

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Fernanda Cristina Corrêa
Corrêa E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 31 / 07 / 2009

ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Sistema embarcado para medidas de escoamento bifásico gás-líquido

Autor: Fernanda Cristina Corrêa
Orientador: Dr. Niederauer Mastelari

92/2009

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

Sistema embarcado para medidas de escoamento bifásico gás-líquido

Autor: Fernanda Cristina Corrêa

Orientador: Dr. Niederauer Mastelari

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2009
SP – Brasil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

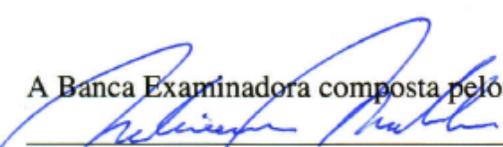
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Sistema embarcado para medidas de
escoamento bifásico gás-líquido**

Autor: Fernanda Cristina Corrêa

Orientador: Dr. Niederauer Mastelari

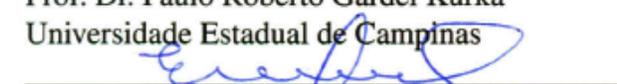
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Niederauer Mastelari, Presidente
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Campinas, 31 de julho de 2009

Dedicatória

Dedico este trabalho a meus pais, José Carlos e Dalva pelo exemplo de vida e pelos esforços para minha formação.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, à Nossa Senhora Aparecida e Santa Rita de Cássia por todas as graças e bençãos que derramaste em minha vida, assim como a conclusão deste trabalho.

Agradeço imensamente ao professor Dr. Niederauer Mastelari pela orientação, pela confiança, incentivo e amizade.

Aos professores Dr. Eugênio Spanó Rosa, Dr. Ricardo Mazza e à todos colegas do *Two Phase Flow Group* que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Ao Dr. Ricardo Menezes Salgado por te contribuído intensamente para a realização deste trabalho.

À Petrobrás, pelo suporte financeiro e o apoio necessário para execução deste projeto.

Ao meu pai José Carlos, à minha mãe Dalva, e aos meus irmãos Carlos Eduardo e Luciana agradeço pelo carinho, apoio, incentivos, fundamentais em meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu namorado Luiz Eduardo por todo seu carinho e amor, sempre me auxiliando nos momentos difíceis.

Enfim, à todos os amigos, em especial à Cibele, colegas e familiares, agradeço o apoio e incentivo.

*"Observei o conjunto da criação de Deus e percebi que
o homem não consegue entender toda a obra que se faz debaixo do sol.
Por mais que se afadigue em pesquisar, não chega a compreendê-la,
e mesmo que o sábio diga que a conhece, nem por isso é capaz de entendê-la".
Eclesiastes 8:17*

Resumo

CORRÊA, Fernanda Cristina *Sistema embarcado para medidas de escoamento bifásico gás-líquido*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 107 p. Dissertação (Mestrado).

Escoamentos bifásicos gás-líquido são comumente encontrados na natureza e em diferentes atividades industriais. Neste tipo de escoamento, as fases presentes podem escoar dispostas em diferentes configurações espaciais no interior do duto, denominadas de regimes ou padrões de escoamento, cuja determinação é crítica para o projeto de sistemas de escoamento bifásico. No presente trabalho, a indicação dos padrões de escoamento é realizada a partir da medida de fração de gás utilizando um instrumento microcontrolado composto por um transdutor e um condicionador de sinais. Um sistema de reconhecimento de padrões é composto por diferentes módulos, que consistem em: adquirir o sinal; extrair informações relevantes do sinal; e por fim a classificação propriamente dita. Para a extração das informações relevantes do sinal, aplicou-se funções estatísticas de média e desvio padrão por ser interessante sob o ponto de vista computacional. Na etapa classificatória, a utilização de um conjunto de regras através de técnicas de Sistemas Especialistas é utilizado pelo desempenho deste tipo de classificação e também pouca necessidade computacional. Desta forma, com a junção das funções estatísticas de média e desvio padrão e um conjunto de regras com Sistemas Especialistas, é desenvolvido neste trabalho um sistema de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido embarcado em um instrumento de medição de fração de gás microcontrolado.

Palavras-chave:

Escoamento bifásico e gas - Escoamento.

Abstract

CORRÊA, Fernanda Cristina *System board to measures of gas-liquid two-phase flow*. Campinas: Faculty of Mechanical Engineering, State University of Campinas, 2009. 107 p. Dissertation (Master's Degree).

Two-phase flow gas-liquid are commonly found in nature and in various industrial activities. In this type of flow, the phases present can escape arranged in different spatial configurations in the duct, called regimes or flow patterns, the determination is critical for the design of two-phase flow systems. In this study, an indication of the flow pattern is achieved from the measurement of gas fraction microcontrolled using an instrument composed of a transducer and signal conditioner. A system of pattern recognition consists of different modules, which consist of: acquiring the signal, extracting relevant information from the signal, and finally the classification itself. Statistical functions of mean and standard deviation are applied to extract the relevant information from the signal, for computational purposes. In the classification stage, a set of rules using techniques of expert systems is used by the performance of this type of classification and also little need computing. Thus, with the addition of the statistical functions of mean and standard deviation and a set of rules with expert systems is developed in this work a system of pattern recognition of two-phase flow gas-liquid loaded into an microcontrolled instrument for measuring gas fraction.

keywords:

Two-phase flow e flow of gas.

Índice

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Algoritmos	xiv
Nomenclatura	xv
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	8
1.2 Organização do Trabalho	8
2 Revisão da Literatura	10
2.1 Reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido	10
2.1.1 Processo de Aquisição do Sinal	10
2.1.2 Tratamento de Sinal	13
2.1.3 Metodologia de Identificação	15
2.2 Sistemas de reconhecimento de padrões embarcados	17
3 Reconhecimento de Padrões	20
3.1 Reconhecimento de Padrões	20
3.2 Técnicas de Reconhecimento de Padrões	21
3.2.1 Reconhecimento de Padrões Sintático	21
3.2.2 Reconhecimento de Padrões Numérico	22
3.3 Estrutura de um Sistema de Reconhecimento de Padrões	23
3.3.1 Sistemas Especialistas	24

4	Arquitetura do Sistema de Medida de Escoamento Bifásico e Levantamento dos Sinais da Base de Conhecimento	33
4.1	Aparato Experimental e Levantamento dos Dados para a Formação da Base de Conhecimento do SE	33
4.2	Sistema de Medidas de Escoamento Bifásico Gás-líquido para Aplicação em Campo	40
4.2.1	Instrumento de Medição de Fração de Gás Microcontrolado	44
5	Implementação do Sistema de Reconhecimento de Padrões de Escoamento Bifásico Gás-líquido	54
5.1	O microcontrolador e o kit de desenvolvimento eZdsp	54
5.2	Extração de Características	55
5.3	Referência do sistema de medida da fração de gás	62
5.4	Sistema de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido embarcado	65
6	Resultados	70
7	Conclusão e Trabalhos Futuros	74
	Referências Bibliográficas	76
A	Programação	85
A.1	Programação no microcontrolador	85

Lista de Figuras

1.1	Padrões e sub-padrões para o escoamento vertical ascendente.	2
1.2	Subpadrões de escoamento vertical gás-líquido.	4
1.3	Padrões de escoamento horizontal gás-líquido.	5
3.1	Diagrama em blocos de um sistema de reconhecimento de padrões	23
3.2	Elementos de um Sistema Especialista	28
3.3	Fases do desenvolvimento de um sistema especialista.	31
4.1	Representação esquemática do circuito de testes com inclinação variável entre 0 grau (vertical) e 95 graus.	34
4.2	Seqüência de fotos exibindo a inclinação variável da linha bifásica	36
4.3	Identificação das válvulas de fechamento rápido, sensores de impedância e caixa de co- nexão na vizinhança da estação de medida 2 posicionada a 260D a jusante do misturador	37
4.4	Dois primeiros segundos de sinais adquiridos com uma freqüência de 1KHz: (a) tu- bulação cheia de líquido (b) bolhas (c) intermitente (d) anular (e) tubulação cheia de gás.	41
4.5	Interface do sistema supervisorio na plataforma LabView	42
4.6	Circuito integrado para a comunicação serial	42
4.7	Modelo de comunicação Modbus mestre-escravo	43
4.8	Frame utilizado na comunicação Modbus	43
4.9	Representação do Sensor de Impedância	45
4.10	Ponte auto-balanceada	48
4.11	Método da conversão corrente-tensão	48
4.12	Modelo equivalente elétrico do sensor de impedâncias	49
4.13	Princípio básico do instrumento de medida	50

4.14	Diagrama esquemático do medidor de impedâncias	51
4.15	Diagrama em blocos evidenciando o funcionamento do AD9833 e seu registrador de controle	52
4.16	CI REF3020 para obter a tensão de referência, que é obtida no pino 2 V_{out}	53
5.1	Arquitetura do microcontrolador TMS320F2808.	56
5.2	Características do Microcontrolador TMS320F2808.	57
5.3	Interface Gráfica do Code Composer Studio.	58
5.4	Diagrama de Blocos do Kit de Desenvolvimento eZdsp.	58
5.5	Análise do espectro de frequências para cada padrão do escoamento bifásico gás-líquido: (a) bolhas (b) intermitente (c) anular	59
5.6	Comportamento dos padrões de escoamento de acordo com a respectiva moda	62
5.7	Separação linear dos padrões de escoamento usando média aritmética simples e desvio padrão	63
5.8	Separação dos padrões de escoamento através de vetores de média e desvio padrão.	63
5.9	Circuito rebaixador do sinal do instrumento de medição de fração de vazios para alimentação do microcontrolador	66
5.10	Algoritmo de classificação de padrões de escoamento	67
6.1	Mapa de Fluxo com ponto experimentais destacados	71

Lista de Tabelas

4.1	Aquisições no Escoamento Vertical	39
6.1	Testes off-line realizados para verificação da eficiência do sistema de reconhecimento .	72

Lista de Algoritmos

5.1	Subalgoritmo para determinação do subpadrão	69
-----	---	----

Nomenclatura

Letras Latinas

B	Susceptância	[S]
C	Capacitância devido ao fluido	[F]
C_d	Capacitância devido à constante dielétrica do fluido	[F]
C_p	Capacitância de polarização	[F]
C_s	Capacitância parasita	[F]
f	Frequência de excitação	[Hz]
G	Condutividade	[S/m]
I	Corrente elétrica	[A]
J_G	velocidade superficial do gás	[m/s]
J_L	velocidade superficial do líquido	[m/s]
R	Resistência elétrica do fluido	[Ω]
R_c	Resistor de carga	[Ω]
V_e	Tensão de excitação senoidal	[V]
V_m	Tensão elétrica referente à informação do escoamento bifásico	[V]
V_{out}	Tensão de saída	[V]
Y	Admitância	[S]
Z	Impedância elétrica da mistura gás-líquido	[Ω]
Z_{in}	Impedância de entrada	[Ω]

Subscritos

d	referente à constante dielétrica do fluido
G	referente a fase gasosa
L	referente a fase líquida

p referente à polarização

Siglas

ADC	Conversor Analógico Digital (do inglês Analogic Digital Converter)
CRC	Código de Correção de Erros (do inglês Cyclic Redundance Check)
DSP	Processador Digital de Sinais (do inglês Digital Signal Processor)
FFT	Transformada Rápida de Fourier
HF	alta frequência (do inglês high frequency)
MLP	Multilayer Perceptron
PDF	Função Densidade de Probabilidade (do inglês Probability Density Function)
PSDF	Função Densidade Espectral de Potência (do inglês Power Spectral Density Function)
RBF	Radial Based Function
RNA	Redes Neurais Artificiais
RP	Reconhecimento de Padrões
SCI	Interface Serial Assíncrona (do inglês Serial Communication Interface)
SE	Sistema Especialista

Capítulo 1

Introdução

O termo escoamento multifásico é utilizado para referir a qualquer fluxo que apresenta mais de uma fase ou componente escoando simultaneamente. Denomina-se escoamento bifásico um fluxo com apenas duas fases distintas, tanto homogêneas como heterogêneas. Este trabalho trata somente de escoamentos bifásico gás-líquido, cujo estudo está sendo realizado visando aplicações na indústria petrolífera.

O escoamento bifásico gás-líquido está presente na natureza e em diferentes atividades industriais, entre elas na indústria química, de petróleo e de geração de energia elétrica. Na indústria de geração termoelétrica e nuclear, pode ocorrer nos circuitos percorridos pelo fluido de trabalho, entre a geração de calor e a expansão nas turbinas, e, também, nas linhas de retorno. Na indústria química, o escoamento bifásico ocorre em reatores, colunas de destinação e absorção, atomizadores, caldeiras, trocador de calor, reatores e linhas de processo. Na indústria de petróleo, o escoamento bifásico está presente em todo o percurso dos fluidos produzidos, desde a rocha-reservatório às unidades de separação, passando pela coluna de produção, linha de surgência e riser, além das unidades industriais de refino.

Escoamentos bifásicos em tubulações podem assumir diferentes configurações geométricas que foram divididas em alguns padrões básicos de acordo com o arranjo de cada fase (Wallis, 1969). Ao longo do percurso, as configurações do escoamento podem ser alteradas, passando de um padrão para outro, ou seja, poderá haver uma sucessão de padrões. O tipo de padrão em cada trecho do duto depende de condições operacionais (vazão, pressão, temperatura, velocidade do

líquido e velocidade do gás), condições geométricas da tubulação (dimensão, inclinação e forma) e de propriedades das fases (densidade e viscosidade).

As classificações dos padrões de escoamento são concordantes entre diferentes pesquisadores (Hewitt, 1982; Ishii, 1975; Mishima e Ishii, 1984; Taitel et al., 1980; Wallis, 1969), e podem ser escoamento vertical e horizontal. Neste trabalho, os padrões para o escoamento bifásico vertical ascendente foram classificados em três grupos denominados por Bolhas, Intermitente e Anular. Por sua vez cada padrão foi dividido em sub-padrões. O padrão Bolhas engloba os sub-padrões de bolhas em regime esférico e mono-dispersas e o capa esférica (*spherical cap*). O padrão Intermitente engloba os arranjos onde há a alternância de bolhas de gás que ocupam toda a seção transversal do tubo e pistões de líquido. Ele foi dividido nos subpadrões: golfadas de líquido (golfadas) e golfadas instáveis (agitado). Por último vem o padrão Anular que foi dividido nos sub-padrões semi-anular e anular. Por referência a Figura 1.1 traz um quadro explicativo das divisões dos padrões e sub-padrões. A escolha por seis subpadrões ao invés dos clássicos três padrões (bolhas, intermitente e anular) é para capturar de forma mais clara as transições entre os padrões.

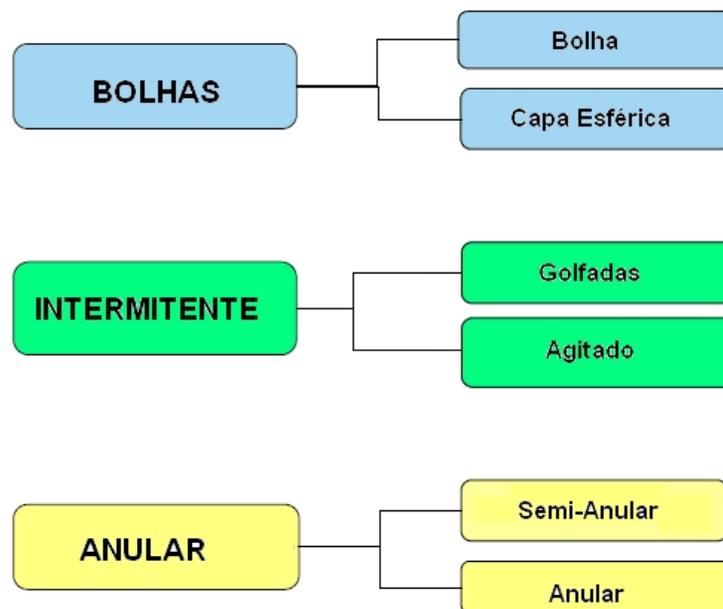


Figura 1.1 - Padrões e sub-padrões para o escoamento vertical ascendente.

Uma descrição qualitativa dos subpadrões é realizada a seguir:

O subpadrão Bolhas representa distribuições com bolhas mono-dispersas com tamanho uni-

forme e também *cluster* de bolhas freqüentemente denominados por bolhas discretas. O primeiro subpadrão possui bolhas com tamanhos uniformes descrevendo trajetórias retilíneas e sem interação com as bolhas vizinhas. O *cluster* de bolhas se apresenta com bolhas de tamanhos variados, com formas não esféricas ou distorcidas e descrevendo uma trajetória em zig-zag.

O subpadrão Capa Esférica ou *Spherical Cap* é caracterizado por bolhas que podem tomar parcialmente ou completamente a seção transversal do tubo na forma de uma "capa" ou "tampa" de gás. Uma vez formadas as bolhas tipo capas esféricas, a bolha que vem atrás alcança a bolha que está a sua frente para formar uma bolha de maior comprimento até que, eventualmente, seja formada uma bolha de Taylor.

O subpadrão Golfadas é caracterizado por uma sucessão de pistões de líquido aerados seguidos por bolhas de gás alongadas, freqüentemente denominadas por bolhas de Taylor, escoando verticalmente ao redor de um filme de líquido junto à parede. A natureza intermitente do padrão é claramente identificada pelo sinal da sonda de impedância que traz um sinal alternado entre valores altos e baixos com uma transição tipo degrau entre estados.

O subpadrão Agitado é definido como sendo um padrão que sucede o golfadas quando a vazão de gás aumenta. Este padrão, como o nome sugere, é instável. O líquido apresenta um movimento oscilatório ou agitado. A integridade da bolha alongada é perdida pela formação constante de pontes de líquido que unem um lado ao outro da bolha para, posteriormente, serem rompidas novamente pelo fluxo de gás. O pistão de líquido é aerado e, constantemente sua integridade é rompida pelo fluxo de gás de forma que o movimento relativo entre as massas de gás e líquido torna-se caótico.

O termo Semi-Anular é usualmente empregado para identificar o subpadrão entre o agitado e o anular, Azzopardi e Hills (2003). Ele é considerado uma forma degenerada do sub-padrão anular com grandes ondas interfaciais onde o filme de líquido adjacente as parede pode apresentar mudança de direção.

O subpadrão Anular é caracterizado por um núcleo com gás e gotas de líquido em alta velocidade envolto por um filme de líquido co-corrente que escoia junto á parede. O filme de líquido

é, ocasionalmente, interrompido por uma onda de perturbação. A Figura 1.2 mostra uma fotografia dos subpadrões em escoamento vertical da qual é possível observar as características de cada subpadrão conforme comentado anteriormente, esta fotografia foi tirada no laboratório de escoamento multifásico do Departamento de Energia da UNICAMP.



Figura 1.2 - Subpadrões de escoamento vertical gás-líquido.

Já no escoamento horizontal, as bolhas são deslocadas para o topo da tubulação devido às forças gravitacionais. Com baixas vazões de líquido e gás, um fluxo suave (estratificado) ou ondular são observados. Com o aumento da vazão de gás, forma-se um escoamento gradativamente mais ondulado. Quando elas tocam a parte superior do tubo, acabam aprisionando uma bolsa de gás. Se a velocidade do fluxo é inferior ao desses vazios, estas coalescem e formam bolhas maiores, transformando-se no padrão intermitente, podendo ser aerado. Já para ambas as velocidades elevadas, um fluxo anular, ou de pequenas bolhas dispersas é esperado, conforme ilustrado na Figura 1.3.

Segundo Trafalis et al. (2005), a determinação precisa do regime de escoamento é crítica para o projeto de sistemas de escoamento bifásico encontrados em vários processos em indústrias químicas, nucleares e petrolíferas, tais como caldeiras, condensadores, linhas de transporte de gás e óleo e sistemas de resfriamento de reatores nucleares. Em particular, nas indústrias petrolíferas, a identificação dos padrões de escoamento é essencial para questões relacionadas ao retorno econô-



Figura 1.3 - Padrões de escoamento horizontal gás-líquido.

mico do campo, por exemplo, na medição das vazões volumétricas transportadas, determinação da queda de pressão ao longo das linhas de escoamento, gerenciamento da produção, fiscalização e projetos de risers.

Os diversos simuladores de escoamento bifásico gás-líquido, utilizados para o dimensionamento de linhas e de equipamentos na área de produção e exploração de petróleo, são fundamentados em equações de modelos de escoamento bifásico. Estes modelos são desenvolvidos através de estudos teóricos e empíricos dos aspectos físicos intrínsecos do escoamento. O sistema de equações de transporte que constituem estes modelos de escoamento bifásico possuem um número de parâmetros ou variáveis maior do que o número de equações, desta forma, para se obter a solução deste sistema de equações são necessárias a introdução de equações constitutivas ou de fechamento. Estas equações constitutivas são dependentes do padrão de escoamento pois os parâmetros físicos variam de acordo com as transições do padrão de escoamento (Ishii, 1975; Mishima e Ishii, 1984).

Existem diversos modelos de escoamento bifásico, dentre eles podemos citar o modelo de dois fluidos e o modelo de mistura. O modelo de Mistura (Ishii, 1977) é um dos modelos de escoamento bifásico freqüentemente utilizado em simuladores de escoamento bifásico gás-líquido e consiste de uma simplificação do modelo de dois fluidos. As equações de transporte do modelo são expressas em termos das propriedades da mistura e da velocidade de difusão. O modelo é resolvido desde que as equações constitutivas que descrevem a velocidade de difusão, que por sua vez é expressa pela velocidade de deslizamento, sejam conhecidas. Estas equações constitutivas são específicas para cada padrão de escoamento.

A indicação dos padrões de escoamento é realizada a partir das medidas de certas propriedades do escoamento. Um parâmetro muito utilizado é obtido pela medida da fração do gás sobre uma linha, área ou volume em relação ao total de uma seção restrita da tubulação. Esta propriedade é denominada fração de gás, sendo um parâmetro relevante para descrever localmente as proporções de cada fase do escoamento gás-líquido.

Existem diversas técnicas de medição de fração de gás, como a válvula de fechamento rápido, atenuação de radiação (raio X ou gama) por linha ou valores de área média, sensores de contato ópticos ou elétricos, sensores de pressão e técnicas de impedâncias. O uso das diferentes técnicas depende da aplicação e da medição de fração de gás desejada. O método de atenuação de radiação pode ser cara e, sob o aspecto de segurança, difícil de implementar, enquanto sensores intrusivos perturbam o campo de escoamento. Em sensores de pressão, algumas dificuldades relacionadas com a presença de duas fases pode não ser facilmente superado, por exemplo, a presença de gás, que poderia estar preso nas linhas desses sensores como mencionado por Jones e Delhaye (1976). Por outro lado, técnicas de impedância são um método prático e com um bom custo benefício para medições de fração de gás, além disso, o tempo de resposta desses sensores é adequado para a tarefa de reconhecimento de padrões em tempo real (Mi et al., 1996).

Técnicas de medida de escoamento bifásico podem utilizar transdutores não intrusivos e intrusivos. Os transdutores não intrusivos consistem de eletrodos montados periféricamente ao redor do campo do escoamento. Já nos transdutores intrusivos os eletrodos são colocados no campo do escoamento em contato direto com os fluidos. Conte e Azzopardi (2003) revisaram diferentes tipos de transdutores intrusivos como o transdutor agulha, transdutor com fio paralelo e transdutor com fio embutido. Dentro destes três, o transdutor com fio paralelo é o mais usado em escoamento bifásico gás-líquido e em escoamento trifásico gás-líquido-líquido (Andritsos e Hanratty, 1997; Luninski et al., 1983; Oddie et al., 1997; Shi e Kocamustafaogullari, 1994). Há ainda a configuração tipo anel (Fossa, 1998), placas paralelas (Sami et al., 1980), hélice dupla (Geraets e Borst, 1988) e as placas côncavas (Costigan e Whalley, 1997), sendo que o transdutor de hélice dupla é o mais linear, mas as configurações de placas côncavas pode ser a preferida pela grande sensibilidade e simplicidade de construção.

Com o intuito de reconhecer os padrões de escoamento bifásico, diversas metodologias de reconhecimento foram desenvolvidas utilizando as mais variadas técnicas computacionais como RNAs (Redes Neurais Artificiais), Lógica Fuzzy e Regras (Se... Então). De um modo geral as metodologias desenvolvidas são baseadas em microcomputadores e voltadas para aplicações de laboratório. Com a difusão do uso de microcontroladores torna-se possível embutir estas metodologias de reconhecimento de padrões nos instrumentos de campo, possibilitando que metodologias de reconhecimento sejam aplicadas à ambientes industriais.

Dentro do contexto de aplicações de campo, os microcontroladores são dispositivos extremamente atraentes para embarcar as metodologias de reconhecimento de padrões, por serem fisicamente robustos e pequenos possibilitam a sua instalação direta na linha do escoamento bifásico, realizando o processamento local do sinal. Desta forma, passa-se a realizar o reconhecimento de padrões no instrumento microcontrolado usado para medições de escoamento bifásico gás-líquido.

Neste trabalho, um sistema de reconhecimento de padrões, utilizando SE (Sistema Especialista), foi embarcado em um instrumento de medição de fração de gás microcontrolado. Os SEs utilizam o conhecimento de um especialista humano no assunto para formar a sua base de conhecimento, e assim, através de Regras (Se... Então) classificar o objeto vigente, o padrão de escoamento.

Para este trabalho usaremos as metodologias de regras, nos sistemas especialistas; pelo fato que ser uma metodologia mais fácil de se implementar e não necessitar de grandes recursos computacionais, possibilitando que seja embarcado em um microcontrolador.

O trabalho aborda somente padrões de escoamento verticais e além do reconhecimento dos padrões típicos é realizado também o reconhecimento de quando a tubulação está cheia de líquido e quando ela se encontra cheia de gás, que servem como alerta à supervisão e também como informação útil para operação e manutenção do sistema. Desta forma, além dos padrões e subpadrões descritos acima, o sistema de reconhecimento também classificará quando a tubulação está cheia de líquido e quando esta se encontra vazia de líquido.

A metodologia de reconhecimento de padrões, utilizando técnicas de SE, foi proposta a fim

de se realizar uma análise considerando fatores como: facilidade de implementação, exigência computacional, taxa de acertos e confiabilidade dos resultados.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um sistema de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido embarcado em um instrumento de medição de fração de gás microcontrolado.

Para a etapa classificatória do sistema de reconhecimento de padrões, serão estudadas e embarcadas técnicas de SE. Para a aquisição dos sinais que formam a base de conhecimento do SE utilizou-se um aparato experimental que produz padrões de escoamento que são controlados e monitorados por um sistema supervisor. Estes sinais são obtidos por um instrumento de medição de fração de gás microcontrolado interconectado em uma rede de instrumentos e instalado na tubulação onde os padrões de escoamento são produzidos.

O desempenho do sistema de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido embarcado em um instrumento de medição de fração de gás microcontrolado será avaliado através da análise da facilidade de implementação, exigência computacional, taxa de acertos e da confiabilidade dos resultados.

É proposta uma interface para o sistema de reconhecimento visando o controle e o gerenciamento de todos os instrumentos de medição de fração de gás microcontrolado pertencente à rede de instrumentos, de modo que o operador do sistema tenha acesso às informações dos instrumentos e aos resultados do reconhecimento dos padrões de escoamento.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho encontra-se dividido nos seguintes capítulos:

- No Capítulo 2 é realizada a revisão bibliográfica relacionada aos trabalhos publicados na área

de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico.

- O Capítulo 3 define um sistema de reconhecimento de padrões, como este é composto, detalhando-se suas etapas. O SE utilizado na etapa classificatória deste trabalho é abordado neste capítulo.
- No Capítulo 4 aborda-se a arquitetura do sistema de medidas de escoamento bifásico gás-líquido enfatizando a rede de instrumentos, canal de comunicação e o instrumento de medição de fração de gás microcontrolado. A aquisição dos dados que compõem a base de conhecimento do SE, através de um aparato experimental, é também descrito neste capítulo.
- O Capítulo 5 detalha a implementação do sistema de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico embarcado no instrumento de medição de fração de gás microcontrolado abordando o kit de desenvolvimento, extração das características do sinal de fração de gás e a implementação do SE.
- O Capítulo 6 apresenta os testes realizados para a validação do sistema assim como os resultados obtidos.
- No Capítulo 7 são discutidas as conclusões retiradas deste trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

Este capítulo está dividido em duas seções, a primeira trata-se do levantamento bibliográfico sobre o processo de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido, e a segunda seção aborda o levantamento bibliográfico de sistemas de reconhecimento embarcados.

2.1 Reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido

O processo de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido pode ser dividido em duas etapas. A primeira etapa é de aquisição de dados e consiste em obter algum tipo de informação sobre o padrão de escoamento a ser classificado. A segunda etapa é o processo de classificação propriamente dito. Nesta última etapa há inicialmente algum tipo de tratamento da informação adquirida, a partir do qual é realizada a classificação. Em função dessas características, os trabalhos levantados serão analisados em termos do processo de aquisição de dados, da transformação dos dados e finalmente da metodologia de identificação.

2.1.1 Processo de Aquisição do Sinal

Em relação às técnicas utilizadas para aquisição do sinal, foram identificadas técnicas de absorção de radiação como raios-X e raio gama, técnicas ópticas, variação de pressão e variação da impedância elétrica.

Técnicas ópticas foram utilizadas por Durst (1976) e Mishima e Hibiki (1996), porém estas

necessitam que a tubulação sejam transparente para que possa ser utilizada. Por outro lado, raios-X e raios gama são capazes de realizar medições em tubulações opacas. Jones e Zuber (1975) e Vince e Lahey (1982) identificaram padrões de escoamento através da análise de fração de gás medida através de um sistema de raios-X. Kumar et al. (1997) identificaram padrões de escoamento utilizando raio gama. Entretanto, técnicas de absorção de radiação são de difícil implementação pelo uso da radioatividade e por sua complicada construção, além disso, essas técnicas requerem conhecimento e equipamento especializados.

Utilizando técnicas avançadas de tomografia computadorizada ultra-sônica, Xu et al. (1997) e Warsito et al. (1999) identificaram padrões de escoamento. Este método tem a capacidade de reconstruir a distribuição de um escoamento bifásico gás-líquido sobre a seção transversal da tubulação.

A variação da pressão, devido à passagem de gás e líquido, e suas características estatísticas, são especialmente atraentes para a caracterização dos padrões de escoamento, porque os sensores de pressão são robustos, de baixo custo e relativamente bem desenvolvidos, e, portanto, mais susceptíveis de serem aplicados nos sistemas industriais (Drahos et al., 1991). Alguns pesquisadores (Hulin et al., 1994; Hubbard e Dukler, 1966; Matsui, 1984; Cai et al., 1994; Selli e Selegim, 2004; Xie, 2004; Bin et al., 2006; Sun et al., 2002; Tutu, 1982; Sun e Zhang, 2008; Wu et al., 2001) realizaram medições de pressão diferencial para identificar os padrões de escoamento. No entanto, esta medida é altamente dependente da localização e o teste pode apresentar algumas imprecisões nas medidas (Jones e Delhaye, 1976), além disso, problemas de manutenção afetam esta técnica, por exemplo a obstrução da tubulação de medida pode inviabilizar todas as medidas.

Os trabalhos de Lee et al. (2004); Dong et al. (2003); Mi et al. (2001, 1998); Tsoukalas et al. (1997); Mi et al. (1996), utilizaram a variação da impedância elétrica para a identificação dos padrões. As tecnologias para a obtenção dos sinais elétricos também são variadas.

Lee et al. (2004) utilizaram sensores não intrusivos para obter sinais elétricos de um escoamento bifásico água e ar, usando-se uma frequência de amostragem de 1 KHz durante um tempo de 60 segundos. Lee et al. (2004) também realizou identificação instantânea dos padrões de escoamento.

mento, neste caso considerando um 1 segundo o tempo de aquisição.

Técnicas de tomografia foram usadas por Dong et al. (2003). Dezesesseis eletrodos foram dispostos equidistantes ao redor da tubulação, ficando em contato com o fluido, mas não interferindo no fluxo do escoamento.

Tsoukalas et al. (1997), Mi et al. (1996, 1998, 2001) usaram sensores de impedâncias não intrusivos, sendo cada sensor formado por um conjunto de eletrodos e um circuito de medidas de impedâncias. Oito eletrodos foram simetricamente dispostos e embutidos na tubulação. Cada par de eletrodo fornece uma medida de impedância. Portanto, uma combinação de medições de impedâncias foram realizados em uma seção transversal da tubulação. As múltiplas combinações se destinam a resolver os problemas associados com a distribuição não uniforme das fases. Água deionizada e ar foram usados como o líquido e gás respectivamente nos experimentos. Mi et al. (2001) adquiriram o sinal do sensor de impedância utilizando uma frequência de amostragem de 200 Hz durante 60 segundos.

Yamashita (1997) adquiriu os sinais para o reconhecimento dos padrões de escoamento através de um par de eletrodos capacitivos que foram colocados próximos ao topo da tubulação vertical para medir a carga eletrostática das paredes da tubulação. Este sensor é composto por um par de eletrodos de cobre, um amplificador de ganho e um analisador de espectro. O sinal foi adquirido com uma frequência de amostragem de 100 Hz e um tempo de aquisição de 0,32 segundos.

A resposta em tempo real, proveniente do sensor de impedâncias, torna possível realizar medições durante situações transitórias, bem como no estado estacionário (Andreussi et al., 1988). A técnica de impedância tem como principal característica o atrativo econômico, uma vez que é normalmente mais fácil de implementá-la do que outras técnicas, além de ser a técnica mais popular e se adaptar à fluidos com diferentes condutividades elétrica.

As técnicas de pressão e de impedância são preponderantes sobre outras técnicas no levantamento bibliográfico, pelo fato de serem técnicas mais simples, baratas e que possuem um tempo de resposta adequado para aplicações de identificação de padrões de escoamento.

2.1.2 Tratamento de Sinal

Os sinais adquiridos, tanto de pressão, como de impedância, não são diretamente utilizados pelas metodologias desenvolvidas. Esses sinais variam bastante devido ao arranjo espacial das fases de gás e líquido, de modo que se torna difícil identificar o padrão diretamente a partir deste sinal. Desta forma, todos os trabalhos fazem algum tipo de transformação para os sinais nas metodologias propostas.

Os tratamentos utilizados são bastante variados, tais como o cálculo da PDF (função de densidade de probabilidade) em Mi et al. (1996), Tsoukalas et al. (1997), Matsui (1984) e Tutu (1982). Mi et al. (2001) utilizou parâmetros estatísticos da PDF para identificar padrões de escoamento instantaneamente, entretanto, este método não pode satisfazer as necessidades de identificação, devido os parâmetros estatísticos da PDF precisarem de um número suficiente de dados, correspondente à 60 segundos de observação, para se encontrar uma caracterização estatística significativa. Deste modo, se o padrão de escoamento se altera dentro desse tempo, é impossível identificar o padrão de escoamento com este método.

Lee et al. (2004) calculam a PSDF (função de distribuição de probabilidade), que é a ordenação dos dados adquiridos de acordo com sua magnitude em um determinado período de tempo; a qual pode ser calculada mais rapidamente do que a PDF, utilizando períodos curtos de observação do sinal, de forma que se torna viável a identificação instantânea dos padrões de escoamento. O termo "instantânea" usado por Lee et al. (2004) se refere ao curto período de tempo que o sinal é adquirido, 1 segundo, sendo que este intervalo de tempo é suficiente para caracterizar os padrões de escoamento.

Yamashita (1997) utiliza a transformada rápida de Fourier (FFT), cuja técnica pode não ser suficiente para descrever o processo dos padrões de escoamento, principalmente porque todas as informações temporais estão escondidas devido à integração no tempo (Selli e Seleglim, 2004). A FFT não pode tratar eventos transitórios de maneira satisfatória pelo fato que essa transformada baseia-se na integração de todo o sinal para o cálculo de cada frequência. Eventos que venham a ocorrer no sinal em momentos distintos e mesmo bastante remotos contribuem de maneira global

para a transformada.

Mi et al. (1998) calcularam a média e o desvio padrão do sinal, possibilitando uma boa exibição das características do sinal, com um baixo custo computacional. Dong et al. (2003) utilizam o método de análise da componente principal, que tem como objetivo encontrar uma transformação mais representativa e geralmente mais compacta das observações do sinal, e neste sentido, representá-las mais claramente. Grande parte da variância dos dados é explicada por um número reduzido de componentes, sendo possível descartar as restantes sem grande perda de informação. Dessa forma, o método de análise da componente principal possibilita uma significativa redução da dimensionalidade dos dados, porém são necessários vários ciclos de processamento para sua execução devido à complexidade do algoritmo.

Em Selli e Selegim (2004) é utilizada a transformada de Gabor sobre o sinal com o objetivo de se realizar uma análise em tempo-frequência, construindo, a partir do sinal original unidimensional, uma distribuição bidimensional que identifique o conteúdo espectral instantaneamente ou local. Neste trabalho os padrões intermitente e estratificado foram identificados com maior segurança devido à sua característica nos domínios tempo-frequência, associada à frequência do padrão intermitente e à frequência de oscilação do padrão estratificado, respectivamente. Já o padrão anular foi identificado com menor grau de certeza por ser um padrão difícil de ser obtido em testes experimentais na horizontal. Para a aplicação da transformada de Gabor são necessários recursos computacionais mais avançados em relação à técnica de média e desvio padrão calculada por Mi et al. (1998). A transformada de Gabor tem se mostrado adequada para extração de características, pois minimiza a incerteza das articulações bidimensionais no espaço de frequência (Daugman, 1988).

Bin et al. (2006) e Ding et al. (2007) utilizam a transformada de Hilbert Huang, que é um método de análise tempo-frequência. A principal diferença entre a transformada de Hilbert Huang e todos os outros métodos é que a função wavelet elementar é derivada do próprio sinal e adaptada. A principal característica da transformada de Hilbert Huang é a decomposição de modo empírico, que é capaz de extrair todos os modos oscilatórios presentes no sinal. Cada modo extraído é referido como uma função de modo intrínseco, que tem uma única característica local.

Depois da transformada de Hilbert em cada função de modo intrínseco ter sido realizada, a distribuição tempo-freqüência da energia do sinal é obtida, que é referida como espectro de Hilbert Huang. A vantagem da transformada de Hilbert Huang sobre todos os métodos são que ele pode lidar com problemas não lineares objetivamente e a resolução do espectro de Hilbert é satisfatório nos domínios do tempo e freqüência.

2.1.3 Metodologia de Identificação

Em relação às metodologias de identificação, são empregadas também várias tecnologias. As metodologias iniciais eram baseadas em regras sobre as funções de PDF calculadas, como em Matsui (1984) e Tutu (1982) onde bons resultados foram obtidos mostrando ser também uma metodologia de fácil implementação.

A técnica de reconhecimento de padrões utilizando lógica difusa, que é freqüentemente usada para resolver problemas estatísticos, foi introduzido para obter a identificação dos padrões de escoamento. Algoritmos difusos são uma coleção de regras SE... Então, formuladas para realizar uma dada tarefa. Os resultados experimentais do trabalho de Dailiang et al. (2004) mostraram que o método é eficiente e a acurácia da identificação de padrões de escoamento em tempo real é satisfeita. Além de classificar os padrões de escoamento, com a lógica difusa é possível observar o grau de contribuição de cada padrão de escoamento no momento da classificação, embora não permita observar as transições dos padrões de escoamento.

Para a identificação dos padrões de escoamento a lógica difusa é bastante viável, requer poucas regras, poucos valores e poucas decisões, porém possui uma limitação na velocidade de processamento o que pode ser um problema em identificações em tempo real, o que impossibilita sua aplicação neste trabalho.

Nas metodologias de identificação há predominância dos modelos baseados em Redes Neurais Artificiais (RNA). O surgimento das RNAs possibilitou que problemas complexos não-lineares, que antes eram mal compreendidos ou demasiadamente complexos para uma modelagem matemática ou explicação física, fossem solucionados através de rápidas predições, apresentando uma van-

tagem para os problemas práticos, englobando de maneira satisfatória o problema da identificação de padrões de escoamento bifásico.

Mi et al. (1996) e Tsoukalas et al. (1997) identificaram padrões de escoamento através da lógica difusa com redes neurais, a chamada neuro-difusa, e obtiveram excelentes resultados em sua identificação, 100% de acertos.

Cai et al. (1994) realizaram as primeiras aplicações de RNAs adotando o modelo Kohonen para classificar os padrões de escoamento bifásico. Mi et al. (1998, 2001); Lee et al. (2004) em seus trabalhos testaram duas diferentes topologias de RNAs, MLP (Multi Layer Perceptron) e Kohonen, e notaram que as redes auto-organizáveis Kohonen revelam as relações naturais escondidas entre os vários padrões e as regiões de transição razoavelmente bem, sendo que a informação sobre a transição é muito útil quando os tubos são opacos, porém as redes Kohonen são mais complexas em relações à outras metodologias de identificação.

Dong et al. (2003) e Malyeri et al. (2003) usaram uma RNA com arquitetura RBF (Radial Based Function). As RNAs RBF apresentam características fundamentais a um bom classificador de padrões, outras vantagens são a simplicidade do processo de treinamento e a eficiência computacional, porém em relação à sua estrutura inicial este modelo de RNA possui dificuldade de configuração das redes e também no que se refere aos parâmetros dos algoritmos de aprendizado.

RNAs MLP foram usadas por Selli e Selegim (2004), que identificaram padrões de escoamento horizontal, intermitente e estratificado com maior facilidade e acurácia, já o padrão anular foi identificado com menor certeza pelo fato das limitações do laboratório em obter esse padrão de escoamento.

Wu et al. (2001) identificou padrões de escoamento utilizando RNAs com o algoritmo *back-propagation*, resultando em um método com alta acurácia, rapidez e com 92% de acertos. Sun et al. (2002) também utilizou esta técnica para identificar padrões de escoamento vertical, obtendo 90% de acertos para o padrão anular, 86,7% para o padrão bolhas, 81,3% para o padrão pistonado, e 88,2% para o padrão golfadas.

As MLPs são as RNAs mais difundidas na área de inteligência artificial, no entanto, possui um tempo de treinamento longo e o processo de treinamento é sensível à medida de ruídos, e estático, não produzindo bons resultados em processos cuja dependência do tempo é fator primordial.

2.2 Sistemas de reconhecimento de padrões embarcados

Na literatura acadêmica é difícil encontrar técnicas de reconhecimento de padrões embarcados em um microcontrolador ou DSP (Processador Digital de Sinais). Há alguns trabalhos acadêmicos com algoritmos de reconhecimento de padrões embarcados, aplicados às outras áreas da ciência, conforme são apresentados a seguir.

Técnicas de reconhecimento de padrões são demonstradas em Mazarakis e Avaritsiotis (2007) para detectar e classificar veículos em nós de sensores sem fio. A classificação foi realizada utilizando redes neurais artificiais feedforward de múltiplas camadas. Todo processo de reconhecimento de padrões foi implementado em um microcontrolador de 8 bits da ATmega32 Atmel, com 2K de memória RAM, 32 K de Flash e um conversor ADC (Conversor Analógico Digital) de 10 bits. Resultados satisfatórios foram obtidos quanto ao reconhecimento de padrões com um baixo custo computacional.

Um monitoramento ambulatorial portátil ECG (eletrocardiograma) é desenvolvido para realizar a detecção da mudança na forma de um determinado segmento proveniente do eletrocardiograma, bem como, a classificação do seu tipo. Um microcontrolador TMS320C32 com um ADC de 16 bits foi utilizado para detectar os pontos característicos do segmento analisado, comparando esses pontos a um segmento de referência, a fim de que fossem classificadas as formas dos segmentos, bem como verificada as suas mudanças. O resultado da análise é bastante eficiente e é utilizado para fazer o controle de quando começar a gravação ECG e quando parar (Jeong e Yu, 2007).

Matic et al. (2002) propõe um sistema classificador de modulação automatizado HF (high frequency), utilizando um DSP TMS320C50, de 16 bits, e um ADC de 12 bits; e um microcontrolador MC68HC11. O DSP efetua a extração e o processamento dos parâmetros de separação, enquanto o processo de decisão é controlado pelo microcontrolador. O método de classificação utilizado se

baseia nos valores médios de cada parâmetro. O sistema classificador opera em tempo real, sendo de fácil implementação, baixo custo e alta probabilidade de classificar corretamente o sinal.

O uso de algoritmos de lógica difusa embarcados em um microcontrolador 68HC16, para reconhecimento de voz, é demonstrado em Hale e Nguyen (1995). Ótimos resultados foram obtidos quanto à eficiência do reconhecimento de voz para baixa largura de faixa.

Willming e Wheeler (1990) mostram o desenvolvimento de um sistema para detecção e classificação de estímulos de atividades neurais, utilizando um DSP TMS320C25, com 48 K de RAM, que efetua o processo de classificação e envia o resultado a um computador IBM através de um canal de comunicação DMA. Foi verificado um rápido e eficiente resultado no processo de classificação do sinal o que viabiliza o monitoramento on-line dos estímulos neurais.

Darwish et al. (2001) programaram um sistema de diagnóstico de falhas para proteção do enrolamento de um gerador, utilizando Redes Neurais Artificiais simples com uma camada escondida. O sistema proposto realiza detecção interna da falha, classificando o tipo da falha e identificando a fase afetada. Os algoritmos são embarcados em um DSP TMS320C40, utilizando também uma placa, o DS2201, para a interface do sistema real com o DSP. Testes foram realizados através de simulações o que indicou um ótimo desempenho do sistema e um rápido processamento do sinal.

Através do levantamento bibliográfico realizado neste capítulo foi possível observar quais são os principais métodos para a aquisição de dados em um sistema de reconhecimento de padrões. Observou-se também quais são as metodologias empregadas para o tratamento do sinal, as técnicas utilizadas para a identificação do padrão de escoamento e quais são os microcontroladores e DSP's utilizados para se embarcar um sistema de reconhecimento de padrões.

Dentro deste contexto, neste trabalho, será usado sensores de impedâncias na etapa de aquisição de dados, por serem populares, baratos e possuem um tempo de resposta adequado para identificação de padrões em tempo real. Já no tratamento do sinal adquirido serão utilizadas funções estatísticas de média aritmética simples e desvio padrão devido à sua facilidade de implementação e pouca exigência computacional. Na etapa de identificação do padrão de escoamento serão usadas

regras SE... Então, através de técnicas de Sistemas Especialistas, cuja escolha derivou-se também da pouca exigência computacional e da facilidade de implementação, resultando em um sistema de reconhecimento de padrões apropriado para ser embarcado em um microcontrolador. Assim como a maioria dos autores embarcaram seus sistemas de reconhecimento em microcontroladores ou DSP's da *Texas Instruments*, neste trabalho o sistema de reconhecimento desenvolvido será embarcado em um TMS320F2808 de 36K de RAM e com um Conversor Analógico Digital de 12 bits, cuja configuração possibilita um adequado funcionamento do sistema embarcado.

Capítulo 3

Reconhecimento de Padrões

Neste Capítulo é detalhado o conceito de Reconhecimento de Padrões e quais possíveis técnicas para realizá-lo. É descrito um sistema de reconhecimento de padrões, destacando-se a etapa classificatória onde usa-se os SEs.

3.1 Reconhecimento de Padrões

Os seres humanos têm grande capacidade em identificar e classificar objeto no cotidiano, até mesmo em situações bastante adversas. Nós recebemos as informações captadas pelos nossos sentidos e imediatamente identificamos as fontes das informações, muitas vezes sem um esforço consciente para isso. Por exemplo, somos capazes de reconhecer faces de pessoas que há muito tempo não víamos, identificar vozes no telefone mesmo quando a ligação não é de boa qualidade, identificar dígitos, manuscritos ou impressos mecanicamente apresentados em diferentes tamanhos e inclinações (Pereira, 2001).

Desta forma, Jain et al. (2000) define RP (Reconhecimento de Padrões) sendo o estudo de como as máquinas podem observar o meio ambiente, aprender a distinguir os objetos de interesse, padrões, e tomar decisões seguras sobre a categoria a qual pertence um dado padrão. O objetivo em RP, portanto, é esclarecer os complicados mecanismos de identificação/classificação dos seres humanos e automatizar essas funções usando computadores (Fukunaga, 1990).

Dois elementos essenciais dentro de reconhecimento de padrões devem ser definidos:

- **Padrão:** É um conjunto de características que definem um objeto ou um grupo de objetos. É essencialmente um arranjo ou uma ordenação em que alguma organização de estrutura pode ser dita existir (Pandya e Macy, 1995). Um padrão pode ser referenciado como uma quantidade ou descrição estrutural de um objeto ou algum outro item de interesse. Um padrão pode ser tão básico quanto um conjunto de medidas ou observações, geralmente sendo representado na forma de vetor ou matriz. O mundo pode ser visto como feito de padrões.
- **Características:** Podem ser entendidas como qualquer medição útil extraída no processo de identificação do padrão. Intensidade de sinais são exemplos de características. As características podem ser simbólicas, numéricas ou ambas. Podem ser variáveis contínuas ou discretas.

3.2 Técnicas de Reconhecimento de Padrões

A maneira como o conjunto de dados, onde se deseja fazer o reconhecimento, é abordado diferencia as técnicas de reconhecimento de padrões, sendo elas Reconhecimento de Padrões Sintático e Reconhecimento de Padrões Numérico, as quais são descritas nas subseções seguintes.

3.2.1 Reconhecimento de Padrões Sintático

O Reconhecimento de Padrões Sintático se baseia na representação estrutural dos padrões. Esta representação deve ser feita utilizando uma gramática que descreve os padrões a partir de símbolos e as regras de como estes símbolos devem ser agrupados para formar cada padrão.

Fu (1982) afirma que não há soluções gerais e que a escolha da gramática é influenciada pela natureza dos dados disponíveis, da aplicação e da tecnologia. Assim, não existe uma gramática universal que sirva de base para todos os problemas de RP. Desta forma, o projetista do sistema deve criar uma gramática a cada problema de reconhecimento. E, a classificação dos padrões deve ser feita a partir da análise dos dados extraídos.

As técnicas de Reconhecimento Sintático podem ter um resultado bastante significativo, principalmente quando a gramática é bem elaborada. Entretanto, nem sempre é possível realizar a formulação gramatical do padrão, impossibilitando em alguns casos a utilização deste tipo de abor-

dagem.

3.2.2 Reconhecimento de Padrões Numérico

Outra técnica utilizada pelo RP é o reconhecimento de padrões numérico, que realiza a classificação de um padrão a partir de um vetor numérico, conhecido como vetor característico ou vetor do padrão. Este vetor deve então ser comparado a um vetor representativo de uma classe de padrões. O vetor de entrada será então classificado de acordo com a maior similaridade entre ele e o vetor representativo de uma das classes.

O Reconhecimento de Padrões Numérico está ainda dividido em Reconhecimento Estatístico e Reconhecimento Neural.

Reconhecimento de Padrões Estatístico

De acordo com Duda e Hart (1973) e Schalkoff (1991), o Reconhecimento de Padrões Estatístico se caracteriza pela geração de um modelo probabilístico para os padrões a serem reconhecidos. Assim, a partir dos dados que se dispõe para treinamento, o sistema deve gerar uma função densidade de probabilidade para as amostras.

A classificação das amostras é feita utilizando a função de densidade de probabilidade e aplicando a Teoria da Decisão Estatística. O resultado deste tipo de sistema depende da quantidade de amostras disponíveis para o tratamento e do nível de generalização que o sistema pode oferecer. Entretanto, a falta de informações sobre a distribuição probabilística das amostras pode dificultar a utilização deste tipo de abordagem.

Reconhecimento de Padrões Neural

Como anteriormente visto, alguns padrões são bem estruturados de forma a serem definidos por uma gramática, outros são de difícil modelagem ou difícil construção de uma gramática. Assim, não há soluções gerais e a escolha de uma técnica de reconhecimento de padrões é influenciada pela

natureza dos dados disponíveis.

A natureza não estruturada do padrão a ser reconhecido torna o problema de reconhecimento difícil de ser tratado. Assim, utilizar Redes Neurais pode ser encarado como um método alternativo para resolução de problemas de reconhecimento, pois ao invés de criar procedimentos lógicos, a construção destas redes envolve o entendimento informal do comportamento desejado para atender ao problema (Duda e Hart, 1973; Schalkoff, 1991; Haykin, 1994).

Algumas das vantagens do Reconhecimento de Padrões Neural é a habilidade de se ajustar a novas informações, velocidade de classificação, capacidade de oferecer boas respostas mesmo com a falta de alguns dados ou com a presença de dados ruidosos (Cavalcanti, 2000). A capacidade de generalização da rede neural também se apresenta como vantagem no problema de reconhecimento de padrões.

De uma forma geral, as redes neurais são altamente recomendáveis para se lidar com sistemas de reconhecimento pouco entendidos e que não podem ser adequadamente descritos por um conjunto de regras ou equações.

3.3 Estrutura de um Sistema de Reconhecimento de Padrões

O sistema de RP é composto por diferentes módulos, cabendo a cada um deles uma função específica. A Figura 3.1 mostra um diagrama de blocos de um sistema de RP, onde ele é composto pelo módulo de aquisição de dados, um extrator de características; e por fim um algoritmo de classificação.

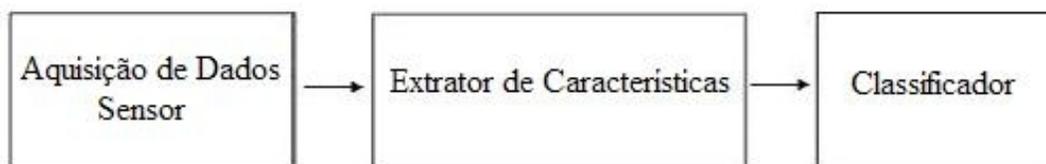


Figura 3.1 - Diagrama em blocos de um sistema de reconhecimento de padrões

O objetivo do módulo de aquisição de dados é traduzir o objeto de reconhecimento em sinais possíveis de serem interpretados pelo restante do sistema de reconhecimento. Este módulo é re-

presentado por um transdutor ou sensor, de modo que a informação recebida possa ser codificada, podendo ser uma câmera de vídeo, uma mesa digitalizadora, um microfone, um scanner, ou um instrumento qualquer que meça alguma grandeza que seja relevante para o reconhecimento.

Após os dados serem adquiridos pelo sensor realiza-se a extração de características, cujo módulo é responsável por extrair dos dados obtidos as informações importantes ao reconhecimento, e se possível eliminar as informações desnecessárias e as redundâncias (Cavalcanti, 2000).

As características extraídas são apresentadas ao classificador que deve definir a classe a que pertence a amostra e agir de acordo com esta classe. Neste trabalho para esta etapa, utiliza-se os SEs que são descritos a seguir.

3.3.1 Sistemas Especialistas

Uma das conquistas mais importantes na área de inteligência artificial é o desenvolvimento de sistemas conhecidos como “especialistas” ou “baseados em conhecimento”. Especialistas são pessoas que tem conhecimento sobre um domínio particular, entendem os problemas dentro desse domínio e tem habilidade para resolvê-los. Esse conhecimento os torna capazes de fazer suposições, reconhecerem problemas e lidar efetivamente com erros ou dados incompletos. Elucidar e reproduzir tal conhecimento é a tarefa central na construção de um SE (Hayes-Roth et al., 1983).

De acordo com Ribeiro (1987), um SE é aquele que é projetado e desenvolvido para atender a uma aplicação determinada e limitada do conhecimento humano. É capaz de emitir uma decisão, com apoio em conhecimento justificado, a partir de uma base de informações, tal qual um especialista de determinada área do conhecimento humano.

Para tomar uma decisão sobre um determinado assunto, um especialista o faz a partir de fatos que encontra e de hipótese que formula, buscando em sua memória um conhecimento prévio armazenado durante anos, no período de sua formação e durante sua vida profissional, sobre esses fatos e hipóteses. E o faz de acordo com a sua experiência, isto é, com o seu conhecimento acumulado sobre o assunto e, com esses fatos e hipóteses, emite a decisão.

Um SE deve, além de inferir conclusões, ter capacidade de aprender novos conhecimentos e, desse modo, melhorar o seu desempenho de raciocínio, e qualidade de suas decisões.

Existem diversos motivos que se podem enumerar, para se colocar em uso sistemas especialistas em determinadas atividades humanas; entretanto de um modo geral sempre que um problema não pode ser algoritmizado, ou sua solução conduza a um processamento muito demorado, estes podem ser uma saída, pois possuem o seu mecanismo apoiado em processos heurísticos. Estes podem não levar à solução do problema, mas na maioria das vezes conduzem às soluções de maneiras mais rápidas.

O desenvolvimento de um SE é um processo consistente para preservar, transferir, e documentar o conhecimento. Embora esse desenvolvimento seja trabalhoso e às vezes caro, torna-se justificável em casos onde o conhecimento é escasso, ou quando é necessário aplicá-lo em muitos locais diferentes, ou mesmo quando o ambiente de aplicação é extremamente hostil para um ser humano.

Durante a década de 60, com o objetivo de analisar espectrogramas de massa, foi desenvolvido o sistema especialista DENTRAL. Em 1974, foi desenvolvido o Mycin, considerado o sistema especialista mais conhecido no mundo, (Rabuske, 1995). Ele foi desenvolvido para diagnosticar infecções bacteriológicas do sangue e prescrever as drogas para seu tratamento. A partir deste sistema, foi desenvolvida uma Shell chamada Emycin. As Shells são ferramentas computacionais que utilizam técnicas de Inteligência Artificial para geração automática de sistemas especialistas. Estas ferramentas utilizam um modelo de representação do conhecimento baseado em regras de produção e probabilidades, tendo como objetivo principal simplificar o trabalho de implementação de sistemas especialistas através do uso de uma máquina de inferência compartilhada, da construção automática de telas e menus, do tratamento probabilístico das regras de produção e da utilização de explicações sensíveis ao contexto da base de conhecimento modelada.

Os sistemas especialistas e os sistemas baseados em “conhecimento” (SBC) começaram a surgir comercialmente no início da década de 80. Embora os Sistemas especialistas tenham sido durante quinze anos, uma mera curiosidade e um sub-campo da Inteligência Artificial, tornou-se

alvo de significativos esforços de desenvolvimento, tanto técnicos como comerciais (Brito, 2002).

Na década de 80, os sistemas especialistas ficaram em evidência graças ao seu ingrediente ativo - o conhecimento (Gomes, 1995). Segundo Brito (2002) a qualidade e a abrangência de sua base de conhecimento são diretamente responsáveis pelo seu sucesso, e não os formalismos e processos de inferência que ele emprega. Mas não é fácil introduzir o conhecimento em um computador. Vários pesquisadores de Inteligência Artificial têm dedicado grande parte de seu tempo a pesquisas de aprendizado das máquinas, ou seja, aos métodos de aquisição automática de conhecimentos.

Atualmente, os SEs são empregados em diversas aplicações, como: Reconhecimento de Padrões, Visão de Computador, Programação de Jogos, Robótica, Diagnósticos Médicos, Processamento da Linguagem Natural, Aprendizado, Base de Dados Inteligentes, entre outros. Neste trabalho, o SE é usado na etapa classificatória de um sistema de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido.

Características de Sistemas Especialistas

Um sistema dito tradicional normalmente é estabelecido para resolver um problema bem especificado que pode ser colocado de forma algoritmizada, isto é, pode-se determinar uma série de etapas finais para se resolver esse problema, em um tempo considerado aceitável para a obtenção da resposta.

Desenvolvido para a solução de um problema bem determinado, um sistema tradicional é projetado para sempre terminar emitindo um resultado final correto, isto é, sistemas tradicionais já são concebidos para apresentar uma solução correta. Esse sistema também processa dados, isto é, os algoritmos são projetados para processar volumes de dados de maneira repetitiva.

Um SE tem o seu funcionamento básico apoiado em heurística; por isso ele é a solução para problemas para os quais, na forma tradicional, não é possível fazer-se um algoritmo ou, se feito, irá obrigar a um processamento muito demorado para a obtenção da solução. Deve-se buscar um

processo heurístico para a solução. Um processo heurístico normalmente conduz a soluções de maneira rápida, porém pode, inclusive, não conduzir a solução alguma (Ribeiro, 1987).

De acordo com Giboshi (1999), SEs tem inúmeras vantagens sobre sistemas tradicionais. Uma delas é a capacidade de armazenar e processar uma vasta quantidade de informações e conhecimentos necessários para avaliar e resolver problemas.

Outra vantagem diz respeito à escassez de especialistas em algumas áreas de conhecimento. Em geral especialistas são pessoas muito ocupadas e sem muito tempo disponível, e com o uso de sistemas especialistas em um determinado domínio, o tempo que eles usariam resolvendo certos tipos de problemas poderia ser usado para treinamento de outros profissionais, para a expansão de conhecimentos ou, eventualmente, para a resolução de problemas mais complexos.

Outra característica de um SE é a facilidade de transferir e reproduzir seu conhecimento. Basta copiar o sistema ou a base de dados, enquanto que para o homem esse é um trabalho difícil e demorado, que requer estudo, aprendizado e treinamento. Por outro lado, os SEs tem dificuldade, para não dizer incapacidade, de “aprender” diante de novos fatos. Os “experts” humanos utilizam-se de sua capacidade de interagir com o meio onde atuam, adaptando-se a novas situações e articulando novas estratégias de ação. Um fator importante que diferencia o “especialista artificial” do humano é que em várias situações, além do conhecimento técnico, deve haver uma “boa dose de bom senso” (Pinheiro, 1995).

Giboshi (1999) diz que outra área onde o especialista humano se sobressai é no aprendizado. Ele se adapta a mudanças de condições, ajustando suas estratégias de acordo com novas situações. Sistemas especialistas não são capacitados para aprender novos conceitos ou regras. Este aprendizado é uma tarefa muito difícil para um sistema especialista. Progressos têm acontecido no desenvolvimento de programas que aprendem, mas esses programas trabalham em domínios extremamente simples, não funcionando bem quanto confrontados com a complexidade e detalhes de problemas reais.

Devido a esses fatores, em muitas aplicações o especialista humano trabalha conjuntamente

com o SE, a fim de se completarem, superando assim as limitações de cada um.

Arquitetura de Sistemas Especialistas

Todo sistema especialista é formado pelo menos por três componentes básicos, mostrados na Figura 3.2: uma base de conhecimento do domínio, um sistema ou mecanismo de inferência ou estrutura de controle para utilização da base de conhecimento e uma interface com o usuário. Neste trabalho, essa base de conhecimento é representada por fatos e regras. É através das regras e da utilização de informações contidas nos fatos, que o SE pode chegar a conclusões, disparar ações ou outras regras. De acordo com Pinheiro (1995), esse tipo de representação do conhecimento é chamado de Baseado em Regras.

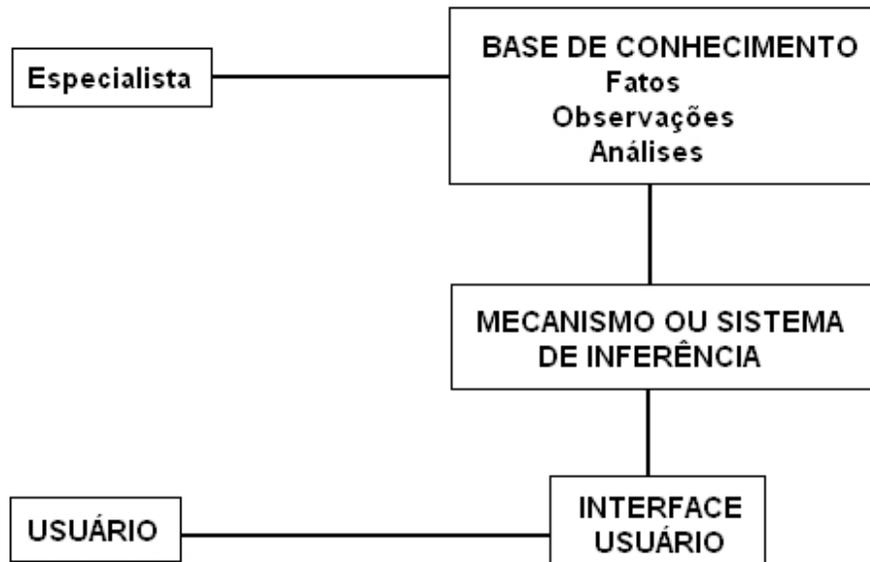


Figura 3.2 - Elementos de um Sistema Especialista

Fonte: Sawyer e Foster (1986)

Os fatos, nesse caso, são extraídos das características estatísticas do sinal de fração de gás proveniente do escoamento. Já as regras, por sua vez, são do tipo “Se <condições forem verdadeiras> Então <ação>”. Por exemplo:

Se < dados amostrados = bimodal > Então < padrão = intermitente >

A base de conhecimento dá as características de funcionamento do sistema. Este terá o conhecimento do que for colocado na sua base de conhecimento, isto é, se ela for projetada para receber informações de uma determinada ciência, o sistema será especialista nesta ciência. É nela onde se armazenam fatos e regras. Um novo fato pode modificar todo um processo de inferência de acordo com as regras existentes sobre ele que estão sendo aplicadas e também sobre os novos fatos gerados pela avaliação dessas regras.

Uma base de conhecimento é sempre feita para uma área bem determinada de uma ciência do conhecimento. Em virtude de limites físicos das memórias existentes, e por uma questão de desempenho das atuais arquiteturas de computadores, esta área é, porém, bastante limitada; mas neste limite de conhecimento que o sistema irá atuar ele deverá ser altamente especializado.

Uma base de conhecimento ideal deve ser projetada para uma perfeita interação do sistema com o especialista. Este irá fornecer as regras para o sistema, evitando que haja pessoas intermediárias que possam desfigurar o conhecimento. Para isso são desenvolvidos editores capazes de entender a linguagem e os principais conceitos da área de conhecimento do especialista. Esse editor é capaz de interagir com o especialista, não apenas para receber o conhecimento, mas também fornecendo e solicitando explicações sobre os conceitos básicos que estão sendo usados ou que são novos para o sistema.

O mecanismo de inferência, também chamado motor de inferência, por alguns autores, é o elemento de um sistema especialista capaz de buscar as regras necessárias a serem avaliadas, ordenadas de uma maneira lógica e, a partir daí, ir direcionando o processo de inferência.

Segundo Sawyer e Foster (1986), é o mecanismo ou sistema de inferência que aplica as regras de lógica racional para pesquisar a base de conhecimento em busca de soluções. Como o próprio nome indica, a principal função do mecanismo é obter inferências, isto é, conclusões. O procedimento é similar ao raciocínio de um especialista quando avalia um problema e propõe soluções.

Ribeiro (1987) diz que o mecanismo de inferência depende de como se está representando

o conhecimento, pois este deve estar preparado para o interpretar. Nos sistemas de avaliação de regras, o mecanismo de inferência busca as regras na base de conhecimento e as avalia. Essa busca depende dos fatos e das hipóteses que existem e que se quer determinar a cada momento. Os objetivos a serem determinados pelo sistema de inferência devem ser relacionados com uma determinada ordem. Assume-se que o programa está sempre tentando identificar algum objetivo. Ele recupera todas as regras necessárias para a obtenção de um desses objetivos. Para atender a um objetivo, algumas vezes é necessário determinarem-se submetas e para atender a estas novas regras serão buscadas e avaliadas, determinando novas submetas, e assim por diante. Isto irá gerar um processo de avaliação que irá ser dependente dos fatos que encontra.

Há dois tipos de controle de inferência. Um conhecido como Encadeamento Progressivo (Forward Chaining), e outro conhecido como Encadeamento Regressivo (Backward Chaining). Neste trabalho, o método de controle utilizado é o Encadeamento para Frente. Essa escolha se deu principalmente pelo fato do Encadeamento para Trás não se enquadrar muito bem no contexto desse trabalho, uma vez que, ele exige a definição de um objetivo a fim de que o processo de inferência possa ser iniciado. A definição a priori desse objetivo é que dificulta a sua utilização, uma vez que a princípio, poderia haver mais de um objetivo a ser colocado para definir qual desses objetivos poderia ser o melhor para determinado caso.

A interface com o usuário é conhecida como o sistema de entrada e saída que permite a comunicação bidirecional, isto é, a troca de informações entre o operador e o mecanismo de inferência. Uma linguagem natural de interface simula uma conversação casual, usando expressões do dia-a-dia do usuário. Através desse sistema, ele entra com conhecimentos que descrevem o problema e recebe solicitações de informações adicionais sobre o mesmo e também conselhos ou recomendações, e as razões das mesmas (Giboshi, 1999).

Desenvolvimento de um Sistema Especialista

As pessoas envolvidas no desenvolvimento de um sistema especialista são:

- Engenheiro de conhecimento: é a pessoa encarregada de extrair o conhecimento dos espe-

cialistas, geralmente através de entrevistas, e depois organizá-lo e sistematizá-lo na base de conhecimento;

- **Usuário:** deve dizer como o sistema será usado, que tipos de problemas deverá resolver e como o programa deverá se comunicar com o usuário;
- **Especialista:** ou melhor, o time de especialistas, que estipula o assunto do problema para fornecer conhecimento, informações de fatos e a relação de métodos analíticos que ele usa para resolver problemas do seu domínio.

Para Sawyer e Foster (1986), todo sistema especialista deve ser considerado um experimento, cuja obtenção de resultados satisfatórios depende da especificidade do problema e da exatidão da definição do mesmo. O desenvolvimento de sistemas especialistas apresenta três fases especiais: planejamento, aquisição de conhecimento e implementação, resumidos na Figura 3.3.

FASE I	PLANEJAMENTO
Domínio	- Especificar objetivos - Definir problemas - Desenvolver controles e medidas
FASE II	ENGENHARIA DE CONHECIMENTO
Especialista	- Seleção de especialistas - Extração de conhecimento - Desenvolvimento da base de conhecimento
FASE III	IMPLEMENTAÇÃO
Usuário	- Programação - Teste preliminar - Refinamento

Figura 3.3 - Fases do desenvolvimento de um sistema especialista.

A fase de planejamento consiste em determinar as características básicas do problema a ser resolvido. O estudo é feito para a área em que o sistema atuará, são estudados os objetivos a serem cobertos e bem delimitados os problemas que o sistema será capaz de resolver (Ribeiro, 1987). Já a

fase de aquisição do conhecimento trata-se de toda manipulação do conhecimento envolvida no desenvolvimento de um SE, como a seleção de especialistas no assunto, a aquisição de conhecimento e a formação da base de conhecimento. Por fim, a fase de implementação se dá em dois níveis: no nível do especialista são levantados os conceitos e regras de sua área de conhecimento, segundo estratégias e hierarquias definidas na fase anterior; no nível do engenheiro do conhecimento a implementação é feita verificando-se o modo de representação física no computador, procurando contornar os problemas da memória física e os problemas de processamento. Adaptam-se as regras e conceitos determinados pelo especialista da área às estruturas determinadas previamente e de acordo com a linguagem a ser utilizada para a implementação.

Capítulo 4

Arquitetura do Sistema de Medida de Escoamento Bifásico e Levantamento dos Sinais da Base de Conhecimento

Este capítulo descreve a arquitetura do sistema de medida de escoamento bifásico que é constituído pelo aparato experimental; pelo transdutor e condicionador de sinais que juntos formam o instrumento de medição de fração de gás; pela rede de comunicação e pelo sistema de supervisão do sistema de medidas com respectiva interface.

4.1 Aparato Experimental e Levantamento dos Dados para a Formação da Base de Conhecimento do SE

O objetivo do aparato experimental é simular ou reproduzir o escoamento bifásico em laboratório, e pode ser utilizado para muitos fins, estudo do comportamento do escoamento, verificar a eficiência dos algoritmos, modelos, equações, simuladores computacionais e também para reproduzir os padrões.

O aparato experimental foi construído em cima de uma treliça articulada com 8200 mm de extensão. A articulação da treliça permite posicionar linha experimental com uma inclinação que pode ser variada continuamente entre zero grau correspondendo a vertical a 95 graus. A linha é um trecho reto de tubulação de acrílico transparente com 26 mm de diâmetro interno e comprimento total de 7956 mm ou 306 diâmetros livres. A Figura 4.1 traz uma representação esquemática do circuito. O líquido opera em circuito fechado. Uma bomba centrífuga recebe o líquido do reservatório e descarrega na linha com pressão, temperatura e a vazão mássica monitoradas. O gás empregado

nos testes é ar comprimido. O ar comprimido é armazenado a uma pressão entre 8 a 10 barg em um tanque com volume de 2 N.m³. O gás tem sua pressão, temperatura e vazão monitorados.

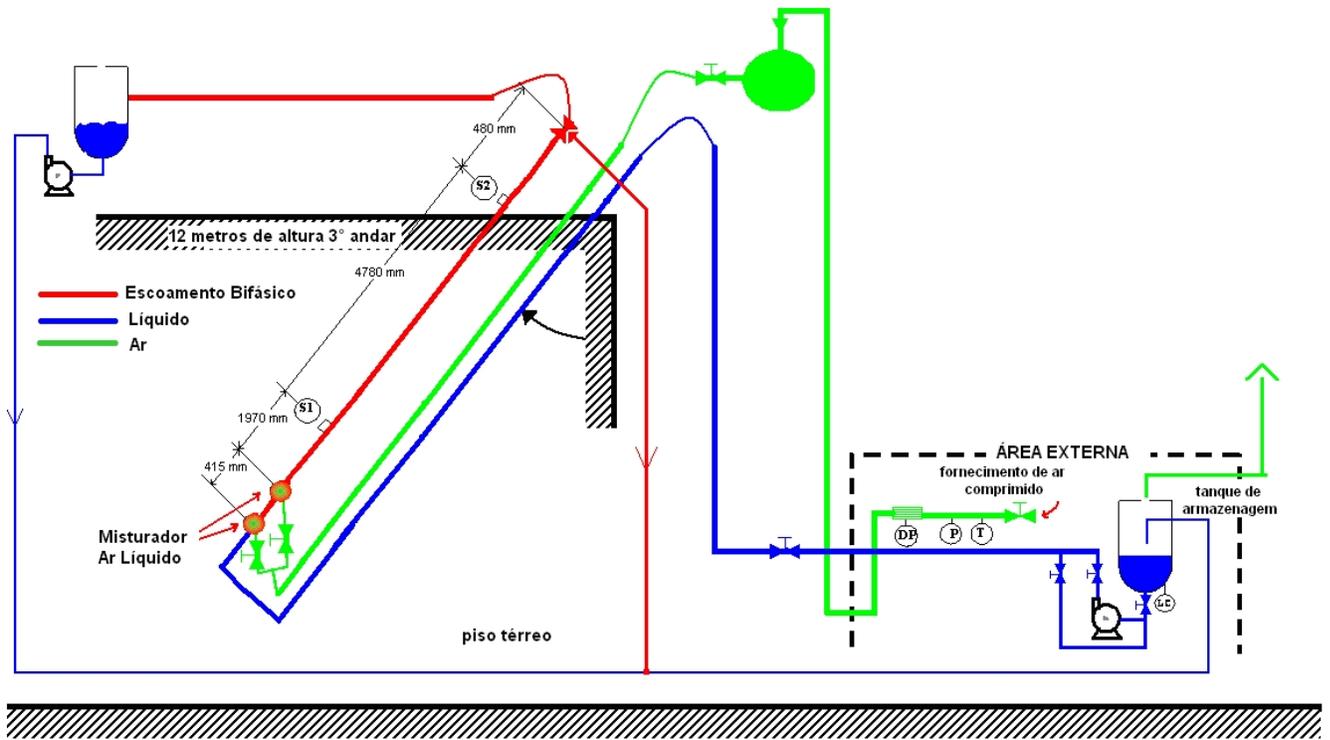


Figura 4.1 - Representação esquemática do circuito de testes com inclinação variável entre 0 grau (vertical) e 95 graus.

As linhas de transporte de gás e líquido estão conectadas à treliça por meio de mangueiras flexíveis localizadas próximo ao ponto de articulação da treliça. A treliça, por sua vez, possui duas outras linhas que transportam o gás e o líquido para sua extremidade inferior. O escoamento bifásico é realizado por meio de dois misturadores, um para alta e outro para baixa vazão de gás, localizados na extremidade inferior da linha. Por meio de um jogo de válvulas de bloqueio, pode-se selecionar cada um deles isoladamente. O escoamento bifásico passa por duas estações de medição (S1 e S2) que tem por finalidade monitorar a passagem das bolhas, a pressão e a temperatura da mistura. As estações estão localizadas a $77D$ e a $257D$ diâmetros livres a jusante do misturador gás-líquido. Após a segunda estação de medida a mistura percorre uma distância equivalente a $49D$, faz uma curva de 180 graus com um raio de 200 mm numa mangueira flexível de 37 mm de diâmetro para depois ser direcionada a um tubo vertical com 6000 mm de altura e 75 mm de diâmetro. Uma das extremidades do tubo vertical é aberta para atmosfera enquanto que a outra extremidade está

conectada ao tanque de armazenamento de água. Este tubo vertical de maior diâmetro atua como um separador ar-água de forma que o ar é livremente descarregado para atmosfera enquanto que a água é dirigida ao tanque de armazenamento pela ação da gravidade. Alternativamente a descarga da linha pode ser conectada ao circuito horizontal existente estendendo a seção de testes.

A Figura 4.2 mostra uma seqüência de fotos ilustrando o movimento angular da linha bifásica suportada pela treliça. O controle do ângulo de inclinação é realizado por meio do sistema supervísório. A medida da posição angular é realizada por um encoder. O operador define uma posição angular em graus e o sistema atua na talha de elevação até elevar a treliça na posição angular desejada.

Foi instalado na linha duas válvulas de fechamento rápido por acionamento pneumático para avaliação da fração de gás média, que é uma possibilidade para medições de fração de gás, mas que neste trabalho não foram utilizadas. A Figura 4.3 mostra em destaque o posicionamento das válvulas além de identificar a estação de medidas 2 com seus instrumentos de medição de fração de gás e caixa de conexão. O acionamento das válvulas é realizado por meio do sistema supervísório. O supervísório envia um sinal que atua num relê e aciona os atuadores pneumáticos para fechar ou abrir as válvulas. Por meio de filmagem foi possível determinar que o tempo de fechamento e abertura é de 0,25 segundos. O volume de líquido capturado é medido por meio de um transmissor de pressão.

O tubo de 26 mm de diâmetro descarrega numa mangueira flexível de 50 mm de diâmetro que possui sua outra extremidade conectada a um tubo vertical rígido de 100 mm. O tubo age como um separador ar-água. Sua extremidade superior é aberta para atmosfera e permite que o ar da linha bifásica seja aliviado. Na extremidade inferior a água é coletada e descarrega por gravidade ao tanque de armazenamento.

Em cada estação, os padrões de escoamento são monitorados por dois instrumentos de medição de fração de gás espaçados de 112,5 mm entre si. Cada estação de medida tem seus instrumentos conectados a uma caixa de conexão que tem por finalidade comunicar-se com o sistema supervísório.

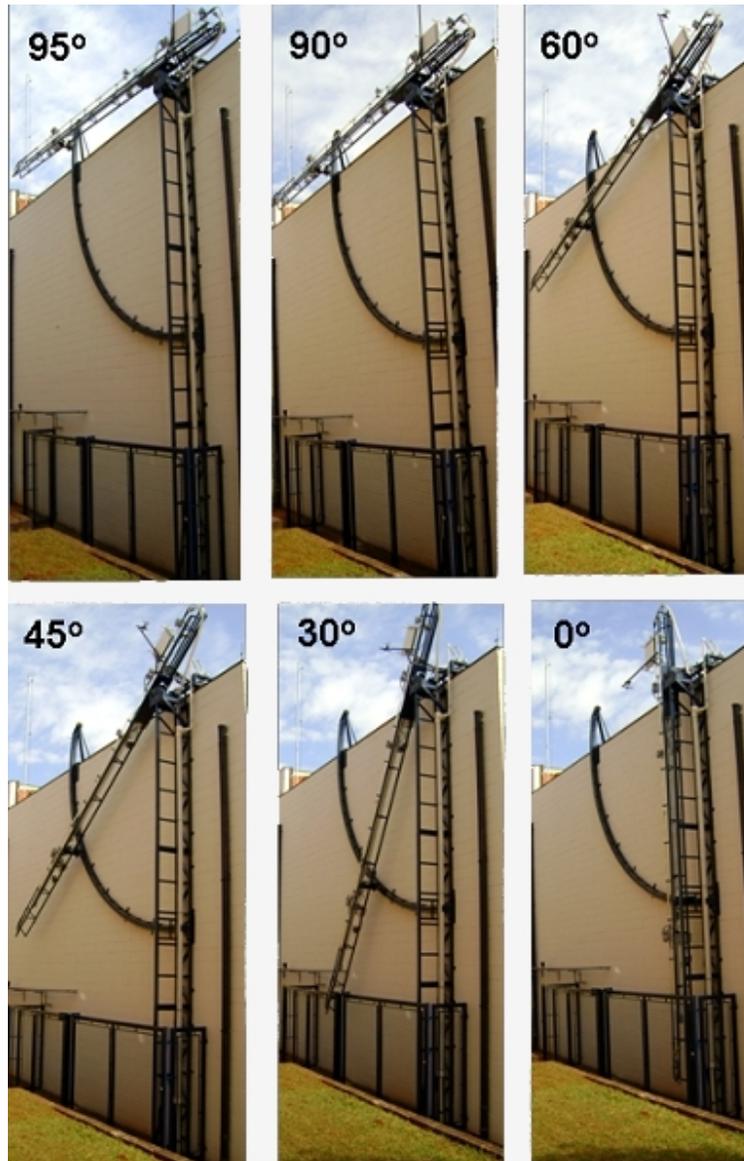


Figura 4.2 - Sequencia de fotos exibindo a inclinação variável da linha bifásica

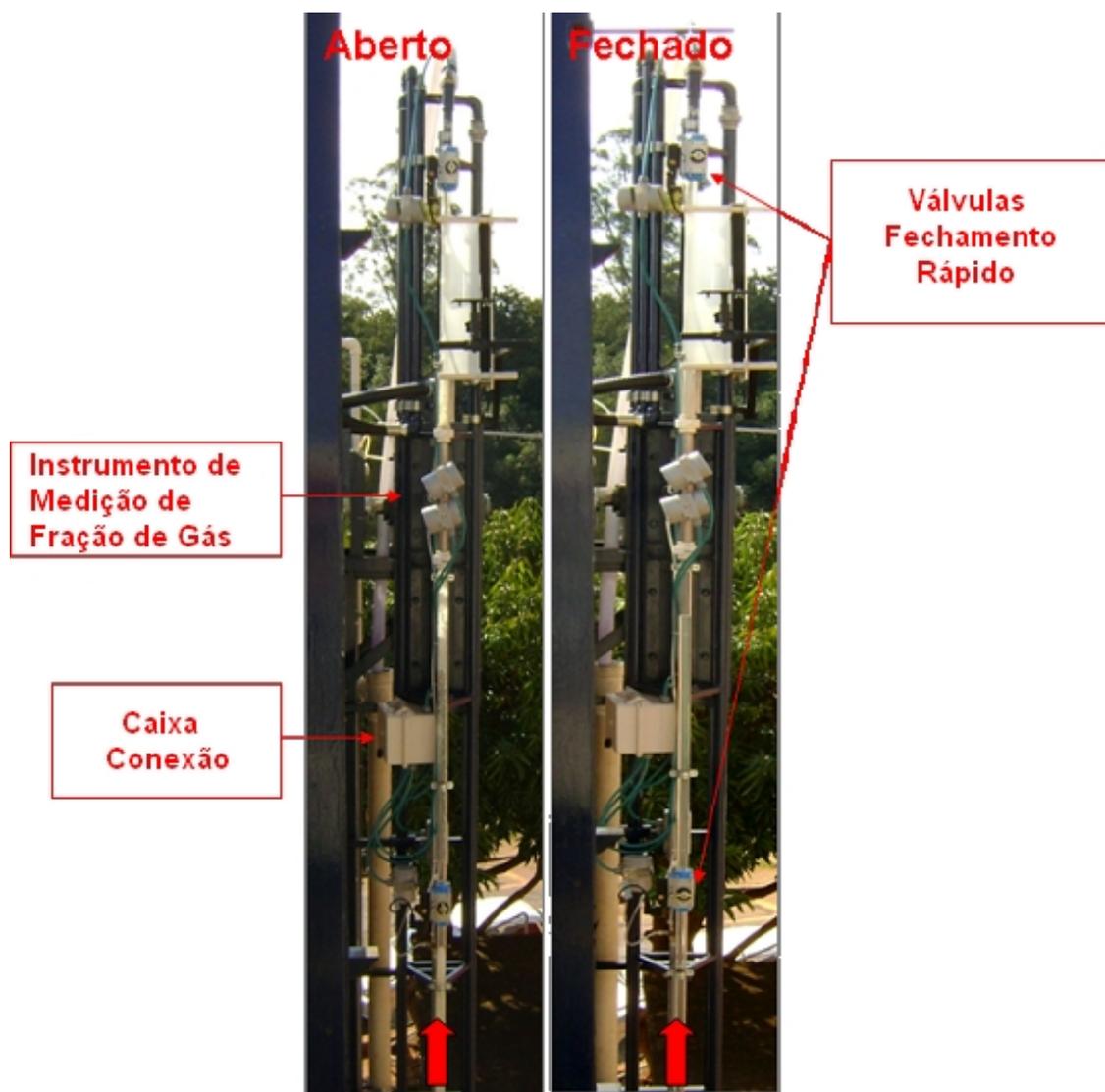


Figura 4.3 - Identificação das válvulas de fechamento rápido, sensores de impedância e caixa de conexão na vizinhança da estação de medida 2 posicionada a 260D a jusante do misturador

Os sinais para a formação da base de conhecimento do SE, foram adquiridos utilizando-se a estação de medida 2. A estação de medida 1, por estar mais próxima do misturador, traz uma forte influência das condições de entrada do misturador por não permitir que a mistura tenha tempo suficiente para desenvolver os padrões de escoamento ao atingir a estação de medida 1.

Os diversos padrões de escoamento (tubulação cheia de líquido, bolhas, intermitente, anular e tubulação vazia de líquido) foram produzidos variando-se a velocidade superficial do líquido e do gás (J_L e J_G) através do sistema supervisor. Desta forma, para se formar um determinado padrão de escoamento os valores de J_L e J_G são parâmetros de entrada do sistema supervisor que controla todo o aparato experimental a fim de que o padrão de escoamento seja produzido. Após o padrão de escoamento entrar em regime estacionário, inicia-se o processo de aquisição através do instrumento de medição de fração de gás, utilizando-se uma frequência de 1 KHz durante um período de 4 segundos com a treliça na posição vertical (0 grau). Como a seção de testes é transparente, é possível a visualização dos padrões de escoamento durante a realização dos testes, dessa forma, é realizada uma identificação visual destes padrões, produzidos pelo aparato experimental. Assim que o padrão é adquirido, este é gravado em um arquivo .txt sendo nomeado de acordo com a identificação feita pelo especialista humano.

Para a formação da base de conhecimento do SE foram adquiridos 99 sinais, de forma que a base de conhecimento possua todos os subpadrões de escoamento. A seguir é apresentada a Tabela 4.1 que especificam os sinais adquiridos para compor a base de conhecimento.

Tabela 4.1 - Aquisições no Escoamento Vertical

Aquisição	Subpadrão	Aquisição	Subpadrão
1	Bolhas	51	Golfadas
2	Bolhas	52	Golfadas
3	Bolhas	53	Golfadas
4	Bolhas	54	Golfadas
5	Bolhas	55	Golfadas
6	Bolhas	56	Golfadas
7	Capa Esférica	57	Golfadas
8	Capa Esférica	58	Golfadas
9	Capa Esférica	59	Golfadas
10	Capa Esférica	60	Golfadas
11	Capa Esférica	61	Golfadas
12	Capa Esférica	62	Golfadas
13	Capa Esférica	63	Golfadas
14	Capa Esférica	64	Golfadas
15	Capa Esférica	65	Agitado
16	Capa Esférica	66	Agitado
17	Capa Esférica	67	Agitado
18	Capa Esférica	68	Agitado
19	Capa Esférica	69	Agitado
20	Capa Esférica	70	Agitado
21	Capa Esférica	71	Agitado
22	Capa Esférica	72	Agitado
23	Capa Esférica	73	Agitado
24	Capa Esférica	74	Agitado
25	Capa Esférica	75	Agitado
26	Capa Esférica	76	Agitado
27	Capa Esférica	77	Agitado
28	Capa Esférica	78	Agitado
29	Capa Esférica	79	Semi-Anular
30	Capa Esférica	80	Semi-Anular
31	Capa Esférica	81	Semi-Anular
32	Golfadas	82	Semi-Anular
33	Golfadas	83	Semi-Anular
34	Golfadas	84	Semi-Anular
35	Golfadas	85	Anular
36	Golfadas	86	Anular
37	Golfadas	87	Anular
38	Golfadas	88	Anular
39	Golfadas	89	Anular
40	Golfadas	90	Anular
41	Golfadas	91	Anular
42	Golfadas	92	Anular
43	Golfadas	93	Tubo Cheio
44	Golfadas	94	Tubo Cheio
45	Golfadas	95	Tubo Cheio
46	Golfadas	96	Tubo Vazio
47	Golfadas	97	Tubo Vazio
48	Golfadas	98	Tubo Vazio
49	Golfadas	99	Tubo Vazio
50	Golfadas		

A Figura 4.4 mostra os primeiros 2 segundos de alguns sinais (tubulação cheia, bolhas, intermitente, anular e tubulação vazia) que foram adquiridos com uma frequência de amostragem de 1KHz, cuja amplitude varia entre 1 e 5 volts.

4.2 Sistema de Medidas de Escoamento Bifásico Gás-líquido para Aplicação em Campo

O sistema de medidas de escoamento bifásico gás-líquido para aplicação em campo é constituído pelo instrumento de medição de fração de gás microcontrolado, que é formado pelo transdutor e pelo condicionador de sinais; pela rede de comunicação e pela interface do sistema de medidas implementada na plataforma LabView® baseada em microcomputador. O meio físico utilizado para comunicação entre o instrumento de medição de fração de gás microcontrolado e a interface do sistema é o RS 485 utilizando o protocolo de enlace Modbus-RTU.

A interface do sistema de medidas controla e gerencia todos os instrumentos de medição de fração de gás microcontrolado pertencente à rede de instrumentos, de modo que o operador do sistema tenha acesso às informações dos instrumentos. A interface em LabView® é também o sistema de supervisão do sistema de medidas da fração de gás, atualmente atuando separado do sistema de supervisão do aparato experimental, porém os dois sistemas formarão um só, um sistema de supervisão que controla a formação dos padrões de escoamento na treliça. A interface do sistema de medidas pode ser vista na Figura 4.5.

A comunicação entre o instrumento de medição de fração de gás microcontrolado e a interface do sistema de medidas é de forma serial, utilizando o periférico SCI (Interface Serial Assíncrona) do microcontrolador, e o protocolo de comunicação Modbus. Este protocolo não proprietário é encontrado na maior parte dos instrumentos utilizados na área de automação. Como o sinal deve cobrir grandes distâncias em um par trançado, foi escolhido o padrão RS 485 que utiliza comunicação balanceada, e esta é implementada através do CI ADM485, Figura 4.6.

No protocolo Modbus a comunicação é baseada em mestre-escravo, Figura 4.7, onde tem-se um único mestre conectado a N-escravos, onde o mestre é a interface do sistema de medidas desenvolvida na plataforma de programação LabView®, e os escravos são os instrumentos de medição

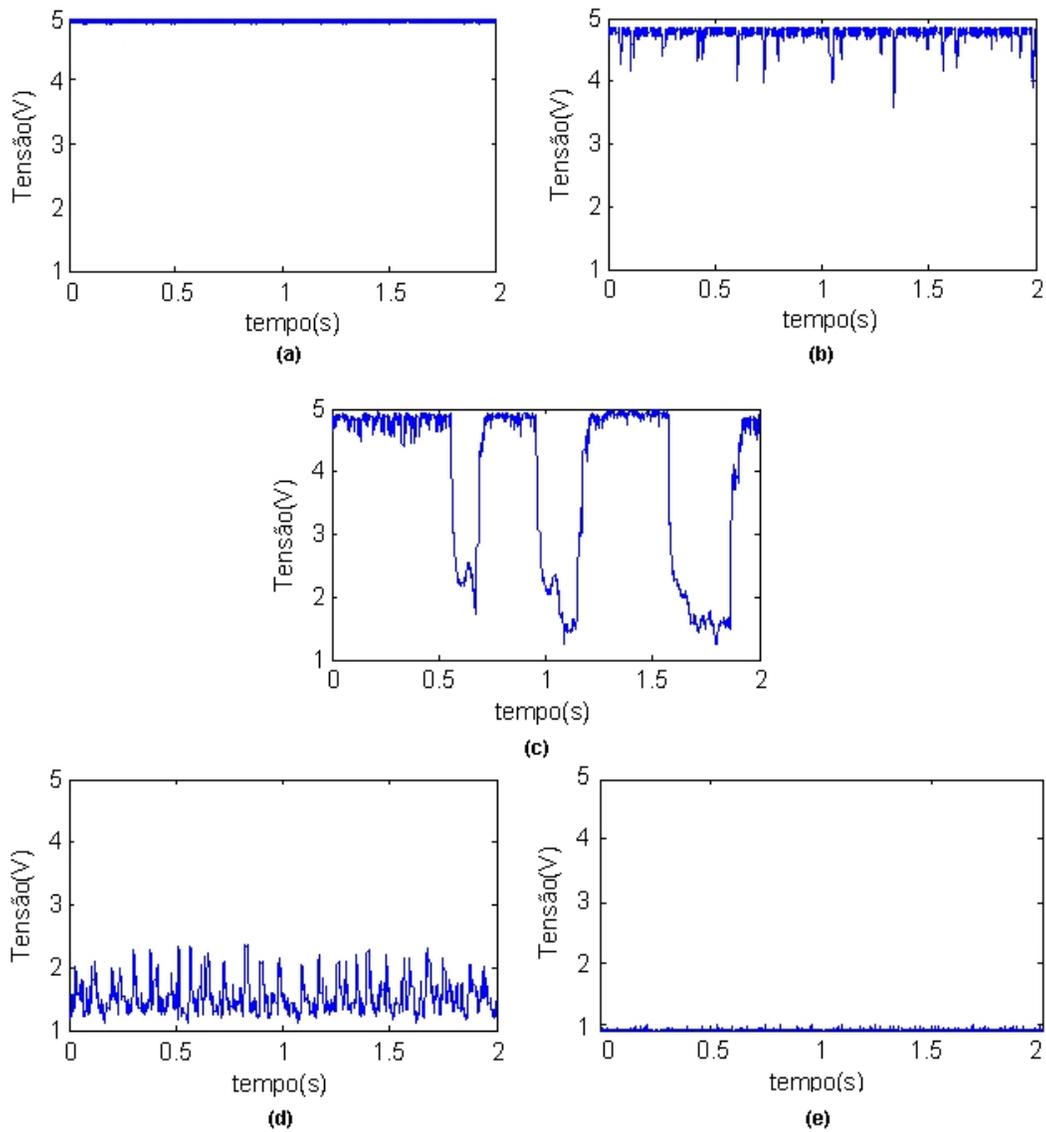


Figura 4.4 - Dois primeiros segundos de sinais adquiridos com uma frequência de 1KHz: (a) tubulação cheia de líquido (b) bolhas (c) intermitente (d) anular (e) tubulação cheia de gás.

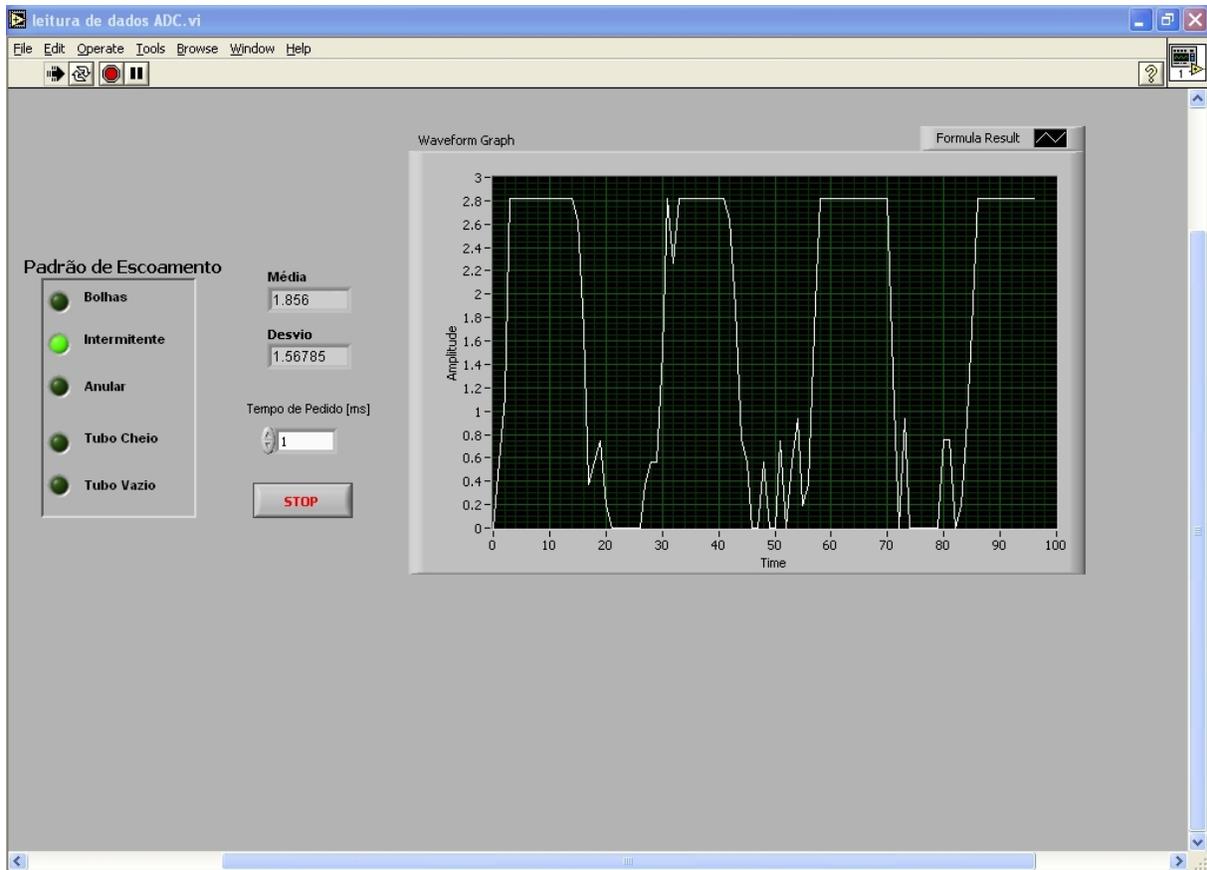


Figura 4.5 - Interface do sistema supervisorio na plataforma LabView

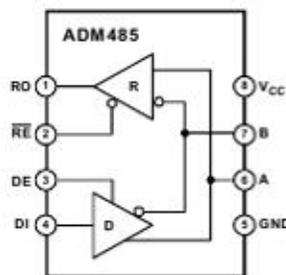


Figura 4.6 - Circuito integrado para a comunicação serial

de fração de gás microcontrolados.

Os parâmetros utilizados na comunicação serial Modbus são: a taxa de comunicação (38,400 Kbps) e o modo de comunicação (RTU). A comunicação Modbus sempre se inicia por iniciativa do mestre, o qual estará constantemente pedindo aos escravos informações sobre o sinal adquirido.

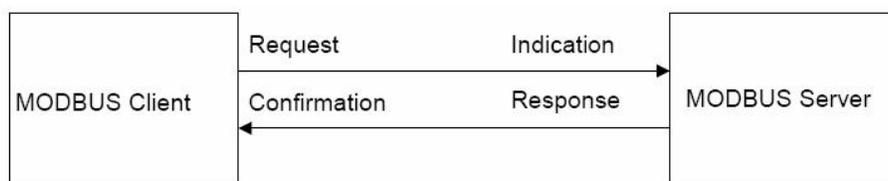


Figura 4.7 - Modelo de comunicação Modbus mestre-escravo

A Figura 4.8 ilustra o frame típico utilizado na comunicação Modbus e a quantidade de bytes usados para cada componente do frame. O primeiro byte deverá ser o endereço do instrumento de medição de fração de gás microcontrolado (escravo), pertencente à rede de instrumentos, que receberá o comando ou a requisição de dados. O instrumento de medição de fração de gás microcontrolado recebe o frame proveniente da interface do sistema de medida e verifica se o endereço indicado corresponde ao seu endereço para assim poder prosseguir, caso contrário, o frame recebido é descartado. A comunicação Modbus tem 247 endereços válidos, podendo desta forma, ter até 247 escravos conectados a um mestre, desta forma, a rede de instrumentos do sistema de medida suporta até 247 instrumentos de medição de fração de gás microcontrolado.

Endereço	Código Função	Dados	CRC
1 byte	1 byte	N*bytes	2bytes

Figura 4.8 - Frame utilizado na comunicação Modbus

O campo Função possui uma faixa de 1 a 255 e determina o que o instrumento de medição de fração de gás microcontrolado deverá fazer. Como a interface está constantemente solicitando informações do sinal do escoamento ao microcontrolado, a função implementada no protocolo Modbus é a função de leitura (04).

Já o campo Dados se refere aos dados transmitidos durante a comunicação, tendo a capacidade de transmitir até 252 bytes a cada frame. Quando a interface do sistema deseja ler um grupo de registradores do instrumento de medição de fração de gás microcontrolado, ela informa neste campo a quantidade de registradores que deverá ser lido e o endereço inicial do primeiro registrador, enquanto que o instrumento, na resposta, envia os dados para a interface do sistema utilizando este campo. Neste trabalho, usa-se uma quantidade de 104 registradores (208 bytes) a cada requisição realizada pelo mestre, com 100 registradores para enviar os dados adquiridos do microcontrolador

de modo que seja construído na interface um histograma para facilitar a visualização dos dados, 2 registradores para os valores de média e desvio padrão, 1 registrador para o resultado da classificação do sinal e 1 registrador para o valor de máxima tensão que ADC está lendo.

Os últimos dois bytes do frame de comunicação se referem ao CRC (Código de Correção de Erros). Estes dois bytes resultam de um cálculo realizado com todos os bytes anteriores. O instrumento de medição de fração de gás ao receber o frame deverá recalculá-lo e compará-lo com o CRC recebido. Caso estes valores não sejam iguais, o frame recebido sofreu um erro em algum bit e uma exceção será gerada.

O sistema de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido foi embarcado na memória flash do microcontrolador do instrumento de medição de fração de gás. Desta forma, o instrumento de medição de fração de gás microcontrolado adquire o sinal referente à fração de gás do escoamento, extrai suas características e o classifica em padrões de escoamento, utilizando os SEs. Para a formação da base de conhecimento do SE os sinais da fração de gás foram adquiridos por um instrumento de medição de fração de gás microcontrolado instalado em um aparato experimental descrito na Seção 4.1. O resultado obtido na classificação, utilizando SEs, é enviado à interface do sistema de medidas para que o operador visualize o resultado do reconhecimento.

4.2.1 Instrumento de Medição de Fração de Gás Microcontrolado

O medidor de fração de gás, baseado na medida da impedância, utilizado neste trabalho foi projetado para uso em tubulações encontradas nas montagens de laboratório ou no campo em linhas de produção ou transporte e seu sistema, *firmware*, embarcado é programável. Este sistema embarcado é dedicado às tarefas de medida de fração de gás e reconhecimento de padrões, e por isso são otimizadas reduzindo o tamanho e os custos, além disto proporcionam maior modularidade e miniaturização e menos ligações são necessárias aumentando a confiabilidade do sistema. O sistema está conectado a rede de instrumentos via Interface de Comunicação Serial (SCI) o qual é convertida para RS-485 para atingir distâncias de 1200 m.

O instrumento de medição de fração de gás microcontrolado ou sensor de impedâncias micro-

controlado é formado por um transdutor de haste metálica inserida transversalmente na tubulação metálica, veja Mastelari et al. (2005), e por um condicionador de sinais, integrado à um microcontrolador TMS320F2808 da empresa Texas Instruments, que torna o sinal do transdutor adequado à rede de instrumentos.

O instrumento de medição de fração de gás microcontrolado é o responsável pela aquisição dos sinais provenientes do escoamento bifásico gás-líquido e é o mesmo que é utilizado no aparato experimental da Seção 4.1. O transdutor que está ilustrado na Figura 4.9 utiliza a tubulação como um dos eletrodos e referência elétrica, a haste metálica representa o segundo eletrodo e a mistura gás e líquido é o meio que envolve os dois eletrodos. O transdutor é intrusivo e voltado para aplicações de campo, a tubulação é uma das placas do sensor e está ligada à referência elétrica do sistema, a haste é de aço inox e tem contato direto com o escoamento. A detecção das fases ocorre devido à diferença entre as impedâncias das fases gás e líquido. Este transdutor foi testado com diferentes fluídos de acordo com o trabalho de Rosa et al. (2008): óleo SAE 20-50, água deionizada, água comum e água salgada 60 g/l e independente das características elétricas da fase líquida, a medida da corrente no conjunto no padrão estratificado é proporcional a altura do líquido, sendo esta uma desejável qualidade deste sensor. A impedância é formada por componentes resistivos e capacitivos, portanto é dependente da frequência de excitação.

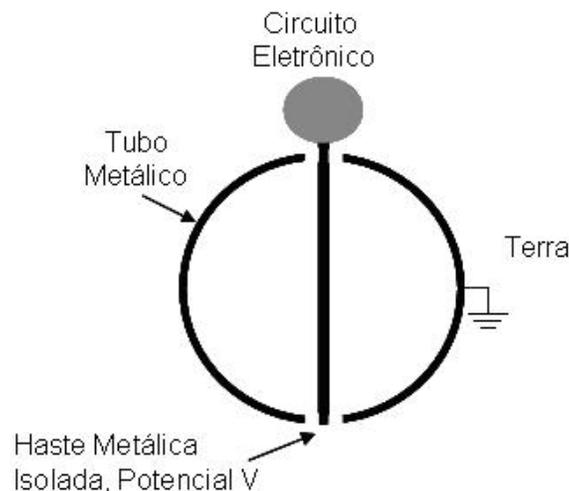


Figura 4.9 - Representação do Sensor de Impedância

Impedância é a grandeza elétrica que relaciona a corrente que flui por um dispositivo com a tensão de excitação a que ele está submetido. Em geral é definida como a oposição que um

dispositivo ou material oferece ao fluxo de uma corrente alternada em uma dada frequência, e é representada por uma quantidade complexa. A impedância Z de um fluxo medido entre dois eletrodos pode ser expressa pela Equação 4.1, Song et al. (1998).

$$Z(f) = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{j\omega C_p} + R} + j\omega C_d} \quad (4.1)$$

Onde R é a resistência correspondendo à condutividade do fluido, C_p é a capacitância devido à polarização das moléculas do fluido próxima aos eletrodos devido ao efeito de dupla camada, C_d é a capacitância devido à constante dielétrica do fluido e f é a frequência de excitação em corrente alternada submetida aos eletrodos. A capacitância de polarização é dependente da geometria da interface eletrodo eletrólito, do material do eletrodo, da concentração do eletrólito, (Mirtaheri et al., 2005), é também uma função da frequência, ela decresce com o seu aumento, como função da frequência com expoente negativo. Seus efeitos estão presentes quando a fase líquida contém íons, tal como água salgada, porém estes podem ser minimizados utilizando-se frequências de excitação altas, acima de 100 KHz.

O escoamento gás-líquido pode ser analisado pela medida da impedância da mistura uma vez que existe uma diferença significativa das propriedades elétricas das duas fases. Se aplicarmos a um sensor de impedâncias uma tensão de excitação senoidal com amplitude constante a corrente elétrica (I), o qual é inversamente proporcional à impedância Z pode ser expressa pela Equação 4.2:

$$I = \frac{V_e}{Z} = YV_e = V_e(G + jB); G = \frac{1}{R}; B = \omega C_d \quad (4.2)$$

Onde V_e é a tensão de excitação; Y é a admitância do processo, G é a condutividade, B é a susceptância e $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular em rad/s. É importante observar que a corrente elétrica é diretamente proporcional à admitância Y e que ela cresce quando a fase líquida flui pela tubulação.

Há muitas técnicas para se medir impedância, para a escolha da técnica mais adequada para uma aplicação é importante se determinar os requerimentos e necessidades específicas para a situações como faixa de frequência de trabalho, abrangência da faixa de medidas, exatidão das medidas, facilidade de implementação e operação da técnica, imunidade a interferência elétrica externa. Entre as técnicas utilizados destacam-se: Ponte de Wheatstone, medida da constante de tempo, ponte auto-balanceada, conversão corrente tensão.

A ponte de Wheatstone é um método que a partir dos valores conhecidos dos braços da ponte calcula-se o valor da impedância desconhecida. É um método de baixo custo que apresenta medidas com grande precisão em uma faixa de frequências grande, porém tem a desvantagem da necessidade de ser balanceada para cada faixa de medida, o que torna um método difícil de ser automatizado. O método de carga descarga, ou medida da constante de tempo foi utilizada com sucesso por Huang et al. (1988), para medida de capacitâncias, porém para medida de impedâncias com pequenas magnitudes a constante de tempo pode ficar muito grande tornando a técnica difícil de ser aplicada em processos dinâmicos.

No método da ponte auto-balanceada, Figura 4.10, um amplificador operacional é utilizado para gerar um terra virtual, e a corrente flui para um resistor de carga R . Se o resistor de carga R for mantido suficientemente baixo, o arranjo apresenta baixa impedância qualidade extremamente importante pois proporciona medidas precisas é torna o método intrinsecamente imune a ruídos. Além disto o método fica pouco sensível à impedância de entrada do amplificador operacional utilizado. Este método apresenta alta precisão para uma faixa bastante larga de impedâncias é simples de ser implementado e é de fácil operação, porém em altas frequências (acima de 500 KHz) o método fica muito dependente da eficiência do amplificador operacional, outra desvantagem é na medida de impedâncias muito pequenas, abaixo de 1 Ohm, neste caso a configuração da ponte tem que ser alterada, trocando-se R por Z_x no arranjo da Figura 4.10. Este método é muito eficiente quando ambos os eletrodos estão flutuando, ou seja, não são aterrados, quando isto ocorre apresenta-se um impedimento para a medida da impedância, pois se a impedância estiver aterrada, a corrente irá para o terra e não para o resistor de carga. É possível isolar a referência da ponte auto-balanceada da referência do sistema, porém neste caso o sistema fica extremamente sensível a EMI (interferência eletromagnética) inviabilizando a solução.

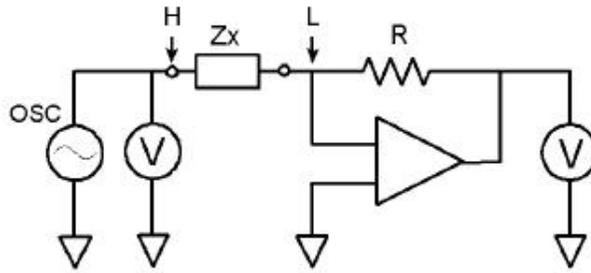
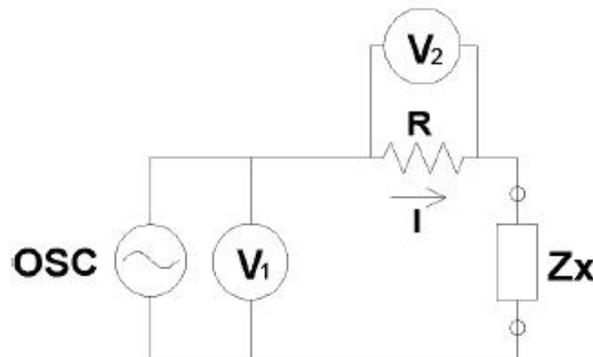


Figura 4.10 - Ponte auto-balanceada

No método da conversão corrente (Figura 4.11) para tensão a impedância é calculada a partir da medida de tensões e correntes. O valor de corrente é obtido pela tensão medida sobre um resistor conhecido R denominado resistor de carga. É um método simples conceitualmente e pode ser utilizado em uma faixa muito grande de impedâncias, e é fácil de ser configurado e aferido a partir da frequência e amplitude da tensão de excitação e do valor do resistor de carga, além disto, é especialmente adequado para a medida de dispositivos diretamente ligados a referência (aterrados). Este método é particularmente sensível à impedância de entrada do dispositivo de medida.



$$Z_x = \frac{V_1}{I} = \frac{V_1}{V_2} R$$

Figura 4.11 - Método da conversão corrente-tensão

Idealmente a impedância Z do escoamento medido através do transdutor é formada por: R - Resistência do fluido; C - Capacitância devido a constante dielétrica do fluido. Para uma dada frequência se o fluido for composto apenas de óleo a característica elétrica é preponderantemente capacitiva C , conforme o fluido apresenta uma porcentagem maior de água a sua característica

torna-se mais condutiva, assim o parâmetro R vai se tornando preponderante. A configuração básica do instrumento baseado na técnica conversão corrente tensão é apresentado pela Figura 4.12. Onde R_c é um resistor de carga e V é a tensão de excitação senoidal. A resistência de carga é mantida suficientemente pequena. A tensão medida sobre o resistor de carga R_c é diretamente proporcional à impedância do fluido (Z), então a tensão V_m proporciona a informação para a análise do escoamento bifásico.

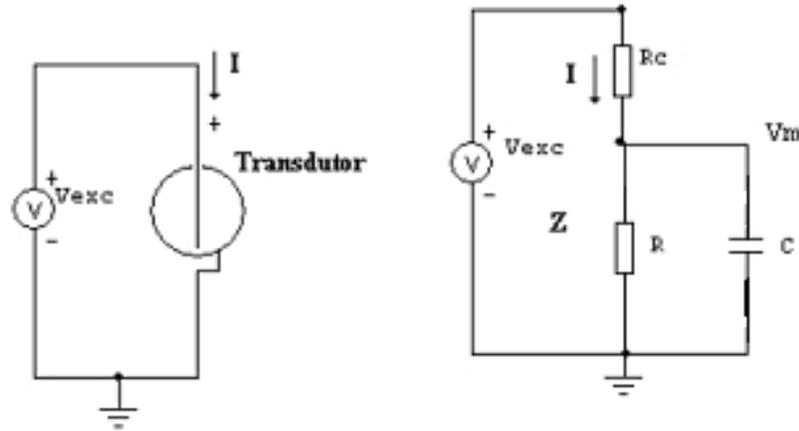


Figura 4.12 - Modelo equivalente elétrico do sensor de impedâncias

O princípio básico de operação do instrumento considerando as capacitâncias parasitas e a impedância de entrada do instrumento ampliando o modelo é apresentado na Figura 4.13. Este circuito utiliza o princípio da conversão corrente tensão. Este método tem como característica a sua simplicidade conceitual e por ser adequado a sensores que tem um dos seus terminais ligados à referência do sistema. No circuito apresentado R_c é o resistor de carga, e seu valor é conhecido previamente, através dele é possível o cálculo da corrente que passa pelo sensor representado pela impedância Z . C_s representa todas as capacitâncias parasitas entre o eletrodo, incluindo a ligações do instrumento de medida com o transdutor, e a referência. Z_{in} representa a impedância de entrada do medidor, porém representada isoladamente dele e finalmente o circuito de medida representado de forma ideal, o qual mede a fase e a tensão do sinal V_m . As capacitâncias parasitas C_s e a impedância de entrada Z_{in} afetam mais as medidas quando o valor de Z é grande. Sob esta circunstância, as capacitâncias parasitas C_s o qual estão efetivamente em paralelo com a impedância do processo Z podem ser minimizadas utilizando guardas ativos. O guarda é formado colocando-se uma camada entre o eletrodo ativo e o aterrado de tal forma que não se forme uma capacitância direta entre eles. Neste sistema que é baseado na excitação senoidal o guarda pode ser alimentado

utilizando-se um seguidor da tensão do eletrodo ativo, assim a capacitância entre este e o eletrodo aterrado será minimizada. A eficiência do eletrodo de guarda depende do erro de ganho e no desvio da fase deste seguidor, Huang et al. (1988).

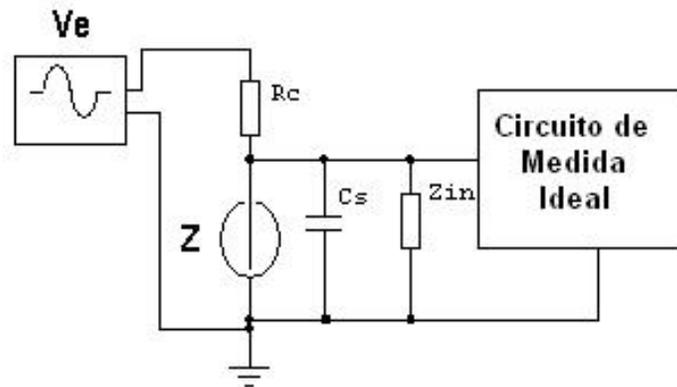


Figura 4.13 - Princípio básico do instrumento de medida

Para grandes valores de impedâncias, Z , a impedância de entrada Z_{in} do instrumento pode influenciar as medidas caso seu valor esteja na ordem de grandeza de Z . Neste caso o seu valor deve ser medido em laboratório e considerado nos cálculos da impedância para corrigir as distorções utilizando a Equação 4.3. Na Equação 4.3 considera-se a reatância capacitiva devido as capacitâncias parasitas $X_{cs} < Z$, e o instrumento com ganho unitário.

$$\frac{V_{out}}{V_e} = \frac{Z // Z_{in}}{R_c + Z // Z_{in}} \quad (4.3)$$

V_{out} é a tensão de saída, e Z_{in} , assim como Z , são funções da frequência f . Quando o valor de Z é pequeno as impedâncias das ligações afetam significativamente as medidas, para minimizar este problema faz-se as ligações com o sensor seguindo o método de Kelvin.

A Figura 4.14 apresenta o diagrama esquemático do sensor de impedância. O núcleo do instrumento é o divisor resistivo composto pelos resistores de carga, R_{c1} a R_{c5} , a impedância Z e uma fonte de alimentação em corrente alternada senoidal. A medida da tensão entre o resistor de carga e a impedância sob teste Z é obtida por um amplificador operacional com alta impedância de entrada na configuração seguidor de tensão. A variação da impedância modula a amplitude do

sinal em corrente alternada senoidal. A fase é obtida medindo-se o tempo de atraso entre as saídas do comparador ligado ao seguidor com aquele ligado à tensão de excitação. A função ou exclusivo destes sinais apresenta um sinal proporcional à fase. Para eliminar a portadora do sinal de interesse, este sofre uma demodulação síncrona e filtragem passa baixa, selecionando a informação sobre o processo e evitando problema de *aliasing* na conversão analógico digital. A informação de interesse que está na faixa de 0 a 500 Hz. O valor da tensão de excitação é medido por um CI true RMS AD637. Assim os sinais: tensão de excitação V_e , a fase Φ , e amplitude V_p são convertidos de analógico para digital à taxa de 10 Kamostras/s pelo microcontrolador pelo DSP Texas TMS320F2808, que faz o processamento das informações o controle do instrumento, e transmite o sinal por meio de uma interface serial RS485 para o canal de comunicação.

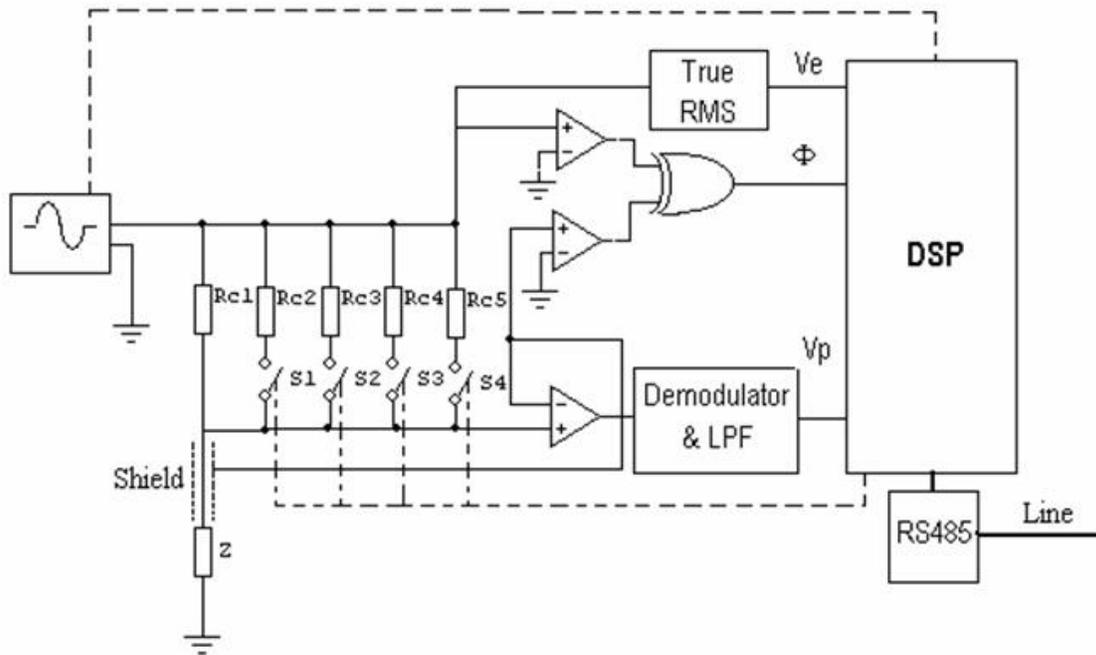


Figura 4.14 - Diagrama esquemático do medidor de impedâncias

Para que o instrumento opere com diferentes fluidos e se adapte as mudanças do meio há três parâmetros de controle: A amplitude V_e da tensão de excitação, a frequência da tensão de excitação f , e o valor do resistor de carga. A tensão de excitação é gerada pelo CI AD9833, este dispositivo pode gerar até três tipos de onda: quadrada, triangular e senoidal e se destaca por possuir um baixíssimo consumo e fácil operação. A resolução das ondas triangular e senoidal é dependente do clock do dispositivo que nesse caso foi feito com clock de 10 MHz. Os sinal senoidal é gerado a partir

de valores de senos armazenados em uma ROM interna ao dispositivo. O seu diagrama em blocos é apresentado pela Figura 4.15. O DSP controla a frequência por meio de uma comunicação SCI e pode assumir valores discretos entre 100 KHz e 1 MHz. Frequências altas facilitam a medida de pequenos valores de capacitâncias, e também minimizam os efeitos da impedância de polarização quando o meio contém soluções iônicas. A amplitude é controlada por meio de um potenciômetro digital e assume valores entre 2,5 volts para impedâncias altas e 0,1 volts para impedâncias baixas. O valor do resistor de carga é alterado selecionando-se um entre os resistores, R_{c1} e R_{c5} , que mantém uma ordem de cinco ordens de grandeza entre o menor e o maior. O valor do resistor de carga é alterado pelo DSP através de micro-switches. Controlando-se estes três parâmetros pode-se ajustar o instrumento para se obter valores mais precisos do escoamento e também adaptá-lo as características do meio.

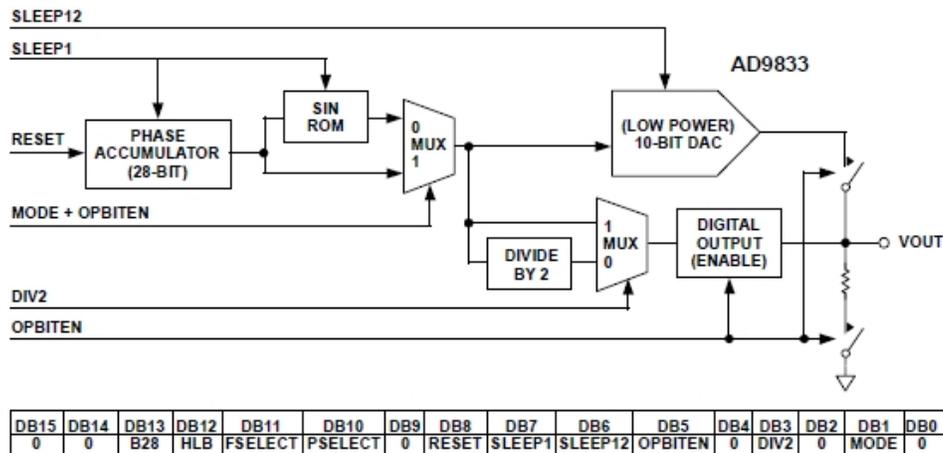


Figura 4.15 - Diagrama em blocos evidenciando o funcionamento do AD9833 e seu registrador de controle

Para realizar a leitura da amplitude de V_m foi escolhido o ADC de 12 bits incluído no microcontrolador TMS320F2808. Para uma operação precisa e estável em temperatura do conversor, no entanto, é necessária uma tensão de referência conectada ao pino ADCREFIN do microcontrolador. Seguindo a recomendação da seção de periféricos do manual do microcontrolador, foi escolhido o CI REF3020 para obter essa tensão, Figura 4.16.

CI REF3020 para obter a tensão de referência, que é obtida no pino 2 V_{out} . Desta forma, tem-se o instrumento de medição de fração de gás microcontrolado que é implantado no aparato experimental possibilitando que sinais dos padrões de escoamento bifásico gás-líquido sejam ad-

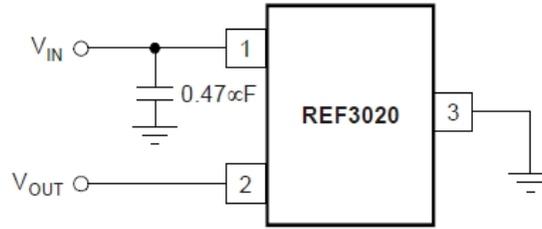


Figura 4.16 - CI REF3020 para obter a tensão de referência, que é obtida no pino 2 V_{out}

quiridos para a formação da base de conhecimento do SE. O SE é utilizado na etapa classificatória do sistema de reconhecimento de padrões implementado no microcontrolador. E através da interface do sistema é possível visualizar o resultado do reconhecimento dos padrões de escoamento e gerenciar os instrumentos de medição de fração de gás microcontrolado.

Cada sensor tem um número na rede e operam como escravos. Um sistema de supervisão baseado no software LabView opera como mestre deste sistema. Toda a interação com os instrumentos se estabelece pelo sistema de supervisão.

Capítulo 5

Implementação do Sistema de Reconhecimento de Padrões de Escoamento Bifásico Gás-líquido

Neste capítulo é abordada a implementação do sistema de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico embarcado no instrumento de medição de fração de gás microcontrolado. São detalhados o microcontrolador e seu kit de desenvolvimento, o eZdsp da *Spectrum Digital*, a extração das características do sinal de fração de gás e a implementação do SE.

5.1 O microcontrolador e o kit de desenvolvimento eZdsp

A opção de utilizar o microcontrolador TMS320F2808 da empresa *Texas Instruments* vem da necessidade de ter um processamento mais rápido, possibilitando um volume de operações significativamente elevado, o qual se mostrou suficiente para suprir as necessidade de cálculos avançados e velocidade de processamento, principalmente no que diz respeito à digitalização (desempenho, velocidade e precisão do ADC) e do processamento dos sinais digitalizados (tratamento e qualificação).

O microcontrolador escolhido está na categoria dos DSP, que são microprocessadores especializados em processamento digital de sinais, o que permite realizar o tratamento e filtragem dos dados com substancial precisão e desempenho. Um outro ponto significativo para o uso deste microcontrolador é a capacidade de armazenamento do *firmware*, sendo que o TMS320F2808 tem 64 Kbytes disponíveis em memória flash. O microcontrolador ainda conta com uma interface serial (SCI) capaz de transmitir e receber dados de um computador remoto. A arquitetura do microcon-

trolador é apresentada na Figura 5.1, onde é possível observar o núcleo de processamento (C28x CPU) interligado às memórias (SARAM, FLASH, OTP e Boot ROM) e aos periféricos (Timers, Sistema de Interrupções, Sistema de Controle, Conversor Analógico Digital e Sistemas de Comunicação). Na Figura 5.2 tem-se um resumo das características deste dispositivo, com especificações dos tamanhos de cada memória, frequência do clock, alimentação, tensão de entrada/saída, níveis de discretização do Conversor Analógico Digital e quantidade de canais PWM.

A implementação do sistema de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico foi realizada através do kit de desenvolvimento do microcontrolador, o eZdsp da empresa *Spectrum Digital*. Este kit fornece recursos de hardware e software com interação gráfica, possibilitando a criação de programas e circuitos. O software de desenvolvimento é o Code Composer Studio e seu uso é permitido somente com o kit de desenvolvimento e a programação é realizada através da linguagem C++. Na Figura 5.3, observa-se a interface gráfica do Code Composer Studio, e na Figura 5.4 o diagrama de blocos do kit de desenvolvimento eZdsp, onde pode ser visualizado a interface JTAG e os periféricos (SCI e ADC).

Para a gravação do programa final na memória flash do microcontrolador (*firmware*), é utilizado um conector JTAG de 14 pinos que permite gravar o *firmware* desenvolvido bem como checar registradores e setar *breakpoints* através do programa Code Composer versão 3.3. O termo JTAG refere-se à gravação *Texas Instruments*, que é baseado no padrão IEEE 1149.1. O kit de desenvolvimento do microcontrolador possui uma pinagem do conector que é usado para comunicação entre o dispositivo JTAG e o microcontrolador no processo de gravação do programa.

5.2 Extração de Características

O reconhecimento dos padrões de um dado processo se baseia na identificação de características determinadas a partir de informações disponíveis sobre o processo. No caso particular da identificação de padrões de escoamento, pretende-se determinar qual o padrão de escoamento em um dado duto, em termos da proporção entre a quantidade de líquido e de gás que passa por uma dada seção do duto (fração de gás).

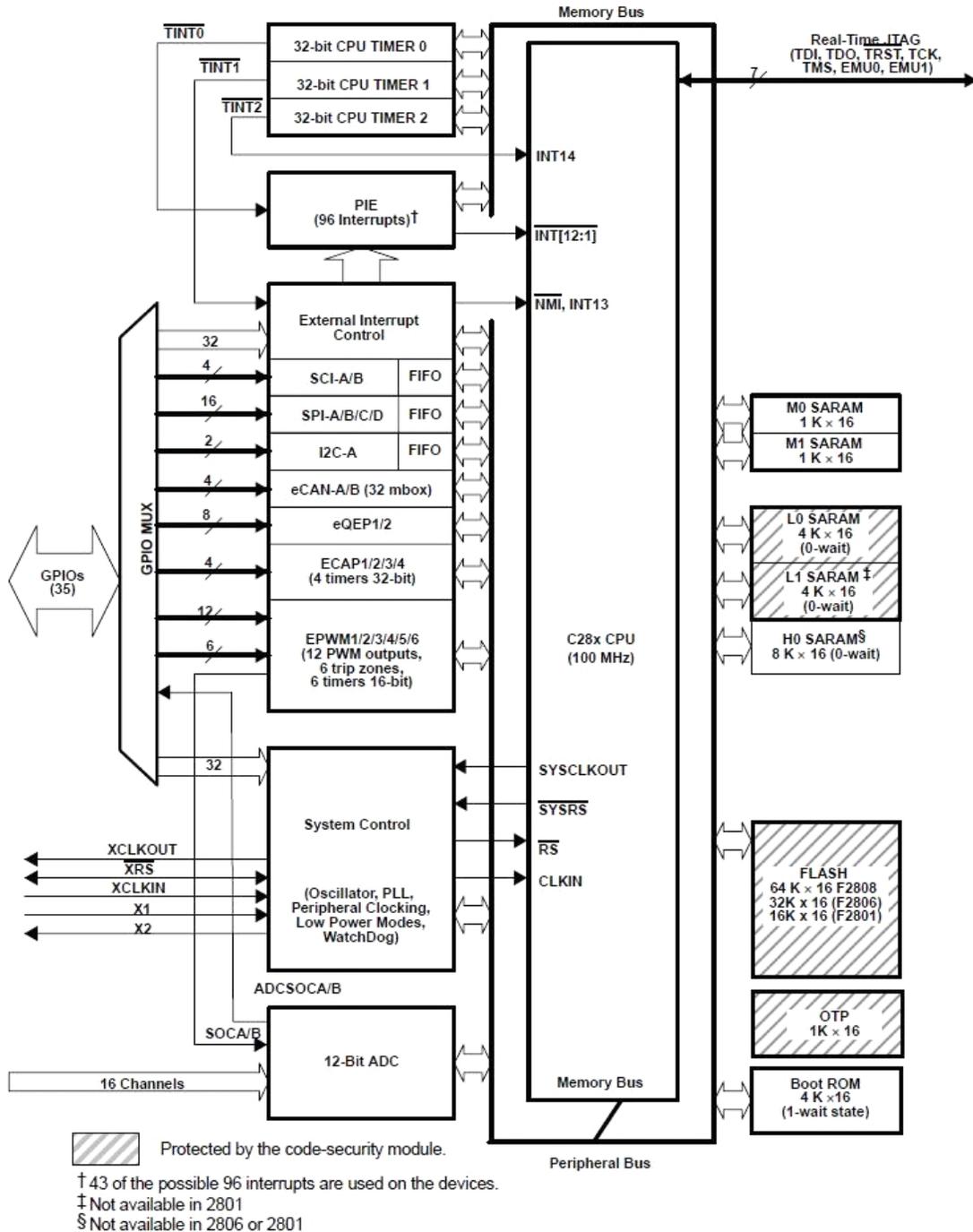


Figura 5.1 - Arquitetura do microcontrolador TMS320F2808.

Como visto anteriormente, a informação que se dispõe sobre o fluxo bifásico em uma dada seção é obtida através de um instrumento de medição de fração de gás microcontrolado. O passo inicial no processo de reconhecimento de padrões é obter o sinal advindo do instrumento de medição de fração de gás (amostragem). Para isto é necessário que a aquisição do sinal seja realizada

Características Gerais:

Clock: 100 Mhz (com prescaler)
Alimentação: 1,8 V
Faixa de temperatura: -40 a 85 °C
Pinagem: 100 pinos
Tensão de entrada/saída: 3,3 V

Memória:

RAM: 36 K
ROM: não tem
OTP-ROM (only time programmed rom): 2 K
Flash: 64 K

Entrada e saída:

GPIO (general purpose in/out): 35 (multiplexado com periféricos)

Temporizadores:

Timers: 2 timers de uso restrito e 1 timer de uso geral e 1 watchdog

Periféricos de comunicação:

Comunicação serial: I2C (1), UART (2), SPI (4) e CAN (2)

Conversor Analógico Digital:

Tempo de conversão: 160 ns
Resolução: 12 bits = 4096 níveis discretos
Canais: 16 canais de entrada (sem filtragem) com um registrador para cada canal
Máxima frequência de amostragem: 12,5 MHz

PWM - Pulse Width Modulation:

Canais: 16 canais

Figura 5.2 - Características do Microcontrolador TMS320F2808.

com uma frequência de amostragem que garanta uma boa representatividade da informação.

Os espectros de frequências para cada padrão de escoamento estudado foram determinados a partir dos sinais adquiridos para a formação da base de conhecimento descritos na Seção 4.1 do Capítulo 4. A metodologia da FFT (Transformada Rápida de Fourier) foi utilizada para esta finalidade. Esta ferramenta possibilita a transformação de um conjunto de dados no domínio do tempo para o domínio da frequência.

A Figura 5.5 apresenta os gráficos de FFT para os padrões bolhas, intermitente e anular. O eixo horizontal representa a frequência em hertz. No eixo vertical são mostrados os valores das magnitudes da FFT, a qual fornece uma idéia da relevância de um determinado valor de frequência no espectro total de frequências.

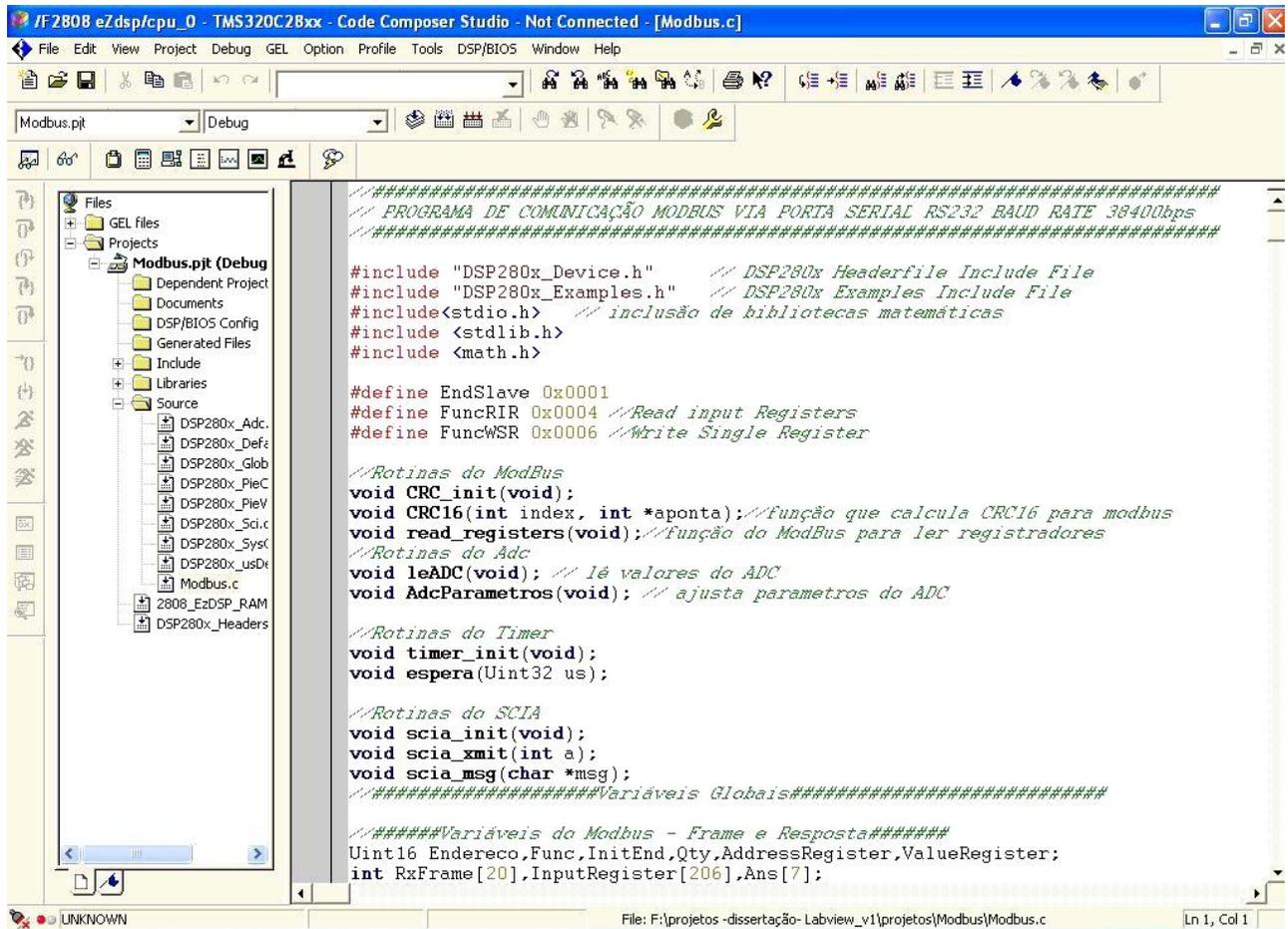


Figura 5.3 - Interface Gráfica do Code Composer Studio.

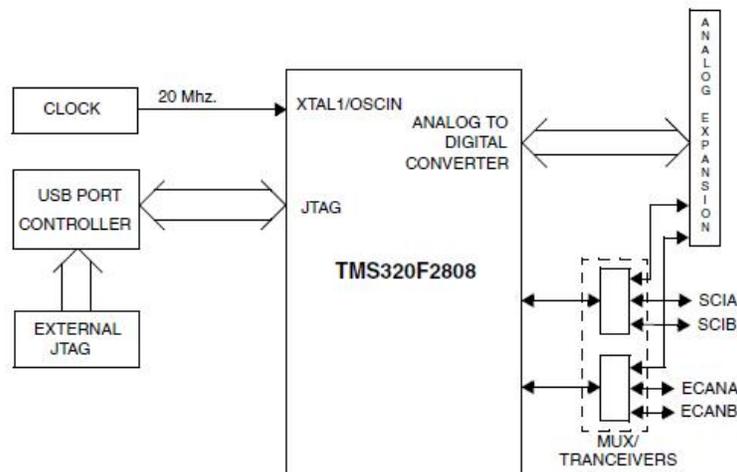


Figura 5.4 - Diagrama de Blocos do Kit de Desenvolvimento eZdsp.

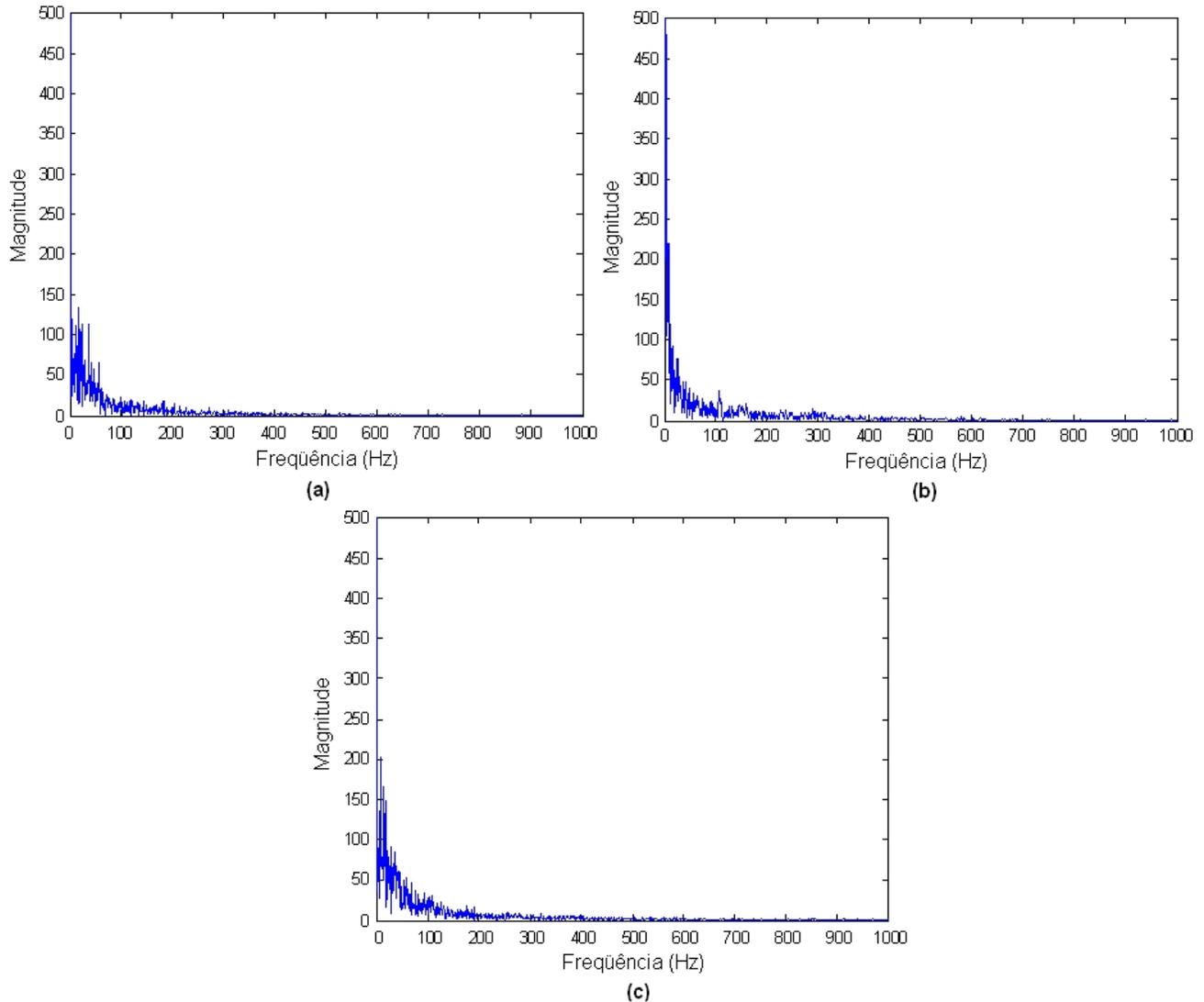


Figura 5.5 - Análise do espectro de frequências para cada padrão do escoamento bifásico gás-líquido: (a) bolhas (b) intermitente (c) anular

Pode-se notar que a maior parte das frequências significantes estão abaixo de 500 Hz. Este resultado foi observado para todos os padrões analisados. Desta forma, de acordo com a frequência de Nyquist, a frequência de amostragem do sinal a ser classificado deve ser maior ou igual a 1 KHz.

Esses sinais, no entanto variam bastante devido ao processo do escoamento bifásico, de modo que torna difícil identificar o padrão diretamente a partir do sinal. Desta forma, é necessário extrair características discriminantes de cada padrão de escoamento, de modo, que facilite o processo de classificação do sinal.

Como visto na revisão da literatura apresentada no Capítulo 2, para se extrair características significantes do sinal várias funções podem ser utilizadas. Neste trabalho, necessita-se que a função seja de fácil implementação, baixo custo computacional, e que possibilite um monitoramento em tempo real do escoamento. A PDF, por exemplo, necessita de um tempo mínimo de amostragem de 60 segundos, o que impossibilita o monitoramento em tempo real dos padrões de escoamento, além de ser uma função com um certo grau de complexidade para ser embarcado em um microcontrolador. Já as transformadas de Gabor, Hilbert Huang e o método de análise da componente principal resultam em características representativas do sinal do escoamento, embora tenham uma exigência computacional maior. Já as funções estatísticas são funções de fácil implementação, baixo custo computacional e representam adequadamente o comportamento dos padrões de escoamento.

Desta forma, várias funções estatísticas foram testadas a fim de que características significativas do sinal do escoamento fossem extraídas. Foram testadas as funções média, desvio padrão, variância, curtose e assimetria utilizando-se a grade de sinais da Seção 4.1 do Capítulo 4 cuja amplitude varia entre 1 e 5 volts. Cada função estatística foi testada separadamente resultando em uma única característica do sinal do escoamento, em seguida realizou-se a classificação para observar a taxa de acertos para cada função estatística usada para extrair as características. Os resultados da classificação foram melhores quando a função média é utilizada como extrator de características, e em segundo lugar a função desvio padrão. Desta forma, as características resultantes das funções média e desvio padrão discriminam melhor o sinal do que as funções curtose, variância e assimetria.

A média é a soma de todos os valores observados (x_i) dividido pelo número total de observações (N_i):

$$Media = \frac{\sum x_i}{N_i} \quad (5.1)$$

A média tem tanto vantagens práticas como teóricas como uma medida da tendência central. É simples de calcular e a soma dos desvios observados da média (expressa em termos de números positivos e negativos) deve ser igual a zero, o que fornece uma maneira simples de verificar os

cálculos. A média também tem propriedades matemáticas que permitem o desenvolvimento de estatísticas avançadas. A maioria das análises descritivas de variáveis contínuas e, até mesmo, em análises estatísticas avançadas usa a média como medida da tendência central.

O desvio padrão mede a dispersão dos valores individuais em torno da média. Para seu cálculo, deve-se obter a média da distribuição e, a seguir, determinar os desvios para mais e para menos a partir da mesma. Assim, o desvio padrão é a média quadrática dos desvios em relação à média aritmética de uma distribuição de frequências, ou seja, é a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios, esses tomados a partir da média aritmética conforme Equação 5.2.

$$Desvio = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x)^2}{N - 1}} \quad (5.2)$$

A Figura 5.7 mostra o comportamento das funções estatísticas média e desvio padrão quando utilizadas para caracterizar os padrões de escoamento; os números 1, 2, 3, 4 e 5 representam respectivamente os 5 padrões de escoamento abordados neste trabalho (tubulação cheia, bolhas, intermitente, anular e tubulação vazia), sendo que a média fica em torno de 1 volt quando a tubulação está vazia e 5 volts quando a tubulação está cheia de líquido, já o desvio padrão encontra-se próximo de 0 quando a tubulação está vazia e cheia de líquido e aproximadamente 1,5 quando o padrão é intermitente. Nota-se que tanto para a função média como para a função desvio padrão alguns padrões de escoamento possuem o mesmo valor, podendo ocasionar erros no momento da classificação. A fim de solucionar este problema, vetores com os valores de média e desvio padrão são utilizados. Os vetores contendo a média e o desvio padrão possibilitam uma melhor caracterização de cada padrão de escoamento, ocasionando uma maior separação entre eles (Figura 5.8), conseqüentemente a chance de se classificar um sinal equivocadamente diminui.

Além das funções estatísticas de média e desvio padrão serem aplicadas ao sinal para se obter o comportamento dos padrões de escoamento, uma outra análise que pode ser feita com o sinal dos padrões de escoamento é verificar se o sinal é unimodal ou bimodal. Em estatística descritiva, a moda é o valor que detém o maior número de observações, ou seja, o valor ou valores mais frequentes. A moda não é necessariamente única, ao contrário da média. A Figura 5.6 mostra os

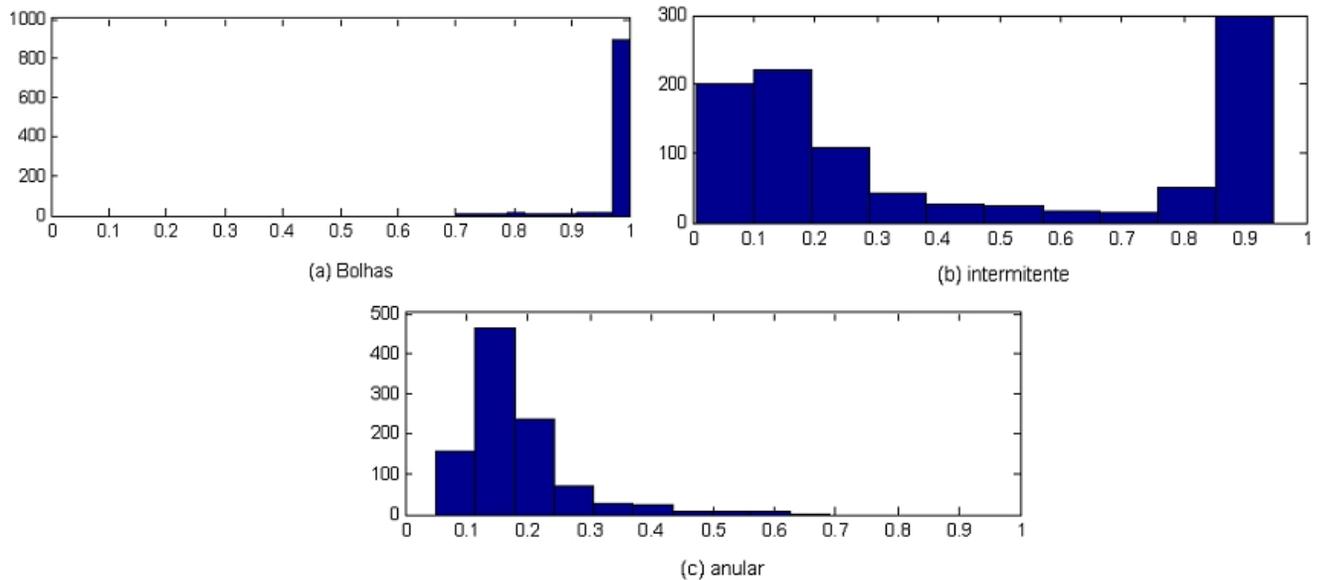


Figura 5.6 - Comportamento dos padrões de escoamento de acordo com a respectiva moda

padrões bolhas (a) e anular (c) que são unimodais, e o padrão intermitente (b) que é bimodal.

Ainda de acordo com a Figura 5.7, quando a tubulação está cheia de líquido a média do sinal fica em torno de 5 volts, quando o padrão é bolhas a média se encontra próximo de 5 volts, já a média no padrão intermitente varia significativamente sendo rotulado por bimodal, por possuir valores significativos altos e baixos; para o padrão anular, a média fica entre 1,5 e 2 e no padrão anular a média encontra-se em torno de 1 volt. Deste modo, apenas o padrão intermitente é bimodal, cuja característica pode ser explicada devido ao comportamento físico do escoamento bifásico, que hora passa líquido hora passa gás, o que implica na grande variação da média e no elevado valor do desvio padrão. Enquanto, os demais padrões (tubulação cheia, bolhas e anular) possuem valores bem delimitados dentro da faixa de operação do instrumento de medição de fração de vazios, tendo assim característica unimodal.

5.3 Referência do sistema de medida da fração de gás

Os principais parâmetros envolvidos na medida da impedância do escoamento bifásico são: A concentração volumétrica de gás na mistura, as características elétricas da fase líquida, as propriedades intrínsecas do transdutor, e a temperatura. A fração de gás normalmente é a variável de

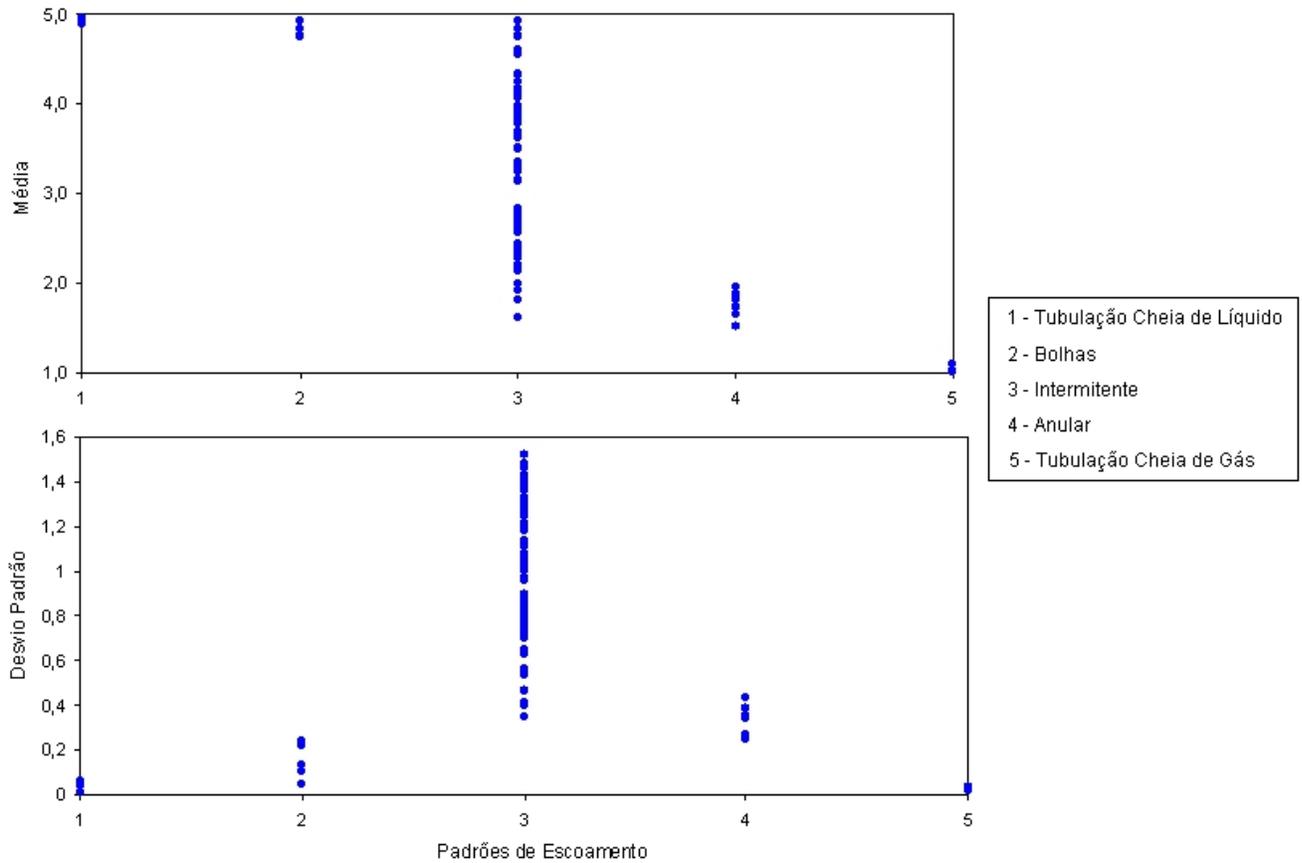


Figura 5.7 - Separação linear dos padrões de escoamento usando média aritmética simples e desvio padrão

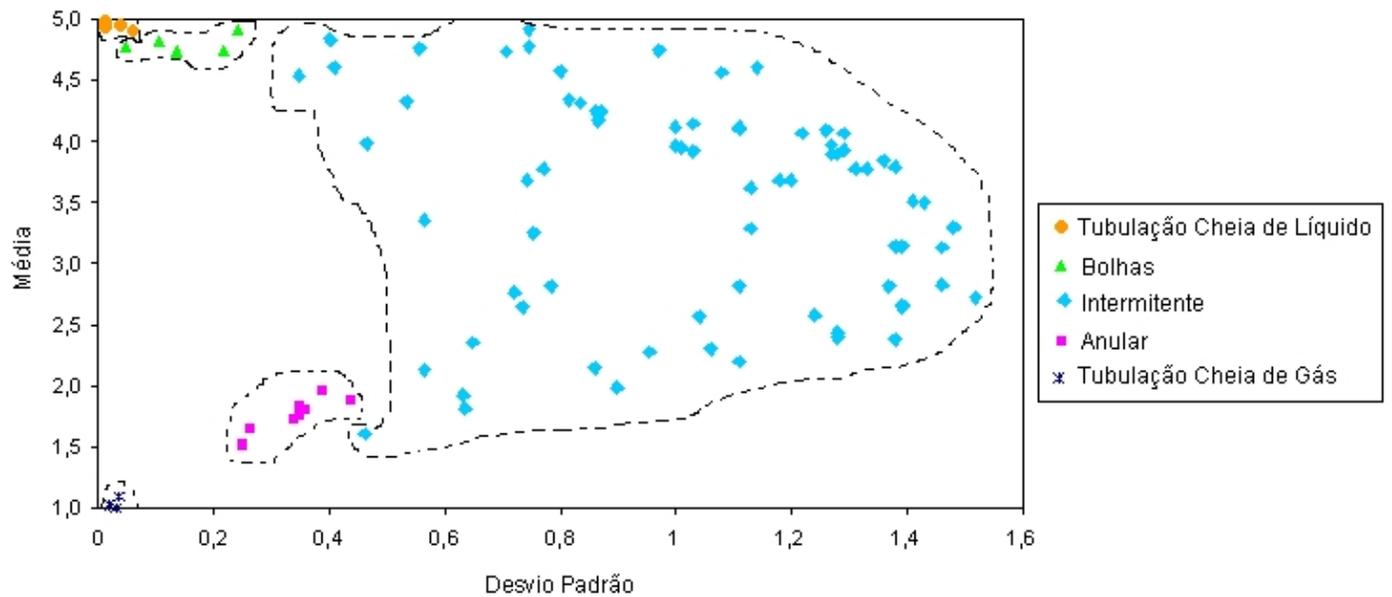


Figura 5.8 - Separação dos padrões de escoamento através de vetores de média e desvio padrão.

interesse para o estudo do escoamento e os demais fatores atuam como interferências indesejáveis às medidas. O transdutor utilizado apresenta uma correspondência linear muito bem definida com a fração de gás e baixa sensibilidade à temperatura, os circuitos eletrônicos utilizados baseiam-se em amplificadores operacionais de precisão que apresentam alta imunidade ao ruído, e baixos desvios e oscilações, "offset" e "drift", devido à temperatura.

Assim a variação das características elétricas da fase líquida é o fator preponderante de interferência. Por sua vez, as características elétricas da fase líquida variam com a natureza elétrica: capacitiva ou resistiva, concentração iônica, impurezas, e com a proporção dos fluídos que a compõe. Estas são tipicamente muito lentas, de tal forma que é possível e necessário um método de aferição sentinela "on line" para que o instrumento se adapte a estas variações.

Exemplificando; no caso específico da produção de petróleo há uma variação muito grande nas características elétricas da fase líquida, tipicamente no início, há produção de óleo com traços de água, porém, com o tempo há um crescimento significativo da presença de água salgada que vai aumentando até se tornar preponderante. Em poços maduros de terra a porcentagem de água chega a ser mais de 95% do volume da produção. Assim apresentam faixas diferentes de impedâncias, que vão desde um valor muito alto quando se opera com o óleo, e tem comportamento de dielétrico, até uma solução constituída principalmente de água salgada que se comporta como um condutor. Portanto, o valor da impedância do fluído, apesar de variar muito lentamente, tem uma amplitude que varia de centenas de kiloOhms para alguns Ohms, ou seja, varia cinco ordens de magnitudes (Rosa et al., 2008). Isto revela a importância das referências para todo o sistema de medida de fração de gás. Um erro significativo nestas referências faz com o sistema de medição e reconhecimento dos padrões de escoamento bifásico não operem corretamente. Esta é uma das razões da inclusão no sistema de reconhecimento de padrões dos padrões tubulação cheia e tubulação vazia, que servem como alerta à supervisão e também como informação útil para operação e manutenção do sistema.

Alguns sistemas de medida de fração de gás utilizam um sensor de referência, onde apenas circula líquido, para a correção dos erros devido às variações das propriedades da fase líquida a exemplo do trabalho de Song et al. (1998). Outro modo de correção do sistema é através de procedimentos de aferição onde o sistema é submetido alternadamente ao escoamento somente de gás e

posteriormente somente ao líquido, quando os valores de impedância do tubo cheio e vazio são precisamente determinados. Outro modo de aferição pode ser realizado por monitoramento estatístico, onde as variações de impedância máxima e mínima são constantemente monitoradas e armazenadas e quando variações sistemáticas são confirmadas altera-se os valores de tubo cheio e tubo vazio. Estes algoritmos são particularmente adequados para os sistemas de escoamento bifásico que não podem ser rotineiramente interrompidos para realizar aferições.

Os dados adquiridos são referenciados a partir da informação da impedância do tubo cheio e do tubo vazio. Assim, os dados adquiridos pelo ADC do instrumento de medição de fração de gás são colocados na forma relativa por estes valores de acordo com a equação:

$$X = \frac{X_{medido} - X_{vazio}}{X_{cheio} - X_{vazio}} \quad (5.3)$$

Onde X é a medida relativa, X_{medido} é o valor amostrado, X_{cheio} é o valor da tubulação somente com o líquido, e X_{vazio} é a tubulação preenchida de gás.

5.4 Sistema de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido embarcado

O ADC do microcontrolador realiza a aquisição do sinal do instrumento de medição de fração de gás constantemente, sendo responsável pela amostragem do sinal, podendo alterar a frequência de amostragem e o tempo de conversão. A sua entrada é limitada em 3 volts; dessa forma, usa-se um rebaixador de tensão antes do sinal alimentar o ADC. Conseqüentemente, pode-se variar a máxima tensão que o ADC poderá ler, dependendo do valor do resistor de carga R_c , alterando-se as referências de máxima e mínimo. A Figura 5.9 mostra o esquema da aquisição do sinal pelo ADC do microcontrolador.

Pela frequência de Nyquist o sinal do instrumento de medição de fração de vazios foi amostrado em 1 KHz resultando em 1000 pontos por segundo e o tempo de observação do sinal é de 4 segundos, o que possibilita uma boa caracterização do padrão de escoamento, resultando em um total de 4000 pontos amostrados. Para reduzir o número de pontos que o microcontrolador irá

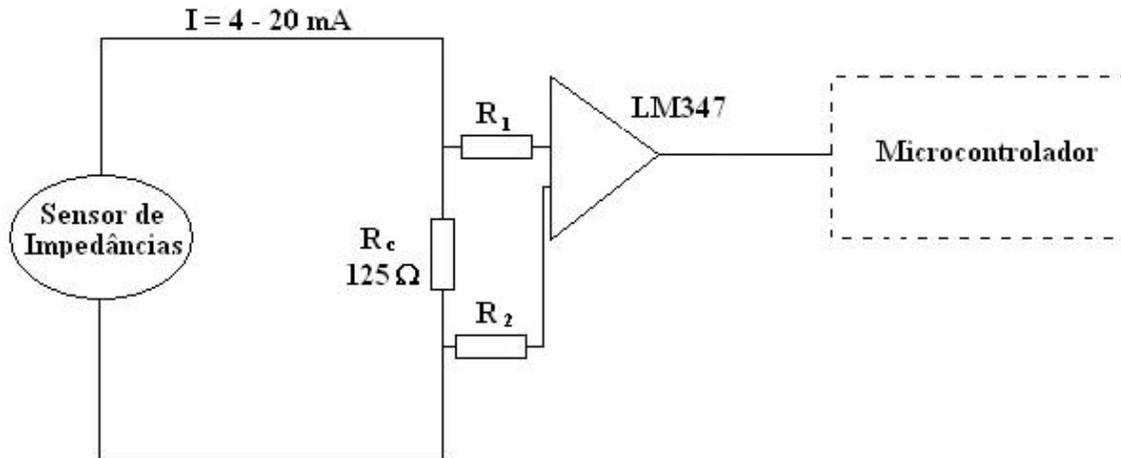


Figura 5.9 - Circuito rebaixador do sinal do instrumento de medição de fração de vazios para alimentação do microcontrolador

processar para realizar o reconhecimento do padrão de escoamento, utiliza-se a redução da dimensionalidade, agrupando-se a cada 4 amostras, e tirando o valor médio dessas amostras agrupadas que são armazenadas na memória do microcontrolador. Desta forma, dos 4000 pontos restam 1000 pontos, resultando-se na redução em 4 vezes sem que haja perda de informações relevantes contidas nos dados.

Os dados armazenadas na memória do microcontrolador são passados de valores absolutos para valores relativos. Conforme visto na seção anterior, para isso é necessário que se conheça os valores de referência quando a tubulação está cheia de líquido e quando a tubulação está vazia. Para encontrar os valores de referência com a tubulação cheia de líquido e com a tubulação vazia de líquido é necessário que haja a aferição do sistema de medidas. Desta forma, quando a tubulação estiver cheia de líquido adquire-se os dados e os armazena, aplicando-se em seguida a função moda para encontrar o valor mais freqüente, sendo que este valor será utilizado como valor de referência cheio. Já para se encontrar o valor de referência quando a tubulação está vazia, é necessária que a aquisição de dados seja realizada com a tubulação vazia de líquido, armazenando os dados adquiridos e em seguida aplicando-se também a função moda, para que o valor mais freqüente seja utilizado como referência de vazio.

Depois dos dados serem convertidos para valores relativos de fração de gás, eles são agrupados de acordo com o valor apresentado. Como o valor relativo é um valor entre 0 e 1, pode-se

dividir esta faixa em 10 grupos de 0.1. Desta forma, os grupos formados são: 0 à 0.1, 0.1 à 0.2, 0.2 à 0.3, 0.3 à 0.4, 0.4 à 0.5, 0.5 à 0.6, 0.6 à 0.7, 0.7 à 0.8, 0.8 à 0.9, 0.9 à 1. Assim, os 1000 pontos adquiridos são agrupados de modo que possibilite a visualização de quais grupos apresentam um maior número de pontos, ou seja, os grupos mais significativos. Em seguida aplica-se as funções média e desvio padrão aos dados agrupados, armazenando-se os resultados no vetor bidimensional Z .

A partir do agrupamento formado, é aplicado um algoritmo para saber se o sinal é unimodal ou bimodal, cuja informação possibilita a rotulação do sinal em um dos três principais padrões de escoamento (bolhas, intermitente e anular) e em tubulação cheia e vazia. Em seguida, aplica-se o algoritmo de classificação de padrões que pode ser visualizado na Figura 5.10:

```

Algoritmo Classifica Padrão
Se sinal = bimodal
Então
    padrão ← intermitente
    subpadrão ← Verifica subpadrão
Senão
    Se média ≤ 0,5
    Então
        Se média = 0 e desvio = 0
        Então
            padrão ← vazio
            subpadrão ← OK
        Se média ≤ 0
        Então
            padrão ← vazio
            subpadrão ← Necessita Aferição
    Senão
        padrão ← Anular
        subpadrão ← Verifica subpadrão
    Se média ≥ 0,5
    Então
        Se média = 1 e desvio = 0
        Então
            padrão ← Cheio
            subpadrão ← OK
        Se média > 1
        Então
            padrão ← Cheio
            subpadrão ← Necessita Aferição
    Senão
        padrão ← Bolhas
        subpadrão ← Verifica subpadrão

```

Figura 5.10 - Algoritmo de classificação de padrões de escoamento

De acordo com a Figura 5.10 tem-se no algoritmo de classificação uma subrotina chamada de *Verifica subpadrão* que ocasiona a classificação do sinal em subpadrões de escoamento. Para a implementação desta subrotina utilizou-se técnicas de SE. A implementação do SE se inicia com a formação da base de conhecimento. Os 99 sinais que foram adquiridos através do aparato experimental descrito na Seção 4.1 do Capítulo 4 foram convertidos em valores relativos, e em seguida foi calculada a média e o desvio padrão de cada sinal adquirido. Desta forma, a base de conhecimento é uma matriz $n \times 3$, onde n é a quantidade de sinais que compõe a base de conhecimento, neste caso 99; e as colunas são a média, desvio padrão e a rotulação do sinal, respectivamente. A rotulação de cada sinal da base de conhecimento foi realizada por um especialista humano no assunto, e ao invés de escrever o nome de cada padrão de escoamento, usou-se números que os simbolizassem, sendo 1 para o subpadrão bolhas, 2 para o subpadrão capa esférica, 3 para o subpadrão golfadas, 4 para o subpadrão agitado, 5 para o subpadrão semi-anular e 6 para o subpadrão anular.

Depois de formada a base de conhecimento, o algoritmo do SE foi implementado. O algoritmo 5.1 apresenta a lógica de programação utilizada. Sendo $Y_i = (media_i, desvio_i)$ um vetor que contém os valores de média e desvio padrão de cada sinal da base de conhecimento, onde $a \leq i \leq b$, variando de acordo com o padrão classificado, ficando restrito à parte da base de conhecimento referente ao padrão. Utiliza-se a distância euclidiana para calcular a distância entre os vetores Z e Y_i através da equação:

$$D_i = \sqrt{(media_i^2 - media^2) + (desvio_i^2 - desvio^2)} \quad (5.4)$$

Depois de calculadas as distâncias, aplica-se a função mínimo ao vetor de distâncias D_i para encontrar a menor distância entre o vetor Z e o vetor Y_i . A função mínimo implementada no microcontrolador retorna o valor da menor distância encontrada e também qual a posição i na base de conhecimento para tal valor. Através do valor de i , é possível achar o seu correspondente número de rotulação localizado na terceira coluna da base de conhecimento. Com regras do tipo *Se... Então*, é realizada a rotulação propriamente dita, através do número de rotulação encontrado. Todo o código implementado encontra-se no apêndice deste trabalho.

Algoritmo 5.1 Subalgoritmo para determinação do subpadrão

- 1: Dado o vetor Z que contem a média e o desvio padrão do sinal de entrada:
 - 2: Para cada elemento Y_i na base de conhecimento, faça: $dist(Y_i, Z) = ||Y_i - Z||$
 - 3: Retornar o subpadrão segundo o elemento Y_i que representar o menor valor para a equação anterior
-

Concluída a classificação do sinal, os resultados, assim como os valores de média, desvio padrão, e as frequências da ocorrência dos dados são enviados ao sistema supervisorio. O sistema supervisorio recebe os dados de frequência da ocorrência e os apresentam em forma de histograma, de modo, que o usuário possa visualizar se o sinal é unimodal ou bimodal, que a partir dessa classificação já é possível saber se o padrão é bolhas, intermitente ou anular. Já os dados com os valores da média e do desvio padrão são observados em um campo apropriado para a média e desvio padrão, e o resultado da classificação dos subpadrões de escoamento acionam leds de acordo com o resultado.

Capítulo 6

Resultados

Para saber se o sistema de reconhecimento de padrões é eficaz, é importante realizar a validação do sistema proposto. Esta validação tem o objetivo de determinar (testar) a classificação dos sinais de entrada de acordo com os sinais da base de conhecimento do SE.

Os testes on-line para a validação do sistema de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido foram realizados através do aparato experimental, apresentado na Seção 4.1 do Capítulo 4, montado no laboratório de escoamento multifásico localizado no departamento de energia da UNICAMP.

Para testar o sistema de reconhecimento usou-se o mapa de fluxo vertical elaborado por Taitel et al. (1980). De acordo com a Figura 6.1, o mapa de fluxo possui 5 regiões demarcadas. A primeira região é bolhas dispersas, que é quando a tubulação está praticamente repleta de líquido e apenas poucas bolhas dispersas no líquido, sendo considerada de tubulação cheia. Há ainda a região do padrão bolhas, anular e intermitente que engloba duas regiões que seriam as regiões referentes aos subpadrões golfadas e agitado, o subpadrão capa esférica ocorre entre o subpadrão golfadas e o subpadrão bolhas, e o subpadrão semi-anular entre o subpadrão agitado e o subpadrão anular.

No mapa de fluxo, com a variação da velocidade superficial de líquido (J_L) e de gás (J_G), ocorre a mudança dos padrões de escoamento. Os testes foram realizados em alguns pontos do mapa de fluxo. Na Figura 6.1 é possível observar quais foram os pontos testados, variando-se a velocidade superficial do líquido e do gás. Foram testados 10 pontos de acordo com o mapa de

fluxo e um ponto para o padrão de tubulação vazia (J_G e $J_L = 0$), totalizando 11 pontos.

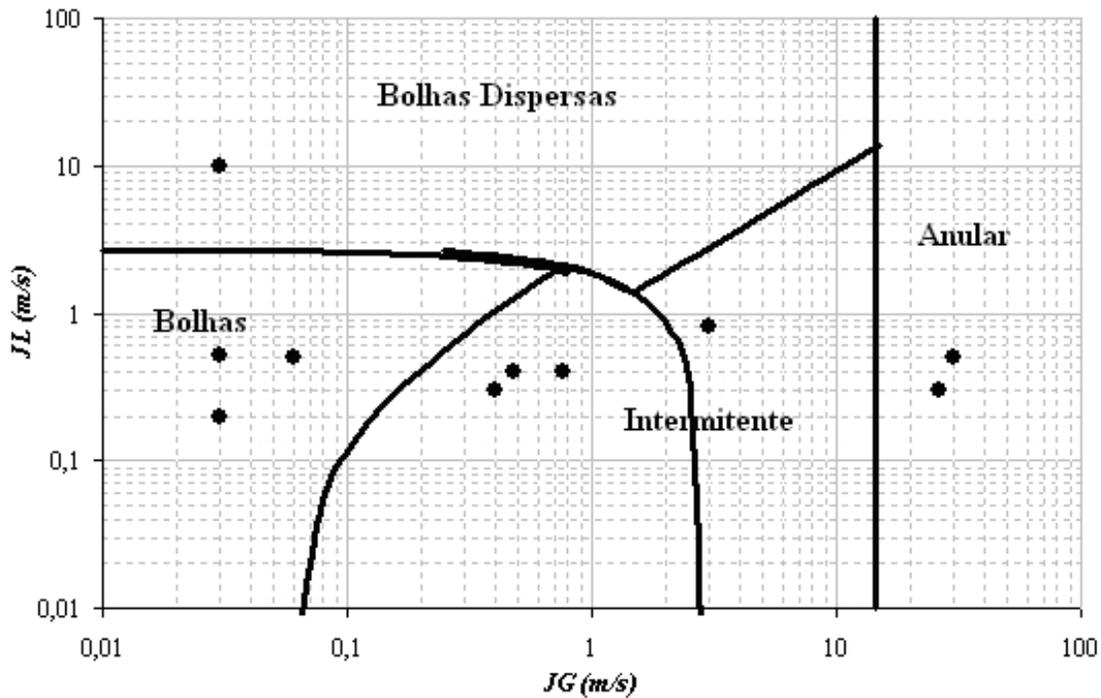


Figura 6.1 - Mapa de Fluxo com ponto experimentais destacados

Escolhido um ponto (J_G e J_L), este é ajustado no sistema supervisor para que tal padrão ocorra. Após o padrão de escoamento se estabilizar, um especialista humano o observa confirmando o padrão presente na tubulação, sendo que este é comparado ao resultado apresentado na interface do sistema de medição.

Para todos os pontos experimentais o resultado no sistema de reconhecimento foi condizente com o mapa de fluxo e a observação visual do padrão de escoamento, resultando em 100% de acertos. No ponto experimental (0,03,10) referente ao padrão bolhas dispersas no mapa de fluxo, o sistema de reconhecimento o classificou como tubulação cheia devido à dimensão das bolhas presentes serem muito pequena e não interferir significativamente na média do sinal.

Além dos testes on-line, foram realizados testes off-line, onde os 99 sinais adquiridos no aparato experimental, descrito na Seção 4.1 do Capítulo 4 para a formação da base de conhecimento, foram divididos em dois grupos: um grupo foi utilizado para a formação da base de conhecimento e o segundo grupo para a validação do sistema. Nos testes off-line, a interface lê os arquivos con-

tendo os sinais usados para validação e os envia para o microcontrolador efetuar o reconhecimento, recebendo de volta o resultado da classificação.

A eficiência do sistema de reconhecimento, utilizando o SE, foi testada, variando-se a quantidade de sinais que compõe a base de conhecimento, para cada teste, e o modo com que esses sinais foram selecionados a partir da grade de sinais, podendo ser manualmente ou automaticamente (aleatórios). Através da Tabela 6.1 é possível observar a quantidade de sinais da base de conhecimento e da etapa de validação para cada teste, a forma com que os sinais foram selecionados e os resultados de cada teste.

Tabela 6.1 - Testes off-line realizados para verificação da eficiência do sistema de reconhecimento

Testes	Qtde de Sinais para Base de Conhecimento	Qtde de Sinais para Validação	Modo de seleção dos sinais	Acertos(%)
1°	68	31	Manual	100
2°	68	31	Aleatório	87
3°	79	20	Aleatório	95
4°	89	10	Aleatório	90
5°	50	49	Aleatório	100
6°	10	89	Aleatório	70

Através dos resultados, observa-se que o sistema de reconhecimento de padrões é de grande eficácia, atingindo uma considerável taxa de acertos nos testes realizados. Quando os sinais que irão compor a base de conhecimento são selecionados manualmente, prevê-se uma taxa de acertos de 100%, pelo fato da base de conhecimento conter todos os sinais representativos do fenômeno do escoamento bifásico. No entanto, quando se seleciona automaticamente os sinais que irão compor a base de conhecimento, não é possível saber se a base de conhecimento ficará representativa, desta forma, a taxa de acertos do reconhecimento dos padrões pode variar, porém, os testes realizados através da seleção automática dos sinais que irão pertencer à base de conhecimento, não atingiram uma taxa de erros crítica. Desta forma, o sistema desenvolvido mostrou ser robusto, obtendo bons resultados para quaisquer sinais provenientes do escoamento que sejam usados para a formação da base de conhecimento e para a validação do sistema.

Sob o ponto de vista computacional, o sistema de reconhecimento de padrões, mostrou ser de

fácil implementação, tendo rápido processamento por possuir funções estatísticas simples (média e desvio padrão) e de rápido processamento na etapa de extração de características, o que possibilitou a sua aplicação on-line. Para que a base de conhecimento possa armazenar mais dados referentes aos padrões de escoamento é necessário que haja um acréscimo de bytes na memória RAM; quanto mais sinais a base de conhecimento tiver, maior representatividade dos padrões de escoamento ela terá, diminuindo a chance de classificações erradas.

Capítulo 7

Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido vertical voltado para aplicações em campo. A estrutura física deste sistema constitui-se na integração de um instrumento de medição de fração de gás microcontrolado, rede de instrumentos e sistema de supervisão.

Aplicações de campo tem restrições no tempo de resposta, capacidade de processamento e memória limitados e necessitam de adequação às condições mais agressivas do ambiente industrial e suas características operacionais. Assim a partir do estudo comparativo levando em consideração a facilidade de implementação, custo computacional, taxa de acertos, confiabilidade dos resultados e facilidade de interpretação dos resultados e do conhecimento sobre o processo de escoamento partiu-se para uma solução de reconhecimento de padrões dentro das restrições impostas.

Uma solução foi a utilização de um Sistema Especialista baseado nas características estatísticas dos dados amostrados do instrumento de medição de fração de gás. Esta solução se mostrou eficiente apresentando total acerto dos padrões apresentados, rápida e de baixo custo computacional podendo portanto ser facilmente embarcada no microcontrolador do instrumento já desenvolvido e sem uso de funções matemáticas complexas.

Além disto a apresentação dos resultados são de fácil compreensão e validação pelo operador do sistema de supervisão. Os resultados para os testes off-line mostraram que o sistema de reconhecimento implementado possui uma robustez que ocasiona uma razoável taxa de acertos mesmo

quando a base de conhecimento do SE não é muito representativa.

Em termos de trabalhos futuros, pode-se incluir o reconhecimento de padrões de escoamento bifásico gás-líquido na horizontal, aumentando-se a base de conhecimento do SE para incluir os sinais de escoamento na horizontal e melhorar a interface para que os padrões horizontais sejam visualizados. Pode também realizar a otimização do sistema de ajuste de referência da tubulação cheia e da tubulação vazia, fazendo com que esse processo seja automatizado. Além disso, o sensor de impedâncias pode ser construído com um número maior de eletrodos, permitindo assim a análise mais precisa em diferentes regiões da tubulação.

Referências Bibliográficas

ANDREUSSI, P.; DONFRANCESCO, A. D.; MESSIA, M. An impedance method for the measurement of liquid hold-up in two-phase flow. *International journal of multiphase flow*, [S.l.], v. 14, n. 6, p. 777–785, 1988. 12

ANDRITSOS, N.; HANRATTY, T. J. Interfacial instabilities for horizontal gas-liquid flows in pipeline. *International Journal of Multiphase Flow*, [S.l.], v. , n. 13, p. 583–603, 1997. 6

AZZOPARDI, B.; HILLS, J. *Flow patterns, transition and models for specific flow patterns in modeling and experimentation in two-phase flow*. New York: Springer Verlag Wien, 2003. 3

BIN, S.; HONGJIAN, Z.; LU, C.; YUXIAO, Z. Flow regime identification of gas-liquid two-phase flow based on hht. *Chinese Journal Chemical Engineering*, [S.l.], v. 14, n. 1, p. 24–30, 2006. 11, 14

BRITO, J. N. *Desenvolvimento de um sistema inteligente híbrido para diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 238 p. Tese (Doutorado). 26

CAI, S.; TORAL, H.; QIU, J.; ARCHER, J. S. Neural network based objective flow regime identification in air-water two-phase flow. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, [S.l.], v. 72, p. 440–445, 1994. 11, 16

CAVALCANTI, H. M. V. C. *Extração de Características via Redes Neurais*. Campinas:

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 116 p. Dissertação (Mestrado). 23, 24

CONTE, G.; AZZOPARDI, B. J. Film thickness variation about a t-junction. *International Journal of Multiphase Flow*, [S.l.], v. , n. 29, p. 305–328, 2003. 6

COSTIGAN, G.; WHALLEY, P. B. Slug flow regime identification from dynamic void fraction measurements in vertical air-water flows. *International Journal of Multiphase Flow*, [S.l.], v. 23, n. 2, p. 263–282, 1997. 6

DAILIANG, X.; HAIFENG, J.; ZHIYAO, H.; HAIQING, L. An online flow pattern identification system for gas-oil two-phase flow using electrical capacitance tomography. In: *Instrumentation and Measurement - Technology Conference*, p. 2320–2325. [S.l.]: [s.n.], 2004. 15

DARWISH, H. A.; TAALAB, A. I.; KAWADY, T. A. Development and implementation of an ann-based fault diagnosis scheme for generator winding protection. *IEEE Transactions on power delivery*, [S.l.], v. 16, n. 2, April 2001. 18

DAUGMAN, D. Complete discrete 2-d gabor transforms by neural networks for image analysis and compression. *IEEE Transactions on Acoustic, Speech, and Signal Processing*, [S.l.], v. 36, n. 7, p. 1169–1179, 1988. 14

DING, H.; HUANG, Z.; SONG, Z.; YAN, Y. Hilbert-huang transform based signal analysis for the characterization of gas-liquid two-phase flow. *Chinese Journal Chemical Engineering*, [S.l.], v. 18, p. 37–46, 2007. 14

DONG, F.; JIANG, Z. X.; QIAO, X. T.; XU, L. A. Application of electrical resistance tomography to two-phase pipe flow parameters measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, [S.l.], v. 14, p. 183–192, 2003. 11, 12, 14, 16

DRAHOS, J.; ZAHRADNIK, J.; PUNCOCHAR, M.; FIALOVA, M.; BRADKA, F. Effect of

operating conditions on the characteristics of pressure fluctuations in a bubble column. *Chemical Engineering and Processing*, [S.l.], v. 29, p. 107–115, 1991. 11

DUDA, R. O. E.; HART, P. E. *Pattern Classification and Scene Análisis*. New York: Wiley, 1973. 22, 23

DURST, F. *Principles and practice of laser-doppler anemometry*. London: Academic Press, 1976. 10

FOSSA, M. Design and performance of a conductance probe for measuring the liquid fraction in two phase gas-liquid flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, [S.l.], v. 9, n. 2, p. 103–109, 1998. 6

FU, K. S. *Syntactic Pattern Recognition and Applications*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1982. 21

FUKUNAGA, K. *Introduction to Statistical Pattern Recognition*. New York: Academic Press, 2. ed., 1990. 20

GERAETS, J. J. M.; BORST, J. C. A capacitance sensor for 2-phase void fraction measurement and flow pattern identification. *International Journal of Multiphase Flow*, [S.l.], v. 14, n. 3, p. 305–320, 1988. 6

GIBOSHI, M. L. *Desenvolvimento de um Sistema Especialista para Determinar a capacidade de uso da terra*. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 97 p. Dissertação (Mestrado). 27, 30

GOMES, H. S. B. *Contribuições para o desenvolvimento de um sistema especialista em diagnose de máquinas rotativas*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1995. 96 p. Dissertação (Mestrado). 26

HALE, C.; NGUYEN, C. Voice command recognition using fuzzy logic. In: *Wescon Conference Record*, p. 608–613. [S.l.]: [s.n.], 1995. 18

HAYES-ROTH, F.; WATERMAN, D. A.; LENAT, D. B. *Building Expert Systems*. London: Addison Wesley, 1983, 444 p. 24

HAYKIN, S. *Neural Networks*. New Jersey: Prentice Hall, 1994. 23

HEWITT, G. F. *Flow Regimes, Handbook of Multiphase Systems*. Washington, DC: McGraw-Hill, 1982. 2

HUANG, S. M.; STOTT, A. L.; GREEN, R. G.; BECK, M. S. Electronic transducers for industrial measurement of low value capacitances. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, [S.l.], v. 21, p. 212–250, 1988. 47, 50

HUBBARD, M. G.; DUKLER, A. E. The characterization of flow regimes for horizontal two-phase flow. In: *Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute*, p. 100–121. Stanford University Press, [S.l.]: [s.n.], 1966. 11

HULIN, J. P.; FIERFORT, C.; CONDOL, R. Experimental study of vortex emission behind bluff obstacles in a gas liquid vertical two phase flow. *International Journal Multiphase Flow*, [S.l.], v. 8, p. 475–90, 1994. 11

ISHII, M. Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow. In: *Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricite de France*. [S.l.]: [s.n.], 1975. 2, 5

ISHII, M. One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for between phases in various two-phase flow regimes. In: *ANL Report ANL*, p. 77–47. [S.l.]: [s.n.], 1977. 5

JAIN, A. K.; DUIN, R. P. W.; MAO, J. Statistical pattern recognition: A review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, [S.l.], v. 22, n. 1, 2000. 20

JEONG, G. Y.; YU, K. H. Development of ambulatory ecg monitoring device with st shape classification. In: *International Conference on Control, Automation and Systems*, p. 1591–1595. [S.l.]: [s.n.], 2007. 17

JONES, O. C.; DELHAYE, J. M. Transient and statistical measurement techniques for two-phase flows: a critical review. *International Journal Multiphase Flow*, [S.l.], v. 3, p. 89–116, 1976. 6, 11

JONES, O. C.; ZUBER, N. The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two phase flow. *International Journal Multiphase Flow*, [S.l.], v. 2, p. 273–306, 1975. 11

KUMAR, S. B.; MOSLEMIAN, D.; DUDUKOVIC, M. P. Gas-holdup measurements in bubble columns using computed tomography. *The American Institute of Chemical Engineers Journal*, [S.l.], v. 43, p. 1414–25, 1997. 11

LEE, J. Y.; PARANJAPE, S. S.; KIM, N. S.; ISHII, M. Instantaneous and objective flow regime identification method. In: *5th International Conference on Multiphase Flow*, 204 p. Yokohama, Japan: [s.n.], 2004. 11, 13, 16

LUNINSKI, Y.; BARNEA, D.; TAITEL, Y. Film thickness in horizontal annular flow. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, [S.l.], v. , n. 61, p. 621–626, 1983. 6

MALYERI, M. R.; MULLER-STEINHAGEN, H.; SMITH, J. M. Neural network analysis of void fraction in air/water two-phase flows at elevated temperatures in a gas liquid vertical two-phase flow. *Chemical Engineering and Processing*, [S.l.], v. 42, p. 587–597, 2003. 16

MASTELARI, N.; ZWANZIGER, M.; ROSA, E. S. Capacitive sensor for dynamic gas-liquid phase detection in two-phase flows. In: *18th International Congress of Mechanical Engineering - Proceedings of COBEM*. [S.l.]: [s.n.], 2005. 45

MATIC, W.; LESTAR, B.; TADIC, V. The use of digital signal processing for a modulation classification. *IEEE Melecon*, [S.l.], v. , p. 126–130, 2002. 17

MATSUI, G. Identification of flow regimes in vertical gas-liquid two-phase flow using differential pressure fluctuations. *International Journal Multiphase Flow*, [S.l.], v. , p. 711–720, 1984. 11, 13, 15

MAZARAKIS, G. P.; AVARITSIOTIS, J. N. Vehicle classification in sensor networks using time-domain signal processing and neural networks. *Microprocessors and Microsystems*, [S.l.], v. 31, p. 381–392, 2007. 17

MI, Y.; TSOUKALAS, L. H.; ISHII, M.; LI, M.; XIAO, Z. Hybrid fuzzy-neural flow identification methodology. In: *Proc. of the 5th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. New Orleans, USA: [s.n.], 1996. 6, 11, 12, 13, 16

MI, Y.; ISHII, M.; TSOUKALAS, L. H. Vertical two-phase flow identification using advanced instrumentation and neural networks. *Nuclear Engineering and Design*, [S.l.], v. , n. 184, p. 409–420, 1998. 11, 12, 14, 16

MI, Y.; ISHII, M.; TSOUKALAS, L. H. Flow regime identification methodology with neural networks and two-phase flow models. *Nuclear and Engineering Design*, [S.l.], v. , n. 204, p. 87–100, 2001. 11, 12, 13, 16

MIRTAHERI, P.; GRIMNES, S.; MARTINSEN, G. Electrode polarization impedance in weak nacl aqueous solutions. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, [S.l.], v. 52, n. 12, p. 2093–2099, 2005. 46

MISHIMA, K.; HIBIKI, T. Visualization and measurements of two-phase flow in metallic ducts using neutrons as microscopic probes. *JSME B*, [S.l.], v. , 1996. 10

MISHIMA, K.; ISHII, M. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes. *International Journal Heat Mass Transfer*, [S.l.], v. 27, p. 723–37, 1984. 2, 5

ODDIE, G.; SHI, H.; DURLOFSKY, L. J.; AZIZ, K.; PFEFFER, B.; HOLMES, J. A.

Experimental study of two and three phase flows in large diameter inclined pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, [S.l.], v. , n. 29, p. 527–558, 1997. 6

PANDYA, A.; MACY, R. B. *Pattern Recognition with Neural Networks in C++*. [S.l.]: CRC Press, 1995. 21

PEREIRA, J. R. G. *Misturas Finitas de Densidades com aplicações em reconhecimento estatístico de padrões*. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 205 p. Tese (Doutorado). 20

PINHEIRO, H. B. *Sistema Especialista para operação de subestações de energia elétrica*. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 1995. 91 p. Dissertação (Mestrado). 27, 28

RABUSKE, R. A. *Inteligência Artificial.*, cap. 10, Alguns Sistemas Especialistas, p. 215–230. [S.l.]: [s.n.], 1995. 25

RIBEIRO, H. C. S. *Introdução aos Sistemas Especialistas*. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1987. 24, 27, 29, 31

ROSA, E. S.; CORRÊA, F. C.; MASTELARI, N.; PORTO, E. Correção de faixa de operação para sensores de impedância aplicados em escoamentos de gás e líquido. In: *12th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences*. [S.l.]: [s.n.], November 2008. 45, 64

SAMI, M.; ABOUELWAFI, A.; JOHN, E.; KENDALL, M. The use of capacitance sensors for phase percentage determination in multiphase pipelines. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, [S.l.], v. 29, n. 1, p. 24–27, 1980. 6

SAWYER, B.; FOSTER, D. L. *Programming Expert Systems in Pascal*. New York: John Wiley & Sons, 1986, 186 p. 28, 29, 31

SCHALKOFF, R. *Pattern Recognition - Statistical, Structural and Neural Approaches*. New York: Wiley, 1991. 22, 23

SELLI, M. F.; SELEGHIM, P. On-line identification of horizontal two-phase flow regimes through gabor transform and neural network processing. In: *10th Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas e Engenharia - ENCIT*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004. 11, 13, 14, 16

SHI, J.; KOCAMUSTAFAOGULLARI, G. Interfacial measurements in horizontal stratified flow patterns. *Nucl. Eng. Des.*, [S.I.], v. , n. 149, p. 81–96, 1994. 6

SONG, N. C.; CHUNG, M. K.; HO, H. C. Measurements of void fraction by an improved multi-channel conductance void meter. *Nuclear Engineering and Desing*, [S.I.], v. , n. 184, p. 269–285, 1998. 46, 64

SUN, T.; ZHANG, H.; HU, C. Identification of gas-liquid two-phase flow regime and quality. In: *Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Techonology Conf.*, p. 1471–4. Anchorage, USA: [s.n.], 2002. 11, 16

SUN, Z.; ZHANG, H. Neural networks approach for prediction of gas-liquid two-phase flow pattern based on frequency domain analysis of vortex flowmeter signals. *Measurement Science and Technology*, [S.I.], v. 19, 2008. 11

TAITEL, T.; BARNEA, D.; DUKLER, A. E. Modelling flow pattern transitions for steady upward gasliquid flow in vertical tubes. *AICHEJ*, [S.I.], v. 26, p. 345–54, 1980. 2, 70

TRAFALIS, T.; OLADUNNI, O.; DIMITRIOS, V. Two-phase flow regime identification with a multiclassification support vector machine (SVM) model. *Ind. Eng. Chem. Res.*, [S.I.], v. 44, p. 4414–4426, 2005. 4

TSOUKALAS, L. H.; ISHII, M.; MI, Y. A. Neuro-fuzzy methodology for impedance-based multiphase flow identification. *Engineering Application of Artificial Inteligence*, [S.I.], v. 10, p.

545–555, 1997. 11, 12, 13, 16

TUTU, N. Pressure fluctuations and flow pattern recognition in vertical two phase gas-liquid flows. *International Journal Multiphase Flow*, [S.l.], v. 8, p. 443–447, 1982. 11, 13, 15

VINCE, M. A.; LAHEY, R. T. J. On the development of an objective flow regime indicator. *International Journal Multiphase Flow*, [S.l.], v. 8, p. 93–124, 1982. 11

WALLIS, G. B. *One-dimensional Two-phase Flow*. New York: McGraw-Hill, 1969. 1, 2

WARSITO; OHKAWA, M.; KAWATA, N.; UCHIDA, S. Cross-sectional distributions of gas and solid holdups in slurry bubble column investigated by ultrasonic computed tomography. *Chem Eng Sci*, [S.l.], v. 54, p. 4711–28, 1999. 11

WILLMING, D. A.; WHEELER, B. C. Real-time multichannel neural spike recognition with dsp's. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, [S.l.], v. , p. 37–39, March 1990. 18

WU, H.; ZHOU, F.; WU, Y. Intelligent identification system of flow regime of oil-gas-water multiphase flow. *International Journal of Multiphase Flow*, [S.l.], v. 27, p. 459–475, 2001. 11, 16

XIE, T. *Hydrodynamic characteristics of gas/liquid/fiber three-phase flows based on objective and minimally-intrusive pressure fluctuation measurements*. Georgia: Institute of Technology, 2004. Phd thesis. 11

XU, L.; HAN, Y.; ET AL. Application of ultrasonic tomography to monitoring gas/liquid flow. *Chem Eng Sci*, [S.l.], v. 52, n. 13, p. 2171–83, 1997. 11

YAMASHITA, Y. Time delay neural networks for the classification of flow regimes. *Computers in Chemical Engineering*, [S.l.], v. 21, p. 367–371, 1997. 12, 13

Apêndice A

Programação

Este apêndice apresenta a programação do sistema de reconhecimento de padrões embarcada no microcontrolador e a programação realizada no Labview para se construir a interface do sistema de medidas.

A.1 Programação no microcontrolador

```
#include "DSP280x_Device.h"    // Inclue arquivo principal para o
// funcionamento do microcontrolador
#include<stdio.h> // inclusão de bibliotecas matemáticas
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#define EndSlave 0x0001    // define o endereço do microcontrolador
// como escravo 01
#define FuncRIR 0x0004 // define a Função de Leitura como 04

//Rotinas do ModBus
void CRC_init(void); // define a função de inicialização do cálculo
// do CRC
void CRC16(int index, int *aponta); //define função que calcula CRC16
// para modbus
void read_registers(void); // define função do ModBus para ler
//registradores
```

```

//Rotinas do Conversor Analógico Digital (ADC)
void leADC(void); // define função que lê valores do ADC
void AdcParametros(void); // define função que ajusta parametros
// do ADC

//Rotinas que ajustam o temporizador do microcontrolador
void timer_init(void); // define função que efetua a inicialização
// do temporizador
void espera(Uint32 us); // define função que ajusta o intervalo das
// amostras

//Rotinas para comunicação serial entre o microcontrolador e a
//interface do sistema

void scia_init(void); // define função que inicia a comunicação serial
void scia_xmit(int a); // define função que envia os dados na
// comunicação serial
void scia_msg(char *msg); // define função para comunicação serial

//#####Variáveis do Modbus - Frame e Resposta#####
Uint16 Endereco,Func,InitEnd,Qty,AddressRegister,ValueRegister1;
Uint16 ValueRegister3;

//Declaração de variáveis
float ValueRegister2;
int tensaomaxima;
Uint16 media, desvio, tensaomaximal;
float tensaominima;
float Dif, valor, tensaomaxima2, tensaomaxima3;
int RxFrame[10],InputRegister[1008],Ans[207];
Uint32 Taxa;
int u;

unsigned int Registradores[1000]; // Define o vetor que receberá
// os dados do ADC

```

```

#####Variáveis do Adc#####
Uint16 AdcRes, DataLow, DataHigh, DataLow1, DataHigh1;
Uint16 DataLow2, DataHigh2;

int padroes[99]; // Define o vetor referente à rotulação dos
// sinais da base de conhecimento

float X[2], Y[2]; // Define vetores X e Y de duas dimensões

float Distancia[99]; // Define o vetor de distâncias
float MMedia[99]; // Define o vetor referente à média dos
// sinais da base de conhecimento
float DDesvio[99]; // Define o vetor referente ao desvio padrão dos
// sinais da base de conhecimento

int n;

//Define variáveis que receberão o resultado das
// funções média e desvio padrão

float Medial, Media2;
float Desviol, Desvio2;

#####Variáveis de Controle#####
Uint16 Erro;
Uint16 i, j, k, p;

#####Variáveis do CRC#####
Uint16 size;
int CRC, *point, Datalow, Datahigh;
int CRClow, CRChigh, DataLowMedia, DataLowDesvio, DataHighDesvio;
int DataHighMedia, DataLowTensao, DataHighTensao;
int byte;
int LSB;
Uint16 poli;

```

```

#####Variáveis auxiliares#####
float total4=0;
float total5=0;
int indice, indice2, indice3;
int indicel;
float valorminimo;

// programação da função para cálculo da média
float averageValue(unsigned int values[], int array_size)
{
float total1 = 0;
int i = 0;

for (i = 0; i < array_size; i++) {
total1 = total1 + values[i];
}
return (double)total1/array_size; // a função retorna o
//resultado do cálculo da média
}

// programação da função para cálculo do desvio padrão
float desvioPadrao (unsigned int valores[], int tamanho, float media)

{
int i;
float a=0, b=0, c=0, total3=0, totalR=0, resultado=0;

for (i=0; i<tamanho; i++){
a = pow(valores[i],2) + a;
b = 2 * media * valores[i] + b;
c = pow(media,2) + c;
}
total3 = a - b + c;
totalR = total3/199;
resultado = sqrt(totalR);
return (float)resultado; // a função retorna o resultado

```

```

//do cálculo do desvio padrão
}
// declaração da função para cálculo do valor mínimo
float minimumValue(float values[], int array_size)
{
float minimum_value;
int d = 0;

minimum_value = values[0];

for (d = 0; d < array_size; d++) {
if (values[d] < minimum_value){
indice = d;
minimum_value = values[d];
} }
return (float)indice; // a função retorna a posição em que o
// valor mínimo está no vetor
}

int maximum_value = 0;
// declaração de função para cálculo do valor maximo
float maximumValue(unsigned int values[], int array_size)
{
int d = 0;

for (d = 0; d < array_size; d++) {
if (values[d] > maximum_value){
maximum_value = values[d];
} }
return (int)maximum_value; // a função retorna o valor máximo do vetor
}
//#####Variáveis do Scia#####
char *msg;

void main(void)
{

```

```

InitSysCtrl(); // Inicia sistema de controle do microcontrolador

//Define Clock do Adc
EALLOW;
SysCtrlRegs.HISPCP.all = 0x4; // HSPCLK = SYSCLKOUT/8
SysCtrlRegs.XCLK.bit.XCLKOUTDIV=0;
EDIS;

InitSciaGpio(); // Inicia a comunicação serial do microcontrolador

DINT; // desabilita interrupções
InitPieCtrl(); // Inicia o controle de periféricos

// Desabilita interrupções da CPU e limpa todos flags de interrupções
IER = 0x0000;
IFR = 0x0000;

InitAdc(); // inicia o ADC
AdcParametros(); // Ajusta os parametros do ADC
scia_init(); // Inicia a comunicação serial
timer_init(); // Inicia o temporizador do microcontrolador
CRC_init(); // Inicia o CRC (Código de correção de erros)

Taxa = 1000; //Inicializa o ADC com Frequência de Amostragem em 1KHz

//#####Execução Principal#####//
for(;;)
{
while(SciaRegs.SCIRXST.bit.RXRDY==0){} // Espera alguma mensagem do
// mestre da comunicação, o Labview
Endereco=SciaRegs.SCIRXBUF.all; // armazena o endereço recebido
if(Endereco==EndSlave){ // compara se o endereço do escravo recebido
// é referente a ele
while(SciaRegs.SCIRXST.bit.RXRDY==0){}
Func=SciaRegs.SCIRXBUF.all; // recebe o restante dos dados recebidos
if(Func==FuncRIR) // Verifica-se qual é a função que esta sendo

```

```

    // solicitada pelo mestre
    read_registers(); // se a função for de leitura, o programa irá para
    // rotina de leitura
    }
    }
}
//#####Rotinas de Leitura#####//
void read_registers(){
RxFrame[0]=Endereco; // armazena o endereço do escravo
RxFrame[1]=Func;     // armazena o número da função
//Armazena o restante dos dados
for(i=2;i<8;i++){
while(SciaRegs.SCIRXST.bit.RXRDY==0){}
RxFrame[i]=SciaRegs.SCIRXBUF.all;}

//Calcula CRC
size=6;
point=RxFrame;
CRC16(size,point); // vai a rotina de cálculo do CRC

//Compara CRC e gera Resposta
if(RxFrame[6]==CRClow&&RxFrame[7]==CRChigh){

Qty=RxFrame[4]<<8;//Concatena Quantidade de 2*N bytes
Qty&=0xFF00;
Qty+=RxFrame[5];

Ans[0]=Endereco;
Ans[1]=Func;
Ans[2]=2*Qty;

//Resultado do reconhecimento
u = 8;
for (i=0; i<1000;i++){ // irá adquirir 1000 amostras do ADC
leADC(); // lê o ADC
Registradores[i]=AdcRes; // atribui à Registradores os valores

```

```

// que são lidos pelo ADC

// procura qual o maior valor entre as amostras adquiridas:
tensaomaxima = maximumValue(Registadores,1000);
tensaomaxima2 = tensaomaxima * 3;
tensaomaxima3 = tensaomaxima2/4095; // realiza a conversão do valor
tensaominima = tensaomaxima3/5; // a tensão mínima é 5 vezes menor
// que a tensão máxima

Dif = tensaomaxima3 - tensaominima; // Calcula a diferença entre a
// tensão máxima e a tensão mínima
valor = 4/Dif; // como a base de conhecimento está entre 1 e 5 volts
//tem-se uma diferença de 4 entre o valor máximo e o valor mínimo,
// este valor 4 dividido por Dif resulta no valor de correção
// da base de conhecimento com o sinal de entrada

InputRegister[u]=DataHigh1; // armazena em InputRegister as amostras
InputRegister[u+1]=DataLow1; // adquiridas do sinal que serão enviadas
// à interface do sistema (LabView) para a visualização da forma de
// onda do sinal

u++;
espera(Taxa); // período entre cada amostra no ADC
}

Medial = averageValue(Registadores,1000); // extraindo a média dos
// sinais adquiridos pelo ADC
Media2 = (tensaomaxima3 * Medial)/4095; // conversão para analógico

media = Medial; // atribuição de um valor float para um valor inteiro
//para sumir com a vírgula

//extraindo o desvio padrão dos sinais adquiridos pelo ADC
Desvio1 = desvioPadrao(Registadores, 1000, Medial);
Desvio2 = (tensaomaxima3 * Desvio1)/4095; // conversão para analógico
tensaomaximal = tensaomaxima;

```

```
desvio = Desvio1; // atribuição de um valor float para um valor inteiro
```

```
// Base de conhecimento - 1Khz - padrões de cada sinal
```

```
// (1 - tubulação cheia de líquido, 2 - padrão bolhas, 3 - padrão
```

```
// intermitente, 4 - padrão anular, 5 - tubulação cheia de gás)
```

```
padroes[0] = 3;
```

```
padroes[1] = 3;
```

```
padroes[2] = 3;
```

```
padroes[3] = 3;
```

```
padroes[4] = 3;
```

```
padroes[5] = 3;
```

```
padroes[6] = 3;
```

```
padroes[7] = 3;
```

```
padroes[8] = 3;
```

```
padroes[9] = 3;
```

```
padroes[10] =3;
```

```
padroes[11] =3;
```

```
padroes[12] =3;
```

```
padroes[13] =3;
```

```
padroes[14] =3;
```

```
padroes[15] =3;
```

```
padroes[16] =3;
```

```
padroes[17] =3;
```

```
padroes[18] =3;
```

```
padroes[19] =3;
```

```
padroes[20] =3;
```

```
padroes[21] =3;
```

```
padroes[22] =3;
```

```
padroes[23] =3;
```

```
padroes[24] =3;
```

```
padroes[25] =3;
```

```
padroes[26] =3;
```

```
padroes[27] =3;
```

```
padroes[28] =3;
```

padroes[29] =3;
padroes[30] =3;
padroes[31] =3;
padroes[32] =3;
padroes[33] =3;
padroes[34] =3;
padroes[35] =3;
padroes[36] =3;
padroes[37] =3;
padroes[38] =3;
padroes[39] =3;
padroes[40] =3;
padroes[41] =3;
padroes[42] =3;
padroes[43] =3;
padroes[44] =3;
padroes[45] =3;
padroes[46] =3;
padroes[47] =3;
padroes[48] =3;
padroes[49] =3;
padroes[50] =3;
padroes[51] =3;
padroes[52] =3;
padroes[53] =3;
padroes[54] =3;
padroes[55] =3;
padroes[56] =2;
padroes[57] =2;
padroes[58] =2;
padroes[59] =3;
padroes[60] =3;
padroes[61] =2;
padroes[62] =2;
padroes[63] =3;
padroes[64] =3;

```
padroes[65] =2;
padroes[66] =3;
padroes[67] =3;
padroes[68] =3;
padroes[69] =3;
padroes[70] =3;
padroes[71] =3;
padroes[72] =3;
padroes[73] =3;
padroes[74] =3;
padroes[75] =3;
padroes[76] =3;
padroes[77] =3;
padroes[78] =3;
padroes[79] =3;
padroes[80] =3;
padroes[81] =3;
padroes[82] =3;
padroes[83] =4;
padroes[84] =4;
padroes[85] =4;
padroes[86] =4;
padroes[87] =4;
padroes[88] =3;
padroes[89] =4;
padroes[90] =4;
padroes[91] =4;
padroes[92] =5;
padroes[93] =5;
padroes[94] =5;
padroes[95] =1;
padroes[96] =1;
padroes[97] =1;
padroes[98] =1;
```

```
//Base de conhecimento (Médias)
```

MMedia[0] = 4.2008;
MMedia[1] = 2.9336;
MMedia[2] = 3.1492;
MMedia[3] = 3.9089;
MMedia[4] = 2.2515;
MMedia[5] = 2.2968;
MMedia[6] = 3.6452;
MMedia[7] = 2.5457;
MMedia[8] = 2.2047;
MMedia[9] = 3.2778;
MMedia[10]= 1.8493;
MMedia[11]= 2.4361;
MMedia[12]= 2.8731;
MMedia[13]= 1.7890;
MMedia[14]= 2.2815;
MMedia[15]= 2.6342;
MMedia[16]= 1.5702;
MMedia[17]= 1.9464;
MMedia[18]= 2.5588;
MMedia[19]= 3.4515;
MMedia[20]= 3.4087;
MMedia[21]= 3.4137;
MMedia[22]= 3.5170;
MMedia[23]= 2.8825;
MMedia[24]= 3.0169;
MMedia[25]= 2.6537;
MMedia[26]= 2.8413;
MMedia[27]= 2.6230;
MMedia[28]= 2.7795;
MMedia[29]= 4.4174;
MMedia[30]= 4.1111;
MMedia[31]= 4.0743;
MMedia[32]= 3.9214;
MMedia[33]= 2.9743;
MMedia[34]= 3.1485;
MMedia[35]= 4.2241;

MMedia[36]= 4.2145;
MMedia[37]= 3.7032;
MMedia[38]= 3.8074;
MMedia[39]= 4.3143;
MMedia[40]= 4.3430;
MMedia[41]= 4.2750;
MMedia[42]= 4.2901;
MMedia[43]= 3.8770;
MMedia[44]= 3.9971;
MMedia[45]= 4.4500;
MMedia[46]= 4.0017;
MMedia[47]= 3.9491;
MMedia[48]= 4.0085;
MMedia[49]= 4.0758;
MMedia[50]= 3.3154;
MMedia[51]= 3.8082;
MMedia[52]= 4.0547;
MMedia[53]= 4.1686;
MMedia[54]= 4.2239;
MMedia[55]= 4.8105;
MMedia[56]= 4.9287;
MMedia[57]= 4.8299;
MMedia[58]= 4.7750;
MMedia[59]= 4.6639;
MMedia[60]= 4.8412;
MMedia[61]= 4.7566;
MMedia[62]= 4.7504;
MMedia[63]= 4.5372;
MMedia[64]= 4.5697;
MMedia[65]= 4.5991;
MMedia[66]= 4.1109;
MMedia[67]= 4.1660;
MMedia[68]= 4.3334;
MMedia[69]= 2.8795;
MMedia[70]= 3.2427;
MMedia[71]= 3.7299;

```
MMedia[72]= 3.7781;
MMedia[73]= 3.9802;
MMedia[74]= 3.3138;
MMedia[75]= 3.5063;
MMedia[76]= 2.9037;
MMedia[77]= 3.1574;
MMedia[78]= 2.2543;
MMedia[79]= 2.3649;
MMedia[80]= 2.3959;
MMedia[81]= 2.6621;
MMedia[82]= 2.7289;
MMedia[83]= 1.7912;
MMedia[84]= 1.8201;
MMedia[85]= 1.8885;
MMedia[86]= 1.8271;
MMedia[87]= 1.8660;
MMedia[88]= 2.1441;
MMedia[89]= 1.5320;
MMedia[90]= 1.6460;
MMedia[91]= 1.7066;
MMedia[92]= 1.0392;
MMedia[93]= 1.0354;
MMedia[94]= 1;
MMedia[95]= 4.9364;
MMedia[96]= 4.8708;
MMedia[97]= 4.85;
MMedia[98]= 4.9;
```

```
// Base de Conhecimento (desvio padrão)
```

```
DDesvio[0]= 0.9512;
DDesvio[1]= 1.5302;
DDesvio[2]= 1.4673;
DDesvio[3]= 1.1091;
DDesvio[4]= 1.3155;
DDesvio[5]= 1.4156;
DDesvio[6]= 1.2286;
```

DDesvio[7]= 1.1537;
DDesvio[8]= 1.1757;
DDesvio[9]= 1.2301;
DDesvio[10]= 0.5843;
DDesvio[11]= 1.0587;
DDesvio[12]= 1.2034;
DDesvio[13]= 0.6842;
DDesvio[14]= 0.7317;
DDesvio[15]= 0.9988;
DDesvio[16]= 0.4707;
DDesvio[17]= 0.7615;
DDesvio[18]= 0.9062;
DDesvio[19]= 1.4129;
DDesvio[20]= 1.4321;
DDesvio[21]= 1.5171;
DDesvio[22]= 1.4703;
DDesvio[23]= 1.5666;
DDesvio[24]= 1.4963;
DDesvio[25]= 1.5494;
DDesvio[26]= 1.3286;
DDesvio[27]= 1.3591;
DDesvio[28]= 1.3806;
DDesvio[29]= 0.8916;
DDesvio[30]= 1.0859;
DDesvio[31]= 1.1485;
DDesvio[32]= 1.2557;
DDesvio[33]= 1.4152;
DDesvio[34]= 1.3865;
DDesvio[35]= 1.0493;
DDesvio[36]= 1.0278;
DDesvio[37]= 1.1024;
DDesvio[38]= 1.1384;
DDesvio[39]= 0.8629;
DDesvio[40]= 0.7624;
DDesvio[41]= 0.8628;
DDesvio[42]= 0.8694;

DDesvio[43]= 1.0384;
DDesvio[44]= 1.0122;
DDesvio[45]= 0.9791;
DDesvio[46]= 1.3701;
DDesvio[47]= 1.1780;
DDesvio[48]= 1.1796;
DDesvio[49]= 1.2528;
DDesvio[50]= 1.5177;
DDesvio[51]= 1.3298;
DDesvio[52]= 1.1598;
DDesvio[53]= 1.0670;
DDesvio[54]= 1.0190;
DDesvio[55]= 0.4906;
DDesvio[56]= 0.2296;
DDesvio[57]= 0.1277;
DDesvio[58]= 0.0492;
DDesvio[59]= 0.7089;
DDesvio[60]= 0.3841;
DDesvio[61]= 0.2115;
DDesvio[62]= 0.1216;
DDesvio[63]= 0.7541;
DDesvio[64]= 0.4145;
DDesvio[65]= 0.2210;
DDesvio[66]= 0.9636;
DDesvio[67]= 0.7780;
DDesvio[68]= 0.3477;
DDesvio[69]= 1.0851;
DDesvio[70]= 1.1631;
DDesvio[71]= 1.0085;
DDesvio[72]= 0.8273;
DDesvio[73]= 0.5128;
DDesvio[74]= 0.7639;
DDesvio[75]= 0.7225;
DDesvio[76]= 0.7491;
DDesvio[77]= 0.7151;
DDesvio[78]= 0.4603;

```

DDesvio[79]= 0.6940;
DDesvio[80]= 0.6206;
DDesvio[81]= 0.7395;
DDesvio[82]= 0.7540;
DDesvio[83]= 0.3507;
DDesvio[84]= 0.3623;
DDesvio[85]= 0.3724;
DDesvio[86]= 0.2894;
DDesvio[87]= 0.4468;
DDesvio[88]= 0.5688;
DDesvio[89]= 0.2519;
DDesvio[90]= 0.2665;
DDesvio[91]= 0.3968;
DDesvio[92]= 0.00188;
DDesvio[93]= 0.0186;
DDesvio[94]= 0.0144;
DDesvio[95]= 0.0144;
DDesvio[96]= 0.0154;
DDesvio[97]= 0.003;
DDesvio[98]= 0.006;

X[0] = Media2 * valor; // atribui ao vetor X[2] os valores
// de média e desvio padrão calculados a
X[1] = Desvio2 * valor; // partir das amostras adquiridas pelo ADC

for (n=0; n < 99; n++){ // atribui ao vetor Y[2] os valores de média
// e desvio padrão de cada sinal n
// pertencente à base de conhecimento
Y[0] = MMedia[n];
Y[1] = DDesvio[n];
Distancia[n] = sqrt((pow((X[0] - Y[0]),2) + (pow((X[1] - Y[1]),2))));
// calcula a distância euclidiana entre X e Y e armazena os resultados
// no vetor Distancia[n]
}

indice1 = minimumValue(Distancia, 99); //retorna qual linha
//(entre 0 e 99) possui a menor distância

```

```

indice2 = padroes[indice1]; // retorna o padrão referente à
                          // linha encontrada de menor distância

// Conjunto de Regras - Através do Índice encontrado acima,
// a resposta será enviada ao Labview

if(indice2==1) // 1 para quando o tubo está cheio de líquido
  DataLow = 1;
  DataHigh= 0;

if(indice2==2) // 2 quando o padrão é bolhas
  DataLow = 2;
  DataHigh= 0;

if(indice2==3) // 3 quando o padrão é intermitente
  DataLow = 3;
  DataHigh= 0;

if(indice2==4) // 4 para o padrão anular
  DataLow = 4;
  DataHigh= 0;

if(indice2==5) // 5 quando o tubo está vazio.
  DataLow = 5;
  DataHigh= 0;

DataLowMedia = media & 0x00FF; // separação do valor inteiro
// de média de 16 bits para dois
DataHighMedia = media & 0xFF00; // registradores de 8 bits,
//para ser enviado através da
DataHighMedia = DataHighMedia >> 8; // comunicação serial Modbus
DataHighMedia = DataHighMedia & 0x00FF;

DataLowDesvio = desvio & 0x00FF; // separação do valor inteiro do
// desvio padrão de 16 bits para

```

```

DataHighDesvio = desvio & 0xFF00; // dois registradores de 8 bits,
// para ser enviado através da
DataHighDesvio = DataHighDesvio >> 8; // comunicação serial Modbus
DataHighDesvio = DataHighDesvio & 0x00FF;

DataLowTensao = tensaomaximal & 0x00FF; // separa o valor de um
//registrador de 16 bits em dois
DataHighTensao = tensaomaximal & 0xFF00; // registradores de 8 bits
DataHighTensao = DataHighTensao >>8;
DataHighTensao = DataHighTensao & 0x00FF;

// atribuição dos valores lidos ao vetor InputRegister[6] que
// enviará a resposta ao Labview

InputRegister[0]= DataHigh; // envia o byte mais significativo
// do resultado do reconhecimento
InputRegister[1]= DataLow; // envia o byte menos significativo do
//resultado do reconhecimento
InputRegister[2]= DataHighMedia; // envia o byte mais significativo
// da média
InputRegister[3]= DataLowMedia; // envia o byte menos significativo
// da média
InputRegister[4]= DataHighDesvio; // envia o byte mais signicativo do
// desvio padrão
InputRegister[5]= DataLowDesvio; // envia o byte menos signicativo
// do desvio padrão
InputRegister[6]= DataHighTensao;
InputRegister[7]= DataLowTensao;

//Carrega Resposta com bytes do Input Register
j=0;
for(i=3;i<216;i++){
Ans[i]=InputRegister[j];
j++;
}

```

```

//Calcula CRC da Resposta
size=3+2*Qty;
point=Ans;
CRC16(size,point);
Ans[3+2*Qty]=CRClow;
Ans[3+2*Qty+1]=CRChigh;

//Envia Resposta para o Labview
for(i=0;i<=3+2*Qty+1;i++)
scia_xmit(Ans[i]);
}
}
//#####Rotinas do CRC#####
void CRC_init(){

CRC=0xFFFF; //Valor inicial
poli=0xA001; //Valor Inicial do polinomio
}

//Rotina que calcula CRC16 para Modbus
void CRC16(int index,int *aponta){

CRC=0xFFFF; //carrega CRC com valor inicial

while(index){

CRC=CRC^*aponta; //XOR entre CRC e byte recebido

for(i=0;i<8;i++){
LSB=CRC & 0x0001; //Pega valor de LSB
CRC=CRC>>1; //Desloca CRC um bit a direita;
CRC=CRC & 0x7FFF; //Zera MSB
if(LSB==1)
CRC=CRC^poli;}

aponta++; //aponta para o proximo byte

```

```

index--; //decrementa indice
}
//divide em dois bytes
CRClow=CRC & 0x00FF;
CRChigh=CRC & 0xFF00;
CRChigh=CRChigh>>8;
CRChigh=CRChigh & 0x00FF;
}
//#####Rotinas do Adc#####//
void leADC(){

AdcRegs.ADCTRL2.bit.SOC_SEQ1=1; //inicia o ADC via software
while(AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1==0){} //Espera fim da conversao
AdcRes=AdcRegs.ADCRESULT0>>4; //Lê Registrador

DataLow1 = AdcRes & 0x00FF;
DataHigh1 = AdcRes & 0xFF00;
DataHigh1 = DataHigh1 >> 8;
DataHigh1 = DataHigh1 & 0x00FF;

AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR=1; //Reseta flag de interrupcao

AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1=1; //Reseta Sequencer
}
void AdcParametros(){

AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 0x0000;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x00; // selecionao canal
// de conversão
AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR=1;
}
//#####Rotinas do Temporizador#####//
void timer_init(){

CpuTimer0Regs.PRD.all=10000;
CpuTimer0Regs.TPR.all=0;

```

```

CpuTimer0Regs.TPRH.all=0;
CpuTimer0Regs.TCR.bit.FREE=1;
CpuTimer0Regs.TCR.bit.SOFT=1;
}
void espera(Uint32 us){ // ajusta o intervalo entre cada amostra
// na aquisição do ADC

CpuTimer0Regs.PRD.all=100*us;
CpuTimer0Regs.TCR.bit.TRB=1;
CpuTimer0Regs.TCR.bit.TSS=0;
while (CpuTimer0Regs.TCR.bit.TIF==0) {}
CpuTimer0Regs.TCR.bit.TIF=1;
}
//#####Rotinas do Scia#####//
void scia_init()
{
    // Note: Clocks were turned on to the SCIA peripheral
    // in the InitSysCtrl() function

SciaRegs.SCIFFTX.bit.SCIFFENA=0; //Desabilita FIFO

    SciaRegs.SCICCR.all =0x0007;    // 1 stop bit, No loopback
                                    // No parity,8 char bits,
                                    // async mode, idle-line protocol
SciaRegs.SCICTL1.all =0x0003; // enable TX, RX, internal SCICLK,
                                // Disable RX ERR, SLEEP, TXWAKE
SciaRegs.SCICTL2.all =0x0000; //Desabilita Interrupções

SciaRegs.SCIHBAUD    =0x0000; // 38400 baud @LSPCLK = 20MHz.
    SciaRegs.SCILBAUD    =81;
SciaRegs.SCICTL1.all =0x0023; // Relinquish SCI from Reset
}

// Transmit a character from the SCI
void scia_xmit(int a)
{

```

```
    while (SciaRegs.SCICTL2.bit.TXRDY == 0) {}
    SciaRegs.SCITXBUF=a;
}
void scia_msg(char * msg)
{
    int i;
    i = 0;
    while(msg[i] != '\0')
    {
        scia_xmit(msg[i]);
        i++;
    }
}
//=====
// No more.
//=====
```