

DAYSON ROBERTO WALDSCHMIDT

**Desenvolvimento de um Medidor de
Fração de Água Utilizando
Tecnologia de Microondas**

Florianópolis, fevereiro de 2008.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Desenvolvimento de um Medidor de Fração de Água Utilizando Tecnologia de Microondas

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Dayson Roberto Waldschmidt

Florianópolis, fevereiro de 2008.

Desenvolvimento de um Medidor de Fração de Água Utilizando Tecnologia de Microondas

Dayson Roberto Waldschmidt

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Automação e Sistemas*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’
Florianópolis, 29 de fevereiro de 2008.

Prof. Daniel Juan Pagano, Dr.
Orientador

Prof^a. Kátia Campos de Almeida
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Daniel Juan Pagano, Dr.
Presidente

Prof. Walter Pereira Carpes Junior, Dr.Eng.

Prof. Nestor Roqueiro, D.Sc.

Eng. Jose Maria Mascheroni, Msc.

Ao meu pai

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família - Dona Cirley, seu Manfred (*in memoriam*), Darlene e Delany (*in memoriam*) - que me ensinou o valor da educação na formação do indivíduo, a recompensa oriunda do comprometimento e da dedicação e, acima de tudo, a estima e admiração pelo esmero.

Agradeço também a minha companheira, namorada e amiga Mel, pelo apoio incondicional e inspiração em todos os momentos, alegres e difíceis. Sem o seu apoio nada disso seria possível.

Meu agradecimento não menos especial ao meu orientador, Daniel Pagano, pela confiança em mim depositada e pela oportunidade de realizar o presente trabalho. Agradeço também aos professores Nestor Roquero e Júlio E. N. Rico pelo apoio durante a realização do trabalho.

Agradeço aos colegas Augustinho Plucênio, Ramiro Saraiva, Guilherme Mafra e Francisco Rafael pelo apoio técnico, amizade e suporte durante a realização do trabalho.

Por último, agradeço a ANP (Agência Nacional de Petróleo e Gás Natural) pelo suporte financeiro, sem o qual este trabalho não teria sido possível, e ao PGEEL pela paciência e compreensão.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Desenvolvimento de um Medidor de Fração de Água Utilizando Tecnologia de Microondas

Dayson Roberto Waldschmidt

Fevereiro/2008.

Orientador : Prof. Daniel Juan Pagano, Dr.
Área de Concentração : Automação e Sistemas
Palavras-chave : Medidores de Fração de Água, Medidores Multifásicos,
: Processamento de Microondas, Sistemas Embarcados,
: Propriedades Dielétricas dos Materiais,
: Instrumentação, Medição Não-Intrusiva, Petróleo.
Número de Páginas : 131

Este trabalho explora o tema da utilização da tecnologia de microondas na medição da fração de água em escoamentos multifásicos, para aplicações na indústria de petróleo e gás natural.

Foi proposto e implementado um sistema de instrumentação não-intrusivo baseado na tecnologia de microondas, utilizando sensores de transmissão.

Foram realizados testes estáticos para a avaliação da viabilidade de diversas técnicas de medição, baseadas em sensores de transmissão, e do sistema de instrumentação desenvolvido para a medição da fração de água numa mistura bifásica de água e óleo.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

Development of a Microwave Water-Cut Meter

Dayson Roberto Waldschmidt

February/2008.

Advisor : Prof. Daniel Juan Pagano, Dr.
Area of Concentration : Automation and Systems
Key words : Water Cut Meters, Multiphase Metering,
: Microwaves Electronics, Embedded Systems,
: Dielectric Properties of Materials,
: Instrumentation, Non Intrusive Measurements, Petroleum.
Number of Pages : 131

The aim of this work is to explore the use of microwave technology for measuring the water cut content in a multiphase flow for application in oil industry.

A non-intrusive instrumentation system, based on microwave technology and using transmission sensors, was proposed and implemented.

Static tests were carried out in order to verify the viability of several measuring techniques based on microwave transmission sensors, and also the viability of the developed instrumentation system for measuring the water cut in a biphasic oil-water mixture.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contextualização do Problema	1
1.2	Técnicas e Métodos de Medição	4
1.2.1	Parâmetros de Escoamento	6
1.2.2	Frações Volumétricas	7
1.2.3	Tipo do Escoamento	8
1.2.4	Propriedades da mistura	12
1.3	Medição utilizando microondas	13
1.4	Aplicações de Sensores de Microondas na Indústria de Petróleo e Gás .	14
1.5	Objetivos	15
1.6	Organização da Dissertação	16
2	Fundamentos Teóricos	18
2.1	Ondas Eletromagnéticas	18
2.2	Propagação das Ondas Eletromagnéticas	20
2.3	Interação das Microondas com os Materiais	21
2.4	Propriedades Dielétricas dos Materiais	22
2.4.1	Propriedades Dielétricas da Água	23
2.5	Geração, Transmissão e Processamento de Sinais de Microondas	26
2.5.1	Parâmetros de Sistemas de Microondas	27
2.5.2	Componentes de um Sistema de Microondas	29
2.6	Tipos de Medidores de Microondas	36

2.6.1	Sensores de Transmissão	36
2.6.2	Sensores de Ressonância	39
2.6.3	Sensores de Reflexão	41
2.6.4	Sensores Radiométricos	45
2.6.5	Sensores Tomográficos	46
2.7	Conclusões	47
3	Sistema Experimental Desenvolvido	48
3.1	Sistema de Geração e Processamento de Microondas	49
3.2	Sistema Digital de Controle e Aquisição de Dados	53
3.2.1	Características do <i>Hardware</i>	54
3.2.2	Características do <i>Firmware</i>	56
3.3	Sistema Embarcado de Comunicação	60
3.3.1	Protocolo de Comunicação	60
3.3.2	Características do <i>Hardware</i>	62
3.3.3	Características do <i>Firmware</i>	64
3.4	Sistema Computacional do Concentrador de Dados	69
3.5	Sistema de Interface com Usuário	72
3.6	Sistema de Alimentação DC	78
3.7	Sistema de Suporte aos Ensaios	80
3.8	Sistema de Medições Auxiliares	83
3.9	Conclusões	83
4	Resultados Experimentais	85
4.1	Descrição de um Ensaio	85
4.2	Ensaios Realizados	86
4.3	Curvas Obtidas	88
4.3.1	Configuração 1	88
4.3.2	Configuração 2	92

5	Conclusões	96
5.1	Pendências de Implementação	99
5.2	Limitações Operacionais	99
5.3	Dificuldades Encontradas	100
5.4	Sugestões para Trabalhos Futuros	100
5.5	Considerações Finais	101
A	Especificações Técnicas dos Componentes de Microondas Utilizados	102
A.1	Antenas	102
A.2	VCO	103
A.2.1	Interruptor	103
A.2.2	Divisor de Potência	104
A.2.3	Amplificador de Potência	104
A.2.4	Atenuador Controlado por Tensão	104
A.2.5	Misturador	105
A.2.6	Detector	105
B	Diagramas Esquemáticos	107
C	Mapeamento dos Registrados Modbus da Unidade de Processamento	113
D	Especificação dos Protocolos de Comunicação Criados	119
D.1	Protocolo de Recrutamento	119
D.2	Protocolo de <i>Logging</i>	120
E	Descrição dos Webservices do Sistema do Concentrador de Dados	123
E.1	Funções dos Webservices	123
E.2	Estruturas de Dados do Webservices	127

Lista de Figuras

1.1	Produção típica de um poço em milhares de barris por dia	2
1.2	Método de avaliação da produção utilizando separador de fases	3
1.3	Método de avaliação da produção utilizando medidores multifásicos	3
1.4	Triângulo multifásico [13]	5
1.5	Exemplos de escoamento disperso [14]	9
1.6	Exemplos de escoamento separado [14]	10
1.7	Exemplos de escoamento intermitente [14]	10
1.8	Mapa de escoamento multifásico para um escoamento vertical [14]	11
1.9	Mapa de escoamento multifásico para um escoamento horizontal [14]	11
2.1	Espectro eletromagnético	19
2.2	Molécula de água	23
2.3	Variação da permissividade elétrica da água pura com o aumento da temperatura para diferentes frequências [7]	24
2.4	Variação da permissividade elétrica da água salgada (10 ppt) com o aumento da temperatura para diferentes frequências [7]	25
2.5	Variação da permissividade elétrica da água salgada com o aumento da temperatura para diferentes concentrações de sais [7]	25
2.6	Variação da permissividade elétrica da água com a frequência, temperatura e concentração de sais [7]	26
2.7	Tipos de antenas - comparação dos diagramas de radiação [6]	30
2.8	Isoladores (a)Funcionamento e (b)exemplo de Aplicação [6]	31
2.9	Aplicação típica de um circulador [6]	32
2.10	Aplicações de detectores para (a)medir a intensidade de uma microonda, (b)demodular um sinal pulsado e (c)demodular um sinal analógico [6]	32

2.11	Aplicações de Misturadores [6]	33
2.12	Misturador como um multiplicador de sinais [6]	33
2.13	Exemplo de aplicação de um interruptor [6]	34
2.14	Utilização de um interruptor na construção de um deslocador de fase [6]	35
2.15	Sensor de Transmissão [9]	37
2.16	Método de FMCW [6]	38
2.17	Sistema para medição da atenuação e da fase [9]	39
2.18	Gráfico da fase e magnitude num medidor de coeficiente de reflexão com $f_r = 1.5GHz$ [20]	41
2.19	Gráfico da fase e magnitude num medidor de coeficiente de transmissão com $f_r = 1.5GHz$ [20]	42
2.20	Sensor de ressonância utilizado na medição de nível de um tanque de óleo de um navio [9]	42
2.21	Princípio de funcionamento de um medidor de parâmetros de escoamento utilizando um sensor de reflexão [9]	43
2.22	Princípio de funcionamento de um radar de pulso [6]	44
2.23	Princípio de funcionamento de um radar de FMCW [9]	45
2.24	Princípio de funcionamento de um radiômetro, onde T_p é a temperatura do objeto, T_b é a temperatura de brilho e η é a emissividade [9]	46
2.25	Princípio de funcionamento de tomógrafo de microondas [9]	47
3.1	Arquitetura do sistema de ensaios com microondas	50
3.2	Diagrama de blocos do sistema de de geração e processamento de mi- croondas	53
3.3	Foto do sistema de geração e processamento de microondas montado sobre uma placa de acrílico	53
3.4	Diagrama de Bode do filtro anti-recobrimento	55
3.5	Diagrama de blocos do sistema controle e aquisição de dados	56
3.6	Desenho da PCI da unidade de processamento do sistema	57
3.7	Unidade de processamento do sistema	57
3.8	Fluxograma de dados no <i>firmware</i> do sistema de controle e aquisição .	59
3.9	Diagrama de blocos do sistema embarcado de comunicação	64

3.10	Mapeamento das camadas do padrão Ethernet em tarefas na biblioteca TCP/IP <i>Stack</i> da Microchip [24]	65
3.11	Estrutura da mensagem Modbus TCP/IP [19]	67
3.12	Possível configuração para o sistema digital	70
3.13	Arquitetura computacional do sistema do concentrador de dados	73
3.14	Tela da interface com usuário onde é apresentada a lista de equipamentos detectados na rede	76
3.15	Tela da interface com usuário onde é apresentado o menu de configuração de <i>logging</i> do sistema	77
3.16	Desenho da PCI da fonte de alimentação	80
3.17	Foto da fonte de alimentação com a tampa aberta	80
3.18	Foto da fonte de alimentação com a tampa fechada	81
3.19	Foto da bancada de ensaios durante um ensaio	82
3.20	Foto da bancada de ensaios durante um ensaio (detalhe do interior da caixa de Faraday)	83
4.1	Parâmetros de configuração de um ensaio bancada de testes	87
4.2	Tanque de ensaio com a manta metálica	89
4.3	Gráfico da intensidade em função da fração de óleo, utilizando-se o tanque de seção retangular e com a utilização da manta de alumínio	90
4.4	Gráfico do atraso de fase em função da fração de óleo, utilizando-se o tanque de seção retangular e com a utilização da manta de alumínio	90
4.5	Gráfico da intensidade em função da fração de óleo, utilizando-se o tanque de seção retangular e com a utilização da manta de alumínio	91
4.6	Gráfico do atraso de fase em função da fração de óleo, utilizando-se o tanque de seção retangular e com a utilização da manta de alumínio	91
4.7	Tanque de ensaio sem a manta metálica	92
4.8	Gráfico da intensidade em função da frequência (faixa inteira), utilizando-se o tanque de seção retangular para diversas frações de água	93
4.9	Gráfico da intensidade em função da fração de água (tipo A), utilizando-se o tanque de seção retangular 2 frequências escolhidas	94
4.10	Gráfico da intensidade em função da frequência (tipo B), utilizando-se o tanque de seção retangular para diversas frações de água	94

B.1	Diagrama esquemático da fonte de alimentação DC	108
B.2	Diagrama esquemático do módulo principal do sistema de controle e aquisição	109
B.3	Diagrama esquemático do módulo de condicionamento das entradas analógicas do sistema de controle e aquisição	110
B.4	Diagrama esquemático do módulo de condicionamento das saídas analógicas do sistema de controle e aquisição	111
B.5	Diagrama esquemático do sistema de comunicação embarcada	112

Lista de Abreviações e Símbolos

ANP	Agência Nacional de Petróleo
DAS	Departamento de Automação e Sistemas
DSP	Processador Digital de Sinais (<i>Digital Signal Processor</i>)
FMCW	<i>Frequency-Modulated Continuous Wave</i>
MC	Medidor Convencional
MM	Medidor Multifásico
MUT	<i>Material Under Test</i>
PTH	<i>Placement Through Hole</i>
RF	Radiofrequência
RMN	Ressonância Magnética Nuclear
SMD	<i>Surface Mount Device</i>
SMT	<i>Surface Mount Technology</i>
VCO	<i>Voltage Controlled Oscillator</i>
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>
WC	<i>Water-Cut</i>
c	Velocidade de propagação de onda no espaço livre
E_q	Energia do <i>quantum</i>
f	Frequência
h	Constante de Planck
IL	<i>Insertion Loss</i>
P_{in}	Potência incidente
P_r	Potência refletida
P_{rad}	Potência irradiada
P_t	Potência transmitida
RL	<i>Return Loss</i>
v	Velocidade de propagação da onda
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
ϵ_0	Permissividade elétrica no vácuo
ϵ_r'	Permissividade óptica
ϵ_{rs}	Permissividade estática
λ	Comprimento de onda
μ_r	Permeabilidade eletromagnética relativa
μ_0	Permeabilidade eletromagnética no vácuo
σ	Condutividade do meio
Γ_L	Coefficiente de reflexão

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização do Problema

Com o declínio das reservas de petróleo no mundo, a indústria petrolífera se vê obrigada a produzir em lugares e em reservas até então considerados economicamente inviáveis. As condições operacionais de um poço e sua produção são avaliadas através do conhecimento das frações de óleo, água, gases dissolvidos e demais resíduos extraídos do poço. Além das frações de cada componente, também é necessário o conhecimento das velocidades de escoamento de cada uma das fases e, no caso de frações significativas de gás, a densidade, ou massa específica, das fases. Os parâmetros acima citados caracterizam o problema da medição multifásica na indústria de petróleo e gás natural e são importantíssimos para o monitoramento da produção dos poços e gerenciamento da exploração do reservatório de onde estes poços produzem. Além disso, o conhecimento detalhado de todas as frações produzidas por cada poço serve para o levantamento da viabilidade econômica do projeto. A importância de tal informação a respeito do escoamento fica ainda mais evidente nos projetos de recuperação de poços. Na figura 1.1 é mostrado o ciclo de vida típico de um poço. Juntamente com o aumento da fração de água¹, é comum um aumento da fração de gás com o passar dos anos. Apesar de serem comumente utilizadas técnicas de injeção de água ou gás na exploração de um reservatório, a maior parte da água e gases explorados são normalmente provenientes do próprio reservatório. As duas principais aplicações da medição multifásica na indústria de petróleo e gás são [14]:

- **Teste de Poços** - engenheiros de reservatório necessitam avaliar constantemente o desempenho de cada poço de um campo para poderem otimizar a produção do

¹em inglês *Water-Cut*

campo, especialmente nos campos em processo de recuperação por injeção de gás ou água;

- **Medição da Produção** - necessária quando uma única planta é utilizada para o processamento da produção de diferentes áreas de licenciamento, ou então quando a produção de diferentes áreas precisa ser transportada através de um duto comum.

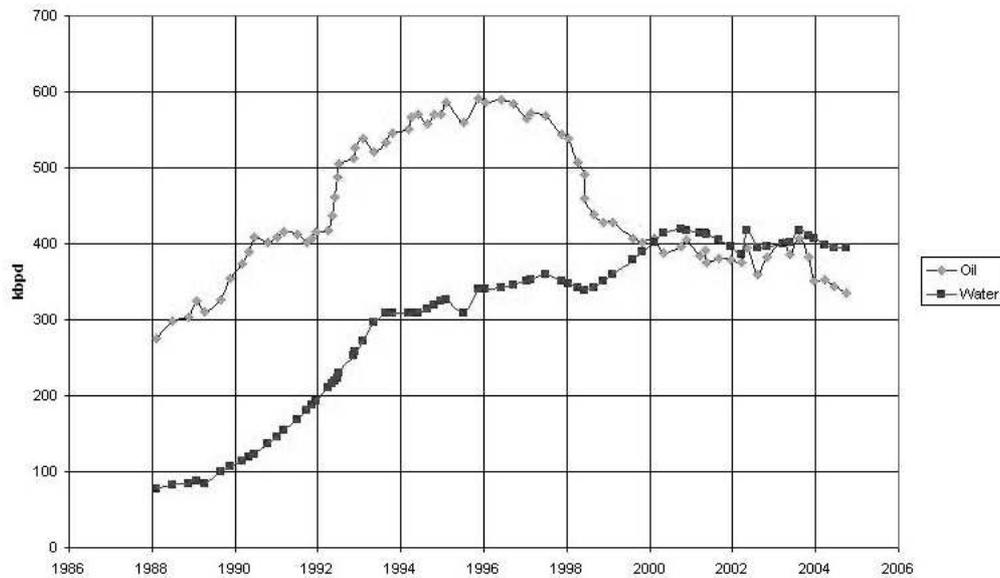


Figura 1.1: Produção típica de um poço em milhares de barris por dia

O método comumente empregado para a medição das frações baseia-se na utilização de separadores de fase. Para tal é necessário que o escoamento seja desviado para uma planta de testes, onde então as fases são separadas e as medições são realizadas utilizando-se Medidores Convencionais (MC), conforme ilustrado na figura 1.2. As desvantagens desse método são [8]:

- é necessário um longo tempo para a estabilização, ou separação, das fases;
- necessita de uma infra-estrutura específica de testes que, por sua vez, ocupa um espaço significativo;
- as medições não são realizadas continuamente, mas sim sobre amostras do escoamento, que não são necessariamente representativas da produção.

Por outro lado, medidores de vazão multifásica ² permitem que a produção seja avaliada de forma contínua. Um medidor de vazão multifásica é um instrumento capaz

²às vezes referidos como *in-line multiphase meters*

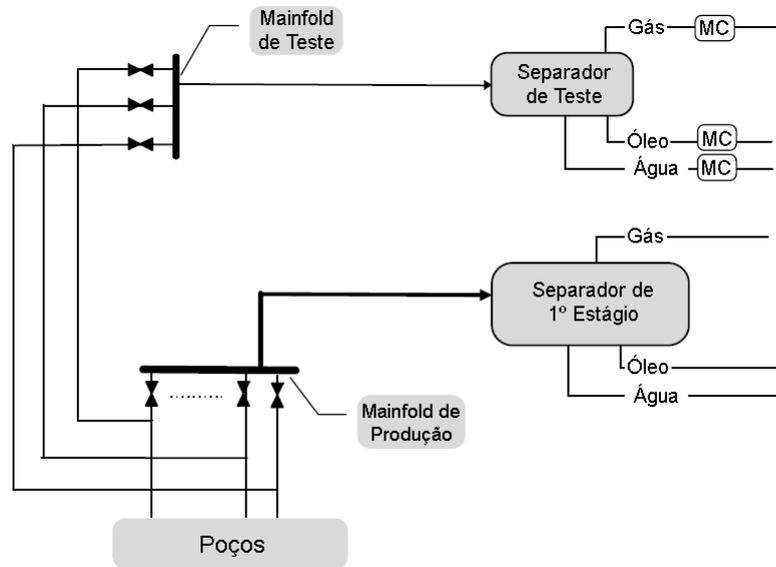


Figura 1.2: Método de avaliação da produção utilizando separador de fases

de medir, sem separação das fases, as vazões de óleo, água e gás, escoando em uma tubulação. Na figura 1.3 é ilustrado uma possível configuração quando se utiliza esse tipo de medidor. Algumas das vantagens da utilização de um Medidor Multifásico (MM) são [8]:

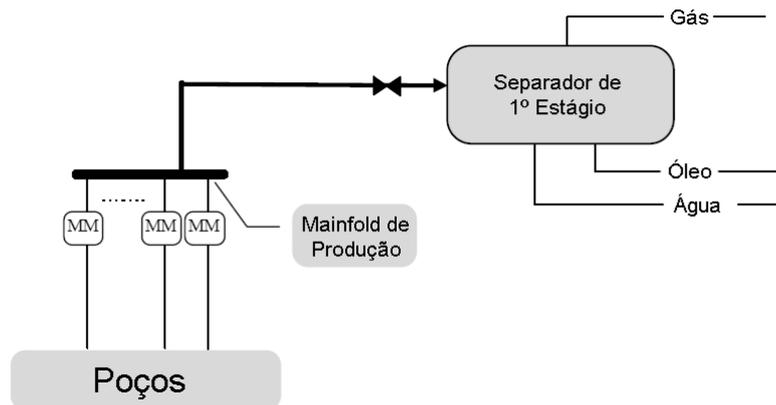


Figura 1.3: Método de avaliação da produção utilizando medidores multifásicos

- redução do tempo de medição;
- eliminação de linhas e separadores de testes;
- melhor gerenciamento do reservatório de produção;

- exploração de novos campos até então inviáveis economicamente;
- melhor controle da vazão de gás das válvulas de *gas lift*;
- otimização da produção de petróleo;
- detecção de parada de produção de um poço de petróleo.

Em contrapartida entre as desvantagens na utilização de medidores multifásicos podemos citar [14]:

- a amostragem dos fluidos não está disponível e, se necessária, pode requerer a instalação de um separador de testes;
- não existe nenhum padrão metrológico rastreável para a aferição dos medidores multifásicos;³
- pode ser necessária a utilização de um separador para a remoção de lama e para fins de limpeza.

Portanto, medidores de vazão multifásica, além de propiciarem uma medição mais representativa dos parâmetros de produção, implicam em uma redução dos investimentos em recursos humanos e em instalações. Apesar das vantagens da utilização desses medidores, é somente recentemente, com o desenvolvimento tecnológico, que estes medidores atingiram os requisitos mínimos de incerteza padrão, resolução e custos requeridos pela indústria para aplicações na produção, sendo que estes instrumentos ainda não atingiram os requisitos mínimos exigidos pela ANP para utilização fiscal. Ainda assim, o custo deste tipo de instrumento ainda é considerado elevado para muitas aplicações.

1.2 Técnicas e Métodos de Medição

A medição multifásica consiste na utilização de equipamentos que permitem a medição da vazão de cada fase, em escoamento multifásico, sem que seja necessária a separação dessas fases, para que suas respectivas vazões (volumétrica ou mássica) sejam determinadas. Nesse tipo de medidor, a medição das vazões das fases é obtida através da interpretação das medições realizadas por diferentes sensores, de acordo com a concepção de medidor adotada. Estes sensores medem os valores de determinados

³tradução livre para: "*multiphase metering is not traceable to any accepted standards*"

parâmetros relativos à fração de presença das fases e suas características fluidas, ou ainda características intrínsecas do escoamento.

Para a indústria de petróleo e gás natural, a mistura multifásica de interesse consiste basicamente de água (normalmente salina), óleo cru e gases. Esta é a mistura encontrada nos reservatórios de petróleo. Dependendo do tipo do reservatório e de diversas condições geológicas e de produção, a composição da mistura pode variar entre os extremos, e apresentar como fase predominante qualquer um dos três componentes, podendo inclusive não apresentar algum dos constituintes. O *triângulo multifásico* é um gráfico que representa as possíveis composições encontradas na exploração de um poço de petróleo [13]. Além disso, o triângulo é de fundamental importância para a compreensão da complexidade do problema da medição multifásica. Na figura 1.4 é mostrado o triângulo multifásico.

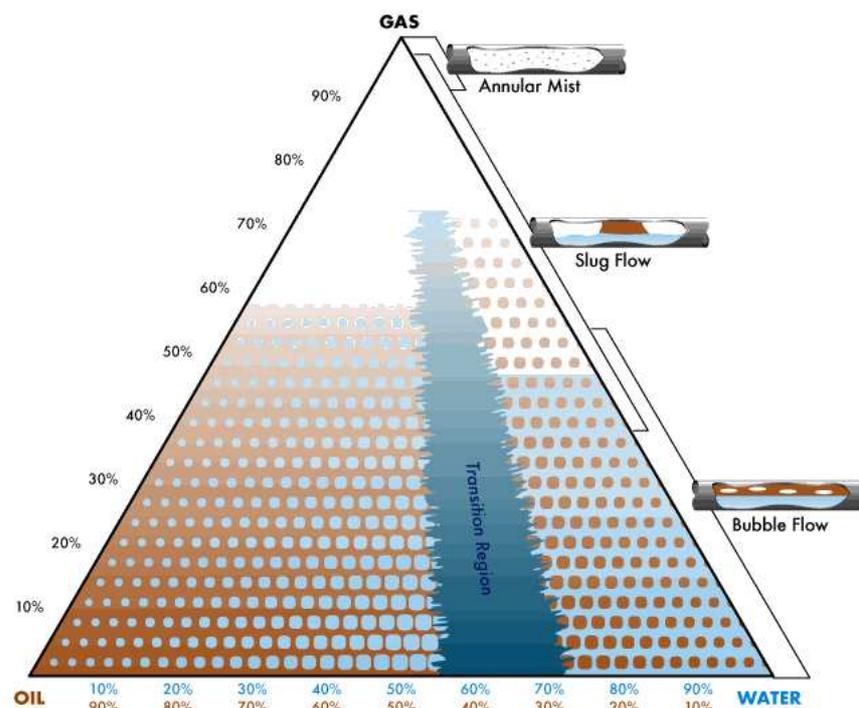


Figura 1.4: Triângulo multifásico [13]

Um medidor multifásico ideal seria aquele que pudesse medir diretamente as frações volumétricas, as velocidades e as massas específicas de cada fase ou componente da mistura, compondo assim as nove incógnitas para a resolução do equacionamento das vazões mássicas de cada fase. Essa forma de medição multifásica também pode ser classificada como um método de medição inferencial. No entanto, tal medidor não existe, sendo que a solução aproximada do problema da vazão multifásica é obtida através de simplificações, aproximações e equações empíricas. Além disso, é comum a

utilização de artifícios que simplificam de alguma forma o problema como, por exemplo, a utilização de misturadores estáticos [8], [14]. Os misturadores estáticos, em teoria, homogeneízam a mistura, igualando a velocidade de escoamento das fases constituintes da mistura e forçando um escoamento do tipo homogêneo.

Podemos dividir o problema da medição multifásica em quatro sub-problemas, ou categorias genéricas [3]:

- determinação dos parâmetros de escoamento⁴;
- determinação das frações volumétricas⁵;
- identificação do tipo do escoamento⁶;
- determinação das propriedades da mistura⁷.

1.2.1 Parâmetros de Escoamento

O principal parâmetro de escoamento medido é a velocidade, ou vazão, do escoamento multifásico. Existem diversas técnicas intrusivas e não-intrusivas para medir a velocidade do escoamento. Abaixo são descritos e listados os principais tipos de medidores utilizados na determinação da velocidade de escoamento, classificados de acordo com a técnica de inferência utilizada:

- **Pressão diferencial:** a velocidade do escoamento é calculada através da leitura da queda de pressão, ou pressão diferencial, devido a uma restrição de escoamento conhecida. Os tipos mais comuns de restrições utilizadas nesse tipo de equipamento são: placas de orifício, tubos de Venturi, *Flow Nozzle* e tubo de Pitot. Para mais detalhes ver [21] e [22].
- **Mecânico:** nesse tipo de medidor são utilizadas partes móveis e a medição da velocidade é realizada através da contagem do número de volumes isolados que passaram através do medidor. Os principais medidores desse tipo são medidores de deslocamento positivo e medidores tipo turbina. Ver [21]
- **Ultrassônico:** a velocidade do escoamento é medida através da alteração na velocidade de propagação das ondas de ultrassom no meio. As duas principais técnicas de inferência utilizadas são: tempo de trânsito e efeito Doppler. Para mais detalhes ver [17] e [5].

⁴*flow parameters*

⁵*volumetric fraction parameters*

⁶*flow regime parameters*

⁷*mixture properties*

- **Correlação Cruzada:** a velocidade do escoamento é calculada através da correlação entre dois sinais provenientes de 2 conjuntos de medição (transmissor/sensor) distantes entre si de uma distância conhecida. Os sensores utilizados para fazer a correlação podem ser de raios-X, raios- γ , ópticos, de impedância elétrica, de capacitância elétrica ou acústicos. Ver [5] e [17]

1.2.2 Frações Volumétricas

A determinação das frações volumétricas das fases constituintes do escoamento multifásico pode ser uma tarefa muito complexa caso as velocidades de escoamento das fases sejam diferentes. Quando as velocidades de escoamento das fases são diferentes, ocorre um fenômeno chamado de *slip*, ou em português "escorregamento" [15]. Geralmente a velocidade da fase gasosa é maior do que a das fases líquidas. Quando ocorre algum tipo de separação das fases líquidas, o fenômeno pode aparecer entre essas fases, implicando em erros de medição significativos caso o medidor não implemente um método de medição de velocidade de escoamento diferenciado para cada uma das fases. Por isso, é comum a utilização de misturadores antes que a medição multifásica *in-line* seja realizada, de maneira a homogeneizar a mistura e impedir a separação das fases.

A correta determinação das frações volumétricas dos constituintes da mistura é de fundamental importância em qualquer tipo de medidor multifásico. Existem uma infinidade de técnicas, métodos e sensores que são utilizados na determinação das frações. De uma maneira geral, podemos dizer que não existe um método universal para a determinação das frações volumétricas que seja eficiente para todas as possíveis condições de escoamento e misturas. Normalmente a determinação das frações volumétricas é realizada através da correlação das medidas obtidas com dois ou mais métodos, ou sensores. Abaixo são listados e descritos alguns dos principais métodos de medição utilizados na determinação das frações volumétricas do escoamento:

- **Interação com sinais de microondas:** devido às características dielétricas peculiares da água, é muito comum a utilização de sinais de microondas na determinação da fração volumétrica desse componente. Existem diversas técnicas de medição que fazem uso de sinais de microondas na determinação da fração de água numa mistura, como por exemplo: medição da atenuação, do atraso de fase e da frequência de ressonância. Ver [9], [20] e [26].
- **Atenuação de sinais de ultrassom:** as partículas sólidas em suspensão, assim como as bolhas de ar presentes num escoamento cuja fase predominante é

líquida, têm a propriedade de espalhar ⁸ ondas de ultrassom. A perda de energia devido à dispersão das ondas ultrassônicas reflete numa atenuação relativa na intensidade do sinal de ultrassom transmitido. Esta técnica pode ser utilizada na determinação da fração de gás de uma mistura de água, gás e óleo, por exemplo. Ver [5].

- **Ressonância Magnética Nuclear (RMN)⁹:** esta técnica baseia-se nas propriedades magnéticas de alguns átomos. Nesse tipo de medição, os átomos interagem com campos magnéticos estáticos, forçando o *spin* dos núcleos dos átomos a se alinharem com o campo aplicado. Então um pulso de ondas eletromagnéticas de RF (*radiofrequência*), de amplo espectro, é transmitido ortogonalmente ao campo estático. Quando a frequência do sinal RF transmitido é igual à frequência de Larmor, ocorre um fenômeno de ressonância, e o *spin* dos átomos se inverte. A energia absorvida devido a esse fenômeno pode ser medida e utilizada para determinar a concentração de um determinado átomo e, indiretamente, a fração de uma determinada fase na mistura. Ver [5].
- **Atenuação radioativa:** este método utiliza a atenuação, por absorção ou dispersão, por parte do material sob análise ¹⁰ de raios X ou raios Gama transmitidos através do meio. As ondas com comprimento de onda da ordem dos raios X e Gama possuem características de partículas, são os chamados fótons. São os fótons que na verdade são absorvidos ou dispersados pelos átomos do MUT. Para a liberação dos fótons são necessárias fontes radioativas que podem diretamente ou indiretamente emitir os raios X ou Gama. Ver [15].
- **Variação da Impedância:** existem duas possibilidades de se medir a impedância complexa de um meio: através da medição da capacitância ou da indutância do meio. Este método pode ser utilizado nas misturas bifásicas, em que a permeabilidade elétrica relativa das fases é suficientemente diferente, o que ocorre, por exemplo, no caso da mistura de óleo e água. Quando a fase de óleo é predominante, pode-se utilizar o método da medição da capacitância. Caso a água seja a fase predominante, pode-se utilizar o método da indutância. Ver [22] e [15].

1.2.3 Tipo do Escoamento

O escoamento multifásico é um fenômeno complexo, difícil de modelar e de prever. A variação do regime de escoamento depende de diversos fatores. Alguns fatores que

⁸tradução para *scatter*

⁹em inglês NMR

¹⁰MUT - *Material Under Test*

interferem no comportamento transitório do escoamento podem ser considerados como perturbações. Esses fatores podem ser, por exemplo, a abertura ou fechamento de uma válvula, alterações na geometria ou na inclinação da tubulação. Na ausência dessas perturbações, o regime de escoamento é determinado pelas velocidades de escoamento, propriedades dos fluidos, diâmetro e inclinação da tubulação [14]. Os diversos tipos de escoamento podem ser agrupados em três tipos:

- **Escoamento disperso**¹¹: caracterizado por uma distribuição uniforme das fases tanto na direção radial quanto na direção axial, conforme mostrado na figura 1.5.
- **Escoamento separado**¹²: este escoamento é caracterizado por uma distribuição contínua de fases na direção axial enquanto apresenta uma distribuição não-contínua na direção radial, conforme mostrado na figura 1.6.
- **Escoamento intermitente**¹³: este tipo de escoamento apresenta uma distribuição não-contínua de fases na direção axial, implicando num comportamento local instável, conforme mostrado na figura 1.7.

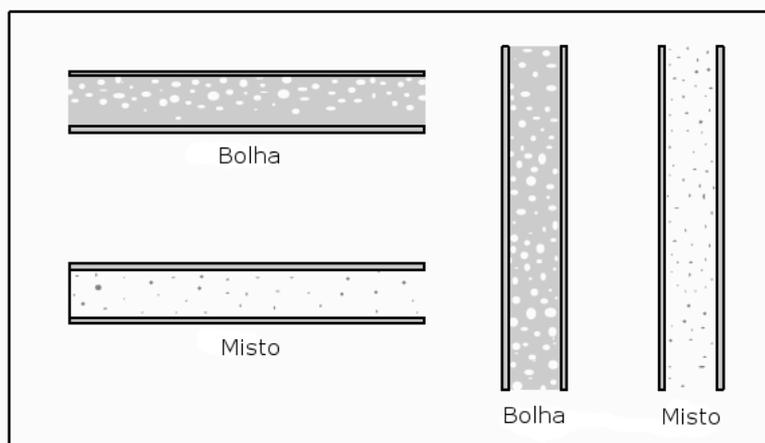


Figura 1.5: Exemplos de escoamento disperso [14]

Os efeitos sobre o tipo do escoamento devido às interações entre as fases líquidas são menos significativos dos que os efeitos devidos às interações entre a fase líquida e gasosa. Portanto, na maioria das situações, pode-se considerar o escoamento da fração líquida, composta de óleo e água, como sendo um escoamento do tipo disperso [14]. Para uma dada tubulação, condições de pressão e fluido multifásico, pode-se traçar um

¹¹do inglês *dispersed flow*

¹²do inglês *separated flow*

¹³do inglês *intermittent flow*

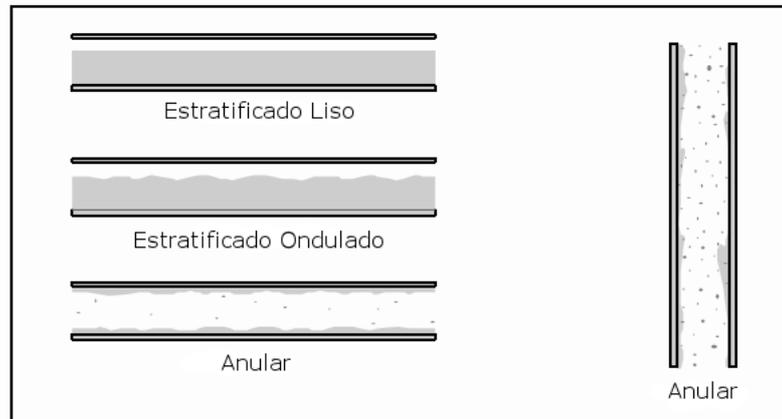


Figura 1.6: Exemplos de escoamento separado [14]

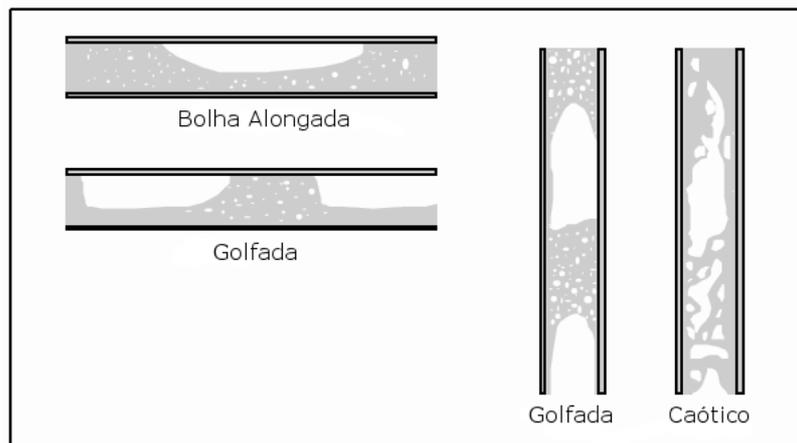


Figura 1.7: Exemplos de escoamento intermitente [14]

mapa qualitativo dos tipos de escoamentos esperados em função das velocidades de escoamento das fases líquidas e gasosas, conforme mostrado nas figuras 1.8 e 1.9, para tubulações verticais e horizontais respectivamente.

Apesar da relevância e influência do tipo do escoamento para a medição multifásica, a maior parte das técnicas utilizadas na determinação dos parâmetros do escoamento e das frações volumétricas requerem que o escoamento seja homogeneizado. Isso caracteriza, portanto, um escoamento disperso com relação às fases líquidas e líquido-gasosa. Alguns dos princípios de medição citados anteriormente podem ser utilizados para se obter uma imagem tomográfica do escoamento. A imagem obtida pode ser então utilizada para a determinação de parâmetros de interesse como, por exemplo, frações volumétricas e tipos de escoamento [15]. As técnicas de imagem normalmente utilizam um conjunto de sensores, ou detectores, dispostos radialmente na tubulação

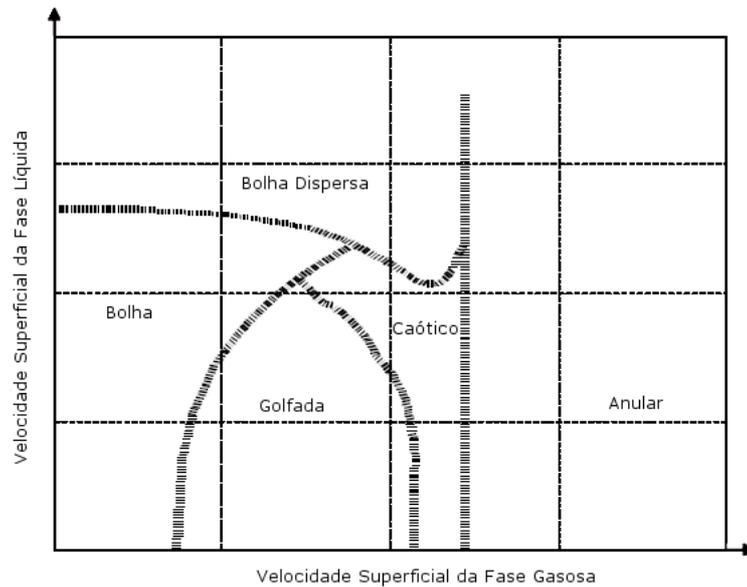


Figura 1.8: Mapa de escoamento multifásico para um escoamento vertical [14]

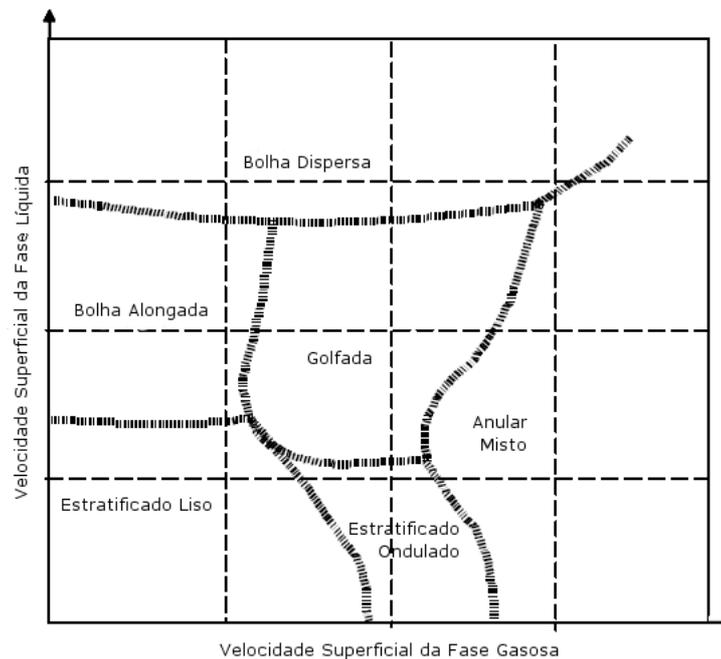


Figura 1.9: Mapa de escoamento multifásico para um escoamento horizontal [14]

de escoamento. Apesar da complexidade e da capacidade computacional exigida, as técnicas de imagem permitem a determinação experimental do tipo de escoamento. Outra técnica utilizada na determinação do tipo de escoamento consiste na utilização de redes neurais [16]. As redes neurais caracterizam um tipo de medição chamado

de caixa-preta¹⁴. Neste tipo de abordagem a modelagem teórica do fenômeno é menos importante do que os resultados obtidos através de um grupo de sensores. Uma vez coletados, os dados relativos ao escoamento podem ser utilizados no treinamento da rede neuronal, que por sua vez pode identificar padrões de escoamento através da correlação de diversas medições.

1.2.4 Propriedades da mistura

Complementarmente à medição das frações volumétricas, velocidades de escoamento e padrão de escoamento, um conjunto de outros parâmetros da mistura e do escoamento se faz necessário para a solução, ou redução das incertezas das medições, do problema da medição multifásica. Podemos citar os seguintes parâmetros como relevantes ao problema [3]:

- densidades;
- salinidade;
- temperatura;
- pressão;
- constante dielétrica.

Dependendo do método de medição empregado na determinação da fração de água da mistura, algumas compensações na medição podem ser necessárias. Isto ocorre quando existe uma influência direta de um determinado parâmetro sobre a medição em questão como, por exemplo, a temperatura e a salinidade, que interferem nas medições realizadas utilizando-se tecnologia de microondas [9]. Quando se deseja calcular a vazão mássica da mistura, parâmetros como as densidades, pressão e temperatura se tornam indispensáveis. A importância de um determinado parâmetro depende das técnicas de medição adotadas e do propósito específico do medidor concebido. De uma maneira geral, quanto maior o número de parâmetros do escoamento, mistura e componentes forem determinados, melhor e mais precisos tendem a ser os resultados obtidos. No entanto, a determinação da correta correlação entre as diversas propriedades medidas torna-se uma tarefa cada vez complexa. Métodos do tipo *caixa-preta*, aplicados utilizando-se algum tipo de inteligência computacional e que fazem uso da grande capacidade de processamento dos sistemas digitais modernos ganham cada vez mais importância e tornam-se cada vez mais importantes para a solução do problema da medição multifásica [3], [16].

¹⁴do inglês *black-box*

1.3 Medição utilizando microondas

A absorção de microondas é um método de inferência muito difundido e utilizado na determinação da fração, ou composição, de água de uma mistura. Isto é possível graças às características dielétricas da água, bem distintas dos demais componentes da mistura comumente encontrada nos poços de petróleo. Algumas das vantagens da utilização deste tipo de sensor para a medição das propriedades dos materiais são abaixo listadas [20]:

- não necessitam de contato físico com o processo;
- as microondas penetram em praticamente todos os materiais, com exceção dos metais, sendo portanto, os resultados representativos do volume do material sob análise e não somente da superfície;
- de uma maneira geral, a água apresenta um bom contraste em relação aos demais materiais, tornando este tipo de medidor aconselhável para a medição da fração de água;
- os sensores de microondas não são sensíveis a condições ambientais como vapores de água, sujeira e altas temperaturas;
- para as potências de transmissão normalmente utilizadas neste tipo de aplicação, as microondas (radiações não-ionizantes) são um método seguro para humanos, em contraste com os métodos que utilizam radiações ionizantes;
- para as frequências de microondas, a influência da propriedade elétrica de condutividade DC ¹⁵ dos materiais pode ser desprezada;
- sensores de microondas são rápidos, possuindo um tempo de resposta pequeno;
- as microondas não afetam o material sob análise.

As microondas interagem com os materiais de diferentes formas. A interação pode se dar na forma de absorção, emissão, refração, dispersão, reflexão ou alteração da velocidade e da fase. Dependendo do arranjo de medição adotado e do fenômeno de interação no qual baseia-se o sensor utilizado, os sensores de microondas podem ser classificados em grupos. Alguns dos principais grupos são [20]:

- sensores de transmissão¹⁶;

¹⁵*DC conductivity*

¹⁶tradução livre do inglês *transmission sensors*

- sensores de ressonância;
- radares e sensores de reflexão;
- radiômetros;
- sensores tomográficos;
- sensores especiais.

Basicamente, o que distingue um tipo de sensor do outro é a maneira como o sistema de microondas interage com os materiais e qual fenômeno de interação está sendo avaliado. De uma maneira geral, os sensores, sistemas de transmissão e processamento dos sinais de microondas são muito similares.

Os sensores de cavidade de ressonância são os mais utilizados na medição da fração de água em aplicações na indústria de óleo e gás natural [9], [20]. Os sensores de transmissão também são citados [9], mas devido à grande atenuação que os sinais de microondas sofrem devido a grandes frações de água, sua utilização não é tão difundida. Os sensores de transmissão são mais simples de serem implementados e desenvolvidos do que os sensores do tipo cavidade de ressonância, e por isso serão estudados no presente trabalho, caracterizando um primeiro esforço na tentativa de domínio dessa tecnologia.

É importante ressaltar que existe um número reduzido de fabricantes ofertando medidores multifásicos e medidores de fração de água que utilizam tecnologia de microondas. Além disso, talvez por motivos estratégicos, esses fabricantes disponibilizam poucos dados e informações a respeito dos seus produtos. Há também poucos artigos e referências sobre o assunto.

1.4 Aplicações de Sensores de Microondas na Indústria de Petróleo e Gás

Os sensores de microondas são utilizados na indústria de petróleo e gás principalmente na medição da fração de água. Também são utilizados na medição de níveis de tanques. Outra aplicação não diretamente relacionada é na medição de vazamentos de óleo nos oceanos. A medição de fração de água, utilizando-se tecnologia de microondas, é utilizada em diversas aplicações, das quais podemos citar:

- **Medição *downhole*:** a utilização de múltiplos *boreholes*, ou perfurações, na exploração do petróleo é uma tendência na tecnologia de gerenciamento de reservatórios. Nessa situação, a produção de muitas zonas de produção convergem para um poço principal. Para a otimização da produção e recuperação desses reservatórios é necessário que a produção de cada zona possa ser medida e controlada de maneira independente. A utilização de medidores de fração de água capazes de medir a fração de água de cada zona permite aos operadores e engenheiros de reservatório monitorar continuamente as frações de água e óleo produzidas, permitindo a detecção de uma frente de água numa determinada zona de produção [20].
- **Medição da produção no *mainfold* principal:** os medidores de fração de água também podem ser utilizados na saída de um *mainfold* para permitir a avaliação da produção de um conjunto de poços.
- **Medição da produção e de custódia:** os medidores de fração de água são utilizados na saída de óleo de separadores primários, de maneira a corrigir pequenos desvios da produção devido à presença de quantidades mínimas de água.

1.5 Objetivos

O presente trabalho se insere em um projeto de pesquisa, dentro do DAS/USFC (Departamento de Automação e Sistemas), cujo objetivo final é o desenvolvimento, análise e calibração de um protótipo de um medidor de vazão multifásica de baixo custo, não intrusivo, capaz de medir as frações dos componentes do escoamento multifásico (água/óleo/gás) e suas vazões volumétricas. Para tal é necessário o desenvolvimento e avaliação das diversas partes constituintes do sistema de medição multifásico.

A primeira etapa do projeto consiste no desenvolvimento de um medidor de fração de água que utilize tecnologia de microondas. Para avaliar algumas das diversas técnicas de inferência utilizando-se microondas foi construída uma bancada para ensaios. Para que os testes fossem possíveis também foi desenvolvida uma unidade microprocessada de controle e aquisição de sinais. A unidade de controle e aquisição desenvolvida para a bancada de testes é a base da unidade de processamento do protótipo do medidor de fração de água.

Os objetivos do trabalho são abaixo listados:

- Desenvolvimento de uma unidade de controle e aquisição de dados, utilizando um processador digital de sinais (DSP), com comunicação em rede através do protocolo Modbus TCP/IP com um software supervisor;

- Desenvolvimento de um software supervisor, em ambiente Windows, para a aquisição de dados e configuração da unidade de aquisição e controle.
- Construção de uma bancada de testes estáticos para avaliação das diversas técnicas de inferência utilizando microondas para misturas bifásicas homogeneizadas.
- Avaliação da viabilidade das técnicas de medição baseadas na tecnologia de microondas para a utilização na medição da fração de água em aplicações da indústria de petróleo e gás.

Os resultados do presente trabalho são importantes para o desenvolvimento de um medidor de fração de água industrial e, posteriormente, um medidor multifásico. A principal simplificação assumida no trabalho é a composição bifásica (água/óleo) do fluido. Na presença de gás, são esperados erros na determinação da fração ou da porcentagem de óleo na mistura, quando se utiliza somente um medidor de fração de água.

Tão importante quanto os resultados obtidos nos testes é o domínio da tecnologia de instrumentação baseada em microondas. Tal tecnologia possui um custo relativamente alto. De uma maneira geral, quanto mais alta a frequência, maiores os custos dos equipamentos eletrônicos necessários. Além disso, a maior parte dos componentes e equipamentos utilizados são para uso na indústria militar ou na indústria aeroespacial, fato este que encarece e dificulta ainda mais a compra e o desenvolvimento com tal tecnologia.

1.6 Organização da Dissertação

No capítulo 2 é realizada uma revisão condensada da bibliografia referente a medidores de microondas. São apresentados alguns fundamentos teóricos sobre a tecnologia de microondas de maneira a proporcionar àqueles que não são da área uma introdução ao assunto.

No capítulo 3 é apresentado o sistema experimental, constituído da bancada de testes e medição. Cada uma das partes constituintes da solução adotada é detalhada e justificada.

No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais obtidos com o sistema. Também são descritos e comentados os ensaios que foram realizados para a obtenção dos resultados apresentados.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho. A eficácia do sistema experimental de medição e das técnicas de medição estudadas são comentadas. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros, bem como uma lista de possíveis melhorias.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

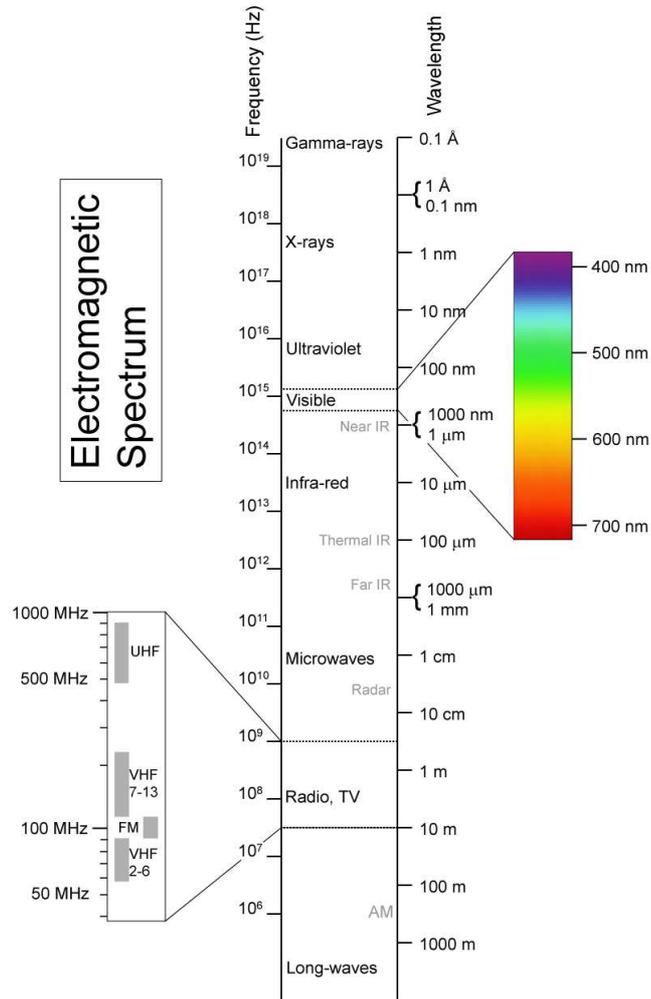
Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica da literatura. São apresentados, de maneira condensada, alguns fundamentos teóricos sobre eletromagnetismo, interação das ondas eletromagnéticas com os materiais e sensores de microondas. O objetivo é introduzir o assunto àqueles que não são da área. O conteúdo do presente capítulo foi todo extraído da literatura, assim como a maior parte das figuras mostradas. A fonte de referência das figuras é mostrada na sua descrição. Os temas são abordados de maneira introdutória e ilustrativa. Para mais detalhes devem-se consultar as referências sugeridas para o tema.

2.1 Ondas Eletromagnéticas

As chamadas Microondas, assim como a luz visível e os raios-X, são ondas eletromagnéticas. O que difere as microondas das demais ondas eletromagnéticas é o seu comprimento de onda λ , ou sua frequência. O comprimento de onda λ e a frequência f se correlacionam através da velocidade de propagação c , dada pela equação 2.1. A figura 2.1 mostra como é dividido e categorizado o espectro eletromagnético.

$$\lambda f = v. \tag{2.1}$$

A radiação eletromagnética possui uma natureza dual, comportando-se tanto como onda quanto como partícula ao mesmo tempo. O comportamento de partícula é explicado pela física quântica. De acordo com a física quântica, a energia eletromagnética tem uma natureza discreta e não pode existir em quantidades arbitrárias, mas sim em múltiplos da menor quantidade possível, chamada de *quantum* (ou fóton no caso da luz visível). A energia de um *quantum* se relaciona com a frequência através da equação



Louis E. Keiner - Coastal Carolina University

Figura 2.1: Espectro eletromagnético

$$E_q = hf, \quad (2.2)$$

onde E_q é a energia do *quantum* e h é a constante de Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34} Js$). Assim, nas altas frequências (parte superior do espectro) o comportamento de partícula é acentuado, por isso falamos em raios (raios Gama e raios-X). No entanto, na faixa das microondas a energia do *quantum* é muito pequena e, portanto, podemos desprezar o comportamento partícula e considerar as microondas como ondas somente.

2.2 Propagação das Ondas Eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas podem propagar-se livremente através do espaço (ar ou vácuo, por exemplo) ou através de linhas de transmissão, ou guias-de-onda. As ondas eletromagnéticas também podem propagar-se através dos materiais, estando, no entanto, sujeitas a níveis de atenuação maiores ou menores dependendo, de uma maneira geral, da permissividade, da permeabilidade e da condutividade do meio, além da frequência da onda eletromagnética que se propaga. A propagação das ondas eletromagnéticas é descrita através das equações de Maxwell [11], [9], [6], as quais não serão aqui mostradas nem abordadas, pois fogem do escopo do presente trabalho.

O fenômeno da propagação eletromagnética, seja no vácuo ou através de outro meio qualquer, é regido por três propriedades do meio: pela permissividade elétrica $[\epsilon]$, pela permeabilidade eletromagnética $[\mu]$ e pela condutividade $[\sigma]$. As duas constantes se correlacionam através da equação 2.3, conhecida como a **equação de onda eletromagnética**.

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (2.3)$$

onde \mathbf{E} é a intensidade do campo elétrico. A velocidade de propagação de uma onda num meio depende das constantes de permissividade e permeabilidade do material. Para meios sem perda a velocidade de propagação pode ser expressa pela equação

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}. \quad (2.4)$$

Os valores das constantes de permissividade (ou dielétrica) e permeabilidade no vácuo são

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \quad [F/m] \quad (Farad/metros), \quad (2.5)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad [H/m] \quad (Henry/metros) \quad (2.6)$$

Para os valores acima, a velocidade de propagação c_0 é de $2.998 \times 10^8 m/s$, que é a velocidade de propagação da luz no vácuo. Por volta de 1860 Maxwell determinou que a velocidade de uma onda eletromagnética corresponde a 193.088 milhas por segundo. Nessa época a melhor medida direta existente da velocidade da luz era 193.118 milhas por segundo. A partir dessa informação, Maxwell chegou à conclusão que a luz deveria ser um fenômeno eletromagnético [1].

2.3 Interação das Microondas com os Materiais

As microondas propagam-se em praticamente qualquer meio, sendo afetadas pelo meio em diversas maneiras. Os materiais não-condutores, ou que são péssimos condutores, são chamados de materiais dielétricos. Nos materiais dielétricos, devido às interações eletromagnéticas das ondas com as cargas elétricas dos materiais (elétrons, íons, moléculas polares), ou então com os dipolos magnéticos do meio, as microondas são atenuadas.

A atenuação de um sinal de microondas é normalmente medida em decibéis dB. A atenuação da amplitude de um campo é dada pela equação

$$A_E(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{E_2}{E_1} \right). \quad (2.7)$$

Por ser a potência proporcional ao quadrado da amplitude do campo, a atenuação, ou ganho, na potência do sinal eletromagnético é dada pela equação

$$A_P(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right). \quad (2.8)$$

Conforme apontado anteriormente, a interação das ondas eletromagnéticas com o meio depende das constantes de permissividade e permeabilidade do meio. As duas constantes são expressas matematicamente como números complexos, conforme descrito abaixo

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (2.9)$$

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.10)$$

O índice r nas equações acima indica que tratam-se de grandezas relativas. A referência nesse caso é a permissividade elétrica ϵ_0 e a permeabilidade μ_0 do vácuo. As grandezas se relacionam através das equações

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0, \quad (2.11)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0. \quad (2.12)$$

As propriedades eletromagnéticas do meio são, portanto, descritas através de quatro constantes praticamente independentes ($\epsilon'_r, \epsilon''_r, \mu'_r, \mu''_r$), as quais, por sua vez, dependem de outras propriedades físicas do meio (como por exemplo: mistura, composição, densidade, temperatura, entre outras) e também da frequência de medição utilizada.

Através do conhecimento da relação entre ϵ_r, μ_r e as propriedades de um dado material, pode-se inferir sobre a composição, ou mistura, do material através da análise dos parâmetros de propagação da onda nesse meio. Para materiais não magnéticos podemos assumir $\mu_r = 1$. Nesse caso, o problema fica reduzido à análise da constante de permissividade elétrica do material.

Além dos fatores de propagação do meio, este também interage com as ondas eletromagnéticas através da refração e reflexão das ondas. Tais interações não serão aqui descritas, pois fogem do escopo e dos objetivos do presente trabalho. A reflexão das ondas eletromagnéticas é o princípio básico de sistemas de radar. Mais informações sobre esse tipo de interações e sistemas, podem ser encontradas em [6], [11].

2.4 Propriedades Dielétricas dos Materiais

Os materiais são normalmente compostos de partículas eletricamente carregadas, as quais se arranjam de tal maneira que qualquer região macroscópica do material torna-se eletricamente neutra. Quando submetida a um campo elétrico externo \mathbf{E}_e , este age como uma força externa, alterando o equilíbrio natural da região a ele submetida. As partículas positivas e negativas movem-se em direções opostas, polarizando a região. Essa polarização produz um campo elétrico interno (\mathbf{E}_i) inferior ao campo externo. A permissividade relativa é uma medida dos efeitos polarizantes na força do campo, ou seja, quão facilmente o meio é polarizado.

A parte complexa de ϵ_r , ou seja ϵ''_r (ver equação 2.10), está relacionada à capacidade dissipativa do meio, e nos dá uma medida da atenuação imposta pelo meio à propagação de uma onda eletromagnética através desse. Num meio onde há perdas dielétricas, a energia eletromagnética é gradualmente transformada em calor. Tal perda é devida à fricção provocada pelo deslocamento das cargas elétricas quando o material se polariza. A polarização ocorre constantemente, em sincronia com o campo elétrico alternado induzido pela propagação da onda eletromagnética através do meio. O valor de ϵ''_r é sempre positivo e normalmente muito inferior a ϵ'_r . O menor valor para ϵ''_r é zero, num meio onde não há perdas dielétricas.

A parte real de ϵ_r , ou seja ϵ'_r (ver equação 2.10), está relacionada às alterações na relação entre as intensidades dos campos elétricos e eletromagnéticos. A relação entre

as intensidades dos campos elétricos e magnéticos caracteriza a impedância da onda. A parte real de ϵ_r também está relacionada à velocidade de propagação da onda no meio. Isso implica num atraso no tempo de propagação da onda, relativo à onda que se propaga no vácuo. Este fenômeno também pode ser interpretado como um atraso na fase do sinal transmitido. A equação abaixo é uma correlação aproximada, para materiais não magnéticos e com baixas perdas dielétricas ($\epsilon_r'' \ll \epsilon_r'$) [9]

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r'}}. \quad (2.13)$$

2.4.1 Propriedades Dielétricas da Água

Devido às características dielétricas da água, é comum a utilização de medidores de microondas na determinação da fração de água de uma mistura. As moléculas de água, devido à sua estrutura molecular peculiar, caracterizam um dipolo permanente, conforme mostrado na figura 2.2. Este dipolo permanente cria na molécula de água um momento de dipolo diferente de zero. Devido a esse momento permanente das moléculas de água, a água líquida é considerada uma substância polar.

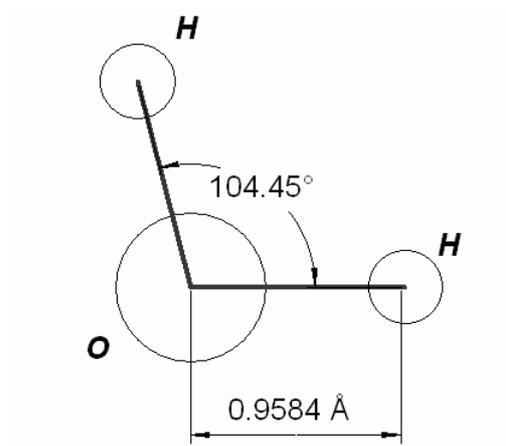


Figura 2.2: Molécula de água

A permissividade da água é altamente dependente de fatores externos como a temperatura e a salinidade. Com o aumento da temperatura, a força das ligações dos átomos de hidrogênio se enfraquece. O efeito do enfraquecimento de tais ligações é que a parte real da permissividade elétrica se reduz. O dipolo se movimenta com mais facilidade e em mais altas frequências, reduzindo as perdas dielétricas (fator complexo da permissividade elétrica), e o arrasto no movimento de rotação das moléculas é reduzido,

causando menos fricção e, conseqüentemente, menos perdas dielétricas também. A presença de sais dissolvidos na água altera a estrutura natural das moléculas, reduzindo o fator real da permissividade elétrica do meio [7].

Por se tratar de uma substância polar, a permissividade da água obedece à relação de Debye [9]. Além disso, caso a água possua sais dissolvidos, é necessário se levar em consideração no cálculo da permissividade elétrica o termo referente à condutividade da água. A permissividade elétrica pode ser expressa pela equação

$$\epsilon_r = \epsilon'_{r\infty} + \frac{\epsilon'_{rs} - \epsilon'_{r\infty}}{1 + j\omega\tau} - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}, \quad (2.14)$$

onde $\epsilon'_{r\infty}$ é a permissividade óptica, para altas frequências (quando $\omega \rightarrow \infty$), ϵ'_{rs} é a permissividade estática, para baixas frequências (quando $\omega \rightarrow 0$), τ é o tempo de relaxação e está associada com a constante de tempo da resposta da polarização a um degrau no campo elétrico, e σ corresponde à condutividade do meio.

No gráfico da figura 2.3 é mostrado como a permissividade elétrica da água pura varia com a temperatura para diferentes frequências. As linhas vermelhas correspondem à variação da parte real da permissividade elétrica (ϵ'_r) com a temperatura, enquanto as linhas verdes correspondem a variação da parte imaginária da permissividade elétrica (ϵ''_r). No gráfico 2.4 são mostradas as mesmas curvas do gráfico 2.3 para a água com uma concentração de sais de 10ppt.

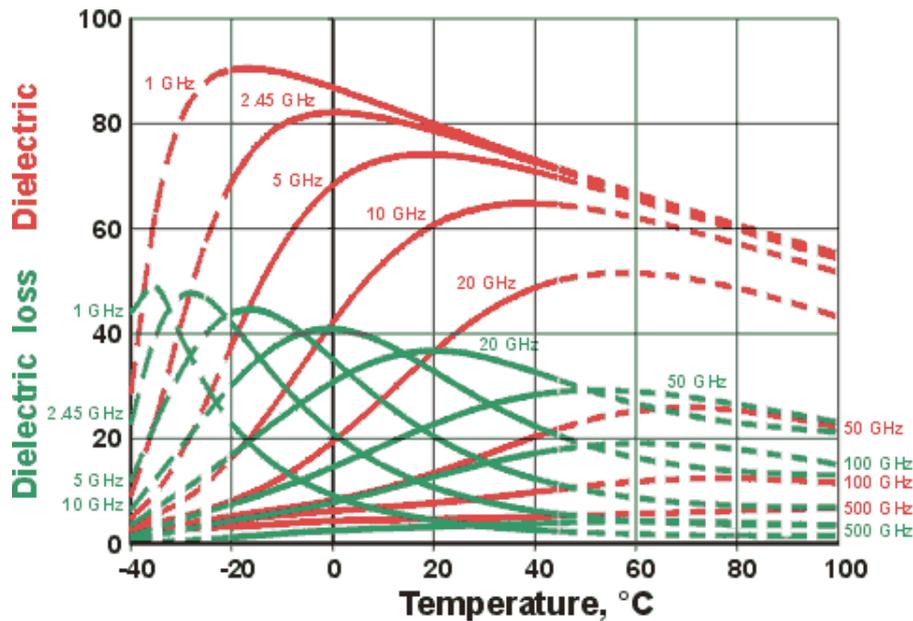


Figura 2.3: Variação da permissividade elétrica da água pura com o aumento da temperatura para diferentes frequências [7]

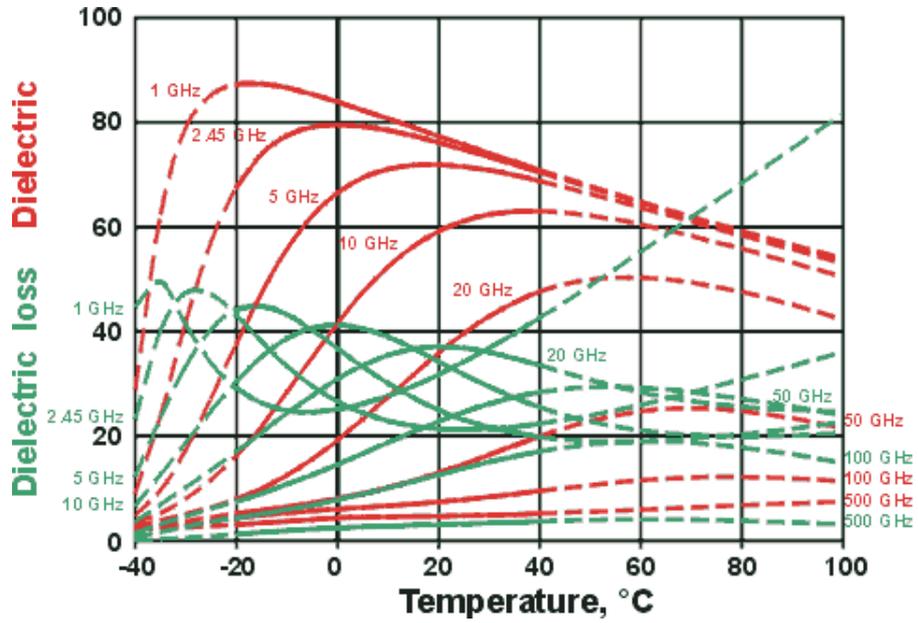


Figura 2.4: Variação da permissividade elétrica da água salgada (10 ppt) com o aumento da temperatura para diferentes frequências [7]

A influência da presença de diferentes concentrações de sais na constante dielétrica da água é mostrada com mais detalhes na figura 2.5, para uma frequência fixa.

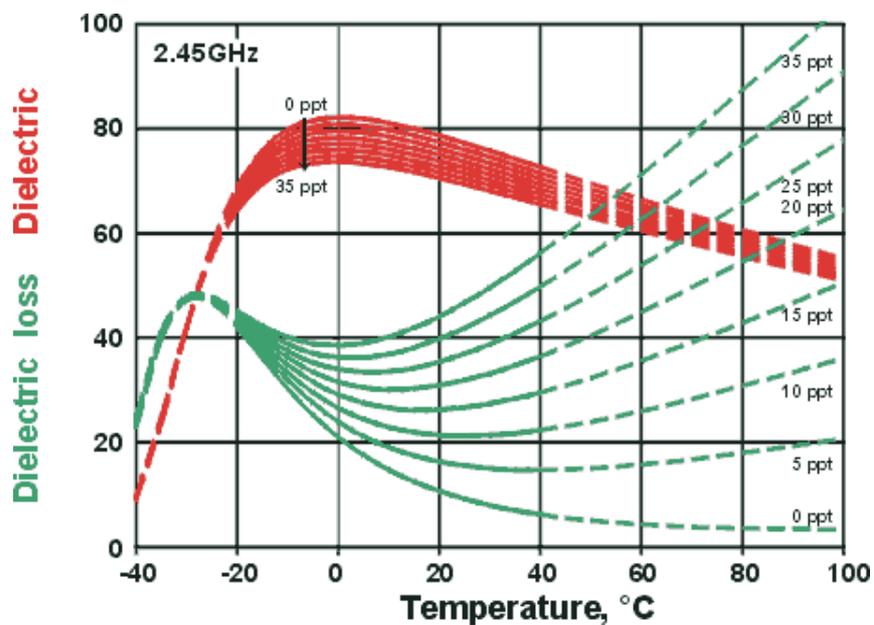


Figura 2.5: Variação da permissividade elétrica da água salgada com o aumento da temperatura para diferentes concentrações de sais [7]

A combinação dos gráficos anteriores pode ser qualitativamente representada pelo

gráfico 2.6, onde as linhas tracejadas ilustram as variações da constante dielétrica da água na presença de sais e as setas representam o sentido da variação da constante dielétrica com o aumento da temperatura.

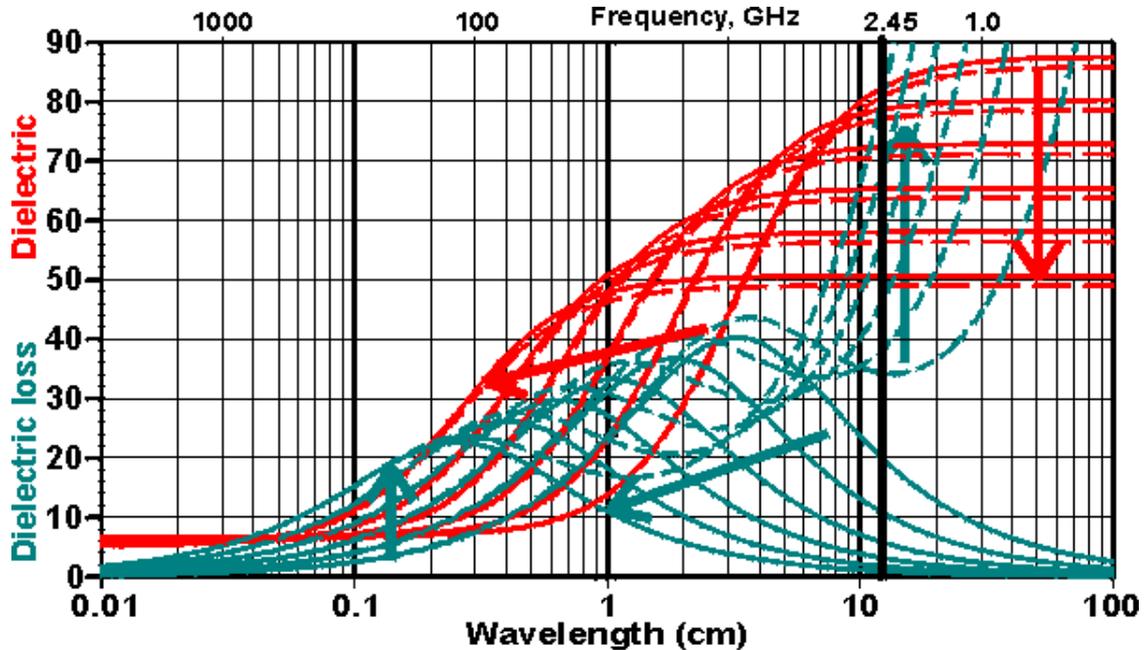


Figura 2.6: Variação da permissividade elétrica da água com a frequência, temperatura e concentração de sais [7]

2.5 Geração, Transmissão e Processamento de Sinais de Microondas

Para a geração, transmissão, recepção e processamento de sinais de microondas são necessários diversos componentes passivos e ativos (estado sólido), específicos para este tipo de sinal, os quais são conectados através de guias-de-onda. Dentre os componentes passivos podemos citar: antenas, guias-de-onda, cabos coaxiais, terminadores, atenuadores, divisores de potência ¹, filtros, isoladores, circuladores ², entre outros. Alguns exemplos de componentes ativos, ou de estado-sólido, são: osciladores, VCOs (*Voltage Controlled Oscillators*), detectores, interruptores ³, misturadores ⁴, amplificadores e atenuadores controláveis.

¹do inglês *power dividers*

²do inglês *circulators*

³do inglês *switches*

⁴do inglês *mixers*

Pela classificação acima, são considerados ativos todos os componentes de estado-sólido. No entanto, outras classificações consideram como ativos componentes que possuem resistência negativa e que são capazes de gerar um sinal de RF a partir de uma polarização DC [6].

2.5.1 Parâmetros de Sistemas de Microondas

Um sistema de microondas é composto por diversos componentes, passivos e ativos, interconectados por linhas de transmissão. A eficiência do sistema como um todo é calculada através do conhecimento da eficiência de cada uma das partes que o compõem. Para medir a eficiência de cada um dos componentes, incluindo as linhas de transmissão, são utilizados diversos parâmetros. Alguns dos parâmetros mais importantes são apresentados a seguir:

a) Coeficiente de Reflexão

A reflexão de uma parcela da potência do sinal transmitido entre dois componentes ocorre quando não há um casamento da impedância característica da linha de transmissão, Z_0 , com a impedância de entrada do componente, Z_L . O coeficiente de reflexão Γ_L também pode ser determinado em função de Z_0 e Z_L , onde o casamento das impedâncias ($Z_0 = Z_L$) proporciona a máxima transferência de potência e, conseqüentemente, um coeficiente de reflexão nulo, conforme a equação [6]

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}. \quad (2.15)$$

A potência refletida P_r por um dado componente pode ser calculada através do coeficiente de reflexão conforme a equação [6]

$$P_r = |\Gamma_L|^2 P_{in}, \quad (2.16)$$

onde P_{in} é a potência incidente. A potência efetivamente transmitida P_t para o componente é dada pela diferença entre P_{in} e P_r .

b) Coeficiente de Onda Estacionária (VSWR)

O coeficiente de onda estacionária VSWR (do inglês *Voltage Standing Wave Ratio*) está relacionado às interações entre o sinal incidente e o refletido. Nos casos onde

não há o casamento entre a impedância característica da linha de transmissão com a impedância de entrada e, portanto, uma parte da potência incidente é refletida, a interação entre a onda incidente e a refletida produz um padrão de onda estacionária ao longo da linha de transmissão. O VSWR pode ser expresso em função do coeficiente de reflexão Γ_L do componente, conforme a equação

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|}. \quad (2.17)$$

c) Perdas de Inserção e Perdas de Retorno

As perdas de inserção ⁵ (IL) e as perdas de retorno ⁶ (RL) de um componente são dadas pelas equações 2.18 e 2.19 respectivamente.

$$IL = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_t} \right), \quad (2.18)$$

$$RL = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_r} \right) = 20 \log |\Gamma_L|, \quad (2.19)$$

onde P_t é a potência efetivamente transmitida ao componente e P_{in} é potência incidente no componente.

d) Potência de Saída (dBm)

As medidas em decibéis [dB] são normalmente relativas, ou expressam algum tipo de ganho. No entanto, a escala logarítmica também pode ser utilizada para expressar valores absolutos de potência, sendo para tal necessário que se estabeleça uma unidade de referência. Em sistemas de microondas são normalmente utilizadas como referências $1mW$ e $1W$. A unidade dBm é expressa em dB relativos a $1mW$, conforme a equação abaixo

$$P(dBm) = 10 \log P(mW). \quad (2.20)$$

Utilizando-se a fórmula acima obtém-se que uma medida de $0dBm$ de potência é equivalente a $1mW$, assim como uma medida de $30dBm$ equivale a $1W$. A unidade dBW tem $1W$ como potência de referência. Assim sendo, $0dBW$ equivale a $1W$, bem como $-10dBW$ equivale a $0,1W$.

⁵do inglês *Insertion Loss*

⁶do inglês *Return Loss*

2.5.2 Componentes de um Sistema de Microondas

Abaixo são descritos cada um dos componentes/módulos que serão utilizados no sistema. Para mais detalhes sobre a construção e os princípios funcionais dos componentes utilizados no sistema de microondas ver [23] e [25].

a) Antenas

As antenas são componentes que irradiam e captam ondas eletromagnéticas. Tratam-se de dispositivos recíprocos, ou seja, uma mesma antena pode ser utilizada para transmitir ou receber os sinais de microondas. As antenas são responsáveis pela transição das ondas guiadas e confinadas às guias-de-onda para o espaço livre e vice-versa. Enquanto as guias-de-onda são projetadas para apresentarem o mínimo possível de perdas por irradiação, as antenas por sua vez são projetadas para irradiarem ao máximo. As antenas podem ser classificadas de acordo com a sua geometria, com o ganho, com sua direcionalidade e com a largura da sua banda.

Por se tratar de um componente com a apenas uma porta, ou conexão, a impedância de entrada e o $VSWR$ da antena podem ser descritos através do coeficiente de reflexão Γ_L da antena, de acordo com a equação 2.17, mostrada anteriormente. Uma antena ideal deveria possuir $VSWR = 1$, ou seja, toda a potência incidente P_{in} é transmitida para a antena e não há perda por reflexão. No entanto, para a maior parte das aplicações um $VSWR \leq 2$ é aceitável.

A largura de banda de uma antena ⁷ é definida como uma faixa de frequências para a qual o desempenho da antena está em conformidade com algum padrão. Um padrão normalmente empregado é um $VSWR \leq 2$, o qual implica numa reflexão de aproximadamente 11% da potência incidente. Assim, a largura de banda da antena (BW) corresponderia à faixa de frequências para o qual o $VSWR$ da antena é menor ou igual a 2.

A diretividade de uma antena D_{max} é uma medida comparativa das propriedades direcionais de uma antena qualquer em relação a uma antena isotrópica, a qual possui, por definição, $D_{max} = 1$. Uma antena isotrópica é uma antena teórica, que não pode ser realizada na prática, que irradia energia igualmente em todas as direções. A eficiência η de uma antena é dada pela equação

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{loss}}, \quad (2.21)$$

⁷do inglês *bandwidth*

onde P_{rad} é a potência efetivamente irradiada pela antena e P_{loss} é a diferença entre a potência incidente na antena P_{in} e P_{rad} .

O ganho G de uma antena é dado pelo produto da diretividade D_{max} pela eficiência η da antena. De uma maneira geral, quanto mais concentrada no espaço for a região de irradiação da antena, maior será o seu ganho. Na figura 2.7 são mostradas comparativamente as distribuições espaciais da irradiação de três tipo de antenas.

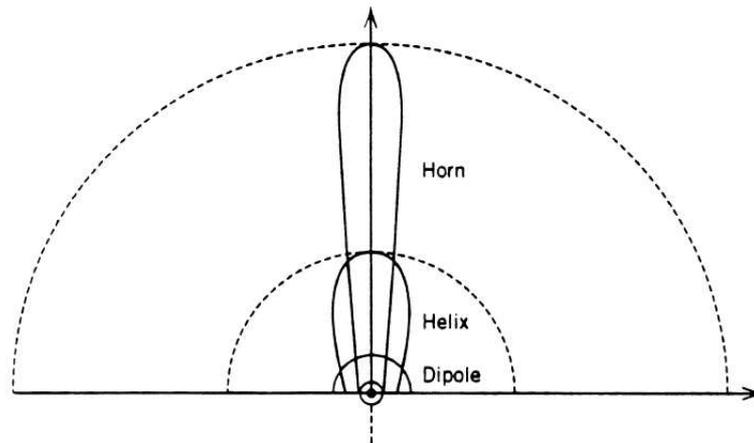


Figura 2.7: Tipos de antenas - comparação dos diagramas de radiação [6]

b) Divisores de Potência, Acopladores e Acopladores Híbridos

Os Divisores de Potência ⁸, Acopladores ⁹ e os Acopladores Híbridos ¹⁰ são componentes utilizados para combinar ou dividir sinais. Um sinal incidente num desses componentes pode ter sua potência de incidência dividida em 2 ou mais portas. A potência nas portas de saídas pode ser igualmente dividida, o que equivale a um fator de acoplamento de $3dB$, ou possuir outros valores para os fatores de acoplamento. Além disso, o sinal numa das portas de saída pode ser defasado em relação às outras portas, caracterizando um acoplador do tipo híbrido (*hybrid*). Enquanto os componentes do tipo Acoplador e Acoplador Híbrido normalmente possuem 2 portas de saída, podendo apresentar fatores de acoplamento diferentes de $3dB$ ou defasagem entre os sinais das portas, os componentes do tipo Divisor de Potência costumam apresentar mais de 2 portas, todas com sinais idênticos. Estes tipos de componentes podem ser utilizados, por exemplo, em alimentadores de antenas, discriminadores de frequência,

⁸do inglês *Power Splitters*

⁹do inglês *Couplers*

¹⁰do inglês *Hybrids*

misturadores balanceados de sinais, moduladores, deslocadores de fase, detectores de fase, entre outras aplicações.

c) Isoladores e Circuladores

Os isoladores e circuladores são componentes não recíprocos. Isso implica que os coeficientes de transmissão não são os mesmos para diferentes direções de propagação. Um isolador normalmente apresenta uma baixa atenuação na transmissão de sinais da porta 1 para a porta 2, mas no sentido inverso, ou seja, na transmissão de sinais da porta 2 para a porta 1, este apresenta uma grande atenuação, conforme mostrado na figura 2.8a. Normalmente este tipo de componente é utilizado na proteção de fontes de energia como, por exemplo, osciladores e amplificadores, impedindo que a potência refletida devido a um descasamento de impedâncias danifique o equipamento gerador, conforme ilustrado na figura 2.8b. Dessa forma, o componente inserido anteriormente a um isolador num sistema de geração enxerga uma impedância perfeitamente casada, uma vez que não há reflexão de energia. Na prática, a inserção de um isolador num sistema de microondas sempre ocasionará uma perda de potência no sistema.

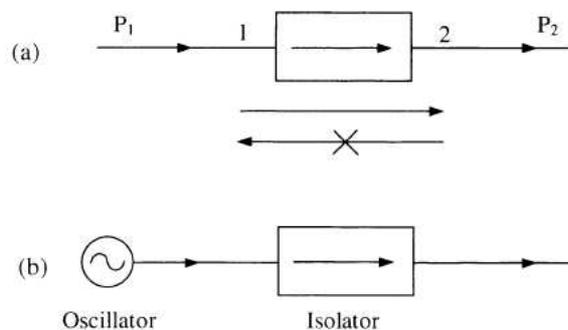


Figura 2.8: Isoladores (a)Funcionamento e (b)exemplo de Aplicação [6]

Os circuladores costumam apresentar 3 portas, conforme ilustrado na figura 2.9. Para o circulador ilustrado na figura 2.9, um sinal incidente na porta 1 é acoplado à porta 2 somente, assim como um sinal que incida na porta 2 é somente acoplado à porta 3, e um sinal incidente na porta 3 é somente acoplado à porta 1. Os circuladores são úteis para o roteamento e separação de sinais, por exemplo, em sistemas que utilizam uma única antena para a transmissão e recepção de sinais, conforme ilustrado na figura 2.9.

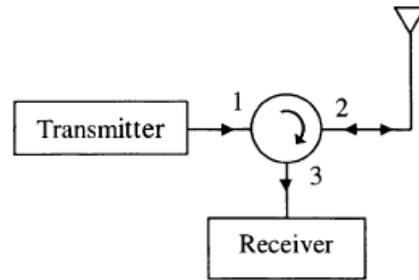


Figura 2.9: Aplicação típica de um circulator [6]

d) Detectores e Misturadores

O detector é um componente que converte a intensidade de um sinal de microondas numa tensão DC. Também pode ser utilizado para demodular sinais de microondas, reconstruindo sinais de baixa frequências. A detecção é obtida através da utilização de componentes com características não-lineares de I-V (corrente - tensão) como, por exemplo, junções *p-n* e junções do tipo *Schottky-barrier*. Na figura 2.10 são ilustrados 3 exemplos do funcionamento dos detectores.

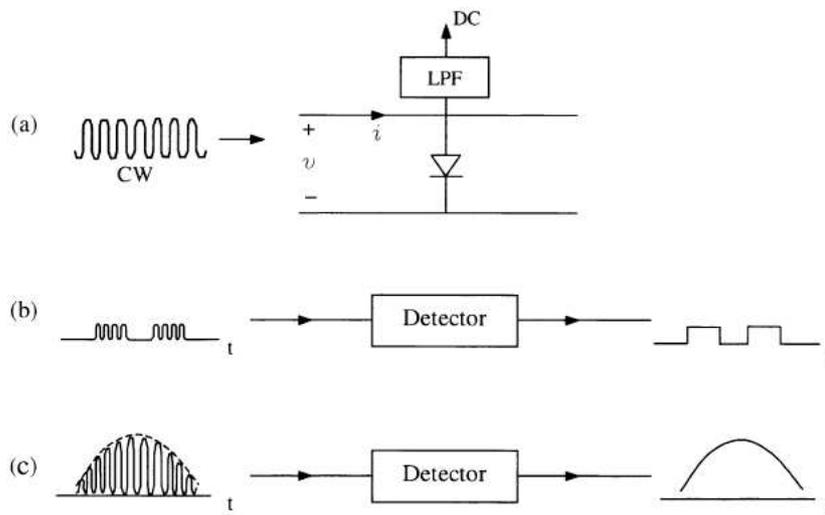


Figura 2.10: Aplicações de detectores para (a) medir a intensidade de uma microonda, (b) demodular um sinal pulsado e (c) demodular um sinal analógico [6]

Os misturadores ¹¹ são componentes utilizados para a conversão de frequências. Um mesmo componente pode ser utilizado tanto como *upconverter* ou *downconverter*.

¹¹do inglês *mixers*

Os misturadores possuem 3 portas: **LO** (*Local Oscillator*, ou frequência de referência), **RF** (sinal em alta frequência modulado) e **IF** (*intermediate-frequency signal*). Quando utilizados para modular um sinal em alta frequência (*upconverter*), o sinal presente na porta RF (saída modulada) é resultado da multiplicação do sinal de IF com LO. Quando utilizados na demodulação de um sinal de alta frequência, o sinal presente em IF (saída demodulada) é resultado da multiplicação do sinal de RF por LO. As duas possíveis situações são ilustradas na figura 2.11, na qual é dada ênfase para os resultados no domínio da frequência (subtração e adição). Na figura 2.12 é ilustrado o funcionamento do misturador como um multiplicador de sinais no domínio do tempo.

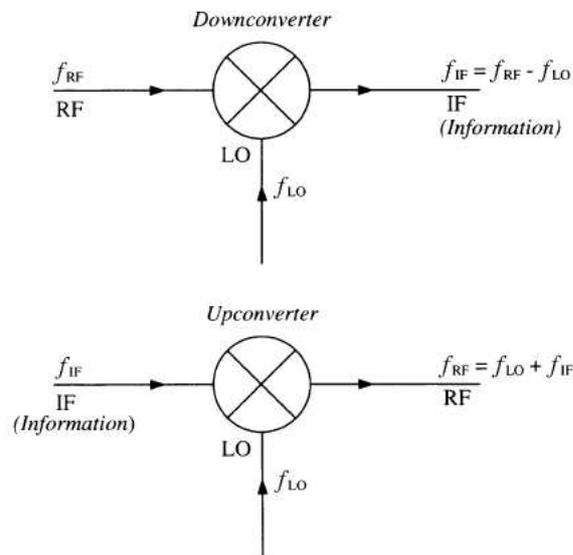


Figura 2.11: Aplicações de Misturadores [6]

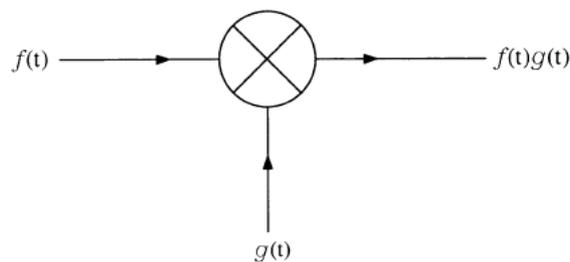


Figura 2.12: Misturador como um multiplicador de sinais [6]

e) Atenuadores, Interruptores e Deslocadores de Fase

Atenuadores, Interruptores ¹² e Deslocadores de Fase ¹³ são componentes que proporcionam um controle eletrônico sobre a atenuação e a fase de sinais de microondas. Estes tipos de componentes podem ser construídos com ferrites ou dispositivos de estado-sólido (como diodos *p-i-n* ou FETs) sendo que os componentes de estado-sólido costumam ser mais rápidos, leves e baratos. Os interruptores são classificados de acordo com o número de pólos que possuem, ou seja, o número de portas de saída que possuem (por exemplo: SPST, SPDT, SP3T). Teoricamente, os interruptores, quando ligados, não deveriam inserir nenhuma atenuação no sinal. Bem como quando desligados não deveriam permitir nenhuma transferência de potência. No entanto, os interruptores reais acabam inserindo alguma perda ao sinal quando ligados e permitindo que uma parcela pequena de potência seja transferida quando desligados. Na figura 2.14 é mostrado um exemplo de aplicação de um interruptor.

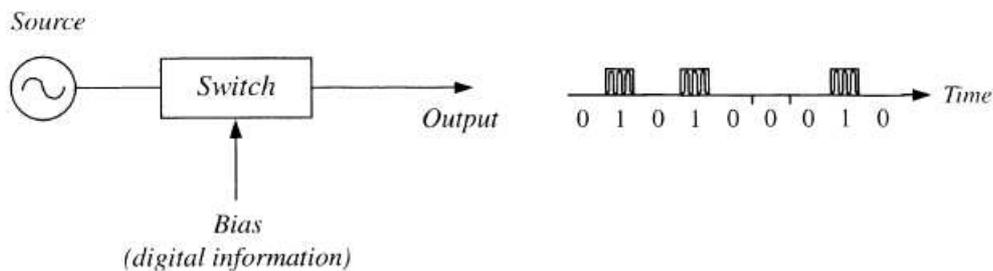


Figura 2.13: Exemplo de aplicação de um interruptor [6]

Os interruptores também são utilizados na construção de Deslocadores de Fase. O atraso da fase é obtido forçando-se o sinal a percorrer um caminho de comprimento diferente do caminho normal. A figura 2.14 ilustra o funcionamento de um Deslocador de Fase.

Em componentes de estado sólido, o chaveamento é obtido através da variação da impedância do dispositivo. A variação da impedância é obtida através de diferentes estados de polarização. Alterando-se a polarização continuamente pode-se obter níveis contínuos de atenuação dos sinais. Este tipo de componente é conhecido como atenuador controlável (normalmente por uma tensão analógica), ou atenuador variável, e entre outras aplicações são utilizados no controle automático de ganho em sistemas de recepção e processamento de microondas.

¹²do inglês *switch*

¹³do inglês *Phase-Shiffters*

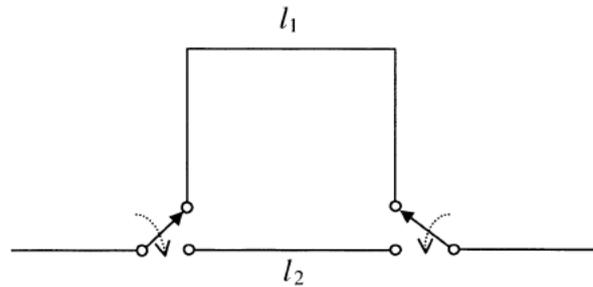


Figura 2.14: Utilização de um interruptor na construção de um deslocador de fase [6]

f) Osciladores e Amplificadores

Os osciladores e amplificadores são componentes ativos, sendo constituídos de algum dispositivo de estado sólido capaz de produzir resistências negativas quando devidamente polarizado. Enquanto uma resistência positiva dissipa a potência de sinais de microondas, introduzindo perdas, uma resistência negativa é capaz de produzir sinais eletromagnéticos a partir de uma polarização DC do dispositivo de estado-sólido.

Os osciladores são utilizados como fontes de microondas em transmissores e como osciladores locais (LO) em moduladores e demoduladores (*upconverters* e *downconverters*). Dependendo da forma que são construídos, a frequência de oscilação pode ser variada continuamente, normalmente através de uma tensão, caracterizando um oscilador controlado por tensão, ou simplesmente um **VCO**. Alguns dos parâmetros mais importantes na caracterização dos osciladores são: potência de saída, a *DC-to-RF efficiency*, a relação sinal-ruído, a estabilidade e a faixa de variação da frequência.

O amplificador é um dispositivo que proporciona um ganho na potência do sinal nele incidente. Um amplificador pode ser cascadeado com outros amplificadores de modo a se obter um ganho maior. Os amplificadores que são utilizados no último estágio de um transmissor, de maneira a proporcionar uma alta potência de saída, são chamados de Amplificadores de Potência. Os amplificadores utilizados na recepção de sinais normalmente possuem uma boa relação de sinal-ruído, sendo chamados de LNA (*Low-Noise Amplifier*). Alguns parâmetros importantes para um amplificador são: o ganho, a relação sinal-ruído, a largura de banda e a estabilidade. Um bom amplificador não deve apresentar oscilações na sua banda de operação. A estabilidade do amplificador é a sua resistência à oscilação.

2.6 Tipos de Medidores de Microondas

Um meio pode afetar as microondas que nele se propagam de diversas formas. A maneira como o meio vai afetar as microondas depende das constantes de permeabilidade e permissividade desse, as quais, por sua vez, dependem de outras propriedades físicas do meio. O conhecimento da natureza da dependência de ϵ_r e μ_r das demais propriedades físicas do meio nos permite inferir sobre as propriedades do meio através da medição destas constantes dielétricas. A medição das constantes dielétricas do meio, por sua vez, pode ser realizada com base no estudo da maneira como o meio afeta um sinal de microondas, cujos parâmetros sejam inicialmente conhecidos. O tipo de medidor, ou técnica de medição, de microondas utilizado depende do parâmetro de propagação que se deseja medir. Além disso, o tipo do medidor de microondas e a maneira mais adequada de se medir um dado parâmetro dependem das características do meio. Os medidores de microondas podem ser classificados em 5 categorias [9][20], as quais serão sucintamente abordadas na seções subseqüentes, e em sensores especiais para aplicações específicas.

2.6.1 Sensores de Transmissão

Esta é a concepção mais direta e simples para um medidor de microondas. Neste tipo de medidor são utilizados um transmissor, um receptor e um par de antenas, normalmente do tipo corneta (*horn*). As duas antenas costumam ser instaladas de maneira que o material a ser medido, ou MUT, fique entre elas, conforme mostrado na figura 2.15. O medidor mostrado na figura 2.15 também é conhecido como *Free-Space Transmission Sensor*. Nesse arranjo, a permissividade do meio afeta tanto a amplitude como a fase da onda que se propaga através deste.

A principal vantagem deste tipo de medidor é a sua simplicidade. A principal desvantagem é a sensibilidade deste tipo de medidor às reflexões no interior do sistema. As reflexões afetam diretamente a precisão na medição da atenuação. Se a seção transversal do MUT é superior a $\lambda/4$ e a atenuação do meio é pequena, as múltiplas reflexões internas vão provocar o aparecimento de ondas estacionárias entre as superfícies do MUT, adicionando uma variação periódica à atenuação medida [9].

Por outro lado, a medição da fase é muito menos afetada pelas múltiplas reflexões e pelas ondas estacionárias do que a medição da atenuação. A fase é medida com a utilização de um Misturador. Para tal, se faz necessária a utilização de um sinal de referência, idêntico ao sinal transmitido, mas que não seja afetado pelo meio. A medida do atraso de fase corresponde a uma tensão DC na porta IF (ver seção 2.5.2) do Misturador. Isto se deve ao fato de se obter, como resultado da multiplicação de

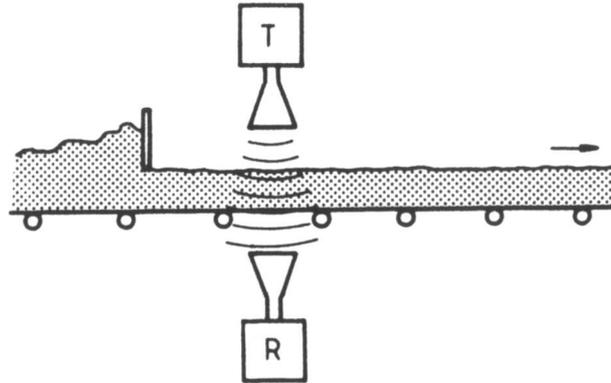


Figura 2.15: Sensor de Transmissão [9]

duas ondas idênticas, porém defasadas, um sinal DC proporcional ao defasamento das ondas.

No entanto, a medição da fase está sujeita ao problema da ambigüidade da fase [26]. Este problema está associado ao fato de que a medição do ângulo da fase só é possível para valores entre -180° e $+180^\circ$. Caso a seção transversal do material a ser medido seja maior que o comprimento de onda no material, o problema da ambigüidade de fase pode aparecer. Uma maneira de se eliminar o problema da ambigüidade de fase é realizar a medição do atraso de fase em duas frequências distintas. Para mais detalhes sobre esta técnica de medição ver [26].

Outra maneira de realizar a medição das constantes dielétricas do material, evitando os problemas das múltiplas reflexões, das ondas estacionárias e da ambigüidade de fase, é através da utilização da técnica de FMCW (*Frequency-Modulated Continuous Wave* [20]). Esta técnica, normalmente utilizada em sistemas de radar, mede na verdade o atraso no tempo sofrido pelo sinal ao atravessar o meio. A técnica consiste em realizar uma variação contínua e linear da frequência de transmissão do sistema. Na prática isto equivale a realizar uma modulação em frequência (FM) do sinal a ser transmitido. O sinal recebido é então multiplicado pelo sinal original. Devido ao atraso temporal sofrido pelo sinal recebido, o resultado da multiplicação dos dois sinais produz um sinal analógico, em baixa frequência, com uma frequência de batimento na porta IF do Misturador utilizado para a multiplicação dos sinais. A frequência de batimento está diretamente relacionada ao atraso sofrido pelo sinal. O método de FMCW é ilustrado na figura 2.17. Para mais detalhes sobre este método, ver [6].

Além dos problemas já citados na utilização desse método de inferência, existem alguns outros inconvenientes que precisam ser levados em consideração. A medição direta tanto da atenuação quanto da fase é afetada diretamente pela não-linearidade e

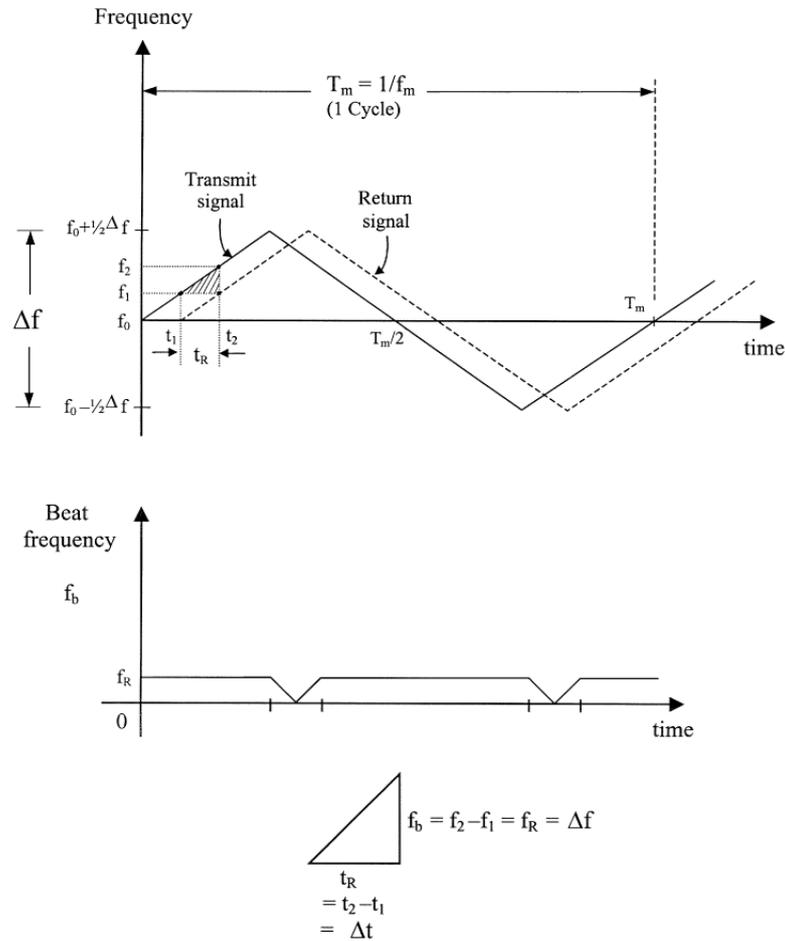


Figura 2.16: Método de FMCW [6]

pela sensibilidade dos detectores de fase e de intensidade. A principal causa de erros e variações nesse tipo de medição é a temperatura do meio, a qual afeta diretamente sua constante dielétrica. Isto implica na necessidade de que se utilize algum tipo de compensação de temperatura no sistema de medição. Uma outra alternativa ao problema da sensibilidade deste tipo de método é através da medição freqüente de um padrão conhecido. Através dos desvios na medição do padrão, podem-se corrigir os valores da medição de interesse. Na figura 2.17 é ilustrado a configuração de um sistema de medição de atenuação e atraso de fase utilizando-se um medidor tipo sensor de transmissão. As linhas tracejadas indicam algumas alternativas, já citadas, para a compensação dos erros inerentes a essa concepção de medidor.

Outro método comumente empregado na melhoria do desempenho deste tipo de sensor é o método da medição balanceada¹⁴[9]. Este método de medição utiliza-se de elementos controláveis, como atenuadores controláveis e deslocadores de fase controláveis,

¹⁴tradução do inglês: *Balancing Method*

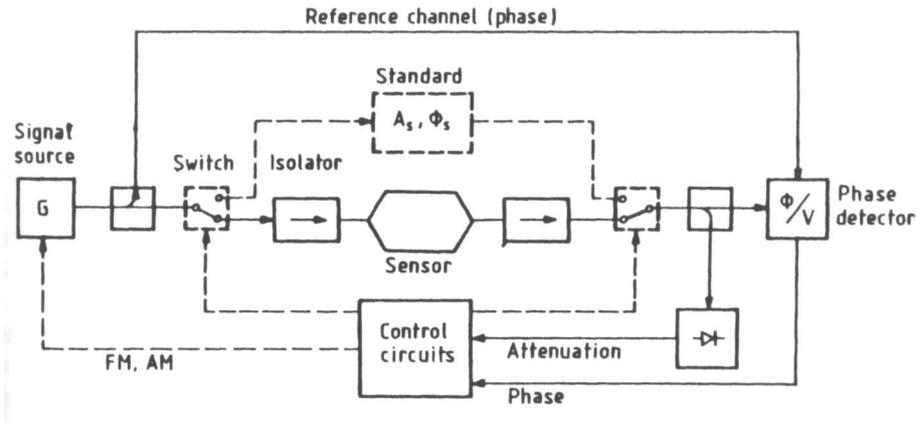


Figura 2.17: Sistema para medição da atenuação e da fase [9]

para manter os níveis dos sinais incidentes nos detectores dentro de uma determinada faixa, reduzindo a influência da não-linearidade e da reduzida faixa dinâmica de alguns dos sensores. Trata-se, na verdade, de um método de inferência em malha-fechada, no qual a principal informação sobre as características dielétricas do meio provém do esforço de controle necessário para se manter as medições do sistema numa dada referência. A utilização desse método permite que os detectores do sistema operem no ponto ótimo de sua faixa dinâmica, maximizando assim parâmetros metrológicos do sistema.

2.6.2 Sensores de Ressonância

Para se medir o fenômeno da ressonância de uma microonda é necessário primeiro criar condições para que tal fenômeno apareça. Para tal, são normalmente utilizadas cavidades ressonantes. Uma cavidade ressonante pode ser descrita como sendo uma linha de transmissão limitada por descontinuidades de impedância em ambos os lados [9]. Além da cavidade ressonante, o fenômeno da ressonância requer que um campo eletromagnético seja criado dentro da cavidade. As microondas precisam ser geradas através de um circuito externo e então, através de uma abertura ou antena, irradiadas no interior da cavidade. As descontinuidades de impedância fazem com que a microonda que se propaga seja refletida diversas vezes. O fenômeno de ressonância só ocorre em frequências específicas e requer que a condição de ressonância seja satisfeita. A condição de ressonância, dada pela equação 2.22, é satisfeita quando a relação entre o comprimento da onda e as dimensões da cavidade assume determinados valores.

$$\frac{2\pi}{\lambda} 2l + \phi_1 + \phi_2 = n \cdot 2\pi, \quad (2.22)$$

onde l é comprimento da cavidade (ou linha de transmissão), ϕ_1 e ϕ_2 são os ângulos de fase dos coeficientes de reflexão das extremidades da cavidade, e n é um inteiro.

A condição de ressonância acima descrita vale para uma cavidade ressonante vazia. Caso a cavidade seja preenchida com algum material dielétrico, a frequência de ressonância ocorrerá numa frequência inferior, uma vez que o comprimento de onda depende da constante dielétrica do meio. Para os casos em que $\epsilon'_r \gg \epsilon''_r$ o comprimento de onda pode ser expresso em função da permissividade elétrica através da equação [9]:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{Re\{\sqrt{\epsilon_r}\}}. \quad (2.23)$$

A permissividade elétrica pode ser então calculada de forma aproximada em função da frequência de ressonância da cavidade vazia e da frequência de ressonância preenchida com um dado material dielétrico. Para os casos em que $\epsilon'_r \gg \epsilon''_r$ a permissividade elétrica do meio pode ser aproximada pela equação 2.24.

$$\epsilon'_r \approx \left(\frac{f_{r0}}{f_r}\right)^2, \quad (2.24)$$

onde f_{r0} é a frequência de ressonância da cavidade vazia e f_r é a frequência de ressonância obtida na presença de um determinado MUT.

Para a medição da constante dielétrica do meio através de um medidor de ressonância, é necessário primeiro induzir um campo eletromagnético dentro da cavidade. A variação da frequência das ondas irradiadas na cavidade, dentro de uma faixa determinada, permitirá a ocorrência do fenômeno de ressonância. A detecção do fenômeno de ressonância f_r pode ser realizada através da medição da atenuação ou da fase, ou ambas, utilizando-se 2 técnicas [20]: através da medição do coeficiente de reflexão na linha utilizada para transmitir o sinal de microondas para a cavidade (ver figura 2.19), ou através da medição do coeficiente de transmissão, com a utilização de um receptor independente dentro a cavidade (ver figura 2.20). Nas figuras 2.18 e 2.19 são mostrados os comportamentos esperados de fase e amplitude para uma faixa de frequências próxima na vizinhança de f_r para as técnicas de coeficiente de reflexão e de coeficiente de transmissão, respectivamente.

Os medidores de cavidade de ressonância já foram muito estudados por [9] e [20]. E não serão aqui abordados em mais detalhes pois fogem do escopo do presente trabalho.

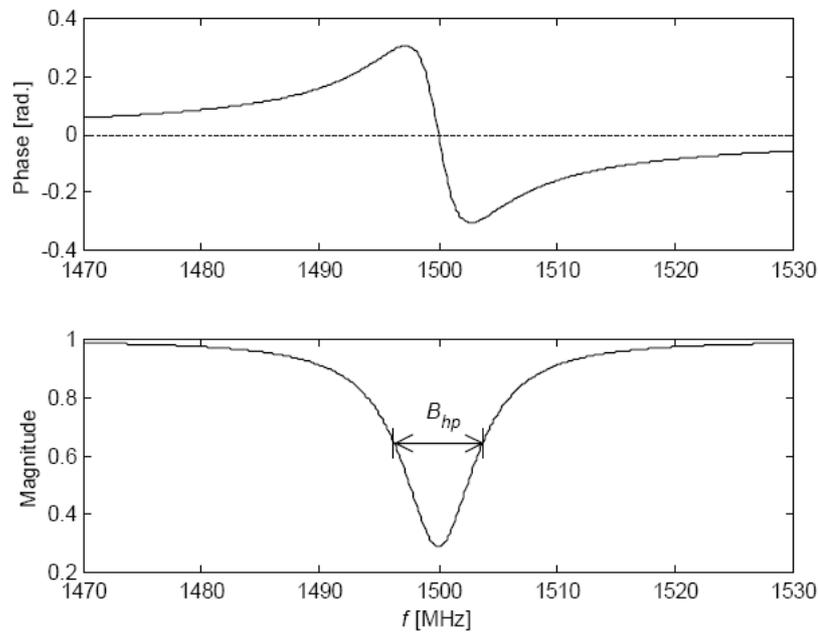


Figura 2.18: Gráfico da fase e magnitude num medidor de coeficiente de reflexão com $f_r = 1.5GHz$ [20]

2.6.3 Sensores de Reflexão

Os sensores de reflexão medem as características do sinal refletido por um objeto, através da transmissão de um sinal conhecido. Os sensores de reflexão podem ser classificados em sensores de contato ou sensores de espaço livre, quando utilizados para medir as propriedades dielétricas dos materiais, ou ainda como sensores de radar, quando utilizados na medição da distância e velocidade de objetos. Na indústria de petróleo e gás, este tipo de sensor é utilizado na medição de nível em tanques [27], ver figura 2.20, e em alguns casos na medição de parâmetros de escoamento, conforme ilustrado na figura 2.21.

Os sensores de contato utilizam linhas de transmissão ou guias-de-onda abertas numa das extremidades. É esta extremidade aberta que deve ser colocada em contato com o objeto ou meio do qual se deseja medir as propriedades dielétricas. O coeficiente de reflexão da extremidade aberta Γ tem suas características de fase e amplitude afetadas pela constante dielétrica ϵ'_r do meio. Os sensores de espaço livre funcionam de maneira similar, no entanto enquanto nos sensores de contato as linhas de transmissão são colocadas em contato com o objeto, nos sensores de espaço livre são utilizadas antenas para a transmissão e recepção do sinal refletido. Ambos os métodos permitem a inferência sobre o coeficiente de reflexão Γ complexo do meio e sobre sua permissividade.

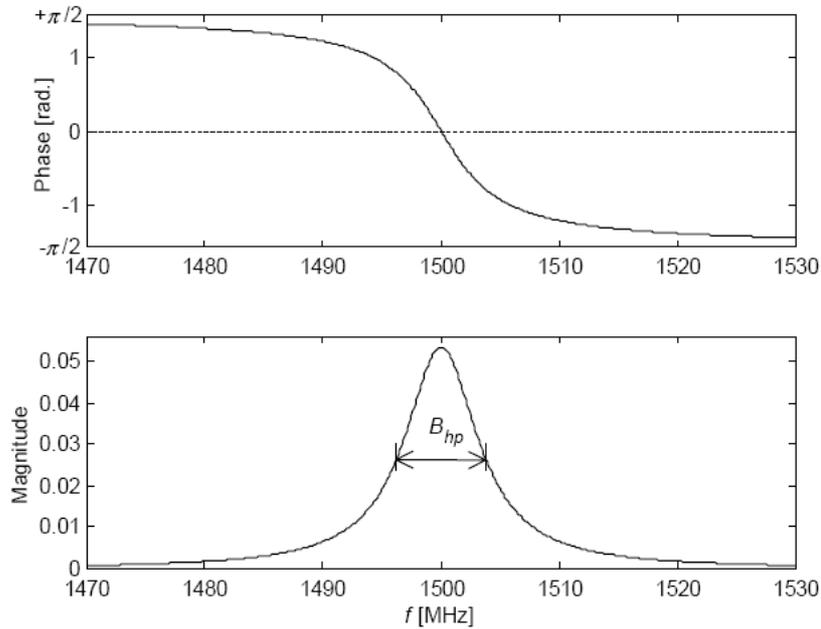


Figura 2.19: Gráfico da fase e magnitude num medidor de coeficiente de transmissão com $f_r = 1.5GHz$ [20]

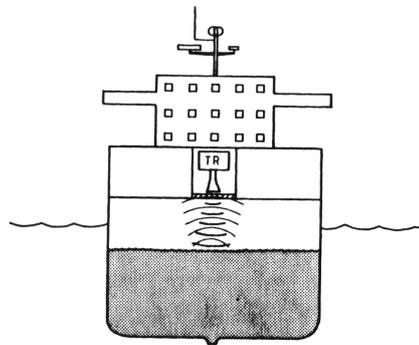


Figura 2.20: Sensor de ressonância utilizado na medição de nível de um tanque de óleo de um navio [9]

Os sensores do tipo radar, ao contrário dos demais tipos de sensores até agora discutidos, não são utilizados na medição das propriedades dos materiais e sim na medição de distância, movimento, vibrações, interfaces, entre outros. De acordo com o princípio de funcionamento os radares podem ser classificados em: radar de pulso, radar de impulso, radar FMCW (*Frequency Modulated Continuous Wave*) e radares de efeito Doppler.

O tipo de radar mais simples é o radar de pulso. Nesse tipo de radar, a onda portadora é transmitida apenas por um pequeno intervalo de tempo com a utilização

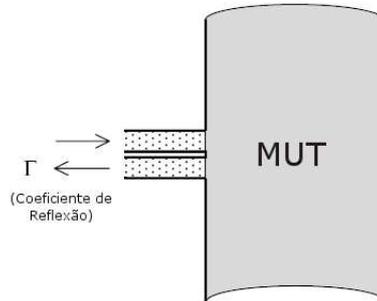


Figura 2.21: Princípio de funcionamento de um medidor de parâmetros de escoamento utilizando um sensor de reflexão [9]

de um interruptor (*switch*), conforme ilustrado na figura 2.22. Sendo a velocidade de propagação c conhecida, com base no tempo que a onda refletida demora para retornar ao sistema, é possível calcular a distância do objeto, conforme a equação

$$\tau = \frac{2l}{c}, \quad (2.25)$$

onde l é a distância do objeto e c é a velocidade de propagação da onda no meio.

Quanto menor o tamanho do pulso, maior a resolução do sistema. Quando se deseja maximizar a resolução do sistema e a máxima distância do objeto a ser medido é pequena, utiliza-se o radar de impulso. Neste tipo de radar o pulso transmitido é reduzido ao máximo. É importante ressaltar que quanto menor o pulso, maior é a banda necessária e pior é a imunidade aos ruídos.

O radar de efeito Doppler é normalmente utilizado na medição da velocidade de um objeto. Isto se deve ao fenômeno físico conhecido como efeito Doppler. O efeito Doppler é caracterizado pela alteração da frequência do sinal recebido em relação ao sinal transmitido. Tal fenômeno ocorre quando o objeto sob análise está em movimento em relação ao sistema de medição. Nesse tipo de radar um sinal de frequência constante é continuamente transmitido. O desvio de frequência (f_d) do sinal refletido pode ser calculado com a utilização de um misturador (*mixer*) e se relaciona com a velocidade do objeto sob análise através da equação

$$f_d = \frac{2v_r}{c} \times f_0, \quad (2.26)$$

onde v_r é a velocidade relativa do objeto, c é a velocidade de propagação da onda no meio e f_0 é a frequência do sinal transmitido.

No radar de FMCW a frequência do sinal transmitido é continuamente variada,

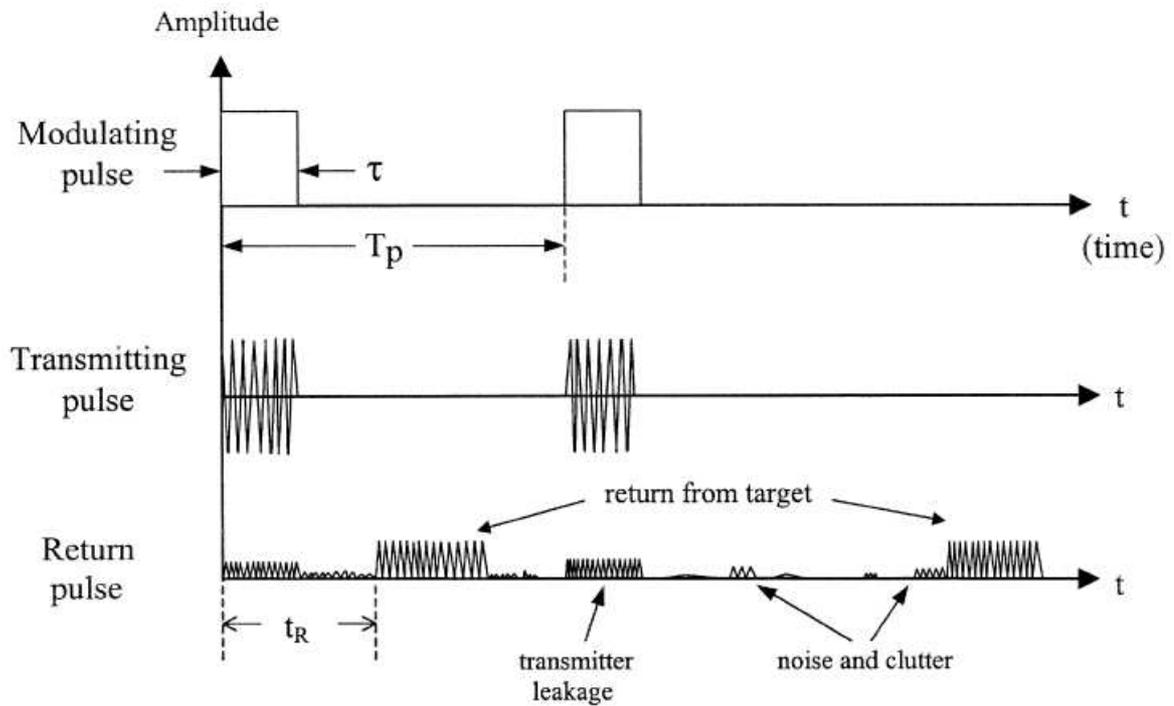


Figura 2.22: Princípio de funcionamento de um radar de pulso [6]

com a utilização de um VCO, para cima e para baixo entre duas frequências f_1 e f_2 , conforme mostrado na figura 2.23. A frequência do sinal recebido será, portanto, diferente da frequência do sinal sendo transmitido. A diferença entre as frequências (f_{IF}) transmitida e recebida pode ser então calculada através da utilização de um misturador (*mixer*), sendo dada pela equação

$$f_{IF} = \tau \left(\frac{f_2 - f_1}{T} \right), \quad (2.27)$$

onde τ é o tempo de propagação da onda desde o momento que foi transmitida até o momento de sua recepção, e T é o período da onda modulada.

O radar tipo FMCW pode ser utilizado tanto na determinação da distância quanto da velocidade do objeto. Caso o objeto esteja em movimento, relativamente ao sistema de medição, haverá um deslocamento na frequência recebida pelo sistema. Para mais detalhes ver [6].

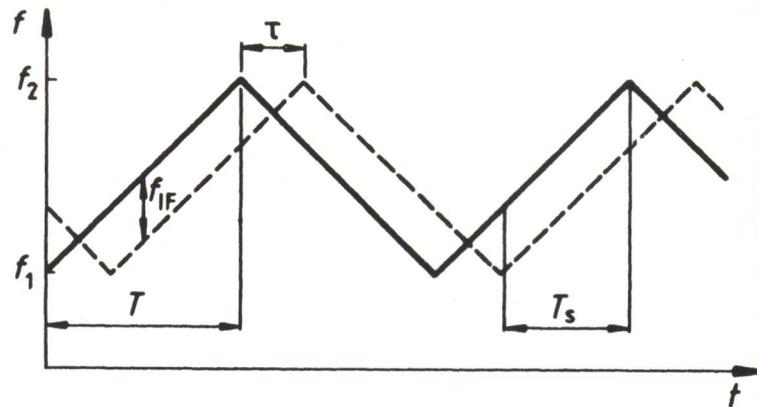


Figura 2.23: Princípio de funcionamento de um radar de FMCW [9]

2.6.4 Sensores Radiométricos

Os radiômetros, como são chamados, medem a intensidade da radiação térmica de corpo negro ¹⁵ irradiada por um objeto. Essa radiação é a mesma que objetos quentes emitem nas frequências da luz visível quando se tornam incandescentes. Para a faixa das microondas, a intensidade da irradiação é diretamente proporcional à temperatura do objeto, sendo no entanto dependente da sua constante de emissividade. A constante de emissividade do objeto está relacionada às propriedades dielétricas e dimensionais da superfície e a sua capacidade de refletir e absorver ondas eletromagnéticas. Um corpo negro ideal possui emissividade igual a 1. Toda a sua radiação térmica é irradiada através da sua superfície, assim como esse absorve toda radiação (e conseqüentemente luz) nele incidente. Na prática, os objetos possuem emissividade menor que 1 e portanto uma parte da sua radiação térmica é refletida e não consegue transpor a superfície do objeto. Na figura 2.24 é ilustrado o princípio de funcionamento de um radiômetro.

O radiômetro de microondas é um sensor, suficientemente sensível, capaz de detectar a radiação térmica de corpo negro de um objeto na faixa das microondas. Os radiômetros são considerados passivos pois eles apenas captam as radiações térmicas emitidas por um objeto. Esse tipo de sensor é amplamente empregado no monitoramento da superfície terrestre por satélites e aviões. Dentre algumas das aplicações de monitoramento da superfície terrestre, podemos citar: o monitoramento de incêndios florestais, o monitoramento da camada de gelo polar e o monitoramento de vazamentos de óleo nos oceanos. Na indústria são utilizados na medição remota da temperatura de processos, onde devido às altas temperaturas, ou ainda outros fatores, não é possível a utilização de sensores de contato ou de infravermelho. Também são citadas na litera-

¹⁵do inglês *black-body radiation*

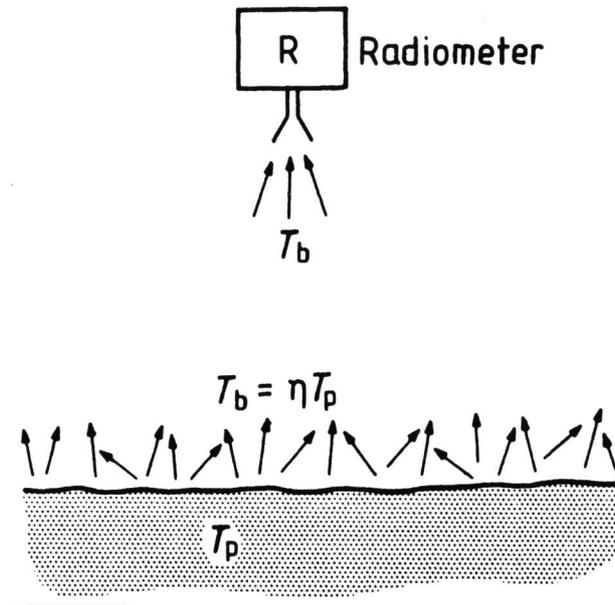


Figura 2.24: Princípio de funcionamento de um radiômetro, onde T_p é a temperatura do objeto, T_b é a temperatura de brilho e η é a emissividade [9]

tura aplicações desse tipo de sensor na medicina [9].

2.6.5 Sensores Tomográficos

A interação das microondas com os materiais também pode ser utilizada na produção de imagens do interior de um objeto ou de um meio. Essa técnica de medição é amplamente empregada na medicina, com a utilização de sensores de raios-X e de ressonância magnética para a visualização do interior do paciente. A tomografia utilizando microondas é realizada através da utilização de um arranjo de sensores ¹⁶ que captam sinais de microondas que foram transmitidos através do objeto, ou meio, em diferentes posições, conforme mostrado na figura 2.25. A distribuição geométrica dos sensores varia de acordo com a aplicação. Quando utilizados na medição de parâmetros de escoamento em tubos (aplicação típica na indústria de petróleo e gás) são normalmente dispostos radialmente ao redor do tubo.

Os sensores utilizados na construção de um tomógrafo são praticamente os mesmos utilizados num sensor de transmissão de espaço livre. Assim como num sensor de transmissão, os sensores do tomógrafo medem a atenuação e o atraso de fase do sinal. No entanto, em vez de utilizar um único sensor, na tomografia de microondas são

¹⁶do inglês *array of receivers*

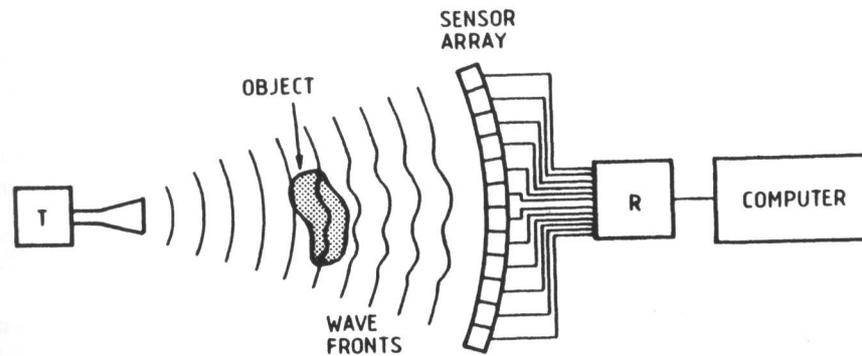


Figura 2.25: Princípio de funcionamento de tomógrafo de microondas [9]

utilizados vários sensores. A reconstrução da imagem com base nos dados adquiridos pelos diversos sensores requer vários cálculos e demanda um processamento computacional significativo, sendo essa uma das principais limitações desse tipo de sensor. Na indústria de petróleo e gás, este tipo de sensor é utilizado na determinação do tipo de um escoamento multifásico [20].

2.7 Conclusões

No presente capítulo foi apresentada uma breve introdução ao eletromagnetismo. As microondas foram caracterizadas como ondas eletromagnéticas. Os fenômenos decorrentes da interação das ondas eletromagnéticas, e mais especificamente as microondas, com os materiais foram apresentados, ainda que em caráter introdutório. As peculiaridades dielétricas da água foram descritas, caracterizando as vantagens da utilização dos sensores de microondas para a medição da fração de água. Os componentes utilizados na construção de um sistema elétrico de geração e processamento de microondas foram apresentados, bem como os principais parâmetros utilizados na especificação desses componentes. Foram apresentados os tipos de sensores de microondas existentes e suas principais aplicações. Os princípios de construção de tais sensores também foram abordados.

No próximo capítulo será apresentado o sistema experimental desenvolvido no presente trabalho. O sistema de geração e processamento de microondas utilizado na bancada experimental será descrito em detalhes, bem como o sistema digital de controle e aquisição que permite a utilização da bancada experimental de testes.

Capítulo 3

Sistema Experimental Desenvolvido

No presente capítulo é apresentado o método desenvolvido. Trata-se de uma bancada de medição e testes construída para avaliar a viabilidade dos sensores de microondas na medição da fração de água. Não só as técnicas serão avaliadas, mas também toda a concepção do sistema de medição. O sistema experimental foi desenvolvido para permitir a realização de testes estáticos com uma mistura bifásica de água e óleo. Os testes são estáticos pois não há vazão. Nos ensaios estáticos são utilizados tanques, com dimensões semelhantes a uma tubulação de produção, os quais são enchidos com uma composição que reproduz as propriedades físicas, relevantes para o presente trabalho, encontradas num escoamento real.

Os sub-sistemas que compõem a bancada de testes e o medidor propriamente dito foram projetados segundo requisitos de um medidor industrial. Dessa forma, após verificada a eficácia de um determinado tipo de sensor, e determinados os parâmetros ideais para a medição da fração de água, toda a infra-estrutura utilizada na bancada pode ser utilizada no desenvolvimento do protótipo de um medidor industrial de fração de água. Podemos citar alguns requisitos indispensáveis para medidores industriais:

- comunicação em rede;
- fonte de alimentação dedicada, robusta e confiável;
- funcionamento automático;
- interface de configuração e parametrização dedicada e específica;
- mecanismos de auto-diagnóstico e sinalização de falhas;
- acondicionamento adequado às condições operacionais.

A solução adotada pode ser subdividida em 8 sistemas, que juntos compõem o sistema experimental e a bancada de testes utilizada nos ensaios. Os subsistemas que compõem a solução implementada são abaixo listados:

- sistema de geração e processamento de sinais de microondas;
- sistema digital de controle e aquisição de dados;
- sistema de comunicação embarcada;
- sistema de alimentação elétrica dos sistemas eletrônicos e de microondas;
- sistema computacional do Concentrador de Dados;
- sistema computacional de interface com o usuário;
- sistema de medições auxiliares;
- sistema de suporte aos ensaios.

Na figura 3.1 é mostrada a arquitetura do sistema desenvolvido, onde se destacam os diferentes sub-sistemas. Estes subsistemas serão descritos nas próximas seções.

3.1 Sistema de Geração e Processamento de Microondas

Para o projeto do sistema de geração e processamento de microondas foi selecionada a frequência central e banda de operação do medidor. Durante a revisão bibliográfica, verificou-se que a frequência mais comumente utilizada nesse tipo de medidor é de 2,4GHz. No entanto, conforme apresentado no capítulo 2 (2.5), na presença de sais, a atenuação da água, para sinais dessa frequência, é muita alta. A frequência escolhida para o medidor foi de 10GHz. Nessa frequência, as perdas dielétricas da água são maiores do que na frequência de 2,4GHz. No entanto, a presença de sais na água influencia muito pouco as perdas dielétricas do meio para sinais da frequência de 10GHz. A maior atenuação da água para a frequência escolhida pode ser vista como um ponto positivo uma vez que, em teoria, quanto maior a atenuação, maior a sensibilidade do instrumento de medição de fração de água. Apesar disso, podemos apontar como uma desvantagem da maior atenuação do sinal a necessidade da transmissão de um sinal de maior potência. Também é importante ressaltar que quanto maior a frequência de operação, mais caros são os equipamentos necessários. O comportamento do sistema

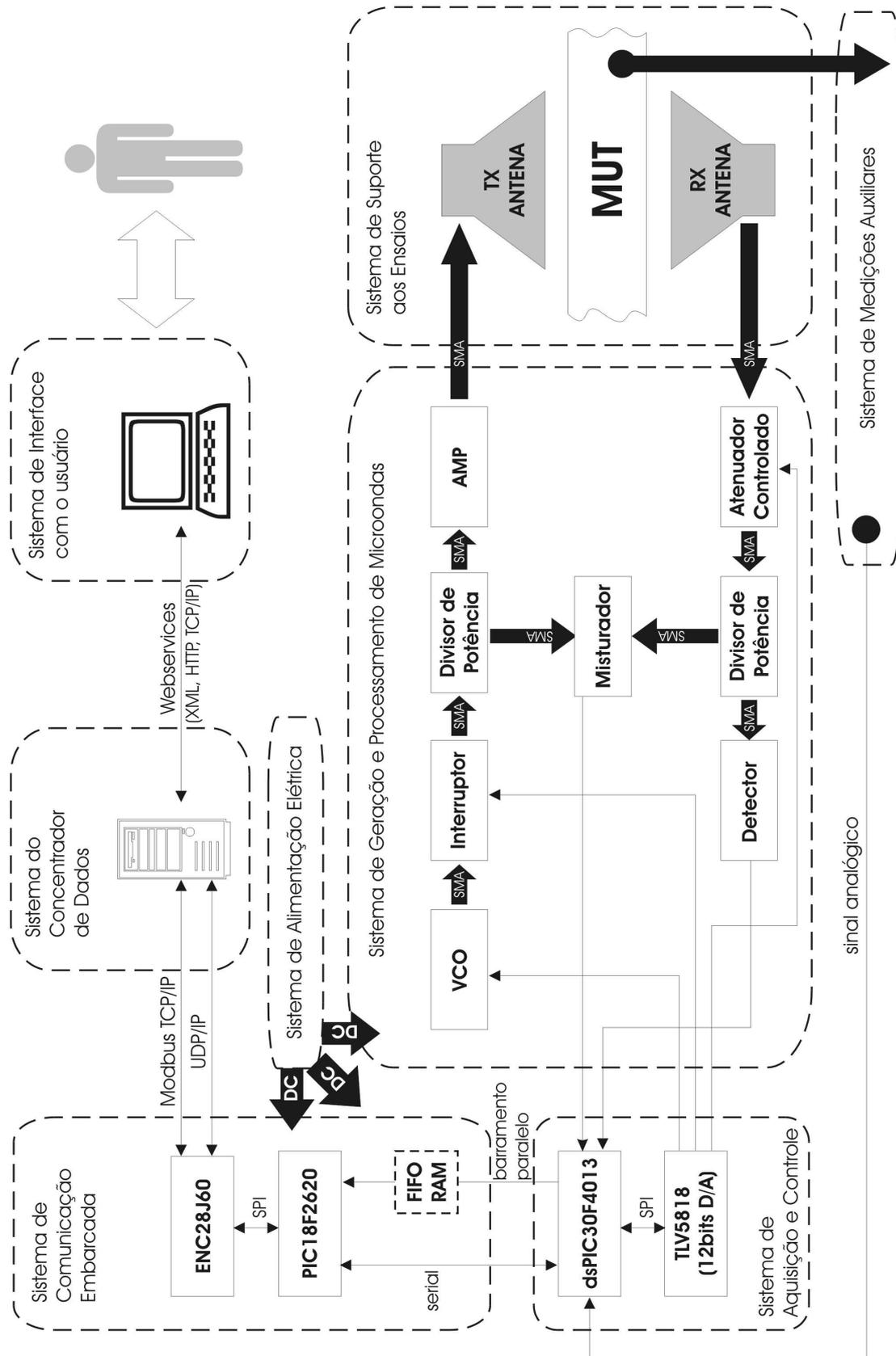


Figura 3.1: Arquitetura do sistema de ensaios com microondas

de medição na presença de sais é um parâmetro importante no projeto de um medidor de fração de água para a indústria de petróleo e gás, uma vez que uma parcela significativa dos poços de produção encontram-se abaixo do leito oceânico.

Para o problema da determinação da fração de água numa mistura bifásica de óleo e água, o tipo de sensor de microondas mais utilizado e adequado, segundo diversos autores [9][20][3], é o sensor de ressonância. No entanto, optamos pelos sensores de transmissão como objeto de estudo do presente trabalho. A opção pelos sensores de transmissão deve-se ao fato de ser este o tipo mais simples de sensor para a aplicação em questão. Também podemos ressaltar o fato de que o sistema de geração e processamento de microondas utilizado nesse tipo de sensor é muito similar ao sistema utilizado em sensores de ressonância, mudando apenas a técnica de inferência de um para o outro. Uma vez validado o sistema de geração e transmissão de microondas para sensores de transmissão, o desenvolvimento de um sensor de ressonância se caracteriza como uma melhoria natural para o sistema. O sistema de geração e processamento de microondas é formado pelos seguintes componentes:

- **Antenas tipo Corneta:** optou-se por antenas desse tipo devido ao alto ganho, ou diretividade, destas. É provável que numa etapa futura de desenvolvimento estas antenas sejam substituídas por antenas de outro tipo, mais compactas. São utilizadas duas antenas: uma dedicada à transmissão de sinais e outra somente para a recepção. As antenas utilizadas tem ganhos de 10dBi e 20dBi.
- **VCO:** a utilização de um oscilador controlável deve-se ao fato de este permitir a realização de ensaios numa faixa de frequências em torno da frequência central. Além disso, o VCO é um componente indispensável na realização de determinados tipos de ensaios e na construção de diversos tipos de sensores. A frequência de oscilação do VCO utilizado pode ser variada de 8GHz a 12GHz.
- **Interruptor:** quando ligado, o interruptor insere uma atenuação mínima de 60dB no sinal transmitido. Na prática isso equivale a desligar o sistema de transmissão. Da maneira como foi projetado o sistema, a utilização do interruptor permite que a transmissão de microondas só ocorra quando uma medição for necessária, evitando assim a transmissão contínua de sinais de microondas.
- **Divisor de Potência:** este componente passivo permite a "divisão" de um sinal em dois sinais idênticos, em fase, mas com metade da potência do sinal original. São utilizados dois divisores de potência no sistema. Um divisor é utilizado na replicação da onda gerada pelo VCO, a qual serve de referência para o cálculo do atraso de fase devido à propagação da onda pelo meio dielétrico. O segundo divisor permite que o sinal recebido pela antena de recepção tenha sua intensidade e atraso de fase medidos.

- **Amplificador de Potência:** o amplificador de potência é o último elemento do sistema antes da transmissão do sinal. A potência de saída máxima do amplificador selecionado é de $30dBm$, ou 1000 mW.
- **Atenuador Controlado por Tensão:** este componente é utilizado pois permite o ajuste contínuo do nível do sinal recebido. O ajuste contínuo do sinal permite que a intensidade do sinal incidente na porta RF do misturador seja mantida constante, otimizando o funcionamento do misturador e, conseqüentemente, a medição do atraso de fase. Esse procedimento também mantém constante a intensidade do sinal incidente no detector, impedindo que este sature. A medição da intensidade do sinal recebido é feita indiretamente através do conhecimento do sinal de controle utilizado no atenuador controlável. O controle da atenuação é linear e feito por uma tensão analógica.
- **Misturador:** o misturador é um componente passivo utilizado no sistema para a medição do atraso de fase.
- **Detector:** o detector permite a medição da intensidade do sinal no sistema. Em comparação aos detectores passivos, os detectores ativos proporcionam sinais de medição de maior nível, devido a um circuito interno de amplificação.

As especificações técnicas dos componentes acima listados encontram-se no Apêndice A. Na figura 3.2 é mostrado o diagrama de blocos do sistema de geração e transmissão de microondas. Os componentes de microondas são conectados através de cabos coaxiais flexíveis, específicas para a frequência de operação do sistema. Todas as guias de onda utilizadas possuem conectores SMA-fêmea em ambas as extremidades. A montagem dos componentes foi realizada sobre uma placa de acrílico, conforme pode ser visto figura 3.3. A placa de acrílico foi escolhida por se tratar de um material não condutor. A preocupação inicial com a montagem do sistema de microondas sobre uma superfície não condutora mostrou-se desnecessária, uma vez que posteriormente verificamos que todas as carcaças dos componentes são aterradas. Também foi constatado, posteriormente, durante a realização dos primeiros testes com o sistema, a necessidade da utilização de dissipadores de calor no VCO e principalmente no amplificador de potência do sistema. Durante a operação esses componentes atingem altas temperaturas, tendo seu desempenho muito influenciado pela temperatura. O atenuador controlado por tensão não funcionou corretamente e não foi utilizado no sistema, como pode ser verificado na figura 3.3.

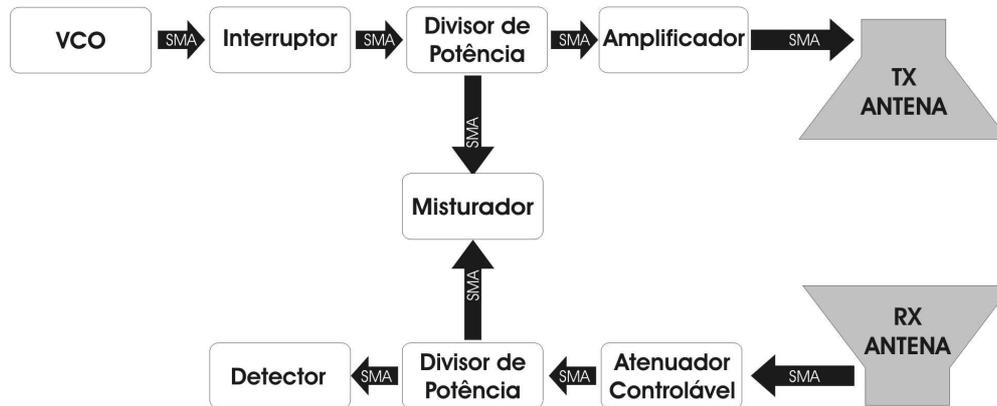


Figura 3.2: Diagrama de blocos do sistema de de geração e processamento de microondas

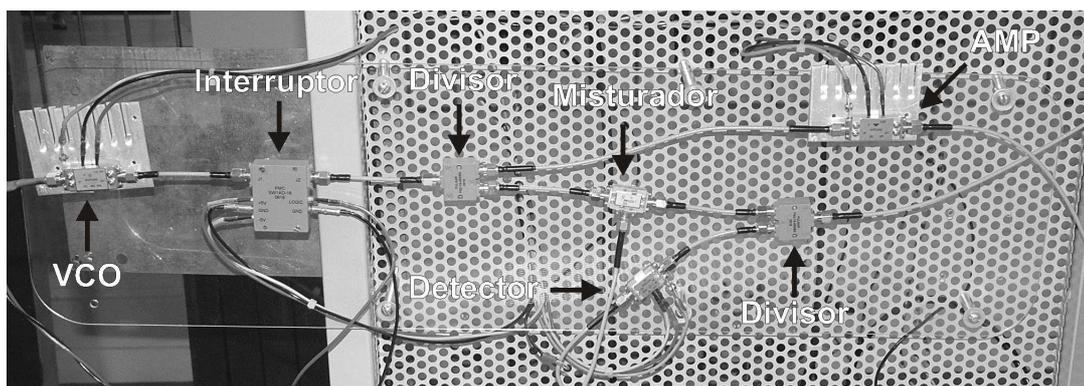


Figura 3.3: Foto do sistema de geração e processamento de microondas montado sobre uma placa de acrílico

3.2 Sistema Digital de Controle e Aquisição de Dados

A opção pelo desenvolvimento dos sensores de microondas, em vez da utilização de equipamentos laboratoriais ou de bancada, implicou na necessidade de desenvolvimento de um sistema digital de controle específico, que atendesse aos requisitos do sistema de microondas. Conforme visto no capítulo 2, o funcionamento de tais sensores não é direto e simples, em alguns casos demandando a realização de um conjunto de procedimentos para a obtenção de uma medida (como por exemplo no caso de utilização de uma técnica de FMCW). Nenhuma das soluções de aquisição e controle disponíveis atendia a todos os requisitos do sistema de geração e processamento de microondas proposto. Além disso, os sistemas de aquisição de dados normalmente utilizados em

aplicações laboratoriais e de pesquisa não atendem aos requisitos de uma aplicação industrial (ver lista de requisitos para sistemas industriais no início do capítulo).

Tendo em vista as razões acima expostas e o objetivo a médio prazo de desenvolvimento de um medidor multifásico industrial, um sistema digital de controle e aquisição de dados foi desenvolvido. O desenvolvimento deste sistema teve como premissa básica a modularidade e o reaproveitamento de código e de hardware. Na prática isso quer dizer que todo o sistema foi projetado não somente para atender às necessidades do atual projeto, mas para que também pudesse ser aproveitado integralmente ou parcialmente em outros projetos. A primeira medida adotada para tornar o sistema embarcado modular foi a separação do módulo de controle e aquisição do módulo de comunicação. O sistema embarcado de comunicação forma com o sistema de controle e aquisição a unidade de processamento do medidor de fração de água. A separação do sistema de comunicação do sistema de processamento e controle também implica numa melhora das características de tempo real do sistema, uma vez que o controle e a aquisição são realizados por um processador dedicado e independente dos não-determinismos, característicos da comunicação em rede, ficando essa tarefa a cargo do processador do sistema embarcado de comunicação. Na atual seção será apresentado somente o sistema de controle e aquisição de dados, sendo o sistema embarcado de comunicação apresentado na seção seguinte.

3.2.1 Características do *Hardware*

O sistema de controle e aquisição possui um DSP de 16 bits com 40 MIPS (Milhões de instruções por segundo), dedicado somente ao processamento dos sinais do processo. O modelo utilizado é o dsPIC30F4013, fabricado pela Microchip. O sistema foi projetado com 4 entradas analógicas. A digitalização dos sinais analógicos é realizada pelo conversor A/D interno do DSP, o qual possui resolução de 12 bits e frequência de aquisição de até 200 MHz. Os sinais analógicos do processo são primeiramente condicionados e depois filtrados (filtro analógico). A etapa de condicionamento consiste num amplificador de instrumentação modelo INA113, fabricado pela Texas Instruments. O ganho do módulo de condicionamento de sinais pode ser configurado de 1 a 500 com o auxílio de um *jumper* e de um potenciômetro. Após ser condicionado, o sinal analógico é então filtrado por um filtro analógico. Foi utilizada uma aproximação tipo Butterworth ativa de quarta ordem. Além de filtrar as componentes de alta frequência do sinal analógico, o filtro também funciona como filtro anti-recobrimento. A frequência de corte escolhida foi de 10 kHz. O digrama de Bode do filtro analógico implementado é mostrado na figura 3.4. O sinal filtrado é então amostrado pelo conversor A/D do DSP. O filtro anti-recobrimento foi projetado para funcionar com uma frequência de

aquisição de 40 kHz por entrada analógica. No entanto, a frequência de aquisição do sistema é configurável pelo usuário, sendo 40kHz por canal a frequência máxima de aquisição. À medida que o usuário reduz a frequência de aquisição, a eficiência do filtro como filtro anti-recobrimento é reduzida. Para mais informações sobre filtros analógicos, ver [10] e [28].

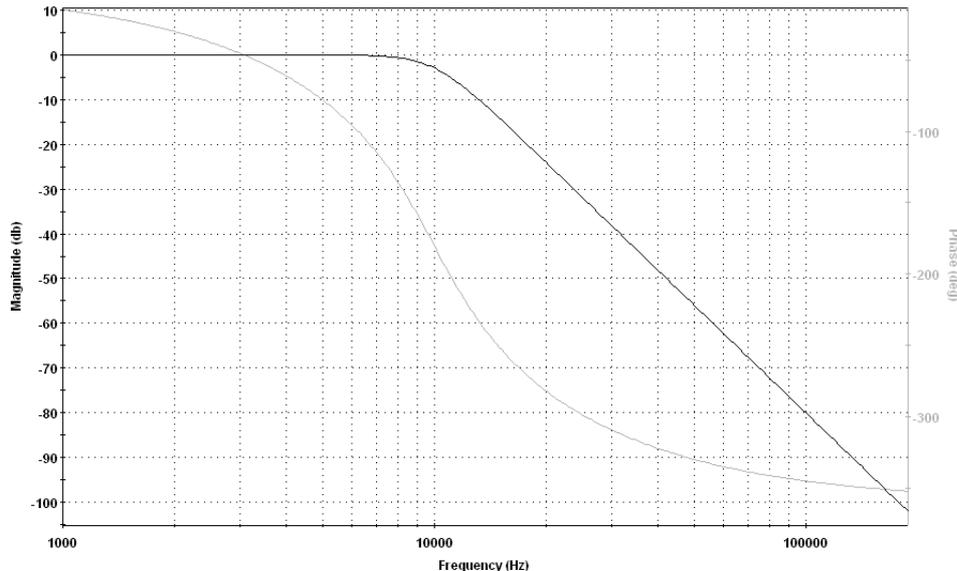


Figura 3.4: Diagrama de Bode do filtro anti-recobrimento

O sistema de controle e aquisição possui 4 saídas analógicas. É utilizado um conversor D/A modelo TLV5618, fabricado pela Texas Instruments, no sistema. É importante ressaltar que o DSP não possui conversor D/A integrado. O conversor escolhido possui resolução de 12 bits. A comunicação entre o conversor e o DSP é feita serialmente através do padrão SPI (*Serial Peripheral Interface*). O sinal analógico produzido pelos conversores D/A do sistema é filtrado através de um filtro analógico RC passivo de 1ª ordem e então condicionado através do módulo de condicionamento das saídas analógicas. O módulo de condicionamento das saídas analógicas consiste de dois amplificadores por canal: um amplificador inversor e outro não-inversor. A escolha de qual dos dois amplificadores será utilizado é feita através de um *jumper* na placa. O ganho do amplificador escolhido é configurável através de um potenciômetro. Assim, devido à utilização dos dois tipos de amplificadores, o sinal analógico de saída, ou controle, pode ter sua faixa configurada de 0V a 12V, ou de 0V a -12V. O sistema foi assim projetado porque alguns componentes do sistema de geração e processamento de microondas utilizam sinais de controle negativos, enquanto outros utilizam sinais positivos. Além das entradas e saídas analógicas, o sistema também possui 2 entradas digitais e 2 saídas digitais, ambas isoladas do resto do sistema através de um ampli-

ficador de ganho unitário, que funciona como proteção. Para mais informações sobre condicionamento de sinais, amplificadores operacionais e microeletrônica ver [12]. Na figura 3.5 é mostrado o diagrama de blocos do sistema de controle e aquisição de dados.

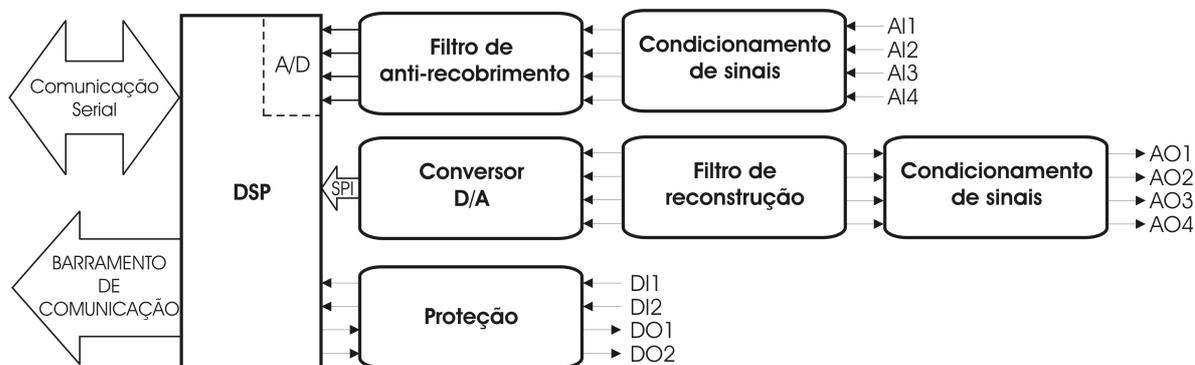


Figura 3.5: Diagrama de blocos do sistema controle e aquisição de dados

Os componentes e módulos constituintes do sistema de controle e aquisição de dados foram montados numa PCI (Placa de Circuito Impresso), juntamente com o sistema embarcado de comunicação, que será descrito na próxima seção. O *layout* da placa foi realizado seguindo as recomendações e procedimentos de compatibilidade eletromagnética para placas de circuito impresso. A título de ilustração, o desenho da placa é mostrado na figura 3.6. A placa é alimentada por uma fonte de tensão simétrica de ± 15 V. A placa possui um pequeno módulo de alimentação que, além das tensões de +15V e -15V, fornece também +5V e +3,3V, para os componentes da placa. Foram utilizados somente componentes PTH (*Placement Through Hole*) no projeto devido à simplicidade de prototipação e fabricação oferecida por esse tipo de tecnologia, se comparada com a tecnologia de SMT (*Surface Mount Technology*). Na figura 3.7 é mostrada uma foto da unidade de processamento do sistema, composta pelo sistema de controle e aquisição de dados e pelo sistema embarcado de comunicação. O diagrama esquemático do sistema de controle e aquisição encontra-se no Apêndice B.

3.2.2 Características do *Firmware*

O *firmware* do DSP do sistema de aquisição e controle foi desenvolvido em linguagem C, utilizando o ambiente de desenvolvimento MPLab da Microchip. O compilador utilizado foi C30 da Microchip, específico para a família de DSPs dsPIC30 da Microchip. O *firmware* foi estruturado na forma de tarefas colaborativas e não bloqueantes através da utilização de diversas máquinas de estado, uma para cada tarefa. As tarefas que o DSP processa são abaixo listadas:

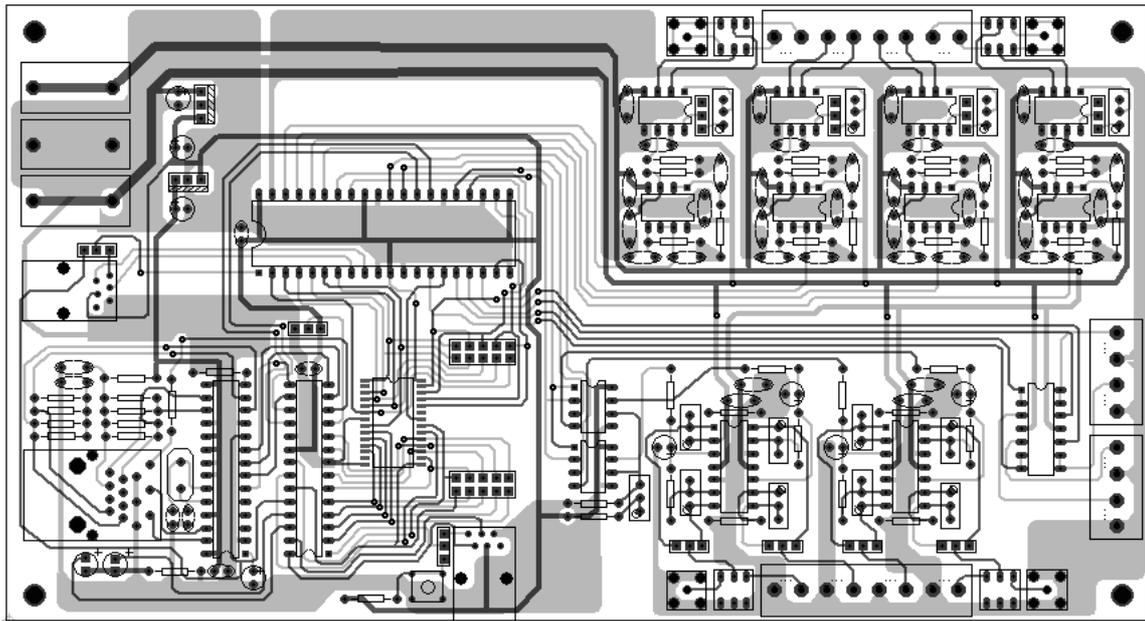


Figura 3.6: Desenho da PCI da unidade de processamento do sistema

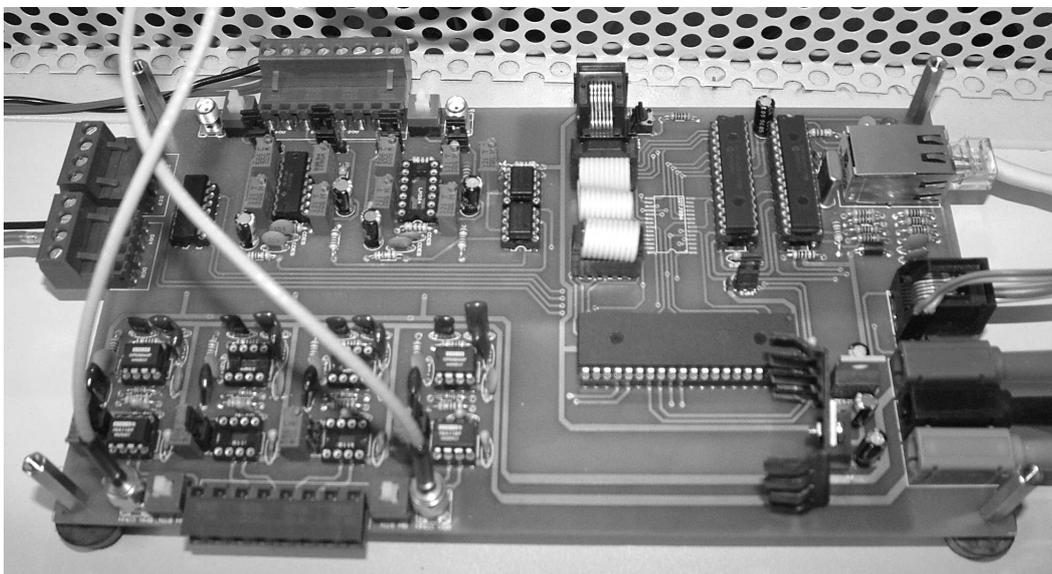


Figura 3.7: Unidade de processamento do sistema

- **Aquisição:** leitura das entradas analógicas;
- **Filtro Digital:** processamento dos amostras de acordo com o filtro digital configurado;
- **Controle:** cálculo do sinal de controle em malha fechada, quando configurado para tal;

- **Medição da Fração de Água:** realização dos comandos para operação do sistema de geração e processamento de microondas;
- **Atualização das Saídas:** atualização dos valores das saídas analógicas e digitais, quando necessário;
- **Alarmes:** envio de mensagens de alarme quando um determinado valor, ou condição, pré-estabelecida for atingida;
- **Comunicação:** implementa a comunicação serial com o sistema embarcado de comunicação;
- **Manipulação da Memória Não-Volátil:** leitura ou escrita da memória não-volátil que armazena os registradores de configuração do sistema;
- **Logging:** uma variação da tarefa de comunicação para transferência de grandes quantidades de dados, em tempo real, através de um barramento paralelo.

A execução das tarefas acima descritas é regida pela interrupção do temporizador de aquisição, sendo que todas são executadas em todos os ciclos de aquisição. O controle de execução de cada tarefa é regido por uma máquina de estados independente. Dessa forma, apesar de todas as tarefas serem solicitadas em todos os ciclos de aquisição, na maior parte das vezes elas retornam o controle prontamente à rotina principal, pois nada têm a executar. Essa organização otimiza o desempenho de tempo-real do sistema. No entanto, nenhuma avaliação ou estudo mais aprofundado sobre o comportamento de tempo-real do sistema foi realizado pois foge do escopo do presente trabalho. Na figura 3.8 é mostrado o fluxo de dados através das diferentes tarefas do sistema de controle e aquisição.

A interface com o sistema de comunicação embarcada é realizada serialmente, através de uma implementação simplificada do protocolo Modbus SLIP. Os dados de *logging* são enviados através do barramento paralelo para uma memória FIFO externa, pertencente ao sistema embarcado de comunicação, o qual será descrito na próxima seção.

O sistema de controle e aquisição foi projetado para ser flexível e permitir a sua utilização em diversas etapas do projeto e, inclusive, em outros sistemas e aplicações. O sistema de controle e aquisição pode ser configurado para operar em diferentes modos de operação. Abaixo são listados os possíveis modos de operação:

- **Modo Aquisição:** nesse modo o sistema realiza somente aquisição de dados. Um usuário ou uma aplicação podem ler as entradas analógicas ou digitais quando

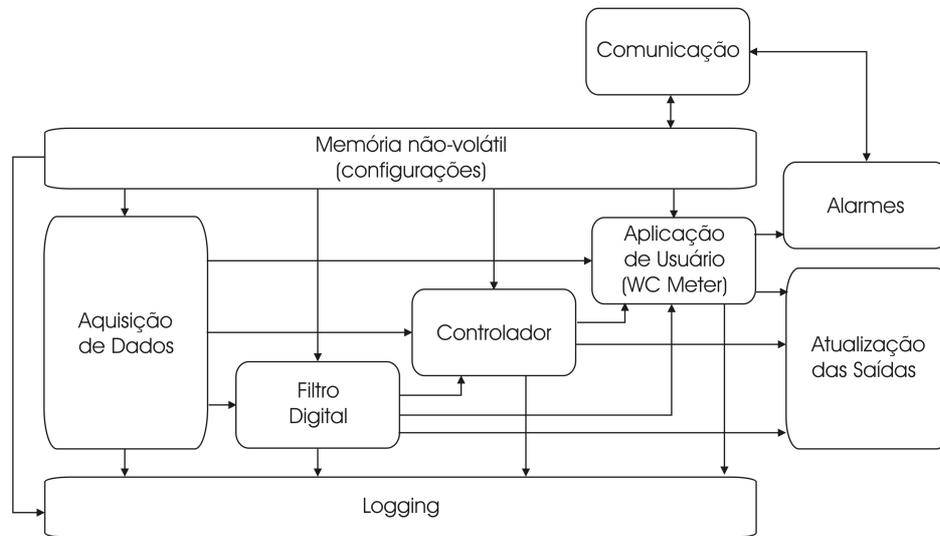


Figura 3.8: Fluxograma de dados no *firmware* do sistema de controle e aquisição

desejarem ou o sistema pode realizar o *logging* das entradas automaticamente. O sistema também pode ser configurado para gerar alarmes quando uma determinada condição for atingida. As entradas analógicas podem ainda ser filtradas pelo filtro digital do sistema.

- **Modo Controlador Manual:** nesse modo um usuário ou uma aplicação pode, além de monitorar as entradas do sistema, enviar comandos para as saídas analógicas ou digitais do sistema.
- **Modo Controlador Automático:** nesse modo o sistema pode controlar um processo de forma automática, de acordo com uma lei de controle previamente configurada nele.
- **Modo Filtro Digital:** o sistema de controle e aquisição pode ser configurado como um filtro digital, continuamente amostrando um sinal analógico, processando o sinal digital e reconstruindo o sinal analógico filtrado.
- **Modo Medidor de Fração de Água:** quando configurado nesse modo, o sistema assume uma configuração específica. Todas as tarefas do sistema são configuradas de uma forma pré-determinada. Os parâmetros de configuração do usuário são específicos para a realização dessa tarefa. O sistema possui ainda dois submodos quando configurado para operar no modo medidor de fração de água. No submodo teste o sistema realiza ensaios previamente determinados para avaliação do sistema e das diversas técnicas de inferência. No submodo medidor o sistema mede continuamente a fração de água do sistema, armazenando o valor

mais recente num registrador da memória, o qual pode ser lido, por exemplo, através de um software supervisorio.

3.3 Sistema Embarcado de Comunicação

Conforme descrito anteriormente, o sistema embarcado de comunicação foi separado do sistema de controle e aquisição de dados com o objetivo de tornar mais modular o sistema. Apesar disso, ambos os sistemas são montados numa mesma placa, compartilham uma mesma fonte de alimentação e juntos constituem a unidade de processamento do medidor de fração de água. A primeira etapa do projeto do sistema embarcado de comunicação foi a escolha do protocolo de comunicação a ser utilizado. A decisão de qual protocolo implementar e adotar no desenvolvimento de uma unidade de processamento compacta, específica e de baixo custo, conforme aqui apresentada, não é uma decisão trivial. A implementação do protocolo de comunicação tem que ser realizada em nível de *hardware*, ou meio físico, e em nível de *software*. Além de determinar diversos aspectos do projeto de *hardware* e *software* do sistema embarcado, o protocolo de comunicação escolhido influencia a maneira como o medidor como um todo irá funcionar, determinando como se dará a interação desse equipamento com outros e com os usuários e operadores do sistema. O sistema embarcado de comunicação foi projetado para atender aos seguintes requisitos de projeto:

- robustez;
- escalonabilidade do sistema;
- capacidade de monitoramento, configuração e diagnóstico remoto;
- baixo custo;
- interoperabilidade e compatibilidade com outros equipamentos e sistemas;
- alta velocidade de transmissão de dados.

3.3.1 Protocolo de Comunicação

Com o avanço tecnológico surgiram, e surgem cada vez mais, novas necessidades de integração entre os sistemas produtivos, em seus diversos níveis (redes de campo, chão-de-fábrica, supervisorios, sistemas de gestão, etc). Dessa forma, hoje em dia um instrumento de medição não precisa somente medir a grandeza propriamente dita, mas

também disponibilizar seus dados num sistema de informação mais amplo e integrado, bem como permitir alterações de configuração e o diagnóstico do seu funcionamento remotamente. Instrumentos que não são capazes de se integrarem num sistema computacional de informação, ou supervisão, praticamente não existem mais no mercado. Instrumentos que utilizam padrões e protocolos de comunicação proprietários também têm perdido mercado para instrumentos que adotam um padrão de comunicação aberto ou homologado e mantido por uma organização ou consórcio de empresas.

Devido à redução dos custos dos microprocessadores e ao aumento exponencial da sua capacidade de processamento, os padrões de comunicação estão cada vez mais complexos e incorporam nos instrumentos de medição e controle que os utilizam uma variedade de funcionalidades até pouco tempo só encontradas em sistemas computacionais de grande e médio porte, como: computadores industriais, pessoais e CLPs de grande porte. Dentre os diversos padrões existentes, podemos destacar alguns dos mais utilizados, como por exemplo: Fieldbus Foundation, Profibus DP, CAN e Modbus. Cada padrão possui suas vantagens e desvantagens sendo que, em geral, cada segmento industrial acaba adotando um padrão.

A escolha do protocolo de comunicação a ser implementado requer uma ponderação entre requisitos do sistema, esforços de desenvolvimento e custos. Tendo em vista essas ponderações, a opção foi pela utilização do protocolo Modbus TCP/IP. O Modbus é um protocolo de comunicação criado em 1979 para permitir a comunicação entre, e com, controladores e equipamentos industriais. A maioria dos CLPs utilizados nos mais diversos segmentos industriais adotam esse padrão ou, no mínimo, possuem módulos de expansão compatíveis com o padrão Modbus. Recentemente, a Modbus-IDA, associação responsável pela manutenção da especificação do protocolo Modbus, lançou uma nova especificação: o Modbus TCP/IP. Desde então, tal padrão tem tido crescente importância no mercado devido à sua facilidade de integração com os antigos equipamentos Modbus-RTA e também devido à sua simplicidade.

O protocolo Modbus TCP/IP é um protocolo do tipo mestre/escravo, em que somente o mestre pode iniciar uma transmissão no barramento. Certamente não se trata de um protocolo de última geração, que contempla em sua especificação todas as funcionalidades requeridas pelos novos "equipamentos inteligentes", com sua arquitetura de controle distribuído. No entanto, para a grande maioria das aplicações encontradas nas diversas etapas da cadeia de processamento do petróleo (exploração, transporte, refino), o Modbus TCP/IP é um protocolo robusto e confiável, que atende aos requisitos dos sistemas de automação, controle e supervisão requeridos. Além disso, trata-se de um protocolo aberto.

Como o nome sugere, o protocolo Modbus TCP/IP é implementado sobre uma rede Ethernet. O padrão Ethernet tem ganhado cada vez mais espaço no mercado das redes

de campo. No entanto, este padrão não implementa a camada de aplicação do modelo OSI. Faz-se, portanto, necessária a utilização de algum outro protocolo que permita a comunicação entre os instrumentos, e dos instrumentos com os sistemas de alto nível, no caso o protocolo Modbus TCP/IP. Dentre as vantagens da utilização do padrão Ethernet, podemos citar:

- tecnologia de baixo custo;
- padrão amplamente difundido e conhecido;
- facilidade na integração com sistemas de mais alto nível;
- padrão aberto;
- permite alta velocidade de transmissão de dados;
- possibilita longas distâncias de comunicação sem necessidade da utilização de repetidores.

3.3.2 Características do *Hardware*

No módulo de comunicação foi utilizado um microcontrolador PIC18F2620, de 8bits e 8MIPS, da Microchip. Para a interface com a camada física do protocolo de comunicação é utilizado um controlador Ethernet modelo ENC28J60, fabricado pela Microchip. A comunicação entre o microcontrolador e o controlador Ethernet é realizada serialmente através de uma interface SPI. O controlador de Ethernet, além de implementar a camada física, implementa também a camada MAC do protocolo Ethernet. As demais camadas definidas pelo protocolo são implementadas no microcontrolador. Para tal é utilizada uma biblioteca fornecida gratuitamente pela própria Microchip, conhecida como "pilha TCP/IP" (do inglês *TCP/IP Stack*). A referida pilha TCP/IP demanda um espaço significativo na memória de programa do microcontrolador que a implementa. O microcontrolador, PIC18F2620 utilizado no presente projeto, possui 64kb de memória de programa (*Flash*), dos quais aproximadamente 34kb foram utilizados pelo sistema em questão.

Além dos componentes acima listados, o sistema embarcado de comunicação também possui uma memória RAM FIFO (*First In First Out*). A memória FIFO é utilizada como um elemento isolador entre o sistema embarcado de comunicação e o sistema de controle e aquisição. A memória FIFO só é utilizada quando o modo *logging* é ativado. O fluxo de dados da comunicação de *logging* só ocorre num sentido, sendo que somente o sistema de controle e aquisição produz esse dados. O sistema

de comunicação lê esses dados e os envia via Ethernet para aplicação do usuário. O restante da comunicação entre os dois sistemas é realizado serialmente, através de uma implementação simplificada do protocolo Modbus. Esse tópico será abordado em mais detalhes na próxima seção. A comunicação dos dados de *logging* pode demandar uma banda significativa do barramento de comunicação, dependendo da frequência de aquisição e de *logging* configuradas. O sistema foi projetado para funcionar com qualquer memória FIFO da família IDT72XX, fabricada pela empresa americana IDT. As memórias dessa família possuem capacidades que variam de 2kb a 64kb. A memória FIFO não é um componente obrigatório no sistema. É possível, através da utilização de um cabo *flat*, conectar diretamente o sistema de comunicação ao sistema de controle e aquisição. Em teoria, o desempenho em tempo-real do sistema de controle e aquisição fica prejudicado quando não se utiliza a memória FIFO. No entanto, não foram realizados estudos para determinar quantitativamente o desempenho em tempo-real do sistema. A placa montada para a realização do presente trabalho não possui memória FIFO devido a dificuldades técnicas encontradas na montagem do componente SMD (*Surface Mount Device*) da memória na placa.

O sistema de comunicação possui ainda um circuito de proteção e isolamento elétrico do barramento Ethernet, conforme sugerido no *datasheet* do controlador ENC28J60. O conector RJ45 utilizado foi o modelo NU1S516, fabricado pela Bothhand. O modelo escolhido possui integrado um transformador de pulsos para cada par trançado de comunicação. O transformador de pulsos do conector faz parte do circuito de proteção do sistema de comunicação. Na figura 3.9 é mostrado o diagrama de blocos do sistema de comunicação. A placa PCI, sobre a qual o sistema de comunicação foi montado, já foi apresentada na seção anterior. Os diagramas esquemáticos do sistema de comunicação encontram-se no Apêndice B. O sistema de comunicação possui ainda 5 *leds* que sinalizam seu estado de funcionamento, sendo que 3 são integrados ao conector RJ45 e outros dois *leds* de 5mm são externos. O significado de cada *led* é abaixo descrito:

- **Amarelo RJ45:** RX da comunicação Ethernet.
- **Verde RJ45:** TX da comunicação Ethernet.
- **Vermelho RJ45:** indicador de funcionamento (*power*) do sistema.
- **Amarelo 5mm:** endereço IP configurado (manualmente ou via DHCP).
- **Verde 5mm:** comunicação com o sistema concentrador de dados estabelecida.

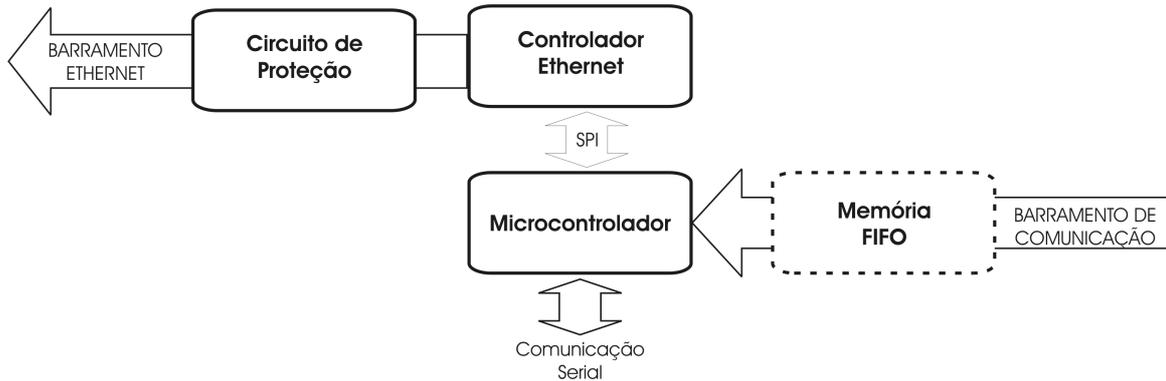


Figura 3.9: Diagrama de blocos do sistema embarcado de comunicação

3.3.3 Características do *Firmware*

O *firmware* do microcontrolador do sistema de comunicação embarcada foi desenvolvido em linguagem C, utilizando o ambiente de desenvolvimento MPLab da Microchip. O compilador utilizado foi o C18 da Microchip, específico para a família de microcontroladores PIC18 da Microchip. O *firmware* do microcontrolador é todo estruturado em função da implementação da biblioteca TCP/IP Stack da Microchip. A referida biblioteca é organizada em tarefas cooperativas. Cada camada de nível do protocolo Ethernet é implementada numa tarefa, que por sua vez é implementada através de máquina de estado finito [24]. A estrutura de camadas do padrão Ethernet e a maneira como esta é mapeada nas tarefas da biblioteca TCP/IP Stack é mostrada na figura 3.10. Para mais detalhes sobre implementação da comunicação Ethernet em sistemas embarcados ver [2] e [4].

Nem todas as camadas, ou tarefas, da biblioteca foram utilizadas. Abaixo são listadas as tarefas utilizadas no desenvolvimento do sistema de comunicação embarcada do módulo de processamento do medidor de fração de água.

- **MAC:** camada de controle de acesso ao meio (*Media Access Control*). Corresponde à camada 2 do modelo OSI, ou seja, a camada de Enlace de Dados. Além de exercer o controle de acesso ao meio e propiciar os mecanismos básicos de detecção de erros de transmissão, esta camada é responsável pelo endereço MAC, ou endereço físico do dispositivo de comunicação. O endereço MAC identifica unicamente um dispositivo numa rede Ethernet e é o mecanismo básico, de mais baixo nível, de endereçamento dentro do padrão Ethernet. Esta camada não faz parte da biblioteca TCP/IP original da Microchip. Na verdade, a implementação dessa camada depende do controlador Ethernet utilizado, funcionando na verdade como um *driver* para o controlador Ethernet. No presente trabalho foi utilizada a tarefa

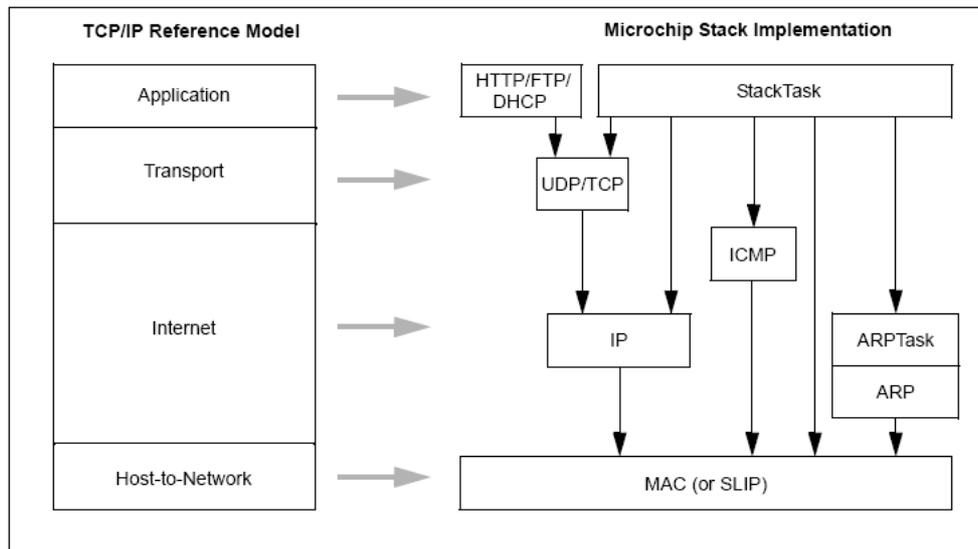


Figura 3.10: Mapeamento das camadas do padrão Ethernet em tarefas na biblioteca TCP/IP *Stack* da Microchip [24]

MAC, ou *driver*, implementada especificamente para o controlador ENC28J60, a qual é fornecida gratuitamente pelo fabricante.

- **ARP:** camada de resolução de endereços (*Address Resolution Protocol*). Corresponde a camada 3 do modelo OSI, ou seja, a camada de Rede. A função desse protocolo é a resolução de endereços IPs em endereços MAC. A resolução é necessária, por exemplo, na determinação do endereço MAC de um dispositivo do qual só se conhece o endereço IP.
- **IP:** camada de Internet (*Internet Protocol*). Corresponde à camada 3 do modelo OSI. Esse protocolo, ou camada, é responsável pelo endereçamento, roteamento e controle de envio e recepção dos datagramas IP. A versão do protocolo utilizada é a IPv4.
- **ICMP:** camada de controle de mensagens de Internet (*Internet Control Message Protocol*). Corresponde à camada 3 do modelo OSI. Esse protocolo é normalmente utilizado no envio mensagens de erro ou anomalias na rede. Também pode ser usado para obter informações e realizar diagnósticos sobre a rede. O serviço de *ping*, por exemplo, utiliza esse protocolo para determinar se um dado dispositivo está acessível.
- **TCP:** camada de controle de transmissão (*Transmission Control Protocol*). Corresponde à camada 4 do modelo OSI, ou seja, a camada de Transporte. Esse protocolo permite a transmissão confiável de dados de um dispositivo a outro, sem duplicação ou perda de dados. Implementa serviços de detecção de erros e

retransmissão de pacotes. É um protocolo orientado a conexões, ou seja, requer que primeiro seja estabelecida uma conexão entre dois dispositivos para que só então a transferência de dados possa ser iniciada.

- **UDP:** camada de datagramas de usuário (*User Datagram Protocol*). Corresponde à camada 4 do modelo OSI. Esse protocolo permite a transmissão de dados de maneira rápida e com o mínimo de *overhead* possível no padrão TCP/IP. Trata-se de um protocolo de transmissão não-confiável, pois não implementa nenhum mecanismo de controle ou integridade.
- **DHCP:** camada de configuração dinâmica de dispositivos (*Dynamic Host Configuration Protocol*). Corresponde à camada 7 do modelo OSI, ou seja, a camada de Aplicação. A implementação de um cliente DHCP permite a configuração automática de diversos parâmetros necessários para que o cliente opere numa dada rede IP, como por exemplo: endereço IP, máscara de rede e *gateway* padrão.

Além das tarefas acima descritas, que implementam as camadas de protocolo do padrão Ethernet, a biblioteca TCP/IP *Stack* também necessita, para o seu funcionamento cooperativo, da configuração da tarefa de gerenciamento da pilha (*Stack Manager*, a qual por sua vez coordena o funcionamento das demais tarefas. A tarefa de gerenciamento da pilha faz parte da biblioteca padrão distribuída pela Microchip.

Conforme citado anteriormente, a implementação do padrão TCP/IP, através da biblioteca fornecida pelo Microchip, corresponde somente a uma parte do protocolo de comunicação adotado no sistema. Foi necessária a implementação do protocolo Modbus TCP/IP no sistema embarcado de comunicação. O protocolo Modbus TCP/IP é basicamente um cliente dos serviços oferecidos pelo protocolo TCP. Nesse sentido, os pacotes de dados transportados pelo protocolo TCP são, na verdade, os datagramas de requisição e resposta do protocolo Modbus TCP/IP. O protocolo Modbus TCP/IP corresponde à camada 7 do modelo OSI, ou seja, a camada de aplicação. Assim como o processamento dos demais protocolos, o processamento do protocolo Modbus TCP/IP também é realizado através de uma tarefa colaborativa no sistema de comunicação embarcada. A tarefa do protocolo Modbus TCP/IP foi implementada de maneira não-bloqueante.

O protocolo Modbus TCP/IP foi implementado para funcionar somente como um escravo na comunicação Modbus, apenas respondendo a requisições de um mestre. A interação entre os sistemas embarcado de comunicação e de controle e aquisição se dá de maneira transparente para os equipamentos e usuários externos. Para todos os efeitos, o mestre Modbus enxerga apenas um dispositivo. Os endereços dos registradores Modbus são mapeados de maneira contínua e unívoca, conforme exigido pelo protocolo. No

entanto, internamente o mapeamento desses registradores é dividido entre os sistemas de comunicação e de controle e aquisição.

Da maneira como foi implementada no sistema, a tarefa Modbus TCP/IP identifica as mensagens Modbus TCP/IP recebidas pelo sistema, valida essas mensagens e então decide se a requisição deve ser repassada ao módulo de controle e aquisição ou não. Na maior parte dos casos a solicitação é repassada ao sistema de controle e aquisição. A requisição Modbus repassada ao sistema de controle e aquisição é simplificada. Somente o PDU (*simple Protocol Data Unity*) da requisição é repassada ao sistema de controle e aquisição. O sistema de controle e aquisição então processa a requisição recebida e retorna a resposta ao sistema de comunicação embarcada. O sistema de comunicação reconstrói o ADU (*Application Data Unit*) referente à implementação TCP/IP do protocolo e em seguida envia a resposta, através da rede Ethernet, ao dispositivo mestre solicitante. Na figura 3.11 é ilustrada a estrutura de uma mensagem Modbus TCP/IP. Para mais detalhes sobre o protocolo Modbus TCP/IP, ver [19] e [18]. O mapeamento dos registradores Modbus no sistema e suas respectivas funções são descritos no Apêndice C.

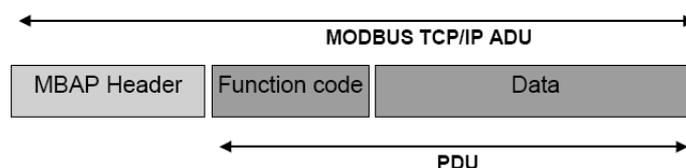


Figura 3.11: Estrutura da mensagem Modbus TCP/IP [19]

Tarefa de *Logging*

O protocolo Modbus TCP/IP não foi desenvolvido com o propósito de permitir que um registrador seja lido numa frequência muito alta, não sendo, portanto, adequado para a funcionalidade de *logging* do sistema. O próprio protocolo TCP/IP insere um *overhead* de comunicação muito alto, tornando a comunicação ineficiente de certa forma. Para aplicações que requerem taxas de transferência muito altas, ou *streaming* de dados, o protocolo UDP/IP é mais adequado. Para atender às necessidades de *logging* do sistema, foi implementada uma tarefa de *logging* no sistema de comunicação, que assim como as demais até agora descritas, funciona de maneira colaborativa e não-bloqueante. O mecanismo de *logging* do sistema utiliza única e exclusivamente comunicação de dados sobre UDP/IP. Nem o sistema de comunicação, nem o sistema de controle e aquisição foram projetados para armazenar grandes quantidades de dados do processo na sua memória interna. Dessa forma, todo o *logging* propriamente dito do

sistema, ou seja, o armazenamento em memória não-volátil dos dados de processo, é realizado via rede através de um serviço implementado pelo sistema do concentrador de dados (que será descrito na próxima seção), ou ainda por um serviço externo qualquer, desde que esse serviço implemente o protocolo de *logging* utilizado. A tarefa de *logging*, implementada no sistema de comunicação, apenas lê os dados inseridos na memória FIFO (ou diretamente enviados pelo barramento paralelo) e envia esses dados para o serviço de *logging* remoto configurado no sistema.

Para o funcionamento da funcionalidade de *logging* remoto no sistema foi necessária a criação de um protocolo mínimo de comunicação. Toda a operação de *logging* do medidor é coordenada pelo sistema embarcado de comunicação, mais especificamente pela tarefa de *logging*. Caso o sistema esteja configurado para realizar o *logging*, a tarefa de *logging* primeiramente solicita ao serviço remoto de *logging* a criação de um canal de *logging*, de acordo com as configurações da unidade de processamento. Após a confirmação da criação do canal, a tarefa de *logging* então autoriza o módulo de controle e aquisição a iniciar o envio dos dados. Os dados de *logging* recebidos pelo sistema são empacotados de acordo com o protocolo definido e então enviados, via rede, para o serviço de *logging* remoto. Uma solicitação para finalizar o *logging* pode ser enviada pelo usuário, pela aplicação remota ou pelo próprio sistema de controle e aquisição. Quando o sistema de comunicação recebe uma solicitação de finalização de *logging*, este primeiro interrompe o *logging* no sistema de aquisição e controle, quando for o caso, e então solicita ao serviço de *logging* remoto a finalização do canal de *logging* criado. O protocolo de *logging*, criado para permitir o funcionamento de tal mecanismo, conforme descrito, é apresentado no Apêndice D.

Tarefa de Recrutamento

O sistema de comunicação pode ser configurado com um IP fixo ou então utilizar o protocolo de DHCP para obter um endereço IP e suas configurações de rede. Quando configurado para utilizar o serviço de DHCP, se faz necessária a utilização de algum mecanismo de cadastramento de equipamentos. Do contrário, um mestre nunca descobriria o endereço de um dado equipamento, assim configurado, numa rede. Para solucionar esse problema foi criado um mecanismo de "recrutamento" de equipamentos. Para tanto foi criada uma tarefa de recrutamento no sistema de comunicação. A tarefa de recrutamento segue as mesmas premissas das demais tarefas até agora descritas. Para tal mecanismo de recrutamento funcionar é necessário que exista um serviço recrutador na rede. O serviço recrutador é implementado no sistema do concentrador de dados, o qual será descrito na próxima seção.

Quando o sistema de comunicação embarcada obtém um IP através do servidor

DHCP da rede, a tarefa de recrutamento solicita ao recrutador da rede, via um *broadcast*, a sua inclusão na lista de equipamentos da rede. A lista de equipamentos da rede pode então ser obtida por um mestre qualquer e o endereço IP de um dado equipamento pode ser determinado. Os equipamentos são identificados através de IDs alfa-numéricas, definidas pelo usuário. Além das IDs, o usuário, ou aplicação, pode utilizar os parâmetros de descrição do equipamento e tipo do equipamento para identificar univocamente um determinado equipamento. O protocolo de cadastramento foi implementado sobre o protocolo UDP, uma vez que demanda a transmissão em *broadcast* de uma solicitação de um recrutamento. A descrição do protocolo de recrutamento desenvolvido é apresentada no Apêndice D.

3.4 Sistema Computacional do Concentrador de Dados

A unidade de processamento do medidor de fração de água foi, até agora, apresentada e tratada como sendo uma unidade única na rede. No entanto, o sistema digital como um todo, formado pela unidade de processamento, sistema do concentrador de dados e sistema de interface com o usuário, foi concebido para funcionar com diversos equipamentos numa mesma rede. Num cenário onde existem diversos equipamentos e usuários operando esses equipamentos, um sistema concentrador se faz necessário. O sistema computacional do concentrador de dados é um serviço de suporte a operação das unidades de processamento do medidor de fração de água. Além disso, o sistema do concentrador de dados implementa uma interface de comunicação de alto nível entre o sistema de interface com usuário com as unidades de processamento. As funcionalidades oferecidas pelo sistema do concentrador de dados são abaixo listadas:

- **Serviço de recrutamento de equipamentos:** quando os equipamentos são configurados para utilizarem o serviço de DHCP para a obtenção de seus endereços de rede, faz-se necessária a utilização de um mecanismo que resolva os endereços dos equipamentos. O serviço de recrutamento recebe solicitações de recrutamento e mantém uma lista com os equipamentos presentes na mesma sub-rede na qual ele está instalado.
- **Serviço de *logging*:** o registro de *logging* do equipamento não fica armazenado nele devido a limitações da sua capacidade de armazenamento. O serviço de *logging* é o responsável pelo registro dos dados de *logging* dos equipamentos da mesma rede na qual ele foi instalado. Os arquivos podem ser posteriormente consultados pela aplicação de usuário.

- **Serviço de *Webservices* para operação do sistema digital:** o serviço de Webservices implementa uma interface de alto nível, orientada a serviços, para a configuração e operação das unidades de processamento do sistema. A consulta aos arquivos de *logging* e à lista de equipamentos recrutados na rede também é realizada através do serviço de *webservices*.

O serviço do concentrador de dados precisa ser instalado na mesma sub-rede em que as unidades de processamento serão instaladas. O serviço pode ser instalado no próprio servidor da rede ou numa máquina separada. Caso o serviço seja instalado numa máquina separada, e seja necessário acessar o sistema digital de outra rede, é importante que a máquina na qual o serviço do concentrador de dados foi instalado possua definida uma rota para a comunicação com as redes externas. Devido ao fato de as unidades de processamento implementarem o padrão Modbus TCP/IP, qualquer aplicativo supervisorio ou de configuração que seja compatível com esse padrão pode ser utilizado sem que haja a necessidade de utilização do serviço do concentrador de dados. É importante ressaltar que o serviço do concentrador de dados não interfere na comunicação Modbus TCP/IP, permanecendo as unidades de processamento compatíveis com tal padrão. Na figura 3.12 é ilustrada uma possível configuração para o sistema digital, com a utilização do serviço do concentrador de dados

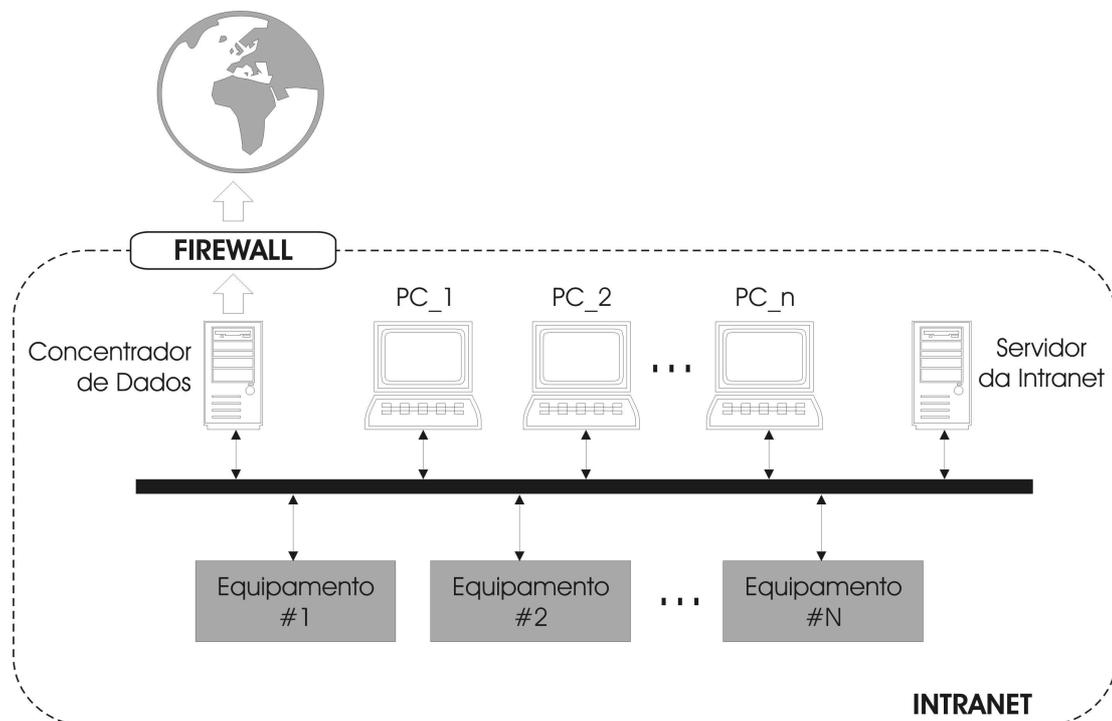


Figura 3.12: Possível configuração para o sistema digital

O chamado Webservice é uma solução utilizada na integração de sistemas e na comunicação entre aplicações diferentes. Com esta tecnologia é possível que sistemas desenvolvidos em plataformas diferentes sejam compatíveis. Trata-se de uma tecnologia de RPC (*Remote Procedure Calls*), que permite o desenvolvimento de aplicações distribuídas através de métodos e objetos remotos. As bases para a construção de um Webservice são os padrões XML e SOAP. O transporte dos dados é normalmente realizado via protocolo HTTP (o padrão não determina o protocolo de transporte). Os dados são transferidos no formato XML e encapsulados pelo protocolo SOAP. A grande vantagem de se utilizar o HTTP (e os Webservices) como solução de comunicação entre equipamentos e sistemas é a de que, normalmente, os *firewalls* corporativos e industriais não oferecem restrições a esse tipo de comunicação sem, no entanto, perderem a segurança. Boa parte dos sistemas supervisórios, ou SCADAs, atuais já implementam nas suas versões mais recentes *drivers* para a comunicação com equipamentos e processos que suportam Webservices.

A comunicação remota via rede, implementada no sistema pelo serviço de Webservices do sistema do concentrador de dados, tem se tornado cada vez mais importante em aplicações industriais. As capacidades de supervisão, configuração e diagnóstico remotos estão se tornando padrão em sistemas industriais por diversas razões, como por exemplo:

- permite que especialistas possam acompanhar as variáveis do processo em qualquer lugar do mundo em que se encontrarem, e de qualquer computador;
- permite o diagnóstico e solução de problemas em equipamentos defeituosos por parte do fabricante sem que seja necessário o envio de um técnico à planta;
- reduz os custos operacionais da planta e o custos de manutenção e de instalação dos equipamentos;

O sistema do concentrador de dados foi todo desenvolvido na linguagem CSharp, utilizando a ferramenta de desenvolvimento Visual Studio, da Microsoft. O concentrador de dados utiliza a plataforma .NET v2, desenvolvida pela Microsoft. A utilização da plataforma .NET requer que o serviço seja instalado numa máquina que ofereça suporte à utilização dessa plataforma. Existem alguns projetos de implementação dessa plataforma em ambiente Linux, como o projeto Mono. Para ser instalado num sistema operacional Microsoft Windows é necessário que este possua instalados o IIS (*Internet Information Service*) e a plataforma .NET v2 propriamente dita. Ambos podem ser obtidos através da página da Microsoft na Internet.

Os serviços de recrutamento e *logging* do sistema do concentrador de dados utilizam exclusivamente o protocolo UDP/IP na comunicação com as unidades de processamento, conforme descrito na seção anterior do presente capítulo. O protocolo de comunicação desenvolvido para permitir o funcionamento desse serviço é descrito no Apêndice D. No Apêndice E são apresentados e descritos todos os serviços, ou métodos, oferecidos pela interface Webservice. Na figura 3.13 é mostrado o diagrama de blocos do sistema do concentrador de dados, onde estão representadas todas as comunicações existentes no sistema, bem como os protocolos utilizados.

O sistema do concentrador de dados desenvolvido pode ser considerado como um *driver* de nova geração para as unidades de processamento, pois permite a comunicação destes com diversos aplicativos: sistemas supervisórios de última geração, planilhas eletrônicas (Excel, por exemplo), ambientes visuais de desenvolvimento e até mesmo um simples navegador de hipertexto. A interface final que permite a compatibilidade com todos os aplicativos citados é a interface Webservices. Computadores de dentro e de fora da intranet poderão utilizá-la para acessar os recursos das unidades de processamento. Não é necessário instalar *drivers* Modbus TCP/IP nos computadores para permitir a utilização das unidades. Na verdade, não é necessário instalar *driver* algum. Somente o serviço do concentrador de dados precisa ser instalado e estar ligado e conectado à rede para prover os serviços necessários.

3.5 Sistema de Interface com Usuário

O sistema digital foi concebido para que a interface com usuário funcione em rede, através da utilização de um navegador de Internet padrão. Nesse contexto, o sistema de interface com usuário é apenas uma página de hipertexto (HTTP) que permite que o usuário configure a unidade de processamento que, por sua vez, controla e coordena a operação dos sistemas que compõem o medidor de fração de água. Além de permitir a configuração do funcionamento do medidor de fração de água, o sistema de interface com o usuário também permite a operação do sistema, o acesso aos dados de *logging* armazenados no concentrador de dados e também a leitura do estado atual do medidor, em tempo-real, incluindo todas as suas variáveis de entrada, saída e internas.

A princípio não existem restrições de acesso e o usuário pode acessar a interface com usuário do sistema de qualquer computador, que não necessariamente precisa estar na mesma rede que o sistema do concentrador de dados. Para permitir o acesso do usuário aos equipamentos, o sistema realiza uma autenticação simples com o uso de senhas. O administrador da rede, ou do sistema, pode adicionar novos usuários no sistema, remover usuários ou alterar senhas. O sistema de interface implementado para

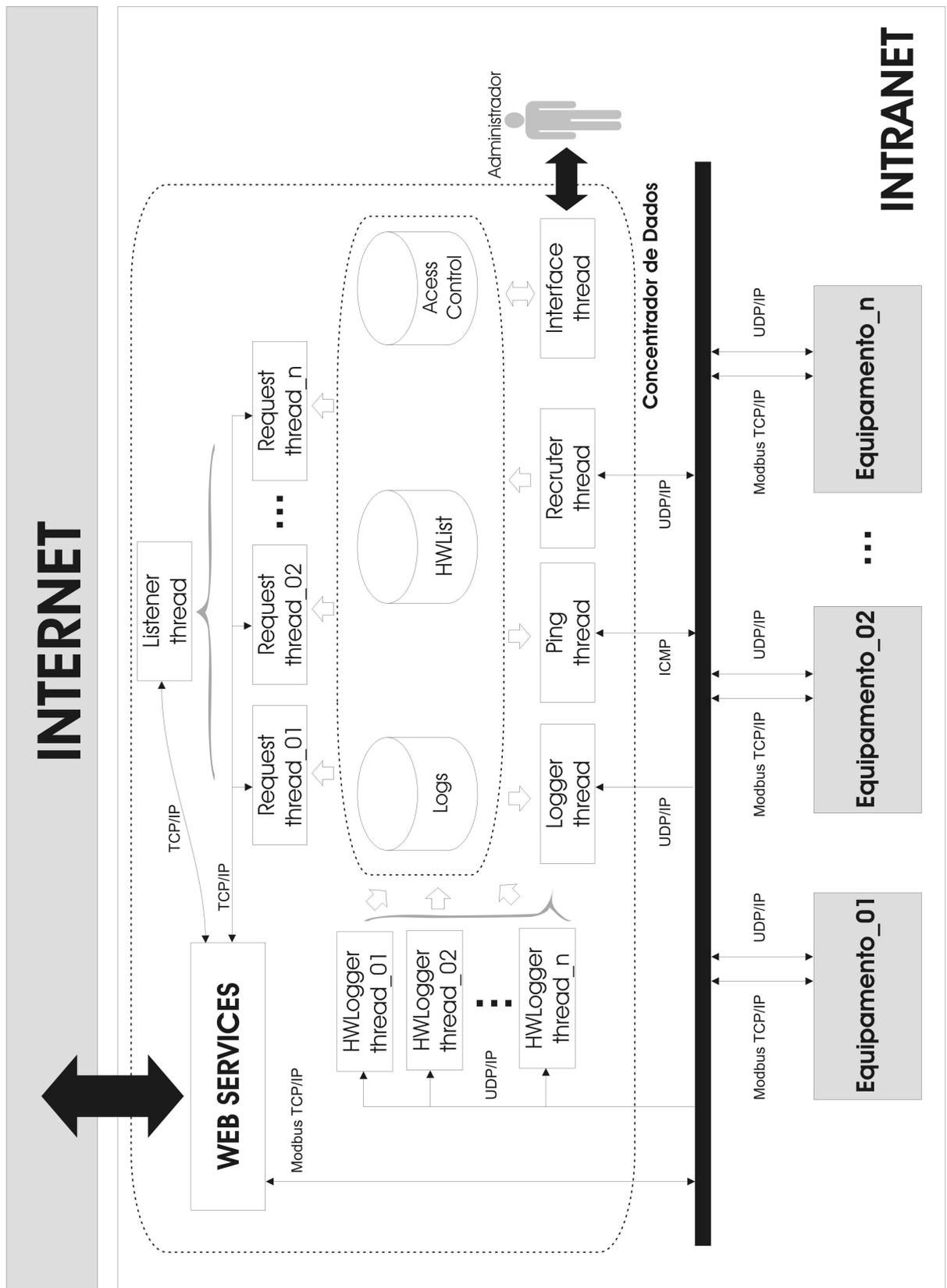


Figura 3.13: Arquitetura computacional do sistema do concentrador de dados

funcionar através de um navegador é, em teoria, compatível com todos os navegadores e independente do sistema operacional. O único pré-requisito é que o navegador possua instalado o *plugin* .NET Compact Framework v2.0, ou superior. Apesar de, teoricamente, o sistema ser independente da plataforma, somente foram realizados testes no ambiente Microsoft Windows, e com a utilização dos navegadores Mozilla Firefox v1.5, Mozilla Firefox v2.0 e Microsoft Internet Explorer v6.

Após a sua autenticação no sistema, o usuário tem acesso a lista de equipamentos detectados na rede de equipamentos. Somente serão detectados no sistema os equipamentos do tipo do descrito no presente trabalho, ou equipamentos desenvolvidos que utilizem pelo menos o mesmo sistema de comunicação embarcada aqui descrito, ou que implementem, de alguma forma, o protocolo de recrutamento descrito no Apêndice C. O usuário pode então escolher na lista de equipamentos detectados o equipamento que ele deseja configurar ou operar. Após a escolha do equipamento, o usuário tem acesso aos menus de configuração e operação específicos ao tipo do equipamento selecionado. As informações de identificação do equipamento selecionado aparecem no canto superior esquerdo da tela. Por enquanto, o único tipo de equipamento existente é o medidor de fração de água. Apesar disso, o sistema de interface com o usuário, assim como o restante do sistema digital, foi projetado para ser escalonável e também ser re-utilizável integralmente ou parcialmente em outros projetos e equipamentos. Abaixo são listadas as opções do menu de configuração que o usuário pode configurar:

- **Ethernet:** nesta opção o usuário pode configurar o identificador, a descrição e o tipo do equipamento. Essas informações são exibidas na lista de equipamentos detectados e são úteis para a identificação de um dado equipamento na rede. O usuário pode também configurar se o sistema funcionará com IP fixo ou obterá as suas configurações através do serviço de DHCP. Caso seja escolhida a opção de IP fixo, é necessário que o usuário configure também os parâmetros de IP, a máscara de rede e o *gateway* da rede.
- **Modo de Aquisição:** nesta opção o usuário pode configurar os canais de aquisição ativos dentre os 4 disponíveis. Também é necessária a configuração da frequência de aquisição e da taxa de *oversampling*, parâmetros esses comuns a todas as entradas.
- **Modo Controlador:** nesta opção o usuário pode habilitar ou desabilitar os controladores digitais do sistema e pode também configurar os parâmetros dos controladores. Na atual implementação, os parâmetros são as constantes da equação de diferenças do controlador desejado e a referência do controlador. A referência do controlador pode ser posteriormente alterada em tempo real.

- **Modo Filtro Digital:** permite que o usuário configure o funcionamento do filtro digital, habilitando ou desabilitando esta funcionalidade. Também é possível configurar os parâmetros do filtro. Na atual implementação, os parâmetros do filtro digital são as constantes da equação de diferença do filtro desejado.
- **Modo Medidor de Fração de Água:** nesta opção o usuário pode habilitar o medidor de fração de água e configurar seus parâmetros de funcionamento. Os parâmetros configurados aqui são específicos à técnica de medição utilizada e têm sofrido constantes modificações no decorrer do trabalho, por isso não descritos em mais detalhes no momento.
- **Saídas Analógicas:** permite ao usuário habilitar ou desabilitar individualmente as saídas analógicas do sistema. As saídas habilitadas precisam ter configuradas o seu sinal de origem. O sinal de referência de uma saída analógica pode ser a saída de um filtro ou controlador. Também pode ser configurada pelo usuário via rede. Existe ainda uma outra opção, que seria a geração de uma função de pré-definida.
- **Saídas Digitais:** nessa opção o usuário pode habilitar ou desabilitar individualmente as saídas digitais do sistema.
- **Logging:** permite que o usuário configure quais canais de dados do medidor ele deseja que sejam armazenados. Os possíveis canais de *logging* são as entradas analógicas, as saídas analógicas e os sinais do controlador. Além disso, o usuário pode definir a frequência de *logging* em função da taxa de aquisição. Também é possível escolher se o *logging* será realizado no concentrador de dados da rede ou através de algum outro dispositivo. Caso seja utilizado outro dispositivo, é necessário configurar o endereço IP e a porta para o envio do dados de *logging*
- **Alarmes:** nessa opção é possível configurar o sistema de alarmes do sistema. O mecanismo de alarmes não foi implementado. O comportamento do sistema no caso de alarmes e a maneira como essa informação chegará ao usuário ainda não foram definidas. Apesar disso, essa opção aparece no menu de configurações.

Quando habilitado o modo medidor de fração de água, as demais opções de configuração do sistema tornam-se indisponíveis, pois são determinadas pelo funcionamento do modo do medidor de fração de água. Somente quando o modo de fração de água está desabilitado o usuário pode configurar o sistema. A operação do sistema fora do modo medidor de fração de água foi de muita utilidade durante o desenvolvimento e teste dos sistemas que compõem o medidor.

Além do menu de configuração, o sistema de interface também possui o menu de operação. No menu de operação, o usuário pode ler os valores atuais das entradas

analógicas, entradas digitais, saídas analógicas e saídas digitais. O usuário também pode controlar as saídas analógicas e digitais, desde que estas estejam configuradas para aceitar o controle do usuário. Também é possível para o usuário iniciar um ensaio com o sistema de microondas. Os ensaios de microondas são realizados para a avaliação das técnicas de medição utilizando-se um dado conjunto de parâmetros como, por exemplo, frequência do sinal, limites do *sweep* de frequência, número de amostragem em cada frequência do *sweep*, entre outros. Todos os resultados experimentais que serão apresentados no presente trabalho foram obtidos através da realização dos referidos ensaios.

A interface com o usuário foi desenvolvida utilizando-se a linguagem de codificação HTML, para a codificação básica das páginas de hipertexto. Também foi utilizada a linguagem ASP.NET para a criação dos controles de usuário nas páginas. Os *scripts* de servidor executados pelos comandos ASP.NET foram escritos na linguagem CSharp. O sistema de interface com usuário foi todo desenvolvido no ambiente Microsoft Visual Studio v5. Na figura 3.14 é mostrada uma tela do sistema supervisorio, na qual aparece a lista de equipamentos detectados. Na figura 3.15 é mostrada uma tela do sistema supervisorio, na qual aparecem as configurações de *logging* do equipamento.

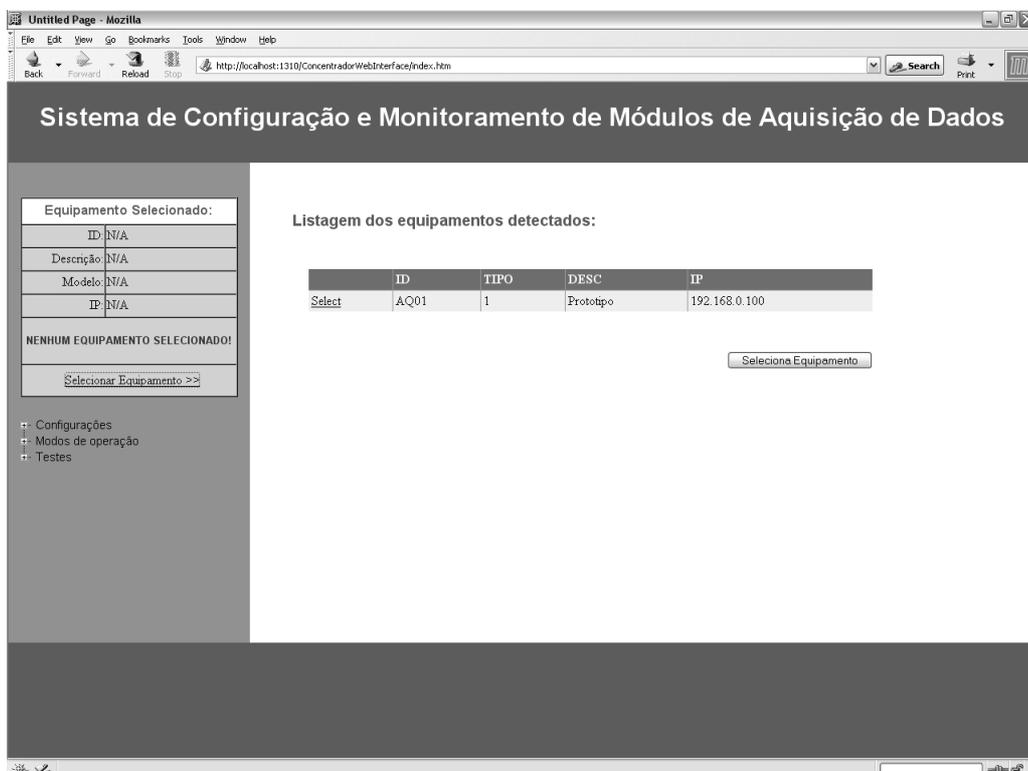


Figura 3.14: Tela da interface com usuário onde é apresentada a lista de equipamentos detectados na rede



Figura 3.15: Tela da interface com usuário onde é apresentado o menu de configuração de *logging* do sistema

3.6 Sistema de Alimentação DC

Para atender as demandas de potência e tensões de alimentação dos sistemas, principalmente do sistema de geração e processamento de microondas, foram desenvolvidas fontes de alimentação DC específicas. O sistema de geração e processamento de microondas demanda uma diversidade de tensões DC, com as mais variadas potências. Os componentes que compõem o sistema de geração e processamento de microondas necessitam, para funcionar, das tensões de $\pm 5V$, $\pm 12V$ e $\pm 15V$. Além disso, devido ao seu alto custo, o sistema de geração e processamento de microondas necessita de um sistema de alimentação confiável, que seja capaz de proteger os sistemas a ele ligados contra surtos, sobretensões e demais anormalidades da rede elétrica. O sistema de alimentação também precisa ser imune a interferências eletromagnéticas, uma vez que este estará muito próximo de fontes eletromagnéticas relativamente potentes, capazes de interferir no funcionamento de dispositivos elétricos e eletrônicos.

Outro requisito das fontes de alimentação DC, empregadas em sistemas de instrumentação e medição, é que essas apresentem baixo *ripple* e baixo conteúdo harmônico na tensão de saída. A qualidade das medições do sistema de geração e processamento está diretamente relacionada à qualidade das fontes de alimentação utilizadas. Por esse motivo, fontes chaveadas, muito comuns no mercado hoje em dia, não são as mais indicadas para sistemas de instrumentação e medição, uma vez que devido ao seu princípio de funcionamento, essas não costumam apresentar as características de desejadas. Por esse motivo optou-se pelo desenvolvimento de fontes de alimentação lineares. As fontes desenvolvidas possuem as seguintes características:

- interruptor iluminado - permite que o usuário identifique mais facilmente se o sistema está ligado ou não;
- conectores para cabos de força do tipo o IEC - padrão utilizado nas fontes de computadores;
- proteção contra surtos na entrada através de fusível;
- chave interna seletora de tensão (110/220);
- transformadores isoladores toroidais de alto rendimento, blindados e selados;
- utilização de diodos schottky na ponte de retificação;
- diversos estágios de filtragem e estabilização;
- proteção elétrica contra sobretensões na saída;

- proteção contra sobrecorrente e curtos na saída através da utilização de fusíveis de queima rápida (*quick blow*).

Os transformadores toroidais utilizados são da série 70000 da AMVECO Magnetics Inc, possuem perfil baixo e são específicos para serem montados em PCI. O modelo do transformador utilizado depende da tensão e da potência de saída. A PCI da fonte foi desenhada de maneira a ser compatível com qualquer transformador AMVECO da série 70000. O desenho da PCI também levou em consideração aspectos de compatibilidade eletromagnética, de maneira a minimizar a influência e a emissão de interferências eletromagnéticas na fonte.

As fontes foram projetadas com 2 saídas completamente independentes de tensão, podendo inclusive serem ajustadas com tensões de saída distintas. A tensão de saída é determinada por um regulador de tensão variável, modelo LM317. O LM317 permite que a tensão de saída seja configurada entre 1,25V e 37V, havendo pequenas variações dessa faixa de acordo com o fabricante do componente. A configuração da tensão de saída no sistema de alimentação DC é feita através do ajuste de um conjunto de potenciômetro e resistor. Dependendo dos valores escolhidos para o conjunto, a fonte pode apresentar uma faixa de variação de tensão maior ou menor, sempre respeitando o limite superior imposto pela tensão de nominal de saída do transformador. O ajuste fino da tensão de saída é sempre feito através do potenciômetro.

Para a utilização de saídas simétricas é necessário primeiramente igualar as tensões das 2 saídas da fontes e então curto-circuitar o terminal negativo da saída 1 com o terminal positivo da saída 2. Para cada um dos circuitos de estabilização da fonte, foi utilizado um CMC (*Common Mode Choke*), que permite a eliminação ou redução do ruído de modo comum, presente nestes. A proteção de sobretensão de cada uma das saídas é realizada através de um circuito de *clipping*. O disparo do circuito de *clipping* é realizado por um diodo zenner, com tensão de polarização adequada às tensões de saída desejadas. Quando o circuito de *clipping* é acionado, a tensão de saída é instantaneamente aterrada e o fusível de proteção da saída queima. A utilização do circuito de proteção contra sobretensões de na saída é opcional.

Foram montadas 4 fontes de alimentação, sendo três para o sistema de geração e processamento de microondas e uma para a unidade de processamento. Todas as fontes montadas foram configuradas para funcionar como fontes simétricas. As três fontes montadas para o sistema de geração e processamento de microondas são de $\pm 5V$, $\pm 12V$ e $\pm 15V$. A fonte da unidade de processamento é de $\pm 15V$, para permitir que as saídas analógicas da unidade possam ser configuradas, com uma certa margem de folga, para a faixa de $\pm 12V$. Foram projetadas e construídas caixas de metal para as fontes. A tampa da caixa de metal é de chapa perfurada para facilitar a ventilação da

fonte, principalmente dos reguladores de tensão, que necessitam dissipar muito calor. Na saídas de tensão CC foram utilizados conectores fêmea tipo "banana" de 4mm. Na figura 3.16 é mostrado, a título de ilustração, o desenho da PCI da fonte. Nas figuras 3.17 e 3.18 são mostradas fotos dos fontes prontas. O diagrama esquemático da fonte é mostrado no Apêndice B.

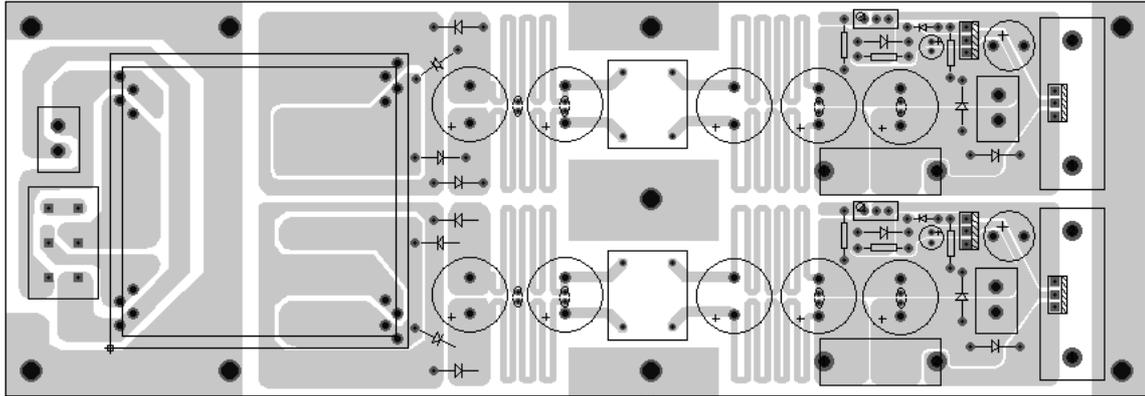


Figura 3.16: Desenho da PCI da fonte de alimentação

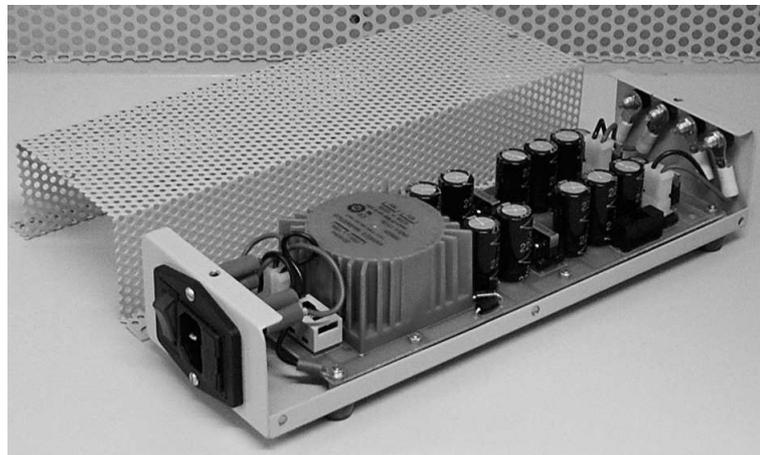


Figura 3.17: Foto da fonte de alimentação com a tampa aberta

3.7 Sistema de Suporte aos Ensaios

Para a avaliação dos sensores de microondas e das técnicas de medição, foi necessária a construção de uma bancada de testes que, na ausência de uma infra-estrutura de escoamento multifásico, permite que alguns aspectos de um escoamento multifásico sejam reproduzidos em laboratório. Os componentes principais da bancada de ensaio

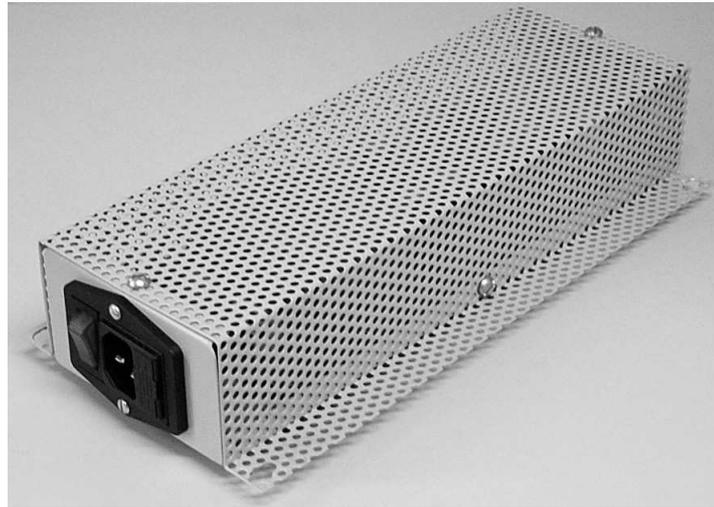


Figura 3.18: Foto da fonte de alimentação com a tampa fechada

são os tanques de acrílico. Foram utilizados dois tanques de acrílico, projetados e construídos especificamente para o projeto, com seções transversais de tamanho similar a um tubo normalmente utilizado em instalações de produção de petróleo e gás. Foi utilizado um tanque com seção transversal quadrada e outro com seção circular. Ambos os tanques possuem aproximadamente 6 polegadas de diâmetro ou largura. O ensaio é realizado num tanque por vez. Foram utilizados dois tanques com o objetivo de comparar a influência da geometria dos tanques no funcionamento do medidor. Os tanques possuem uma válvula de admissão e outra de saída. Para a realização dos ensaios, os tanques são encheidos com uma fração de água e óleo conhecida. Após a realização do ensaio a quantidade de água ou óleo pode ser modificada com o auxílio das válvulas.

Os tanques foram projetados para serem utilizados na horizontal. Nessa configuração, a separação natural que ocorre entre a água e o óleo não afeta o comportamento do sistema. Isto ocorre porque os volumes de água e óleo que ficam entre as duas antenas utilizadas são sempre constantes, independentemente do estágio de separação da mistura. A configuração horizontal também facilita a remoção controlada de alguns dos componentes através da válvula de saída, uma vez que após um curto período de tempo a mistura se separa por completo, com óleo na parte superior e água na parte inferior. A opção pela utilização do acrílico para a construção dos tanques deve-se ao fato de que este não interage com as microondas. Além disso, o acrílico, por ser um material translúcido, permite que a mistura no interior do tanque seja visualmente inspecionada. Os tanques são sustentados por suportes de madeira para evitar interações indesejadas com as microondas.

A bancada de ensaios foi construída em metal e pintada eletrostaticamente com tinta epóxi, sendo montada sobre rodas para permitir a sua fácil movimentação. Os tanques e as antenas, que são a parte do sistema que ficam expostas às microondas, foram confinadas numa caixa de metal devidamente aterrada. O objetivo da caixa é impedir que as microondas se propaguem livremente pelo espaço e interfiram no funcionamento dos equipamentos eletrônicos utilizados no medidor e também não ofereçam nenhum risco à saúde das pessoas próximas durante a realização dos ensaios. As antenas são fixadas em posicionadores que permitem que estas possam ser afastadas ou aproximadas do tanque. Os posicionadores, por sua vez, são fixados na tampa superior e na base da caixa de metal. A tampa da caixa foi construída com chapas perfuradas. As chapas perfuradas permitem que seja possível visualizar o interior da caixa sem, no entanto, comprometer o isolamento eletromagnético da caixa, uma vez que o diâmetro dos furos da tampa é bem inferior ao comprimento de onda das microondas utilizadas no sistema. Na figura 3.19 é mostrada uma foto da bancada de ensaios durante a realização de um ensaio. Na figura 3.20 é mostrada em detalhe a estrutura de ensaio no interior da caixa de metal.



Figura 3.19: Foto da bancada de ensaios durante um ensaio

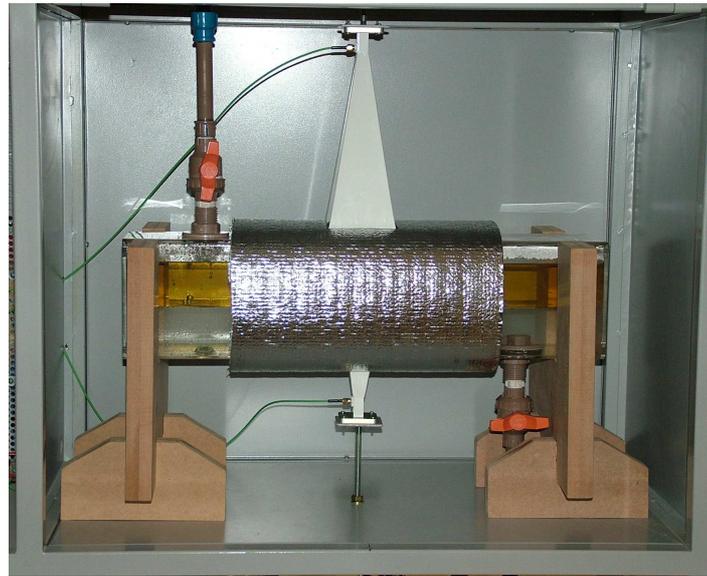


Figura 3.20: Foto da bancada de ensaios durante um ensaio (detalhe do interior da caixa de Faraday)

3.8 Sistema de Medições Auxiliares

Conforme mostrado no capítulo 2, as características dielétricas da água variam significativamente com algumas propriedades físicas da água. As duas principais fontes de erros de medição para a aplicação dos sensores de microondas na indústria de petróleo e gás são a temperatura da mistura e a salinidade da água. Para o correto funcionamento de um sensor de microondas é necessário que as medições realizadas sejam corrigidas com os valores da medição da temperatura e da salinidade mistura bifásica.

Apesar da importância da realização das medições auxiliares para a confiabilidade do sistema, o sistema de medições auxiliares não chegou a ser implementado no presente trabalho. Em aplicações industriais o efeito dessas fontes de variação e incerteza é relevante e não pode ser desprezado, tendo em vista as condições extremas que esses sistemas podem ser submetidos. No entanto, para o estudo em condições simuladas e controladas de laboratório, a influência de tais parâmetros não compromete a validade das medições.

3.9 Conclusões

No presente capítulo foi apresentado e descrito o sistema experimental desenvolvido. Cada um dos sub-sistemas que compõem a bancada de testes foram descritos,

com exceção do sistema de medição auxiliares que não chegou a ser implementado durante o presente trabalho. Todos os sistemas foram desenvolvidos tendo em vista a possibilidade de aplicação futura num medidor industrial. Os sistemas de instrumentação e de controle desenvolvidos permitem a construção de vários tipos de sensores de microondas como, por exemplo, sensores de transmissão, sensores de ressonância e sensores de reflexão. A tecnologia aplicada nesses tipos de sensores é muito parecida e com pequenas alterações na estrutura da bancada esses tipos de testes podem ser realizados.

Com o desenvolvimento da bancada de ensaios uma etapa importante do projeto foi concluído. A partir da bancada é possível a realização de diversos experimentos que permitem que diversos aspectos positivos e negativos dos sensores de microondas possam ser avaliados. No próximo capítulo serão descritos os tipos de testes que foram realizados no sistema e as condições nas quais se derem esses testes. Também serão apresentados os resultados obtidos com a realização dos testes.

Capítulo 4

Resultados Experimentais

No presente capítulo serão descritos os testes e ensaios realizados com a unidade experimental. O objetivo principal dos testes é avaliar a viabilidade da utilização de sensores de transmissão para a medição da fração de água em aplicações da indústria de petróleo e gás. Serão apresentados os dados obtidos nos diversos testes e ensaios realizados.

4.1 Descrição de um Ensaio

A bancada de ensaios foi inicialmente projetada para permitir a avaliação de sensores de transmissão somente. Apesar disso, o sistema de microondas, permite assim como, o sistema digital, que outros tipos de sensores sejam construídos e avaliados. No presente trabalho foram avaliados somente os sensores de transmissão. No entanto, foram identificados diversos fenômenos de ressonância no interior da caixa de ensaios da bancada de testes.

Para a realização dos testes foram utilizados água e óleo de cozinha. As quantidades desses dois componentes foram variadas ao longo de toda a faixa de mistura. Para uma dada composição da mistura, diversos ensaios foram realizados e os dados foram coletados. Além da composição da mistura, o outro parâmetro do sistema que pode ser alterado é a frequência do VCO.

Um teste consiste em (para uma dada composição da mistura bifásica no interior do tanque) medir a intensidade e o atraso de fase do sinal transmitido através da mistura para um conjunto de frequências. Os testes podem ser realizados, por exemplo, para toda a faixa de frequências do VCO, de 8GHz a 12GHz. Um teste também pode ser realizado numa frequência somente, ou em qualquer número de frequências desejado. A resolução do sistema de geração de microondas é de, aproximadamente, 1MHz.

A realização dos ensaios experimentais foi automatizada na placa de controle e aquisição. O usuário só necessita configurar alguns parâmetros adicionais para que o sistema realize, de maneira automática, o teste solicitado, disponibilizando em seguida os dados de *logging* armazenados durante a realização do teste. Os parâmetros que o usuário necessita configurar no sistema de controle são:

- **Taxa de aquisição do sistema (f_s):** a taxa de aquisição do sistema, além de definir a taxa de amostragem do sistema, funciona como referência de tempo para alguns parâmetros do ensaio, sendo esses parâmetros medidos em número de amostras.
- **Frequência inicial (f_0):** a frequência na qual o sistema de microondas inicia o ensaio e a aquisição dos dados.
- **Frequência final (f_1):** frequência na qual o sistema encerra o ensaio.
- **Incremento da Frequência (Δf):** permite ao usuário configurar o valor do intervalo de acordo com o qual se dará a variação da frequência do VCO.
- **Número de Aquisições (N_{AQ}):** define o número de aquisições que serão realizadas numa determinada frequência ou patamar. O interruptor do sistema de geração e processamento de microondas só permite a transmissão do sinal de microondas durante o número de aquisições definidas por esse parâmetro.
- **Intervalo Entre Dois Períodos de Aquisição (T_{OFF}):** este parâmetro define por quanto tempo o sistema ficará desligado antes de iniciar um novo ciclo de aquisição. Este parâmetro pode ser configurado como 0.

O ensaio inicia com o sistema de geração de microondas desligado e f_0 configurada. Após T_{OFF} aquisições, o interruptor do sistema é ligado, permitindo a transmissão do sinal de microondas através do meio. São então realizadas N_{AQ} aquisições, após as quais o interruptor é novamente desligado. Após a conclusão das N_{AQ} a frequência de oscilação é incrementada em Δf . Caso f_1 não tenha sido atingida, o sistema aguarda T_{OFF} aquisições e então liga novamente o interruptor e repete todo o ciclo. Quando f_1 é atingido, o sistema encerra o ensaio, desliga o interruptor e disponibiliza os dados para o usuário. Na figura 4.1 são ilustrados os parâmetros de ensaio.

4.2 Ensaios Realizados

O ganho do sistema de geração e processamento de microondas não é o mesmo para toda a faixa de frequências. O ganho em frequência do sistema como um todo é

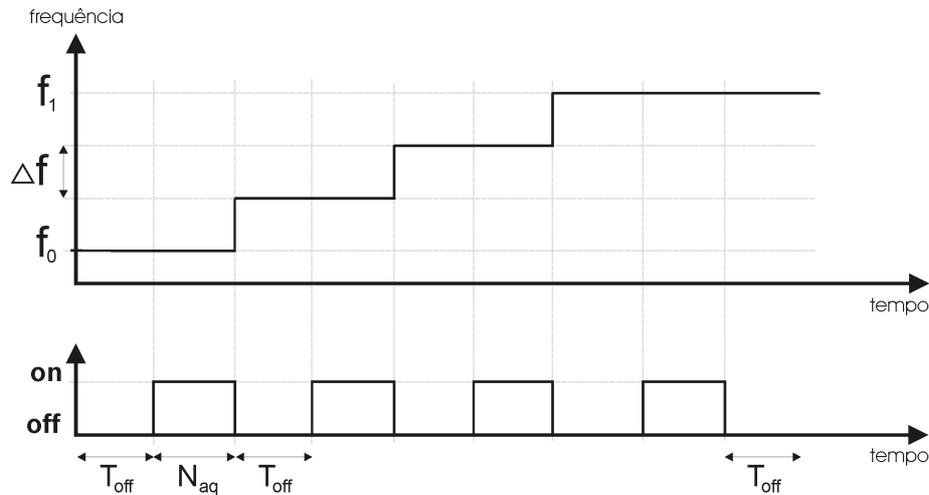


Figura 4.1: Parâmetros de configuração de um ensaio bancado de testes

resultado da composição dos ganhos em frequência de cada um dos componentes que o compõem. Além disso, a posição relativa das antenas, bem como o meio entre elas, influenciam a resposta em frequência do conjunto. As curvas de ganho da água já foram apresentadas no capítulo 2.

Com o objetivo de determinar a influência da fração de água na resposta do sistema, foram realizados ensaios variando-se o volume de água dentro dos tanques. Depois que o tanque foi completado com água, iniciou-se a redução gradativa da quantidade de água e a adição da mesma quantidade de óleo. A água foi adicionada no tanque em múltiplos de 1L. Depois de enchido o tanque, a água foi removida em múltiplos de 0,5L. A mesma quantidade era adicionada de óleo. Para cada composição do tanque foram sempre realizados 2 ensaios, que são abaixo descritos:

- **Ensaio A:** este ensaio consiste na medição da fase e atenuação em duas frequências. Foram escolhidas as duas frequências de máxima intensidade do sinal. As duas frequências precisam ter um mínimo valor de separação entre elas, sendo necessário que ambas caracterizem máximos regionais da curva de intensidade do sinal. O sistema foi configurado para realizar 20 aquisições em cada frequência, numa taxa de aquisição de 1000 amostras por segundo.
- **Ensaio B:** este ensaio consiste na realização de uma varredura, ou *sweep*, de frequências em torno da região que apresenta o pico máximo de intensidade do sinal. A faixa de variação das frequências é de 100MHz, e o incremento da frequência é mínimo, ou seja, aproximadamente 1MHz. São realizadas 3 amostragem em cada frequência. O sistema é desligado por dois períodos de amostragem antes de coletar os dados referentes à próxima frequência.

No entanto, para a realização sistemática dos ensaios acima descritos, é necessário primeiro que se determine as frequências de máxima intensidade do sinal. Para tal, é necessária a realização de alguns ensaios utilizando toda a faixa de frequências e a máxima resolução, ou menor incremento possível. As frequências de máxima intensidade do sinal no sistema, determinadas para uma dada configuração de ensaios e uma dada quantidade de água, são utilizadas em todas as medições posteriores realizadas, variando-se somente a fração de água e óleo no interior do tanque. A fração água (F_h) e a fração de óleo (F_o) no interior do tanque são expressas em função do volume de óleo (V_o) e do volume de água (V_h) contidos no tanque, conforme as equações

$$F_h = \frac{V_h}{V_h + V_o}, \quad (4.1)$$

$$F_o = \frac{V_o}{V_h + V_o}. \quad (4.2)$$

A realização das medições em duas frequências, no ensaio tipo A, tem como objetivo a avaliação do atraso de fase em duas frequências distintas, de maneira a eliminar, em teoria, a ambiguidade inerente à medição do atraso de fase. Os dados obtidos com a realização dos ensaios tipo *sweep* nos permitem determinar a resposta em frequência do sistema.

Para cada configuração de água e óleo no tanque, o ensaio A foi repetido diversas vezes (de 4 a 8 vezes). Os dados coletados em todas as medições, em todas as repetições, foram então estatisticamente processados e a média e o desvio padrão foram calculados. Para alguns ensaios foi utilizada uma manta de metálica envolvendo o tanque. O objetivo da manta era o de reproduzir a situação encontrada numa tubulação real, onde espera-se a ocorrência de diversas reflexões no interior do tubo. Na figura 4.2 é mostrada uma foto do tanque de seção retangular, envolvido pela manta metálica.

4.3 Curvas Obtidas

4.3.1 Configuração 1

Os ensaios que produziram os gráficos abaixo mostrados foram realizados utilizando-se o tubo de seção transversal retangular. A manta metálica também foi utilizada na realização dos ensaios. Primeiramente foi realizado um ensaio para determinar os dois máximos de intensidade do sistema. As frequências obtidas, para as quais a intensidade do sinal é máxima e, portanto, a atenuação é mínima, foram 9657 MHz e 9881 MHz,

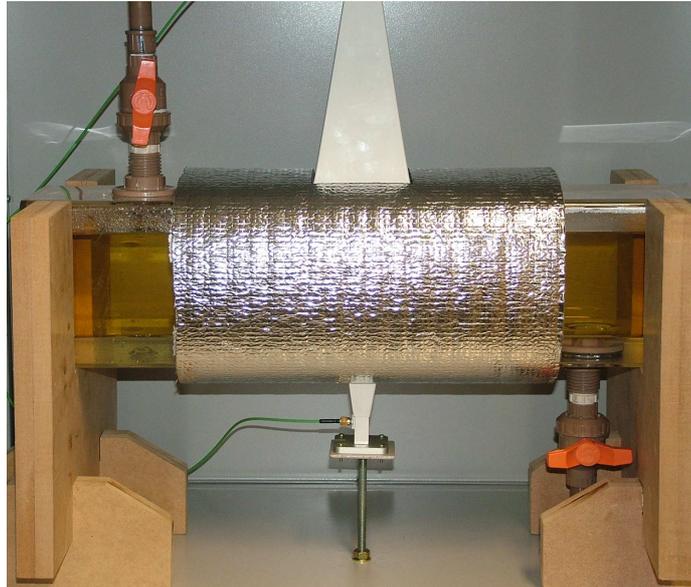


Figura 4.2: Tanque de ensaio com a manta metálica

sendo a segunda a frequência de máximo ganho do sistema. O ensaio tipo A foi realizado nessas duas frequências e o ensaio tipo B realizado na faixa de 9802 MHz à 9918 MHz. Nas figuras abaixo também é mostrada a faixa de incerteza das medições obtida através da tratamento estatístico dos dados coletados. Na figura 4.3 é mostrado o gráfico da intensidade em função da fração de óleo para a frequência de 9657 MHz. Na figura 4.4 é mostrado o gráfico do atraso de fase em função da fração de óleo para a frequência de 9657 MHz. Na figura 4.5 é mostrado o gráfico da intensidade em função da fração de óleo para a frequência de 9881 MHz. Na figura 4.6 é mostrado o gráfico do atraso de fase em função da fração de óleo no tanque, para a frequência de 9881 MHz.

A conversão dos valores de atraso de fase, obtidos pelo sistema digital, em unidades de engenharia não foi realizada pois restam dúvidas sobre como fazer a conversão. O sistema foi projetado para realizar a medição das fases com níveis de altos sinais de LO e RF no misturador. No entanto, não foram obtidos os níveis de sinais desejados no misturador. Quando utilizados sinais de nível alto, capazes de saturar as entradas do misturador, a medição de fase independe das intensidades dos sinais. Em [9] é apresentada uma equação que permite obter o atraso de fase, utilizando-se um misturador, para quando os níveis dos sinais não são suficientes para saturar as entradas do misturador. Conforme pode ser visto nos gráficos acima, não é possível determinar uma correlação direta entre os parâmetros medidos e a fração de água. Não é possível sequer determinar uma tendência nas curvas de intensidade e atraso de fase. O comportamento esperado para a intensidade do sinal é um aumento da intensidade com o aumento da fração de óleo (ou equivalentemente, a redução da fração de água). Observou-se

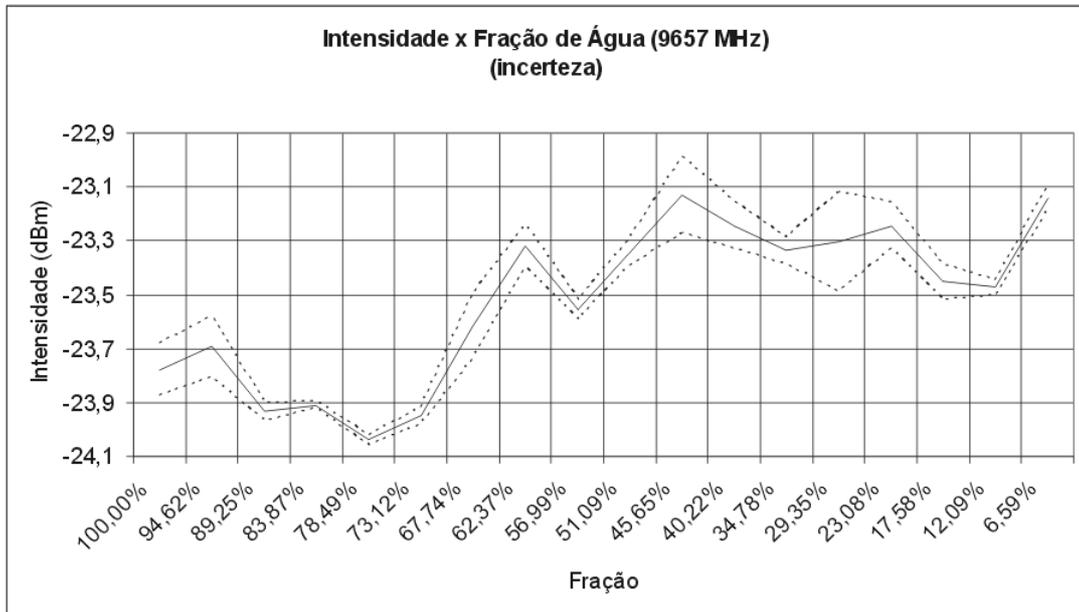


Figura 4.3: Gráfico da intensidade em função da fração de óleo, utilizando-se o tanque de seção retangular e com a utilização da manta de alumínio

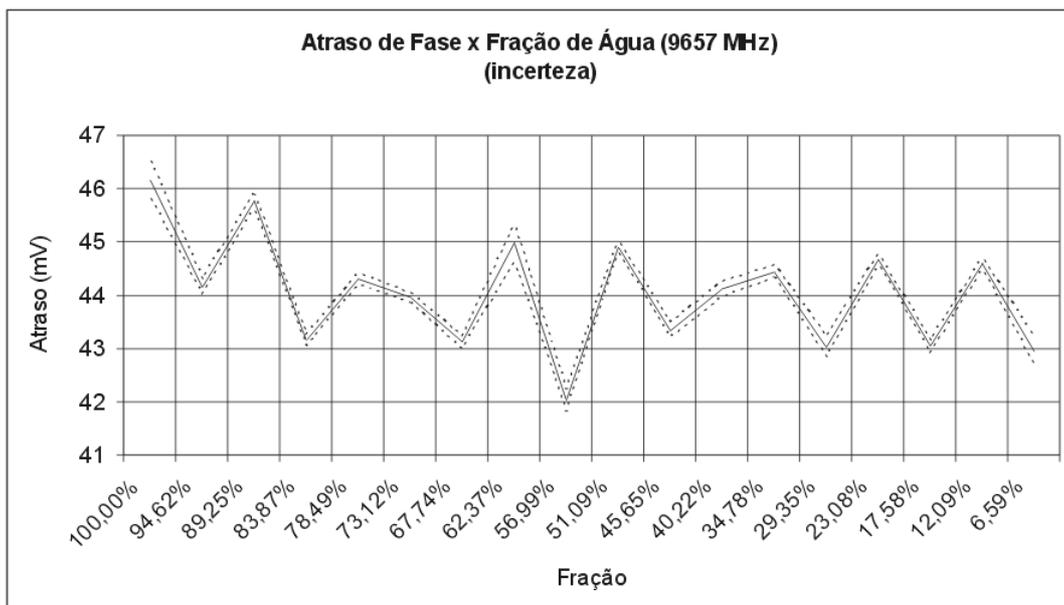


Figura 4.4: Gráfico do atraso de fase em função da fração de óleo, utilizando-se o tanque de seção retangular e com a utilização da manta de alumínio

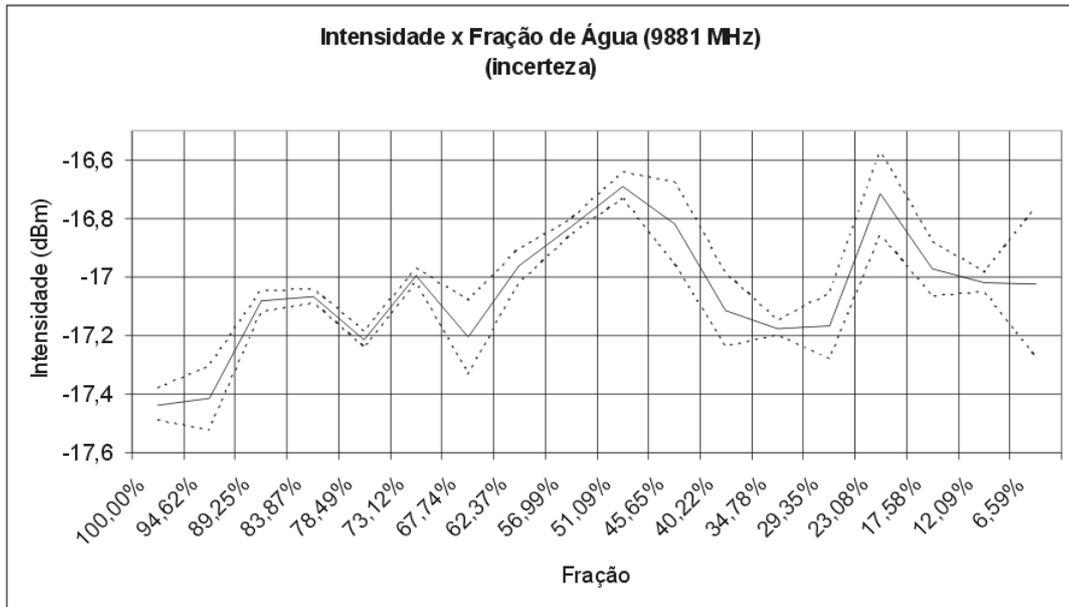


Figura 4.5: Gráfico do intensidade em função da fração de óleo, utilizando-se o tanque de seção retangular e com a utilização da manta de alumínio

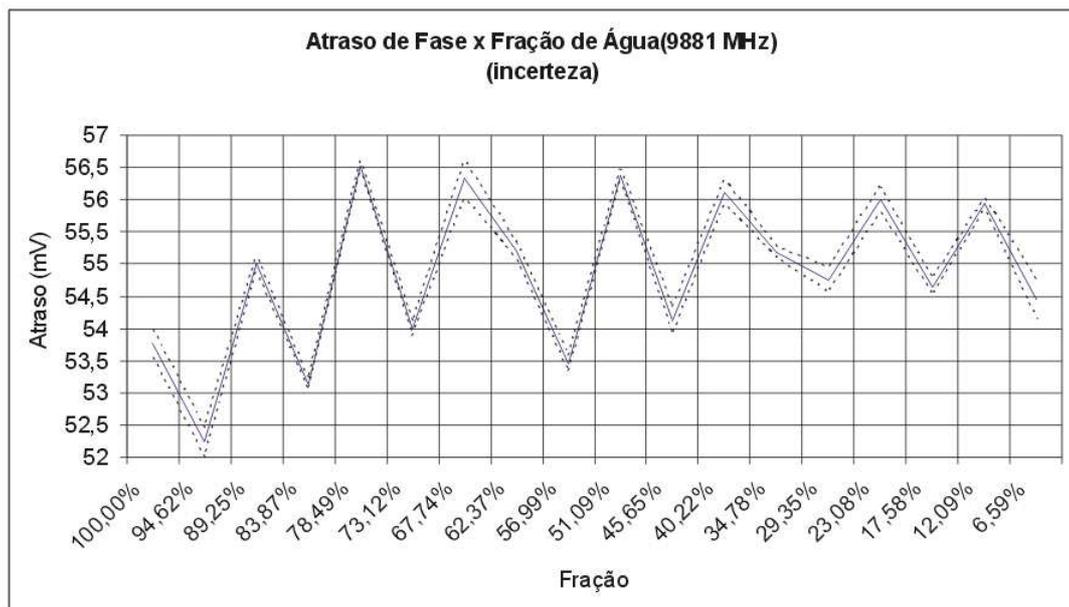


Figura 4.6: Gráfico do atraso de fase em função da fração de óleo, utilizando-se o tanque de seção retangular e com a utilização da manta de alumínio

que o valor medido da intensidade oscila, apresentando uma leve tendência de crescimento para ambas as frequências escolhidas para os testes. Para o atraso de fase, o comportamento esperado é o inverso da intensidade, ou seja, espera-se uma redução do atraso de fase com o aumento da fração de óleo. As medições obtidas, além de oscilarem, apresentam tendências distintas para as duas frequências escolhidas. Apesar disso, o desvio padrão calculado para as diversas medições realizadas mostrou-se pequeno, especialmente para a medição da fase. O desempenho metrológico do sistema foi considerado satisfatório, indicando que o comportamento observado do sistema esteja provavelmente relacionado às interações secundárias entre as microondas e o meio, além das interações esperadas e desejadas.

4.3.2 Configuração 2

Os ensaios que produziram os gráficos abaixo mostrados foram realizados utilizando-se o tubo de seção transversal retangular. Nestes ensaios a manta metálica não foi utilizada. Na figura 4.7 é mostrada uma foto da configuração utilizada nesse ensaio.



Figura 4.7: Tanque de ensaio sem a manta metálica

A metodologia de realização dos ensaios nessa configuração foi um pouco diferente da metodologia utilizada na realização dos ensaios com a configuração 1. Além dos ensaios A e B anteriormente descritos, o ensaio de varredura utilizando toda a faixa de frequências foi repetido para todas as frações de água. O ensaio de varredura de faixa inteira foi realizado utilizando-se a máxima resolução de frequência do sistema. Na figura 4.8 é mostrado o resultado do ensaio de varredura de ampla faixa para todas as frações de água. As frequências escolhidas para a realização dos ensaios tipo A foram

9907 MHz e 9991 MHz, sendo a primeira a frequência de máximo ganho do sistema. Os resultados obtidos com a realização dos ensaios tipo A, para as duas frequências descritas são mostrados na figura 4.9. Os ensaios tipo B foram realizados na faixa de 9860 MHz à 10000 MHz. Os resultados obtidos com a realização dos ensaios tipo B é mostrada na figura 4.10

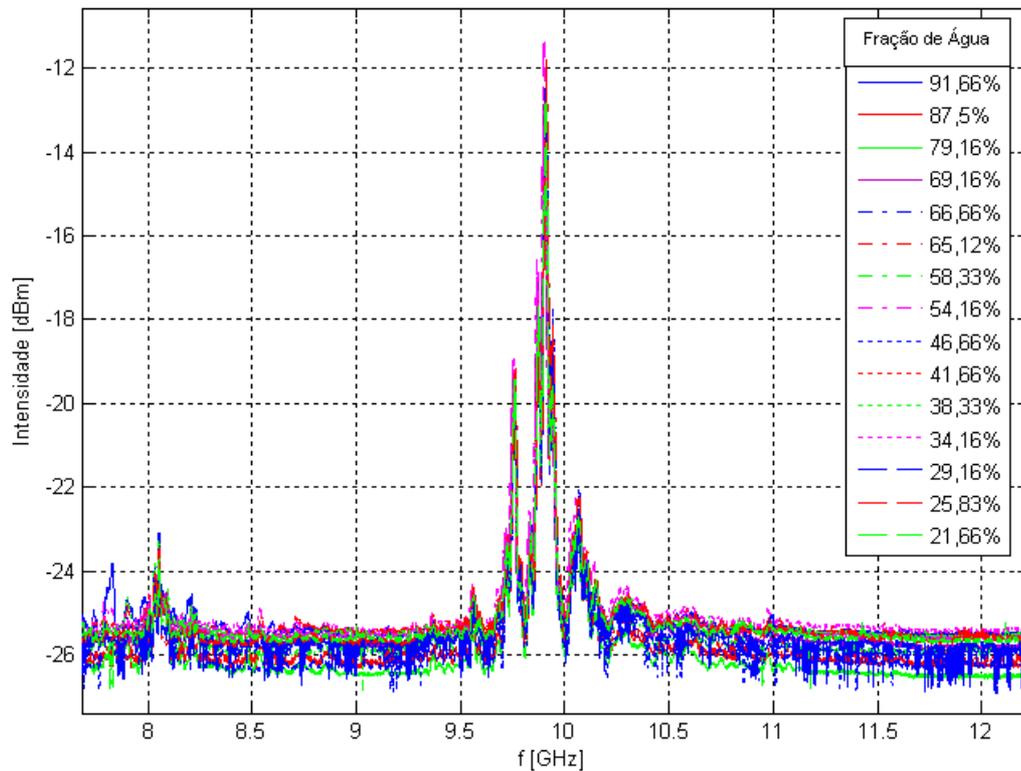


Figura 4.8: Gráfico da intensidade em função da frequência (faixa inteira), utilizando-se o tanque de seção retangular para diversas frações de água

O comportamento do atraso de fase para os ensaios realizados utilizando-se a configuração 2 não serão mostrados pois, conforme comentado anteriormente, a metodologia dos ensaios realizados com a configuração 2 foi um pouco diferente da adotada na configuração 1. Buscou-se, com os ensaios realizados com a configuração 2, compreender melhor os fenômenos de reflexão e ressonância no interior do sistema. Foram observados diversos tipos de correlações entre a intensidade do sinal e a fração de água. Analisando com atenção e em detalhes os resultados obtidos com o ensaio de varredura de faixa inteira, observou-se frequências para as quais a correlação entre a intensidade do sinal e a quantidade de água é diretamente proporcional. Em outras frequências a correlação observado foi inversamente proporcional e, ainda, em outras frequência não se observou nenhuma correlação direta entra a intensidade do sinal e a fração de água.

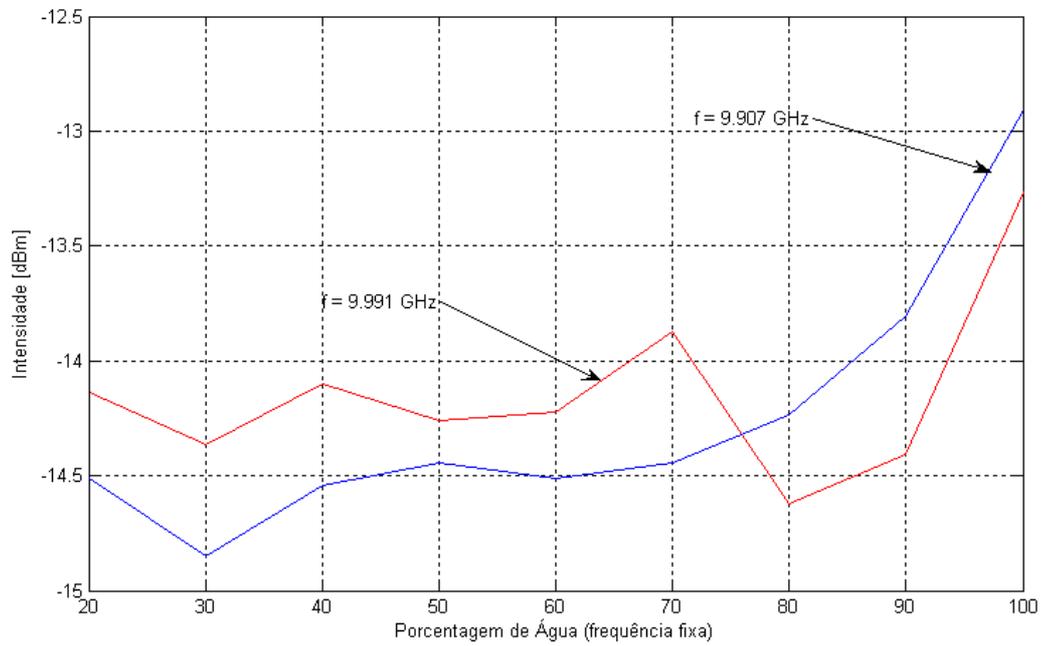


Figura 4.9: Gráfico da intensidade em função da fração de água (tipo A), utilizando-se o tanque de seção retangular 2 frequências escolhidas

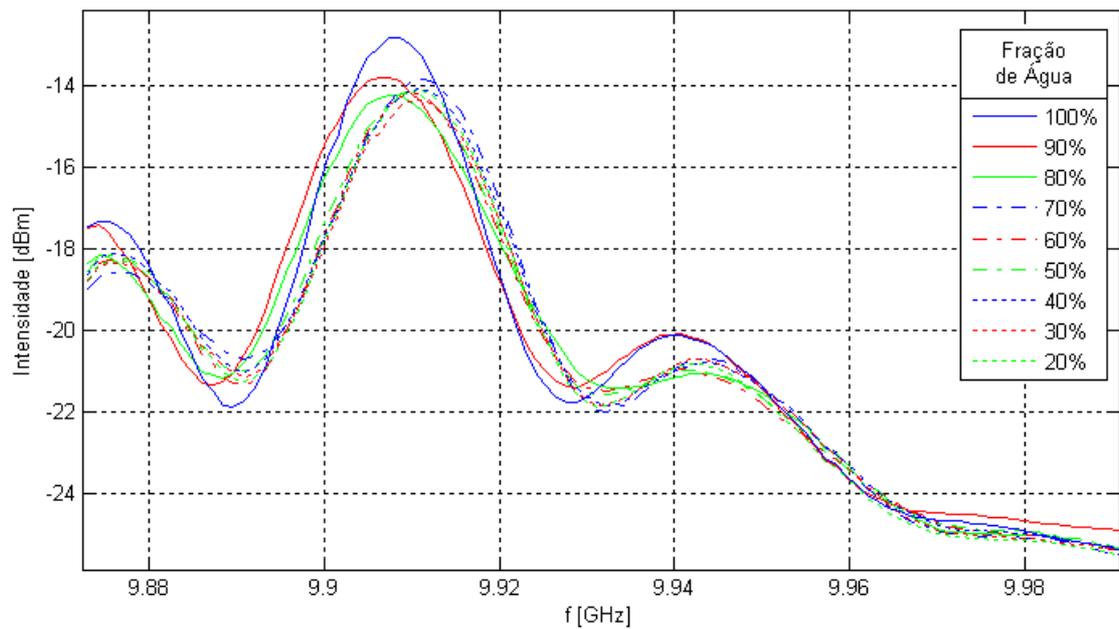


Figura 4.10: Gráfico do intensidade em função da frequência (tipo B), utilizando-se o tanque de seção retangular para diversas frações de água

Além disso, como pode ser observado nos gráficos da intensidade em função da fração de água, tanto para a configuração 1 quanto para a configuração 2, para uma dada faixa de frações é possível obter uma relação direta e não-ambígua entre a intensidade do sinal e a fração de água. No gráfico 4.10 é possível observar, para a faixa de 60% a 100% de água uma relação clara entre a intensidade do sinal e a fração de água, apesar de a relação obtida ser o inverso da esperada. É importante ressaltar que a maior parte dos medidores existentes no mercado são especificados para funcionar dentro de uma determinada faixa de frações de água.

Capítulo 5

Conclusões

O presente trabalho se caracteriza como pioneiro na área dentro do DAS. Além dos objetivos expostos no capítulo 1, podemos ressaltar como objetivo secundário a criação de uma infra-estrutura mínima que permitisse a realização do presente trabalho e servisse como base para desenvolvimentos e trabalhos futuros na área. Tendo em vista a ausência de uma infra-estrutura de testes laboratoriais, todo o sistema foi projetado e construído tendo como objetivo final o desenvolvimento de um medidor industrial.

No presente trabalho foi desenvolvida uma bancada de ensaios para a avaliação da viabilidade da aplicação da tecnologia de microondas e dos sensores de transmissão para a medição da fração de água numa mistura estática de água e óleo. Foram realizados diversos experimentos com o sistema, variando-se alguns parâmetros do processo, mas utilizando-se a mesma configuração do sistema de instrumentação.

Os dados coletados nos ensaios foram analisados e verificou-se, para uma dada configuração do sistema, uma correlação entre a fração de água da mistura e os parâmetros medidos pelo sistema de instrumentação. Com base na correlação obtida um protótipo de medidor de fração de água foi desenvolvido. No entanto, verificou-se, conforme apontado na literatura por [9] e [20], as limitações dos sensores de transmissão para a aplicação em questão.

Os resultados obtidos nos ensaios em que foi utilizada a manta metálica não indicaram nenhuma correlação entre a fração de água e os parâmetros medidos. A hipótese mais provável para a causa dos efeitos indesejados é a existência de múltiplas reflexões no interior do tanque devido à utilização da manta metálica. As reflexões interagem criando padrões de ondas estacionárias que interferem de maneira significativa nas medições de intensidade e atraso de fase do sinal de microondas. Tal fenômeno é descrito na literatura e apontado como principal limitação no uso de sensores de transmissão para medição da fração de água em tubos. As curvas de intensidade e de atraso

de fase em função da fração de óleo, mostradas em 4.3.1, apresentaram resultados significativamente distintos para duas frequências diferentes, reforçando assim a hipótese das múltiplas reflexões, uma vez que, para diferentes comprimentos de onda, os padrões de interações são diferentes.

Apesar do conhecimento prévio de tais efeitos e limitações dos sensores de transmissão, a escolha de tal tipo de sensor deve-se ao fato de ser este o tipo de sensor de microondas mais simples. O desenvolvimento de outros tipos de sensores depende do desenvolvimento intermediário dos sensores de transmissão. A comprovação experimental de fenômenos descritos na literatura pode ser considerada como válido conhecimento adquirido no processo de desenvolvimento e domínio das tecnologias envolvidas. A compreensão dos fenômenos de reflexão e formação de ondas estacionárias que ocorrem nos sensores de transmissão é a base teórica para o desenvolvimento dos sensores de ressonância, apontados como os sensores mais adequados para serem utilizados na aplicação em questão.

Aparentemente, as múltiplas reflexões e ondas estacionárias também interferiram nos ensaios realizados sem a manta metálica, produzindo comportamentos indesejados no sistema de medição, ainda que em menor intensidade do que nos ensaios em que foi utilizada a manta metálica. Suspeitamos que a caixa metálica, construída para isolar o sistema, causa os mesmos efeitos de reflexão observados nos ensaios com a manta metálica.

Para reforçar a hipótese das influência das reflexões nas medições, foi verificado que a frequência de máxima intensidade do sinal varia com a utilização da manta metálica. Utilizando-se o tubo de seção retangular, verificou-se que a frequência de máxima intensidade do sinal, obtida através do ensaio de varredura de frequências, é de 9881 MHz para ensaios em que se utiliza a manta metálica, e de 9907 MHz nos ensaios em que não se utiliza a manta. Aparentemente, em ambas as situações estão ocorrendo fenômenos de ressonância nas frequências citadas. Em teoria, a frequência de ressonância deveria variar de acordo com as dimensões da cavidade de ressonância e com as propriedades dielétricas do MUT, no entanto, não foi possível observar tal fenômeno. Para uma dada configuração de ensaio, a mesma frequência de ressonância foi obtida para toda a faixa de fração de óleo, com variações mínimas no limite da resolução do sistema. Nessas situações de múltiplas reflexões, a influência do meio no sinal recebido não pode ser facilmente determinada. Portanto, nessas situações, a eficiência do sistema na medição da fração de óleo é questionável.

Outro fator que supostamente influenciou os resultados criando padrões de interferência e ondas estacionárias foi a interface estática presente na mistura bifásica. Assim como a luz, as microondas sofrem reflexões e refrações quando encontram um interface entre dois meios com propriedades dielétricas distintas. A interface estática

presente nos testes estáticos realizados no sentido axial do tanques não corresponde a realidade de um escoamento multifásico. Novos testes deverão ser conduzidos sobre uma mistura de água/óleo devidamente homogeneizada (sem apresentar esta interface). Isto pode ser realizado adicionado-se um misturador dentro do corpo de prova na bancada de testes. Futuramente uma unidade de escoamento multifásico deverá gerar o fluido de teste em condições mais próximas da realidade. Neste sentido, atualmente estão sendo conduzidos trabalhos no DAS, na direção de construir e disponibilizar para testes esta unidade de escoamento multifásico.

O sistema de medição mostrou-se bastante estável e confiável, tendo em vista a repetibilidade obtida nas medições realizadas para uma mesma configuração. Além disso, a incerteza das medições, calculada através do desvio padrão, foi satisfatória, especialmente a medição do atraso de fase que se mostrou bastante estável. No entanto, para obter esse comportamento estável foi necessário estabilizar a temperatura do sistema de geração e processamento de microondas utilizando refrigeração forçada. Durante a realização dos primeiros testes com o sistema, verificou-se que o VCO e o amplificador de potência do sistema de geração e processamento de microondas produziam muito calor. Nessas condições, o sistema de medição apresentou péssimas características metrológicas. Os dissipadores utilizados no sistema foram subdimensionados. Para solucionar o problema, foi utilizada ventilação forçada no sistema de microondas.

A potência do sinal transmitido e, conseqüentemente, a intensidade do sinal recebido, ficaram muito abaixo do esperado e determinado teoricamente. A potência abaixo do esperado reduz a sensibilidade do sistema e força essa a operar muito abaixo das condições ótimas. Uma hipótese para a causa da redução da potência do sistema é a perda de potência devido ao não casamento de impedâncias entre os componentes do sistema de geração e processamento de microondas, ocasionando o aparecimento de ondas estacionárias no sistema e, conseqüentemente, a perda de potência. Eventualmente, esse fenômeno possa ser, pelo menos em parte, responsável pelo sobre-aquecimento do sistema. Uma possível solução para esse problema é a utilização de isoladores entre os elementos de potência do sistema (VCO e amplificador). Uma outra possibilidade para a melhora do sinal recebido é a utilização de um amplificador para o sinal recebido.

O mecanismo de *logging* de alta velocidade implementado utilizando o protocolo UDP/IP não funcionou como o esperado. Na prática, para altas frequências de *logging* a perda de pacotes na rede foi muito grande, uma vez que o protocolo UDP/IP não possui mecanismos de controle de transporte. Devido a essa limitação, a taxa de aquisição em que os ensaios foram realizados foi de 1 kHz.

5.1 Pendências de Implementação

Abaixo são listadas funcionalidades e componentes que fazem parte do projeto do sistema, mas que, no entanto, não foram implementadas por razões diversas.

- O sistema de medições auxiliares não chegou a ser implementado. Ele é importante para a determinação da influência da temperatura e da salinidade nas propriedades dielétricas do meio. Numa aplicação industrial, em condições reais de escoamento, a medição dessas grandezas são indispensáveis para a correta medição da fração de água.
- O atenuador controlado por tensão apresentou defeito e não foi utilizado no sistema. O atenuador controlável é uma peça importante no sistema de geração e processamento de microondas. Este componente garante níveis constantes de intensidade no misturador do sistema de microondas, permitindo que este opere em condições ótimas.
- A memória FIFO, que conecta o sistema de comunicação embarcada ao sistema de controle e aquisição de dados, não foi montada na placa. A utilização deste componente é fundamental em aplicações que requerem altas frequências de *logging*.
- As tarefas de controle, filtro digital e alarme da unidade de aquisição não foram completamente implementadas. A tarefa de controle é indispensável caso se utilize o atenuador controlado no sistema de geração e processamento de microondas. A tarefa de filtro digital pode melhorar significativamente a qualidade das medições da unidade de aquisição.

5.2 Limitações Operacionais

Abaixo são listadas algumas limitações, não previstas, que o sistema implementado apresentou:

- Para o correto funcionamento do sistema de medição é necessário utilizar ventilação forçada no sistema.
- A frequência máxima de *logging* obtida é de 1 kHz, limitando a taxa de aquisição para os ensaios em 1 kHz.

5.3 Dificuldades Encontradas

O processo de aquisição dos componentes de microondas é lento e burocrático. Não existem fabricantes nacionais. Os fabricantes disponibilizam poucas informações sobre seus produtos. Os fabricantes não costumam manter estoques de seus componentes, sendo estes produzidos após o pedido de compra, o que implica numa demora de algumas semanas para a produção dos componentes e, às vezes, compra de uma quantidade mínima. Além disso, por se tratarem de componentes normalmente utilizados em aplicações militares e aeroespaciais, o processo de compra pode exigir algum tipo de declaração de utilização para fins pacíficos.

A inexistência de um laboratório equipado e preparado para a realização de ensaios e avaliação das técnicas de inferência utilizando microondas pode ser considerada como uma grande dificuldade. Tais tipos de testes demandam uma variedade de equipamentos, tais como: analisadores de espectro, geradores de microondas, amplificadores de potência, antenas direcionais, guias de onda, entre outros. Todos os testes e medições foram realizados utilizando única e exclusivamente o equipamento desenvolvido no presente trabalho, não havendo nenhum outro equipamento de referências para a validação dos resultados ou calibração do equipamento desenvolvido.

5.4 Sugestões para Trabalhos Futuros

A maior parte das sugestões para trabalhos futuros são decorrentes de deficiências e problemas identificados no presente trabalho que, por motivos diversos, não foram solucionados. Abaixo são listadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- implementação das pendências de implementação do presente trabalho;
- utilização de isoladores no sistema de processamento de microondas;
- avaliação do sistema utilizando outras antenas e configurações das antenas;
- montagem do sistema de processamento e geração de microondas sobre uma placa metálica que facilite a dissipação do calor produzido pelos componentes;
- montagem do sistema de microondas na forma de uma matriz de componentes, de maneira a simplificar e permitir a alteração da configuração dos componentes de microondas, permitindo a alteração do roteamento dos sinais através da utilização de guias de onda flexíveis;

- utilização de mais um amplificador de potência para a transmissão do sinal e ainda mais um amplificador para a recepção;
- reavaliação do mecanismo de *logging* em alta velocidade;
- projeto de uma cavidade de ressonância e avaliação dos sensores de ressonância utilizando o sistema de instrumentação atual;

5.5 Considerações Finais

De uma maneira geral, o medidor desenvolvido apresentou resultados muito próximos dos esperados. Os sistemas de instrumentação e medição funcionaram de maneira satisfatória. O tempo dedicado à realização dos ensaios propriamente ditos foi pequeno. O esforço necessário para colocar o sistema em operação consumiu muito tempo.

A grande realização do presente trabalho foi a criação de uma infra-estrutura para trabalhos futuros. A experiência e o conhecimento adquirido no desenvolvimento do sensor de transmissão são de fundamental importância para trabalhos futuros, apesar de, aparentemente, esse tipo de sensor não produzir os resultados desejados para a aplicação em questão.

Existem diversas aplicações para sensores de microondas. Trata-se de uma linha de pesquisa ampla e variada. A instrumentação utilizando-se tecnologia de microondas, apesar de não ser uma tecnologia nova, ainda é assunto pouco estudado. Existem poucas publicações na área e alguns poucos fabricantes oferecendo produtos que empregam essa tecnologia no mercado.

Apêndice A

Especificações Técnicas dos Componentes de Microondas Utilizados

Neste apêndice são apresentadas as especificações técnicas, bem como o modelo e o fabricante, dos componentes utilizados no sistema de geração e processamento de microondas. Para maiores detalhes sobre os deve-se consultar os *datasheets* fornecidos pelos fabricantes, os quais podem ser obtidos através no *website* das empresas.

A.1 Antenas

Foram utilizadas duas antenas tipo *horn*, fabricadas pela empresa Q-par Angus (<http://www.q-par.com>). Abaixo são descritas as principais características de cada um dos modelos utilizados.

- **QSH16S10S**

- Ganho = 10 dBi
- Conector = tipo SMA
- Banda = 8,2 GHz a 12,4 GHz

- **QSH16S20S**

- Ganho = 20 dBi
- Conector = tipo SMA
- Banda = 8,2 GHz a 12,4 GHz

A.2 VCO

Foi utilizado no sistema um VCO modelo O2ACP12001, fabricado pela Teledyne Cougar (<http://www.cougarcorp.com>). Abaixo são listadas as principais características desse componente:

- Banda = 8 GHz a 12 GHz
- Tensão de controle = 0V a -12V
- Potência de saída = 17 dBm
- Variação da potência de saída = 5,5 dB
- Tensão de alimentação = +15VDC
- Corrente de alimentação (max) = 220 mA
- Conectores = tipo SMA

A.2.1 Interruptor

Foi utilizado no sistema um interruptor (*switch*) de um pólo, modelo SW1AD-16, fabricado pela Pulsar Microwave Corporation (<http://www.pulsarmicrowave.com>). Abaixo são listadas as principais características desse componente:

- Banda = 0,3 GHz a 13 GHz
- Tipo = absorviva
- Perda de inserção (max) = 3,5 dB
- VSWR = 1,70
- Tempo de chaveamento = 100 ns
- Tensão de controle = +5V
- Tensão de alimentação = ± 5 VDC
- Corrente de alimentação (tipico) = 30 mA (+5V) e 30mA (-5V)
- Conectores = tipo SMA

A.2.2 Divisor de Potência

Foi utilizado um divisor de potência (*power divider*) passivo, de 2 vias, modelo PS2-16-450/8S, fabricado pela Pulsar Microwave Corporation (<http://www.pulsarmicrowave.com>). Abaixo são listadas as principais características desse componente:

- Banda = 8 GHz a 12,4 GHz
- Perda de inserção (max) = 0,4 dB
- VSWR (max) = 1,35
- Conectores = tipo SMA

A.2.3 Amplificador de Potência

Foi utilizado um amplificador de potência (*power amplifier*) modelo A2CP11049, fabricado pela Teledyne Cougar (<http://www.cougarcorp.com>). Abaixo são listadas as principais características desse componente:

- Banda = 6 GHz a 11 GHz
- Potência de saída (max) = 30dBm
- Ganho de pequeno sinal (min) = 18.5 dB
- VSWR (max) = 1,7
- Tensão de alimentação = +12VDC
- Corrente de alimentação (max) = 590 mA
- Conectores = tipo SMA

A.2.4 Atenuador Controlado por Tensão

Foi utilizado no sistema um atenuador controlado por tensão (*voltage controlled attenuator*), com controle linear, modelo AAT-28-479A/5S, fabricado pela Pulsar Microwave Corporation (<http://www.pulsarmicrowave.com>). Abaixo são listadas as principais características desse componente:

- Banda = 6 GHz a 16 GHz
- Faixa de atenuação = 32dB
- Ganho = 8dB/Volt
- Perda de inserção (max) = 4 dB
- VSWR (max) = 2
- Tensão de controle = 0V a 4V
- Tensão de alimentação = ± 15 VDC
- Corrente de alimentação (tipico) = 100 mA (+15V) e 50mA (-15V)
- Conectores = tipo SMA

A.2.5 Misturador

Foi utilizado no sistema um misturador (*mixer*), passivo, modelo MMP12241, fabricado pela Teledyne Cougar (<http://www.cougarcorp.com>). Abaixo são listadas as principais características desse componente:

- Banda na porta LO = 2 GHz a 12 GHz
- Banda na porta RF = 2 GHz a 12 GHz
- Banda na porta IF = DC a 2 GHz
- Perda de conversão (max) = 5 dB
- Potência de LO (nominal) = +7.0 dBm
- Conectores = tipo SMA

A.2.6 Detector

Foi utilizado no sistema um detector (*detector*), ativo, modelo DACP18001, fabricado pela Teledyne Cougar (<http://www.cougarcorp.com>). Abaixo são listadas as principais características desse componente:

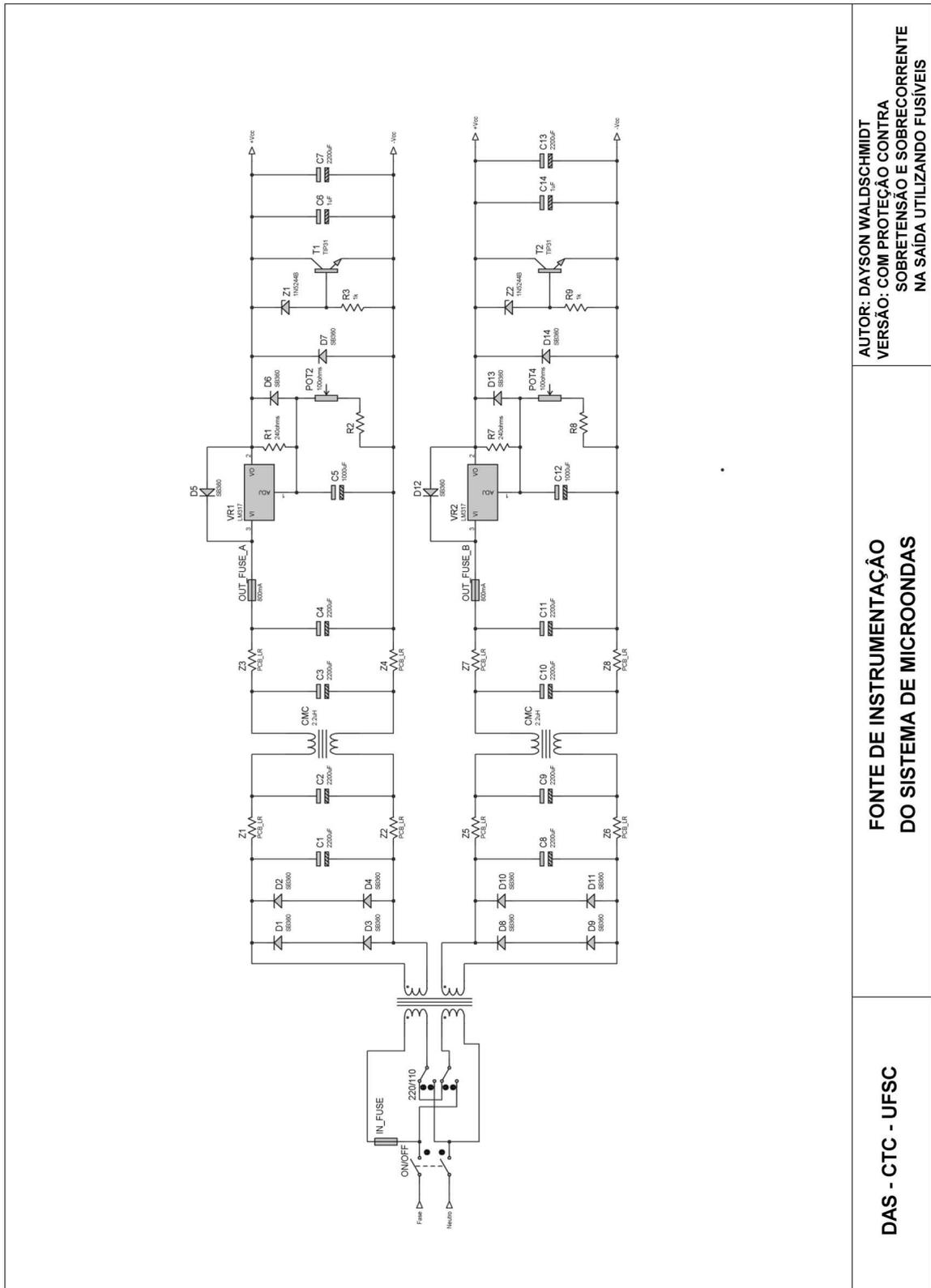
- Banda = 0,1 GHz a 18 GHz

- Níveis de potência de entrada = -30 dBm a +5 dBm
- VSWR (max) = 1,5
- Tensão de alimentação = ± 5 VDC
- Conectores = tipo SMA

Apêndice B

Diagramas Esquemáticos

A seguir são apresentados os diagramas esquemáticos do sistema de alimentação DC, do sistema de controle e aquisição, e do sistema de comunicação embarcada. O sistema de controle e aquisição foi dividido em 2 módulos: módulo principal de processamento e módulo de condicionamento de sinais. O módulo de condicionamento de sinais por sua vez é dividido em 2 sub-módulos: módulo de condicionamento das entradas analógicas e módulo de condicionamento das saídas analógicas. Os componentes passivos dos módulos de condicionamento de sinais não possuem valores indicados. Os valores dependem dos ganhos que se deseja no sistema e do projeto do filtro anti-recobrimento e, portanto, não serão detalhados nos diagramas esquemáticos.

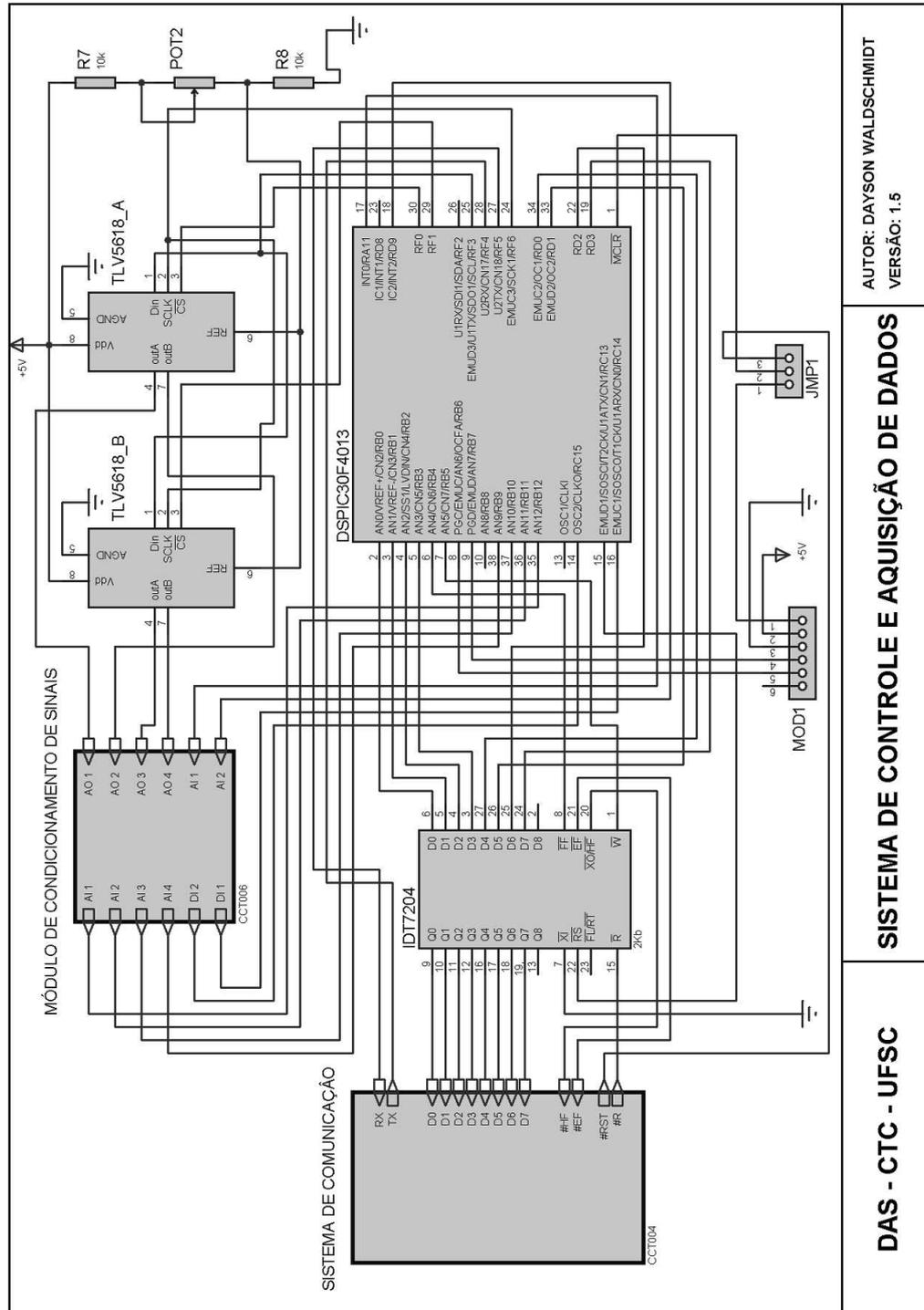


**AUTOR: DAYSON WALDSCHMIDT
 VERSÃO: COM PROTEÇÃO CONTRA
 SOBRETENSÃO E SOBRECORRENTE
 NA SAÍDA UTILIZANDO FUSÍVEIS**

**FONTE DE INSTRUMENTAÇÃO
 DO SISTEMA DE MICROONDAS**

DAS - CTC - UFSC

Figura B.1: Diagrama esquemático da fonte de alimentação DC

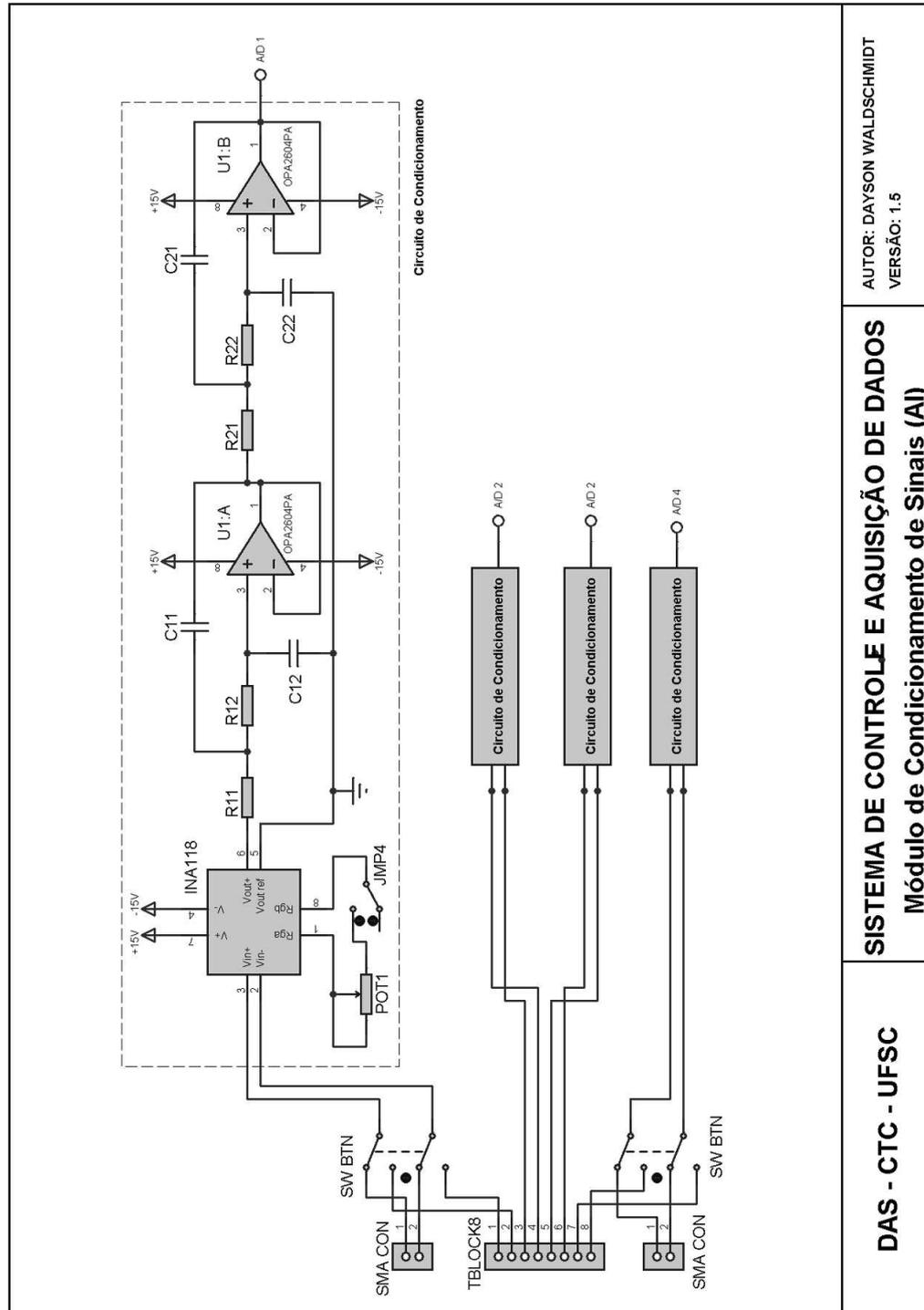


AUTOR: DAYSON WALDSCHMIDT
VERSÃO: 1.5

SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS

DAS - CTC - UFSC

Figura B.2: Diagrama esquemático do módulo principal do sistema de controle e aquisição

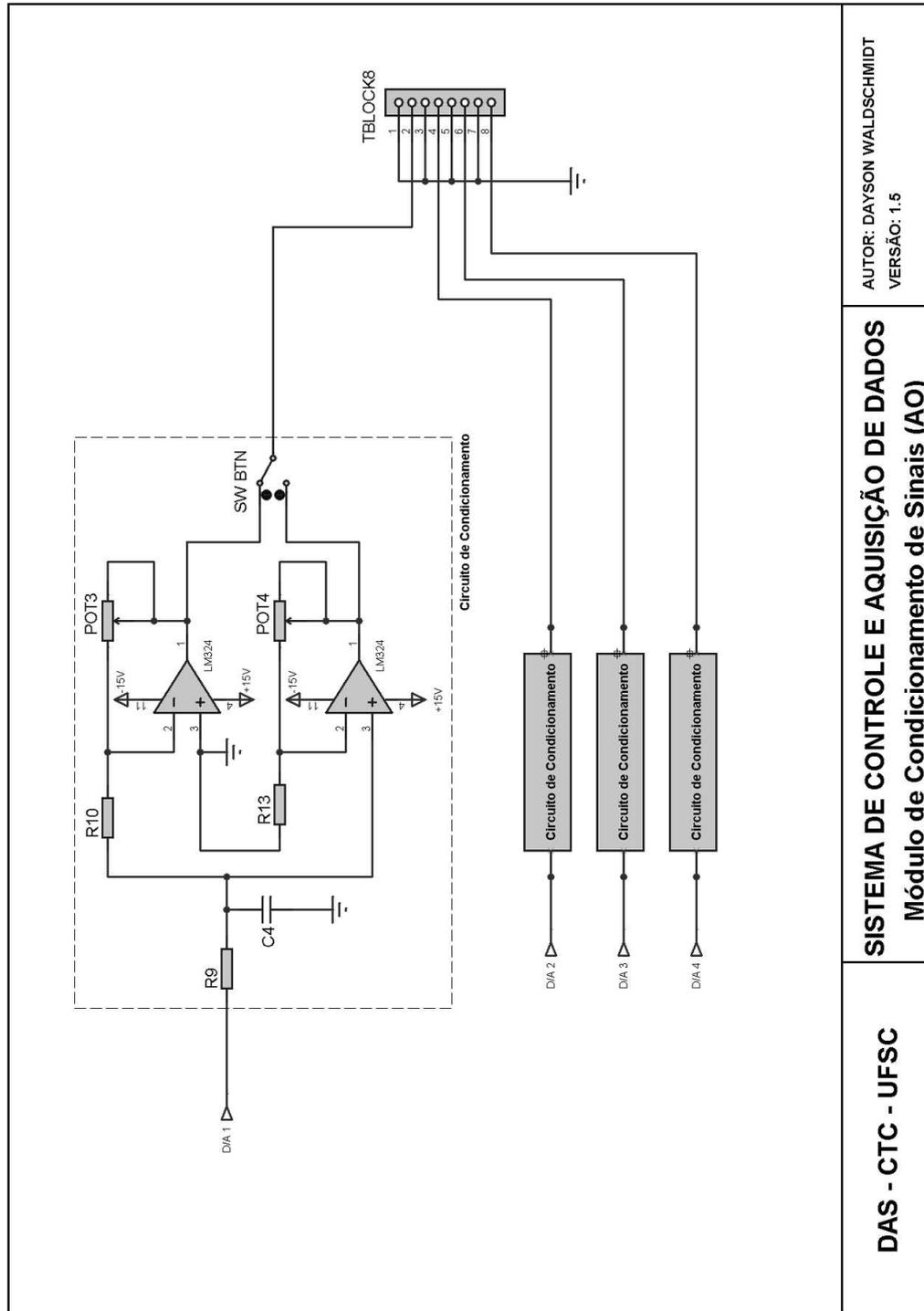


AUTOR: DAYSON WALDSCHMIDT
VERSÃO: 1.5

SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS
Módulo de Condicionamento de Sinais (AI)

DAS - CTC - UFSC

Figura B.3: Diagrama esquemático do módulo de condicionamento das entradas analógicas do sistema de controle e aquisição



AUTOR: DAYSON WALDSCHMIDT
VERSÃO: 1.5

SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS
Módulo de Condicionamento de Sinais (AO)

DAS - CTC - UFSC

Figura B.4: Diagrama esquemático do módulo de condicionamento das saídas analógicas do sistema de controle e aquisição

Apêndice C

Mapeamento dos Registrados Modbus da Unidade de Processamento

Na tabela C.1 é apresentado o mapa de registradores Modbus da unidade de processamento do sistema. Através do conhecimento do mapa de registradores é possível integrar a unidade de processamento a qualquer sistema compatível com o protocolo Modbus TCP/IP. O padrão Modbus utiliza registradores de 16 bits, ou 2 bytes. A função de cada registrador é descrita na sequência.

- **MODBUS_CONF_REG:** configura o modo de operação da unidade de processamento. Abaixo são listados os possíveis valores para esse registrador:
 - 0x0000 = Modo Aquisição.
 - 0x0001 = Modo Filtro Digital.
 - 0x0002 = Modo Controlador.
 - 0x0003 = Modo WCMeter.
- **MODBUS_TYPE_REG:** tipo ou modelo do equipamento. ¹
- **MODBUS_ID_REG:** define um ID alfanumérico para o equipamento para facilitar a sua identificação numa rede com vários equipamentos.
- **MODBUS_DESC_REG:** define uma descrição para um dado equipamento com o objetivo de facilitar sua identificação e função numa rede com vários equipamentos.

¹por enquanto só existe um tipo

Registrador	Endereço	Tamanho (Words)
MODBUS_CONF_REG	0x0001	1
MODBUS_TYPE_REG	0x0002	1
MODBUS_ID_REG	0x0003	4
MODBUS_DESC_REG	0x0007	16
MODBUS_IP_REG	0x0017	2
MODBUS_MASK_REG	0x0019	2
MODBUS_GATEWAY_REG	0x001B	2
LOG_CONF_REG	0x001D	1
LOG_FREQ_REG	0x001E	1
LOG_REMOTE_IP	0x001F	2
LOG_REMOTE_PORT	0x0021	1
AQ_FREQ_REG	0x0030	1
AQ_CHANNELS_REG	0x0031	1
AQ_OVERSAMPLING_REG	0x0032	1
ANALOG_OUT1_CONF_REG	0x0033	1
ANALOG_OUT2_CONF_REG	0x0034	1
ANALOG_OUT3_CONF_REG	0x0035	1
ANALOG_OUT4_CONF_REG	0x0036	1
ANALOG_OUT1_VALUE_REG	0x0037	1
ANALOG_OUT2_VALUE_REG	0x0038	1
ANALOG_OUT3_VALUE_REG	0x0039	1
ANALOG_OUT4_VALUE_REG	0x003A	1
LOG_AQ_CHANNELS_REG	0x003B	1
LOG_ANALOG_OUT_CHANNELS_REG	0x003C	1
DIGITAL_OUT1_CONF_REG	0x003D	1
DIGITAL_OUT2_CONF_REG	0x003E	1
DIGITAL_OUT1_VALUE_REG	0x003F	1
DIGITAL_OUT2_VALUE_REG	0x0040	1
REG_WC_MODE	0x0043	1
REG_WC_FREQ_MIN	0x0044	1
REG_WC_FREQ_MAX	0x0045	1
REG_WC_STEP_NAQ	0x0046	1
REG_WC_INTER_STEP	0x0048	1
REG_WC_AQ_FREQ	0x0049	1
REG_WC_AQ_OVERSAMPLING	0x004A	1
REG_WC_START	0x004B	1

Tabela C.1: Mapa dos registrador Modbus da unidade de processamento

- **MODBUS_IP_REG:** IP do equipamento. Indispensável quando se utiliza IP fixo.
- **MODBUS_MASK_REG:** máscara de rede do equipamento. Indispensável quando se utiliza IP fixo.
- **MODBUS_GATEWAY_REG:** endereço do *gateway* da rede Ethernet. Indispensável quando se utiliza IP fixo.
- **LOG_CONF_REG:** configura se o *logging* será realizado pelo serviço do concentrador de dados, ou através de um serviço externo. Abaixo são listados os possíveis valores para esse registrador:
 - 0x0000 - *logging* desabilitado.
 - 0x0001 - *logging* habilitado através do serviço do concentrador de dados.
 - 0x0002 - *logging* habilitado através de um serviço externo.
 - 0x0003 - *logging* habilitado simultaneamente através do serviço do concentrador de dados e de um serviço externo.
- **LOG_FREQ_REG:** a frequência de *logging* é dada pela razão entre a frequência de aquisição e o valor deste registrador.
- **LOG_REMOTE_IP:** configura o IP do equipamento de *logging* remoto. Quando se utiliza o serviço de *logging* do concentrador de dados não é necessário configurar esse parâmetro.
- **LOG_REMOTE_PORT:** configura a porta do equipamento de *logging* remoto. Quando se utiliza o serviço de *logging* do concentrador de dados não é necessário configurar esse parâmetro.
- **AQ_FREQ_REG:** configura a frequência de aquisição de dados do sistema. Todos os canais de aquisição ativos utilizam a mesma frequência de aquisição.
- **AQ_CHANNELS_REG:** configura os canais analógicos habilitados. Cada bit corresponde a um canal. Quando setado, o bit habilita a aquisição do canal correspondente. Como o presente sistema só possui 4 entradas analógicas, somente os bits de 0 a 3 são utilizados, correspondendo cada um a uma das entradas digitais.
- **AQ_OVERSAMPLING_REG:** configura o parâmetro de *oversampling* dos canais de aquisição. Quando configurado com um valor diferente de 1, o sistema multiplica a frequência real de aquisição pelo valor n configurado no registrador, calculando então a média entre as n amostras, de maneira que, para o usuário,

a frequência de aquisição se mantenha constante. No entanto, como o sistema na verdade aumenta a frequência e calcula a média utilizando o mesmo fator, as medidas se tornam mais representativas. O valor 0x0000 não é válido para esse parâmetro.

- **ANALOG_OUT1_CONF_REG:** configura a saída analógica 1 da unidade de processamento. Abaixo são listados os possíveis valores para esse registrador:
 - 0x0000 = saída desabilitada.
 - 0x0001 = saída constante, configurável pelo usuário.
 - 0x0002 = saída tipo função predefinida.
 - 0x0003 = saída do filtro digital 1.
 - 0x0004 = saída do filtro digital 2.
 - 0x0005 = saída do controlador 1.
 - 0x0006 = saída do controlador 2.
 - 0x0007 = saída de controle do modo medidor de fração de água.
- **ANALOG_OUT2_CONF_REG:** configura a saída analógica 2 da unidade de processamento. Utiliza a mesma configuração da saída analógica 1.
- **ANALOG_OUT3_CONF_REG:** configura a saída analógica 3 da unidade de processamento. Utiliza a mesma configuração da saída analógica 1.
- **ANALOG_OUT4_CONF_REG:** configura a saída analógica 4 da unidade de processamento. Utiliza a mesma configuração da saída analógica 1.
- **ANALOG_OUT1_VALUE_REG:** permite a leitura do valor atual da saída analógica 1, ou a escrita desta, caso a saída esteja configurada no modo "configurável pelo usuário"(0x0001).
- **ANALOG_OUT2_VALUE_REG:** permite a leitura do valor atual da saída analógica 2, ou a escrita desta, caso a saída esteja configurada no modo "configurável pelo usuário"(0x0001).
- **ANALOG_OUT3_VALUE_REG:** permite a leitura do valor atual da saída analógica 3, ou a escrita desta, caso a saída esteja configurada no modo "configurável pelo usuário"(0x0001).
- **ANALOG_OUT4_VALUE_REG:** permite a leitura do valor atual da saída analógica 4, ou a escrita desta, caso a saída esteja configurada no modo "configurável pelo usuário"(0x0001).

- **LOG_AQ_CHANNELS_REG:** habilita ou desabilita o *logging* das entradas analógicas do sistema. Cada bit corresponde a um canal. Como a unidade de processamento possui apenas 4 canais de aquisição, somente o bits de 0 a 3 são utilizados. Quando setado, o bit habilita o *logging* do canal correspondente.
- **LOG_ANALOG_OUT_CHANNELS_REG:** habilita ou desabilita o *logging* das saídas analógicas do sistema. Cada bit corresponde a um canal. Como a unidade de processamento possui apenas 4 saídas analógicas, somente o bits de 0 a 3 são utilizados. Quando setado, o bit habilita o *logging* do canal correspondente.
- **DIGITAL_OUT1_CONF_REG:** configura a saída digital 1 da unidade de aquisição. Abaixo são listados os possíveis valores para esse registrador:
 - 0x0000 = saída digital desabilitada. Quando desabilitada a saída assume vai para o estado lógico baixo (zero).
 - 0x0001 = saída digital configurável pelo usuário.
 - 0x0002 = saída de controle do modo medidor de fração de água
- **DIGITAL_OUT2_CONF_REG:** configura a saída digital 1 da unidade de aquisição. Utiliza a mesma configuração da saída digital 1.
- **DIGITAL_OUT1_VALUE_REG:** permite a leitura do valor atual da saída digital 1, ou a escrita desta, caso a saída esteja configurada no modo "configurável pelo usuário" (0x0001).
- **DIGITAL_OUT2_VALUE_REG:** permite a leitura do valor atual da saída digital 2, ou a escrita desta, caso a saída esteja configurada no modo "configurável pelo usuário" (0x0001).
- **REG_WC_MODE:** configura o funcionamento do modo "medidor de fração de água" da unidade de processamento (MODBUS_CONF_REG = 0x0003). Abaixo são listados os possíveis valores para esse registrador:
 - 0x0001 = modo ensaio. Nesse modo o sistema realiza ensaios pré-determinados com o sistema de microondas.
 - 0x0002 = modo medidor. Nesse modo o sistema mede continuamente a fração de água do sistema.
- **REG_WC_FREQ_MIN:** configura a frequência do sinal de microondas na qual o sistema deve iniciar no modo de ensaio do medidor de fração de água. O valor mínimo é 7000 (MHz) e o máximo 12500 (MHz).

- **REG_WC_FREQ_MAX:** configura a frequência máxima do sinal de microondas no modo de ensaio do medidor de fração de água. O valor mínimo é 7000 (MHz) e o máximo 12500 (MHz).
- **REG_WC_STEP_NAQ:** configura o número de medições que devem ser realizadas em cada estágio. Aceita valores de 1 à 65535.
- **REG_WC_INTER_STEP:** configura o incremento da frequência do sinal de microondas entre os estágios de um ensaio do modo medidor de fração de água.
- **REG_WC_AQFREQ:** configura a frequência de aquisição durante um ensaio no modo medidor de fração de água. Quando configurado no modo medidor de fração de água o valor definido em AQ_FREQ_REG é ignorado pelo sistema.
- **REG_WC_AQ_OVERSAMPLING:** configura a frequência de aquisição durante um ensaio no modo medidor de fração de água. Quando configurado no modo medidor de fração de água o valor definido em AQ_FREQ_REG é ignorado pelo sistema.
- **REG_WC_START:** configura o parâmetro de *oversampling* dos canais de aquisição durante um ensaio no modo medidor de fração de água. Quando configurado no modo medidor de fração de água o valor definido em AQ_OVERSAMPLING_REG é ignorado pelo sistema.

Apêndice D

Especificação dos Protocolos de Comunicação Criados

Para complementar o protocolo Modbus TCP/IP e permitir que a unidade de aquisição possuísse as funcionalidades necessárias foi necessário o desenvolvimento de alguns protocolos de comunicação. Os protocolos desenvolvidos funcionam sobre UDP/IP e são utilizados na comunicação entre a unidade de aquisição e o concentrador de dados. Serão apresentados dois protocolos: o protocolo de recrutamento de equipamentos e o protocolo de solicitação e configuração de *logging*. Os protocolos são mínimos e simples

D.1 Protocolo de Recrutamento

O protocolo de recrutamento permite que um mestre detecte o ingresso de um novo equipamento na rede e que o equipamento detecte o mestre. Além de ser necessário para permitir a resolução dos IPs dos equipamentos, o processo de recrutamento é indispensável para a utilização do serviço de *logging* do concentrador de dados. Somente equipamentos devidamente recrutados podem solicitar o serviço de *logging* ao concentrador.

O mecanismo de recrutamento funciona através do *broadcast*, às portas 4000 da rede, de solicitações de recrutamento (RECRUTER_REQUEST) de equipamentos novos equipamentos ou não recrutados ainda. O serviço de recrutamento do concentrador de dados, quando recebe uma solicitação de recrutamento, retorna ao equipamento solicitante uma confirmação de recrutamento (RECRUTER_ACK), informando o seu endereço IP. Um equipamento não recrutado vai continuar enviando solicitações de

recrutamento periodicamente até receber uma confirmação de um serviço de recrutamento.

O concentrador de dados mantém a sua lista de equipamentos recrutados testando continuamente a conexão com os equipamentos através do serviço de *ping* do padrão Ethernet. Quando um equipamento deixa de responder às comandos de *ping* do recrutador, este equipamento é removido da lista de equipamentos do recrutador. De forma similar, se o recrutador deixar de responder a alguma requisição de um equipamento, este assume o estado de não recrutado e passa a enviar solicitações novamente.

Toda vez que o serviço de recrutamento é iniciado, re-iniciado ou tem o seu endereço IP alterado, o recrutador envia na rede, através de um *broadcast*, uma notificação de RECRUTER_CHANGE, informando seu novo IP. Os equipamentos que recebem essa notificação devem passar ao estado de não-recrutados, reiniciando o processo de recrutamento através do envio periódico de solicitações de RECRUTER_REQUEST. Abaixo são descritas as mensagens de solicitação (RECRUTER_REQUEST), confirmação (RECRUTER_ACK) e notificação (RECRUTER_CHANGE).

Comando	1 Byte	0xCC
ID do equipamento	8 Bytes	8 caracteres ASCII
Descrição do equipamento	24 Bytes	24 caracteres ASCII
Tipo do equipamento	1 Byte	0x01

Tabela D.1: Mensagem de solicitação de recrutamento (RECRUTER_REQUEST)

Comando	1 Byte	0xCE
IP do concentrador de dados	4 Bytes	b1.b2.b3.b4

Tabela D.2: Mensagem de confirmação de recrutamento (RECRUTER_ACK)

Comando	1 Byte	0xCA
IP do concentrador de dados	4 Bytes	b1.b2.b3.b4

Tabela D.3: Mensagem de notificação de mudança do concentrador de dados (RECRUTER_CHANGE)

D.2 Protocolo de *Logging*

O protocolo de *logging* permite a utilização do serviço de *logging* do concentrador de dados. Qualquer equipamento que esteja na lista de equipamentos cadastrados pode solicitar ao concentrador de dados um canal de *logging*. Para cada equipamento que solicitar um canal de *logging* é criado uma tarefa específica para receber, tratar e armazenar os dados enviados pelo equipamento. A tarefa de *logging* de um determinado equipamento vai continuar ativa até que o equipamento solicite o encerramento

do serviço, ou então, saia da rede e, conseqüentemente, da lista de equipamentos re-
crutados. De maneira a otimizar a utilização da memória no concentrador de dados,
a tarefa de *logging* de um dado equipamento só é criada quando o equipamento envia
um requisição (LOGGER_REQUEST) ao concentrador de dados.

O mecanismo do serviço de *logging* inicia com o envio, via UDP/IP, de uma re-
quisição de *logging* à porta 4001 do concentrador de dados. Juntamente com a re-
quisição o equipamento deve informar ao serviço de *logging* o número de canais de
logging que serão utilizados, a frequência de *logging* (em função da frequência de
aquisição), a frequência de aquisição e o tamanho do pacote de dados que será uti-
lizado. O tamanho do pacote é definido pelo equipamento de maneira a otimizar sua
memória e seus *buffers* internos. Um pacote pode conter os dados de *logging* de diversos
canais, durante um dado período de tempo.

Quando o serviço de *logging* recebe uma requisição de um equipamento, este então
cria uma tarefa específica para a recepção e tratamento do fluxo de dados de *logging*
gerado pelo equipamento. O serviço de *logging* retorna uma confirmação de criação de
canal de *logging* (LOGGER_ACK) ao equipamento solicitante. Quando cria a tarefa
de *logging* para um dado equipamento, o serviço de *logging* designa uma porta de
comunicação para ser usada única e exclusivamente para a comunicação de *logging*
com o equipamento. Junto com a confirmação de criação de canal de *logging* o serviço
de *logging* retorna ao equipamento a porta designada para a comunicação de *logging*
desse equipamento. Após o recebimento da confirmação da criação de canal de *logging*
o equipamento pode iniciar o envio de dados de *logging* para a porta designada do
concentrador de dados.

Os dados de *logging* são enviados na forma de um *streaming* de dados ao concetra-
dor. Somente o equipamento envia dados ao concentrador. Não existem mecanismos de
controle de erros ou de transmissão segura. Junto com cada pacote de *logging* o equi-
pamento envia um byte de sequência de pacote ao concentrador. O byte de sequência é
incrementado a cada novo envio. O número de sequência funciona como um mecanismo
de estampa de tempo simples. Com base nas configurações de frequência de *logging* e
de frequência de aquisição, enviados com a requisição de *logging*, o concentrador cal-
cula a estampa de tempo referente a um dado byte de sequência e estampa no arquivo
de *logging* o instante de recebimento de cada dado. Cada tarefa de *logging* criada é
associada a um único arquivo de *logging*. O arquivo de *logging* fica armazenado no
concentrador de dados e pode ser posteriormente recuperado.

Uma tarefa de *logging* pode ser encerrada pelo equipamento solicitante através do
envio de uma solicitação de finalização de canal de *logging* (LOGGER_STOP) ao serviço
de *logging* na porta 4001 do concentrador de dados. Quando o concentrador recebe uma
requisição de finalização ele encerra a tarefa de *logging* criada para o equipamento e

libera o arquivo de *logging* gerado para o sistema do concentrador. O arquivo de *logging* também é liberado para o sistema se o equipamento sai da lista de equipamentos recrutados ou solicita um canal de *logging* já possuindo um canal de *logging* ativo. Abaixo são descritas as mensagens de solicitação (LOGGER_REQUEST), confirmação (LOGGER_ACK) e notificação (LOGGER_STOP).

Comando	1 Byte	0xDC
Canais de <i>logging</i>	2 Bytes	cada bit representa um canal
Frequência de <i>logging</i>	2 Bytes	0 a 65535
Frequência de aquisição	2 Bytes	0 a 65535
Tamanho do pacote de <i>logging</i>	1 Byte	

Tabela D.4: Mensagem de solicitação de criação de canal de *logging* (LOGGER_REQUEST)

Comando	1 Byte	0xDE
Porta de comunicação dedicada	2 Bytes	0 a 65535

Tabela D.5: Mensagem de confirmação de criação de canal de *logging* (LOGGER_ACK)

Comando	1 Byte	0xD9
----------------	--------	------

Tabela D.6: Mensagem de notificação de finalização de canal de *logging* (LOGGER_END)

Apêndice E

Descrição dos Webservices do Sistema do Concentrador de Dados

Neste apêndice são apresentados os Webservices disponibilizados pelo sistema do concentrador de dados. Esses Webservices podem ser utilizados por qualquer aplicação de usuário que venha a ser desenvolvida. Também podem ser utilizados por qualquer sistema supervisorio que tenha suporte, ou *driver*, para Webservices. As funções que serão apresentadas permitem a utilização de todas as funcionalidades da unidade de processamento. Também permitem que o usuário interaja com o sistema num nível de abstração maior do que a utilização do protocolo Modbus TCP/IP permite. Enquanto que, utilizando-se o protocolo Modbus, a configuração do sistema é realizada através do escrita e leitura de registradores, os Webservices criam uma camada de abstração que torna detalhes do protocolo e da implementação transparentes ao usuário. As funções e estruturas de dados utilizadas pelo Webservices são obtidas automaticamente pelo cliente através da linguagem WSDL (*Web Services Description Language*) e do protocolo UDDI (*Universal Description, Discovery and Integration*), definidos na especificação da tecnologia de Webservices. As funções disponibilizadas pelos Webservices são descritas abaixo. Na sequência são apresentadas as estruturas de dados utilizadas. Os protótipos¹ das funções e das estruturas são apresentados na sintaxe da linguagem CSharp.

E.1 Funções dos Webservices

A seguir são listadas e descritas todas as funções oferecidos pelo serviço de Webservices do concentrador de dados.

¹do inglês: *prototypes*

- ***HWList ListHardware()*** - retorna uma lista com os dados dos equipamentos detectados na rede pelo concentrador de dados.
- ***bool WriteRegister(IP, REG_ADD, REG_VALUE)*** - implementação da função Modbus de escrita de um único registrador. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. O parâmetro REG_ADD é o endereço do registrador Modbus que se deseja escrever. A função retorna verdadeiro se o comando foi bem sucedido, ou falso caso contrário.
- ***bool WriteCoil(IP, COIL_ADD, COIL_STATE)*** - implementação da função Modbus de escrita de uma saída digital. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. O parâmetro COIL_ADD é a saída digital que se deseja escrever. A função retorna verdadeiro se o comando foi bem sucedido, ou falso caso contrário.
- ***bool WriteMultipleRegisters(IP, REG_START_ADD, DATA, N_REG)*** - implementação da função Modbus de escrita de múltiplos registradores. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. O parâmetro REG_START é o endereço do primeiro registrador Modbus que se deseja escrever. O parâmetro N_REG corresponde ao número de registradores, a partir de REG_START_ADD, que se deseja escrever. Os valores que se deseja escrever devem ser passados, na ordem correspondente, através do parâmetro DATA. A função retorna verdadeiro se o comando foi bem sucedido, ou falso caso contrário.
- ***bool ReadMultipleRegisters(IP, REG_START_ADD, N_REG, ref DATA)*** - implementação da função Modbus de leitura de múltiplos registradores. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. O parâmetro REG_START é o endereço do primeiro registrador Modbus que se deseja ler. O parâmetro N_REG corresponde ao número de registradores, a partir de REG_START_ADD, que se deseja ler. Os resultados do comando de leitura serão armazenados em DATA. A função retorna verdadeiro se o comando foi bem sucedido, ou falso caso contrário.
- ***bool ReadInputRegisters(IP, REG_START_ADD, N_REG, ref DATA)*** - implementação da função Modbus de leitura de múltiplas entradas analógicas. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. O parâmetro REG_START a primeira entrada analógica que se deseja ler. O parâmetro N_REG corresponde ao número de entradas analógicas, a partir de REG_START_ADD, que se deseja ler. Os resultados do comando de leitura serão armazenados em DATA. A função retorna verdadeiro se o comando foi bem sucedido, ou falso caso contrário.

- ***bool ConfigureAquisitionRegisters(IP, AQRegs)*** - permite a configuração dos parâmetros de aquisição de dados da unidade de processamento. A estrutura AQRegs que contém a configuração desejada deve ser passada como parâmetro. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna verdadeiro se o comando foi bem sucedido, ou falso caso contrário.
- ***bool ConfigureAnalogOutputRegisters(IP, AnalogOutRegs)*** - permite a configuração dos parâmetros das saídas analógicas da unidade de processamento. A estrutura AnalogOutRegs que contém a configuração desejada deve ser passada como parâmetro. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna verdadeiro se o comando foi bem sucedido, ou falso caso contrário.
- ***bool ConfigureDigitalOutputRegisters(IP, DigitalOutRegs)*** - permite a configuração dos parâmetros das saídas analógicas da unidade de processamento. A estrutura DigitalOutRegs que contém a configuração desejada deve ser passada como parâmetro. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna verdadeiro se o comando foi bem sucedido, ou falso caso contrário.
- ***bool ConfigureEthernetModule(IP, EthernetModuleRegs)*** - permite a configuração dos parâmetros de rede da unidade de processamento. A estrutura EthernetModuleRegs que contém a configuração desejada deve ser passada como parâmetro. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna verdadeiro se o comando foi bem sucedido, ou falso caso contrário.
- ***bool ConfigureLoggingRegisters(IP, LOGRegs)*** - permite a configuração dos parâmetros de *logging* da unidade de processamento. A estrutura LOGRegs que contém a configuração desejada deve ser passada como parâmetro. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna verdadeiro se o comando foi bem sucedido, ou falso caso contrário.
- ***bool ConfigureLoggingChannels(IP, LOGChannelsRegs)*** - permite a configuração dos canais de *logging* da unidade de processamento. A estrutura LOGChannelsRegs que contém a configuração desejada deve ser passada como parâmetro. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna verdadeiro se o comando foi bem sucedido, ou falso caso contrário.
- ***bool ConfigureWCRegisters(IP, WCRegs)*** - permite a configuração dos parâmetros de funcionamento do modo medidor de fração de água da unidade de processamento. A estrutura WCRegs que contém a configuração desejada deve ser passada como parâmetro. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna verdadeiro se o comando foi bem sucedido, ou falso caso contrário.

- ***bool SetAnalogOutputs(IP, AnalogOutRegs)*** - permite a definição dos valores das saídas analógicas da unidade de processamento. A estrutura AnalogOutRegs que contém os valores desejados deve ser passada como parâmetro. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna verdadeiro se o comando foi bem sucedido, ou falso caso contrário.
- ***EthernetModuleRegs ReadEthernetModuleConfiguration(IP)*** - permite a leitura dos parâmetros de configuração de rede da unidade de processamento. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna a estrutura EthernetModuleRegs com os parâmetros lidos da unidade de processamento.
- ***AQRegs ReadAquisitionConfigurationRegisters(IP)*** - permite a leitura dos parâmetros de configuração de aquisição da unidade de processamento. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna a estrutura AQRegs com os parâmetros lidos da unidade de processamento.
- ***AnalogOutRegs ReadAnalogOutConfigurationRegisters(IP)*** - permite a leitura dos parâmetros de configuração das saídas analógicas da unidade de processamento. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna a estrutura AnalogOutRegs com os parâmetros lidos da unidade de processamento.
- ***DigitalOutRegs ReadDigitalOutConfigurationRegisters(IP)*** - permite a leitura dos parâmetros de configuração das saídas digitais da unidade de processamento. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna a estrutura DigitalOutRegs com os parâmetros lidos da unidade de processamento.
- ***LOGChannelsRegs ReadLoggingChannelsRegisters(IP)*** - permite a leitura dos parâmetros da configuração de canais de *logging* habilitados da unidade de processamento. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna a estrutura LOGChannelsRegs que contém a configuração de canais de *logging* habilitados da unidade de processamento.
- ***LOGRegs ReadLoggingConfigurationRegisters(IP)*** - permite a leitura dos parâmetros de configuração de *logging* da unidade de processamento. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede. A função retorna a estrutura LOGRegs com os parâmetros lidos da unidade de processamento.
- ***WCRegs ReadWCConfigurationRegisters(IP)*** - permite a leitura dos parâmetros de funcionamento do modo medidor de fração de água da unidade de processamento. O parâmetro IP corresponde ao endereço da unidade na rede.

A função retorna a estrutura WCREgs com os parâmetros lidos da unidade de processamento.

E.2 Estruturas de Dados do Webservices

Abaixo são listadas todas as estruturas de dados utilizadas no serviço de Webservices do concentrador de dados.

```
HWTNode[32] HWList

struct HWTNode
{
    String IP;
    String ID;
    String DESC;
    byte TYPE;
}

struct EthernetModuleRegs
{
    bool DHCP;
    int TYPE;
    String ID;
    String DESC;
    String IP;
    String MASK;
    String GATEWAY;
}

struct AQRegs
{
    ushort AQ_FREQ;
    ushort AQ_CHANNELS;
    ushort AQ_OVERSAMPLIG;
}

struct AnalogOutRegs
{
    ushort ANALOG_OUT_1CONF;
```

```
    ushort ANALOG_OUT_1VALUE;
    ushort ANALOG_OUT_2CONF;
    ushort ANALOG_OUT_2VALUE;
    ushort ANALOG_OUT_3CONF;
    ushort ANALOG_OUT_3VALUE;
    ushort ANALOG_OUT_4CONF;
    ushort ANALOG_OUT_4VALUE;
}

struct WCREgs
{
    ushort WC_MODE;
    ushort WC_FREQ_MIN;
    ushort WC_FREQ_MAX;
    ushort WC_STEP_NAQ;
    ushort WC_STEP_SIZE;
    ushort WC_INTER_STEP;
    ushort WC_AQ_FREQ;
    ushort WC_AQ_OVERSAMPLING;
}

struct DigitalOutRegs
{
    ushort DIGITAL_OUT_1CONF;
    ushort DIGITAL_OUT_2CONF;
    ushort DIGITAL_OUT_1VALUE;
    ushort DIGITAL_OUT_2VALUE;
}

struct LOGChannelsRegs
{
    ushort LOG_AQ_CHANNELS;
    ushort LOG_ANALOG_OUT_CHANNELS;
}

struct LOGRegs
{
    ushort LOG_CONF;
    ushort LOG_FREQ;
    String REMOTE_IP;
    ushort REMOTE_PORT;
}
```

}

Referências Bibliográficas

- [1] David Achson. *From Calculus to Chaos - An Introduction to Dynamics*. Oxford University Press, 1997.
- [2] Jan Axelson. *Embedded Ethernet and Internet Complete - Designing and Programming Small Devices for Networking*. Lakeview Research LLC, 2003.
- [3] Ibrahim M.M. Babelli. In search of an ideal multiphase flow meter for the oil industry. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 27(2B), october 2002.
- [4] Jeremy Bentham. *TCP/IP Lean - Web Servers for Embedded Systems*. CMP Books, 2002.
- [5] Johan Carlson. *Ultrasonic Characterization of Materials and Multiphase Flows*. PhD thesis, Lulea University of Technology, 2002.
- [6] Kai Chang. *RF and Microwave Wireless Systems*. John Wiley and Sons, INC., 2000.
- [7] Martin Chaplin. Water structure and science. obtido no site da London South Bank University, 2007.
- [8] José A. P. da Silva Filho e Fransisco J. de Silva Neto Claudio B.C. Silva, Miguel J. Borges Filho. Critério para a seleção de medidores multifásicos na petrobrás. Boletim técnico, Petrobras, jan/dez 1999.
- [9] Pertti Vainikainen Ebbe G. Nyfors. *Industrial Microwave Sensors*. Artech House, INC., 1989.
- [10] Sidnei Noceti Filho. *Filtros Seletores de Sinais*. Editora da UFSC, 2003.
- [11] Nathan Ida. *Microwave NDT*. Kluwer Academic Publisher, 1992.
- [12] Texas Instruments. *Op Amps for Everyone*. Texas Instruments.
- [13] Andy W. Jamieson. Multiphase metering - the challenge of implementation. *16th North Sea Flow Measurement Workshop*, 1998.

- [14] Eivind Dykesteen John Amdal, Harald Danielsen. Handbook of multiphase metering. Technical report, The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement.
- [15] Martyn John Key. *Gas Microstructure X-Ray Detectors and Tomographic Multiphase Flow Measurement*. PhD thesis, University of Surrey, 1999.
- [16] Mamoru Ishii Lefteri H. Tsoukalas and Ye Mi. A neurofuzzy methodology for impedance-based multiphase flow identification. *Engng. Applic. Artif. Intell.*, 10(6):545,555, 1997.
- [17] W. Merzkirch M. Schneider, F. Peters. Influence of velocity profile and turbulence on cross-correlation-based flow metering.
- [18] Modbus-IDA. Modbus application protocol specification v1.1b. <http://www.modbus.org>.
- [19] Modbus-IDA. Modbus messaging on tcp/ip implementation guide v1.0b. <http://www.modbus.org>.
- [20] Ebbe Gustaf Nyfors. *Cylindrical Microwave Resonator Sensors For Measuring Materials Under Flow*. PhD thesis, Helsinki University of Technology, 2000.
- [21] Inc Omega Engineering. *Transactions in Mesurement and Control - Volume IV - Flow and Level Measurement*, volume IV of *Transactions in Mesurement and Control*. Omega Engineering, Inc.
- [22] Emilio E. Paladino and Clovis R. Maliska. Multi-phase flow modelling in differential pressure flow meters. *Proceedings of the ENCIT 2002*, 2002.
- [23] David M. Pozar. *Microwave Engineering*. John Wiley adn Sons, INC., 1998.
- [24] Nilesh Rajbharti. The microchip tcp/ip stack. Technical report, Microchip Technology Inc.
- [25] Ulrich L. Rohde and David P. Newkirk.
- [26] Andrzej W. Kraszewski Samir Trabelsi and Stuart O. Nelson. Phase-shift ambiguity in microwave dielectric properties measurements. *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 49(1), February 2000.
- [27] Alexander S. Sovlukov and Victor I. Tereshin. Measurement of liquefied petroleum gas quantity in a tank by radio-frequency techniques. *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement*, 53(4), August 2004.
- [28] Steve Winder. *Analog and Digital Filter Design*. Newnes, second edition edition, 2002.