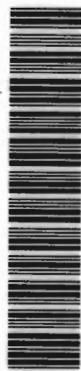


DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA A MEDIDA DE DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE DE UM LÍQUIDO

Paulo Eduardo Silveira

DEDALUS - Acervo - EESC



31100006933

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento

ORIENTADOR: Prof. Dr. Woodrow Nelson Lopes Roma

São Carlos

1997



Class. Tese. - EESC
Curt. 5636
Tombo T 0020/98

311 00006933

S/S 942937

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

S587d Silveira, Paulo Eduardo
Desenvolvimento de instrumentação para a medida de deformações na superfície de um líquido / Paulo Eduardo Silveira. -- São Carlos, 1997.
Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.
Área: Hidráulica e Saneamento
Orientador: Prof. Dr. Woodrow Nelson Lopes Roma
1. Instrumentação opto-eletrônica. 2. Ondas superficiais. 3. Deformações superficiais. 4. Renovação superficial. 5. Reaeração superficial. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **PAULO EDUARDO SILVEIRA**

Dissertação defendida e aprovada em 23-9-1997
pela Comissão Julgadora:



Prof. Titular **WOODROW NELSON LOPES ROMA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Titular **MARCIUS FANTOZZI GIORGETTI**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Titular **MARIO PINOTTI JUNIOR**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDRHY**
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento



Prof. Titular **JOÃO VITOR MOCCELLIN**
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação
em exercício

Aos meus pais,
o saudoso Rubens e a D. Anna com seu insistente "Termina isto, filho"

Agradecimentos

Ao Prof. Woodrow Roma pela orientação e com quem conheci e aprendi o significado da frase “não enveredar por caminhos sem fim em trabalhos experimentais”.

Ao CNPq pela bolsa concedida.

À Solange e ao Paulo, cuja amizade e alegria tornam a rotina um pouco agradável.

Ao professor Marcius, pelas sempre bem vindas sugestões.

Ao pessoal do laboratório, em especial ao Celso e Laíze pela convivência gratificante e os incontáveis cafés.

Ao Antenor, pelo incentivo crítico e preciso dentro e fora do laboratório.

Ao Sr. Wagner Lamon, o grande responsável pelas montagens eletrônicas e mecânicas, pelas boas idéias, cuja dedicação, incentivo e amizade facilitaram este trabalho.

Ao Sílvio e Walter, pela grande amizade e ajuda a qualquer hora, neste e em outros assuntos.

Em especial, à Flávia, companheira incansável na convivência diária que me emprestou a determinação indispensável à finalização de um trabalho. A você, todo o meu amor.

Sumário

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas.....	iii
Lista de Símbolos.....	iv
Lista de Siglas.....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT	viii
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
3.1 - Conceitos de ótica	10
3.2 - Ondas superficiais	23
3.3 - Análise de Fourier.....	28
4 - METODOLOGIA E CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	33
4.1 - A sonda ótica	33
4.2 - O sistema de aquisição de dados.....	37
4.3 - A montagem experimental	39
4.4 - O programa de controle	41
4.5 - Método para calibração estática.....	45
4.6 - Método para calibração dinâmica.....	47
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	51

5.1 - Calibração estática	51
5.2 - Calibração dinâmica	59
6 - CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
APÊNDICE 1 - Notação Exponencial.....	77
APÊNDICE 2 - Espectro de emissão do led infravermelho..	79
APÊNDICE 3 - Esquemas elétricos.....	80
APÊNDICE 4 - Disquete demonstrativo	83
Listagem do programa fonte	84
APÊNDICE 5 - Curva de Calibração do conversor A/D	88

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - Feixe de luz atravessando uma interface	10
FIGURA 3.2 - Ângulo limite de incidência	12
FIGURA 3.3 - Campos elétrico e magnético ortogonais de uma onda eletromagnética	14
FIGURA 3.4 - Onda eletromagnética com campo elétrico normal (perpendicular) ao plano de incidência.	16
FIGURA 3.5 - Onda eletromagnética com campo elétrico pertencente (paralelo) ao plano de incidência.	17
FIGURA 3.6 - Áreas projetadas de um feixe incidente numa interface ...	18
FIGURA 3.7 - Transmitância e Reflectância versus ângulo de incidência (polarização paralela ao plano de incidência).....	19
FIGURA 3.8 - Transmitância e Reflectância versus ângulo de incidência (polarização normal ao plano de incidência).....	20
FIGURA 3.9 - Diagrama de propagação de uma onda progressiva	24
FIGURA 3.10 - Representação no domínio do tempo e da frequência de um sinal periódico.....	29
FIGURA 3.11 - Espectro contínuo de um pulso de duração d	31
FIGURA 4.1 - Diagrama de blocos - Sonda Ótica	34
FIGURA 4.2 - Diagrama de blocos da placa de aquisição e controle	39
FIGURA 4.3 - Diagrama esquemático da montagem experimental	41
FIGURA 4.4 - O parafuso limnimétrico	42

FIGURA 4.5 - Tela de execução do programa	44
FIGURA 4.6 - Filmagem de uma onda completa.....	48
FIGURA 4.7 - Sequência de quadros típica das filmagens	49
FIGURA 5.1 - Curva de calibração estática - sonda aberta.	54
FIGURA 5.2 - Curva de calibração estática - sonda semi confinada	56
FIGURA 5.3 - Curva de calibração estática - sonda confinada.....	58
FIGURA 5.4 - Ondas típicas geradas no canal - pontos do padrão	60
FIGURA 5.5 - Medições típicas obtidas com a sonda confinada	61
FIGURA 5.6 - Resposta da sonda aberta.....	62
FIGURA 5.7 - Resposta da sonda semi confinada.....	62
FIGURA 5.8 - Resposta da sonda confinada	63
FIGURA 5.9 - Resposta da sonda semi confinada - onda com frequência 1,36 Hz	64
FIGURA 5.10 - FFT de uma onda de 1,57 Hz - sonda aberta.....	65
FIGURA 5.11 - FFT de uma onda de 1,57 Hz - padrão.....	66
FIGURA 5.12 - FFT de uma onda de 1,57 Hz - sonda semi confinada ...	66
FIGURA 5.13 - FFT de uma onda de 1,57 Hz - sonda confinada	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 - Calibração estática - emissor aberto	53
TABELA 5.2 - Calibração estática - emissor semi confinado	55
TABELA 5.3 - Calibração estática - emissor confinado.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - área
- A_0 - área projetada
- A_s - área efetiva
- a_n - coeficiente de Fourier
- \vec{B} - vetor densidade de fluxo magnético
- B_0 - amplitude do vetor \vec{B}
- b_n - coeficiente de Fourier
- C - concentração, celeridade
- C_0 - concentração inicial
- C_s - concentração de saturação
- \vec{E} - vetor campo elétrico
- E_0 - amplitude do vetor campo elétrico, coeficiente de Fourier
- E_n - coeficiente de Fourier
- f - frequência
- g - aceleração da gravidade
- \vec{H} - vetor intensidade de campo magnético
- h - altura, profundidade
- I - irradiância
- \vec{J} - vetor densidade de corrente
- k - número de onda
- k_2 - coeficiente de reaeração

k_L	- coeficiente de transferência de massa
L	- comprimento de onda, leitura digital
n	- índice de refração
R	- reflectância
r	- coeficiente de amplitude de reflexão
\vec{S}	- vetor de Poynting
s	- taxa de renovação superficial
T	- transmitância, temperatura, período
t	- coeficiente de amplitude de transmissão, tempo
u	- velocidade na direção x
V	- volume
v	- velocidade na direção y
w	- velocidade na direção z
δ	- ciclo de trabalho
ϕ	- potencial de velocidades, ângulo de fase
ξ	- deslocamento vertical
θ	- ângulo genérico
ρ	- densidade volumétrica de carga elétrica
ϵ	- permissividade elétrica
μ	- permeabilidade magnética
ω	- frequência angular
ϖ	- frequência angular
η	- impedância intrínseca do meio
σ	- condutividade elétrica

LISTA DE SIGLAS

- A/D - conversor analógico digital
- D/A - conversor digital analógico
- DC - corrente contínua (*direct current*)
- DLL - *Dynamic Link Library*
- LDA - anemômetro laser (*Laser Doppler Anemometer*)
- PWM - modulação por largura de pulso
- TTL - lógica transistor - transistor (*transistor transistor logic*)

RESUMO

SILVEIRA, P.E. (1997). *Desenvolvimento de instrumentação para a medida de deformações na superfície de um líquido*. São Carlos, 1997. 88p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho foi orientado ao aprimoramento de um sistema para a quantificação da deformação da superfície livre de um líquido. A operação baseia-se nos fenômenos óticos da refração da luz estudados, neste trabalho, de acordo com a teoria eletromagnética, com base na qual se propõe um modelo matemático para descrever seu funcionamento. A sonda foi submetida a um procedimento de calibração estática e dinâmica em um canal retilíneo de laboratório, equipado com um gerador mecânico de ondas. Os ensaios contaram com instrumentação assistida por computador, toda a instrumentação utilizada neste procedimento é apresentada de forma detalhada no trabalho. Os resultados obtidos são analisados com o uso de técnicas matemáticas no domínio do tempo e da frequência.

Palavras-chave: instrumentação opto-eletrônica; ondas superficiais; deformações superficiais; renovação superficial; reaeração superficial

ABSTRACT

SILVEIRA, P.E. (1997). *Development of instrumentation for the measurement of deformations on the surface of a liquid*. São Carlos, 1997. 88p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This research effort was concerned with the improvement of a system for the measurement of deformation on the free surface of a liquid. The probe's operation is based on the optical phenomena of light refraction, studied, in this work, in accordance with the electromagnetic theory, upon which a mathematical model is proposed to describe its action. The probe was calibrated statically and dynamically with the use of a laboratory flume equipped with a wave generator. The tests counted with computer assisted instrumentation; all the particulars of the instrumentation are show with detail in the text. The results are analyzed with the use of mathematical techniques on the time and frequency domain.

Keywords: opto-eletronic instrumentation; free surface waves; free surface deformation; surface renovation; surface reaeration.

1 - INTRODUÇÃO

A transferência de oxigênio do ar atmosférico para corpos d'água, também conhecido por reaeração, têm recebido atenção de recentes pesquisas devido à sua influência na auto depuração de rios e lagos e no tratamento de efluentes industriais e domésticos.

O processo de reaeração é caracterizado pela transferência de moléculas de oxigênio presentes no ar atmosférico para o corpo líquido, transferência que ocorre através da superfície de contato, a interface ar - água.

Vários modelos matemáticos têm sido desenvolvidos afim de retratar a reaeração. Ainda não se obteve um modelo que seja incondicionalmente aceito pelos pesquisadores, mas por outro lado cada modelo é válido em determinadas condições. Entretanto, os autores concordam que a área da interface ar - água exerce grande influência no processo, e quando se consideram interfaces turbulentas, a área efetiva de contato se torna muito maior que a simplificação $A = V/h$ (onde A é a área projetada da interface, V , o volume de líquido e h é a profundidade), o que motiva a procura de um método para a medida da área efetiva de troca.

As medições de turbulência em meios líquidos pelos métodos tradicionais de anemometria de fio/filme quente e LDA (Laser Doppler Anemometer) não são aplicáveis na superfície embora sejam confiáveis pouco abaixo desta. Já a sonda ótica desenvolvida por **Roma (1988)**, que opera segundo os fenômenos óticos que ocorrem quando um feixe de luz atravessa a interface entre dois meios refringentes diferentes, responde

segundo a deformação da superfície, ou seja, da área de contato do corpo líquido com o ar.

O presente trabalho visa o aperfeiçoamento e a calibração estática e dinâmica da sonda ótica aplicada à medição de parâmetros relacionados a perturbações superficiais em corpos d'água (ondas unidimensionais) geradas mecanicamente em canal de laboratório.

O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre temas relacionados à reeração e a preocupação de pesquisadores de outras áreas na medição de parâmetros que melhor quantifiquem este fenômeno.

Toda a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento deste trabalho encontra-se no Capítulo 3, onde são apresentados conceitos clássicos de ótica geométrica e uma abordagem eletromagnética do estudo da propagação da luz. Neste capítulo também é apresentada a terminologia e o equacionamento envolvido no estudo da propagação de ondas superficiais em corpos d'água. Complementarmente, a análise de Fourier é revisitada de forma a fornecer os requisitos básicos para a análise de fenômenos no domínio da frequência.

A montagem experimental e a metodologia utilizada são introduzidas no Capítulo 4 que descreve os instrumentos utilizados e a bancada de ensaios.

Os resultados dos experimentos são apresentados e analisados no Capítulo 5 à luz de análises no domínio do tempo e da frequência.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas e sugestões para a continuidade do desenvolvimento de instrumentos desta linha.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de transporte de massa em interfaces gás líquido começou a ser cientificamente investigado por pesquisadores relacionados à área química, afim de melhor quantificar este fenômeno. O transporte de massa em interfaces deste tipo pode ser separado em duas situações principais, uma quando a fase líquida e a fase gasosa apresentam alta reatividade entre si, e outra quando os componentes da fase gasosa apresentam baixa reatividade com a fase líquida e encontram-se dissolvidos em pequena quantidade. A primeira situação é governada por fenômenos físicos e químicos e a segunda quase que exclusivamente por fenômenos físicos, sendo esta a de interesse para o presente trabalho. Mais especificamente, o interesse é centrado na transferência de oxigênio do ar atmosférico para corpos d'água e no coeficiente de reaeração, conhecido por k_2 .

Considerando a água como fase líquida e a fase gasosa composta de gases de baixa solubilidade em água, como o oxigênio, **Adeney e Becker**, citados em **Barbosa (1989)**, consideram que o processo pode ser considerado como uma reação de primeira ordem e propõem um modelo onde a concentração de gás no líquido é proporcional à diferença entre a concentração atual e a concentração de saturação C_s , ou matematicamente:

$$\frac{dC}{dt} = k_L \frac{A}{V} (C_s - C) \dots\dots\dots (2.1)$$

O modelo considera que a concentração é uniforme por todo o volume. Considerando-se que no início do processo o líquido apresente

uma concentração inicial C_0 e que passado um tempo suficientemente grande a concentração atinja o valor de saturação C_s , tem-se a seguinte solução para a equação (2.1):

$$(C_s - C) = (C_s - C_0) \cdot \exp\left(-\frac{k_L A t}{V}\right) \dots\dots\dots (2.2)$$

Quando a equação (2.2) é utilizada para descrever a absorção de oxigênio do ar por um corpo d'água com déficit de oxigênio dissolvido (OD) ela pode ser reescrita de outra forma:

$$(C_s - C) = (C_s - C_0) \cdot \exp(-k_2 t) \dots\dots\dots (2.3)$$

onde k_2 é o coeficiente de reaeração já citado e:

$$k_2 = k_L \frac{A}{V} \dots\dots\dots (2.4)$$

Nota-se que k_2 é dependente da área interfacial, do volume de líquido e do coeficiente k_L . Nas determinações experimentais de k_2 não é relevante o conhecimento destas grandezas, porém na validação de modelos matemáticos de estimativa do parâmetro elas são de fundamental importância.

Diversos autores propuseram modelos matemáticos para a determinação de k_L e de k_2 . **Lewis e Whitman (1923)** apresentam um modelo que se tornou classicamente conhecido por Modelo dos Dois Filmes, um modelo bastante simplificado que não incorpora nenhuma característica fluido-dinâmica.

Com o intuito de incluir características do escoamento nos modelos, diversos trabalhos foram realizados quase sempre controversos que, embora tenham trazido contribuições importantes, quase sempre transferiam o problema da determinação de k_L para outra grandeza.

Higbie (1935) desenvolveu o chamado modelo da penetração no qual elementos de volume saturados na superfície são trocados por outros

provenientes do corpo líquido, transportando o gás para a massa líquida.

Seguindo nesta direção **Danckwerts (1951)** modificou este modelo inserindo a taxa de renovação superficial s , entretanto o sistema deverá estar operando em condições hidrodinâmicas estacionárias, ou seja, s deve permanecer constante durante o processo, para que o modelo seja válido.

Metzger & Dobbins (1967) relatam a dificuldade de medida da área efetiva de contato na interface, e relacionam a área efetiva A_e com a simplificação $A_o = V/H$ que é a projeção horizontal da área real, através de uma constante de proporcionalidade.

Diversos outros autores modificaram e combinaram estes modelos que, para obter boas correlações com resultados experimentais, tiveram a complexidade aumentada.

A tentativa de se realizar uma medida indireta, ou uma estimativa, de k_2 levou alguns pesquisadores a estudarem analogias entre reaeração e outros fenômenos físicos. **Giorgetti & Giansanti (1983)** avaliaram o desgaste de sondas solúveis em função da intensidade turbulenta próxima à superfície em águas correntes, correlacionando os resultados dos desgastes com o coeficiente de reaeração. **Barbosa (1989)** utilizou a técnica de traçadores gasosos e correlacionou o coeficiente de dessorção do etileno com o coeficiente de reaeração em tanques agitados por pás rotativas em variadas condições de agitação, trabalho que forneceu resultados com boa repetibilidade e confiabilidade.

A influência de ondas na transferência gasosa foi investigada por **Daniil & Gulliver (1991)** procurando associar características das ondas com o coeficiente de transferência e com a formulação utilizada concluíram que o coeficiente é proporcional à velocidade vertical da onda. Os dados apresentados mostram que quando ocorre a quebra da superfície, arrebatada, o coeficiente é fortemente aumentado. Para a quantificação

dos parâmetros associados às ondas geradas foram utilizados métodos fotográficos.

A turbulência da fase líquida é então fator determinante no processo de reaeração, daí a necessidade de se conhecer a estrutura turbulenta que está associada ao sistema. **Thompson & Turner (1975)** utilizaram grades oscilantes em tanques como forma de produzir turbulência sem produzir escoamento médio. Para a medida das velocidades turbulentas utilizam um anemômetro de fio quente, que é girado no tanque com velocidade constante para produzir sua própria velocidade média e relatam a influência de bolhas e partículas que contaminam a sonda, alterando sua sensibilidade.

Também utilizando grades oscilantes, **Hopfinger & Toly (1976)** descrevem a estrutura turbulenta e sua propagação a partir de sua formação na grade. Determinaram ainda que a energia turbulenta decai aproximadamente com o quadrado da distância em relação à grade.

Com um anemômetro de filme quente, **Brumley & Jirka (1987)** realizaram medidas das velocidades turbulentas vertical e horizontal simultaneamente utilizando montagem semelhante as de **Thompson & Turner (1975)** e de **Hopfinger & Toly (1976)**, tendo trabalhado nas camadas próximas à superfície.

Contando com a possibilidade de quantificar parâmetros turbulentos procurou-se estabelecer dependências entre a reaeração e turbulência independentemente da forma de geração da turbulência, pretendendo-se chegar a resultados que pudessem ser aplicados em campo.

O instrumento mais utilizado neste tipo de quantificação foi o anemômetro de fio/filme quente, dispositivo sensível a impurezas sólidas presentes na água. Outro instrumento é o anemômetro laser, bastante preciso porém caro e não portátil, tornando-o impraticável para uso em cursos naturais.

Roma (1988) desenvolveu um novo tipo de sonda para investigar a deformação da superfície da lâmina d'água, e não em camadas abaixo desta. A sonda opera segundo fenômenos óticos de refração quando um feixe de luz atravessa a interface entre dois meios refringentes diferentes, no caso a água e o ar. Com a sonda ótica operando com um sistema de aquisição de dados com computador conseguiu uma previsão da relação de dependência entre seu sinal de saída, na forma de tensão elétrica, e o coeficiente de reaeração obtido em um tanque agitado por grade oscilante.

Carreira (1995) trabalhou no aprimoramento da sonda ótica para medir a deformação superficial em tanque cilíndrico agitado por sistema de pás rotativas, obtendo repetibilidade nos dados coletados, além de correlação entre o coeficiente de transferência de massa k_L e uma macro escala de turbulência definida em função dos sinais elétricos obtidos com a sonda ótica. Em laboratório preocupou-se em controlar as condições de umidade relativa e a temperatura do ambiente, fatores que influenciam no processo de absorção de oxigênio atmosférico pela água.

Mello (1996), também trabalhou com o sistema ótico correlacionando as medidas deste com o coeficiente de reaeração em tanques agitados por grades oscilantes.

Quanto à influência da temperatura, diversos autores estudaram seus efeitos e na atualidade o modelo mais aceito é o da equação (2.5) com $\theta=1.024$, citado em **Barbosa (1989)**, **Chao et alii (1987)** e **Daniil & Gulliver (1989)**.

$$k_2(T) = k_2(20^\circ)\theta^{(T-20)} \dots\dots\dots (2.5)$$

A importância da determinação da área interfacial em reatores químicos de duas ou mais fases é relatada por **Cieszkowski e Dylag (1994-1)** que propõem a aplicação de uma metodologia denominada método do sulfito na determinação deste parâmetro em tanques mecanicamente agitados. Os autores relatam a existência de outros

métodos como a fotografia holográfica, técnicas de ultra-som e anemometria laser. Posteriormente, aplicando o método proposto, os autores investigam a influência de partículas sólidas na área interfacial e sua relação com a potência fornecida ao agitador (**Cieszkowski e Dylag (1994-2)**).

Pesquisadores envolvidos na caracterização de ondas descrevem o uso da fotografia, como **Maxworth (1976)** que investigou a colisão de ondas solitárias produzidas em canal de laboratório através de fotogramas tomados à uma taxa de 64 quadros por segundo e posteriormente projetados para medição manual da elevação da lâmina d'água. Por onda solitária entende-se uma única onda se propagando, diferentemente de ondas periódicas.

Estudos mais recentes das interações entre ondas fazem uso da transformada de Fourier para análise no domínio da frequência tanto em trabalhos experimentais como em teóricos e de simulação numérica.

Fenton e Rienecker (1982) desenvolveram um método numérico baseado em séries de Fourier para resolver equações não lineares que governam o movimento de fluídos com superfície livre e o aplicam no estudo de interações entre ondas solitárias. Devido à limitação do número de termos da série adotada, o método perde acurácia quando as ondas apresentam cristas agudas ou ocorre arrebentação.

Interessados no estudo de interações entre ondas, **Chu, Long e Phillips (1992)** realizaram medições destas interações entre um grupo de ondas longas geradas mecanicamente, de natureza determinística, e ondas curtas e aleatórias geradas por vento soprando sobre a superfície. Os autores relatam o uso de uma sonda capacitiva de boa sensibilidade e linearidade para as medições das ondas; entretanto, não apresentam uma descrição da mesma. Os resultados experimentais são tratados à luz de análise frequencial, através da qual são estudadas alterações ocorridas na distribuição espectral das ondas geradas pelo vento devido à passagem do grupo de ondas longas.

Estudando a influência de barras retangulares submersas na propagação de ondas superficiais, **REY et alli (1992)** utilizam uma técnica de detecção ótica da elevação da onda baseada em um feixe de laser colimado incidindo perpendicularmente à superfície. A detecção é feita com um detetor linear de 256 pixels posicionado obliquamente em relação ao feixe e a elevação é calculada a partir do deslocamento do feixe sobre o detetor.

3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 - CONCEITOS DE ÓTICA

Quando um feixe de luz incide em uma superfície de separação entre dois meios refringentes diferentes, uma parcela do feixe é refletida, continuando no mesmo meio do incidente e uma outra parcela é refratada, passando ao outro meio. Na figura 3.1 é ilustrado este fenômeno, e, também são definidos os ângulos e nomenclaturas utilizados no equacionamento do mesmo.

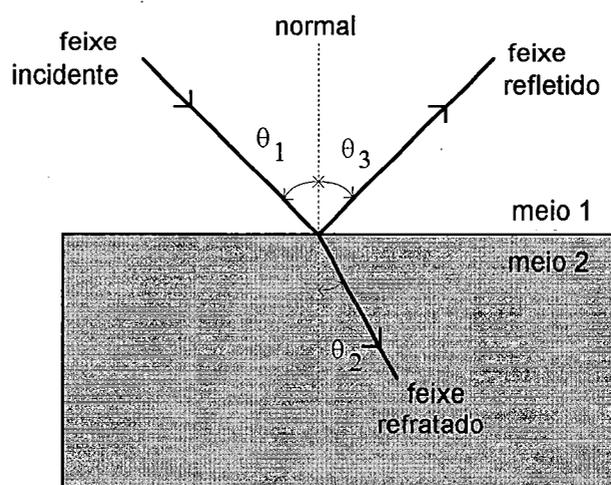


FIGURA 3.1 - Feixe de luz atravessando uma interface

Os feixes incidente, refletido e refratado pertencem todos ao mesmo plano e os ângulos θ_1 , θ_2 e θ_3 são medidos em relação ao eixo normal à superfície e são respectivamente os ângulos de incidência, de refração e reflexão, e ainda:

- o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão $\rightarrow \theta_1 = \theta_3$
- lei de Snell $\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = n_{21}$ (3.1)

Onde n_{21} é conhecido por índice de refração do meio 2 em relação ao meio 1 e representa também a relação entre as velocidades da luz quando esta se propaga no meio 1 e no meio 2.

A velocidade da luz no meio é determinada por:

$$v_a = \sqrt{\frac{1}{\mu_a \cdot \epsilon_a}} \dots\dots\dots (3.2)$$

Onde μ_a é a permeabilidade magnética e ϵ_a a permissividade elétrica do meio.

Para o caso da interface ar - água, como pode ser visto em **Chen (1983)**, o índice de refração da água em relação ao ar, n_a , é calculado por:

$$n_a = \sqrt{\frac{\mu_a \cdot \epsilon_a}{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} \dots\dots\dots (3.3)$$

E como $\epsilon_{ar} \cong \epsilon_0$, $\epsilon_{\acute{a}gua} \cong 1.77 \cdot \epsilon_0$ e $\mu_{ar} \cong \mu_{\acute{a}gua} \cong \mu_0$, temos que $n_{ar} \cong 1$ e $n_{\acute{a}gua} \cong 1.33$ em relação ao vácuo, e finalmente o índice de refração da água em relação ao ar será $n_a = \frac{n_{\acute{a}gua}}{n_{ar}} \cong 1.33$. Assim a lei de Snell para a interface ar - água será:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = n_a = 1.33 \dots\dots\dots (3.4)$$

Onde o meio 1 é o ar e o meio 2 é água, podendo-se verificar que a luz se propaga com velocidade maior no ar do que na água, revelando a água mais refringente que o ar.

Quando um feixe passa de um meio mais refringente para um outro menos refringente, o feixe refratado afasta-se da normal, com relação ao feixe incidente, e à medida que o ângulo de incidência aumenta, chega-se a uma situação limite em que o ângulo de refração é de 90° . Aumentado ainda mais o ângulo de incidência, não ocorre mais refração e todo o raio se reflete. A figura 3.2 apresenta um esquema deste fenômeno. Considerando um feixe se propagando da água para o ar, temos que o ângulo limite de incidência será $\theta_{incm\acute{a}x} = 48.7^\circ$.

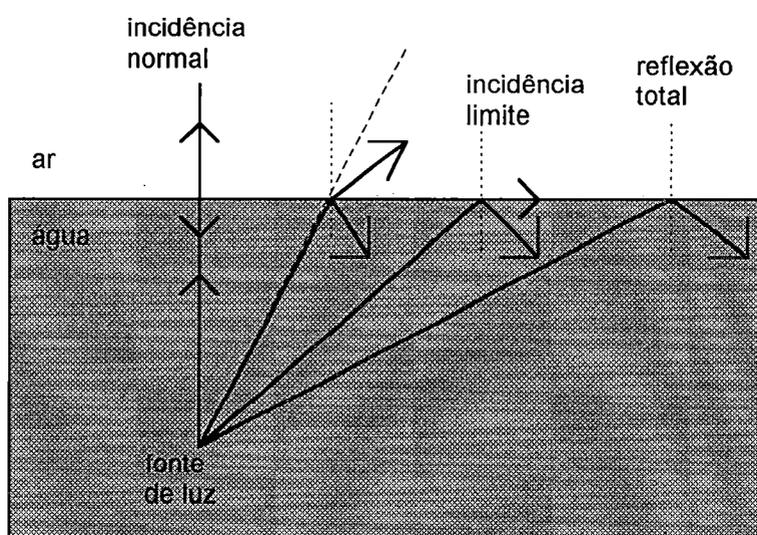


FIGURA 3.2 - Ângulo limite de incidência

Convém ressaltar que o fenômeno não ocorre quando o feixe propaga-se do ar para a água.

Embora as considerações teóricas acima descrevam o processo de refração e reflexão nada é informado quanto à parcela da intensidade do feixe incidente que é refratada e a parcela que é refletida. Para estudar este comportamento é necessário recorrer à teoria de Eletromagnetismo e estudar a luz como uma onda eletromagnética. As equações de Maxwell descrevem o comportamento de campos elétricos e magnéticos no espaço livre, e para os propósitos deste trabalho, podem descrever também estes comportamentos no ar atmosférico. Considerando que no ar atmosférico a permeabilidade magnética μ e a permissividade elétrica ϵ têm os mesmos valores que no vácuo e ainda que a densidade volumétrica de cargas ρ é zero, as equações de Maxwell na forma diferencial são as seguintes:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon = 0 \dots\dots\dots (3.6)$$

$$\nabla \times \vec{B} = -\mu\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J} \dots\dots\dots (3.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \dots\dots\dots (3.8)$$

Um feixe de luz na forma de uma onda harmônica plana propagando-se na direção do versor \vec{e}_x , tem seu campo elétrico descrito pela equação abaixo:

$$\vec{E}_y(x, t) = E_{0y} \cos[\omega(t - x/v) + \theta] \dots\dots\dots (3.9)$$

Aplicando a primeira relação de Maxwell, $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$, podemos obter a densidade de fluxo magnético associada ao campo elétrico da onda:

$$\bar{B}_z = -\int \frac{\partial \bar{E}_y}{\partial x} dt \dots\dots\dots (3.10)$$

$$\bar{B}_z(x, t) = \frac{1}{v} E_{0y} \cos[\omega(t - x/v) + \theta]$$

$$\bar{B}_z(x, t) = B_{0z} \cos[\omega(t - x/v) + \theta] \dots\dots\dots (3.11)$$

Nota-se que o campo magnético associado tem direção perpendicular ao campo elétrico, possui a mesma dependência temporal e a mesma fase. Verifica-se também que o produto vetorial de $\bar{E} \times \bar{B}$ apresenta componente apenas na direção de propagação do versor \bar{e}_x . Um feixe de luz, de natureza eletromagnética, que se propaga de acordo com as características acima é dito polarizado, uma vez que apresenta somente uma, e bem definida, direção para o campo magnético, e portanto para o campo elétrico associado. A figura 3.3 ilustra os campos magnético e elétrico associados para um feixe de luz polarizado.

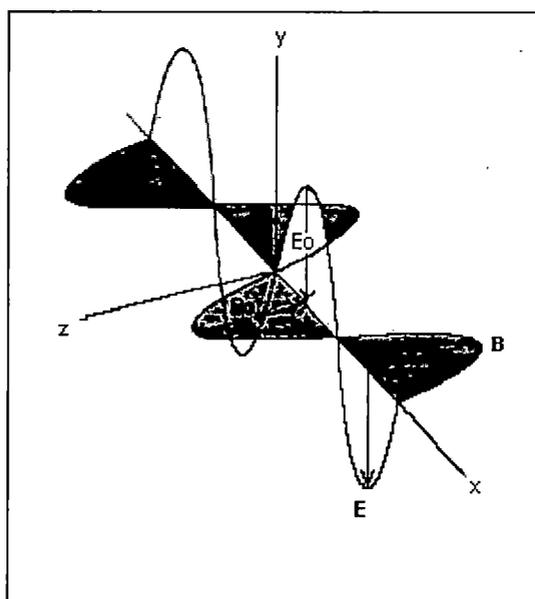


FIGURA 3.3 - Campos elétrico e magnético ortogonais de uma onda eletromagnética

Uma fonte de luz ordinária consiste de um grande número de emissores de radiação aleatoriamente orientados. Cada emissor é um átomo excitado que emite um trem de ondas polarizado por aproximadamente 10 ns, sendo a próxima emissão deste mesmo átomo imprevisível.

De acordo com este mesmo procedimento, novos trens de onda estão sendo constantemente emitidos por outros átomos com polarizações diferentes e de maneira imprevisível.

Este tipo de onda é conhecido como luz não polarizada ou luz natural, porém toda forma de luz pode ser representada por duas ondas polarizadas linearmente ortogonais (**HECHT & ZAJAC (1979)**).

Quando um feixe de luz atravessa uma interface entre dois meios diferentes define-se plano de incidência como o plano que contém o feixe incidente e é perpendicular à interface. Como dito anteriormente, os feixes incidente, refratado e refletido pertencem ao mesmo plano, e portanto pertencem ao plano de incidência.

Pode-se então investigar um feixe de luz incidindo em uma interface estudando o comportamento de duas componentes ortogonais sabendo que qualquer outra polarização estará entre estas duas situações extremas, mostradas nas figuras 3.4 e 3.5:

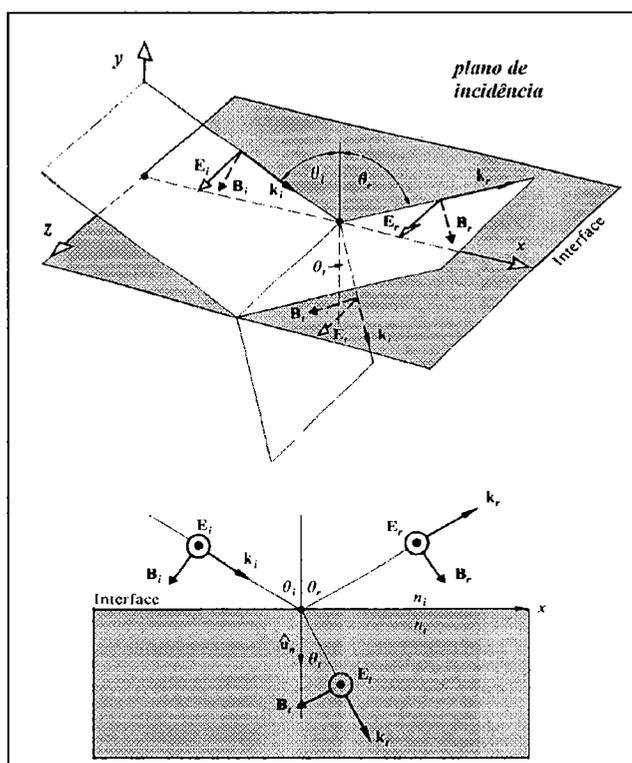


FIGURA 3.4 - Onda eletromagnética - campo elétrico normal (perpendicular) ao plano de incidência.

A potência por unidade de área de um feixe incidindo em uma superfície é dada pelo vetor de Poynting, definido por:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \dots\dots\dots (3.12)$$

Onde $\vec{H} = \vec{B}/\mu$ é a intensidade de campo magnético.

A densidade de fluxo radiante, em W/m^2 , que incide na interface (irradiância) é o valor médio de \vec{S} em um período:

$$I = \langle \vec{S} \rangle = \frac{v\epsilon}{2} E_0^2 \dots\dots\dots (3.13)$$

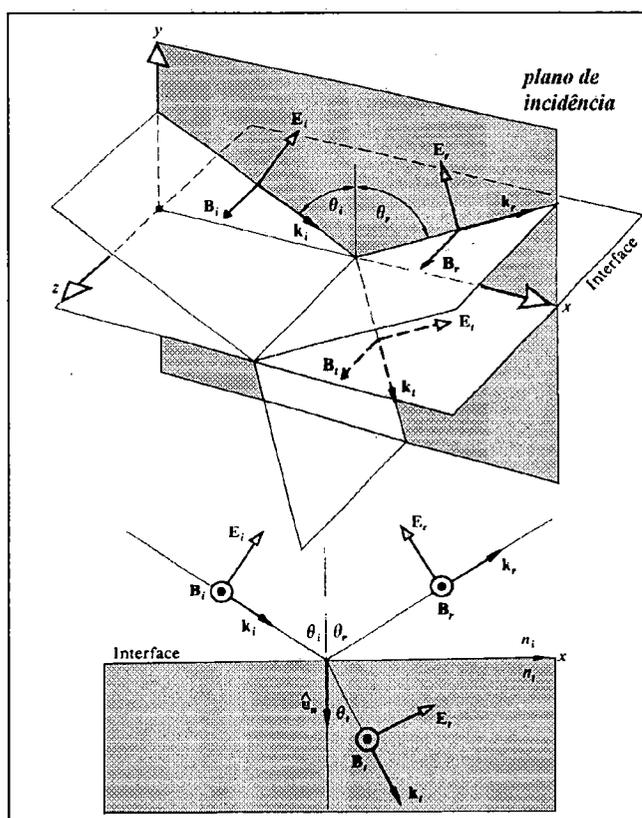


FIGURA 3.5 - Onda eletromagnética - campo elétrico pertencente (paralelo) ao plano de incidência.

E as intensidades transmitidas e refletidas serão proporcionais às áreas projetadas em suas respectivas direções, conforme figura 3.6 e definem-se os termos reflectância R como a razão entre o fluxo, ou potência, refletido e o fluxo incidente, e similarmente, transmitância T como a razão entre o fluxo refratado e o incidente.

De acordo com a figura 3.6 e como pode ser verificado em **HECHT & ZAJAC (1979)** :

$$R \equiv \frac{I_r \cos \theta_r}{I_i \cos \theta_i} = \frac{I_r}{I_i} = r^2 \dots \dots \dots (3.14)$$

$$T \equiv \frac{I_t \cos \theta_t}{I_i \cos \theta_i} = \left(\frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} \right) t^2 \dots \dots \dots (3.15)$$

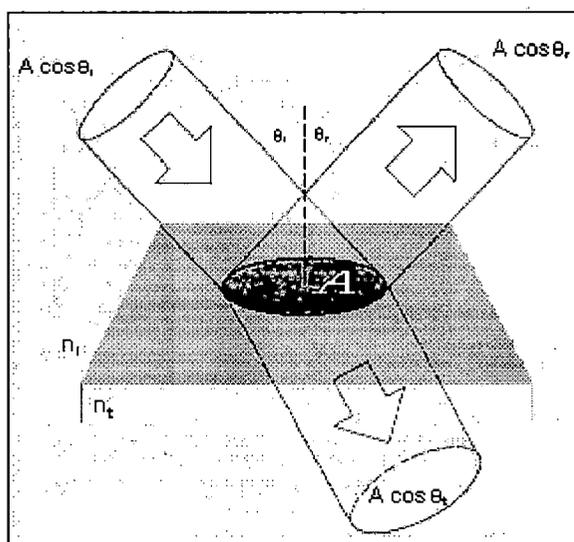


FIGURA 3.6 - Áreas projetadas de um feixe incidente em uma interface

Os coeficientes r e t , chamados de coeficientes de amplitude de reflexão e transmissão dependem da polarização da onda incidente. Desta forma tem-se uma transmitância e reflectância diferentes para os feixes com polarização paralela e perpendicular ao plano de incidência. Ainda de acordo com **HECHT & ZAJAC (1979)** :

Situação 1 - Polarização com campo elétrico paralelo ao plano de incidência:

$$r_{//} \equiv \left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_{//} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \dots\dots\dots (3.16)$$

$$t_{//} \equiv \left(\frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)_{//} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \dots\dots\dots (3.17)$$

Situação 2 - Polarização com campo elétrico perpendicular ao plano de incidência:

$$r_{\perp} \equiv \left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_{\perp} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \dots\dots\dots (3.18)$$

$$t_{\perp} \equiv \left(\frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)_{\perp} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \dots\dots\dots (3.19)$$

Finalmente, conhecendo o índice de refração do ar e da água e considerando que o feixe se propaga do ar em direção a água, para efeito de cálculo teremos $n_i = 1,00$ e $n_t = 1,33$ com o auxílio das equações acima apresentamos de forma gráfica, nas figuras 3.7 e 3.8, a reflectância e transmitância como função do ângulo de incidência.

Como relações complementares podemos citar duas, onde evidentemente está desprezada a absorção de energia na interface :

$$R_{//} + T_{//} = 1 \quad \text{e} \quad R_{\perp} + T_{\perp} = 1 \dots\dots\dots (3.20)$$

Analisando os gráficos de reflectância e transmitância para este caso particular, verifica-se que para ângulos de incidência de 0° a 60° a transmitância varia somente de 100% a 90% .

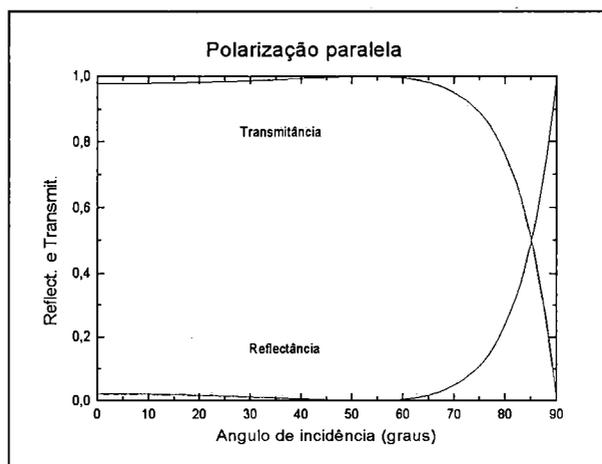


FIGURA 3.7 - Transmitância e Reflectância em função do ângulo de incidência (polarização paralela ao plano de incidência)

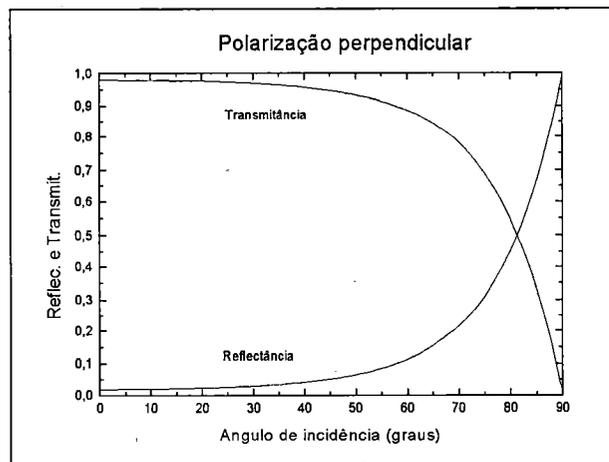


FIGURA 3.8 - Transmitância e Reflectância em função do ângulo de incidência (polarização normal ao plano de incidência)

A análise anterior não considerou a existência de perdas no meio de propagação, entretanto uma onda eletromagnética propagando-se em um meio dissipativo sofrerá uma atenuação que depende exclusivamente das características do meio. Para determinar a lei de decaimento da intensidade será utilizada a onda plana em notação exponencial (ver Apêndice 1), quando as relações de Maxwell podem ser rescritas para este caso particular da seguinte maneira:

$$\vec{E}_y(x, t) = E_{0y} \cdot e^{-jx\omega/v} \dots\dots\dots (3.21)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \dots\dots\dots (3.22)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \dots\dots\dots (3.23)$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\varepsilon \vec{E} + \vec{J} \dots\dots\dots (3.24)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \dots\dots\dots (3.25)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \dots\dots\dots (3.26)$$

Admitindo ausência de fontes de corrente, a densidade de corrente \vec{J} será decorrente da corrente de condução originada do campo elétrico presente e para meios isotrópicos a lei de Ohm estabelece que:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \dots\dots\dots (3.27)$$

Aplicando a (3.22) em (3.21):

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= j\omega \epsilon \vec{E} + \sigma \vec{E} \\ \nabla \times \vec{H} &= j\omega \left(\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right) \vec{E} \dots\dots\dots (3.28) \end{aligned}$$

Definindo a permissividade complexa $\epsilon^* = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega}$ nota-se que a condutividade é responsável pela parte imaginária da permissividade complexa.

Substituindo (3.26) em (3.11):

$$\vec{H}_z = \frac{1}{\nu \mu} \vec{E}_y \dots\dots\dots (3.29)$$

Substituindo (3.1) em (3.29) considerando a permissividade complexa:

$$\vec{H}_z = \frac{\sqrt{\mu \epsilon^*}}{\mu} \vec{E}_y = \sqrt{\frac{\epsilon^*}{\mu}} \vec{E}_y = \frac{\vec{E}_y}{\eta^*} \dots\dots\dots (3.30)$$

Onde η^* é a impedância intrínseca do meio que, devido à sua natureza complexa, pode ser dividida nas componentes real e imaginária.

$$\eta^* = \eta_r + j\eta_i = |\eta^*| \exp(j\theta_1) = |\eta^*| \cdot e^{j\theta_1} \dots\dots\dots (3.31)$$

Voltando a notação exponencial:

$$\tilde{H}_z = \frac{E_{0y}}{|\eta^*|} \cdot e^{-jx\omega/v} \cdot e^{j\theta_1} \dots\dots\dots (3.32)$$

Substituindo (3.1) em (3.32) e definindo o número de onda como

$$k = \omega/v:$$

$$k = \omega/v = \omega\sqrt{\mu\epsilon^*} = k_r + jk_i \dots\dots\dots (3.33)$$

$$\tilde{H}_z = \frac{E_{0y}}{|\eta^*|} \cdot e^{-jk_r x} \cdot e^{-k_i x} \cdot e^{-j\theta_1} \dots\dots\dots (3.34)$$

E finalmente obtêm-se a irradiância através do valor médio do vetor de Poynting em um período, que mostra uma dependência exponencial da intensidade com a distância a partir o elemento irradiador.

$$I = \langle \vec{S} \rangle = \langle \vec{E} \times \vec{H} \rangle = \frac{1}{2\eta^*} E_{0y}^2 \cdot e^{-k_i x} \dots\dots\dots (3.35)$$

Esta equação será utilizada no modelamento da sonda desenvolvida para a medição da altura da lâmina de água entre um emissor de luz infravermelha e um foto detetor, onde será admitido que a impedância intrínseca e a amplitude do campo elétrico serão constantes e a constante de decaimento k_i será devida ao comportamento eletromagnético da água.

3.2 - Ondas Superficiais

O modelamento matemático para a propagação de ondas superficiais em corpos d'água apresenta-se de forma complicada devido à natureza complexa do fenômeno. As dificuldades são provenientes da irregularidade da forma da onda, da dissipação de energia e à turbulência, aumentado ainda mais quando ocorre arrebatamento das ondas. Desta forma, qualquer modelo matemático determinístico incluirá simplificações, e será aplicável em situações particulares.

Um tipo de onda bastante conhecida é a onda progressiva, uma evolução senoidal da lâmina d'água. A figura 3.9 mostra a forma e o modo de propagação de uma onda dita progressiva onde, considerando a onda propagando-se da esquerda para a direita, são definidas as seguintes grandezas:

h - profundidade da lâmina d'água.

L - comprimento da onda

A - amplitude

T - período

ω - frequência angular

C - velocidade de propagação horizontal, velocidade de fase ou celeridade

k - número de onda

$\xi(x,t)$ - deslocamento vertical da superfície

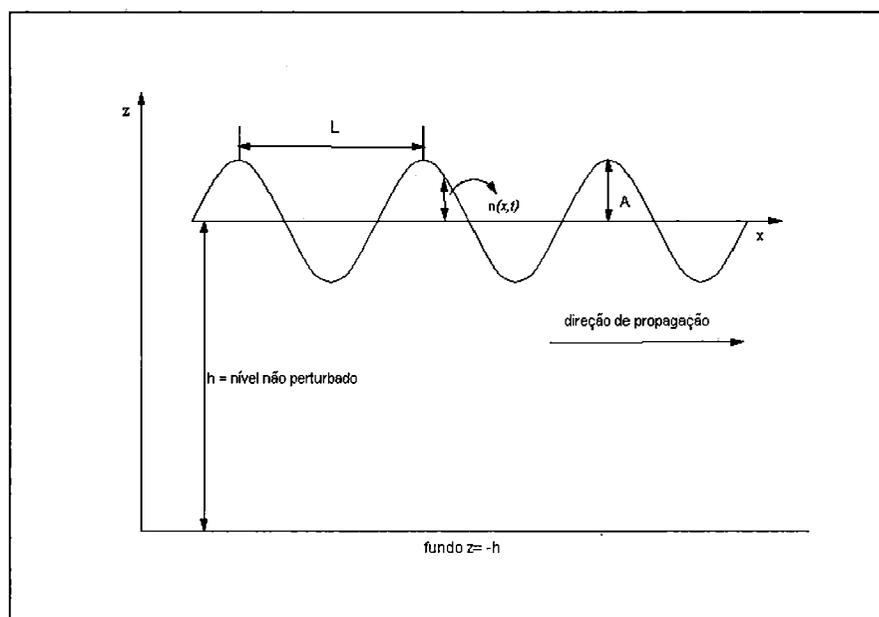


FIGURA 3.9 - Diagrama de propagação de uma onda progressiva

E são válidas as seguintes relações:

$$T = 1 / f = 2\pi / \omega \dots\dots\dots (3.36)$$

$$k = 2\pi / L \dots\dots\dots (3.37)$$

Considerando o movimento da água como irrotacional pode ser admite-se a existência de escoamento potencial, que no caso bidimensional e regime não permanente, será adicionado à conhecida equação de Bernoulli o termo não permanente $-\frac{\partial\phi}{\partial t}$, relacionado ao potencial de velocidades (**RAHMAN (1995)**):

$$-\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) = 0 \dots\dots\dots (3.38)$$

Para ondas de pequena amplitude, onde pode ser admitido que os movimentos são suficientemente pequenos, pode-se desprezar os termos de segunda ordem para a velocidade e a equação (3.38) torna-se:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz = 0 \dots\dots\dots (3.39)$$

Feitas tais considerações, a equação de Laplace para o potencial de velocidades deve ser satisfeita na região $-h \leq z \leq \xi(x,t)$ e $-\infty < x < +\infty$, ou seja:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \dots\dots\dots (3.40)$$

Considerando ainda o fundo impermeável e fixo, a velocidade na direção z será nula em $z = -h$, a equação de Laplace estará sujeita a esta condição de contorno:

$$w_{z=-h} = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0 \dots\dots\dots (3.41)$$

A equação pode então ser resolvida analiticamente pelo método de separação de variáveis e uma solução para o potencial de velocidades é (RAHMAN (1995)):

$$\phi = \frac{Ag \cosh k(z+h)}{\omega \cosh kh} \cos(kx - \omega t) \dots\dots\dots (3.42)$$

Da equação (3.38) sujeita à condição de contorno da superfície, onde $z = \xi(x,t)$, a pressão P é nula e desprezando o termo de segunda ordem, tem-se:

$$z = \xi(x,t) = \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \Big|_{z=\xi} \dots\dots\dots (3.43)$$

A condição de contorno $z=\xi$ para ondas de pequenas amplitudes pode ser simplificada para $z \approx 0$. Neste caso a solução para a equação acima é conhecida como onda progressiva que apresenta um perfil senoidal para a deformação da superfície da forma:

$$z = \xi(x, t) = \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \Bigg|_{z=0} = A \text{sen}(kx - \omega t) \dots\dots\dots (3.44)$$

Em **RAHMAN (1995)**, pode ser visto que para uma onda progressiva a celeridade será:

$$C^2 = \frac{g}{k} \tanh kh = \frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \dots\dots\dots (3.45)$$

Como, por definição, $C = L/T$, o comprimento de onda pode ser calculado numericamente para uma dada profundidade h e período T com o auxílio da equação (3.45):

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \dots\dots\dots (3.46)$$

As ondas são classificadas em três categorias de acordo com a relação entre a profundidade e o comprimento de onda:

- $h/L < 1/20$ → águas rasas ou ondas longas
- $1/20 < h/L < 1/2$ → águas intermediárias
- $h/L > 1/2$ → águas profundas ou ondas curtas

No caso de ondas longas, $\tanh kh \approx kh$ e a celeridade assume a forma bastante conhecida para ondas de pequenas amplitudes onde:

$$C^2 = gh \dots\dots\dots (3.47)$$

No outro extremo, para águas profundas $\tanh kh \approx 1$ e neste caso a celeridade será independente da profundidade, podendo ser obtida por:

$$C^2 = \frac{gL}{2\pi} \dots\dots\dots (3.48)$$

No caso de ondas de profundidade intermediária não cabe nenhuma simplificação.

Todo o equacionamento anterior, aplica-se a um canal de fundo fixo e impermeável e de largura infinita. Em casos reais, muitas vezes estas situações não ocorrem e as ondas apresentarão formas das mais variadas e as equações (3.44) e (3.45) para a elevação e celeridade não serão válidas.

De qualquer maneira, sendo a onda periódica, pode-se fixar um ponto de interesse na direção x , tal que a função que rege a elevação da lâmina d'água neste ponto seja função somente do tempo, ou seja:

$$\xi(x, t)|_{x=x_0} = \xi(t) \dots\dots\dots (3.49)$$

A onda pode então ser estudada utilizando-se a análise de Fourier, através da qual uma função periódica é expressa pela soma de funções senoidais e cossenoidais como será visto à seguir.

3.3 - Análise de Fourier

Os fenômenos físicos até aqui descritos estão representados no domínio do tempo, ou seja, através de funções dependentes do tempo. Entretanto, frequentemente é desejável estudar o comportamento de sinais ou fenômenos no domínio da frequência e a análise de Fourier é uma técnica matemática que possibilita esta representação no domínio da frequência em termos de suas componentes harmônicas.

Um sinal ou fenômeno físico que seja periódico e apresente um número finito de discontinuidades em um período pode ser representado através de uma série de Fourier, que na forma trigonométrica apresenta-se da seguinte maneira:

$$\xi(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \operatorname{sen} n\omega_0 t) \dots\dots\dots (3.50)$$

Ou ainda:

$$\xi(t) = \frac{E_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (E_n \cos(n\omega_0 t + \theta)) \dots\dots\dots (3.51)$$

Onde os coeficientes podem ser obtidos através das equações (3.52) a (3.54).

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \xi(t) \cdot \cos n\omega_0 t \cdot d(\omega t) \quad n = 0, 1, 2, \dots \dots\dots (3.52)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \xi(t) \cdot \operatorname{sen} n\omega_0 t \cdot d(\omega t) \quad n = 1, 2, \dots \dots\dots (3.53)$$

$$E_0 = \frac{a_0}{2}, \quad E_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{e} \quad \theta_n = \arctan \frac{-b_n}{a_n} \dots\dots\dots (3.54)$$

A componente de frequência $\omega_0 = 2\pi/T$ é chamada componente fundamental e têm a mesma frequência do sinal e as componentes $n\omega_0$ são os ené-simos harmônicos.

Um gráfico onde o eixo das abcissas é utilizado para as frequências e o eixo das ordenadas para as amplitudes E_n das componentes frequenciais é conhecido como espectro de amplitudes. Procedimento análogo para as fases θ_n formam o espectro de fases. A figura 3.10 ilustra um sinal genérico com suas representações no domínio do tempo e da frequência.

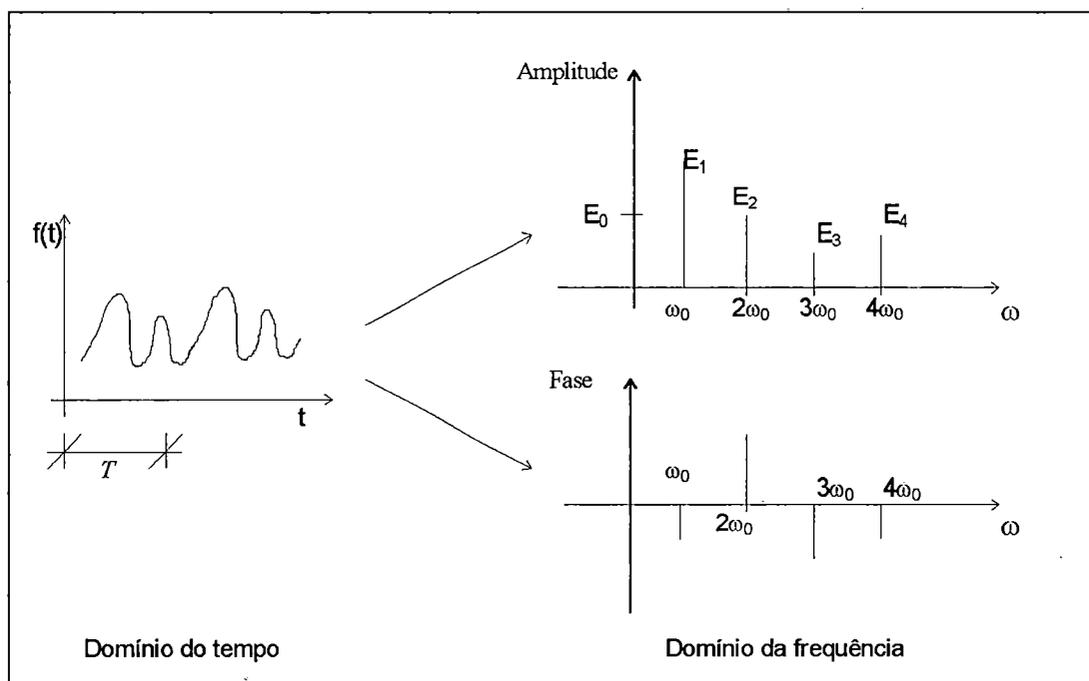


FIGURA 3.10 - Representação no domínio do tempo e da frequência de um sinal periódico.

Outra maneira mais compacta é através da forma complexa, utilizando a identidade de Euler (Apêndice 1), onde os coeficientes c_n fornecem o espectro bilateral de amplitudes de $\xi(t)$. Note que a somatória percorre desde $-\infty$ até $+\infty$ e convém ressaltar que frequências negativas não têm significado físico e são resultado do tratamento matemático..

$$\xi(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \cdot e^{(jn\omega_0 t)} \dots\dots\dots (3.55)$$

E os coeficientes c_n são fornecidos por:

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \xi(t) \cdot e^{(-jn\omega_0 t)} dt \dots\dots\dots (3.56)$$

Como condição para o tratamento acima, foi imposta a necessidade de o sinal ser periódico. No entanto, mesmo o sinal não sendo periódico pode-se aplicar a análise de Fourier na condição limite em que o período T tende ao infinito, ou, $T \rightarrow \infty$. O espectro de amplitudes que era discreto e cujas componentes espectrais estavam separadas por $\Delta\omega = 2\pi/T$ agora assume a forma contínua uma vez que $\Delta\omega \rightarrow 0$.

Tomando-se a equação (3.56) e aplicando o limite em que $T \rightarrow \infty$ temos a transformada de Fourier:

$$\xi(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} T c_n = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} \xi(t) \cdot e^{(-jn\omega_0 t)} dt \dots\dots\dots (3.57)$$

E finalmente têm-se:

$$\xi(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \xi(t) \cdot e^{(-j\omega t)} dt \dots\dots\dots (3.58)$$

$$\xi(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \xi(\omega) \cdot e^{(j\omega t)} d\omega \dots\dots\dots (3.59)$$

A transformada de Fourier $\xi(\omega)$, ou função densidade espectral, de uma função temporal não periódica representa o espectro contínuo de frequências desta função. Em outras palavras, quando o período tende à infinito, as frequências discretas $n\omega_0$ tornam-se uma variável contínua ω e a série de Fourier converge para a integral da equação (3.58). A figura 3.11 ilustra o espectro contínuo de um único pulso de duração d .

As equações (3.58) e (3.59) formam o par de transformadas de Fourier e permitem a transformação analítica de uma função do domínio do tempo para o domínio da frequência e vice versa.

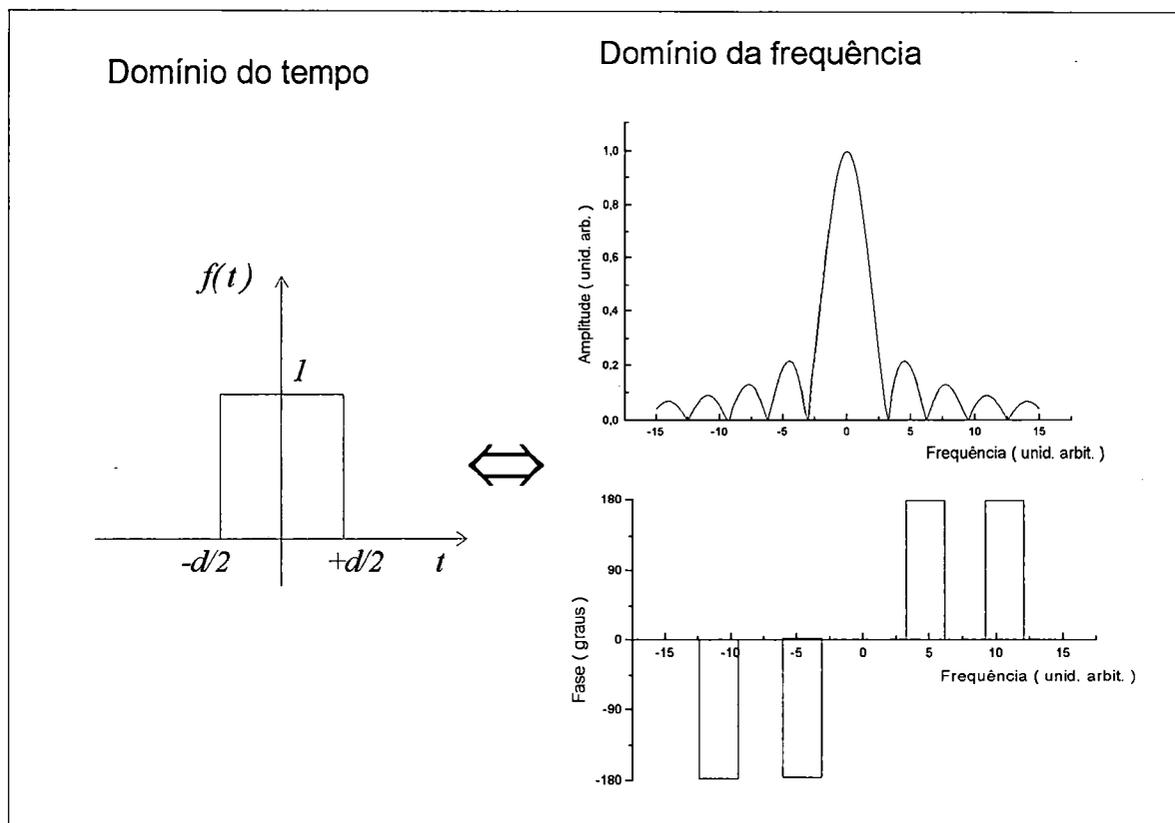


FIGURA 3.11 - Espectro contínuo de um pulso de duração d .

Mais detalhes sobre análise de Fourier e suas propriedades podem ser encontrados em **JOAQUIM & SARTORI (1990)**.

Toda a análise até aqui descrita baseia-se na existência de uma função analítica que descreva o fenômeno no tempo, porém resultados experimentais geralmente não atendem a esta exigência, sendo desejável modificar o par de transformadas de maneira a ser possível sua aplicação a dados discretos.

Esta modificação, chamada de transformada discreta de Fourier, DFT, é então uma aproximação da transformada contínua.

A função contínua no tempo é substituída por um conjunto de N amostras tomadas a uma frequência de f_s amostras por segundo durante um tempo T_0 de observação. Através da DFT, a transformada contínua é representada por N componentes discretas separadas de $f_0=1/T_0$ (**BRIGHAM (1974)**).

Os algoritmos originais de DFT são de classe N^2 o que, mesmo com computadores digitais, significa um grande esforço de cálculo. Foram então desenvolvidos outros métodos de obtenção da DFT, que exigem menos operações matemáticas, surgindo uma nova classe de algoritmos, denominados algoritmos de FFT (**ENCINAS (1994)**).

Os algoritmos de FFT, transformada rápida de Fourier, viabilizaram a implementação em computadores digitais e atualmente diversos pacotes de programas incluem a ferramenta FFT (*Fast Fourier Transform*) que proporciona o espectro de amplitudes e de fases a partir de um conjunto de pontos experimentais tomados igualmente espaçados no tempo.

Sistemas de aquisição de dados de baixo custo baseados em microcomputadores permitem elevadas taxas de amostragem variando de 10 a 100.000 pontos por segundo o que permite o acompanhamento de uma grande variedade de fenômenos físicos.

Conhecendo-se os algoritmos de implementação de FFT, podem ser desenvolvidos equipamentos com *programas* específicos dedicados à apresentação do espectro de amplitudes em tempo real (**ENCINAS (1994)**).

4 - METODOLOGIA E CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO

A montagem experimental foi realizada para verificar o comportamento da sonda ótica e obter uma relação entre a resposta da sonda ótica e a deformação da superfície. A sonda foi instalada em um canal de seção retangular com gerador mecânico de ondas e submetida a um procedimento de calibração estática e dinâmica. O experimento contou com a monitoração de um sistema de controle e aquisição de dados com microcomputador, no qual foi coletado o sinal da sonda ótica e realizadas as medidas de velocidade e frequência da onda gerada no canal.

Antes de descrever o aparato experimental serão descritas a sonda ótica e a placa de aquisição de dados e controle.

4.1 - A Sonda Ótica

A sonda ótica proposta por **Roma (1988)** foi modificada, do ponto de vista ótico e eletrônico, visando minimizar a influência de outras fontes de luz como lâmpadas (fluorescentes e incandescentes) e da iluminação natural.

Do ponto de vista ótico, a fonte de luz foi construída com um *led, light emitter diode*, ou diodo foto emissor que emite em infravermelho, apresentando pico de emissão em torno de 950 nm (ver Apêndice 2), um

comprimento de onda acima do visível cuja absorção pela água não é significativa.

Do ponto de vista eletrônico, o emissor de luz opera não em regime contínuo, mas pulsado com frequência e ciclo de trabalho fixos.

O detetor adotado não responde à luz visível e com estas modificações, não é mais necessário operar em ambientes escuros ou em condições de luminosidade controlada.

No diagrama de blocos da figura 4.1 tem-se a nova configuração adotada, onde se destacam as formas de onda na saída de cada bloco. Deve-se ressaltar que o processo físico de funcionamento, baseado na refração, é exatamente o mesmo empregado e descrito por **Roma (1988)**.

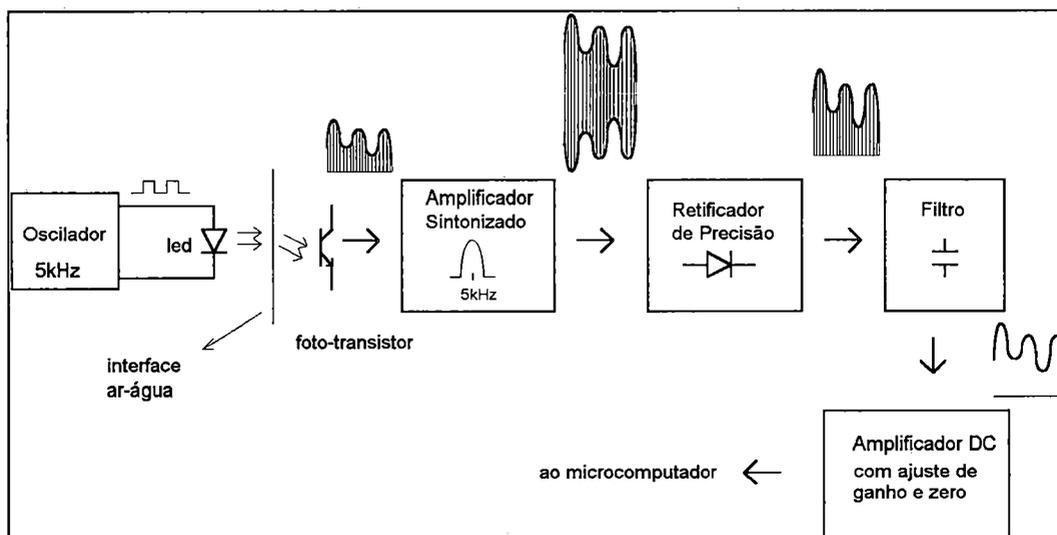


FIGURA 4.1 - Diagrama de blocos - Sonda Ótica

O feixe de luz que atravessa a interface é pulsado à uma taxa de 5000 vezes por segundo ou 5kHz. Pelo teorema da amostragem, ver **OGATA (1993)**, um sinal que contenha determinada informação, denominado sinal modulante, para ser modulado e recuperado sem grandes distorções deve utilizar como portadora um segundo sinal com frequência

de, no mínimo, duas vezes a maior frequência (componente espectral) presente no sinal modulante.

Na prática é aconselhável o uso de portadoras com frequências pelo menos dez vezes superior à maior componente espectral da informação, afim de minimizar distorções e simplificar o demodulador. Com estas considerações, o sistema proposto é capaz de manipular informações com componentes espectrais em torno de 500 Hz, limite bastante suficiente para a aplicação proposta.

O oscilador gera um sinal quadrado com frequência fixa de 5 kHz para excitação do *led* infravermelho. O sinal gerado apresenta ciclo de trabalho de $\tau = 50\%$ para melhor rendimento. Por ciclo de trabalho entende-se a relação entre o tempo em que o led está aceso (t_{on}) e período do sinal (T), logo $\tau = t_{on} / T$.

O *led* é um dispositivo semiconductor que quando excitado convenientemente por uma corrente elétrica emite luz . O tipo empregado é o SFH415 marca Siemens de 5 mm de diâmetro e opera preferencialmente emitindo em infravermelho, um comprimento de onda não visível, sendo capaz de responder à frequência de excitação empregada (5 kHz). Desta forma o feixe incidente não é um sinal contínuo, mas um trem de pulsos de luz.

O trem de pulsos de luz emitido pelo led atravessa a interface, sofrendo os efeitos da refração descritos anteriormente e alcança o detetor situado abaixo da interface ar água, que também é um dispositivo semiconductor, agora um foto transistor.

O foto transistor utilizado, também fabricado pela Siemens, é o modelo SFH205F que não apresenta resposta à luz visível; responde apenas ao sinal infravermelho pulsado pelo *led*, modulado em intensidade pela lâmina d'água e suas deformações, convertendo as variações de

intensidade do feixe luminoso em sinais elétricos. Os sinais elétricos apresentam a mesma frequência da excitação do led, com amplitude variando de acordo com a altura da lâmina d'água sobre o detetor e com a deformação da interface. Como não responde à luz visível não ocorre saturação do detetor devida à luz ambiente.

O amplificador sintonizado, ou filtro seletivo, tem a função de amplificar sinais que apresentem somente a sua frequência de sintonia, no caso 5 kHz. Com esta técnica são rejeitados sinais de frequências diferentes da de excitação, diminuindo-se as interferências externas, como por exemplo as de lâmpadas fluorescentes que emitem sinais luminosos de 120 Hz, de lâmpadas incandescentes e iluminação natural que são sinais, praticamente, de frequência nula. Este amplificador foi construído segundo a técnica de filtros ativos onde foi empregada uma topologia que apresenta elevado fator de qualidade. O fator de qualidade de um filtro indica a capacidade do mesmo de amplificar somente a frequência desejada rejeitando ou atenuando fortemente, frequências diferentes. O sinal de saída do filtro será um sinal senoidal de 5kHz modulado em amplitude, cuja envoltória traz informações sobre a deformação e a elevação da lâmina d'água.

Os dois blocos subsequentes formam um demodulador de sinais modulados em amplitude com portadora de baixa frequência, onde um retificador de precisão ceifa a parte negativa do sinal e um filtro passa baixas ativo rejeita frequências acima de 500 Hz, inclusive a da portadora (excitação), permitindo a passagem do sinal modulante, recuperando-se a informação.

O amplificador DC atua como um condicionador de sinais que adequa os níveis de saída do demodulador aos exigidos pelo sistema de aquisição de dados. Com os recursos de ajuste de ganho e zero (*off-set*) consegue-se condicionar o sinal a fim de alcançar o limite de resolução do sistema de aquisição, que recebe sinais analógicos entre -10 e +10V, podendo

amostrá-los à uma taxa de 50 kHz. A taxa permitida é bastante elevada e em seu limite obtém-se 50.000 pontos por segundo, muito acima do necessário para esta aplicação.

4.2 - O sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é composto por um microcomputador do tipo IBM-PC/AT com processador Intel 80486DX4, equipado com uma placa de interface com conversores A/D (analógico para digital) e D/A (digital para analógico) para monitoramento e controle do experimento e uma placa de aquisição de imagens de vídeo.

A placa de interface A/D e D/A foi projetada e construída para esta finalidade e a placa de vídeo utilizada foi adquirida no mercado nacional.

A placa de aquisição foi projetada de forma à satisfazer as exigências de velocidade e resolução para a aplicação em questão. Chegou-se à uma placa versátil, de baixo custo cujo diagrama de blocos está ilustrado na figura 4.2 que atende com folga às necessidades e que apresenta as seguintes características:

- Compatível com padrão IBM - PC/AT
- Seção A/D
 - ⇒ 16 canais de entrada analógica
 - ⇒ resolução de 12 bits
 - ⇒ tempo de aquisição por canal de 20 μ s
 - ⇒ tensão de entrada entre -10 e +10V
- Seção D/A

⇒ 2 canais de saída analógica

⇒ resolução de 12 bits

⇒ sinal de saída 0 a +10V

- Seção digital

⇒ 24 linhas de entrada/saída digitais

⇒ configuráveis por blocos de 8 linhas

⇒ compatibilidade TTL

- Contador

⇒ 3 contadores independentes de 16 bits (até 65535 eventos)

⇒ configuráveis independentemente como contadores de eventos ou geradores de bases de tempo.

- Oscilador

⇒ oscilador interno controlado a cristal de 8 MHz

⇒ saídas de 8, 4,2,1 e 0,5 MHz.

Os esquemas elétricos completos da sonda e da placa de aquisição de dados encontram-se no Apêndice 3.

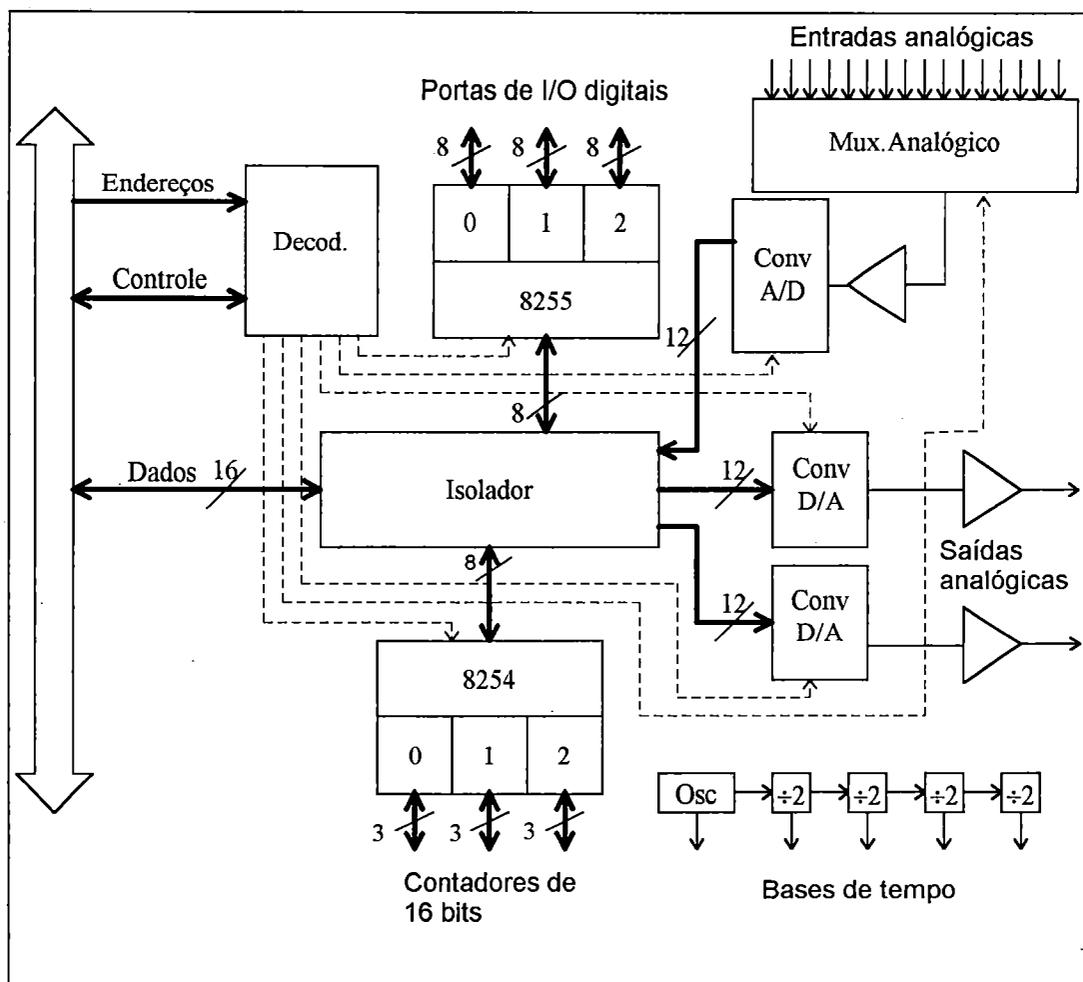


FIGURA 4.2 - Diagrama de blocos da placa de aquisição e controle

4.3 - A montagem experimental

A montagem experimental, esquematizada na figura 4.3 foi realizada em laboratório, e consistiu na montagem de uma canal para geração de ondas e de equipamentos eletrônicos de medida, com a finalidade de estudar o comportamento da sonda ótica na medida de deformações da superfície do fluido.

As partes que compõem a montagem estão descritas abaixo:

- ⇒ canal prismático de seção retangular - construído em acrílico transparente, com 5,4 m de comprimento, 24 cm de largura e 12 cm de altura. É um canal fechado para estudos de fenômenos hidráulicos sem escoamento. Nas duas extremidades foram montados dissipadores de ondas para reduzir as reflexões e portanto as interações entre as ondas primárias e reflexões.
- ⇒ gerador mecânico de ondas - composto por uma pá instalada dentro do canal acoplada a um mecanismo que proporciona um movimento oscilatório translacional da pá quando acionado por um sistema biela manivela que por sua vez é acionado por um motor de corrente contínua. A amplitude das ondas pode ser variada através do ajuste do comprimento da manivela.
- ⇒ motor de corrente contínua - motor DC com variador eletrônico de velocidade, controlável por sinal externo proveniente da seção D/A da placa de aquisição que possibilita o controle da frequência de ondas.
- ⇒ sonda ótica - montagem eletrônica descrita anteriormente.
- ⇒ sistema de aquisição de dados e controle - sistema baseado em microcomputador padrão IBM-PC/AT descrito anteriormente.
- ⇒ microcomputador compatível com padrão IBM-PC.
- ⇒ detetor de crista - sonda eletrônica para detectar a crista das ondas, é utilizado na cronometragem eletrônica para determinação da celeridade.
- ⇒ parafuso limnimétrico - utilizado como padrão na calibração estática da sonda é construído com um parafuso com passo de um fio de rosca por milímetro com disco graduado no topo e duas

guias verticais para medida no nível da lâmina d'água, conforme figura 4.4.

⇒ câmara de vídeo - modelo comercial marca Panasonic usada para filmar a onda e, posteriormente, com o auxílio de uma placa de aquisição de sinais de vídeo comercial marca Blaster modelo SE100, fornecer o padrão para a calibração dinâmica.

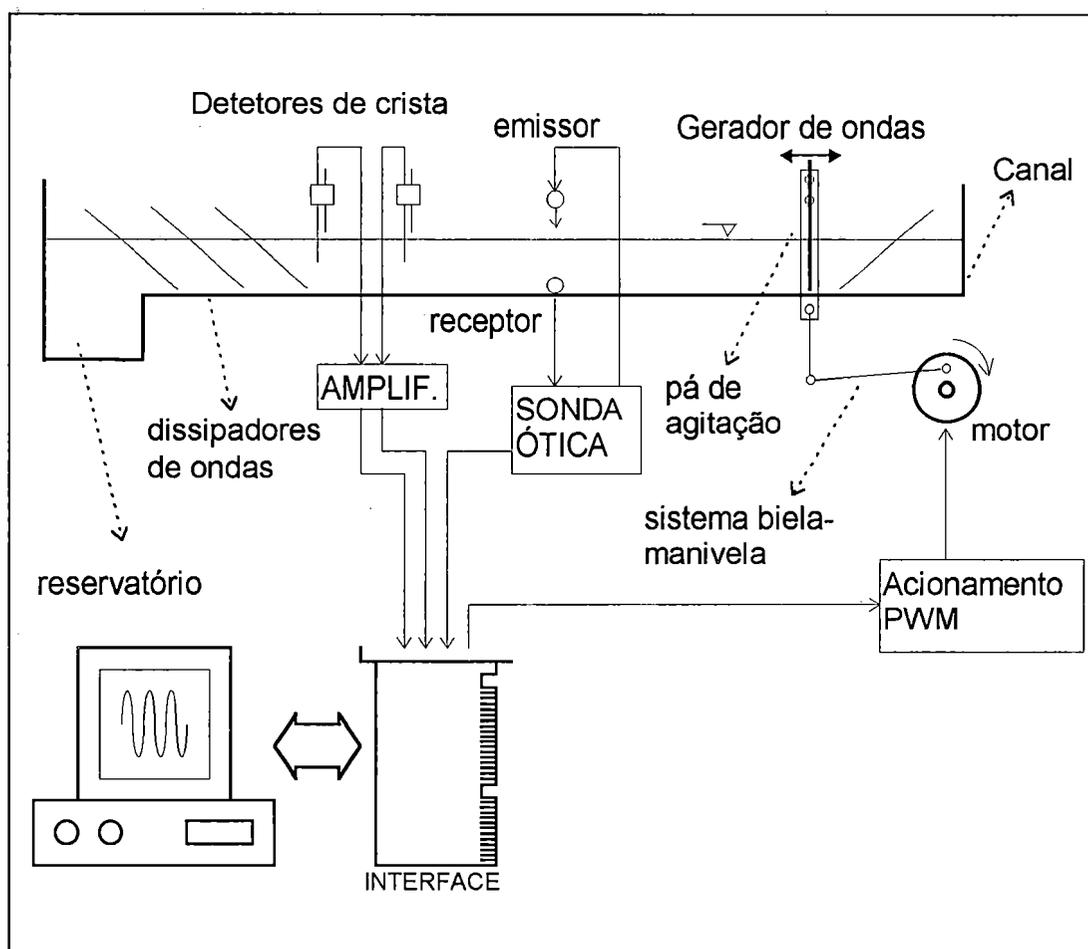


FIGURA 4.3 - Diagrama esquemático da montagem experimental

4.4 - O programa de controle

Para uso otimizado do sistema de aquisição, o programa de controle foi elaborado utilizando duas linguagens de programação diferentes.

Com a intenção de aproveitar os recursos de interface com o usuário característicos do ambiente Windows, o programa foi confeccionado em Visual Basic 3.0 escolhida pelos recursos gráficos disponíveis. No entanto, esta linguagem é de execução lenta o que pode comprometer o desempenho do sistema de aquisição de dados, motivo pelo qual as rotinas de acesso aos módulos da placa de aquisição foram elaboradas em linguagem C e compiladas na forma de DLL (*Dynamic Link Libraries*).

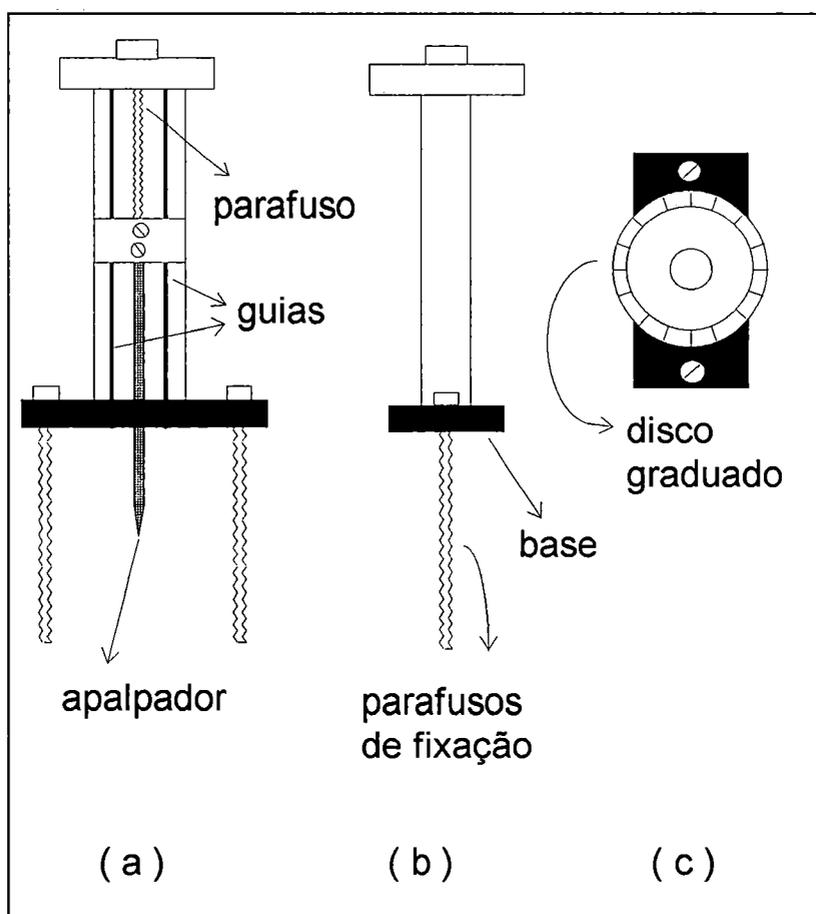


FIGURA 4.4 - O parafuso limnimétrico. (a) - vista frontal; (b) - vista lateral; (c) - vista superior

A DLL gerada é uma biblioteca de funções de acesso e controle dos módulos da placa de aquisição e é utilizada pelo programa principal. Todas as funções desenvolvidas estão detalhadas no programa fonte disponível no

disquete anexado ao Apêndice 4. Algumas destas funções estão descritas abaixo:

⇒ LeCnADC (Cn) - esta função realiza a leitura do canal número Cn do conversor analógico - digital e retorna ao programa principal o nível digital correspondente à tensão do sinal analógico presente neste canal.

⇒ EscCnDAC (Cn , Valor) - atua sobre o canal Cn do conversor D/A que fornece uma tensão analógica entre 0 e 10V proporcional ao nível digital da variável Valor.

⇒ LeCnPIO (Cn) - realiza a leitura do canal Cn da porta digital de entrada / saída.

O programa principal também se encontra no disquete do Apêndice 4, tanto o programa fonte como o executável. Desenvolvido em linguagem Visual Basic 3.0, consta das seguintes rotinas:

⇒ rotina para adquirir o sinal da sonda ótica. Faz uso dos módulos conversor A/D, contadores e gerador de base de tempo e apresenta as seguintes características:

- taxa de aquisição programável de 100 a 1000 pontos por segundo.
- número de pontos por corrida experimental programável de 100 a 1000 pontos por experimento.
- janela gráfica que mostra o sinal adquirido versus tempo que permite monitorar a forma de onda.
- janela numérica que mostra a média aritmética e o desvio padrão do sinal adquirido, medida útil na calibração estática da sonda ótica que será descrita posteriormente.

⇒ rotina para medida da velocidade de fase - acessando os contadores de 16 bits e o circuito de base de tempo da interface, cronometra o tempo que uma onda leva para passar entre os dois detetores de crista. Conhecendo-se o espaçamento entre os detetores de crista, calcula-se a velocidade.

⇒ rotina para variação da velocidade do motor do gerador de ondas via conversor D/A.

⇒ rotina para salvar arquivos de dados - salva os dados adquiridos em formato ASCII, que é um formato facilmente importado pelos principais programas de tratamento de dados e planilhas de cálculo.

Na figura 4.5 tem-se a tela de operação do programa, onde podem ser identificados os botões de acesso às diversas rotinas. O disquete anexado ao apêndice 4 contém uma versão demonstrativa do programa.

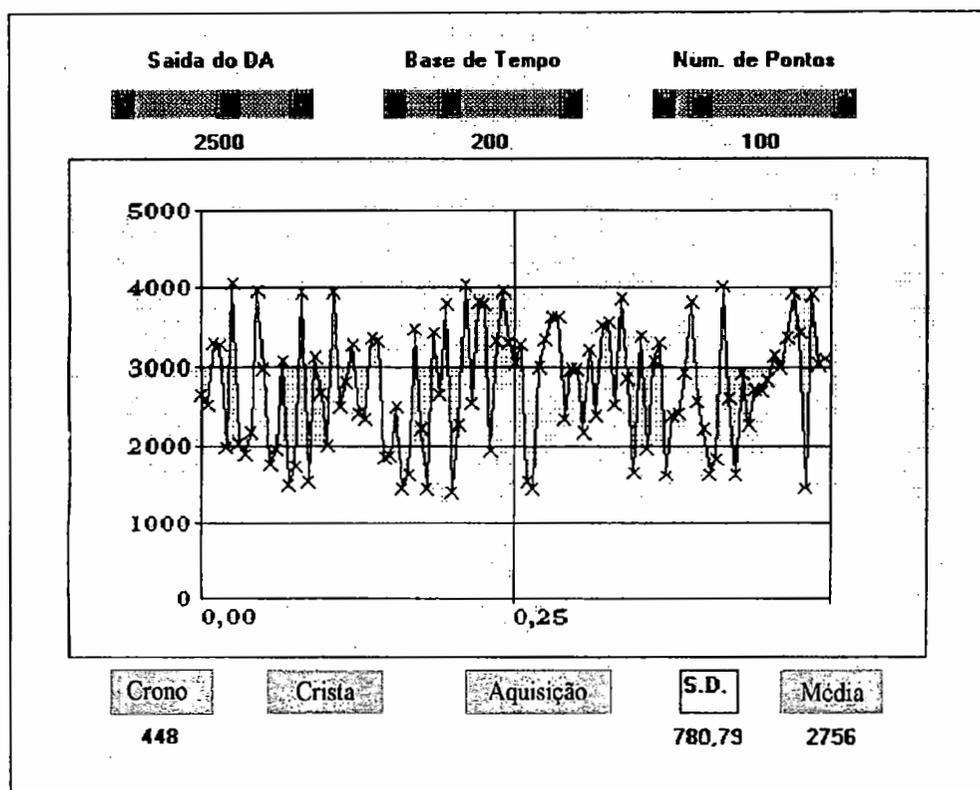


FIGURA 4.5 - Tela de execução do programa

4.5 - Método para calibração estática

No procedimento de calibração estática e na realização dos experimentos, foram tomadas precauções quanto à estabilidade térmica do sistema completo, aguardando-se tempo suficiente para a extinção de todas as variações devidas ao auto aquecimento dos instrumentos. Os equipamentos, exceto o motor do gerador de ondas, foram acionados com no mínimo uma hora de antecedência, porém observações intermediárias mostraram estabilidade térmica com quinze minutos de funcionamento.

Foram realizados, ainda, ensaios quanto à interferência de fontes de luz naturais e lâmpadas fluorescentes e incandescentes, não sendo observadas alterações no sinal de saída em função destas fontes. Não tendo sido identificadas outras fontes de interferência óticas ou de outra natureza, o experimento foi considerado em condições de controle estatístico.

A calibração estática constou do levantamento experimental da resposta da sonda ótica em função da altura da lâmina d'água. Considerou-se como resposta da sonda o sinal elétrico em forma de tensão fornecido pela eletrônica associada ao sistema emissor receptor de luz.

Como o processo global da sonda se resume na conversão da altura da lâmina d'água em tensão elétrica que são convertidos em níveis digitais pela seção A/D da placa de aquisição.

Para a calibração são consideradas como variável de entrada, a altura da lâmina d'água e como variável de saída, os níveis digitais. Adotando-se este procedimento não é necessário realizar a propagação de erros decorrentes da conversão altura da lamina d'água em tensão elétrica seguida da conversão tensão elétrica em níveis digitais.

A seção A/D da placa de aquisição foi previamente calibrada estaticamente para ter assegurada sua linearidade com respeito à tensão de

entrada. Desta forma eventuais não linearidades que surgissem na calibração do sistema global poderiam ser creditadas totalmente à parte ótica. Foi utilizada uma fonte YEW - Yokogawa Electric Works modelo DC Voltage Current Standard type 2853 na escala 0 -10 V_{DC} e resolução de 5mV como padrão de entrada. Os resultados da calibração da seção A/D podem ser verificados no Apêndice 5.

Quanto à calibração da sonda, o padrão de entrada utilizado foi um parafuso limnimétrico construído no laboratório de Fenômenos de Transporte do Departamento de Hidráulica e Saneamento LFT-SHS. O parafuso limnimétrico, apresentado na figura 4.5, tem as seguintes características:

- curso total de 200 mm
- menor divisão de escala 0,01 mm
- folga ou *backlash* < 0,05 mm

Com o padrão instalado sobre o canal, o mesmo foi preenchido com água comum de abastecimento doméstico sem nenhum tratamento especial até uma altura de 60 mm, sendo então esvaziado em retiradas sucessivas de volumes de aproximadamente três litros cada, quando eram realizadas e registradas as leituras do parafuso limnimétrico e da placa de aquisição. A escolha do esvaziamento progressivo em detrimento ao enchimento, deve-se ao fato da aderência da água à extremidade do parafuso limnimétrico devido aos efeitos da tensão superficial.

Devido à dificuldade inerente de repetição do padrão, cada ponto de entrada foi ensaiado uma única vez em cada corrida experimental, enquanto a leitura registrada da sonda ótica foi a média de 100 leituras consecutivas realizadas pelo programa que também fornece o desvio padrão das leituras. Esta limitação de repetição não afeta a calibração, que é realizada em uma faixa de medição e não em um ponto específico.

Foram definidas três configurações para o emissor:

- emissor totalmente aberto
- emissor confinado em um tubo de 5 cm de comprimento com abertura de 5 mm, denominada configuração com emissor semi confinado.
- emissor confinado com abertura de 2 mm, denominada configuração com emissor confinado.

Para cada configuração, o experimento foi executado diversas vezes procurando-se estabelecer uma condição ótima de funcionamento que aliasse ampla faixa de operação e sensibilidade. Definida a condição ótima de distância entre emissor e receptor, a mesma condição foi utilizada nas três configurações, sendo os ajustes de zero e ganho da eletrônica realizados para cada configuração.

Os experimentos resultaram nas curvas de calibração estática apresentadas nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3.

Ressalta-se, entretanto, que não são disponíveis dados de calibração dos padrões utilizados que permitissem uma completa rastreabilidade, mas para os fins desejados, os padrões empregados podem ser considerados adequados.

4.6 - Método para calibração dinâmica

O termo calibração dinâmica significa a determinação dos parâmetros dinâmicos de um instrumento ou equipamento tais como tempo de atraso, constante de tempo, ganho na banda de passagem, produto ganho x largura de faixa, ou resumindo, consiste na determinação da função de transferência do instrumento. A calibração dinâmica, no modo clássico, é realizada através do levantamento da curva de resposta em frequência, que

consiste da varredura em frequência do sinal de entrada observando a relação de amplitudes e defasagem entre sinais de entrada e de saída.

Neste trabalho é inviável este procedimento devido à dificuldade inerente à montagem mecânica de se obter padrões de onda senoidais (ondas progressivas puras) com possibilidade de varredura em frequência em uma faixa suficientemente grande para investigar a resposta da sonda a este tipo de excitação.

A excitação foi feita através da onda do gerador mecânico descrito anteriormente que, apesar de não ser puramente senoidal, apresentou-se periódica podendo ser representada por uma série trigonométrica de Fourier ou por uma FFT, cujos resultados podem ser encontrados no Capítulo 5.

Para determinar a forma de onda da excitação foi utilizada uma câmara de vídeo filmando a lateral do canal de acrílico transparente.

No entanto, a relação entre a amplitude e o comprimento da onda gerada é muito pequena e a filmagem da onda completa não forneceu resolução adequada para o padrão, como pode ser visto na figura 4.6.

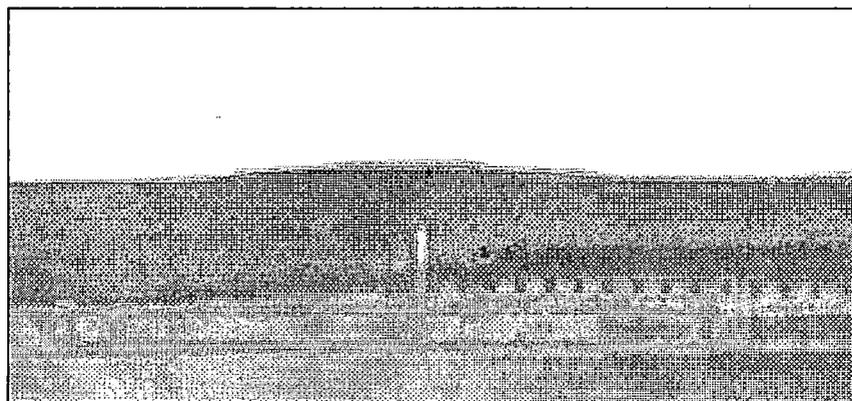


FIGURA 4.6 - Filmagem de uma onda completa

A solução adotada para o problema de resolução foi a filmagem da passagem da onda pela sonda com máxima aproximação (*zoom*). A filmagem no padrão VHS é realizada a uma taxa constante de 30 quadros

por segundo. A filmagem é então reproduzida quadro a quadro (através dos recursos de *slow motion*) em um aparelho de vídeo cassete, e com o auxílio da placa Blaster e do programa que acompanha o produto, montou-se uma tabela representando a elevação da elevação da lâmina d'água em função do tempo, para um ponto fixo do canal.

O aparelho de vídeo cassete é da marca Phillips modelo 456 e a placa de aquisição de sinais de vídeo é da marca Blaster modelo SE100.

Para a determinação da elevação da lâmina, colou-se uma escala quadriculada em centímetros na borda do canal como referência. A figura 4.7 mostra uma seqüência típica das filmagens realizadas, onde pode ser vista a evolução de um pico de onda.

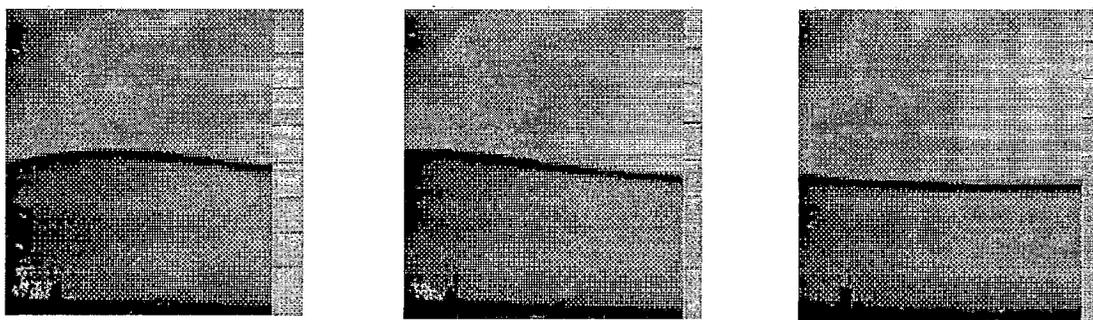


FIGURA 4.7 - Sequência de quadros típica das filmagens

Os ensaios realizados seguiram a combinação de dez frequências e duas amplitudes de excitação para cada tipo de sonda. Com isto obteve-se 60 conjuntos de pontos experimentais e o mesmo número de filmagens para elaboração do padrão.

O padrão para a calibração dinâmica foram então as medidas da elevação da lâmina d'água via filmagem com taxa de amostragem de 30 pontos por segundo e erro absoluto de ± 1 pixel, resultando em $\pm 0,25$ mm.

Como ferramenta para a calibração dinâmica utilizou-se a FFT, disponível em diversas planilhas eletrônicas e programas de tratamento de

dados. O programa para o tratamento dos dados foi o MicroCal Origin 4.0 for Windows que, para a realização de FFT, exige 2^n pontos (n inteiro) igualmente espaçados no tempo, motivo pelo qual as séries de dados são sempre de 128, 256 ou 512 pontos para a sonda e de 32 ou 64 para o padrão.

Complementarmente, a celeridade foi avaliada cronometrando-se o tempo necessário para a crista de uma onda se propagar entre dois detetores de crista espaçados de 20 cm. O cronômetro foi implementado utilizando-se os módulos contador de eventos e gerador de base de tempo da placa de aquisição e desenvolvida rotina específica. Foram realizadas 25 cronometragens para cada padrão de onda.

Efeitos da tensão superficial ocorreram na borda no canal, causando uma linha de interface sem boa definição entre ar e água prejudicando a análise da filmagem. Para reduzir estes efeitos, foi aplicado regularmente detergente neutro (Extran 5%) na parede do canal. Observou-se ainda que a adição do detergente à água não influenciou no funcionamento da sonda.



5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - Calibração Estática

Como descrito anteriormente, a calibração estática de cada configuração da sonda foi realizada variando-se a altura da lâmina d'água no canal e fazendo-se a medição da altura com o parafuso limnimétrico e a sonda ótica.

A temperatura ambiente não exerce influência significativa no fenômeno estudado e assim não houve preocupação com seu controle.

As medidas relacionadas à sonda ótica foram baseadas em 500 leituras realizadas automaticamente à taxa de 100 por segundo pelo sistema de aquisição, cujo programa já fornece o cálculo da média e o do desvio padrão.

O modelo adotado para regressão foi do tipo decaimento exponencial de primeira ordem com *off-set*, conforme equação (5.1), onde a variável independente h é a altura da lâmina d'água acima do detetor e L é a leitura do conversor A/D. Este modelo foi escolhido com base nas previsões teóricas apresentadas no Capítulo 3, especificamente a equação 3.35. A equação foi modificada de forma a incluir os ajustes de zero da eletrônica da sonda, representados na equação abaixo por y_0 e x_0 .

$$L = y_0 + A_1 \cdot e^{-(h-x_0)/t_1} \dots\dots\dots (5.1)$$

Os termos A_1 e t_1 estão relacionados com a amplitude do campo elétrico da luz E_0 e com a constante de decaimento k_i respectivamente.

O valor da altura da lâmina d'água correspondente à uma leitura da sonda pode ser obtido a partir da função inversa da equação de calibração, que assume a seguinte forma:

$$h = x_0 - t_1 \cdot \ln\left(\frac{L - y_0}{A_1}\right) \dots\dots\dots (5.2)$$

Os ajustes de zero e de ganho dos amplificadores da sonda ótica influenciam nos parâmetros do modelo, o que justifica o fato das discrepâncias entre os parâmetros resultantes da calibração de cada configuração da sonda.

Nas tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 encontram-se os resultados de tal procedimento que estão apresentados de forma gráfica nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3. Os pontos experimentais são representados pelos triângulos e a linha contínua é o modelo ajustado.

TABELA 5.1 - Calibração estática - emissor aberto

Parafuso limnimétrico (mm)	Sonda Ótica (níveis digitais)	Desvio Padrão
4,255	3592	4,74
7,355	3299	3,34
10,580	3003	2,99
13,420	2731	4,31
15,860	2539	4,90
18,045	2377	3,54
19,455	2273	2,50
21,360	2139	3,30
23,365	2014	3,22
25,215	1905	3,71
26,930	1805	3,24
28,790	1711	2,93
30,880	1595	3,56
33,370	1483	3,15
35,455	1390	4,55
37,610	1298	3,36
39,710	1205	4,60
41,785	1124	5,70
44,080	1049	3,79
46,800	971	2,67

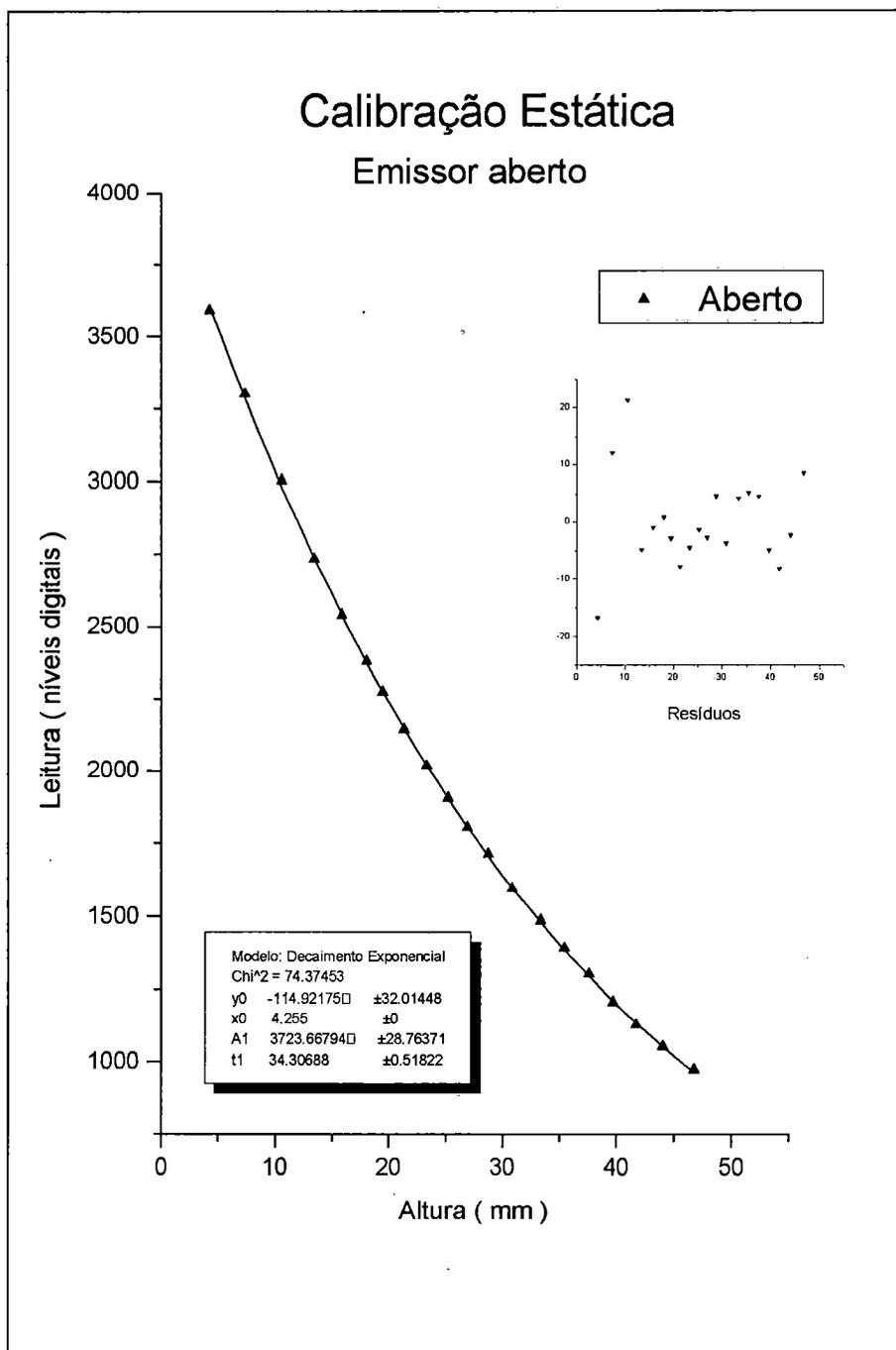


FIGURA 5.1 - Curva de calibração estática - sonda aberta.

Os parâmetros resultantes e o gráfico dos resíduos da regressão também estão presentes. O resíduo é a diferença entre o valor experimental e o obtido pela curva de calibração e deve apresentar uma distribuição próxima à distribuição normal.

TABELA 5.2 - Calibração estática - emissor semi confinado

Parafuso limnimétrico (mm)	Sonda Ótica (níveis digitais)	Desvio Padrão
3,550	3596	1,50
5,425	3408	1,03
7,230	3202	0,79
9,120	3012	0,99
10,670	2847	1,56
13,070	2639	1,99
15,165	2448	2,41
17,725	2231	1,82
19,480	2097	1,67
19,960	2062	1,74
22,545	1891	1,61
24,175	1759	2,11
26,855	1584	1,50
28,630	1460	2,08
30,725	1340	2,12
33,375	1200	1,85
35,750	1083	1,45
37,880	971	2,26
40,415	865	1,18
42,480	780	1,10
44,450	702	1,54
47,000	611	1,24

O fato de a distribuição dos resíduos apresentar tendência diferente da distribuição normal, indica que o modelo ou pode não ser adequado ou necessita de mais parâmetros.

A regressão foi realizada com auxílio do programa comercial Origin 4.0, que utiliza o algoritmo de Levenberg-Marquardt para regressão não linear, além do método Simplex.

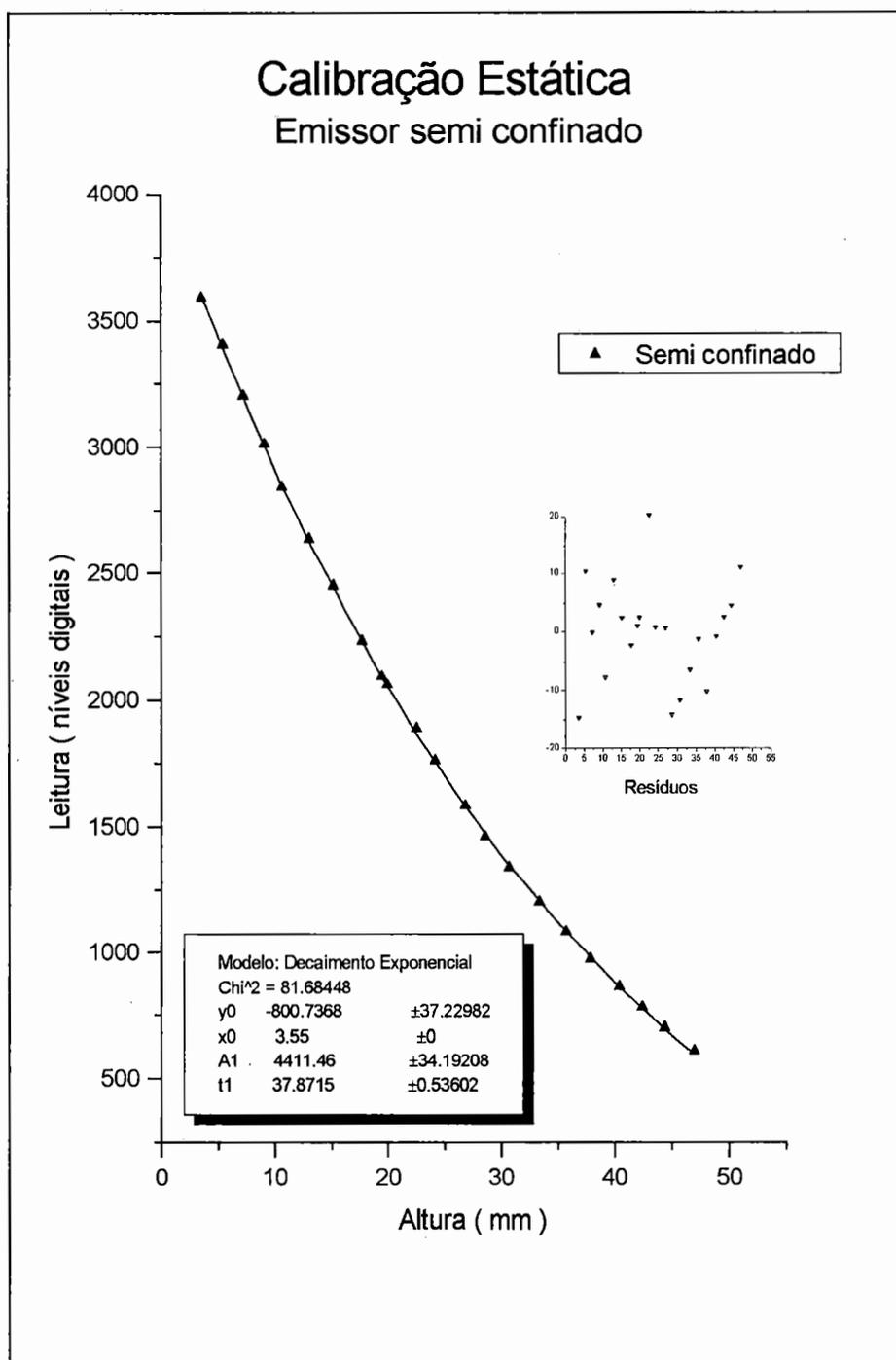


FIGURA 5.2 - Curva de calibração estática - sonda semi confinada.

Para as três configurações, o modelo mostrou-se adequado apresentando boa aderência aos pontos experimentais. A aderência foi analisada visualmente e os gráficos dos resíduos presentes nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3 não mostraram nenhuma tendência que justificasse uma análise mais detalhada.

TABELA 5.3 - Calibração estática - emissor confinado

Parafuso limnimétrico (mm)	Sonda Ótica (níveis digitais)	Desvio Padrão
0,425	3251	2,15
1,710	3164	2,54
2,240	2981	2,56
3,680	2851	2,94
5,100	2733	3,33
6,400	2616	1,99
7,450	2508	1,99
8,315	2453	3,28
9,060	2404	2,99
10,840	2265	3,76
12,690	2153	2,55
13,565	2034	3,64
15,480	1921	2,75
17,325	1802	3,19
19,270	1711	4,45
21,145	1616	3,01
23,070	1516	5,41
24,950	1442	4,93
26,705	1362	4,07
28,440	1292	4,44
29,935	1242	4,52
31,670	1188	4,58
33,530	1119	4,56
35,325	1071	2,95
37,185	1014	2,62
39,100	961	4,39
41,770	887	8,61

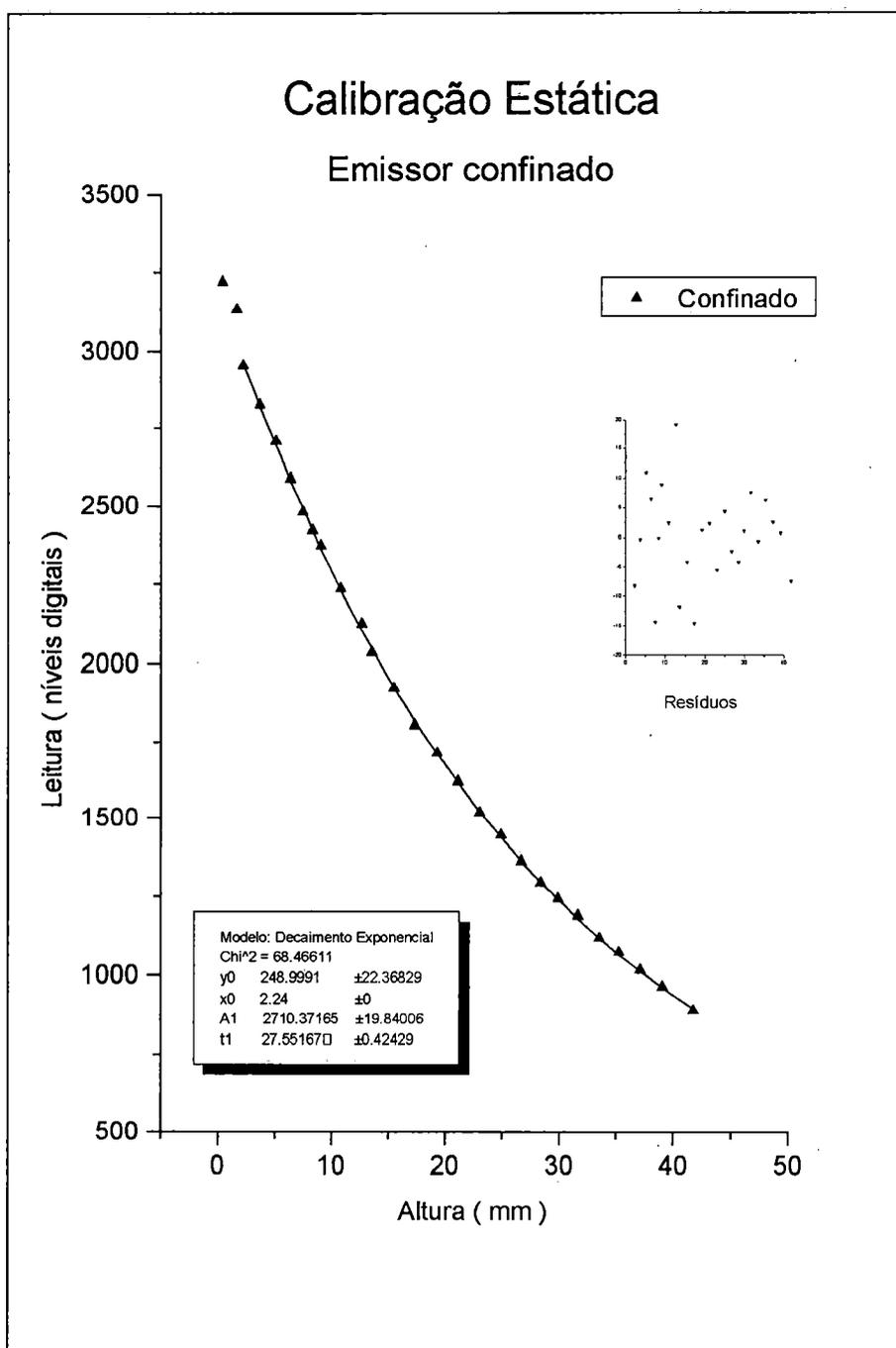


FIGURA 5.3 - Curva de calibração estática - sonda confinada.

Como pode ser verificado na figura 5.3, para o emissor confinado o modelo não foi aplicado aos pontos do extremo inferior da faixa de operação proposta, onde verificou-se uma alteração significativa do comportamento da sonda.

Esta alteração foi creditada à pequena espessura da lâmina d'água sobre a sonda que ainda sofre os efeitos de tensão superficial. Entretanto, na parte central da faixa de operação o ajuste foi considerado bom.

Algumas dificuldades foram encontradas no ensaio da configuração com o emissor confinado. O alinhamento entre o emissor e receptor tornou-se crítico e pequenas variações na posição relativa entre emissor e receptor causavam alterações de sinal. Os ajustes de ganho e zero da eletrônica também tornaram-se críticos.

Quanto às outras configurações, estas se mostraram mais estáveis e robustas, não apresentando sensibilidade excessiva a elementos de perturbação. Não houve, no tocante à operação estática, diferenças significativas entre os comportamentos das sondas aberta e semi confinada.

5.2 - Calibração dinâmica

As ondas obtidas não apresentaram perfil próximo ao senoidal puro e devido ao atrito do fluido com a parede foram observadas perturbações de pequena amplitude e elevada frequência na superfície.

As ondas geradas apresentaram relação $h/L < 1/20$ recebendo a classificação de ondas longas e a celeridade situou-se na faixa entre 0,56 e 0,65 m/s, mas não foi encontrada nenhuma correlação entre ela e os outros parâmetros relacionados à caracterização de ondas como amplitude ou comprimento de onda. As celeridades obtidas ficaram abaixo do teórico previsto para esta classe de onda, que é de 0,67 m/s.

As frequências de ensaio situaram-se entre 1,23Hz e 1,80Hz, uma faixa aparentemente pequena, que ficou limitada ao sistema motor redutor disponível, mas que se mostrou suficiente para o avaliação desejada.

Para a amplitude de translação da pá de agitação foram adotados dois valores, 7,5 mm e 10 mm.

A forma da onda mostrou grande dependência da frequência de excitação. Observou-se que pequenas alterações na frequência de excitação causam modificações significativas no perfil da superfície.

A figura 5.4 mostra a elevação da lâmina d'água, medida através do padrão de calibração dinâmica, para as frequências de 1.22, 1.34 e 1.57 Hz, onde pode ser avaliada esta dependência. A figura 5.5 mostra as mesmas ondas vistas pela sonda ótica, sem qualquer tratamento matemático posterior.

Nestas duas figuras a escala do eixo y foi propositadamente alterada para facilitar a distinção entre as formas de onda

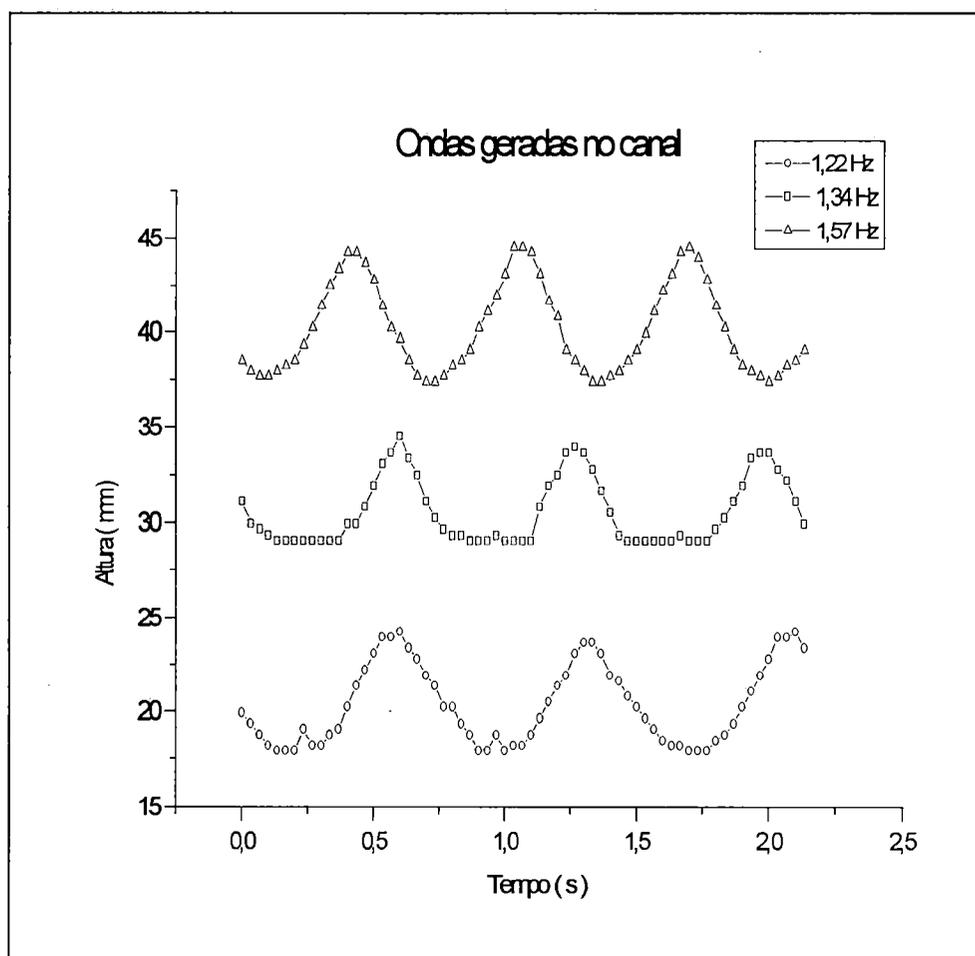


FIGURA 5.4 - Ondas típicas geradas no canal - pontos do padrão.

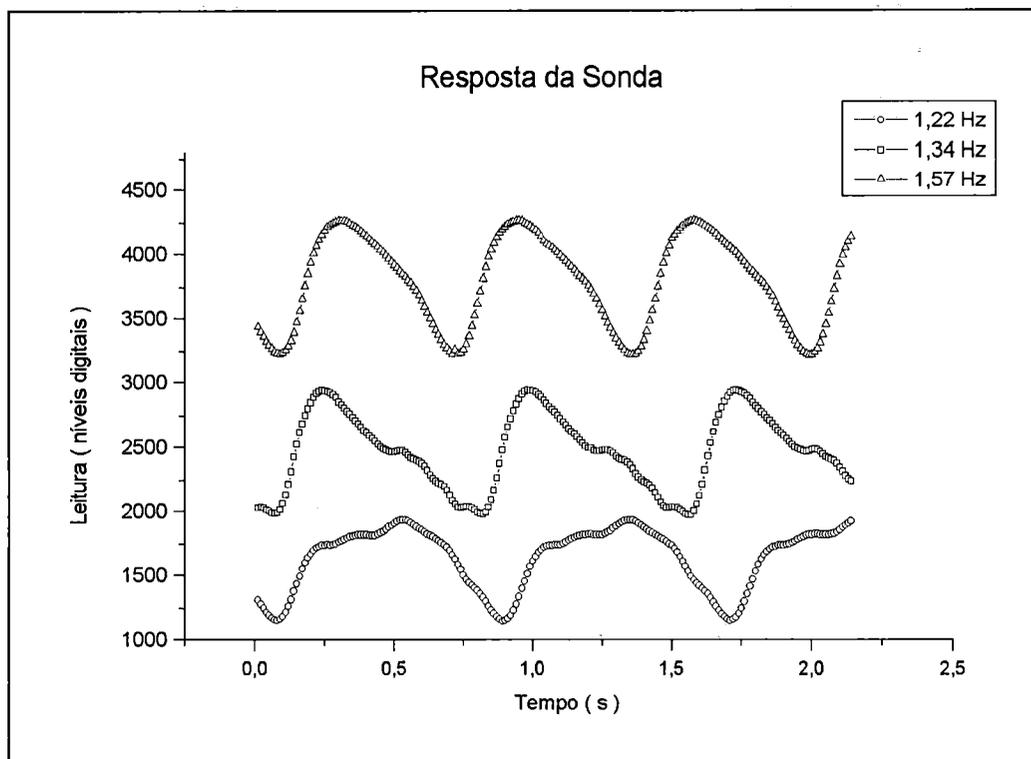


FIGURA 5.5 - Medições típicas obtidas com a sonda confinada.

O extenso número de ensaios realizados e o grande número de dados coletados, 512 por corrida, não indica a organização de extensas tabelas que não são de grande utilidade na análise visual dos dados.

Serão apresentados de forma gráfica, um conjunto de resultados composto da medição de um mesmo padrão de onda com as três configurações da sonda sendo que, para cada ensaio o padrão foi reavaliado.

As figuras 5.6, 5.7 e 5.8 mostram as ondas coletadas pela sonda e tratadas matematicamente sobrepostas às ondas obtidas da avaliação do padrão.

Por tratamento matemático entenda-se a aplicação da equação de correção (5.2) aos pontos experimentais. Evidentemente para cada tipo de sonda foram empregados os parâmetros correspondentes.

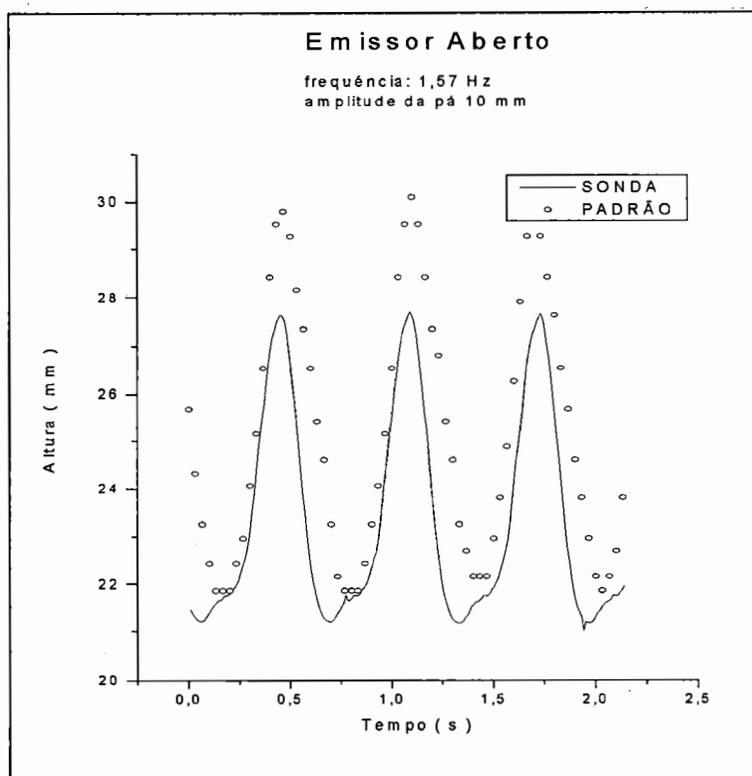


FIGURA 5.6 - Resposta da sonda aberta.

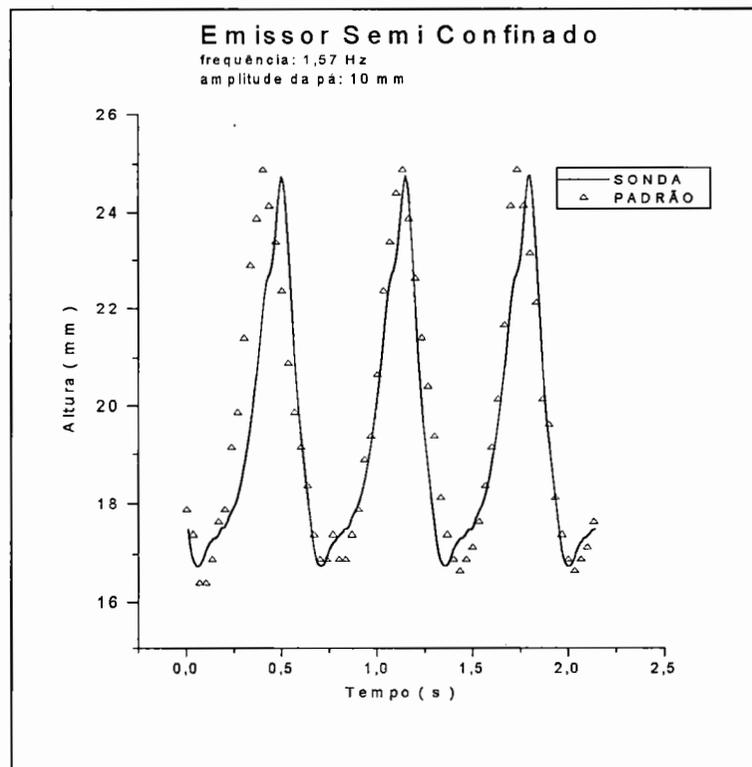


FIGURA 5.7 - Resposta da sonda semi confinada

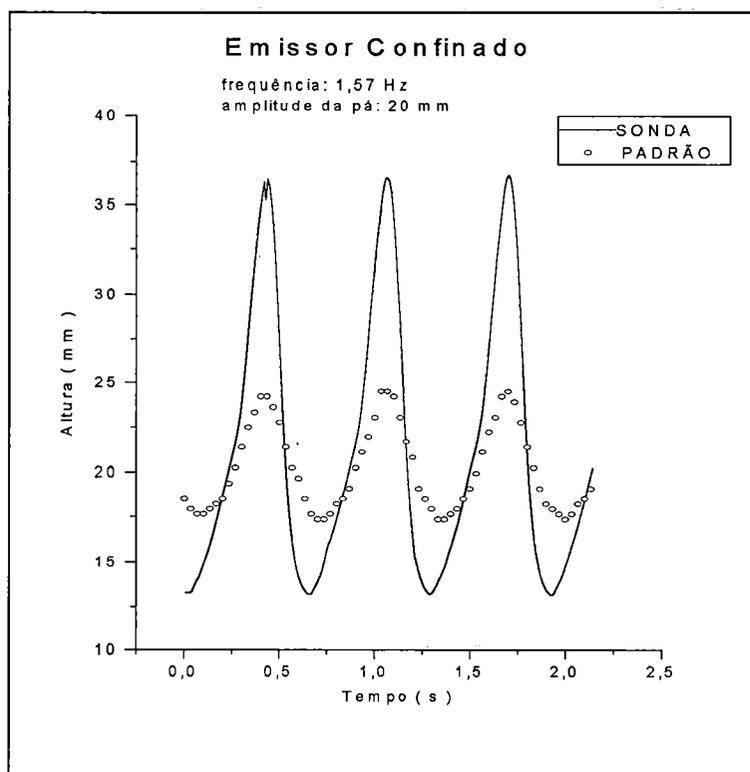


FIGURA 5.8 - Resposta da sonda confinada.

A análise dos gráficos acima induz à eleição da sonda semi-confinada como a configuração mais adequada. Esta dedução é válida para as características da onda apresentada. Ondas com características pouco diferentes podem levar à escolha de outra configuração.

Na figura 5.9 pode ser observada a dificuldade desta configuração em responder a excitações que apresentem picos salientes. Devido ao feixe de luz incidente ser estreito, uma maior inclinação da lâmina desvia o feixe refratado do receptor causando uma diminuição no sinal que não é devida somente à variação de altura da lâmina d'água.

Desta forma, na configuração aberta este efeito é menos pronunciado e mais intenso na configuração confinada .

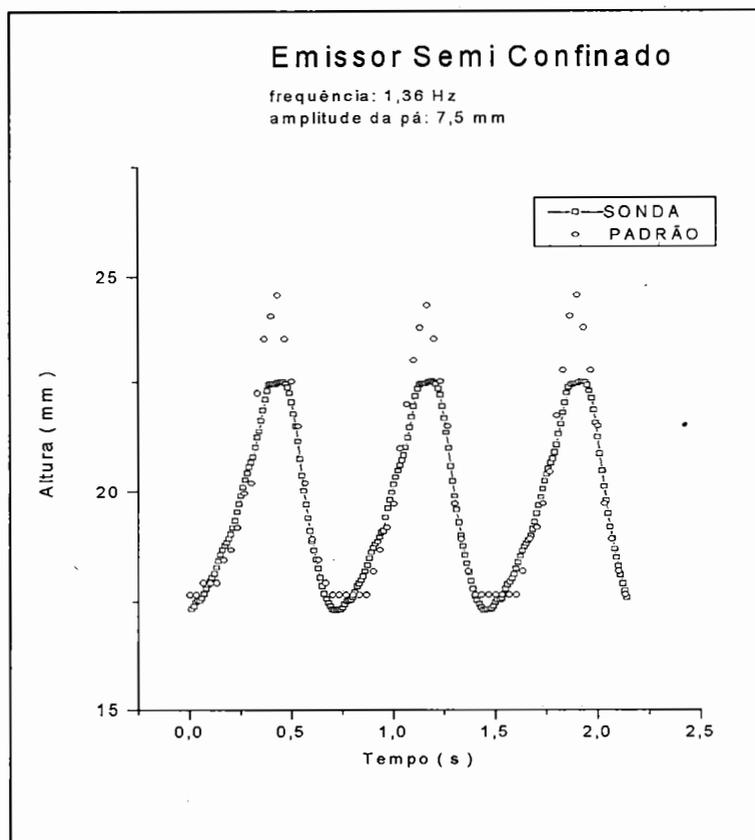


FIGURA 5.9 - Resposta da sonda semi confinada - onda com frequência 1,36 Hz

Finalmente os dados experimentais serão analisados no domínio da frequência através de FFTs realizadas no programa Origin 4.0. Os dados analisados serão os mesmos utilizados na confecção das figuras 5.6 a 5.8 com apenas uma modificação; foi subtraído o valor médio de cada corrida para analisar somente as componentes com frequência não nula. Este procedimento é adotado quando o sinal apresenta elevado nível médio comparado às componentes frequenciais.

As séries de dados utilizados serão de 512 pontos tomados à taxa de 100 por segundo para a sonda e para o padrão serão 64 pontos à taxa de 30 por segundo.

Na FFT da figura 5.10 são visualizados duas componentes frequenciais mais evidentes, a fundamental e a 2ª harmônica. Nota-se uma rápida diminuição das amplitudes com o aumento da frequência. Nota-se também, embora com pequena amplitude, a presença de componentes

frequências de até 15 Hz. Estas componentes são originadas do atrito do fluido com a parede que causa perturbações na superfície.

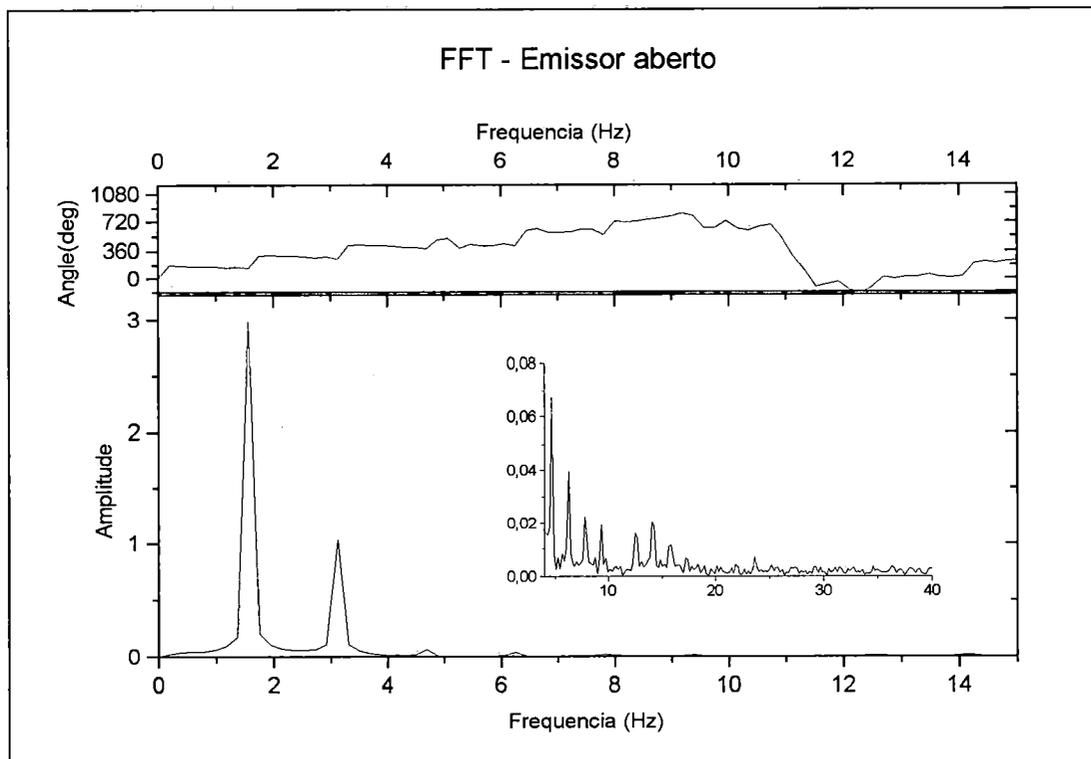


FIGURA 5.10 - FFT de uma onda de 1,57 Hz - sonda aberta

Como pode ser verificado na figura 5.11, a FFT obtida dos dados da filmagem utilizados como padrão não apresentou boa definição mas também é possível identificar a presença das duas primeiras harmônicas. No entanto não é possível obter nenhuma informação relacionadas a componentes de alta frequência.

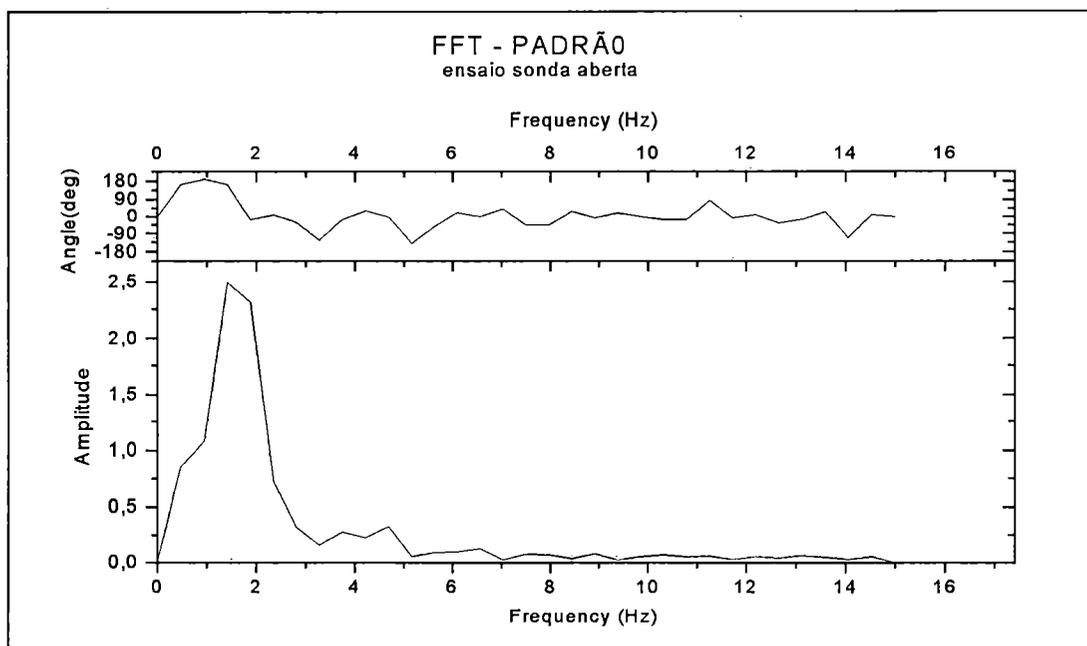


FIGURA 5.11 - FFT de uma onda de 1,57 Hz - padrão.

A título de comparação, serão apresentadas as FFTs calculadas com base nos dados das outras duas configurações excitadas com a mesma onda (figuras 5.12 e 5.13).

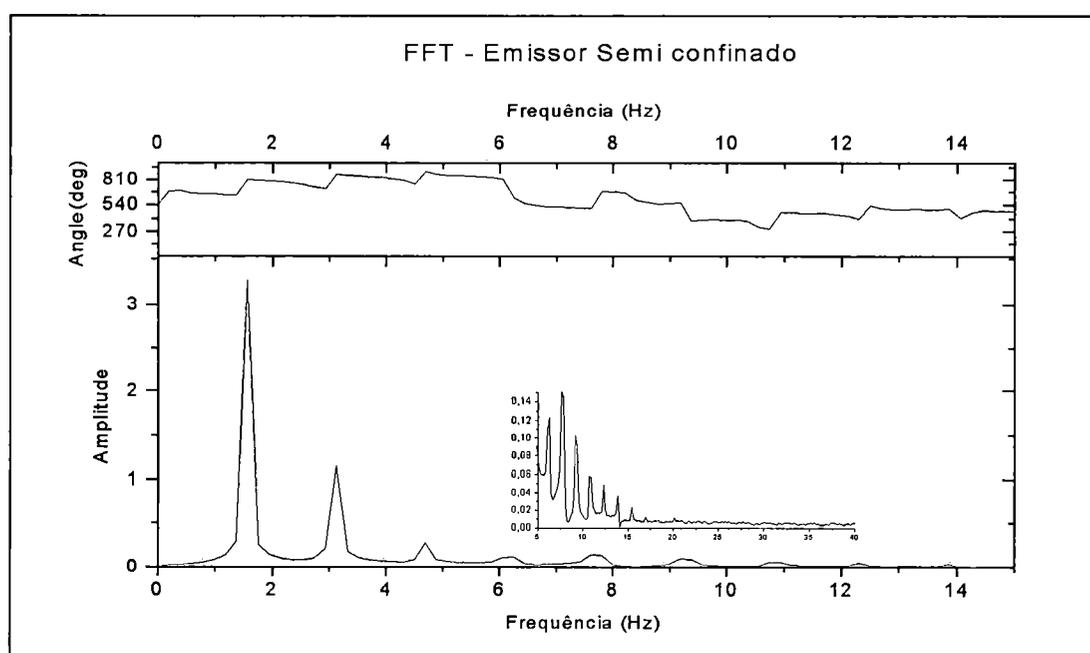


FIGURA 5.12 - FFT de uma onda de 1,57 Hz - sonda semi confinada

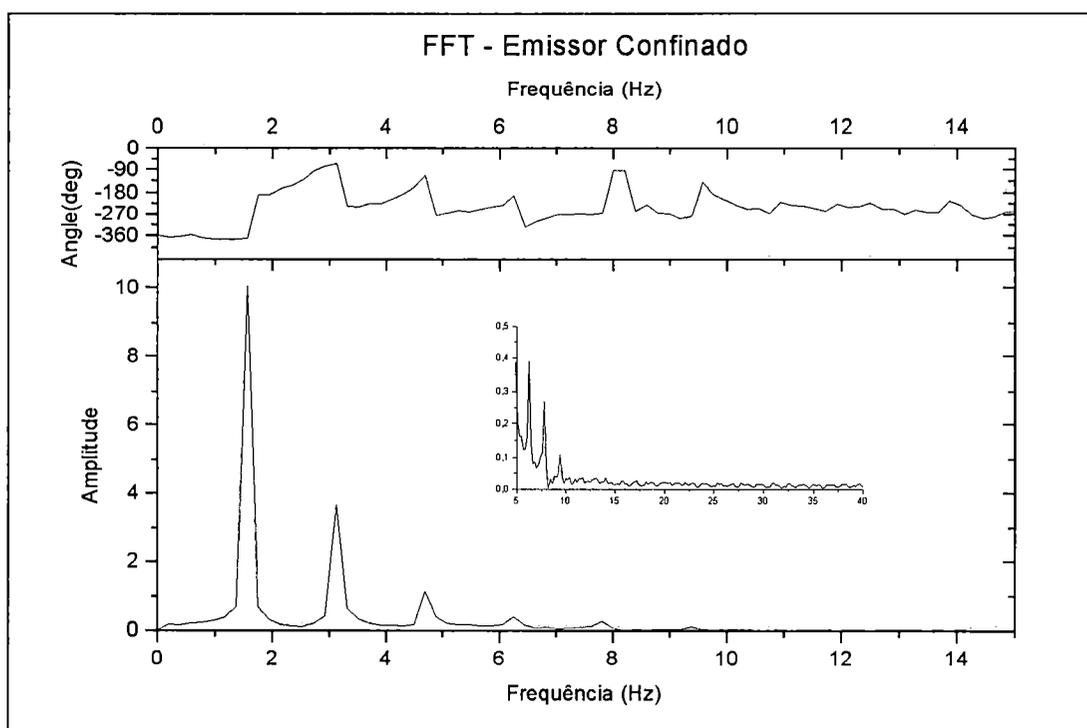


FIGURA 5.13 - FFT de uma onda de 1,57 Hz - sonda confinada

Da análise das FFTs realizadas, observa-se a resposta da sonda em frequências elevadas, comportamento esperado desde a concepção do projeto.

Verifica-se também que o padrão adotado para a calibração dinâmica foi útil somente na confrontação visual no domínio do tempo, não sendo adequado para a análise no domínio da frequência uma vez que não forneceu resolução suficiente devido ao pequeno número de amostras.

6 - CONCLUSÕES

Procurou-se, neste trabalho, o aprimoramento de uma sonda que permitisse a medição da área interfacial de líquidos agitados.

Foram ensaiadas três configurações para a sonda em estudo, onde foram variados os ângulos de emissão do emissor de infravermelho através de confinamento do feixe.

Todas as configurações apresentaram comportamento estático estável. O modelo matemático proposto de acordo com a teoria eletromagnética ajustou-se com boa aderência aos pontos experimentais.

Quanto ao comportamento dinâmico, conclui-se que, cada configuração da sonda será mais adequada a um determinado tipo de onda. Entretanto não foi obtida uma configuração única que respondesse adequadamente a todos os padrões de onda gerados em laboratório.

A sonda ótica merece ainda estudos complementares onde sugere-se a substituição do emissor de infravermelho por um diodo laser com feixe colimado e do detetor por outro do tipo matriz. Com esta alteração espera-se avaliar a inclinação e a altura da lâmina do líquido através da posição e a da intensidade do feixe incidente no detetor.

A eletrônica desenvolvida para a sonda ótica encontra aplicação em outros sistemas de medição. Foi desenvolvido um manômetro digital de diafragma para gases e líquidos. Encontra-se em fase de desenvolvimento um método com bóia flutuante para medição de nível d'água em ensaios de *run-off*.

O sistema de aquisição mostrou-se bastante versátil, rápido e preciso e têm sido utilizado em outros experimentos.

A análise de Fourier via FFT mostrou-se uma poderosa ferramenta principalmente quando aliada ao sistema de aquisição de dados utilizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLOCA, J. A. & STUART, A. Transducers _ Theory and applications
Reston Publishing Company, 1984.

ASCE A Standard Methods for measurement of oxygen transfer in Clean
Water - Oxygen Transfer Standard Committee ASCE , New York, 1984.

BARBOSA Jr., A. R. *Desenvolvimento de metodologia para determinação
do coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais da água com o
emprego de traçador gasoso* Dissertação de mestrado em Hidráulica e
Saneamento apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos
ESSC-USP, 187p., 1989.

BECKER, H. G. Mechanism of absorption of moderately soluble gases in
water *Industrial and Engineering Chemistry*, vol 16, pp.1220-1224,
1924.

BECKER, J. M. & MILES, J. W. Progressive radial cross-waves *Journal of
Fluid Mechanics*, vol.245, pp. 29-46, 1992.

BENJAMIN, T. B. A new kind of solitary wave *Journal of Fluid Mechanics*,
vol.245, pp. 401-411, 1992.

BENNETT, J. P. & RATHBUN, R. E. Reaeration in Open Channel Flow.
Geological Survey Professional Paper Washington U. S. Government
Printing Office, Paper n. 737, 1972.

- BRIGHAM, E. O.** *The Fast Fourier Transform* Ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1974.
- BRUMLEY, B. H. & JIRKA, G. H.** Near-surface turbulence in a grid-stirred tank *Journal of Fluid Mechanics*, vol.183, pp. 235-263, 1987.
- BRYANT, P. J. & STIASSNIE, M.** Different forms for nonlinear standing waves in deep water *Journal of Fluid Mechanics*, vol.272, pp. 135-156, 1994.
- BURR-BROWN** IC DATA BOOK - Data Conversion Products Burr-Brown Corporation, 1994.
- BURR-BROWN** IC DATA BOOK - Data Conversion Products Burr-Brown Corporation, 1994.
- BYATT-SMITH, J. G. B.** Na integral equation for unsteady surface waves and a comment on Boussinesq equation *Journal of Fluid Mechanics*, vol.49, part 4, pp. 625-633, 1971.
- CARREIRA, M. F.** *Relação entre o coeficiente de absorção de massa K_L e parâmetros de turbulência superficial obtidos por método óptico*
Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1995.
- CHAO, A. C., CHANG, D. S., SMALLWOOD, C. & GALLER, W. S.**
Influence of temperature on oxygen transfer *Journal of the Environmental Engineering*, pp. 722-735, aug/1987.
- CHEN, L. C. & KONG, J. A.** *Applied Electromagnetism* Brooks/Cole Engineering Division, Belmont, 1983.
- CHEN, W. K.** *Passive and active filters* John Wiley & Sons, 1986.

- CHU, J. S., LONG, S. R. & PHILLIPS, O. M.** Measurements of the interaction of waves groups with shorter wind-generates waves *Journal of Fluid Mechanics*, vol.245, pp.191-210, 1992.
- CIESZKOWSKI, F. & DYLAG, M.** The gas-liquid interface in a three-phase reactor with a mechanical agitator *International Chemical Engineering*, vol.34, pp. 527-538, oct/1994.
- CIESZKOWSKI, F. & DYLAG, M.** Application of the sulfite method to the determination of the interfacial area in stirred-tank reactors *International Chemical Engineering*, vol.34, pp. 511-517, oct/1994.
- DALLY, J. D., RILEY, W. F. & McCONNELL, K. G.** *Instrumentation of engineering measurements*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1993.
- DANCKWERTS, P. V.** Significance of Liquid - Film Coefficients in Gas Absorption *Industrial and Engineering Chemmistry*, vol. 43, pp. 1460-1467, ,jun/1951.
- DANIIL, E. I. & GULLIVER, J. S.** Influence of Temperature on Oxigen Transfer *Journal of Environmental Engineering*, vol. 115, pp. 855-871, 1989.
- DANIIL, E. I. & GULLIVER, J. S.** Effect of temperature on oxigen transfer - laboratory studies *Journal of Environmental Engineering*, vol. 115, pp. 479-48, apr/ 1989.
- DANIIL, E. I. & GULLIVER, J. S.** Influence of waves on air-water gas transfer *Journal of Environmental Engineering*, vol.117, pp. 522-540, sep.oct/1991.
- DOEBELIN, E.** *Measurement Systems: Aplication and Desing*, McGraw Hill, 1985.

- DOWNING, A. L. & THUESDALE, G. A.** Some factores affecting the rate of solution of oxygen in water *Journal of Applied Chemistry*, vol. 5, oct/1955.
- ELMORE, H. L. & WEST, W. F.** Effect of Water Temperature on Stream Reaeration *Journal of the Sanitary Engineering*, vol. 87, 1961.
- ENCINAS Jr, W. S.** *Sistema de aquisição e processamento de dados para espectroscopia por transformada rápida de Fourier* Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Física de São Carlos da USP, 1995.
- FENTON, J. D. & RIENECKER, M. M.** A Fourier method for solving nonlinear water-wave problems: application to solitary-wave interactions *Journal of Fluid Mechanics*, vol.118, pp. 411-443, 1982.
- GAMESON, A. L. H., TRUESDALE, G. A. & VARLEY, R. A.** Some Factors Affecting the Aeration of Flowing Waters *The Water and Sanitary Engineer*, pp. 52-59, 1959.
- GIORGETTI, M. F. & GIANSANTI, A. E.** *Avaliação do nível de turbulência em águas correntes e sua correlação com o coeficiente de reaeração superficial* Trabalho apresentado ao 10^o Congresso da ABES, nov/1983.
- GNAIGER, E. & FORSTNER, H.** *Polarographic Oxygen Sensors* Spring - Verlag, Berlin, 1983.
- GUZZELLI, E., REY, V. & BELZONS, M.** High-order Bragg reflection of gravity surface waves by periodics beds *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 245, pp. 301-317, 1992.
- HANRATTY, T. J.** Effect of gas flow on physical absorption *In: Air-Water Mass Transfer Second International Symposium on Gas transfer at Water Surfaces* ASCE, New York, pp. 10-33, 1990.

- HECHT, E. & ZAJAC, A.** *Optics* Adson-Wesley Publishing Company, 1979.
- HIGBIE, R.** On the absorption of a pure gas into a still liquid during short period exposure *Transactions of American Institute of Chemical Enginners*, vol. 31, pp. 365-390, 1935.
- HOPFINGER, E. J. & TOLY, J. A.** Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces *Journal of Fluid Mechanics*, vol.78, pp.155-175, 1976.
- HOROWITZ, P & HILL, W.** *The arts of eletrônics* Cambridge University Press, 2nd edition, 1995.
- HUA, H.** Accurate method for calculation of saturation O.D. *Journal of the Environmental Engineering*, apr/1989.
- HUNT, J. C. R. & GRAHAM, J. M. R.** Free-stream turbulence near plane boundaries *Journal of Fluid Mechanics*, vol.84, pp.209-235, 1978.
- JOAQUIM, M. B. & SARTORI, J. C.** Representação de Sinais e Sistemas Serviço de Publicações da EESC-USP, São Carlos, 1990.
- KARMAN, T. & HOWARTH, L.** On the statistical theory of isotropic turbulence *Proceedings of Royal Society of London*, vol. 164, pp. 192-215, 1937.
- KISHINEVSKY, M. K.** Two Approaches to the Theoretical Analisis of Absorption Processes *Journal of Applied Chemmistry - U.S.S.R*, vol. 28, pp. 881-886, 1955.
- KUSNETSOV, V. R., PRASKOVSKIY, A. A. & SABEL'NIKOV, V. A. -** Measurement of microscale turbulence in shear flows *Fluid Mechanics Soviet Researchs*, vol.19, pp. 60-69, nov_dec/1990.

- LEWIS, W. & WHITMAN, W. G.** Principles of gas absorption *Industrial and Engineering Chemistry*, vol 16, pp. 1215-1220, 1924.
- MAXWELL, W. H. L. & HOLLEY, E. R.** A method for deaerating water *Journal of Hydraulics Division*, pp.577-580, jan/1969.
- MAXWORTHY, T.** Experiments on collisions between solitary waves *Journal of Fluid Mechanics*, vol.76, pp.177-185, 1976.
- MELLO, E. C.** *Sistema óptico para avaliação do coeficiente de reaeração superficial em corpos d'água* Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1996.
- METZGER, I. & DOBBINS, W. E.** Role of fluid properties in gas transfer, vol.1, pp.57-65, jan/1967.
- NATIONAL Semiconductor Corporation** LS / S / TTL Logic Databook 1984.
- OGATA, K.** *Engenharia de Controle Moderno*, 2ª edição, Editora Prentice Hall do Brasil, 1993.
- RATHBUN, R. E.** Reaeration coefficients of streams - state of the art *Journal of Hydraulics Division*, pp. 215-229, april/1978.
- REY, V., BELZONS, M., GUAZZELLI, E.** Propagation of surface gravity wavws over a rectangular submerged bar *Journal of Fluid Mechanics*, vol.235, pp. 453-479, 1992.
- ROMA, W. N. L.** *Medida dos parâmetros de turbulência superficial e sua interrelação com o coeficiente de reaeração* Tese de Livre Docência apresentada à escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1988.
- SCHULZ, H. E.** *Investigação do mecanismo de reoxigenação da água em escoamento e sua correlação com o nível de turbulência junto à*

superfície. Tese de Doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos - EESC-USP, 1990.

STANDART Methods For The Examination Of Water And Wastewater
American Public Health Association, 1971.

THACKSTON, E. L. & **KRENKEL**, P. A. Reaeration prediction in natural streams *Journal of the Sanitary Engineering Division*, pp. 65-94, Feb/1969

TAYLOR, G. I. Statistical Theory of turbulence. *Proceedings of Royal Society of London*, pp. 421-478, 1935.

TAYLOR, G. I. The spectrum of turbulence *Proceedings Royal Society of London*, pp. 476-490, 1937.

THOMPSON, J. S. & **TURNER**, J. S. Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid *Journal of Fluid Mechanics*, vol.67, part2, pp. 349-368, 1975.

TONISSI Jr, S. A. *Instrumentação eletrônica para pesquisas na área de ótica* Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Física e Química de São Carlos da USP, 1992.

WHITMAN, W. G. The two - film theory of gas absorption *Chemical and Metallurgical Engineering*, vol. 23, pp. 146-148, 1923.

APÊNDICE 1

Notação Exponencial

A notação exponencial é utilizada como forma compacta de representação de funções harmônicas no tempo. Neste caso considerar-se-á o caso de de funções com apenas uma componente frequencial.

Seja o número complexo $x=a+jb$ onde:

a é a parte real de x , ou $a = \text{Re}(x)$

b é a parte imaginária de x , ou $b = \text{Im}(x)$

Pode ser provada ainda a relação de Euler que estabelece:

$$Ae^{j(\omega t + \phi)} = A \cos(\omega t + \phi) + jA \text{sen}(\omega t + \phi) \dots\dots\dots (A1.1)$$

Desta forma, uma função do tipo $f(t) = A \cos(\omega t + \phi)$ pode ser escrita como:

$$f(t) = \text{Re}(e^{j(\omega t + \phi)}) = \text{Re}(e^{j\omega t} \cdot e^{j\phi}) \dots\dots\dots (A1.2)$$

Como a frequência não se altera, podemos suprimir os termos Re e $e^{j\omega t}$ sem perda da generalidade. Deve-se considerar que embora não estejam presentes, os termos existem, e assim:

$$f(t) = A \cos(\omega t + \phi) \equiv Ae^{j\phi} \dots\dots\dots (A1.3)$$

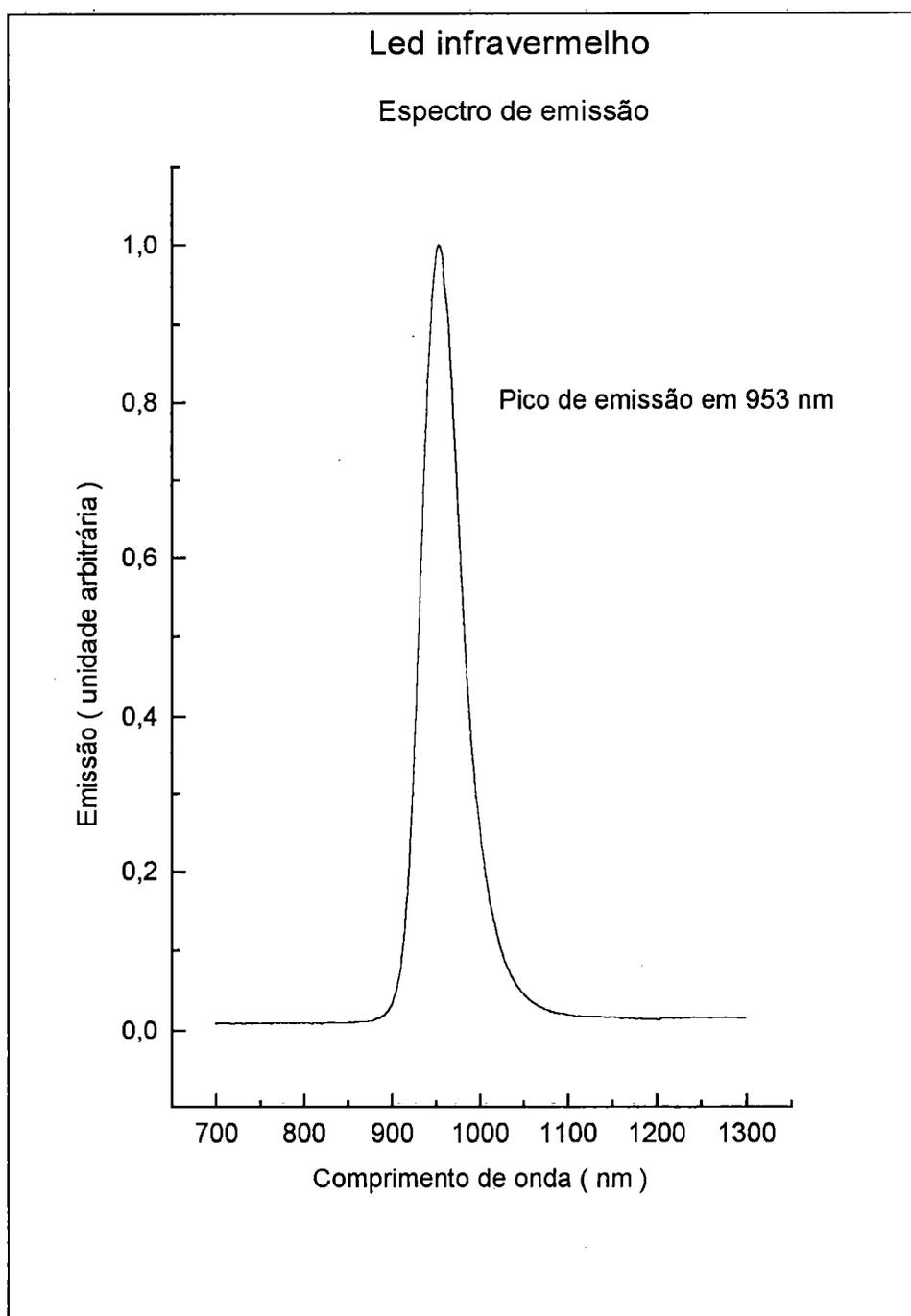
E são úteis as relações:

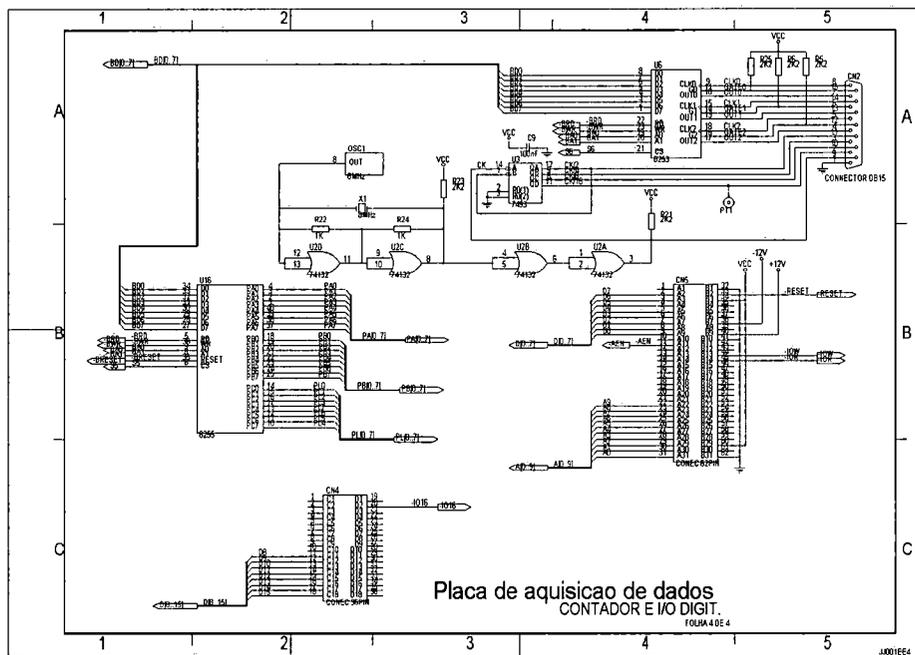
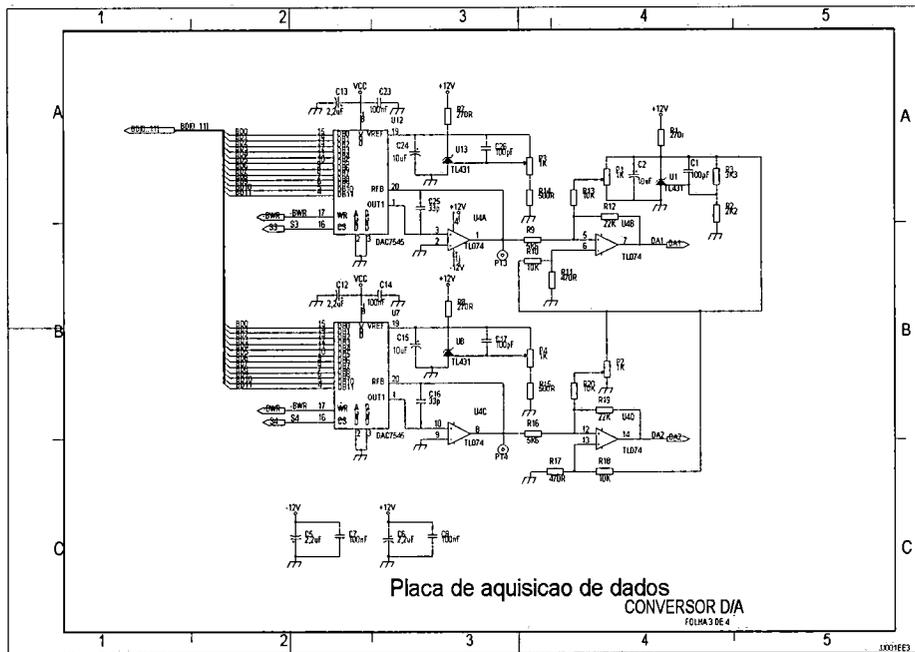
$$\frac{df(t)}{dt} = -A\omega \operatorname{sen}(\omega t + \phi) = j\omega A e^{j\phi} \dots\dots\dots (A1.4)$$

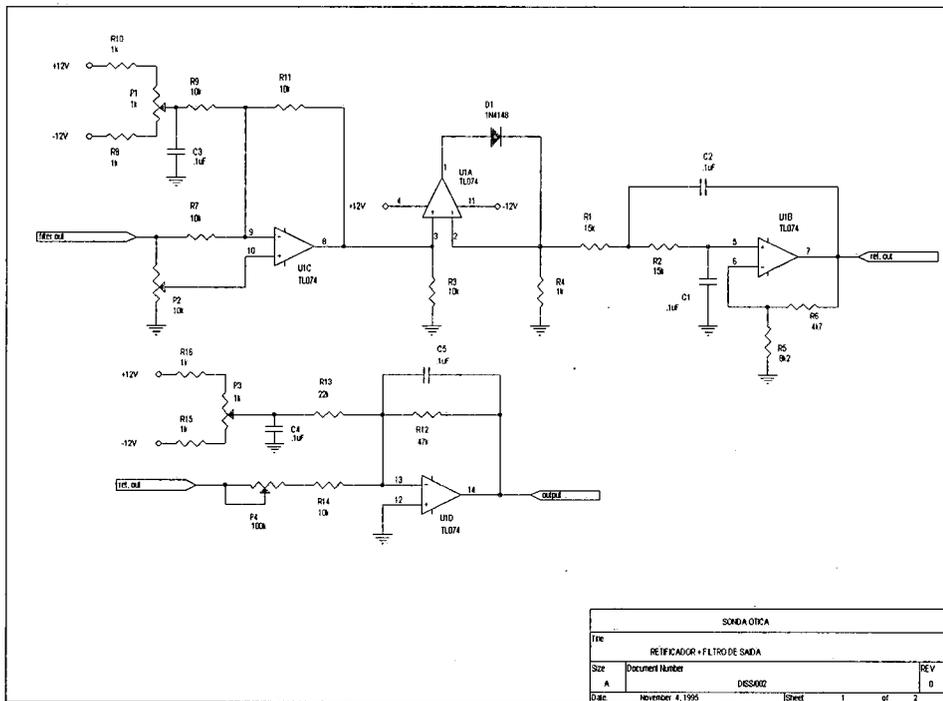
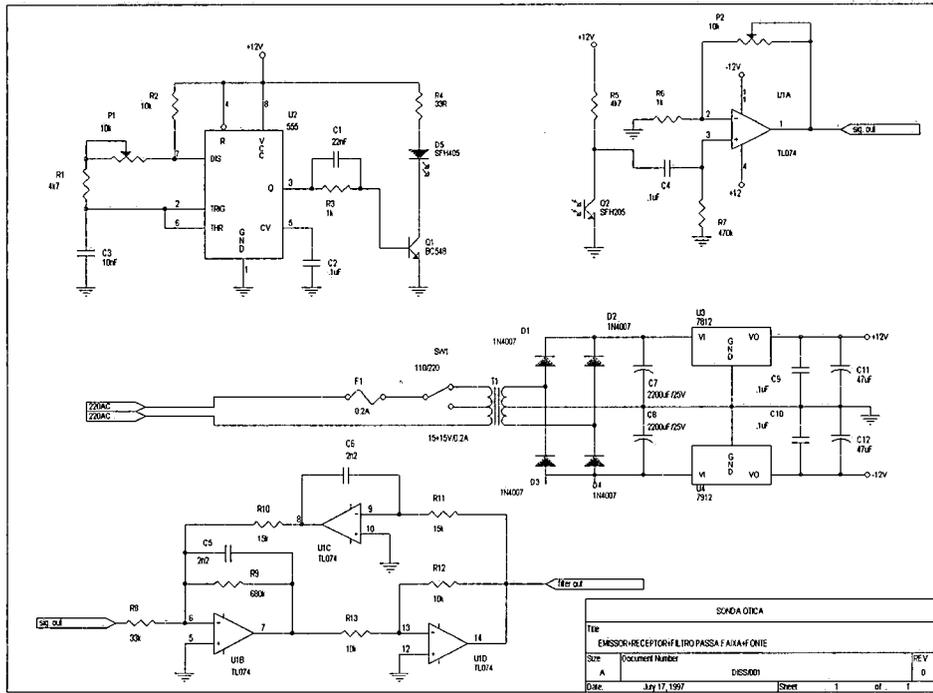
$$\int f(t)dt = \frac{A}{\omega} \operatorname{sen}(\omega t + \phi) = \frac{1}{j\omega} A e^{j\phi} = -j \frac{A}{\omega} e^{j\phi} \dots\dots\dots (A1.5)$$

APÊNDICE 2

Espectro de emissão do led infravermelho







APÊNDICE 4

Disquete demonstrativo

No disquete anexo, além do programa fonte, está incluído um arquivo executável em Windows que simula o programa utilizado na aquisição dos dados.

Para acessá-lo é necessário copiar o arquivo WKernel.DLL para o subdiretório C:\Windows\System, o que pode ser feito através do arquivo de lote Instala.bat da seguinte forma:

No *Explorer* do Windows95, selecione o drive A (3 ½ ") e dê dois *clicks* sobre o arquivo Instala.bat.

Em seguida dê dois *clicks* sobre o arquivo Onda.exe.

Todos os botões de comando estarão ativos e quando acionados exibirão resultados aleatórios por que não têm a placa de aquisição disponível.

No disquete também contém os arquivos utilizados no tratamento dos dados. Os arquivos com extensão **opj** podem ser abertos com o Origin 4.0.

Listagem do programa fonte

A listagem abaixo é o fonte do programa implementado em Visual Basic. O fonte do programa em C encontra-se no disquete com o nome Kernel.C

Definição das variáveis globais

```
Global Onda%()
Global NPtos%
Global FreqAq%
```

Definição das rotinas implementadas na DLL

```
Declare Sub SelPlaca Lib "wkernel.dll" (ByVal ender%)
Declare Sub ConfPIO Lib "wkernel.dll" (ByVal modo%)
Declare Sub ConfCnPIO Lib "wkernel.dll" (ByVal canal%, ByVal modo%)
Declare Sub EscCnPIO Lib "wkernel.dll" (ByVal canal%, ByVal dado%)
Declare Function LeCnPIO Lib "wkernel.dll" (ByVal canal%) As Integer
Declare Sub EscCnDAC Lib "wkernel.dll" (ByVal canal%, ByVal dado%)
Declare Function LeCnADC Lib "wkernel.dll" (ByVal canal%) As Integer
Declare Sub ConfCnCTD Lib "wkernel.dll" (ByVal canal%, ByVal modo%)
Declare Sub EscCnCTD Lib "wkernel.dll" (ByVal canal%, ByVal dado%)
Declare Function LeCnCTD Lib "wkernel.dll" (ByVal canal%) As Integer
Declare Sub LeCnADCbt Lib "wkernel.dll" (ByVal cnADC%, ByVal
cnCTD%, vet%(), ByVal n%)
Declare Sub LeCnADCev Lib "wkernel.dll" (ByVal cnADC%, ByVal cnPIO%,
ByVal bitPIO%, vet%, ByVal n%)
```

```
Global Const PIO_SIMPLES% = 0
Global Const PIO_HANDSHAKE1% = 1
Global Const PIO_HANDSHAKE2% = 2
```

```
Global Const PIO_CN_ENT% = 0
Global Const PIO_CN_SAI% = 1
Global Const PIO_CN_ES% = 2
```

```
Global Const CTD_INTERR% = 0
Global Const CTD_PULSO% = 2
Global Const CTD_CLOCK% = 3
Global Const CTD_GATE% = 4
```

Rotina para Salvar arquivo de dados

```
Sub mnuSalva_Click ()
Dim l%
diaArq.Action = 2
If diaArq.FileName <> "" Then
Open diaArq.FileName For Output As #1
For l% = 1 To Nptos%
```

```

        Print #1, Format$(I% / FreqAq%, "0.0000"), Onda%(I%)
    Next I%
    Close #1
End If
End Sub

```

Rotina de saída

```

Sub mnuSair_Click ()
IniPlaca
    End
End Sub

```

Rotina para alterar a velocidade do motor

```

Sub scrDA_Change ()
Dim v%
    txtDA = scrDA.Value
    v% = scrDA.Value
    EscCnDAC 0, v%
End Sub

```

Rotina setar para taxa de aquisição

```

Sub scrBase_Change ()
Dim div%
    labBase = scrBase.Value
    div% = (2000 / scrBase.Value) * 1000
    EscCnCTD 0, div%
End Sub

```

Rotina para escolher número de pontos por corrida

```

Sub scrNPtos_Change ()
labNPtos = scrNPtos.Value
End Sub

```

Rotina para conometrar onda

```

Sub Crono_Click ()
    screen.MousePointer = 11
    Dim Pico%, Pico2%, TempOnda%
    EscCnCTD 1, 500
    'configura CTD1 para gerar
    'base de tempo de 1kHz'

    Do
        Pico% = LeCnPIO(2)
        Pico% = Pico% And 2
    Loop While Pico% <> 2
    EscCnCTD 2, 10000
    'inicia contagem 8253'
    Beep
    Do
        Pico2% = LeCnPIO(2)
        Pico2% = Pico2% And 4
    Loop

```

```

Loop While Pico2% <> 4
TempOnda% = LeCnCTD(2)           'termina contagem'
TempOnda% = 10000 - TempOnda%   'calcula tempo'
Beep
Beep
tempo.Caption = TempOnda%
screen.MousePointer = 1
End Sub

```

Rotina para sincronizar aquisição com passagem de crista

```

Sub Crista_Click ()
screen.MousePointer = 11
pos.Caption = "Vale"
pos.Refresh
Dim Pico%
Do
Pico% = LeCnPIO(2)
Pico% = Pico% And 2
Loop While Pico% <> 2
pos.Caption = "Crista"
pos.Refresh
Beep
btnInic_Click
screen.MousePointer = 1
pos.Caption = ""
End Sub

```

Rotina para disparar aquisição de dados

```

Sub btnInic_Click ()
Dim l%
Nptos% = scrNPTos.Value
FreqAq% = scrBase.Value
ReDim Onda(Nptos%)
graOnda.NumPoints = Nptos%
LeCnADCEv 2, 2, 0, Onda%(1), Nptos%
For l% = 1 To Nptos%
Onda%(l%) = 4095 - Onda%(l%)
Next l%
graOnda.AutoInc = 0
For l% = 1 To Nptos%
graOnda.ThisPoint = l%
graOnda.GraphData = Onda%(l%)
graOnda.LabelText = Format$(l% / FreqAq%,
"#0.00")
Next l%
graOnda.DrawMode = 2
Média_click
End Sub

```

Rotina para cálculo da média e desvio padrão

```

Sub Média_click ()
Dim MédiaVet As Long
Dim SomaD As Long

```

```
Dim SD As Single
MédiaVet = 0
SomaD = 0
SD = 0
For I% = 1 To Nptos%
    MédiaVet = MédiaVet + Onda%(I%)
Next I%
MédiaVet = MédiaVet / Nptos%
MédiaLbl.Caption = MédiaVet
For I% = 1 To Nptos%
    SomaD = (Onda%(I%) - MédiaVet) ^ 2
    SD = SomaD + SD
Next I%
SD = Sqr(SD / (Nptos% - 1))
LblSD = Format(SD, "#.##")
```

End Sub

APÊNDICE 5

Curva de calibração do conversor A/D

