior crescimento na atualidade), baixo tempo de resposta (abaixo de 10ms), consistência e confiabilidade dos dados, não-dependência de apenas um fabricante de *software* supervisorio (o que ocorre em algumas redes) (BORDIM, 2006).

Algumas versões de Redes Fieldbus foram propostas, como a IEC/ISA SP50, Profibus-PA (líder de mercado na Europa, principalmente na Alemanha), WorldFip e Fieldbus Foundation. A *Fieldbus Foundation*, resultado da fusão da ISP com a com a WorldFip, tem uma proposta que vem atualmente buscando consolidar-se como padrão único e interoperável de rede Fieldbus no mundo da automação industrial, apesar desse impasse ainda não ter uma definição.

O protocolo *Foundation Fieldbus* (FF) é uma tecnologia de comunicação serial, digital, bidirecional e multi-drop. Especifica a utilização de três (3) das sete (7) camadas do modelo de referência ISO/OSI (física, enlace e aplicação), mais a camada de usuário (também encontrado no modelo ISA/IEC SP50) (PROFESSOR AQUINO, 2003).

No que se refere à camada física, o protocolo prevê a utilização apenas de pares trançados de cobre como meio de comunicação. Duas velocidades são definidas:

- A) 1 Mbps e 2,5 Mbps (para interligar equipamentos de usuário - PCs por exemplo - e os dispositivos mais rápidos do chão-de-fábrica), no sistema H2 ou *Higher-Speed Fieldbus*;
- B) 31,25 kbps (para interligar dispositivos mais lentos de chão-de-fábrica), no sistema H1 ou *Lower-Speed Fieldbus*.

A versão de 31,25 kbps pode operar nas mesmas instalações do padrão 4 a 20 mA, o que é útil para atualizações graduais de plantas industriais. O padrão permite o uso de até 32 dispositivos conectados ao barramento, entretanto esse número cai com o comprimento do cabo e se o mesmo transmite energia junto com os dados (o padrão permite transmissão de dados com ou sem energização).

A rede é formada por uma linha tronco e suas derivações (*spurs*). A linha tronco é finalizada por um terminador passivo formado por um resistor de 100Ω em série com um capacitor de 1μF. O comprimento máximo da linha tronco é de 1900m. O número de instrumentos pode ser de 2 a 32, para conexão não-intrinsecamente segura com alimentação separada, 1 a 12 instrumentos, para conexão não intrinsecamente segura e alimentação transmitida pelo cabo de dados, e 2 a 6 instrumentos para aplicações com segurança intrínseca quando os instrumentos são alimentados diretamente pelo cabo de sinal. A tabela abaixo define o tamanho máximo dos *spurs* ou segmentos de rede que podem ser utilizados:

Total de dispositivos por rede	Um disp. por spur(m)	Dois disp. por spur(m)	Três disp. por spur(m)	Quatro disps por spur(m)	Comprimento máximo total (m)
1-12	120	90	60	30	439
13-14	90	60	30	1	384
15-18	60	30	1	1	329
19-24	30	1	1	1	220
25-32	1	1	1	1	10

Tabela 1: Comprimento máximo do cabo por Spur (Fonte: PROFESSOR AQUINO, 2008)

Repetidores podem ser usados em número máximo de quatro (4) para regenerar o sinal depois de excedido o comprimento máximo. A distância máxima entre dois instrumentos é de 9.500 m. O cabo FF é polarizado. Sua inversão pode causar sérios danos aos instrumentos. A fonte de alimentação que provê energia para os instrumentos possui entrada AC Universal e saída de 24V devidamente isolada e protegida.

As topologias em árvore, ponto-a-ponto, em ramos e mista podem ser utilizadas, porém não se recomenda a topologia em anel, pois torna o barramento vulnerável a interrupções.

2.2 INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Inversores de frequência são equipamentos de baixo custo usados para o controle da velocidade de motores de indução trifásicos, controle este que permite uma economia de energia sem prejudicar a qualidade final do sistema. Abaixo na Figura 14, está ilustrado um inversor de frequência comercial:



Figura 14: Inversor de Frequência Comercial

Nos sistemas convencionais os controladores de vazão, pressão e temperatura comandam válvulas e/ou *dampers* de estrangulamento, desperdiçando a energia elétrica. Nos sistemas atuais, as válvulas de estrangulamento estão sendo substituídas por inversores de frequência, acionando os motores principais. A grande vantagem de utilização de inversores é que além de gerarem economia de energia também reduzem o custo de instalação do sistema. Os inversores variam as velocidades dos motores de acordo com a maior ou menor necessidade de vazão, pressão ou temperatura de cada zona de controle. Ao diminuir a velocidade, os inversores proporcionam grande economia de energia. Tal efeito não ocorre com as válvulas tradicionais onde a vazão é reduzida, porém, o motor continua operando na mesma velocidade, pressionando o fluido sobre a entrada da válvula, absorvendo a mesma potência (RASHID, 1993).

Outra vantagem que se pode obter utilizando inversores de frequência é a possibilidade de redução dos custos de manutenção. Os inversores possibilitam que os motores sejam acionados suavemente, sem trancos. Com isso, reduz-se a quebra de elementos de transmissão como correntes e rodas dentadas, ocorrências frequentes em virtude do esforço adicional provocado pelos motores com partida direta.

Para entender o funcionamento de um inversor de frequência é necessário, antes de tudo, saber a função de cada bloco que o constitui, o que está mostrado abaixo na Figura 15.

Ele é ligado na rede, podendo ser monofásico ou trifásico, e em sua saída há uma carga que necessita de uma frequência diferente daquela da rede. Para tanto, o inversor tem como primeiro estágio um circuito retificador, responsável por transformar a tensão alternada em contínua; após isso há um segundo estágio capaz de realizar o inverso, ou seja, de CC para CA (inversor), e com a frequência desejada pela carga (MOHAN; ROBBINS, 1989).

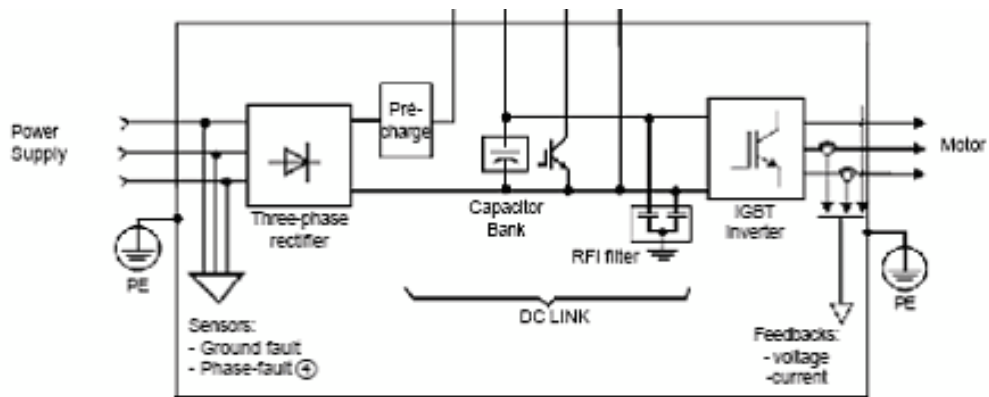


Figura 15: Diagrama de blocos de um inversor de frequência (Fonte: PENELLO, 1992)

O IGBT responsável por realizar a segunda inversão, de CC para CA, está mais bem detalhado na Figura 16, que mostra o esquema interno desse componente.

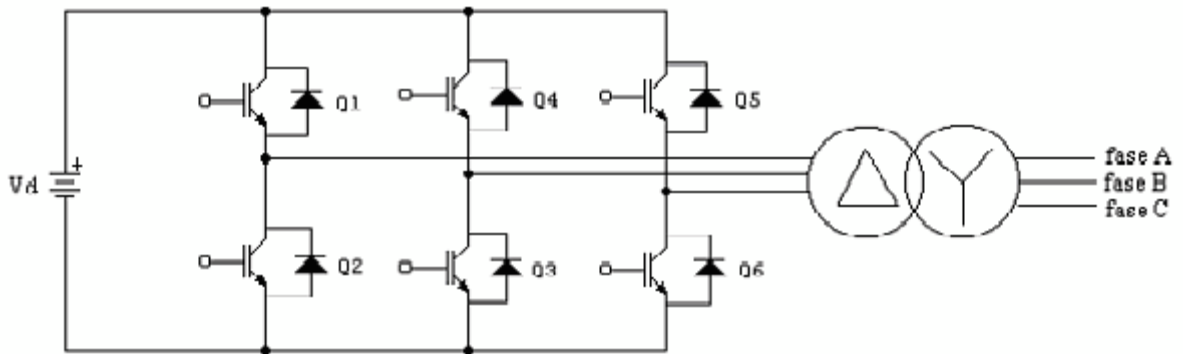


Figura 16: Esquema do inversor IGBT (fonte: RASHID, 1993)

Os inversores de frequência podem ser divididos em três categorias (RASHID,1993):

Inversores PWM (*Pulse-width Modulated Inverters*): Nesses inversores, a tensão de entrada do conversor (CC→CA) é mantida constante por um retificador a diodo, por exemplo, e o inversor controla a magnitude e a frequência da tensão de saída através de um PWM.

Inversores de onda quadrada: Nesses inversores a tensão CC de entrada do conversor é alterada de forma a controlar a magnitude da tensão CA de saída. Desta forma o conversor tem que controlar apenas a frequência da tensão de saída. A onda de saída tem a forma similar a uma onda quadrada, daí o seu nome.

Inversores monofásicos com cancelamento de tensão: Em sistemas monofásicos é possível controlar a magnitude e a frequência da tensão CA da saída, mesmo sem PWM. Vale notar que essa técnica de cancelamento de tensão funciona apenas para sistemas monofásicos.

2.4 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados foi realizada utilizando o programa computacional LabVIEW no ambiente *Windows*. O LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma linguagem de programação gráfica originária da National Instruments. A primeira versão surgiu em 1986 para o Macintosh e atualmente existem também ambientes de desenvolvimento integrados para os sistemas operacionais *Windows*, *Linux* e *Solaris* (ELEKTORBRASIL, 2009).

Os principais campos de aplicação do LabVIEW são a realização de medições e a automação. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a

esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação (ELEKTORBRASIL, 2009).

Os programas em LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais ou, simplesmente, IVs. São compostos pelo painel frontal, que contém a interface, e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. O programa não é processado por um interpretador, mas sim compilado. Deste modo, o seu desempenho é comparável à exibida pelas linguagens de programação de alto nível. A linguagem gráfica do LabVIEW é chamada "G".

Os blocos de funções são chamados de instrumentos virtuais. Isto porque, em princípio, cada programa (Sub-IV) pode ser usado como sub-programa por qualquer outro ou pode, simplesmente, ser executado isoladamente. Devido à utilização do modelo do fluxo de dados, as chamadas recursivas não são possíveis, podendo-se, no entanto, conseguir esse efeito pela aplicação de algum esforço extra.

O programador liga IVs com linhas de ligação e define deste modo, o fluxo de dados. Cada IV pode possuir entradas e/ou saídas. A execução de um IV começa quando todas as entradas estão disponíveis; os resultados do processamento são colocados nas saídas assim que a execução do sub-programa tenha terminado. Desta forma, a ordem pela qual as tarefas são executadas é definida em função dos dados. Uma ordem pré-definida (por exemplo, "da esquerda para a direita") não existe. Uma importante consequência destas regras é a facilidade com que podem ser criados processos paralelos no LabVIEW. Os sub-IVs sem interdependência dos respectivos dados são processados em paralelo (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

Os sub-IVs que não possuem entradas são executados no início do programa. Se o sub-IV não possuir saídas, os dados resultantes são ignorados ou, então, usados pelo exterior: são escritos para o disco rígido ou para a rede, ou enviados para impressão. Da mesma forma, um sub-IV sem entradas pode receber dados provenientes de aparelhos periféricos ou pode gerar os seus próprios dados (um exemplo é um gerador de números aleatórios). Os sub-IVs podem estar interligados com muita complexidade. Muitas das funções próprias do LabVIEW são, por sua vez, IVs normais, que podem ser modificados pelo programador (o que não é recomendado). Todos os IVs se baseiam numa série de funções básicas, chamadas "primitivas", que não podem ser modificadas pelo programador (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

Os dados podem ser ligados ao painel frontal através de manipuladores. Por exemplo, a inserção de números pode ser dependente de um manípulo e uma variável de saída booleana pode ser realizada por um *LED* colocado no painel.

O painel frontal do LabVIEW é uma interface amigável para construir programas. O programador não precisa escrever nenhuma linha de código. A apresentação gráfica dos processos aumenta a facilidade de leitura e de utilização (LUSOROBOTICA, 2009). Uma grande vantagem em relação às linguagens baseadas em texto é a facilidade com que se criam componentes que se executam paralelamente. Em projetos de grande dimensão é muito importante planejar a sua estrutura desde o início (como acontece nas outras linguagens de programação).

2.5 ESCOAMENTO BIFÁSICO

O escoamento bifásico ocorre frequentemente em diferentes áreas da tecnologia, por exemplo, na geração de energia nuclear, extração de petróleo, entre outras. Também acontece em processos naturais, tais como vulcões e nos sistemas biológicos.

Na produção *offshore* de óleo e gás, os fluidos provenientes da rocha-reservatório fluem como uma mistura bifásica (óleo e gás) ou trifásica (óleo, gás e água livre) até as unidades de produção por tubulações apropriadas para este fim. Durante seu percurso pelo leito submarino, estas tubulações encontram irregularidades de relevo que se refletem no escoamento multifásico. Por exemplo, a baixas vazões a fase gasosa pode se acumular nos pontos mais altos das tubulações, ao passo que o óleo e/ou a água livre tende a se acumular nos pontos baixos (“vales”) dos dutos. Estes acúmulos preferenciais traduzem-se em uma produção instável em termos das vazões dos fluidos produzidos e da distribuição da pressão ao longo de toda a tubulação. Esta fenomenologia é apenas um entre diversos problemas de produção causados pelo escoamento simultâneo de mais de uma fase por um duto, e enfatiza a necessidade em se conhecer melhor estes escoamentos para que tais problemas sejam evitados, corrigidos ou mitigados, conhecimento este que requer um bom entendimento do que são e significam os chamados *padrões de escoamento*.

Os escoamentos bifásicos distinguem-se pela forma com que as fases se distribuem e se arranjam dentro das tubulações. Tais distribuições são conhecidas como *arranjos de fases* ou *padrões de escoamento*. Um dos padrões mais comuns do escoamento bifásico é o chamado escoamento em golfadas ou *slug flow*. Este padrão intermitente pode ocorrer em qualquer sistema onde haja o escoamento simultâneo de líquido e gás, daí a importância em melhor conhecer e caracterizar escoamentos deste padrão.

O escoamento em golfadas caracteriza-se por uma sucessão temporal e espacial de bolhas alongadas de gás seguidas por bolsões de líquido que podem conter pequenas bolhas no seu interior. Um filme de líquido envolve a bolha alongada completamente (no caso de escoamento vertical em padrão de golfadas) ou simplesmente escoar ao lado desta.

3 DESENVOLVIMENTO

O foco deste projeto está em projetar e montar circuitos eletrônicos, uma válvula proporcional para gás e um sensor tipo placa de orifício plenamente integrados ao sistema de aquisição industrial Fieldbus Foundation e placa analógica com programação LabView, para a automatização das vazões de gás e líquido.

3.1 INSTRUMENTAÇÃO

Para o controle das vazões de ar e líquido, é necessário um sensor de vazão de líquido e um sensor de vazão de gás, dando as variáveis de processo necessárias para um controle por malha fechada.

3.1.1 Medidores de Vazão

Foi utilizado um medidor Coriolis para vazão de líquido e, para medir a vazão de gás com compensação de densidade, foram utilizados um tubo com placa de orifício, um transdutor de pressão diferencial e três (3) medidores de pressão relativa.

3.1.1.1 Medidor de Vazão Tipo Coriolis

O medidor Coriolis utilizado foi o modelo Micromotion serie F, fabricante Emerson®. É um equipamento de medição de vazão mássica e não depende da viscosidade, densidade, temperatura ou natureza do material a ser medido. Isso permite medição de vazão de fluidos corrosivos, em altas temperaturas e com partículas sólidas imiscuídas, como na indústria química e petrolífera. Suas principais características são: meia polegada de diâmetro nominal, conexão ao processo flangeada, alimentação bivolt Vac, consumo de 10.5mA, fabricado em aço inoxidável, repetitividade melhor do que $\pm 0,05\%$, acurácia de $\pm 0,1$ da taxa medida instantânea (para líquidos), range de medição de ate 1,5 litros por segundo, sinal de saída no padrão Fieldbus Foundation H1 31.25kbit/s, suporta barramento energizado de 9 a 32 V ou 9 a 24V (para conexão intrinsecamente segura) (Emerson, 2009). O modelo utilizado é mostrado na Figura 17.

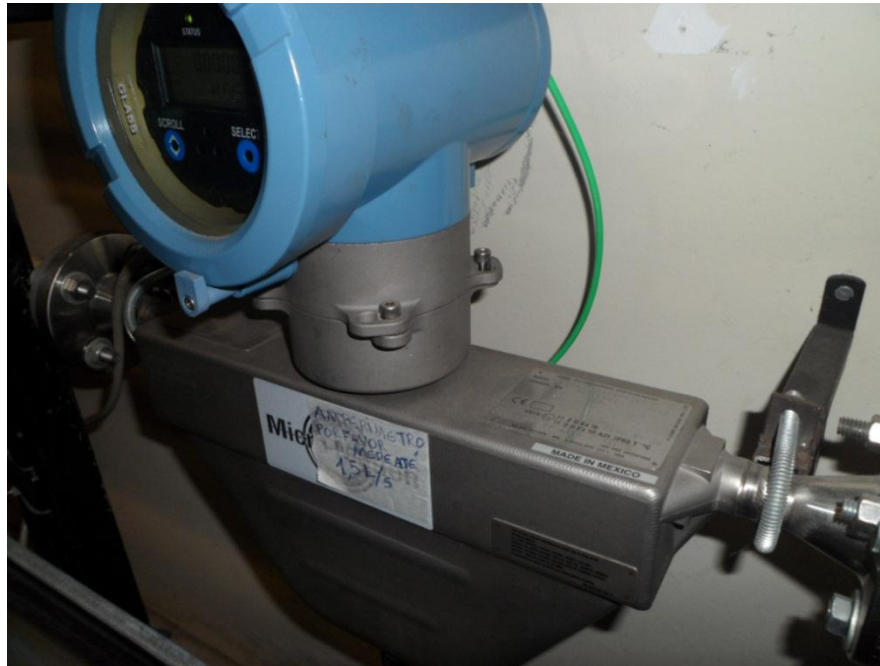


Figura 17: Medidor Coriolis

3.1.1.2 Medidor de vazão de gás tipo placa de orifício

Como mostrado na Figura 18, o medidor montado pelo autor, com conexões de PVC de três quartos de polegada, muito comum em casas de materiais de construção.



Figura 18: Tubo de placa de orifício

O dispositivo foi montado e colado com cola de tubos PVC, foram dois (2) tês. Uma união roscavel, e quatro luvas com rosca, quatro engates rápidos, sendo dois com rosca de meia polegada e tubo de 12 mm e dois com rosca de um quarto de polegada com tubo para 6 mm, duas reduções de meia polegada para um quarto de polegada. Entre a união roscavel se encontra um disco de aço inox com um orifício de 1 mm. Para a vedação desse disco são usados dois anéis de borracha, um de cada lado do disco.

Para medir a diferença de pressão na placa de orifício, foi usado um transmissor de pressão diferencial da marca Emerson®, Figura 19, com fundo de escala de 6 metros de coluna de água, e sinal digital *Fieldbus Foundation*.

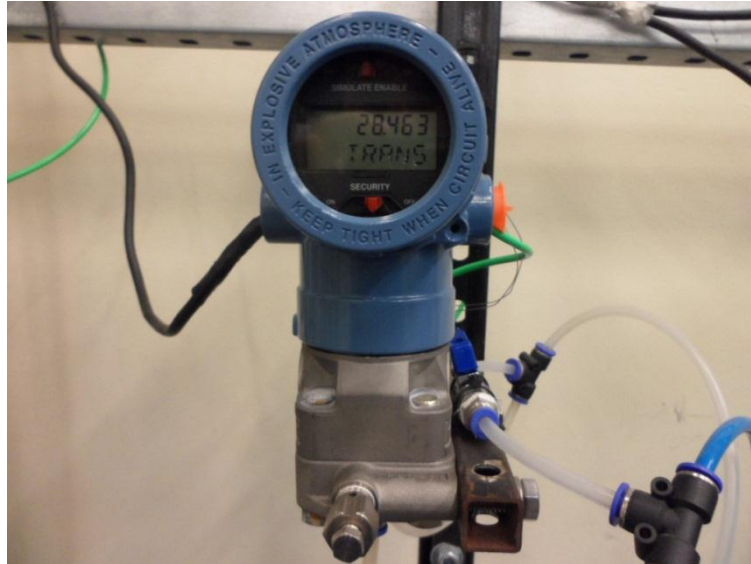


Figura 19 Medidor de pressão diferencial

3.1.1.3 Medidor de vazão de gás tipo rotâmetro

Para o levantamento da relação de pressão diferencial na placa de orifício com a vazão volumétrica de gás (no presente caso o ar), foram usados três rotômetros: um de baixa, um de média e um de alta vazão. A Figura 20 mostra um dos rotômetros utilizados.



Figura 20 Medidor de vazão de gás tipo rotâmetro

Cada rotâmetro vem acompanhado de seu certificado de calibração, com pressão de saída de uma (1) atmosfera, ar seco, sem umidade, e com temperatura de 15°C e 20°C. Os rotômetros vêm com uma escala graduada de 0 até 100, para a conversão dessa escala pela vazão em litros

por hora. Estes rotômetros não possuem tabela de compensação da densidade do ar, o que quer dizer que a saída deve estar sempre para a atmosfera e não pressurizada. Na Figura 21 o gráfico da escala do rotômetro pela vazão (l/h) com equação do 1º grau que representa essa reta.

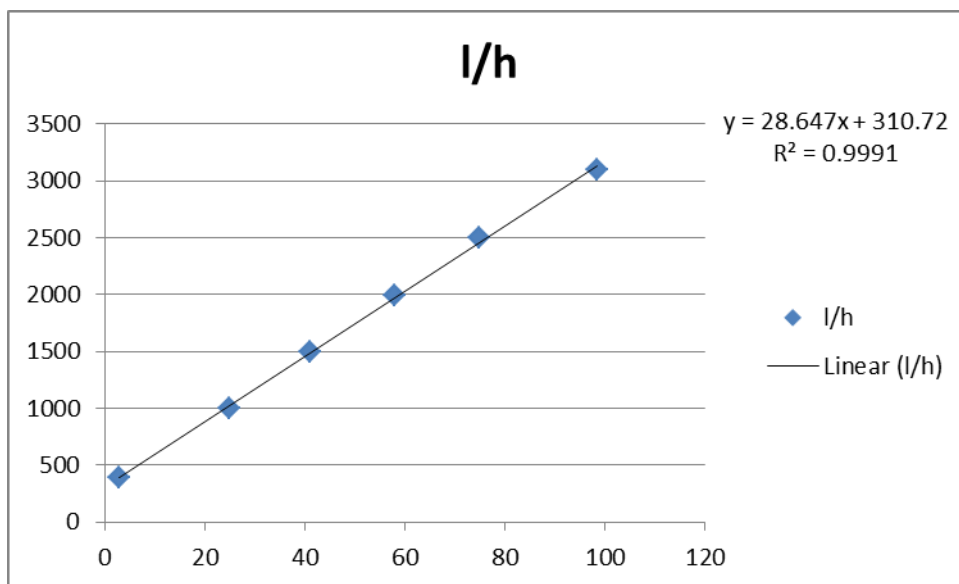


Figura- 21 Gráfico da equação de vazão de gás no rotômetro

Cabe ressaltar que para atingir a faixa requerida pelos projetos de escoamento bifásico desenvolvidos no LACIT são utilizados vários rotômetros de diferentes faixas de vazão de gás. A Figura 22 mostra as faixas de cada rotômetro cobrindo o mapa de Taitel (1990) para escoamento em golfadas.

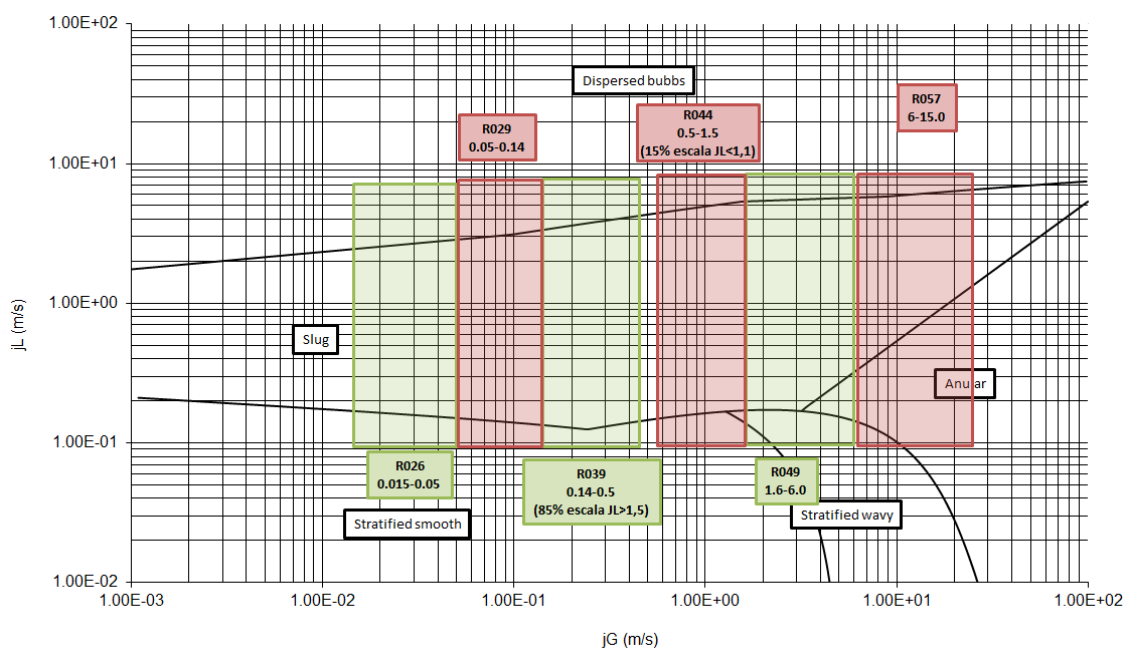


Figura 22 Esquema dos rotômetros utilizados nos projetos do LACIT.

3.1.2 Medidores De Pressão

Os medidores de pressão utilizados foram os seguintes:

3.1.2.1 Manômetro diferencial de coluna de líquido

Para uma verificação da calibração de um transdutor de pressão foi usada uma coluna de água com escala como mostrado na Figura 23. Basicamente, são tubos de vidro interligados com mangueiras no transdutor, que são preenchidas gradativamente com água. As colunas assim formadas são então comparadas com os valores de pressão que são mostrados no visor do transdutor. Como os transdutores são novos, nenhum precisou ser recalibrado.



Figura 23: Manômetro de coluna de água

3.1.2.3 Medidor de pressão capacitivo tipo Fieldbus®

Os medidores em questão têm saída em padrão Fieldbus®. O modelo 3051 do fabricante Rosemount®, que está ilustrado na Figura 24, mede pressão diferencial e relativa. São suas principais características: 12,7cm diâmetro nominal, invólucro de alumínio e partes úmidas em aço inoxidável, conexão ao processo flangeada, acurácia máxima $\pm 0,04\%$ do valor instantâneo, *rangeabilidade* de 120:1, *range* garantido de 0 a 6 m de coluna de água para o de pressão diferencial e de 0 ate 100 metros de coluna de água para o de pressão relativa, 17 tipos de blocos de função para estratégias de controle e diagnóstico avançado, temperatura do

processo suportada de -40 a +100 °C, alimentação de 12 a 45V, sinal de saída padrão Fieldbus® H1 31.25 kbit/s, suporta cabeamento de dados energizado de 9 a 32V, consumo quiescente de corrente 12mA (Rosemount, 2009).

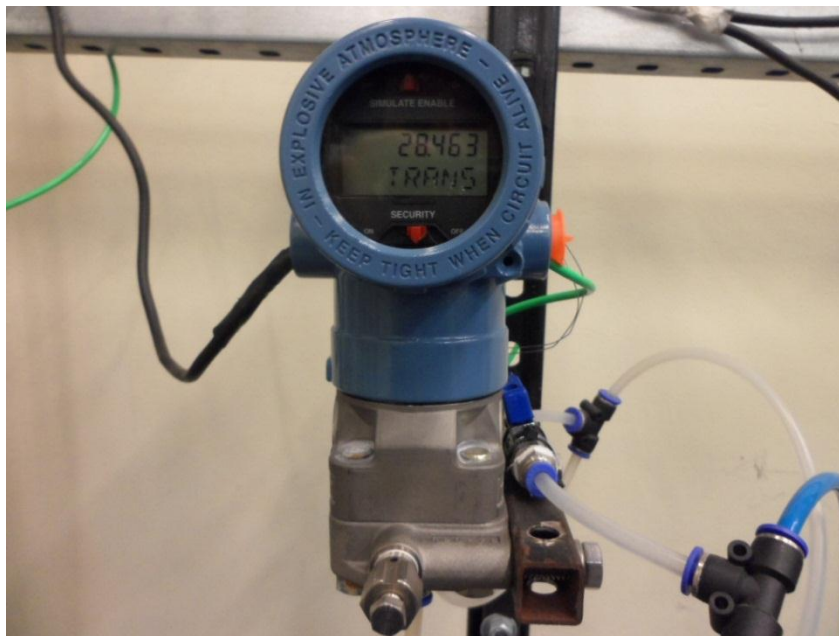


Figura 24: Medidor de Pressão Diferencial

3.1.3 Medidor De Temperatura

Para o acompanhamento da temperatura do fluido escoando na bancada, foi usado um termômetro. Inicialmente observou-se que a temperatura mostrada correspondia à temperatura fornecida pelo medidor de vazão Coriolis. Utilizou-se o seguinte medidor de temperatura:

3.1.3.1 Termopar de Imersão tipo K

O termopar do tipo K é composto pelas ligas de Níquel–Cromo (ou Cromel)/ Níquel –Alumínio (ou Alumel). O cromel é o terminal positivo, enquanto o alumel é o negativo. Os termopares K são recomendáveis para uso em atmosferas oxidantes ou inertes no seu *range* de trabalho. Como são resistentes à oxidação, são melhores que os tipos T, J e E, sendo largamente utilizados em temperaturas superiores a 540°C. Podem ocasionalmente ser usados em temperaturas abaixo de 0°C. São os termopares mais utilizados na indústria em geral, devido à grande faixa de atuação. Sua faixa de medição vai de -270 a +1372°C, correspondendo a, respectivamente, -6,458 a +54,852mV (DOEBELIN, 2004).

O termopar foi ligado ao transmissor de temperatura TT301, tal como mostra a Figura 25. A especificação do transmissor segue abaixo:

Modelo TT301 do fabricante Smar®, invólucro de alumínio, *range* suportado para termopar tipo K de -200 a +1350°C, *span* mínimo de 60°C, precisão digital de $\pm 0,6^\circ\text{C}$, sinal de saída 4 a 20 mA com sinal Hart® sobreposto, alimentação 12 a 45V, PID incorporado, temperatura de operação de -40 a +75°C.

O TT301 é projetado especialmente para medir temperatura usando termopares ou termorresistências (RTDs). Ele possui tabelas-padrões de calibração em sua memória para uma série de termopares (como o tipo B, E, J, K) e RTDs (PT50, PT100, PT500). Basta selecionar o tipo de sensor que está sendo utilizado. Além desses dispositivos, é possível também ligar outros ao TT301. Para tanto, é necessário inserir manualmente sua tabela de calibração na memória do transmissor (SMAR, 2009).

Cabe ressaltar que a compensação de junta de referência para o uso de termopares é feita automaticamente pelo transmissor. Através de um termômetro interno que capta a temperatura ambiente, ele adiciona a tensão referente a essa temperatura à tensão proveniente do termopar que está no processo (tensões baixas, na faixa de mV), de modo a ajustar-se às curvas características.

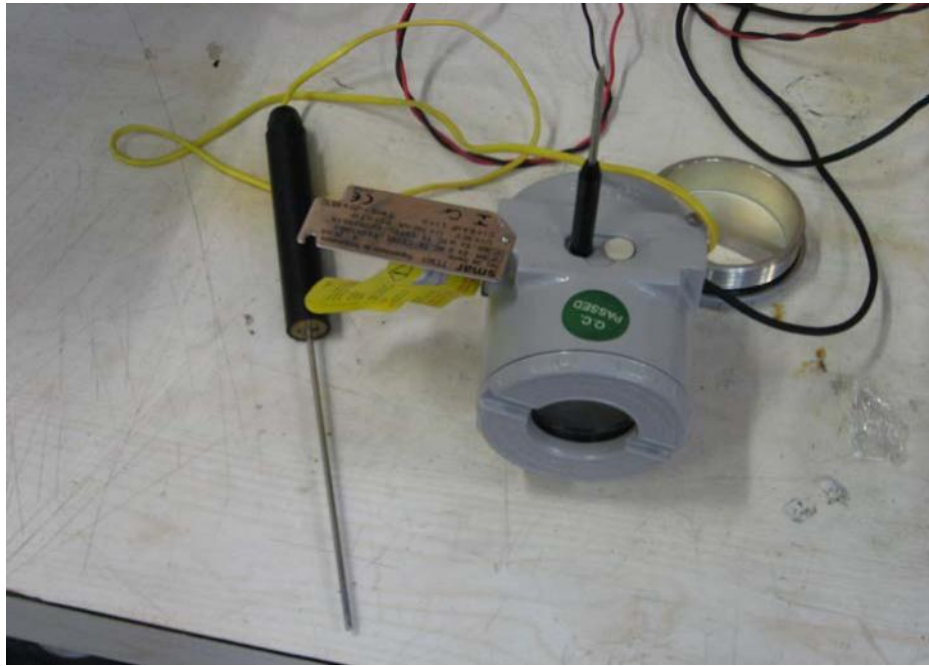


Figura 25: Termopar ligado ao transmissor de temperatura

3.1.4 Aspectos Gerais da Instrumentação

Nesta seção serão abordados atributos gerais, bem como problemas e soluções encontradas para a instrumentação das bancadas de simulação.

3.1.4.1 Bomba de líquido

A bomba usada é uma bomba centrífuga de líquido, modelo BCI-E602, fabricante Fabo®, motor WEG de indução de gaiola trifásico, potência 3.0 c.v., 3450 rpm, 220/380V, 8.39/4.86A, rendimento de 81,9 %, pressão máxima 20 m.c.a, vazão máxima de 2,5 l/s. A Figura 26 ilustra essa bomba. O corpo da bomba em aço inoxidável é um aspecto importante, pois o fluido não será contaminado com ferrugem. A vazão fornecida, após a perda de carga pelo circuito, curvas, válvulas, é de 1,5 l/s.

O selo mecânico da bomba suportou pressões de até oito (8) bar. Este tipo de motor apresentou bom controle pelo inversor de frequência em altas vazões, não sendo, porém, recomendado para baixas vazões, devido a oscilações na vazão.



Figura 26: Bomba de líquido

3.1.4.3 Compressor de Ar

A função do compressor de ar no circuito de circulação de fluidos é basicamente propelir ar para misturá-lo ao líquido, de modo a formar uma mistura bifásica, água+ar. Ele foi utilizado na bancada de estudo do golfadas.

São as seguintes as especificações do compressor: Modelo NBPI-10, fabricante PEG®, vazão de 10 pés³/min, capacidade de 100 litros, compressão de 120 lbs/pol², potência motor 2HP, rotação 1700 rpm, pressão máxima de 120 lbs. A Figura 27 mostra esse equipamento.

O motor original foi trocado por um trifásico com menor rotação, pois 1700 rpm sobreaquecia demasiadamente o cabeçote do pistão, vindo a danificá-lo. Com a troca por um motor trifásico, foi possível controlá-lo via inversor de frequência.

Para auxiliar a capacidade de reserva, o sistema é composto por um vaso de pressão com capacidade para 500 litros de ar a 8 bar com um regulador de pressão de um quarto de polegada.

Geralmente por questões de custo, nas aplicações industriais as válvulas e reguladores possuem sempre bitolas inferiores às da tubulação.

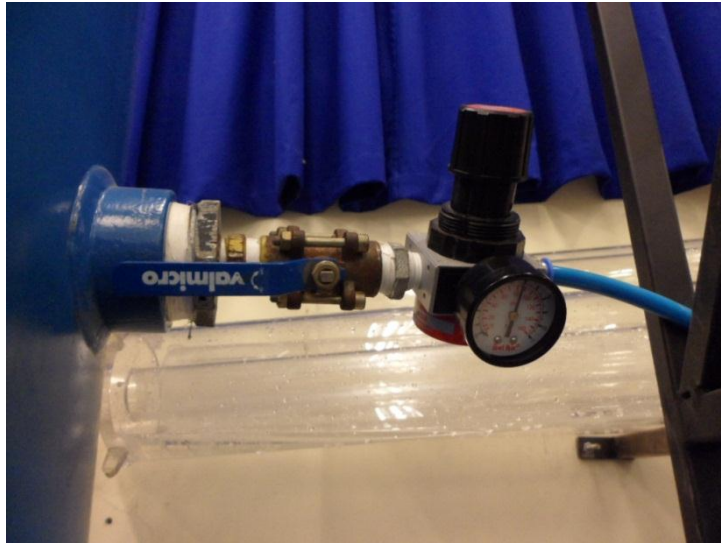


Figura 27: Válvula reguladora de pressão de saída de ar

Um problema com a válvula reguladora é que, para vazões mais altas, ela não mantém a pressão regulada, que vai caindo com a subida da vazão. Para resolver este problema e também o da umidade do ar, é usado um vaso de pressão de 100 litros, servindo para separar a água do ar e estabilizar a pressão e vazão fornecida ao circuito de gás. Este vaso de pressão é mostrado na Figura 28.



Figura 28: Compressor de ar

3.1.4.4 Sistema Elétrico de Acionamento

Para o acionamento elétrico do inversor de frequência, foi utilizado um disjuntor trifásico de 20 A. Para o acionamento do compressor de ar foi montada uma caixa com duas botoeiras e uma contatora, sendo que uma botoeira liga o compressor e a outra o desliga, como mostrado na Figura 29.

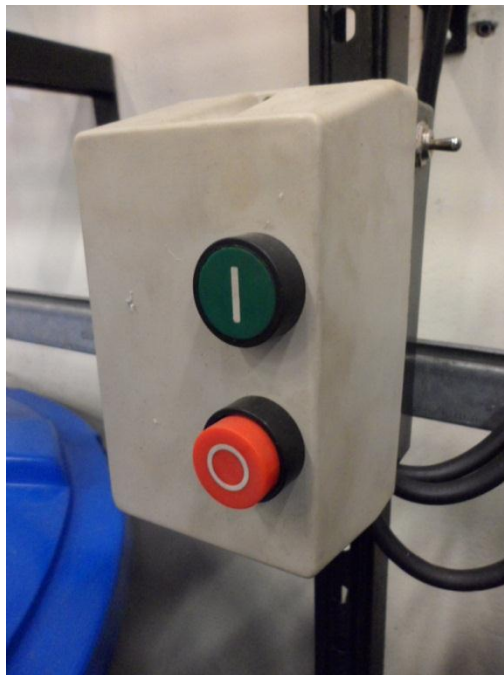


Figura 29: Painel de controle do compressor com botoeiras

3.1.4.5 Confeção da válvula elétrica

Para a confecção da válvula de controle de gás, foi adquirida uma válvula comercial tipo agulha com conexão de um quarto de polegada. Foi também adquirido um motor de corrente contínua de até 12 V com caixa de redução embutida. Escolheu-se uma caixa com taxa de redução bem alta, o que significa que o eixo move-se lentamente, mas com grande torque. Esse motor é encontrado em lojas de componentes eletrônicos com custo médio de R\$50,00. Para fixar o motor à válvula, usou-se uma barra de ferro fixada com braçadeiras. Para a transmissão do torque do eixo do motor com o eixo da válvula, foi necessário usinar no torno uma peça cilíndrica em aço com um orifício transfixando-a no meio. Para fazer o encaixe no centro foi usado o sistema de abrasão elétrico, no qual uma barra de cobre com o formato do eixo do motor vai desbastando, como uma solda ao contrário, material do aço vai se soltando e levado pelo esguicho de fluido, especial para eletro abrasão, como mostrado na Figura 30.



Figura 30: Máquina de extrusão.

Na Figura 31 vemos a válvula já montada e instalada na bancada. Neste caso foi usado engate rápido com rosca de um quarto de polegada e engate para mangueira de 12 mm.

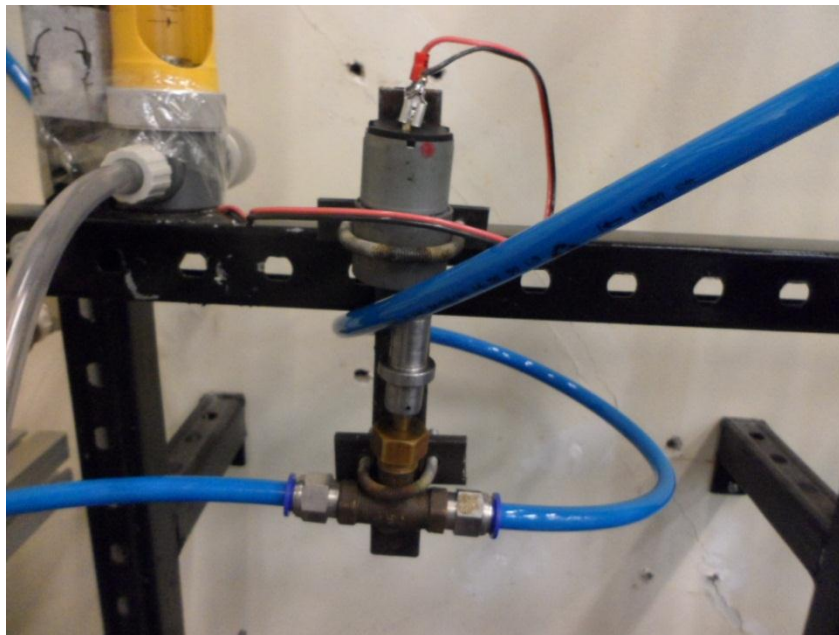


Figura 31: Válvula de controle de gás

3.1.4.6 Tomadas de Pressão

As tomadas de pressão foram feitas usando um colar comercial da marca Tigre, de fácil aquisição no mercado, em casas de hidráulica e materiais de construção. Foi usado com medidas do colar de 32 mm e tomada de três quartos de polegada com redução para um quarto de polegada com engate rápido para mangueira de 8 mm, que vai ser ligada no transdutor de pressão. É feito um furo com broca de 2 mm no tubo, na área de interesse e acoplado o colar com *o-ring*, que suporta pressões de 9 bar sem vaziar, como mostrado na Figura 32.

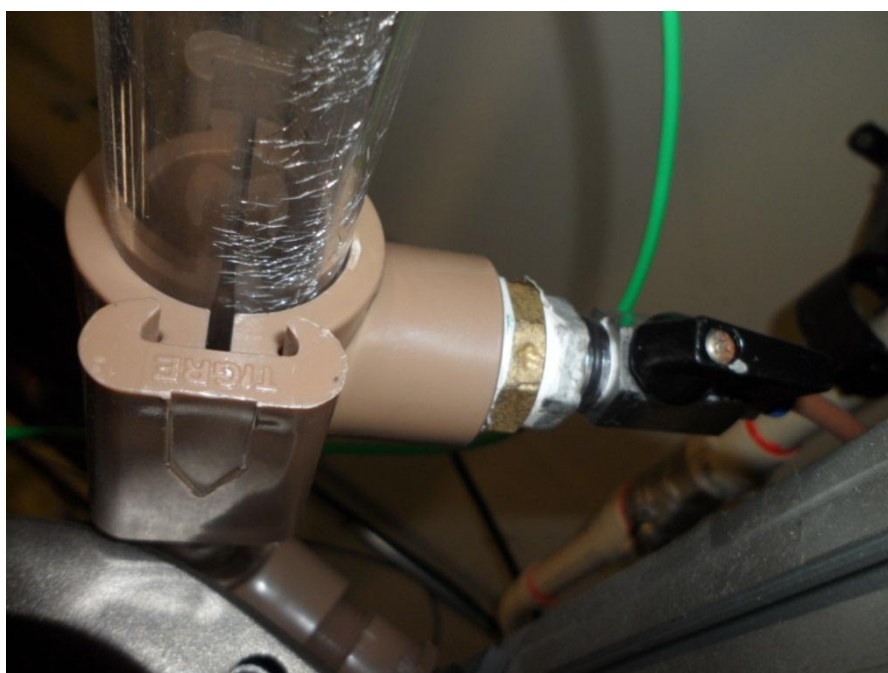


Figura 32: Tomada de pressão comercial e já incorporada à bancada

3.1.4.7 Confeção do circuito de potencia

Para mover o motor da válvula, foi montado um circuito eletrônico de potência. Este circuito é capaz de mover o motor nos dois sentidos, abrindo e fechando a válvula. Foi usada uma ponte H, que permite que o circuito não entre em curto quando as duas entradas forem nível alto. Foram usados transistores TIP122 porque o sinal digital que sai da placa de aquisição é de baixíssima corrente, e para reforçar o sinal foi usado um integrado TTL 7404 (portas inversoras). O circuito foi alimentado com uma fonte de 5 V. O circuito consome 3 V, sobrando 2 V para movimentar o motor. O motor é para 12 V, mas com 2 V o giro é suficiente para controlar a válvula. O circuito alimentado com 5V 200 mA nominal é visto na Figura 33.

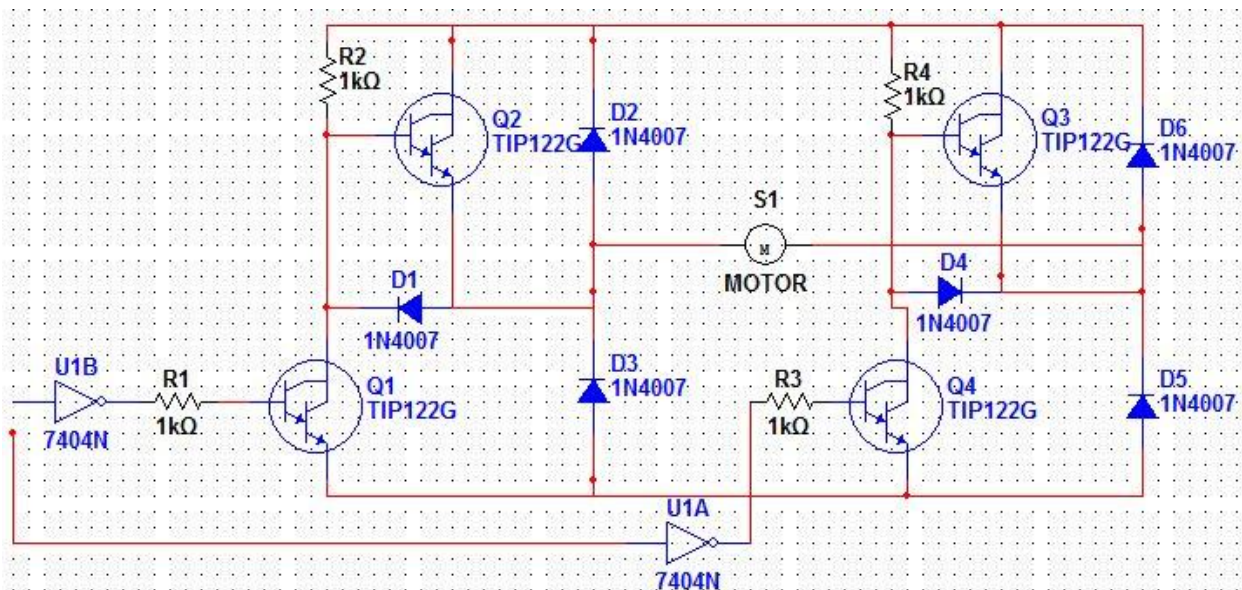


Figura 33: Circuito eletrônico de potência ponte H

O circuito de potência foi montado em uma placa universal de fenolite, e acondicionado numa caixa plástica, como mostrada na Figura 34. Foi implantada uma chave de liga e desliga o circuito com uma luz piloto e também uma chave de seleção de controle, via computador ou controle da válvula via dois botões, um para abrir e outro para fechar a válvula.



Figura 34: Protótipo do painel de controle da válvula.

3.1.4.8 Circuito eletrônico para controle do inversor de frequência

O inversor de frequência pode ser operado por botões no próprio corpo do inversor ou remotamente através de uma tensão de 0 a 10 V no conector número 6 do inversor deste modelo. Até então estava sendo usado um potenciômetro de 5 k Ω como divisor de tensão, sendo que este fornecia através do giro do botão do potenciômetro uma tensão de 0 a 10 V ao conector 6 do inversor. A fonte dessa tensão vem do conector 7, que é de 10 V.

Para automatizar esse processo existem varias opções, como um conversor de *Fieldbus* para corrente de 4 a 20 mA ou um inversor que já tenha esta tecnologia incorporada internamente.

Configurações mais econômicas para uso em laboratórios podem ser obtidas usando-se a porta paralela ou a porta serial do computador. Como já havia uma placa de aquisição que estava sendo usada para fornecer sinal digital para o controle da válvula de gás, optou-se por esse equipamento.

Essa placa consegue fornecer tensão analógica de 0 a 5 V, sendo que o necessário seria de até 10 V. Foi montado um circuito com um amplificador operacional muito comum no mercado, o 741, foi usado a configuração de sem inversão do sinal e calculado os resistores para ganho 2. O circuito, mostrado na Figura 35, necessita de alimentação +15 V e -15 V nos pinos 7 e 4 respectivamente. Foram usados dois resistores de 1 k Ω , seguindo o cálculo do ganho = $1 + R2/R1$.

Com este circuito conseguiu-se chegar aos 10 V, pois ele duplica o valor da tensão de saída da placa de aquisição.

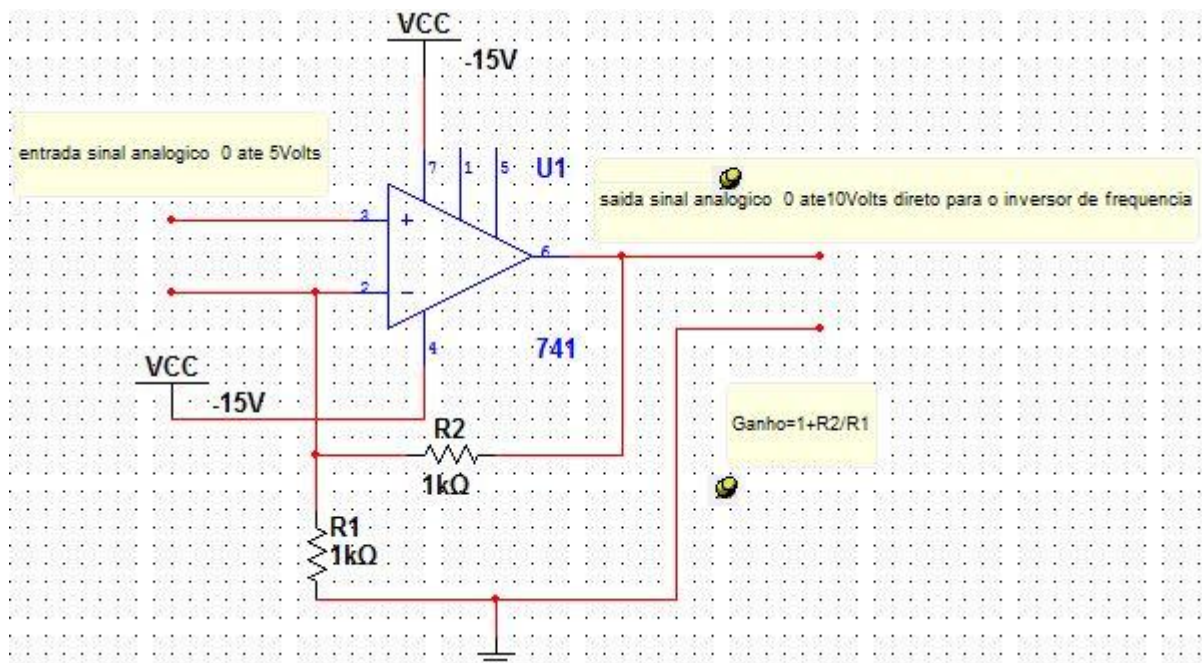


Figura 35: Circuito eletrônico com amplificador operacional

Na Figura 36 vemos o conjunto fonte e circuito interligado com a placa de aquisição.



Figura 36: Conjunto fonte e eletrônica

3.2 CALIBRAÇÃO

A calibração é um importante passo para o uso de sensores e atuadores nos ambientes fabris. Por meio dela, especificam-se os valores inferiores e superiores do *range* de medição, as unidades de medida, parâmetros como o *span* e o zero, o tipo de sensor utilizado, *set point*, informações mostradas no *display*, entre outros. Este tópico trará de forma simplificada os procedimentos utilizados para a calibração dos dispositivos usados no presente projeto. Neste trabalho vai ser somente verificado se o sensor está calibrado ou não.

3.2.1 Calibração de Vazão

Os sensores de vazão utilizados são os da Micromotion serie F da Rosemount® (Fieldbus®) e o sensor de vazão de gás por placa de orifício. Por serem de tecnologias distintas, a calibração difere um pouco de um para o outro, principalmente no que tange ao modo de inserção dos parâmetros relevantes. Enquanto na tecnologia Analógica/Hart® lança-se mão do ajuste manual (por meio da chave magnética nos furos S e Z) ou por meio do configurador, na Fieldbus® em geral calibra-se com o auxílio do programa configurador do mesmo fabricante da placa de aquisição e do programa LabView, que identifica os parâmetros e permite sua alteração.

A verificação da calibração do sensor de vazão Coriolis Micromotion foi feito da seguinte forma:

1 – Elabora-se um programa em LabView que adquira e salve as seguintes variáveis de processo: temperatura, densidade, vazão mássica e vazão volumétrica.

2 – Após o medidor de vazão, no próprio circuito, faz-se um desvio do escoamento para o reservatório de água com tubulação.

3 – A verificação da medida das vazões foi feita utilizando-se um cronômetro, uma balança de precisão, um recipiente de um litro calibrado com escala e três recipientes com três volumes predeterminados.

4 – É colocada uma vazão baixa, aguarda-se estabilizar e começa-se a salvar os dados no LabView, e vai-se completando o recipiente de volume menor com água e cronometrando. Tendo o tempo e o volume conhecido obtém-se a vazão volumétrica, verifica-se a massa na balança e em seguida compara-se com a média dos dados adquiridos pelo LabView. Esse procedimento é feito várias vezes para verificar a receptividade dos dados e feito com o balde de volume médio e grande também para a verificação da calibração de todo o range do medidor.

5 – A verificação da densidade é feita colocando o líquido de teste na garrafa de um litro calibrado e verificando-se a massa na balança calibrada. É importante não se esquecer de tarar a garrafa previamente.

A Figura 37 ilustra o procedimento da verificação de calibração da vazão do líquido.



Figura 37: Verificação da calibração de vazão

Para a calibração especificamente do sensor tipo placa de orifício serão necessários três rotômetros: um de baixa, um de média e um de alta vazão. Um medidor de pressão diferencial na placa de orifício e um medidor absoluto na jusante da placa de orifício.

Passos que foram dados para encontrar a equação da vazão da placa de orifício, sem compensação da densidade.

- 1- Instalou-se a placa de orifício de 1 mm de diâmetro na linha e após a válvula reguladora de vazão instalou-se o rotômetro de média vazão como na Figura 38. Regulou-se a pressão de saída do reservatório para 2 bar.
- 2- Desenvolveu-se um programa em LabView em que se entra com a escala marcada pelo rotômetro e salvam-se os dados do medidor de pressão diferencial e do de pressão relativa em um arquivo. Como não está disponível um medidor de pressão absoluto foi usado um de pressão relativa e, com um medidor de pressão atmosférica portátil, somou-se a esse valor o da pressão relativa.
- 3- Foram adquiridos valores de pressão diferencial entre 0 e 100 na escala do rotômetro, de 10 em 10 marcações, totalizando 10 vazões com seus correspondentes em pressão diferencial. Deve-se frisar que o rotômetro deve estar aberto para a atmosfera, pois seu certificado de calibração foi feito para pressão atmosférica.
- 4- A equação da vazão é dada pelo produto de uma constante da placa de orifício pela raiz quadrada da pressão diferencial. Como a vazão e a pressão diferencial são conhecidas, encontra-se a constante como mostrado na Figura 38.

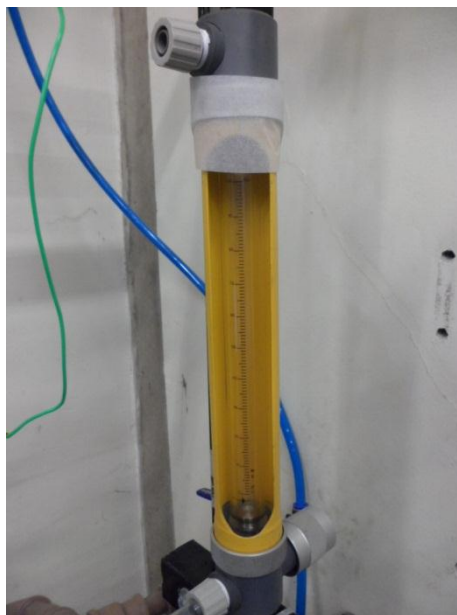


Figura 38: Calibração do sensor de pressão

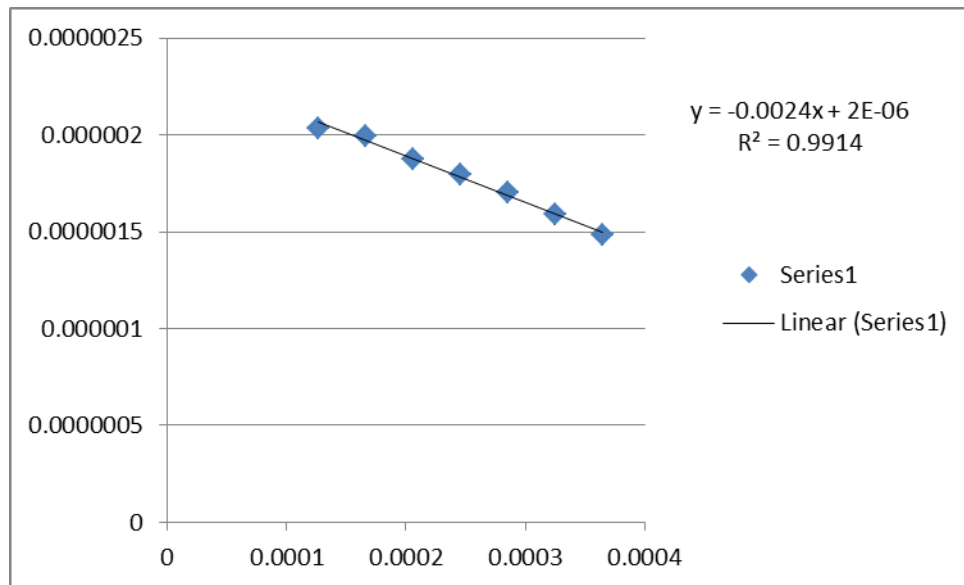


Figura 39: Reta da equação de calibração do sensor de pressão

No gráfico da Figura 39 temos a linha que deveria ser uma constante da placa de orifício. O eixo “y” contém a raiz quadrada da pressão diferencial e o eixo “x” a vazão de ar em m³/s. Notamos que com o aumento da vazão a “constante” caiu.

Isso se dá porque não foi feita a compensação da densidade; a válvula de pressão foi regulada a 2 bar, mas com o aumento da vazão a válvula não consegue manter os 2 bar de pressão. Assim, a pressão na entrada da placa de orifício cai e a densidade do ar, conseqüentemente, diminui.

A solução então é fazer a compensação da densidade instalando um sensor de pressão absoluta na entrada da placa de orifício. A compensação da densidade do ar não vai ser explanada neste trabalho.

3.2.2 Calibração de Pressão

Na bancada há medidores de pressão com valores muito altos para serem conferidos com coluna de água, o menor que é o de pressão diferencial tem fundo de escala de seis metros de coluna de água, para fazer a verificação foi usado um bomba hidrostática com capacidade para até 350 metros de coluna de água.

Foi desenvolvido um programa em LabView para salvar dados de dois medidores de pressão.

Montou-se o medidor cuja calibração se quer verificar na mesma linha com outro medidor já calibrado. Inicia-se o bombeamento de água para esses medidores, aguarda-se a estabilização ao mesmo tempo em que os dados lidos são salvos em um arquivo. Em nenhuma hipótese deve-se ultrapassar o fundo de escala marcado no corpo do transmissor para não danificar o diafragma do sensor e também não ultrapassar 10 bar, que é a pressão até a qual o

fabricante garante a operação da mangueira de pressão que está ligando os sensores. Fazem-se várias idas e voltas de pressão e depois se constrói um gráfico para verificar se os sensores estão alinhados.

Uma alternativa é o aparelho da marca FLUKE, Figura 40, para calibração de medidores de pressão. Conecta-se a entrada de pressão do transdutor na saída de pressão do aparelho FLUKE. Bombeia-se através de uma bomba manual no próprio corpo do aparelho, gerando uma pressão que é mostrada no mostrador do aparelho e compara-se com a mostrada no transdutor de pressão. Caso a pressão esteja bem fora da realidade, com o transdutor conectado no computador e com um programa chamado Configurador, do próprio fabricante do LabView, corrige-se a pressão no transdutor.

O custo destes aparelhos da FLUKE somente compensa quando se trabalha com calibração de transdutores em larga escala.



Figura 40: Calibrador de medidores de Pressão

Na Tabela 2 vemos vários modelos com seus *ranges* de calibração

Nome do modelo	Descrição
Fluke 718 1G	Calibrador de pressão -1 a 1 psi, (-68,9 mbar a 68,9 mbar, -6,89 a 6,89 kPa) Todos os modelos incluem o seguinte: <ul style="list-style-type: none"> • Estojo de protecção amarelo, com compartimento para cabos de teste • Folha de Instruções (14 idiomas) • Cabos de teste e pinça de crocodilo • Duas pilhas alcalinas de 9 V
Fluke 718 30G	Calibrador de pressão -12 psi a 30 psi (-850 mbar a 2 bar, -85 a 206,84 kPa)
Fluke 718 100G	Calibrador de pressão -12 psi a 100 psi (-850 mbar a 7 bar, -85 a 689,48 kPa)
Fluke 718 300G	Calibrador de pressão -12 psi a 300 psi (-850 mbar a 20 bar, -85 a 2068,42 kPa)

Tabela 2: Calibração do sensor de pressão

3.2.3 Calibração de Temperatura

A verificação da temperatura consiste em ligar o termopar no transmissor de temperatura e com o banho térmico, (ver Figura 41), gerar temperaturas e com o termopar imerso na bacia do banho térmico, acompanhar e comparar a temperatura mostrada no transdutor e a mostrada no banho térmico. Caso a temperatura esteja bem diferente, pode ser que o termopar não seja o corretamente configurado no transdutor. Nesse caso, deve-se atentar para os tipos de termopar ou se ele está danificado, necessitando substituição.

O banho térmico RTE111 da Neslab® foi utilizado. Esse equipamento é composto por um módulo de refrigeração, um módulo de aquecimento e outro de controle. Por meio deste último, o usuário entra com o valor de *set point* desejado, entre -25 e +125°C (acurácia garantida de $\pm 0,01\%$), e o aparelho aquece ou resfria conforme a necessidade, estabilizando-se nessa temperatura, desta forma fornecendo uma ótima referência para fins de calibração.



Figura 41: Banho térmico para calibração de temperatura

3.3 BANCADA DE ESTUDO DO ESCOAMENTO EM GOLFADAS

Para compreender a natureza do desenvolvimento das bolhas em tubulações – um fenômeno característico do escoamento multifásico – são feitas simulações em computadores. Porém, para validar tais simulações e conferir um caráter mais científico aos resultados, testes experimentais concomitantes a estas simulações são também executados.

Foi projetado pelo LACIT um circuito que, em escala bem menor, representa com fidedignidade o fenômeno a ser estudado. O esquema da planta que foi construída encontra-se abaixo, na Figura 42. Ela foi montada no Laboratório de Bancadas Experimentais do LACIT.

Também foi desenvolvido um controle PID da vazão do líquido, por meio do inversor de frequência e da placa NI USB-6008. Adicionalmente, uma câmera de alta velocidade foi instalada. Estes procedimentos são abordados nas seções seguintes.



Figura 42: Bancada experimental do LACIT.

3.4 AQUISIÇÃO E CONTROLE

A aquisição de sinais foi feita por meio de duas placas: NI USB-6008 e NI PCI- FBUS/2. Prefere-se placas USB pois os computadores não estão sendo mais fabricados com o barramento PCI

3.4.1 A placa NI USB-6009

Esta placa, mostrada na Figura 43, foi usada para enviar sinal de controle das vazões de líquido e gás. No controle da vazão de líquido foi usado uma porta digital de saída de 0 até 5 V e na saída para controlar a vazão de gás foram usadas duas portas de saída digital, a P0.0 e a P0.1.

São as seguintes as características desta placa: oito entradas analógicas *single-ended* (com negativo comum a todos os dispositivos) ou quatro diferenciais (com negativos em separado), entrada em tensão de ± 1 a ± 10 V, resolução de entrada de 12 bits, máxima taxa de amostragem 10 KS/s, duas saídas analógicas de 12 bits de 0 a 5 V, taxa de saída a 150 S/s, *bus powered* (o mesmo cabo serve para alimentar os dispositivos e transmitir os sinais) 12 I/O digitais, acurácia para *range* máximo de entrada (-10 ~ +10 V) de 138 mV, acurácia de saída analógica 7 mV, ligação ao PC via entrada USB.



Figura 43: Placa NI-USB 6008

3.4.2 Aquisição de sinais Fieldbus® pela placa NI PCI-FBUS/2

Para a aquisição dos sinais dos sensores/transmissores Fieldbus, foi usada a placa NI PCI-FBUS/2 da National Instruments, ilustrada na Figura 44. Ela tem as seguintes especificações:

Fieldbus H1 (31.25 kbit/s), duas portas, *plug and play*, compatível com Windows 2000/NT/XP/7, corrente típica de 820 mA e máxima de 1A, máximo de 16 dispositivos por porta, totalizando 32 dispositivos de alimentação de 11 a 32 V, consumo de 8 W, conexão por DB9 DSUB.

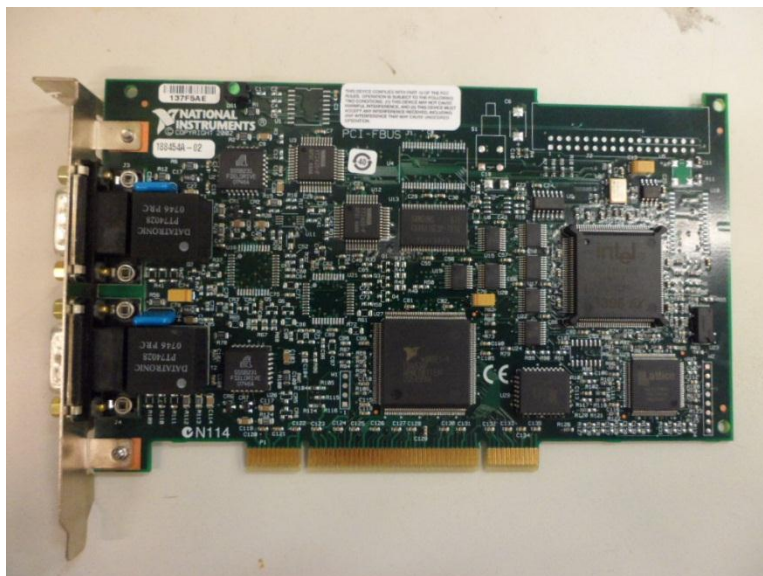


Figura 44: Placa PCI NI-FBUS/2

Os componentes da rede *Fieldbus* são mostrados na Figura 45: cabo par trançado blindado, terminadores para evitar reflexão de sinal nos cabos (reflexão também conhecida como *jitter*, que atrasa o sinal tornando a rede lenta), fonte 24 V corrente contínua e um filtro que isola o sinal digital da rede da fonte, que possui capacitores para evitar *ripple*, capacitores estes que diminuiriam a amplitude do sinal da rede.

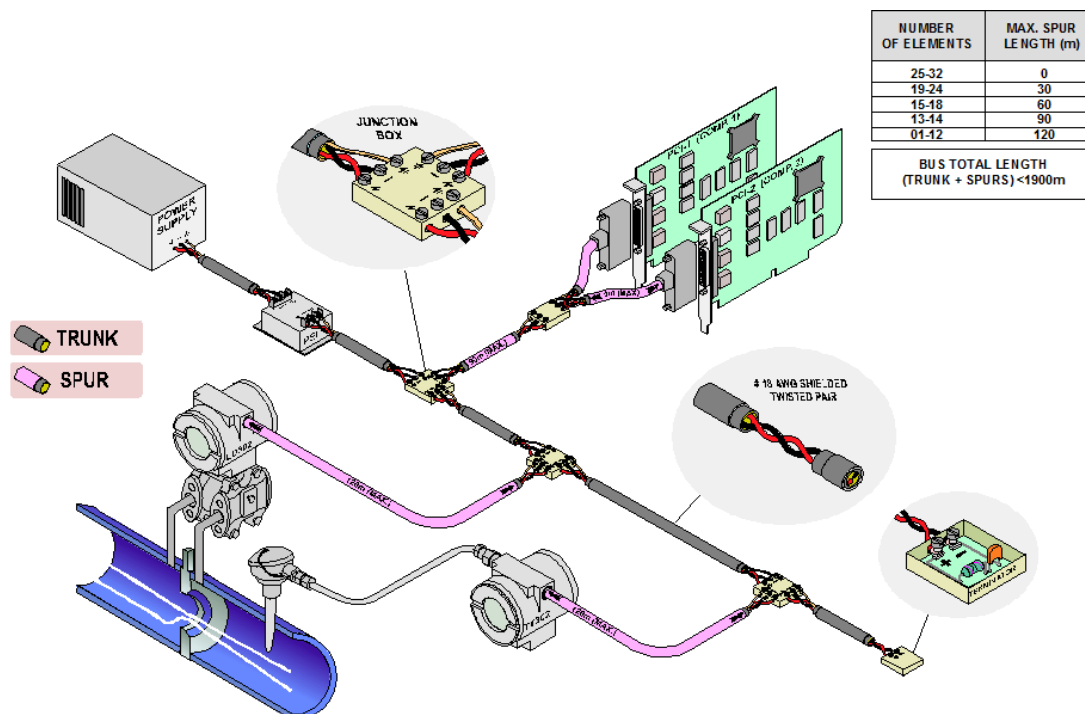


Figura 45: Esquema da ligação da rede *Fieldbus* (Fonte: SMAR)

A comunicação com a placa NI PCI-FBUS/2 é feita com conector padrão DB9, do qual apenas dois pinos são usados, o 6 e o 7, ficando os demais desconectados. Como é comum pessoas desavisadas ligarem equipamentos com comunicação RS232C nessas portas, torna-se é conveniente afixar um aviso. A confecção do cabo que liga a placa NI PCI-FBUS à rede

requer atenção quando da soldagem dos fios, para que não haja inversão: ligar o pino 6 no positivo e o 7 no negativo. A placa irá receber também os 24 V da rede. O esquema respectivo é mostrado na Figura 46.

Uma das vantagens do Fieldbus é não necessitar de tratamento do sinal de saída para obtenção das variáveis de processo. Mas uma destas variáveis, porém, é a taxa de amostras obtidas pelo LabView, de 1 por segundo, não servindo para medir transientes. No Fieldbus, pelo fato de os medidores possuírem microprocessadores internos, as variáveis são obtidas diretamente e em diversas unidades à livre escolha. Além de facilitar a descentralização do controle, essa metodologia de trabalho facilita muito o trabalho do instrumentista e do programador.

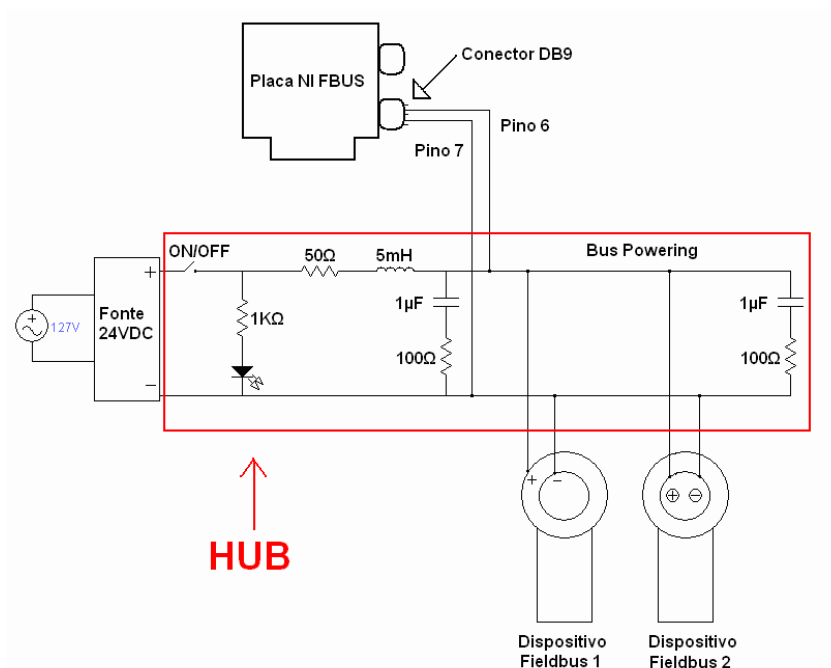


Figura 46. Esquemático da rede Fieldbus Foundation (Fonte:LACIT)

3.4.2.1 Programando no LabView

Os passos para a programação em LabView são os seguintes:

Baixar pela internet da página do fabricante quatro pacotes de programas para instalação em Microsoft Windows, que são os seguintes LabView, NIDAQMX PID e NIFBUS. Para baixar os programas é necessário fazer um cadastro na página. Os programas podem ser usados no modo de avaliação temporária caso não se possua uma licença.

Duplo clique no gerenciador de comunicação do *Fieldbus Foundation* e em seguida abrir o programa Tag Editor para criar um arquivo com endereço das variáveis de processo que serão usadas no programa. Para criar este arquivo todos os transmissores que serão usados deverão estar conectados na rede e em serviço, como mostrado na Figura 47.

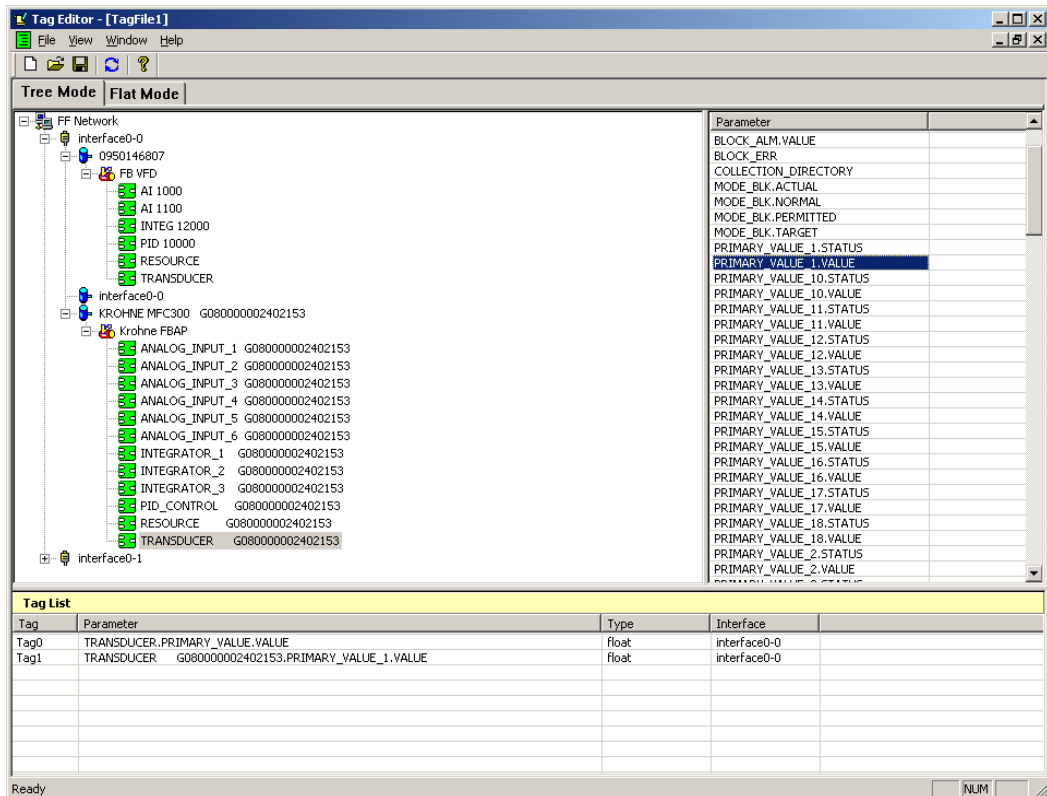


Figura 47: Tag Editor mostrando os parâmetros dos dispositivos da rede

Depois de criado o arquivo com o Tag Editor com extensão xml, deve-se salvá-lo numa pasta, lembrando que toda vez que o programa for chamado o Labview lerá este arquivo. Abra o LabView e monte um programa como mostrado na Figura 48.

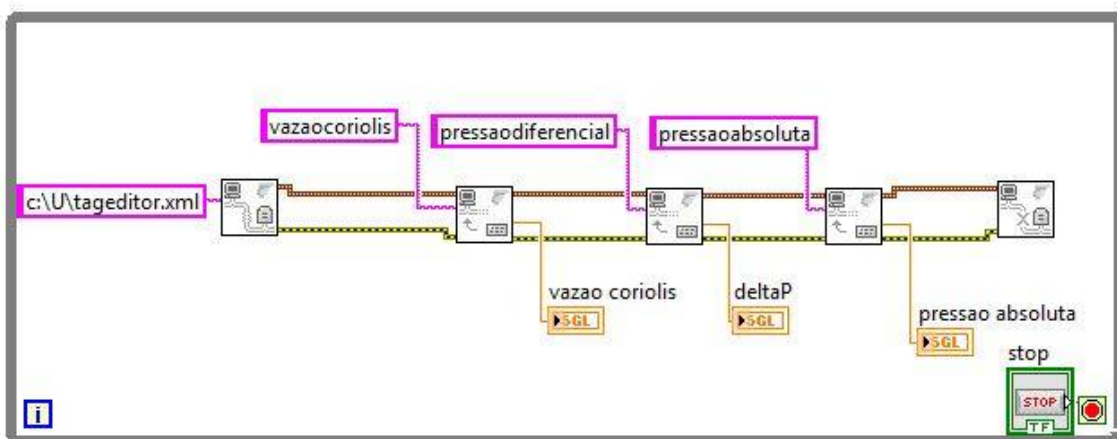


Figura 48. Diagrama de blocos no LabVIEW.

Selecionar o tipo dos blocos para flutuante. Este programa faz a leitura das variáveis de processo do medidor de vazão Coriolis do medidor de pressão diferencial e do medidor de pressão absoluta para correção da densidade.

Na Figura 49 vemos o bloco de PID para o controle da vazão de gás. O bloco é totalmente configurável, e contém janelas para entrada das constantes do proporcional, do integrativo e do derivativo. Aqui foi configurado para resposta de saída de -2 até 2. Para uma sintonia correta do controle é necessário levantar a função de transferência do processo, e inserir

os valores calculados nas janelas do bloco PID do LabView.

Na saída do controlador foi usada lógica condicional verdadeira ou falsa, e o par de sinais binários é enviado ao bloco saída digital, que é encarregado de fazer a comunicação com a placa de aquisição, transmitindo esse par de sinais binários em forma de 0 V e 5 V nos terminais da placa de aquisição e que está ligado na base do circuito eletrônico de potência ponte H.

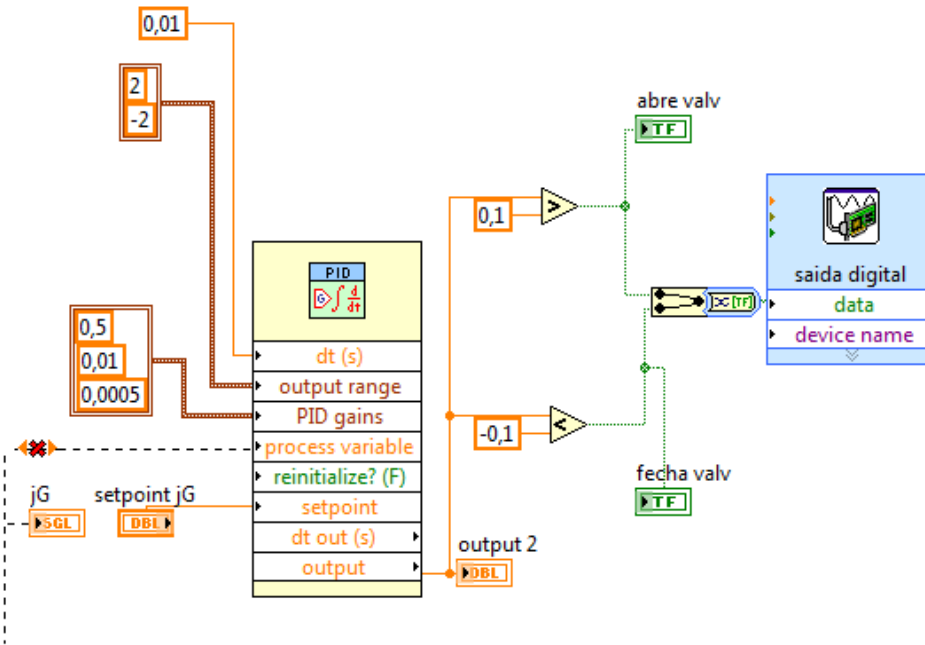


Figura 49. PID e saída digital vazão gás

Na Figura 50 está demonstrado como foi feito a programação para o controle da vazão de líquido. O valor de j_L entra no bloco PID através de uma entrada de controle onde é inserido o valor desejado de j_L . Aqui também o controle pode ser sintonizado inserindo-se os valores nas janelas de constantes. Foi estabelecida uma lógica combinatória para o controle do sinal analógico de saída do PID restringindo a saída de -100 a 100 para 0 até 5, pois a saída da placa de aquisição não suporta saídas fora destes valores. Este valor de controle então é enviado para o bloco encarregado da comunicação com a placa de aquisição, fornecendo em seus terminais de saída analógica o valor em tensão correspondente para controlar a vazão de líquido. Esta tensão segue então para o circuito com amplificador operacional com ganho 2 para seguir então para o inversor de frequência.

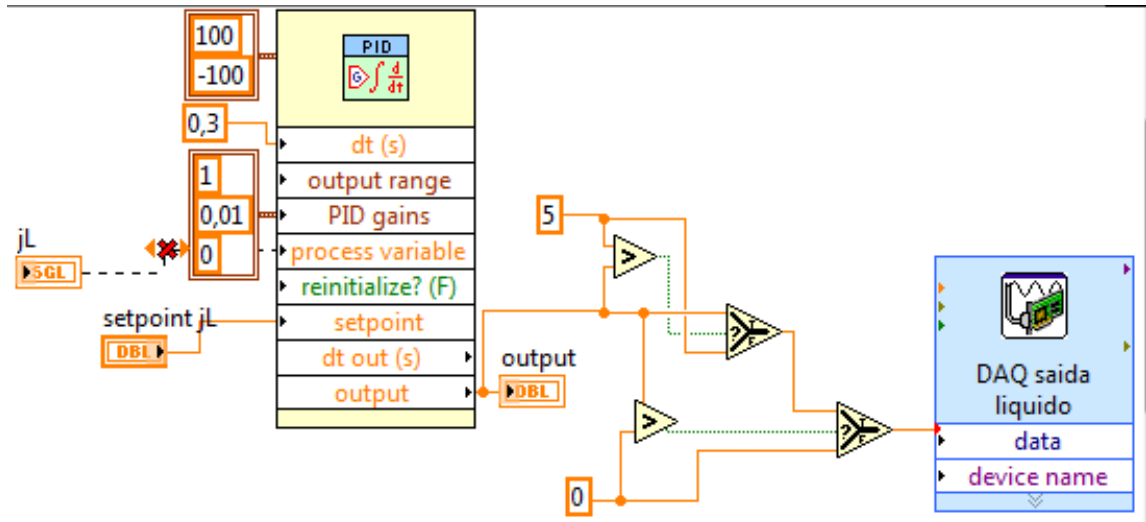


Figura50 PID e saída digital vazão líquido

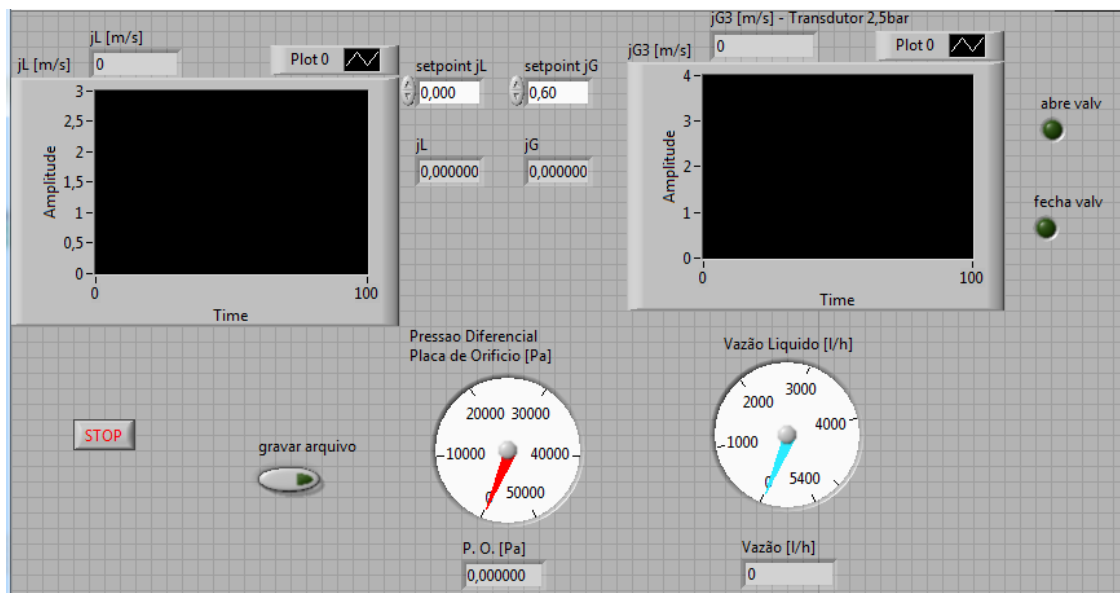


Figura 51 PID e saída digital vazão gás

Na Figura 51 é mostrada uma proposta de um supervisório bastante completo. Neste supervisório há dois gráficos para acompanhamento do j_L e j_G com o tempo, assim como uma caixa de interação para a entrada dos valores de j_L e j_G desejáveis para o processo executar de forma automática. Os alarmes estão em forma de relógios indicando o fundo de escala do medidor de vazão e do medidor de pressão diferencial para que não sature o fundo de escala dos medidores. Não foi necessário elaborar uma lógica para impedir a saturação dos medidores; anotaram-se os valores de fundo de escala e estes valores foram configurados na caixa de interação do j_L e do j_G , e caso algum usuário queira colocar um valor acima do permitido o programa restringe esta ação. Existe também o botão para gravar os dados em arquivo e luzes-piloto indicando abertura ou fechamento da válvula elétrica do gás.

4 RESULTADOS

Após tudo montado, válvulas, programas, circuitos eletrônicos, sensor de vazão tipo placa de orifício e instalado, foi feito um teste rápido, e o resultado foi o mostrado na figura 52. Neste gráfico no eixo y esta j_L e j_G e no eixo x o tempo. A serie 1 é o j_L desejado a serie 2 é o j_L obtido, a serie 3 é o j_G desejado e a serie 4 é o j_G obtido. Não foi levantado a função de transferência das vazões, a sintonia foi feita colocando-se valores aleatórios e verificando a resposta ate que estivesse aceitável.

Vários fatores interferem nessa malha fechada, a vazão de gás interfere na vazão de liquido e vice versa, além disso, o tempo que o transmissor manda o valor da variável de processo de quase uma amostra por segundo.

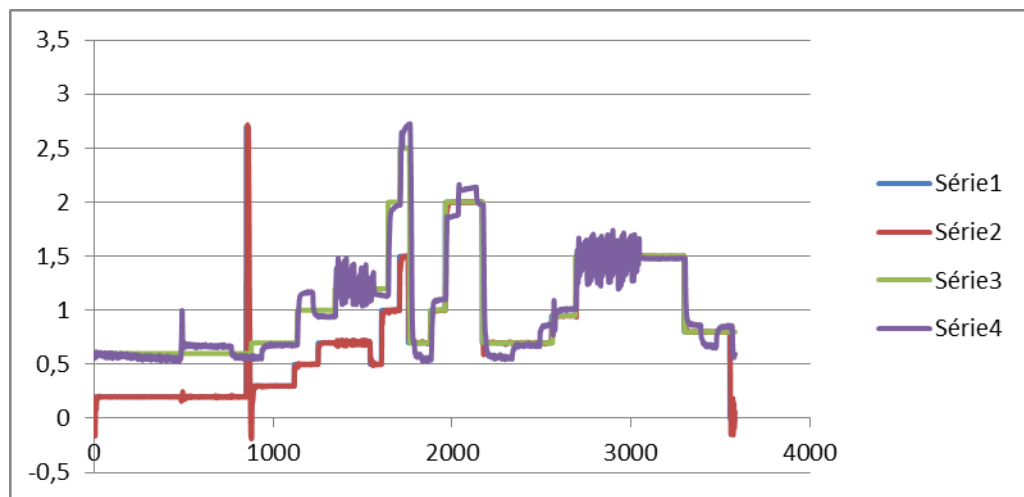


Figura 52-Gráfico das velocidades em m/s j_G de gás e liquido

Analisando o gráfico da figura 53 vemos somente a velocidade de liquido e foi constatado que pode ser ajustado qualquer valor de j_L , de 0,1 ate 2,7 que é a vazão máxima fornecida pela moto bomba contando com a perca de carga das tubulações. Valore inferiores a 0,1 devido a característica da bomba centrifuga, não é possível estabilizar.

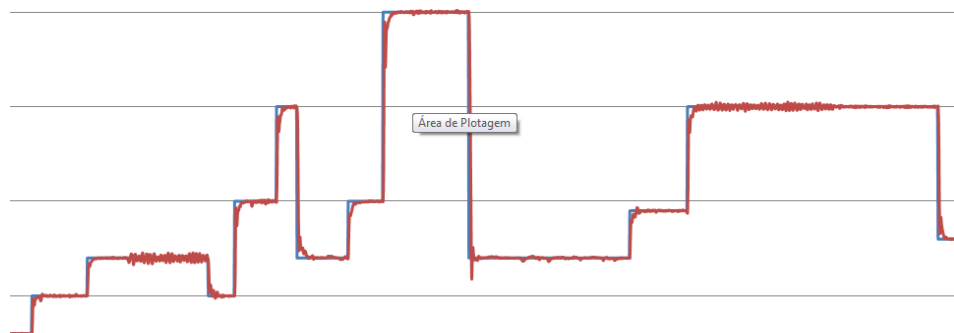


Figura 53- Gráfico da velocidade do liquido

O gráfico da Figura 55 vê-se a velocidade m/s j_G de gás, neste notamos um sistema oscilatório e com grandes extrapolação do valor desejado, demonstrando que este PID não esta corretamente sintonizado. O sistema pode ser facilmente corrigindo, inserindo os valores calculados após uma função degrau. nas janelas do bloco de PID do LabView , até que o gráfico

fique igual ao da Figura 53, com respostas rápidas, sem sobre sinal e sem oscilação. Lembrando que pode ser usado um bloco de *auto-tuning* do Labview.

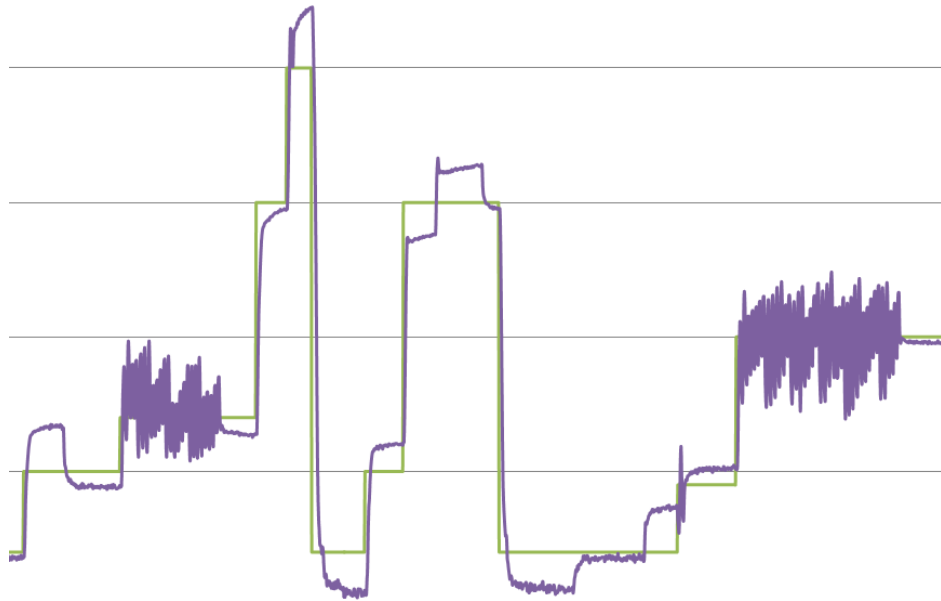


Figura 54- Gráfico da velocidade j_G de gás

5 CONCLUSÃO

Ao final deste projeto, pode-se concluir que as etapas de construção e instrumentação da planta foram desenvolvidas conforme planejado. Na parte de instrumentação: os circuitos elétricos para controle da planta, a alocação dos sensores, bem como a calibração e ajuste destes foram realizadas.

Quanto ao desenvolvimento do programa LabView, o mesmo está funcionando de acordo com o que foi previsto no início do trabalho, e através da descrição detalhada do desenvolvimento do programa assim como a aquisição de dados e o tratamento desses, que consta na seção 3.4, esse relatório poderá ser usado como material de apoio para os alunos que desejarem desenvolver trabalhos aperfeiçoando as bancadas existentes.

Esse aperfeiçoamento pode ser feito nos seguintes aspectos: diversas plantas podem ser geradas a partir de uma base, modificando apenas alguns equipamentos, ou também mantendo os mesmos instrumentos, mas trabalhando com formas mais avançadas de programação ou da tecnologia *Fieldbus Foundation*, como, por exemplo, utilizando a chamada Rede HSE, que é uma rede Fieldbus de alta velocidade. Esta é inclusive uma sugestão para projetos futuros.

As bancadas instrumentadas estão funcionando de acordo com os objetivos iniciais deste trabalho, estando em uso pelos acadêmicos que realizam suas pesquisas, trabalhos de conclusão de curso, mestrado, e outros projetos. Houve alguns problemas técnicos, principalmente no que se refere à calibração dos equipamentos, pois em alguns casos as informações não constavam dos manuais e *datasheets*, e foi necessário recorrer ao suporte técnico do fabricante. Quando este não dava retorno ou não era satisfatório, pesquisa e diversas tentativas de tentativa e erro foram executadas. Estas foram as formas encontradas para dar continuidade ao projeto.

Além disso, houve um substancial incremento no nível de conhecimento sobre aspectos fundamentais da mecânica dos fluidos, assim como programação para aquisição de dados, tipos de sensores analógicos e Fieldbus e modos de operacionalização, placas de aquisição, calibração, e principalmente na programação em LabView e o uso da tecnologia *Fieldbus Foundation*. O custo para de uma bancada confiável de escoamento bifásico é muito alta, medidores Coriolis de baixa vazão estão na ordem de R\$17.000,00 e de alta vazão custa R\$24.000,00, transdutores de pressão custam em media R\$2.000,00, moto bomba R\$1.600,00 e inversor de frequência R\$1.700,00, placas de aquisição R\$9.000,00, e demais , compressor, vaso de pressão, tubulações de acrílico, computador, suportes, ferragens, válvulas, caixa de agua, o valor pode chegar à R\$90.000,00 a bancada de escoamento bifásico de uma universidade. O petróleo como uma fonte de energia não renovável pode acabar um dia, mas o conhecimento deixado pelo estudo desta fonte ficara para sempre.

REFERÊNCIAS

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e fundamentos de medidas** – Vol. 2. 1.ed.. Brasil: LTC, 2007.

BORDIM, Professor - Universidade de Brasília – UNB. Departamento de Ciências da Computação. **Redes Industriais – Fieldbus**: Apostila. Disponível em: <http://www.cic.unb.br/~bordim/TD/Arquivos/G04_Monografia.pdf>. Acesso em: 19 de novembro de 2008.

CEFET / RIO DE JANEIRO. **Medidores de Pressão**. Disponível em: <<http://www.cefet-rj.br/>>. Acesso em: 15 de maio de 2009.

CHAM. **Solutions on CFD**. Disponível em: <<http://www.cham.co.uk/>>. Acesso em: 09 de junho de 2009.

COLÉGIO POLITEC. Professor Luís Francisco Casteletti. **Instrumentação Industrial**: Apostila. Disponível em: <<http://tutomania.com.br/livro/instrumentacao-industrial>>. Acesso em: 17 de novembro de 2008.

DOEBELIN, Ernest O. **Measurement systems: application and design**. 5th. ed. New york: McGraw-Hill 2004. 1078 p.

ELEKTORBRASIL. **Artigos Informativos: Software LabVIEW**. Disponível em: <<http://www.elektorbrasil.com.br/>>. Acesso em: 15 de junho de 2009.

FLUENT. **Solutions: What is CFD**. Disponível em: <<http://www.fluent.com/solutions/whatacf.htm>>. Acesso em: 09 de junho de 2009.

FLUKE Calibradores de pressão Disponível em <<http://www.fluke.com/Fluke/brpt/Calibracao-de-Processos/Calibradores-de-pressao/Fluke-718.htm?PID=56112>> . Acesso em 16 de Junho de 2012

FIELDBUS Tutorial – A Foundation Fieldbus Technology Overview, www.smar.com.br/fieldbus

FOLHA ONLINE. **Reservas de Petróleo no Mundo**. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u392021.shtml>>. Acesso em: 29 de maio de 2008

INCONTROL. **Medidor de Vazão Tipo Turbina**. Disponível em: <<http://www.incontrol.ind.br/>>. Acesso em: 11 de março de 2009.

JANSEN, F. E. **The Elimination of Severe Slugging** – Experiment a Modeling. Grã-Bretanha: Elsevier Science Ltda, 1996. 17 p.

KROHNE. **Manuais e datasheets**. Disponível em <http://www.krohne.com/Download.10964.0.html>. Acesso em dezembro de 2008.

LUSOROBÓTICA. **Aquisição de Dados**. Disponível em: <<http://lusorobotica.com/>>. Acesso em: 15 de junho de 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balço Energético Nacional**. Slides/ Apresentações. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432&pageId=15043>. Acesso em: 13 de maio de 2008.

MITSUBISHI AUTOMATION. **Automation Systems**. Disponível em: <<http://www.mitsubishi-automation.com/>>. Acesso em: 18 de abril de 2009.

MOHAN, Ned. UNDELAND, Tore M. ROBBINS, William P. **Power electronics – Converters, Applications and Design**. John Wiley & Sons, Canada:1989

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCI, Plínio B. de Lauro. **Engenharia de automação industrial**. 2 ed. São Paulo: LTC, 2007.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Getting Started with LabVIEW**: Apostila. Disponível em: <<http://www.ni.com>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2009.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Introduction to LabVIEW**: Apostila. Disponível em: <<http://www.ni.com>>. Acesso em: 9 de fevereiro de 2009.

NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW Fundamentals**: Apostila. Disponível em: <<http://www.ni.com>>. Acesso em: 9 de fevereiro de 2009.

NIVETEC INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE. **Medidor de Vazão Vortex**. Disponível em: <<http://www.nivetec.com.br/htm/medvazaovortex.htm>>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2009.

PENELLO, Luiz Fernando. **Filtro Ativo de Potência “Shunt”**. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE: 1992.

PROFESSOR AQUINO. **Apostilas: Instrumentação, Redes Industriais**. Disponível em: <<http://professoraquino.site.br.com/apostilas.htm>>. Acesso em: 05 de dezembro de 2008.

PUC / RIO GRANDE DO SUL. **Redes Industriais**. Disponível em: <<http://www3.pucrs.br/portal/page/portal/pucrs/Capa/>>. Acesso em: 11 de março de 2009.

RASHID, Muhammad Harunur. **Power electronics – Circuits, devices and applications**. 2.ed. Prentice Hall, New Jersey: 1993.

ROSEMOUNT. **Medidor de Vazão Tipo Vortex**. Disponível em: <http://www.emersonprocess.com/rosemount/products/flow/m8800c.html>. Acesso em novembro de 2008.

SALMERON, Robert A; **Introdução à eletricidade e ao magnetismo**, 4.ed. São Paulo. Ed. Biblioteca Nacional, 1965.

SENAI. **Apostilas: Automação Industrial**. Disponível em: <<http://www.sc.senai.br/>>. Acesso em: 12 de março de 2009.

SMAR. **Manuais e Datasheets**. Disponível em: <http://www.smar.com/brasil2/>. Acesso em dezembro de 2008.

TAITEL, Y; BARNEA, D. Two-Phase Slug Flow. *Journal of Heat Transfer*, v. 20, p. 83-132, 1990.

TSE, Francis S; MORSE, Ivan E. **Measurement and instrumentation in engineering: Principles and basic laboratory experiments**. New York: M Dekker, 1989. 757 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS. Departamento de Engenharia Química. **Instrumentação**: Apostilas. Disponível em: <http://www.enq.ufrgs.br/cursos/grad/Instrum/Apostila/CD_Mulimidia/>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2009.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Sistemas de Automação Industrial**. Disponível em: <<http://www.ufsc.br/>>. Acesso em: 8 de março de 2009.

WATANABE, Edson H. **Aplicação de Software Aberto em Redes Industriais**. 2006. 177 f. Dissertação (Pós-Graduação em Eng. Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: <http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/1884/4282/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Aplica%C3%A7%C3%A3o%20de%20Sistemas%20Abertos%20em%20Redes%20Industr%E2%80%A6.pdf>. Acesso em 25 de Junho de 2012