

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRAULICAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HIDRICOS E SANEAMENTO

CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
PARA AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS
DE PRESSÕES INSTANTÂNEAS EM LABORATÓRIO

Autor: LUIZ AUGUSTO MAGALHÃES ENDRES

Orientador: Prof. Dr. LUIZ EMILIO SA BRITO DE ALMEIDA

Co-orientador: Prof. M.Sc. BRUNO SEIBERT DE REZENDE

Porto Alegre, RS, dezembro de 1990.

SUMÁRIO

	pag.
LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE TABELAS.....	5
RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
INTRODUÇÃO.....	8
1 ASPECTOS TEÓRICO-PRÁTICOS.....	10
1.1 CLASSIFICAÇÃO DE DADOS FÍSICOS.....	10
1.2 TÉCNICAS DESCRITIVAS DOS DADOS ALEATÓRIOS.....	12
1.2.1 VALORES MÉDIOS QUADRÁTICOS.....	12
1.2.2 FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE.....	13
1.2.3 FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO E AUTOCOVARIÂNCIA.....	14
1.2.3.1 CORRELOGRAMA.....	16
1.2.3.2 ESTIMADORES DAS FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO E AUTOCOVARIÂNCIA.....	17
1.2.4 FUNÇÕES DENSIDADE DE POTÊNCIA ESPECTRAL.....	18
1.2.4.1 PROCESSOS CONTÍNUOS.....	24
1.2.4.2 ANÁLISE DE FOURIER.....	24
1.2.4.3 FREQUÊNCIA DE NYQUIST.....	25
1.2.4.4 PERIODOGRAMA.....	25
1.2.4.5 ESTIMADORES DA FUNÇÃO DENSIDADE DE POTÊNCIA ESPECTRAL.....	28
1.2.4.6 SÉRIES TEMPORAIS CONTÍNUAS.....	31
1.3 TÉCNICAS PARA ANÁLISE CONJUNTA DE DADOS ALEATÓRIOS.....	32

1.3.1	FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE CONJUNTA.....	33
1.3.2	FUNÇÃO DE CORRELAÇÃO CRUZADA.....	34
1.3.3	FUNÇÕES DENSIDADE DE ESPECTRO CRUZADO.....	34
1.4	MEDIÇÕES COM AUXILIO ELETRÔNICO.....	35
1.4.1	DOMINIOS DOS DADOS.....	36
1.4.2	COMPONENTES ELETRÔNICOS.....	37
1.4.2.1	TRANSDUTORES RESISTIVOS.....	38
1.4.3	CONVERSÃO DE DADOS DIGITAIS E ANALÓGICOS.....	40
1.4.3.1	SINAIS ANALÓGICOS VARIÁVEIS.....	41
1.4.3.2	CONVERSORES E MEDIÇÕES.....	43
1.5	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS.....	43
1.5.1	ANÁLISE DIGITAL VERSUS ANALÓGICA.....	48
2	OBJETIVOS.....	48
3	METODOLOGIA.....	50
3.1	EQUIPAMENTO UTILIZADO.....	50
3.1.1	SENSOR.....	51
3.1.2	CONDICIONADOR DE SINAIS.....	52
3.1.3	CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL.....	53
3.1.4	PROCESSADOR.....	54
3.2	GERENCIAMENTO DO SISTEMA.....	54
3.2.1	PROGRAMAS DE COMPUTADOR.....	56
3.2.1.1	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	57
3.2.1.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS.....	60
3.2.1.3	ANÁLISE ESPECTRAL DE DADOS.....	62
4	APLICAÇÕES DO SISTEMA.....	66
4.1	ESCOAMENTO DE FLUIDOS.....	67
4.1.1	DISSIPACÃO DE ENERGIA.....	68
4.2	APLICAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA.....	69
4.2.1	DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO.....	70
4.2.2	INSTRUMENTAÇÃO.....	73
4.2.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	73
4.2.3.1	CONDIÇÕES HIDRAULICAS.....	73
4.2.3.2	CALIBRAÇÃO ESTATICA.....	74
4.2.3.3	AQUISIÇÃO.....	76
4.2.3.4	ANÁLISE.....	76
4.2.4	RESULTADOS OBTIDOS.....	78
4.2.5	COMENTARIOS SOBRE OS RESULTADOS.....	80

4.2.5.1 PRESSÕES MÉDIAS, MÁXIMAS E MÍNIMAS.....	80
4.2.5.2 COEFICIENTE DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO.....	81
4.2.5.3 FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO.....	83
4.2.5.4 FUNÇÃO DENSIDADE DE POTÊNCIA ESPECTRAL..	85
4.3 TÉCNICAS USUAIS.....	87
4.3.1 MEDIÇÕES DE PRESSÃO.....	87
4.3.2 OUTRAS MEDIÇÕES.....	93
5 CONCLUSÕES.....	96
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98

ANEXOS

- A1: VISUALIZAÇÃO DA ENTRADA DE DADOS
- A2: AQUISIÇÃO DE DADOS EM TEMPO REAL
- A3: CONVERSÃO DE VALORES NO DOMÍNIO DIGITAL
- A4: ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS
- A5: DETERMINAÇÃO DO AUTOCORRELOGRAMA
- A6: DETERMINAÇÃO DO ESPECTRO DE POTÊNCIA

LISTA DE FIGURAS

	pag.
figura 1.1: SÉRIE TEMPORAL ESTACIONARIA E SUA CORRELAÇÃO DE CURTO-TERMO.....	17
figura 1.2: DENSIDADE E DISTRIBUIÇÃO NORMALIZADA DE POTENCIA ESPECTRAL.....	22
figura 1.3: DOMÍNIOS DE REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES.	36
figura 1.4: ONDA SENOIDAL.....	42
figura 1.5: GERAÇÃO DA ONDA SENOIDAL A PARTIR DO VETOR ROTATIVO.....	43
figura 3.1: TRANSDUTOR DE PRESSÃO.....	51
figura 3.2: CONDICIONADOR DE SINAIS...	52
figura 3.3: CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL.	53
figura 4.1: VISTA GERAL DAS INSTALAÇÕES.	71
figura 4.2: DETALHE DAS INSTALAÇÕES.....	72
figura 4.3: APARATO PARA CALIBRAÇÃO ESTATICA.	75
figura 4.4: DENSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES..	81
figura 4.5: COEFICIENTES DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO.	82
figura 4.6: CORRELOGRAMAS TIPO.	84
figura 4.7: ESPECTROS TIPO.....	86

LISTA DE TABELAS

tabela 1: RESUMO DOS ENSAIOS REALIZADOS.....	78
tabela 2: ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO..	79
tabela 3: ANÁLISE ESPECTRAL DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO.....	80

RESUMO

Este trabalho constituiu-se no desenvolvimento de um sistema para aquisição e tratamento de dados de pressões instantâneas em laboratório. A aquisição consta das etapas de amostragem da série contínua de valores reais e de sua conversão, entre os domínios físico, elétrico e digital, em que é representada. O tratamento efetuado subdivide-se em: análise estatística, com a determinação da função distribuição de probabilidade dos valores amostrados, e de seus quatro primeiros momentos estatísticos; e análise espectral, com a determinação das funções de autocorrelação e densidade de espectro de potência amostrais.

O desenvolvimento deste sistema possibilita a caracterização de escoamento reais, no que diz respeito a valores flutuantes de pressões instantâneas. As informações obtidas permitem uma melhor compreensão da física dos escoamentos, contribuindo, por exemplo, no enriquecimento dos critérios de dimensionamento de estruturas hidráulicas correntes, que baseiam-se, apenas, em grandezas médias.

O sistema foi montado, a partir de equipamentos apropriados e existentes no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e de outros, recentemente adquiridos. Os programas de computador, responsáveis tanto pela etapa de aquisição como pela de tratamento, foram escritos em linguagem BASIC e, posteriormente, compilados para linguagem de máquina, quando de sua utilização.

Foi realizada, também, uma aplicação prática do sistema, na avaliação do campo de pressões, verificado a jusante de um modelo físico de descarregador de cheias. Os resultados são apresentados e comentados.

ABSTRACT

In this study, a system for the acquisition and treatment of instantaneous pressure data, in a laboratory, is developed. Acquisition consists of two stages: sampling the continuous series of real values and their conversion between the physical, electrical and digital domains in which they are represented. The treatment performed is subdivided into: statistical analysis, determining the probability distribution function of the sampled values and the first four statistical moments; and spectral analysis with the determination of the autocorrelation function and power spectral density function of the sample.

The development of this system makes it possible to describe real flow as to oscillating values of instantaneous pressures. The information obtained allows an improved understanding of the physics of flow, thus contributing, for instance, to broaden the design criteria for current hydraulic structures which are only based on mean values.

The system was set up with appropriate equipment available at the Institute of Hydraulic Research of the Federal University of Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS), and others recently acquired equipment. The computer programs which performs both acquisition and treatment were written in BASIC, and later compiled for machine language when they were used.

The system was also applied in practice, for the evaluation of a pressure field found downstream of a physical model of a spillway. The results are presented and discussed.

INTRODUÇÃO

O presente trabalho, apresenta o desenvolvimento e aplicação de um sistema para aquisição em tempo real e tratamento de dados representativos de pressões instantâneas, em laboratórios de hidráulica.

A utilização de sistemas deste tipo, é de grande relevância, pelas informações que decorrem de sua aplicação. Por exemplo, o levantamento de flutuações e valores extremos das pressões, junto aos contornos dos escoamentos verificados em estruturas ensaiadas em modelos físicos, não pode ser substituído, apenas, pelo dos valores médios, obtidos através dos equipamentos não-eletrônicos, convencionais (LOPARDO et al., 1974; ORTIZ, 1986; LOPARDO, 1986; TOSO e BOWERS, 1988; entre outros).

O sistema foi desenvolvido a partir de equipamentos apropriados e existentes no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS), complementados por um conversor analógico-digital e um micro-computador, compatível com o IBM-PC. O gerenciamento das operações foi executado por um conjunto de programas para computador, montado de forma a obter total compatibilidade com os demais dispositivos empregados.

O trabalho foi organizado em sete itens principais. No

primeiro, registra-se o resultado da busca bibliográfica sobre aspectos teórico-práticos em estatística e eletrônica, normalmente empregados em sistemas deste tipo. O maior destaque, dado aos tópicos de análise espectral e medições com auxílio eletrônico, embora com enfoque introdutório, visa suprir eventuais deficiências que os integrantes de equipes de laboratório possuam, nestas áreas não abordadas nos cursos regulares de graduação em engenharia civil.

No segundo item expõem-se os objetivos do trabalho.

No seguinte é abordada a metodologia empregada, descritos os equipamentos utilizados e apresentada a forma como os dados foram adquiridos e tratados, via computador digital, através de um conjunto de programas, que são apresentados em anexo.

Em continuação, no item de aplicação do sistema, descrevem-se os métodos específicos e apresentam-se os resultados alcançados no levantamento de características do campo de pressões flutuantes, no piso de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico, instalada a jusante de um descarregador de cheias (modelo). Este levantamento, é parte integrante de pesquisa realizada no IPH, sobre critérios para projeto de bacias de dissipação. neste mesmo item estão listadas, de forma resumida, as técnicas usuais empregadas por diferentes autores na aquisição e tratamento de dados instantâneos. Estas informações servirão como subsídios a futuras ampliações da aplicação do sistema desenvolvido.

Os itens restantes contém conclusões, referências bibliográficas e anexos.

Para facilitar a leitura, as figuras e tabelas utilizadas estão inseridas no texto, próximas ao local das citações. Os símbolos e abreviaturas empregados, têm seu significado apresentado juntamente com a primeira ocorrência.

1 ASPECTOS TEÓRICO-PRÁTICOS

1.1 CLASSIFICAÇÕES DE DADOS FÍSICOS

Os dados que representam um fenômeno físico em observação, podem apresentar determinadas características que permitem classificá-los sob diferentes critérios. Um destes, conforme apresentado em BENDAT e PIERSOL, 1971, sob o ponto de vista da análise a ser empregada na descrição, pode ser esquematizado na seguinte forma:

DADOS OBSERVADOS	determinísticos	periódicos	senoidais
		quase-periódicos	complexos
		transientes	
	aleatórios	estacionários	ergódicos
		não-estacionários	não-ergódicos

Este critério, baseia-se na possibilidade ou não de repetirem-se, de forma idêntica, as ocorrências originalmente observadas, considerando os limites de erro em utilização ou, mais rigorosamente, se é possível ou não explicitar relações matemáticas capazes de descrever, com o rigor desejado, o

conjunto de dados em questão.

No caso positivo da possibilidade de recuperação de valores já ocorridos, através de uma relação matemática, os dados são designados determinísticos e, em caso contrário, dados aleatórios.

Os dados determinísticos que apresentarem ocorrências repetidas a intervalos fixos de tempo (período), podem ser descritos por uma função dependente do tempo, dados periódicos senoidais, ou possuir sua forma da onda, uma função também dependente do tempo, repetida a intervalos regulares, sendo chamados dados periódicos complexos. Caso ocorra, na prática, a fusão de dois ou mais fenômenos periódicos não relacionados, o fenômeno físico resultante será representado, em geral, por um conjunto de dados designados quase-periódicos. Quaisquer outros fenômenos físicos que tenham sua descrição através de funções matemáticas dependentes do tempo, sem a identificação de períodos, terão dados não-periódicos transientes a descrevê-los.

A representação de um fenômeno físico aleatório, por outro lado, não poderá ser feita através de uma relação matemática explícita, pois qualquer observação realizada será apenas uma das muitas possíveis de ocorrer, resultando um conjunto de dados, também designados, aleatórios.

No entanto, o conjunto de todos os resultados que poderiam ocorrer em um fenômeno aleatório pode, em alguns casos, ser descrito por valores médios obtidos a partir deste conjunto, para determinados instantes, tais como o valor médio e a função de autocorrelação (descritos adiante). Nesse caso, o processo aleatório gerador dos dados é dito estacionário, sendo, ainda, classificado como ergódico se possuir os valores médios referidos constantes ao longo do tempo. A não-ergodicidade é atribuída ao comportamento oposto e a não-estacionariedade caracteriza os fenômenos aleatórios que geram dados cujos parâmetros característicos variam no tempo.

Verifica-se, na prática, que os processos aleatórios ergódicos são uma classe importante dentre os processos aleatórios em geral, sendo possível determinar suas propriedades através de médias no tempo, provenientes de um único registro amostral. Os dados aleatórios representativos dos fenômenos físicos estacionários são, geralmente, ergódicos, daí a razão de ser possível avaliar corretamente as propriedades dos fenômenos estacionários a partir da observação de um único registro.

1.2 TÉCNICAS DESCRITIVAS DOS DADOS ALEATÓRIOS

Quatro tipos principais de funções estatísticas são usadas para descrever as propriedades básicas de dados aleatórios:

- a) Valores médios quadráticos: informam sobre a magnitude dos dados;
- b) Funções densidade de probabilidade: fornecem informações sobre as propriedades dos dados que dizem respeito a suas amplitudes (domínio das amplitudes);
- c) Funções de autocorrelação (autocovariância): fornecem informações sobre as propriedades dos dados que os caracterizam no tempo (domínio do tempo); e
- d) Funções densidade de potência espectral: fornecem informações sobre as propriedades dos dados que os caracterizam quanto às frequências de variação (domínio da frequência).

Utilizando termos gerais e assumindo que os dados a serem tratados são ergódicos, pode-se descrever as funções mencionadas.

1.2.1 Valores médios quadráticos

Um valor médio quadrático é a média dos quadrados dos valores constantes do registro no tempo. O valor médio quadrático ψ_x^2 de um registro amostral $x(t)$ é dado por

$$\psi_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (1.1).$$

A raiz quadrada positiva do valor médio quadrático é chamada raiz média quadrática ("root mean square" = valor RMS) ou, simplesmente, média quadrática.

Normalmente, os dados físicos são tratados como resultantes da combinação entre uma componente invariante no tempo e outra flutuante. A componente invariante pode ser descrita pelo valor médio (μ_x) de todos os valores, ou seja

$$\mu_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (1.2).$$

A componente flutuante pode ser descrita por uma variância (σ_x^2), que vem a ser o valor médio quadrático com relação ao valor médio, ou seja

$$\sigma_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_x]^2 dt \quad (1.3).$$

A raiz quadrada positiva da variância é o que se denomina desvio padrão, σ .

Comprova-se que a variância é igual à diferença entre o valor médio quadrático e o quadrado do valor médio, ou seja

$$\sigma_x^2 = \psi_x^2 - \mu_x^2 \quad (1.4).$$

1.2.2 Funções densidade de probabilidade

A função densidade de probabilidade dos dados aleatórios descreve a probabilidade com que os dados assumirão um valor, dentro de uma faixa definida, em qualquer instante do tempo. Esta função é sempre real e não-negativa.

Se o tamanho da faixa de variação dos valores do registro $x(t)$ é definido pelos limites x e $x+\Delta x$, a função densidade de probabilidade $p(x)$ é

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \text{Prob}[x < x(t) < x+\Delta x] / \Delta x \quad (1.5)$$

A probabilidade de que o valor instantâneo $x(t)$ seja menor ou igual a algum determinado valor x é a ordenada da função distribuição de probabilidade ou função distribuição de probabilidade cumulativa $P(x)$, obtida pela integração da função densidade de probabilidade, entre $-\infty$ e x . Em forma de equação

$$P(x) = \text{Prob} [x(t) \leq x] \quad (1.6)$$

A função distribuição $P(x)$ é limitada por zero (impossibilidade da ocorrência de valores para $x(t)$ menores do que $-\infty$) e a unidade (certeza da ocorrência de valores para $x(t)$ menores do que $+\infty$). A probabilidade de que $x(t)$ resulte no interior da faixa $(x_1; x_2)$ é dada por

$$P(x_2) - P(x_1) = \text{Prob} [x_1 < x(t) \leq x_2] = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx \quad (1.7).$$

A partir deste momento, aprofundando um pouco mais a análise, até o nível em que será utilizada neste trabalho, e dando-se preferência à formulação adequada a dados discretizados, passa-se a descrever as demais técnicas usualmente empregadas no tratamento das séries temporais.

1.2.3 Funções de autocorrelação e autocovariância

Um guia importante para as propriedades de uma série temporal é obtido (CHATFIELD, 1982) pela série de grandezas chamadas coeficientes de autocorrelação amostral, que medem a correlação existente entre observações afastadas de diferentes retardos, e estimam a função de autocorrelação.

A idéia básica do coeficiente de autocorrelação é de que, dados N pares de observações de duas variáveis x e y , o coeficiente de correlação r , é dado por

$$r = \frac{[\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{[\sum (x_i - \bar{x})^2] [\sum (y_i - \bar{y})^2]}} \quad (1.8)$$

Uma idéia similar pode ser aplicada a séries temporais para verificar se observações sucessivas são correlacionadas. Aqui,

são dadas N observações x_1, x_2, \dots, x_N , de uma série temporal discreta, onde \bar{x} representa a média dos valores, calculada sobre toda a série, assim

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t \quad (1.9)$$

São, então, tomados pares de pontos, afastados de uma distância k , denominada retardo ("lag"), determinando o coeficiente de correlação r_k

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2} \quad (1.10)$$

Como o coeficiente de (1.10) mede a correlação entre observações sucessivas, ele é chamado coeficiente de autocorrelação no retardo k .

Na prática, os coeficientes de autocorrelação são, normalmente, calculados pela determinação da série de coeficientes de autocovariância (c_k), que pode ser definido através de

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (1.11),$$

coeficiente de autocovariância no retardo k .
Calcula-se, então,

$$r_k = c_k / c_0 \quad (1.12)$$

para $k=1, 2, \dots, m$, onde $m < N$, e c_0 é o coeficiente de autocovariância para retardo nulo, não existindo maior interesse em valores de r_k para retardos muito longos.

Alguns autores sugerem

$$c_k = \frac{1}{N-k} \sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (1.13)$$

ao invés de (1.11), mas para grandes valores de N existe pouca diferença entre os valores calculados pelas duas expressões.

1.2.3.1 Correlograma

A plotagem dos valores de r_k contra os retardos k resulta no gráfico denominado correlograma. Frequentemente, uma inspeção visual do correlograma é bastante útil, no estabelecimento da influência de valores em um instante qualquer sobre eventos nos instantes futuros.

Devido à permanência de valores não nulos da autocorrelação para todos os retardos, característico de dados determinísticos, em oposição à tendência para zero nos grandes retardos, encontrada nos dados aleatórios, é possível detectar valores determinísticos superpostos a valores aleatórios.

Interpretar o significado de um conjunto de coeficientes de autocorrelação nem sempre é tarefa fácil, existindo recomendações gerais a serem seguidas (CHATFIELD, 1982), que se aplicam a séries temporais: (a) que são completamente aleatórias; (b) que têm tendência para a alternância de valores; (c) que possuem tendências (não-estacionárias); (d) que contêm flutuações sazonais; (e) que contêm valores fora do normal; e (f) que possuem correlações denominadas de curto-termo.

As séries estacionárias, normalmente, exibem as correlações de curto-termo, caracterizadas por um grande valor de r_1 seguido por 2 ou 3 outros coeficientes que, embora significativamente maiores do que zero, tendem a tornar-se sucessivamente menores do que o imediatamente anterior. Valores para r_k de longos retardos tendem a ser aproximadamente nulos. Um exemplo desta situação é o da figura 1.1.

Uma série temporal que dá origem a este tipo de correlograma é aquela em que uma observação acima (ou abaixo) da média tende a ser seguida por uma ou mais observações, também, acima (ou

abaixo) da média.

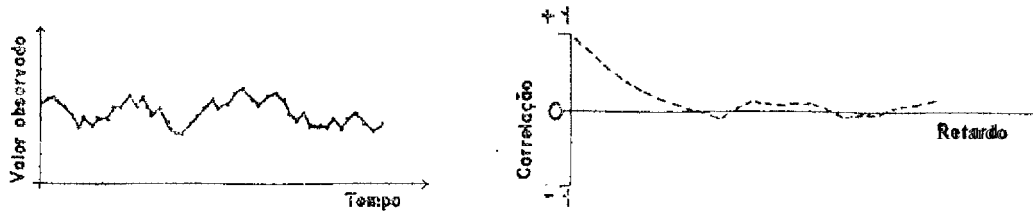


figura 1.1: SERIE TEMPORAL ESTACIONARIA E SUA CORRELAÇÃO DO TIPO CURTO-TERMO (fonte: CHATFIELD, 1982)

Existem recomendações, bastante eficientes, para interpretação de correlogramas, no entanto, é sempre necessária uma experiência considerável para fazer-se bom uso das informações prestadas por esta poderosa ferramenta.

1.2.3.2 Estimadores das funções de autocorrelação e autocovariância

A função de autocorrelação amostral de uma série temporal observada é uma estimativa razoável da função de autocorrelação da população, desde que a série seja estacionária. No entanto, isto pode ser verificado de maneira um pouco mais rigorosa, com o auxílio do coeficiente de autocovariância amostral, c_k , apresentado em (1.11), que é o estimador usual para o coeficiente teórico de autocovariância no retardo k , $\gamma(k)$.

Em CHATFIELD, 1982, está demonstrado que o erro de tendenciosidade de c_k é da ordem de $1/N$. Entretanto,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} E(c_k) = \gamma(k) \quad (1.14)$$

então o estimador torna-se, no limite, não-tendencioso.

Também pode ser mostrado que

$$\text{Cov}(c_k, c_m) \cong \sum_{r=-\infty}^{\infty} \{\gamma(r)\gamma(r+m-k) + \gamma(r+m)\gamma(r-k)\} / N \quad (1.15)$$

Quando $m = k$, a expressão (1.15) fornece a variância de c_k e, então, o erro médio quadrático de c_k .

Outra forma de obter a estimativa em questão é através da equação (1.13), usada por alguns autores por possuir menor erro devido a tendenciosidades, porém, em geral, com maior erro quadrático médio.

Um terceiro método de estimativa da função de autocovariância é o de Quenouille, de redução de erro, também conhecido como estimativa "jackknife", comentado em CHATFIELD, 1982.

Obtida a estimativa da função de autocovariância, temos, através da equação (1.12), um estimador para $\rho(k)$, função de autocorrelação da série temporal completa.

Reforçando comentário do item 1.1, o fato de se poder obter estimativas consistentes das propriedades de um processo estacionário a partir de uma única realização finita não é imediatamente óbvio. Conforme CHATFIELD, 1982, o conceito de ergodicidade tem mostrado, na prática da análise de séries temporais, que para a maioria dos processos estacionários, os momentos amostrais de um registro observado de comprimento T convergem (em média quadrática) para os momentos correspondentes da população, enquanto $T \rightarrow \infty$, ou seja, médias no tempo de uma única realização convergem para as médias do conjunto.

1.2.4 Funções densidade de potência espectral

Visto de uma forma não rigorosa, se supusermos que uma série temporal contém uma componente periódica conhecida, o modelo natural que a representa é

$$X_t = R \cos(\omega t + \theta) + Z_t \quad (1.16)$$

onde ω é a frequência da variação periódica, R é a amplitude da

variação, θ é a fase e Z_t é alguma série aleatória estacionária.

Como w tem expressão dimensional em termos de radianos por unidade de tempo, algumas vezes é denominado frequência angular, embora, alguns autores (JENKINS e WATTS, 1968, por exemplo) refiram-se à frequência como $f = w/(2\pi)$, expressa em número de ciclos por unidade de tempo. O período de um ciclo senoidal, por sua vez, denominado comprimento de onda, é $2\pi/w$ ou $1/f$.

A variação no modelo da série temporal pode aparecer com componentes em várias frequências. Generalizando a equação (1.16) para

$$X_t = \sum_{j=1}^k R_j \cos(w_j t + \theta_j) + Z_t \quad (1.17)$$

onde R_j é a amplitude na frequência w_j , através de relações trigonométricas, a equação (1.17) pode ser escrita como uma soma de termos expressos em seno e co-seno, na forma

$$X_t = \sum_{j=1}^k (a_j \cos w_j t + b_j \sin w_j t) + Z_t \quad (1.18)$$

onde $a_j = R_j \cos \theta_j$ e $b_j = -R_j \sin \theta_j$.

Fazendo $k \rightarrow \infty$, mostra-se que qualquer processo estacionário discreto medido a intervalos regulares pode ser representado na forma

$$X_t = \int_0^\pi \cos wt \, du(w) + \int_0^\pi \sin wt \, dv(w) \quad (1.19)$$

onde $u(w)$ e $v(w)$ são determinados tipos de processos contínuos, definidos para todo w na faixa $(0; \pi)$. A equação (1.19) é denominada representação espectral do processo.

Não há perda de generalidade ao restringirmos a equação (1.19) aos limites $(0; \pi)$, para um processo medido em intervalos unitários de tempo, uma vez que

$$\cos (w, t + k \pi . t) = \begin{cases} \cos w . t & \text{para } k, t \text{ inteiros e } k \text{ par} \\ \cos (\pi - w) . t & \text{para } k, t \text{ inteiros e } k \text{ ímpar} \end{cases}$$

e então frequências maiores do que π não podem ser distinguidas de variações para frequências correspondentes na faixa $(0; \pi)$. A frequência $w = \pi$ é chamada frequência de Nyquist. Para um processo discreto medido a intervalos iguais de tempo Δt , a frequência de Nyquist é $\pi / \Delta t$.

A introdução do modelo (1.19) visava mostrar que cada frequência na faixa $(0; \pi)$ pode contribuir para a variação do processo, entretanto, $u(w)$ e $v(w)$ não possuem, em seu emprego, um interesse prático direto. Ao invés deste modelo, na prática, utiliza-se a função de distribuição (de potência) espectral $F(w)$, relacionada com $u(w)$ e $v(w)$ a qual provém do teorema de Wiener-Khintchine, aplicado a processos com valores reais, que para qualquer processo estocástico estacionário com função de autocovariância $\gamma(k)$, existe uma função crescente monótona $F(w)$, tal que

$$\gamma(k) = \int_0^{\pi} \cos w . k \, dF(w) \quad (1.20)$$

que é chamada de representação espectral da função de autocovariância.

$F(w)$ tem interpretação física direta uma vez que é a contribuição da série devida às frequências na faixa $(0; \pi)$. Além disso, não há variação para frequências negativas, portanto \dots $F(w) = 0$ para $w < 0$.

Para um processo discreto, medido a intervalos unitários de tempo, a mais alta frequência possível é π e, então, toda a variação é devida a frequências menores do que π . A partir desta afirmação, $F(\pi) = \text{variância}(X_1) = \sigma_x^2$, que também poderia ser obtido de (1.20) com $k=0$, quando $\gamma(0) = \sigma_x^2 = \int_0^{\pi} dF(w)$.

Entre $w=0$ e $w=\pi$, $F(w)$ é monotonamente crescente. A função comporta-se de maneira análoga à função distribuição cumulativa de uma distribuição de probabilidade, exceto quanto ao limite

superior σ_x^2 , em lugar da unidade.

O termo "potência", utilizado em "função de distribuição espectral", deriva do uso, na engenharia, da palavra potência em conexão com a passagem de uma corrente elétrica através de uma resistência. Para uma entrada senoidal, a potência é diretamente proporcional ao quadrado da amplitude de oscilação. Para uma entrada genérica, a função distribuição de potência espectral descreve como a potência é distribuída com relação à frequência. No caso de uma série temporal, a variância pode ser vista como a potência total.

Uma forma normalizada de $F(w)$ é preferida por alguns autores, e é dada por

$$F^*(w) = F(w) / \sigma_x^2 \quad (1.21)$$

e representa a proporção da variância devida a frequências na faixa $(0; \pi)$. Uma vez que $F^*(\pi) = 1$ e $F^*(w)$ é monotonamente crescente, $F^*(w)$ tem propriedades similares às da função de distribuição cumulativa.

Diferenciando a função de distribuição espectral com relação a w , para um processo estacionário discreto, totalmente livre de componentes determinísticas, no intervalo $(0; \pi)$, anotaremos o resultado da derivada por $f(w)$ dada por

$$f(w) = dF(w) / dw \quad (1.22)$$

cujo nome é função densidade (de potência) espectral, normalmente resumido por "espectro".

A equação (1.20) pode ser expressa na forma

$$\gamma(k) = \int_0^\pi \cos w.k.f(w) dw \quad (1.23)$$

e colocando $k=0$ teremos

$$\gamma(0) = \sigma_x^2 = \int_0^\pi f(\omega) d\omega = F(\omega) \quad (1.24)$$

O significado físico do espectro é que $f(\omega) d\omega$ representa a contribuição para a variância de componentes com frequências na faixa $(\omega; \omega+d\omega)$. Quando o espectro é desenhado (plotagem de $f(\omega)$ versus ω), a equação (1.24) indica que a área total sob a curva é igual à variância do processo. Um pico no espectro indica uma importante contribuição para a variância nas frequências da região correspondente. Um exemplo de espectro é o da figura 1.2, apresentado em conjunto com a função distribuição espectral normalizada.

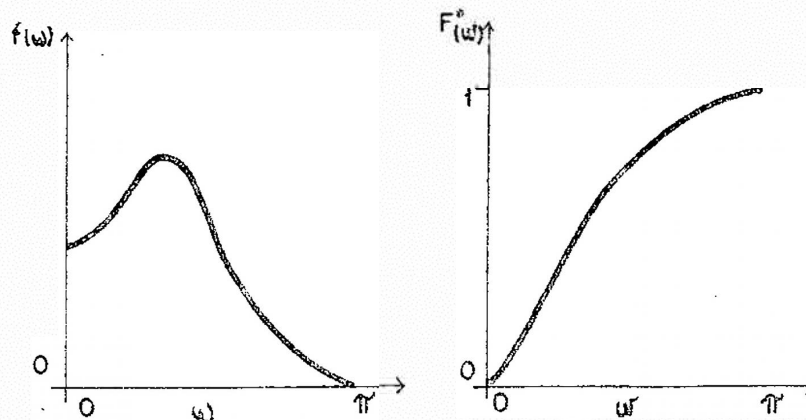


figura 1.2: DENSIDADE E DISTRIBUIÇÃO NORMALIZADA DE POTÊNCIA ESPECTRAL (fonte: CHATFIELD, 1982)

É importante compreender que a função de autocovariância e a função densidade de potência espectral são formas equivalentes para descrever um processo estocástico estacionário, sendo complementares, uma à outra. Ambas contêm a mesma informação em domínios diferentes de representação. A relação entre as duas é, de certa forma, similar àquela existente entre a função densidade de probabilidade e a função característica de uma distribuição de probabilidade contínua.

A equação (1.23) expressa $\gamma(k)$ em termos de $f(\omega)$ como uma transformação co-senoidal. A relação inversa é dada por

$$f(\omega) = \frac{1}{\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma(k) e^{-i\omega k} \quad (1.25)$$

onde $i = \sqrt{-1}$, de forma que o espectro é a transformada de Fourier da função autocovariância. Como $\gamma(k)$ é função par, a equação (1.25) é, freqüentemente, escrita na forma equivalente

$$f(\omega) = \frac{1}{\pi} [\gamma(0) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \gamma(k) \cos \omega.k] \quad (1.26)$$

CHATFIELD, 1982, recomenda cautela com as diferentes definições para o espectro, encontradas na literatura corrente, muitas das quais diferem da expressão (1.26) no que diz respeito a valores de constantes ou pela faixa de definição de $f(\omega)$. A abordagem mais popular é definir o espectro na faixa $(-\pi; \pi)$ por

$$f(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma(k) e^{-i\omega k} \quad (1.27)$$

cuja relação inversa é

$$\gamma(k) = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\omega k} f(\omega) d\omega \quad (1.28)$$

O conhecido trabalho de JENKINS e WATTS, (1968), utiliza estas equações embora tome $f = \omega/(2\pi)$ como variável. Estas expressões são bastante mais gerais podendo ser aplicadas a séries temporais constituídas por valores complexos.

Algumas vezes pode ser útil empregar uma forma normalizada da função densidade espectral dada por

$$f^*(\omega) = f(\omega) / \sigma_x^2 = dF^*(\omega) / d\omega \quad (1.29)$$

sendo esta a derivada da função espectral normalizada. Então, $f^*(\omega)$ é a transformada de Fourier da função autocorrelação,

$$f^*(\omega) = \frac{1}{\pi} [1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \rho(k) \cos \omega.k] \quad (1.30)$$

e $f^*(\omega) d\omega$ é a proporção da variância entre $(\omega; \omega+d\omega)$

1.2.4.1 Processos contínuos

Para um processo estacionário contínuo X_t , totalmente livre de componentes determinísticas, a função autocovariância $\gamma(\tau)$ é definida para todo τ e a função densidade de potência espectral $f(w)$ é definida para todo w positivo. A relação entre estas duas funções é muito similar àquelas que existem no caso discreto, exceto por não haver limite superior para a frequência. Temos

$$f(w) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \gamma(\tau) e^{-i w \tau} d\tau = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \gamma(\tau) \cos w \cdot \tau d\tau \quad (1.31)$$

para $0 < w < \infty$, e com a relação inversa

$$\gamma(\tau) = \int_0^{\infty} f(w) \cos w \cdot \tau dw \quad (1.32)$$

1.2.4.2 Análise de Fourier

Uma modificação da análise de Fourier tradicional, que a torna mais apropriada para aplicação a funções estocásticas do tempo, ao invés de funções determinísticas, resulta no que é denominado análise espectral de dados. A análise de Fourier consiste, basicamente, na aproximação de uma função por uma soma de termos em seno e co-seno, chamada representação em série de Fourier. Supondo que uma função $f(t)$ é definida em $(-\pi; \pi]$ e satisfaz as condições de Dirichlet (integrável em todo intervalo, tem um número finito de descontinuidades e de máximos e mínimos), então $f(t)$ pode ser aproximada pela série de Fourier

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{r=1}^k (a_r \cos r \cdot t + b_r \sen r \cdot t) \quad (1.33)$$

$$\text{onde } a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) dt$$

$$a_r = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos r \cdot t dt \quad (r=1,2,\dots)$$

$$b_r = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \sen r \cdot t dt \quad (r=1,2,\dots)$$

Pode ser demonstrado que esta série de Fourier converge para $f(t)$

enquanto $k \rightarrow \infty$, exceto nos pontos de descontinuidade onde converge para $\frac{1}{2}[f(t+0)+f(t-0)]$.

1.2.4.3 Freqüência de Nyquist

Conforme anteriormente referido (neste mesmo item 1.2.4), não é perdida a generalidade da informação com a restrição à faixa $(0;\pi)$ da função distribuição espectral de um processo discreto medido em intervalos unitários. Pode-se demonstrar que o limite superior π , denominado freqüência de Nyquist, é a mais alta freqüência sobre a qual podemos obter informações com algum significado, a partir de um conjunto de dados.

Se as observações são tomadas a intervalos iguais, de comprimento Δt , então a freqüência (angular) de Nyquist é $\omega_N = \pi/(\Delta t)$. A freqüência equivalente, expressa em ciclos por unidade de tempo é $f_N = \omega_N / (2\pi) = 1 / (2 \cdot \Delta t)$.

Sobre a freqüência mais baixa que podemos ajustar, é intuitivo raciocinar que para avaliar uma variação durante determinado período, em uma freqüência baixa, devemos ter, pelo menos, um período de dados.

De maneira geral, quanto mais baixa é a freqüência que desejamos detectar, mais longo é o período sobre o qual necessitamos de medições, ao passo que, quanto mais alta a freqüência de interesse, mais freqüentemente devemos fazer as observações.

1.2.4.4 Periodograma

A representação em série de Fourier, dos valores da série discretizada $\{x_t\}$ é

$$x_t = a_0 + \sum_{p=1}^{N/2-1} [a_p \cos(2\pi p t / N) + b_p \sin(2\pi p t / N)] + a_{N/2} \cos(\pi t) \dots$$

com $t = (1, 2, \dots, N)$ (1.34)

e os coeficientes

$$\begin{aligned} a_0 &= \bar{x} \\ a_{N/2} &= \sum (-1)^t x_t / N \\ a_p &= 2 [\sum x_t \cos(2\pi p t / N)] / N \\ b_p &= 2 [\sum x_t \sin(2\pi p t / N)] / N \end{aligned} \quad p=1, \dots, N/2 - 1 \quad (1.35)$$

A análise que segue estas recomendações é denominada análise de Fourier ou análise harmônica. A representação em série de Fourier (1.34) tem N parâmetros para descrever N observações e, portanto, pode ajustar os dados com total exatidão.

O efeito geral da análise de Fourier a partir dos dados é repartir a variabilidade da série em componentes, nas frequências $2\pi/N, 4\pi/N, \dots, \pi$. A componente na frequência $\omega_p = 2\pi p/N$ é chamada a p-ésima harmônica. Para p diferente de N/2, é mais útil escrever a p-ésima harmônica na forma equivalente

$$a_p \cos(\omega_p t) + b_p \sin(\omega_p t) = R_p \cos(\omega_p t + \phi_p) \quad (1.36)$$

$$\text{onde } R_p = \sqrt{(a_p^2 + b_p^2)} \quad (1.37)$$

é a amplitude da p-ésima harmônica e

$$\phi_p = \tan^{-1}(-b_p/a_p) \quad (1.38)$$

é a fase da p-ésima harmônica. Para p diferente de N/2, a contribuição da p-ésima harmônica para a soma total dos quadrados é dada por $N(a_p^2 + b_p^2)/2 = N \cdot R_p^2/2$. A partir desta expressão, obtém-se

$$\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2 / N = \sum_{p=1}^{N/2-1} R_p^2 / 2 + N \cdot a_{N/2}^2 \quad (1.39)$$

conhecida como a expressão do teorema de Parseval, em que o membro da esquerda é a variância das observações e R_p^2 a contribuição da p-ésima harmônica para a variância. A equação (1.39) mostra como a variância total é fracionada.

A plotagem de $R_p^2/2$ contra $w_p=2\pi p/N$ fornece uma apresentação de espectro não apropriada para séries temporais contínuas (CHATFIELD, 1982) pois seus espectros são, geralmente, também contínuos. Se tomarmos R_p^2 como a contribuição para a variância na faixa $(w_p \pm \pi/N)$ podemos plotar um histograma cuja altura na faixa mencionada é

$$I(w_p) = N \cdot R_p^2 / 4\pi \quad (1.40)$$

sendo que em $p=N/2$, a contribuição para a variância é $a^2/2$, na faixa $[\pi(N-1)/N; \pi]$, e

$$I(\pi) = N \cdot a^2 / 2 / \pi.$$

A plotagem de $I(w)$ contra w é chamada periodograma, embora $I(w)$ seja uma função da frequência e não do período. A vantagem desta representação é que a área total sob a curva é igual à variância da série temporal.

A equação (1.40) pode ser calculada diretamente a partir dos dados utilizando

$$I(w_p) = ([\sum x_t \cos(2\pi p t / N)]^2 + [\sum x_t \sin(2\pi p t / N)]^2) / (N \cdot \pi) \quad (1.41)$$

que também se aplica para $p=N/2$. JENKINS e WATTS, (1968), definem uma expressão similar em termos da variável $f=w/(2\pi)$, a qual denominam espectro amostral.

O periodograma, sob um primeiro exame, parece uma forma natural de estimar a função densidade de potência espectral, no entanto necessita ser modificado para a aplicação a processos contínuos.

Além de tratar-se de uma forma quadrática dos dados $\{x_t\}$, o periodograma é a transformada finita de Fourier dos coeficientes de autocovariância $\{c_k\}$.

A equação (1.41) pode ser reescrita, e com algumas

transformações obtém-se

$$I(\omega_p) = [c_0 + 2 \sum_{k=1}^{N-1} c_k \cos(\omega_p \cdot k)] / N \quad (1.42)$$

ou

$$I(\omega_p) = \sum_{k=-(N-1)}^{N-1} c_k \cdot e^{-i \cdot \omega_p \cdot k} / N \quad (1.43)$$

A equação (1.42) que expressa o periodograma é uma estimativa do espectro de potência apresentado na equação (1.26), simplesmente substituindo y_k por sua estimativa c_k , para valores de k até $(N-1)$, e colocando subsequentes estimativas de y_k iguais a zero. Pode-se mostrar, no entanto, que $I(\omega)$ não é um estimador consistente para a função $f(\omega)$.

1.2.4.5 Estimadores da função densidade de potência espectral

Embora não haja consistência estatística na estimativa da função densidade de potência espectral através do periodograma (CHATFIELD, 1982), os procedimentos normalmente utilizados passam pela obtenção desta função, empregando, ainda, algum tipo de mecanismo capaz de suavizar a forma de seu gráfico. Além disso, as tendências devem ser removidas pois produzem picos de frequência em zero, enquanto variações sazonais produzem picos nas frequências sazonais e em seus múltiplos, denominados harmônicos.

a) Transformação da função de autocovariância

Uma forma bastante comum de procedimento estimativo consiste em tomar a transformada de Fourier da função de autocovariância truncada, usando uma metodologia de ponderação. Da equação (1.42) tem-se que o periodograma é a transformada discreta de Fourier da função amostral de autocovariância completa. No entanto, com o aumento de k , ocorre o decréscimo de precisão na avaliação de c_k e parece razoável dar menos peso para os valores c_k na medida em

que k aumenta. Um estimador que tem esta propriedade é

$$f(w) = \frac{1}{\pi} (\lambda_0 c_0 + 2 \sum_{k=1}^M \lambda_k c_k \cos(w.k)) \quad (1.44)$$

onde $\langle \lambda_k \rangle$ é um conjunto de pesos chamado janela de retardo ("lag window") e M ($M < N$) é chamado ponto de truncamento. Comparando as equações (1.44) e (1.42), verifica-se que os valores de c_k para $M < k < N$ não são mais usados, enquanto valores de c_k para $k \leq M$ são ponderados por um fator λ_k .

Para utilização deste estimador devemos selecionar uma janela de retardo e ponto de truncamento adequados. Segundo CHATFIELD, 1982, as duas janelas mais comuns são

- Janela de Tukey

$$\lambda_k = \frac{1}{2} [1 + \cos(\pi.k/M)], \text{ com } k=0,1,\dots,M \quad (1.45)$$

também conhecida por janela de Tukey-Hanning ou Blackman-Tukey, e

- Janela de Parzen

$$\lambda_k = \begin{cases} 1 - 6(k/M)^2 + 8(k/M)^3 & 0 \leq k \leq M/2 \\ 2(1 - k/M)^3 & M/2 \leq k \leq M \end{cases} \quad (1.46)$$

As janelas de Tukey e Parzen fornecem, na maioria dos casos, o mesmo espectro estimado, porém, a de Parzen possui a vantagem de não oferecer valores negativos de estimativas.

A escolha do ponto de truncamento M , porém, não é tarefa fácil e existem poucas recomendações, a este respeito, na literatura. Deve ser escolhido de forma a balancear o que se espera em termos de resolução e variância da estimativa. Quanto menor o valor de M , menor será a variância de $f(w)$ estimado, mas maior será o erro cometido (NEAVE, 1971, citado em CHATFIELD, 1982). Se M for muito pequeno, importantes características de $f(w)$ podem ser mascaradas pelo suavizamento de picos, enquanto que se M for muito grande, o comportamento da $f(w)$ estimada torna-se mais parecido com o do periodograma, com suas bruscas variações entre frequências. A escolha de M em torno de $2\sqrt{CN}$

assegura que enquanto N tende a infinito, M também tenda a infinito, mas de forma que M/N tenda a zero.

Em princípio, a expressão (1.44) pode ser avaliada em qualquer valor de w no intervalo $(0; \pi)$ mas, usualmente, é avaliada a intervalos regulares iguais a $w = \pi \cdot j/Q$, com $j=0,1,\dots,Q$, onde Q é escolhido suficientemente grande para mostrar todas as características da $f(w)$ estimada. Frequentemente, Q é tomado como igual a M .

b) Procedimento de J. Hann

Também denominado Hanning, consiste, em termos práticos, no mesmo procedimento da janela de Tukey fornecendo, inclusive, os mesmos resultados diferindo deste, no entanto, no procedimento computacional.

c) Procedimento de R. W. Hamming

Também denominado Hamming, é muito similar ao Hanning (até mesmo na denominação, o que possibilita confusões) exceto pelos pesos utilizados na ponderação. Fornece estimativas similares às anteriores.

d) Alisamento do periodograma

É um método alternativo às transformações da função de autocovariância amostral. Consiste no agrupamento das ordenadas do periodograma em conjuntos e na obtenção de seu valor médio, dentro do conjunto.

O tempo necessário para a realização de análises de Fourier no tratamento de séries temporais deve ser considerado. Em função dos dados e parâmetros utilizados, esta variável pode tornar-se importante uma vez que ocupa com exclusividade o computador utilizado na análise (digital, no caso) durante sua execução o que pode representar um incremento de custos. O emprego da técnica denominada Transformada Rápida de Fourier, TRF, ("Fast

Fourier Transform, FFT") pode reduzir, substancialmente, o tempo necessário para a realização desta análise, além de fornecer resultados mais precisos (BENDAT e PIERSOL, 1971).

A idéia inicial da TRF é do início do século mas foram Cooley, Tukey e Sande, em 1965, que primeiro estimularam sua aplicação à análise de séries temporais. Os detalhes de seu desenvolvimento e emprego aparecem em BENDAT e PIERSOL, 1971, por exemplo.

Conforme CHATFIELD, 1982, somente a partir de amostras com 1000 dados obtém-se ganhos substanciais com a utilização da TRF e sua utilização é bastante discutida: enquanto JENKINS e WATTS, 1968, argumentam e fundamentam sobre sua não utilização, inúmeros autores apresentam vários resultados sobre o ganho de tempo obtido com seu emprego.

1.2.4.6 Séries temporais contínuas

Via de regra, as séries temporais contínuas são tomadas pela leitura de valores do registro, em intervalos iguais de tempo, de comprimento Δt sendo, então, desta forma, convertidas em uma série temporal discreta padrão onde os métodos já vistos podem ser empregados.

Ao amostrar uma série contínua, uma questão importante é como escolher o intervalo de amostragem Δt . A amostragem conduz a alguma perda de informação e esta torna-se de piores conseqüências enquanto Δt aumenta. Por outro lado, é normalmente dispendioso fazer Δt muito pequeno e algum valor deve ser adotado.

Para as séries amostradas, a freqüência de Nyquist é $\pi/\Delta t$ radianos por unidade de tempo e não é possível obter informações sobre variações em freqüências mais altas, conforme apresentado no item 1.2.4.3. Desta forma, deve-se adotar Δt tal que a variação na série contínua seja desprezível em freqüências mais altas do que $\pi/\Delta t$.

A escolha de um Δt muito grande pode acarretar na ocorrência do fenômeno denominado dobramento ("aliasing") descrito, por exemplo, em BENDAT e PIERSOL, 1971. Se a série contínua não possui variações em frequências acima da de Nyquist, então $f_{cont}(w) = 0$ para $w > \pi/\Delta t$ e $f_{disc}(w) = f_{cont}(w)$. Neste caso, nenhuma informação é perdida pela amostragem. Mas, de maneira geral, o efeito da amostragem será tal que a variação em frequências acima da de Nyquist serão acumuladas (dobradas) sobre as frequências abaixo da de Nyquist, na $f_{disc}(w)$. Anotando a frequência de Nyquist por w_N , então as frequências w , $2w_N - w$, $2w_N + w$, $4w_N - w$, $4w_N + w$, ..., são chamadas dobradas ("aliases") umas da outra. Sob um ponto de vista prático, o dobramento causará problemas a menos que Δt seja escolhido para resultar $f_{cont}(w) \cong 0$ para $w > \pi/\Delta t$. Adota-se Δt 's decrescentes até que $f_{disc}(w)$, para $w = \pi/\Delta t$, aproxime-se de zero. Alternativamente, pode-se filtrar a série contínua para remover as componentes em frequências que não interessam à análise corrente.

A análise descrita neste item, denominada análise espectral, é imprescindível na determinação das propriedades em frequência das séries temporais que não apresentam uma tendência ou sazonalidade óbvia na inspeção visual da plotagem de seus valores com o tempo, comportamento este bastante comum às séries representativas de fenômenos físicos.

De posse do espectro estimado, vários comportamentos devem ser investigados: na existência de picos no espectro deve-se buscar os motivos; se o espectro é largo nas baixas frequências pode estar ocorrendo não estacionariedade na média; e a forma geral do espectro deve ser comparada à forma resultante de outros dados físicos, já conhecidas, para condução a conclusões análogas.

1.3 TÉCNICAS PARA ANÁLISE CONJUNTA DE DADOS ALEATÓRIOS

As funções estatísticas até aqui apresentadas, são bastante úteis para descrever as propriedades dos dados resultantes de

processos aleatórios individuais, como os que serão tratados neste trabalho. Embora não seja este o objetivo aqui, é, também, possível descrever certas propriedades conjuntas, comuns a diferentes séries de dados, provenientes de dois ou mais processos aleatórios.

De acordo com BENDAT e PIERSOL, 1971, são utilizados três tipos principais de funções estatísticas para descrever as propriedades conjuntas de registros amostrais de dois processos aleatórios:

- a) funções densidade de probabilidade conjunta, com informações no domínio das amplitudes;
- b) funções de correlação cruzada, com informações no domínio do tempo; e
- c) funções densidade de espectro cruzado, com informações no domínio das frequências.

Estas três funções são extensões das formulações básicas já utilizadas na descrição das propriedades de registros amostrais individuais. Utilizando termos gerais e assumindo que os dados a serem tratados são ergódicos, pode-se descrever, resumidamente, as funções mencionadas.

1.3.1 Funções densidade de probabilidade conjunta

A função densidade de probabilidade conjunta de dois registros amostrais aleatórios descreve a probabilidade com que ambos registros assumirão, simultaneamente, valores entre algum par de faixas de variação em qualquer instante de tempo. A função densidade de probabilidade conjunta é sempre uma função real não-negativa.

A probabilidade de que os valores instantâneos de dois registros sejam menores do que, ou iguais a algum valor desses registros é definida pela função distribuição de probabilidade conjunta.

A principal aplicação para a avaliação de uma função destes

tipos é estabelecer uma descrição probabilística para um evento que é associado com dois conjuntos de dados aleatórios correlacionados. Aplicação especial ocorre no estabelecimento do número esperado de cruzamentos do registro por determinado valor de interesse especial (cruza pelo zero, por exemplo) ou limiares de cruzamento de dados físicos.

1.3.2 *Função de correlação cruzada*

A função de correlação cruzada de dois conjuntos de dados aleatórios descreve a dependência geral dos valores de um conjunto de dados em relação ao outro. Dentre as aplicações da função de correlação cruzada, são muito importantes: a medição do lapso de tempo para a passagem de um sinal através de um sistema; a determinação do caminho da transmissão deste sinal através do sistema; e a detecção-recuperação de um sinal de interesse, superposto a outro, estranho (ruído).

1.3.3 *Funções densidade de espectro cruzado*

O conceito da função densidade de espectro cruzado de dois conjuntos de dados aleatórios surge diretamente da função de correlação cruzada. Assim como a função densidade de potência espectral de um único registro no tempo é a transformada de Fourier da função de autocorrelação, também a função densidade de espectro cruzado de um par de registros no tempo é a transformada de Fourier da função de correlação cruzada.

Na avaliação da densidade de espectro cruzado de séries de dados resultantes de fenômenos físicos, é usual empregar-se a função de coerência entre dois registros, dada pela razão entre o quadrado da densidade de espectro cruzado e o produto das densidades de potência espectral dos dois registros, em cada frequência.

Dentre as principais aplicações da função densidade de espectro cruzado, é muito importante a avaliação das funções de resposta em frequência do sistema envolvido. A resposta em

frequência de um sistema, pode ser vista como o valor composto pela razão entre a amplitude do sinal de saída e a do sinal de entrada (ganho do sistema) e a defasagem de fase (fase do sistema) entre os sinais de saída e entrada. Um sistema linear, por sua vez, é assim chamado quando, entre dois pontos claramente definidos, entrada ou excitação e saída ou resposta, obtemos a saída de uma soma de entradas igual à soma das saídas resultantes de cada entrada, individualmente, e quando a saída produzida por uma entrada multiplicada por uma constante é igual à constante multiplicada pela saída resultante da entrada isolada. Além desta aplicação, a avaliação desta função é empregada na medição de lapsos de tempo para a passagem de um sinal através de um sistema (com vantagem sobre a aplicação da função de correlação cruzada); predição de informações sobre um sinal e; como subsídio para a teoria de filtros de sinais.

1.4 MEDIÇÕES COM AUXÍLIO ELETRÔNICO

As informações específicas que um pesquisador procura obter dependem, obviamente, da área de sua especialidade. Porém, qualquer que seja seu campo de atuação, os dados obtidos requerem várias transformações quanto à forma em que são representados. Devido à conveniência, economia e velocidade dos dispositivos eletrônicos modernos, grande parte dos sistemas de medição utilizam instrumental eletrônico em algum estágio de seu desenvolvimento, seja na obtenção, manipulação, processamento, armazenamento, visualização e/ou interpretação dos dados.

Numa medição efetuada com auxílio eletrônico, a quantidade física a ser medida é convertida em um sinal elétrico, (grandeza elétrica ou sua variação) que represente a informação e, então, amplificado ou modificado de alguma maneira, para operar um dispositivo que apresente visualmente o valor numérico da quantidade medida. O sinal obtido com o dispositivo de entrada tem alguma característica relacionada à grandeza medida, de uma forma previamente conhecida, e é modificado por um circuito eletrônico, normalmente um amplificador com parâmetros ajustáveis, que o torna adequado para operar o dispositivo de

saída, um medidor ou registrador gráfico. Cada diferente forma de representação ou codificação pela qual a grandeza física passa é denominada domínio dos dados.

1.4.1 Domínios dos dados

Segundo MALMSTADT et al., 1974, a maioria dos diferentes dispositivos eletrônicos, circuitos e instrumentos usados na pesquisa científica, tem seu princípio de funcionamento explicado em função de três conceitos básicos: os dados medidos são representados em um instrumento, a qualquer instante, por uma grandeza física, química, ou alguma característica de um sinal elétrico; enquanto os dados percorrem os instrumentos, ocorre uma mudança na característica ou propriedade usada para representar os dados medidos, chamada conversão do domínio de dados; e todo sistema de medição pode ser descrito como um conversor entre domínios de dados ou como uma seqüência de conversores.

Nos equipamentos de laboratórios atuais, é normal a utilização de várias conversões de domínios para proceder à medição desejada. Na figura 1.3, aparecem como áreas separadas algumas das formas em que a informação pode ser representada. São os domínios não-elétricos: físico, químico, posição em escala e numérico; e os elétricos: carga, corrente, voltagem e potência.

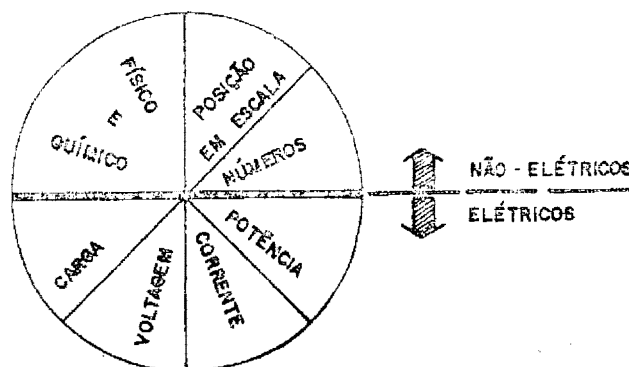


figura 1.3: DOMÍNIOS DE REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES (fonte: MALMSTADT et al., 1974)

Em uma medição eletrônica, o percurso dos dados cruza a linha mediana **horizontal** da figura 1.3 ao menos duas vezes: uma quando a informação sobre a quantidade física ou química é convertida para um domínio elétrico, pelo dispositivo de entrada, e outra quando a quantidade elétrica é convertida para uma posição em escala ou número, pelo dispositivo de saída do sistema de medição. Estes dispositivos que convertem dados de entrada ou saída são denominados, geralmente, transdutores.

A medição, que pode ser definida como a determinação de uma característica particular de uma amostra em termos de unidades padrão desta característica, envolve, então, uma comparação, inerentemente acompanhada de erro. O dispositivo de medição apresenta determinadas características que qualificam a avaliação da grandeza a ser medida, quais sejam: sensibilidade, menor variação na quantidade a ser medida que produz uma variação detectável na saída; precisão, relacionada à sua repetibilidade e resolução; e exatidão, grau de afinidade entre os valores real e medido.

1.4.2 Componentes eletrônicos

As propriedades elétricas de um material determinam a maneira com a qual ele responde às quantidades de carga, diferença de potencial, corrente e potência a que é submetido e todo dispositivo eletrônico possui, em algum grau, a propriedade da resistência.

Quando um dispositivo resistivo, por exemplo, é projetado para ter uma única propriedade, a inevitável presença das outras propriedades elétricas, capacitância e indutância, representa uma imperfeição. A magnitude da propriedade elétrica de um dispositivo ideal, "linear", é independente da magnitude das quantidades elétricas aplicadas. As condições sob as quais ocorrem desvios do comportamento linear esperado dos dispositivos constituem possíveis limitações da aplicabilidade do mesmo. Além disso, as propriedades são, freqüentemente, afetadas por condições tais como temperatura, umidade, pressão, radiação e

campos magnéticos. Em alguns casos, a sensibilidade de um dispositivo a estes fatores limita o campo de suas aplicações e, em outros, para os quais alguma propriedade elétrica é intencionalmente sensível a um parâmetro físico particular, tira-se proveito deste fato para converter a magnitude do parâmetro físico em uma grandeza que pode ser eletricamente medida.

Nenhum equipamento elétrico é completamente livre de todas as características elétricas indesejáveis ou independente das condições ambientais. Isto explica o grande número de equipamentos elétricos existentes, embora sejam apenas três as propriedades básicas.

1.4.2.1 Transdutores resistivos

A variedade de componentes eletrônicos construídos com o único propósito de introduzir resistência em um circuito elétrico é composta pelos resistores. São constituídos de vários materiais e em várias formas, tamanhos e valores. Caracterizam-se pelo valor nominal da resistência, a exatidão com que o valor real é representado pelo nominal, a dissipação de potência e a estabilidade da resistência com relação ao tempo, temperatura, umidade, etc.

Se a resistência de um dispositivo é uma função conhecida e reproduzível da temperatura, luz, posição, esforço, voltagem, campo magnético ou outro parâmetro físico ou químico, então ele pode ser utilizado como um conversor inter-domínios, e a magnitude da temperatura, luz, esforço, etc, deduzida da relação que transfere as informações.

Um resistor constituído de um fio metálico fino, tem resistência igual à razão entre o produto da resistividade do metal pelo seu comprimento e a área da seção transversal do fio. Se o fio é deformado por um estiramento, seu comprimento aumenta enquanto a área diminui. A rigor, a resistividade também pode variar. O resultado, é um resistor para o qual a resistência é

função do esforço responsável pelo estiramento e este dispositivo é denominado extensômetro elétrico ("strain gauge"), de larga aplicação em medições mecânicas. Normalmente, o fio é solidário a um substrato flexível (membrana) de forma que as dimensões do fio variam enquanto o substrato é flexionado. Uma vez que a variação da resistência com o esforço é apenas uma parcela muito pequena da resistência total, são necessárias técnicas bastante sensíveis para sua quantificação. Outra dificuldade é a separação das mudanças na resistência devidas à temperatura, daquelas devidas ao esforço.

Para as aplicações de laboratório, obtém-se grande exatidão nas medições a partir de transdutores resistivos com a utilização de circuitos conversores de resistência para voltagem, que fornecem uma saída linear em resistência. O padrão para a medição de resistência, é uma técnica denominada "comparação de resistência nula". Em uma medição deste tipo, o efeito de uma resistência desconhecida é comparado com o de uma resistência variável padrão, sob condições tão semelhantes quanto possível. Uma vez que a resistência afeta as quantidades elétricas em um circuito, as resistências desconhecida e padrão são colocadas em circuitos idênticos de tal forma que a quantidade elétrica afetada (voltagem ou corrente), em cada circuito, possa ser comparada através de um método, como por exemplo, o da ponte de Wheatstone.

Os transdutores resistivos descritos neste item, não são os únicos existentes para aplicações em laboratórios: existem os do tipo indutivo e do tipo capacitivo, que completam o grupo dos transdutores denominados ativos e os do tipo piezoelétrico, classificados como passivos. Um comentário superficial, a respeito do princípio de funcionamento de cada um, é apresentado a seguir.

No caso do transdutor indutivo, a conversão do sinal mecânico de entrada é obtida após uma prévia conversão intermediária. Na primeira conversão a deformação de um diafragma causa a variação do campo magnético em uma bobina, no interior do

transdutor. Em uma segunda conversão, a variação do campo magnético resulta, finalmente, em um sinal de saída.

O transdutor capacitivo tem seu princípio de funcionamento na medida de uma capacitância, que é função da separação entre duas placas. Considerando que uma das placas tem a forma de uma fina membrana que deve facear a grandeza física a ser medida, a deflexão desta membrana produz uma mudança na separação entre as placas e, conseqüentemente, na capacitância do sensor.

O transdutor piezoelétrico (ou piezocerâmico), por sua vez, é constituído por substâncias com propriedades piezoelétricas, ou seja, que quando deformadas, pela grandeza física alvo de estudo, produzem um campo elétrico que pode ser medido.

1.4.3 Conversão de dados digitais e analógicos

Quando equipamentos eletrônicos são utilizados no auxílio a um processo de medição, a quantidade a ser medida é convertida por um transdutor em um sinal elétrico a ela relacionado de uma forma conhecida. Existe um grande número de formas em que a informação medida (dados) pode ser representada (codificada) como uma variação de um sinal elétrico e cada uma tem suas vantagens em aplicações particulares. Os circuitos integrados proporcionam um incremento da variedade de funções eletrônicas complexas em novos métodos de codificação para a instrumentação científica. A busca por novos métodos visa combinar os dispositivos de medição atuais com os equipamentos de processamento de dados que trabalham com a conveniente forma de saída de dados digital.

Conforme MALMSTADT et al., 1974, as diferentes formas em que os dados podem ser eletronicamente codificados em um instrumento podem ser agrupadas em um dos três domínios de dados: analógico, temporal e digital, que englobam características das propriedades específicas, utilizadas na representação da medição. No domínio analógico, a magnitude de uma grandeza elétrica é relacionada aos dados; no temporal, aos dados referimos as relações temporais existentes com as mudanças nos níveis do sinal; e no digital, um

número inteiro é representado por sinais binários.

O domínio específico de qualquer sinal é determinado pelo estabelecimento das unidades para representação daquela sua característica que representa os dados. Portanto, pode-se afirmar que os sinais, em cada diferente domínio, representam os dados por diferentes unidades e, onde existirem diferentes unidades para a representação, é necessária a utilização de um conversor entre domínios de dados.

Se uma grandeza que varia continuamente com o tempo deve ser convertida para o domínio digital, o número resultante é válido, apenas, para o instante específico do tempo, não sendo possível um registro digital contínuo real da grandeza variável. O que pode, normalmente, ser feito, é a medição em instantes sucessivos com o armazenamento dos resultados, seqüencialmente. Para uma medição suficientemente freqüente, o registro digital pode ser bastante representativo, porém, a máxima freqüência das medições tem uma de suas limitações no tempo necessário para as tarefas de conversão e armazenamento.

1.4.3.1 Sinais analógicos variáveis

O sinal analógico, resultante do transdutor deve, normalmente, sofrer condicionamento ou modificação para ser levado a um domínio analógico particular ou a um nível de saída melhor aceito pelos outros componentes do sistema adotado. A amplificação de voltagem, por exemplo, não é uma conversão entre domínios de dados, uma vez que a unidade "volt" descreve a quantidade codificada tanto na entrada como na saída do amplificador.

Os sinais elétricos no domínio analógico, geralmente, variam com o tempo e os que resultam de experimentos científicos apresentam-se de forma bastante complexa. No entanto, apesar desta complexidade, pode-se interpretar o sinal como composto pela soma de ondas senoidais bastante simples, que necessitam, para sua completa caracterização, apenas, de informações sobre a

freqüência da forma da onda, o tempo e a amplitude do pico.

De grande importância na física e eletrônica, é a forma de onda periódica mais simples denominada onda senoidal. É sabido, que o intervalo para repetição da forma da onda é o período e cada repetição é chamada ciclo. O período, então, é expresso em unidades de tempo por ciclo e seu recíproco, um número de ciclos por unidade de tempo, é denominado freqüência. Se a unidade de tempo é o segundo, a unidade ciclos por segundo da freqüência é denominada Hertz (Hz). A visualização destas grandezas é bastante elementar e está na figura 1.4.

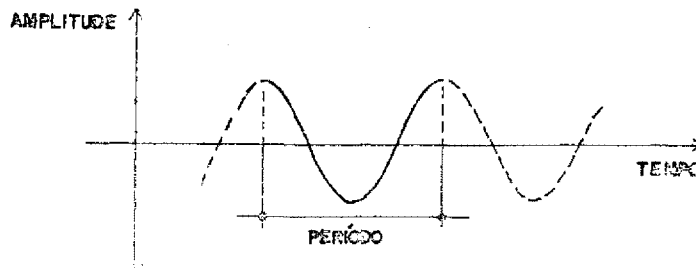


figura 1.4: ONDA SENOIDAL (fonte: MALMSTADT et al., 1974)

A geração de uma onda senoidal, a partir de um vetor rotativo pode ser ilustrada como na figura 1.5.

Ela resulta da projeção do raio R (magnitude do vetor) em um eixo vertical, enquanto o vetor gira em sentido anti-horário com velocidade angular w uniforme.

Quando duas ondas senoidais de mesma freqüência são superpostas, o resultado é uma outra onda senoidal de mesma freqüência. A amplitude da onda resultante depende das amplitudes das ondas individuais e do tempo relativo em que as duas alcançam pontos similares nas suas oscilações. Qualquer diferença no tempo em que duas ondas senoidais, de mesma freqüência, atingem pontos similares, tais como o amplitude do pico ou cruzamento pelo zero, é conhecida como uma diferença de fase.

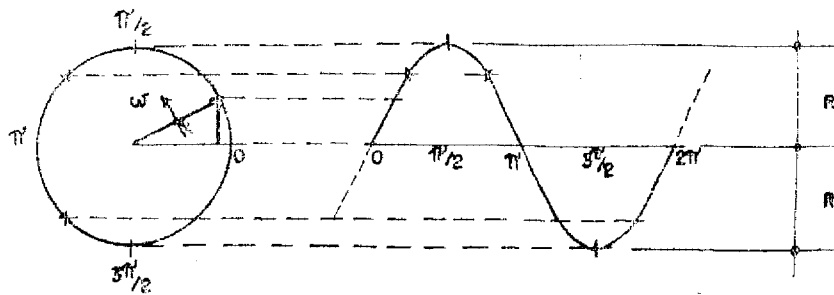


figura 1.5: GERAÇÃO DA ONDA SENOIDAL A PARTIR DO VETOR ROTATIVO
(fonte: MALMSTADT et al., 1974)

1.4.3.2 Conversores e medições

Os sinais no domínio digital representam números, caracteres ou outra informação específica, sem ambigüidades. Para tanto, o sinal deve possuir tantos níveis de caracterização quantos forem os caracteres ou números que seriam necessários para representá-los. O número mínimo de níveis distintos que um circuito pode ter, sendo ainda útil a medições, é dois, daí resultando um circuito bastante utilizado devido a determinadas características dos componentes eletrônicos (MALMSTADT et al., 1974).

Na prática, para obter o grande número de níveis necessários à codificação dos dados, vários sinais binários, ou circuitos, são agrupados. Diz-se, então, que o sinal é "codificado em binário" e cada sinal é usado para representar um dígito binário ("binary digit = bit").

A medição digital de grandezas analógicas envolve algum tipo de conversor analógico-digital (CAD), que determina o número de unidades ou incrementos que caracteriza a grandeza medida.

1.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

As técnicas apropriadas para aquisição e processamento de dados aleatórios são determinadas pelo próprio fenômeno físico a que serão aplicadas e pelos objetivos que se deseja atingir no

processamento. De uma maneira geral, no entanto, conforme BENDAT e PIERSOL, 1971, os dados devem passar por etapas de coleta, transmissão, preparação, registro, qualificação e análise.

O elemento chave na coleta de dados é um dispositivo que traduz informações de uma forma de apresentação para outra, conhecido como o transdutor. Sob o ponto de vista da engenharia, a transdução se dá de alguma medida de um fenômeno físico para um sinal analógico, havendo uma relação calibrada entre as quantidades de entrada e saída do dispositivo. As operações básicas que podem estar envolvidas são uma conversão mecânica da quantidade física de interesse em uma quantidade mecânica intermediária, um passo de conversão desta última em uma quantidade elétrica intermediária e outra conversão elétrica final, usualmente para voltagem.

O ideal seria, que estas operações fossem desenvolvidas sem distorções ou modificações, porém, ocorrem defasagens no tempo e na amplitude das grandezas criando, assim, uma fonte potencial de erros na aquisição de dados.

O meio mais adequado para a transmissão dos sinais coletados é através de cabos elétricos, porém, quando o uso de cabos se mostra impraticável, a transmissão remota (telemetria) do sinal do transdutor deve ser empregada. A transmissão, tanto por cabos como por telemetria, está sujeita à incorporação de interferências indesejáveis que incluem "ruídos" ao sinal original transmitido.

A preparação dos dados, para o caso da análise digital empregada neste trabalho, passa, necessariamente, pela fase em que são definidos os instantes em que devem ser feitas as observações. Usualmente, os intervalos são igualmente espaçados e este espaçamento deve ser criteriosamente selecionado, de forma a evitar perda ou mascaramento de informações (dobramento), quando os intervalos são muito grandes e os dados, excessivamente correlacionados. Intervalos muito pequenos, por outro lado, resultam incrementos nos custos da aquisição.

Os dados, após amostrados, deverão ter suas magnitudes expressas por algum número fixo de dígitos e somente um número fixo de níveis está disponível para representar o infinito número de níveis dos dados originais contínuos. Uma vez que os sistemas de conversão analógico-digital típicos produzem de 6 a 16 bits, suas resoluções variam numa faixa de 64 (2^6) a 65536 (2^{16}) níveis e o processo de aproximação dos valores será tanto mais preciso quanto maior for o número de níveis que estiver disponível para ocupar (MALMSTADT et al., 1974).

A conversão analógico-digital do sinal pode envolver outros erros, inerentes à maioria dos conversores comerciais, decorrentes de que a amostra é tomada sobre um instante finito de tempo ao invés de instantaneamente e de que o intervalo de tempo entre amostras pode variar de alguma forma aleatória devido a disfunções momentâneas do equipamento ou a alguma limitação no controle da amostragem.

Os dados obtidos devem ser formatados de maneira compatível com o sistema computacional utilizado quando, então, são convertidos para unidades físicas, normalmente através de relações lineares entre grandezas digital->física, obtidas de calibrações de referência, efetuadas em procedimento independente da conversão. Estes dados, já com evidente significado físico, devem ser examinados, para uma primeira detecção e remoção de possíveis valores fora de limites razoáveis de ocorrência, defasados, tendenciosos ou com outros erros provenientes das diferentes fontes citadas anteriormente.

O registro de dados, na maioria dos casos, é necessário para efetuar-se uma análise posterior dos mesmos. No entanto, em algumas aplicações, é possível que os processamentos desejados com os sinais do transdutor, sejam feitos em tempo real ("real time"). Quando o armazenamento for necessário, a maneira desejável e conveniente de fazê-lo será em dispositivos capazes de armazenar grandes quantidades de dados e de reproduzi-los de forma magnética, tais como fitas ou discos para computador.

A qualificação dos dados visa salientar características básicas das observações efetuadas e é etapa importante na medida em que os procedimentos corretos para a posterior análise e interpretação de resultados é fortemente influenciada por estas características. Por exemplo, a estacionariedade dos dados deve ficar bastante clara pois as técnicas utilizadas na análise de dados não-estacionários é, geralmente, bastante mais complicada. Além disto, a não identificação de periodicidades existentes nos dados pode conduzir a interpretações errôneas de resultados finais.

A análise dos dados, é efetuada diferentemente quando se trata com registros individuais ou com grupos de registros de que se conhece as propriedades individuais. O procedimento para análise de registros individuais pode incluir análise de valores médios e médios quadráticos, autocorrelações, densidade de potência espectral, densidade de probabilidade e outros tratamentos especiais para dados não-estacionários e/ou periódicos.

A análise de grupos de registros, que não será desenvolvida neste trabalho, parte da análise individual dos registros que pertencem ao grupo e inclui análises de correlação cruzada, densidade espectral cruzada, função de coerência, função de resposta em frequência, e outros.

1.5.1 *Análise digital versus analógica*

Embora, no presente trabalho, a análise de dados seja efetuada em computador digital, conforme MALMSTADT et al., 1974, até 1950 a grande maioria das análises deste tipo eram feitas em instrumentos analógicos de aplicações especiais, que são projetados para executar alguns tipos de operações limitadas. A partir da década de 1950, passou a ser prática a utilização de computadores digitais de aplicação geral bem como de programas ("softwares") para as análises desejadas. Por este motivo, entre 1950 e 1965 discutiu-se bastante sobre os méritos da análise que

utiliza equipamento analógico em oposição ao digital, que pode ser programado para realizar os cálculos necessários por operações numéricas sobre valores amostrais discretos, representativos de uma história de dados contínuos.

Ainda hoje em dia, muitos argumentos são apresentados pelos defensores de ambos os lados, girando em torno de itens como precisão e velocidade. Embora o computador digital seja mais preciso e, geralmente, mais rápido do que o equipamento analógico, os erros inerentes à amostragem (discretização) da série contínua e às operações de processamento, desnecessárias na análise analógica, podem compensar as limitações deste último. Por outro lado, o custo, normalmente, menor do investimento em equipamentos analógicos pode, também, ser discutido, considerando a grande gama de utilizações que pode ser dada ao computador digital, por exemplo, em uma instituição de pesquisa.

Afastado desta discussão e com poder decisório final bastante maior do que os pontos até aqui levantados, o aspecto de "qual é o equipamento que está disponível?" é que realmente parece definir a escolha final a ser feita.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema para aquisição e tratamento de dados de pressões instantâneas, utilizando componentes apropriados e disponíveis no laboratório de instrumentação do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Desta forma, cumpre-se uma primeira etapa de trabalho, com caráter eminentemente prático, em que montou-se um sistema e avaliou-se seu desempenho, em uma aplicação prática da engenharia hidráulica.

Em etapa posterior, deverão ser feitos estudos sobre características específicas exigidas de sistemas a utilizar, na análise de outros fenômenos físicos, além das flutuações de pressão.

Além disso, como consequência natural dos desenvolvimentos alcançados, objetiva-se contribuir para o surgimento de uma nova proposta de pesquisa no Instituto, com grandes possibilidades de aperfeiçoamento de pessoal.

A este respeito, os próprios dados levantados na aplicação prática aqui realizada, fazem parte de pesquisa desenvolvida no laboratório, com vistas ao estudo de desempenhos de diferentes tipos de bacias de dissipação. Sua continuação utiliza, em parte,

o sistema para aquisição e tratamento desenvolvido e baseia-se, também, na revisão bibliográfica realizada. Desta forma, objetiva-se complementar resultados que podem ser obtidos, apenas sob o aspecto qualitativo, em modelos reduzidos de estruturas hidráulicas a fundos móveis.

Uma desejável consequência da existência deste sistema, que, também, é objetivo deste trabalho, é tornar o laboratório do IPH apto, no que diz respeito à instrumentação necessária, a trabalhar com informações mais completas, na área da pesquisa sobre características de escoamentos reais de fluidos.

3 METODOLOGIA

3.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO

No presente trabalho, a forma para obtenção da medida da pressão sobre contornos sólidos, iniciará com a utilização de um dispositivo sensor cuja resistência elétrica e sua variação em função do esforço a que está submetido, são conhecidas.

O sensor, transdutor de pressão piezo-resistivo (ver item 1.4.2.1), possui extensômetros elétricos ("strain gauge") cuja resistência elétrica é alterada por estiramentos ocasionados pelo esforço aplicado.

A variação da resistência, em princípio desconhecida, é avaliada através da medição do desbalanceamento de uma ponte de Wheatstone, da qual o transdutor é parte integrante. A ponte é excitada e a saída amplificada, através do condicionador de sinais.

O sinal condicionado é transmitido ao conversor analógico-digital sendo, após a conversão, adquirido, registrado e tratado, nesta ordem (ver item 1.5), pelos programas de computador utilizados no gerenciamento do sistema.

3.1.1 Sensor

O sensor utilizado (ver figura 3.1) é um transdutor de pressão piezo-resistivo em miniatura e de alta sensibilidade, que combinada à sua alta frequência de ressonância o torna ideal para medição de pressões dinâmicas. É constituído por uma ponte medidora de esforço com quatro membros ativos, aposta sobre um diafragma e apresenta as seguintes características (ENDEVCO, 1981):

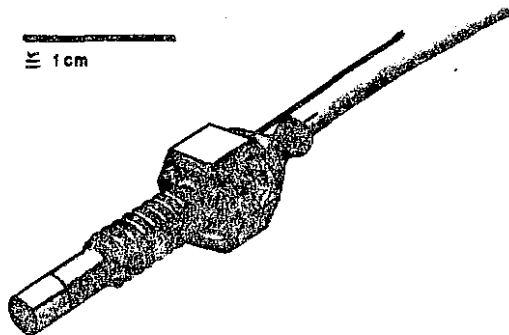


figura 3.1: TRANSDUTOR DE PRESSÃO (fonte: ENDEVCO, 1981)

- marca: ENDEVCO, modelo S.8506-2 (procedência norte americana);
- faixa de trabalho: 2 psig ou 13,8 kPa (1,4 mH₂O) relativa, sendo mH₂O=metros de coluna de água;
- sensibilidade (excitado a 10 Vdc): 23 ± 7 mV/kPa;
- frequência natural de ressonância: 45 kHz;
- linearidade e histerese: 1,5 % do fundo de escala de saída (fes);
- fuga do zero com a temperatura (temperatura máxima a 93°C): 3 % do fes;
- perda de sensibilidade a 93°C: 4 % do fes;
- pressão de ruptura do diafragma: ± 40 psi ou ± 276 kPa (28 mH₂O);
- diâmetro da face: 2,3 mm; e
- rosca para fixação: 6-32.

Este transdutor, apesar de sua alta sensibilidade e pequeno diâmetro, apresenta como desvantagem, no caso do presente trabalho, ter sido projetado para uso com gases secos e não condutivos. O fabricante não recomenda a utilização com líquidos de alto ou baixo pH, longa exposição à água ou exposição a solventes que ataquem o epóxi utilizado na construção do dispositivo. A não observação destas recomendações diminui a vida útil do equipamento.

3.1.2 Condicionador de sinais

O condicionador de sinais para transdutor utilizado (ver figura 3.2) é um amplificador de alto ganho que proporciona excitação, complementação, condicionamento e amplificação dos sinais gerados pela ponte de Wheatstone. É compatível com transdutores de pontes constituídas por 1, 2, 3 ou 4 membros ativos e outras fontes usuais. Apresenta as seguintes características (BELL & HOWELL, s.d.):

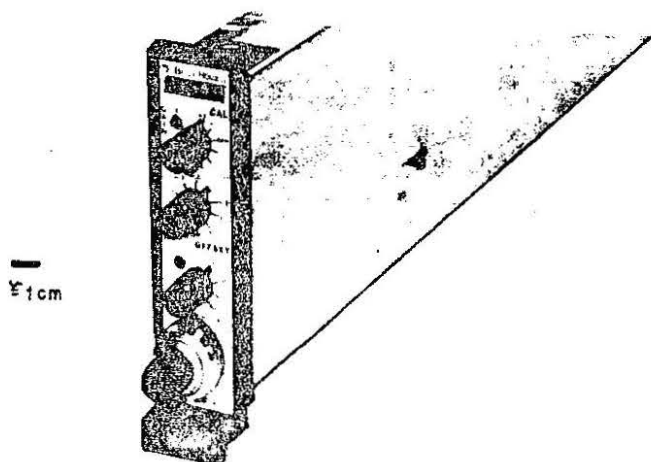


figura 3.2: CONDICIONADOR DE SINAIS (fonte: BELL & HOWELL, s.d.)

- marca: Bell & Howell, modelo CEC-183 (procedência norte americana);
- voltagens de excitação da ponte (selecionáveis): 2,5 , 5,0 , 7,0 e 10,0 V;
- ajuste da excitação (para 10 V): $\pm 0,1 \%$;
- voltagem de saída: 1,0 V;
- faixa de temperatura ambiente, permissível: 0 a 50 °C;

- faixa de umidade ambiente, permissível: 0 a 95 %; e
- ruído máximo de saída (para 10 V): 6 mV.

3.1.3 Conversor analógico-digital

O conversor (ver figura 3.3) da forma de apresentação dos dados medidos, entre os domínios analógico e digital, é um sistema desenvolvido para micro computadores compatíveis com o "IBM-PC". É constituído por um suporte (caixa), onde estão localizados amplificadores e conectores de entrada e por uma placa que suporta e interliga os circuitos de conversão. Os dois componentes são interligados por um cabo plano e a placa é conectada ao computador através de uma placa interfaceadora que funciona como dispositivo de entrada/saída. O conversor apresenta as seguintes características técnicas (ANAMED, s.d.):

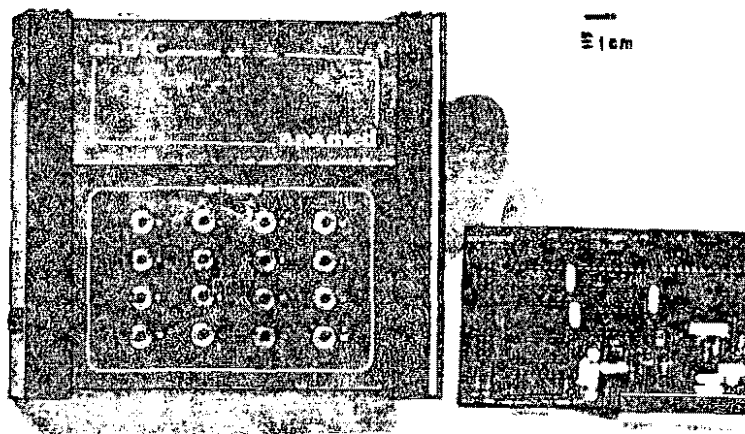


figura 3.3: CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL (fonte: ANAMED, s.d.)

- marca ANAMED, modelo AM13PC (procedência nacional);
- entrada analógica: 16 canais;
- resolução: 12 bits ($2^{12} = 4096$ níveis);
- método de conversão: aproximações sucessivas;
- faixas de entrada para operação (seleccionável):
 - * de -5000 a +5000 mV,
 - * de -1000 a +1000 mV,
 - * de - 500 a + 500 mV, ou
 - * de - 100 a + 100 mV;
- tempo de conversão do canal: 15,5 μ s;
- desvio máximo: 0,024 %;

- codificação binária; e
- proteção contra sobre-tensão: * ligado: ± 22 V, ou
* desligado: ± 10 V.

O sistema faz leituras de tensão sob o controle de um programa de computador que retorna, quando requisitada uma leitura, um número entre 0 e 4095, relacionado à tensão lida. Neste caso específico, quando uma conversão é solicitada é enviado um pulso de disparo ao registrador de aproximação sucessiva (RAS) que inicia o processo de conversão, colocando na entrada do conversor digital-analógico (CDA) um valor correspondente a 2047, que equivale à metade da faixa útil. O nível de tensão fornecido pelo CDA é comparado com a tensão de entrada desconhecida, apresentada pelo circuito de amostragem e retenção quando o comparador de tensões informa ao RAS se a tensão desconhecida é maior ou menor do que a enviada pelo CDA, repetindo-se a operação até a igualdade entre os valores de tensão do CDA e da entrada desconhecida.

Uma vantagem deste conversor para aplicações de laboratório é a flexibilidade de operação obtida, pois todas as operações de mudança de canal e de faixa de operação são feitas através de programas de computador.

3.1.4 Processador

O processador do micro computador utilizado, compatível com o IBM-PC/XT, tem como características:

- faixa de endereçamento: 512 kB;
- tamanho da palavra: 16 bits; e
- característica da velocidade de processamento: 4,77 MHz.

3.2 GERENCIAMENTO DO SISTEMA

O gerenciamento das operações a serem executadas na aquisição e tratamento dos dados é feito através de um conjunto de rotinas para computador, escritos em linguagem BASIC para IBM-PC, que são compiladas para linguagem de máquina através de

um aplicativo apropriado.

As rotinas foram montadas de forma a obter-se a máxima compatibilidade com os equipamentos analógicos do sistema e a tornar sua aplicação bastante flexível, no que diz respeito ao emprego em medições e tratamento de outros tipos de grandezas físicas. Sua atuação abrange itens como instante e intervalo de aquisição dos dados, em que comandam a conversão do valor medido, do domínio analógico para o digital; número de dados por amostra, em função da representatividade que se deseja obter da amostra frente à população; armazenamento de valores brutos medidos; conversão dos valores gravados para valores representativos da grandeza física que está sendo medida; e armazenamento final destes últimos dados.

Um outro conjunto de rotinas, escritos da mesma forma que o anterior é, então, empregado no tratamento estatístico dos dados convertidos para pressões e os resultados são apresentados via monitor de vídeo ou impressora, em forma tabular ou em gráficos, conforme a conveniência do usuário. Seu emprego, no caso, visa obter estimativas das funções de distribuição de probabilidade e seus momentos estatísticos, de autocorrelação e de densidade de potência espectral que descrevem as características das flutuações de pressão em investigação, sob diferentes aspectos de interesse prático.

O agrupamento das rotinas citadas formam um "pacote" para aquisição e tratamento de dados instantâneos em laboratório que poderá, ainda, vir a ser bastante desenvolvido, e adaptado na medida das necessidades de cada possível usuário ou conforme a interpretação que será dada aos resultados obtidos, enfocando aspectos da otimização de projetos de estruturas hidráulicas ou da maior compreensão dos fenômenos ocorridos no interior de uma massa fluida em escoamento turbulento.

3.2.1 Programas de computador

Os programas foram escritos em linguagem BASIC/IBM-PC, inclusive a etapa para aquisição de dados, para que fossem introduzidas, de maneira simples, todas as alterações necessárias à aplicação do sistema na aquisição de outro tipo de grandeza física.

A utilização de programas fechados, sistemas de aquisição e/ou tratamento, disponíveis comercialmente no mercado da computação não é recomendada neste caso, devido à indispensável flexibilidade de utilização necessária à aplicação destes sistemas na pesquisa científica que não pode, de forma alguma, estar limitada a um reduzido número de alternativas para manipulação de grandezas.

O programa principal é constituído por três partes, responsáveis por aquisição, análise estatística e análise espectral de dados. Serão apresentados, a seguir, as listagens e comentários sobre as principais características destas rotinas.

A tela utilizada para apresentação do programa principal foi a seguinte:

```
*****
*   A Q D A T A   AQUISIÇÃO E TRATAMENTO                               *
*                                     DE DADOS INSTANTANEOS              *
*                                                                 *
*   opção desejada:                                                                 *
*       (1) AQUISIÇÃO DE DADOS                                             *
*       (2) ANALISE ESTATISTICA DE DADOS                                   *
*       (3) ANALISE ESPECTRAL DE DADOS                                     *
*****
```

A maior parte das expressões utilizadas no processamento já foi apresentada no item 1. A forma como foram empregadas aparece, aqui, com a mesma simbologia do BASIC, com o objetivo de possibilitar uma melhor compreensão dos cálculos realizados, e de

seu encadeamento, em conjunto com a apresentação das listagens.

3.2.1.1 Aquisição de dados

Esta etapa do programa permite a visualização, no terminal de vídeo, das flutuações de pressão, em uma tomada a cada vez (ver item 4.2.1), em tempo real; a aquisição e gravação de dados medidos, em tempo real, em valores fornecidos pelo conversor A/D e provenientes do transdutor de pressão; e a conversão de valores, dos níveis do conversor gravados (dados brutos) para valores da grandeza física, no caso, pressão de água.

A tela utilizada para a apresentação da aquisição de dados foi a seguinte:

```
*****
*   AQUISIÇÃO DE DADOS   *
*                               *
*   opção desejada:      *
*           (1) VISUALIZAÇÃO DA ENTRADA NA TELA   *
*           (2) AQUISIÇÃO DE DADOS EM TEMPO REAL  *
*           (3) CONVERSÃO DE VALORES DIGITAL -> FÍSICO *
*****
```

A visualização das flutuações de pressão, em forma de gráfico (tempo X magnitude da pressão), é apresentada para a tomada de pressão que estiver conectada ao canal da placa A/D em uso. Especifica-se, também, o número de telas que deverão ser apresentadas. Junto com o gráfico, são vistos, na tela, os valores mínimo e máximo registrados, durante a apresentação corrente. (Ver anexo A1.)

Visto com maior detalhe, são informados o número de telas que devem ser preenchidas [TELA] e o canal utilizado na placa de conversão A/D [CANAL]. Dimensiona-se a matriz que conterá os dados adquiridos [DIGITAL], inicializa-se a conversão e, ao mesmo tempo em que o dado é adquirido, determina-se quais são os valores máximo [MAXIMO] e mínimo [MINIMO] que foram verificados

até o instante observado. Para cada aquisição, um ponto é plotado em tela de alta resolução, com coordenadas horizontal, igual à coluna da tela (até 640 pontos) representativa do tempo, e vertical (até 200 pontos), igual à linha da tela representativa da amplitude da voltagem lida dada por [Y]

$$Y = 200 - \text{DIGITAL} / 20,48 .$$

A aquisição e gravação de dados, em tempo real, pode ser feita, para os equipamentos utilizados, a uma velocidade de aquisição variando desde valores muito baixos a até, aproximadamente, 700 dados por segundo, podendo este valor ser bastante aumentado com a mudança de algumas características do processador do micro computador, do equipamento propriamente dito (inclusão de co-processador aritmético) e aplicativo compilador da linguagem BASIC. O programa apresentado está adaptado às condições existentes e adquire 100 dados por segundo. São especificados o número do canal utilizado na placa A/D, o nome do arquivo a ser gravado em disco, que conterà o registro dos dados brutos, e número de valores da amostra. Este último, em combinação com a frequência de aquisição, informa o tempo total de observação e registro da tomada de pressão analisada. (Ver anexo A2.)

Visto com maior detalhe, são informados [CANAL], nome do arquivo para gravação dos dados lidos [NOMARQ\$] e número de valores a adquirir na amostra em exame [NUMVAL]. Dimensiona-se a matriz que conterà os dados adquiridos [DIGITAL2] e inicializa-se a conversão.

Para a leitura do valor de pressão convertido em tensão, existe apenas um endereço, pré-selecionado, na memória do computador. Após a escolha deste endereço, informa-se à placa interfaceadora computador-conversor, qual soquete está ativo (onde está conectado o conversor), dá-se inicialização ao processo de conversão e seleciona-se canal/código de ganho através dos comandos "OUT". Então, tantas vezes quantas for o número de valores a adquirir, o conversor é disparado, os

resultados intermediários lidos e combinados de forma adequada para obtenção do valor digital final [DIGITAL2]

$$\text{DIGITAL2} = 8\text{BmS} + 256.(4\text{BMS})$$

onde 8BmS = oito bits menos significativos e

4BMS = quatro bits mais significativos

de uma palavra binária de 12 bits que contém o resultado.

Entre aquisições subseqüentes, um contador [DEMORA] é incrementado até o valor [ATRASSO], compatibilizando a velocidade de conversão/aquisição do equipamento com a que desejamos obter, 100 dados/segundo neste caso. Ao término da aquisição, [NOMARQ\$] é gravado em disco.

Esta mesma seqüência de aquisição, exceto as etapas de retardamento e gravação, é utilizada na etapa do programa que permite a visualização da entrada na tela, anteriormente descrita.

A conversão dos dados brutos (ver anexo A3) em valores da grandeza física analisada, pressão, é feita através da função linear com a forma geral

$$\text{VF} = \text{AA} \cdot \text{VD} + \text{BB}$$

onde VF = valor físico da pressão, em unidades de pressão;

VD = valor digital da pressão, expressa em termos do número de níveis de resolução da placa conversora A/D, que estão gravados no arquivo de dados brutos [NOMARQ1\$];

AA e BB = coeficientes angular e linear, respectivamente, da reta que melhor ajusta os valores [VF] e [VD], obtidos da calibração estática do sistema, calculados a priori (ver item 4.2.3.2).

O programa grava o arquivo destino [NOMARQ2\$] (dados convertidos), apresentando na tela a listagem destes valores, na medida em que são calculados, para controle do procedimento e

exame preliminar do registro.

3.2.1.2 Análise estatística de dados

A análise estatística aplicada sobre os dados, neste trabalho, constitui-se na determinação de valor médio, valor mínimo, valor máximo, desvio padrão e coeficientes de assimetria e curtose. Além disso, a gama de valores registrados é dividida em um número de intervalos de classe e contabilizado o número de ocorrências em cada um, para a determinação das estimativas das funções densidade e distribuição de probabilidade. (Ver anexo A4.)

A tela utilizada para a apresentação da análise estatística de dados foi:

```
*****
*   ANALISE ESTATISTICA DE DADOS   *
*                                   *
*   número de intervalos de classe ? *
*   nome do arquivo ?               *
*   gravação dos resultados (s/n) ? *
*   impressão de resultados (s/n) ? *
*****
```

São informados, o número de intervalos de classe em que os valores da amostra devem ser distribuídos [NUMINTERV] e o nome do arquivo [NOMARQ\$] em disco, que contém os dados [A] a serem analisados. [NOMARQ\$] é lido e, durante a leitura, é calculado o somatório simples dos valores [SOMAVAl] para posterior obtenção da média da amostra [MEDIaval] (equações 1.1 e 1.9)

$$MEDIaval = SOMAVAl / NUMVAL$$

Em continuação, para cada dado da amostra é obtido o desvio [VALOR] em relação à média

$$VALOR = A - MEDIaval$$

e os somatórios de [VALOR] elevado ao quadrado [SOMAVL2], ao cubo [SOMAVL3] e à quarta potência [SOMAVL4]. Investiga-se, também, a ocorrência dos valores mínimo [MINIVAL] e máximo [MAXIVAL] registrados. Feito isto, determina-se as estimativas dos parâmetros desvio padrão [DESVIO] (equação 1.3), coeficiente de assimetria [ASSIMETRIA] e curtose [CURTOSE]

$$\text{DESVIO} = \sqrt{\text{SOMAVL2}/\text{NUMVAL}}$$

$$\text{ASSIMETRIA} = \text{SOMAVL3}/(\text{DESVIO}^3 \cdot \text{NUMVAL})$$

$$\text{CURTOSE} = \text{SOMAVL4}/(\text{DESVIO}^4 \cdot \text{NUMVAL})$$

bem como o tamanho dos intervalos de classe [TAMINTERV] (ver item 1.2.2)

$$\text{TAMINTERV} = (\text{MAXIVAL} - \text{MINIVAL})/\text{TAMINTERV}$$

Além disso, são determinados os limites superiores [D] dos intervalos

$$D = \text{MINIVAL} + K \cdot \text{TAMINTERV}$$

onde K indica o número de ordem seqüencial do intervalo.

A seguir, é feita a repartição dos [A] conforme estejam incluídos entre os limites dos diferentes intervalos, da seguinte forma:

- se [A] é igual a [MINIVAL], incrementa-se em uma unidade o número de ocorrências simples [NSMPL] de ordem zero; e
- se [A] é superior a [MINIVAL], determina-se a ordem [K] do intervalo em que se encontra, dada pela parte inteira do número

$$[(A - \text{MINIVAL})/\text{TAMINTERV}]$$

e incrementa-se em uma unidade o [NSMPL] de ordem [K].

Finalmente, calculam-se os somatórios acumulados [NACUM] dos [NSMPL] desde a ordem zero até a ordem [K], quando são efetuadas as estimativas das funções distribuição de probabilidade [DISPROB] e densidade de probabilidade [DNSPROB], para cada intervalo (equações 1.7 e 1.5, respectivamente)

DISPROB = NACUM/NUMVAL; e

DNSPROB = NSMPL/NUMVAL.

Na apresentação destes resultados, são listados [NUMVAL], [MAXIVAL], [MINIVAL], [MEDIIVAL], [DESVIO], [ASSIMETRIA], [CURTOSE] e os resultados, para cada intervalo de [NSMPL], [NACUM], [DNSPROB] e [DISPROB].

3.2.1.3 Análise espectral de dados

Sob a denominação de análise espectral está o tratamento que visa obter informações relativas à correlação entre valores de pressão, de uma mesma amostra, considerando defasagens no tempo, e a identificação das amplitudes de cada frequência componente da oscilação dos valores de pressão (ver itens 1.2.3 e 1.2.4). O conteúdo do arquivo de dados é lido previamente.

A tela utilizada para a apresentação da análise espectral foi:

```
*****
*   ANALISE ESPECTRAL DE DADOS   *
*                               *
*   nome do arquivo para análise ?   *
*   opção desejada :               *
*           (1) CORRELOGRAMA         *
*           (2) ESPECTRO DE POTENCIA *
*****
```

Na opção do autocorrelograma (ver anexo A5) do arquivo

[NOMARQ\$] de valores [C], informa-se o retardo máximo [LAG] até onde a correlação deve ser pesquisada. Dimensiona-se a matriz que conterá os valores calculados de autocorrelação [RO] e obtém-se a média dos valores, conforme procedimento anteriormente descrito.

Ao longo de toda a amostra, calcula-se o somatório [SOMAVAR] dos desvios elevados ao quadrado, em relação à média. Após, para cada retardo, desde zero até [LAG], efetua-se o somatório [SOMAPROD] do produto dos desvios em relação à média, dos valores da amostra defasados. Ao final, calcula-se a autocorrelação no retardo corrente (equações 1.10, 1.11 e 1.12)

$$RO = SOMAPROD/SOMAVAR$$

que é apresentada em conjunto com a defasagem a que corresponde.

Na determinação do espectro de potência (ver anexo A6), por sua vez, são informados a frequência com que os dados foram adquiridos [FREQ] na etapa de aquisição, o ponto de truncamento para cálculo do espectro [TRUNCPT] e o número de ordenadas a serem calculadas na apresentação dos resultados [NUMORD]. Preliminarmente, calcula-se o intervalo de tempo entre amostras consecutivas [DELTAT]

$$DELTAT = FREQ^{-1}$$

apresentado como número inteiro, arredondado, e dimensiona-se as matrizes que conterão [LAMBDAK] os pesos da janela de retardo (utilização da janela de Tukey, do item 1.2.4.5-a) multiplicados pelas covariâncias em cada retardo e pelo número de dados da amostra, [FREQ] as frequências e [SPEC] respectivas ordenadas do espectro, além da determinação da média da amostra com o procedimento usual.

São, então, calculados, para retardos [K] desde zero até [TRUNCPT], os somatórios [SOMAPROD] (anteriormente descritos) para os valores da amostra até a diferença entre [NUMVAL] e o retardo corrente. Após, calcula-se (equações 1.12 e 1.45)

$$\text{LAMBDA C} = \frac{1}{2} \cdot [1 + \cos(K \cdot \pi / \text{TRUNCPT})] \cdot \text{SOMAPROD} / \text{NUMVAL}$$

que corresponderá ao retardo [K].

Em seguida, para cada uma das [NUMORD] ordenadas de ordem [I], calcula-se [FREQ]

$$\text{FREQ} = I / (2 \cdot \text{NUMORD})$$

e, para retardos [K] até [TRUNCPT], o somatório [SOMASPEC] do produto entre [LAMBDA C] e

$$\cos(2 \cdot \pi \cdot \text{FREQ} \cdot K)$$

quando é determinada a [SPEC] de ordem [I] (equação 1.44)

$$\text{SPEC} = (\text{LAMBDA C}_0 + 2 \cdot \text{SOMASPEC}) / \pi$$

onde [LAMBDA C₀] é o valor de [LAMBDA C] para [K] igual a zero, ou ainda, a variância da amostra multiplicada pelo número de valores que ela contém.

Durante este procedimento, são selecionadas a ordenada máxima do espectro [MXSPEC], a frequência correspondente a esta ordenada [FREQDM] (denominada frequência dominante) e a ordenada em que ocorre [ORDMAX].

A apresentação dos resultados inclui, para todas as [NUMORD], a frequência (em Hz) [FREQ/DELTAT], SPEC e a amplitude da onda senoidal componente dada por (CHATFIELD, 1982)

$$\sqrt{(2 \cdot \text{SPEC} / \text{NUMVAL})}$$

Além disso, são apresentados o tempo total de registro [TMPREG], comprimento da banda de resolução da janela adotada [CMPBRS], número de graus de liberdade [GRLBRD] e erro padrão normalizado

da estimativa [ERPDNR], calculados por (BENDAT e PIERSOL, 1971)

$$\text{TMPREG} = \text{DELTAT} \cdot \text{NUMVAL};$$

$$\text{CMPBRS} = 4 / (3 \cdot \text{TRUNCPT} \cdot \text{DELTAT});$$

$$\text{GRLBRD} = 8 \cdot \text{NUMVAL} / (3 \cdot \text{TRUNCPT}); \text{ e}$$

$$\text{ERPDNR} = \sqrt{(2 / \text{GRLBRD})}.$$

4 APLICAÇÕES DO SISTEMA

Montado e desenvolvido este sistema inicial para aquisição e tratamento de pressões instantâneas e absorvida, ainda que parcialmente, com maior ou menor profundidade, as técnicas envolvidas nas áreas de instrumentação, computação e hidráulica, novas informações poderão ser obtidas.

Esta afirmação é justificada pelo fato de que a base do sistema, desde a transdução da grandeza física até o armazenamento final de resultados, não é alterada no caso em que, em lugar da pressão, a grandeza a ser avaliada venha a ser nível de água, velocidade de fluxo, esforço, vibração e outras de interesse no aprimoramento de projetos em engenharia hidráulica ou na melhor compreensão dos fenômenos envolvidos nos escoamentos de fluidos verificados na natureza.

Em cada caso, o sensor, níveis de amplificação do sinal, velocidade de aquisição/conversão de amostras e tratamento gráfico/matemático para apresentação e interpretação de resultados, deverão ser adequados às características próprias do sistema físico investigado.

4.1 ESCOAMENTOS DE FLUIDOS

A grande maioria dos escoamentos na natureza, e nas aplicações de engenharia, possui características próprias dos escoamentos ditos turbulentos. Uma destas características, a irregularidade ou aleatoriedade com que as propriedades do escoamento se manifestam, torna a abordagem determinística inviável para problemas de turbulência, lançando-se mão de métodos estatísticos na abordagem usual.

Conforme apresentado em TENNEKES e LUMLEY, 1980, a aleatoriedade das propriedades, combinada com outras características importantes dos escoamentos, torna os desenvolvimentos teóricos de equações de movimento praticamente insolúveis. Por este motivo, a pesquisa nesta área é, hoje em dia, um dos principais problemas não resolvidos da física, embora as primeiras investigações datem do século passado.

As equações que descrevem o movimento de fluidos foram exaustivamente analisadas na busca de previsões quantitativas precisas, mas como o número de incógnitas envolvidas é sempre superior ao de equações disponíveis, ocorre o chamado problema do fechamento ("closure problem"). Para contornar este problema, a comunidade científica tem sugerido a utilização de modelos, normalmente baseados em dados empíricos, para a ligação entre a teoria conhecida e os resultados experimentais observados, de tal forma que possibilitem previsões razoáveis sobre comportamentos futuros. O Instituto Tecnológico de Massachusetts/EUA publicou dois importantes trabalhos neste sentido: as obras de Tennekes e Lumley, 1972 e de Monin e Yaglom, volume 1 em 1971 e volume 2 em 1975. Nestas obras, além de desenvolvimentos teóricos sobre a matéria, aparecem descrições sobre os métodos experimentais normalmente utilizados no estudo da turbulência e extensas listas bibliográficas sobre a literatura corrente, à época.

No estabelecimento das relações entre grandezas intervenientes nos escoamentos, se for possível identificá-las, a análise dimensional é ferramenta poderosa, para a determinação de

previsões quanto a manifestações médias das grandezas dependentes. Por outro lado, é muito importante examinar como as flutuações aleatórias, dos valores dessas grandezas, estão distribuídas em torno de valores médios e como flutuações adjacentes, no que diz respeito a espaço e tempo, estão relacionadas. Com este objetivo, existe toda uma área do estudo da turbulência, baseada em descrições estatísticas.

Para o estudo das distribuições em torno de valores médios, utiliza-se a densidade de probabilidade e, além desta, para o estudo da relação entre flutuações vizinhas, utiliza-se a autocorrelação e sua transformada de Fourier, espectro de potência. Na bibliografia especializada, estas ferramentas matemáticas são largamente utilizadas, principalmente no estudo do transporte turbulento (difusão) e da dinâmica espectral (TENNEKES e LUMLEY, 1980).

4.1.1 Dissipação de energia

Os escoamentos turbulentos são sempre dissipativos e isto se deve ao trabalho de deformação realizado pelos esforços cisalhantes viscosos que incrementam a energia interna do fluido, às custas do fornecimento de energia cinética, para ser transformada. Esta transformação e dissipação de energia, a jusante de estruturas hidráulicas de médio e grande porte, é assunto de interesse cada vez maior na engenharia hidráulica.

Uma forma bastante consagrada para efetuar esta dissipação em líquidos é através da utilização do movimento macroscopicamente permanente e rapidamente variado, verificado toda a vez que um escoamento a superfície livre passa do regime de escoamento rápido a lento, no denominado ressalto hidráulico.

O ressalto hidráulico vem sendo estudado, provavelmente, desde Leonardo da Vinci até nossos dias. Inicialmente, interpretou-se matematicamente suas características básicas, levando em conta somente elementos do escoamento médio no tempo e, mais recentemente, tem-se considerado as flutuações

instantâneas destas características (LOPARDO, 1986).

O processo de dissipação no interior do ressalto está, inevitavelmente, acompanhado de bruscas flutuações de pressões que são transmitidas aos componentes das estruturas dissipadoras de energia, sendo estas submetidas a esforços, por vezes, superiores a seus limites de resistência, responsáveis por danos em lajes de revestimentos, fadiga de materiais e vibrações estruturais.

Assim, o conhecimento sobre amplitudes e frequências destas flutuações de pressão, obtido a partir de parâmetros estatísticos a elas vinculados, é de essencial importância ao projeto de estruturas do tipo em questão:

- mediante a comparação entre as faixas de frequências dominantes, induzidas pelo escoamento, e as frequências naturais de vibração das estruturas submetidas aos esforços hidráulicos, pode-se avaliar a possibilidade de ocorrência de vibrações por fenômenos de ressonância;
- sendo as cargas, induzidas sobre as estruturas, variáveis no tempo, um exame de condições extremas como a alternância de sentidos opostos de aplicação dos esforços, pode indicar tendências à fadiga dos materiais empregados em fundações e ancoragens; e
- a presença de grandes flutuações de pressão, com valores muito abaixo da atmosférica local, ainda que por curtíssimo intervalo de tempo, podem indicar tendências à ocorrência de cavitação (LOPARDO, 1986).

4.2 APLICAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA

O sistema desenvolvido para aquisição e tratamento de pressões instantâneas em laboratório, em parte objeto deste trabalho, foi aplicado a um caso real de obtenção dos parâmetros estatísticos, anteriormente referidos, ao longo do item 1.2.

O sistema foi utilizado na forma como apresentado no item 3, ao caso da avaliação de características do escoamento, a jusante

de um descarregador de cheias onde foi imposta a formação de ressalto hidráulico para dissipação de energia do escoamento, em modelo reduzido.

4.2.1 Descrição da instalação

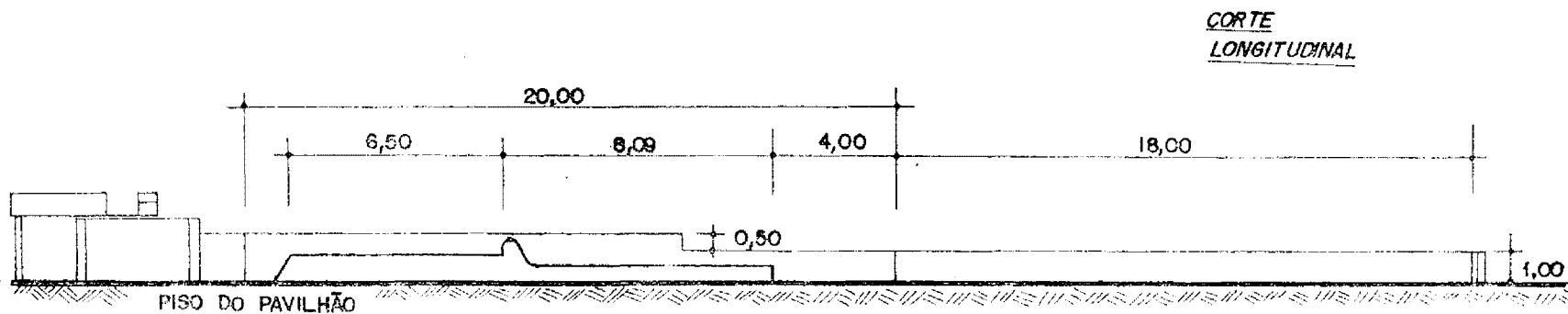
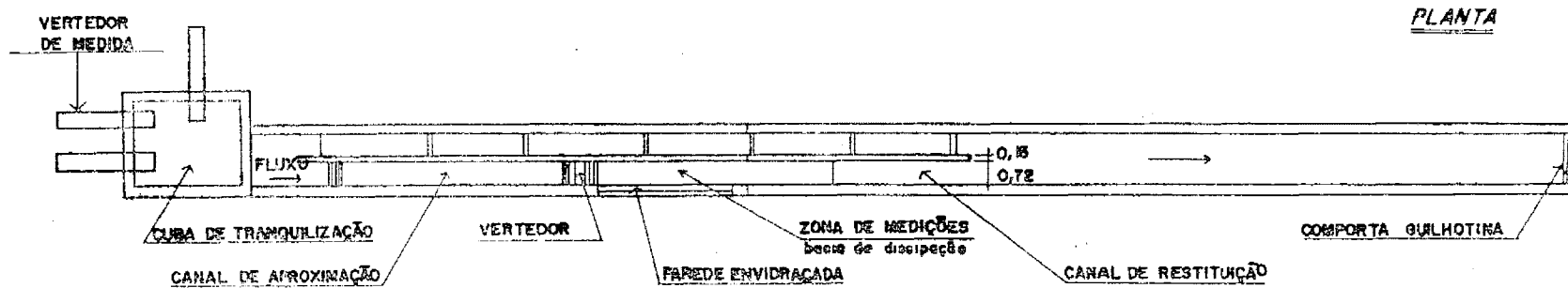
A instalação experimental utilizada foi montada no Pavilhão Fluvial do Laboratório de Hidráulica do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É constituída por um canal de fundo horizontal, construído em concreto e alvenaria de tijolos, possuindo em seu percurso o modelo de um descarregador de cheias, seguido de bacia de dissipação. O canal é alimentado por um conjunto de moto-bombas, e os níveis são controlados por comporta.

O canal, retilíneo, possui, no total, 40,00m de comprimento por 1,50 m de largura e altura variando entre 1,50 e 1,00 m. Para a presente aplicação, foi adaptado às dimensões constantes na figura 4.1, possuindo em seu lado direito, na zona de medição de pressões, uma janela de 4,00 m de comprimento por 1,00 de altura. A vazão escoada no canal é medida por um conjunto de vertedores aferidos, de soleira delgada, e o nível de água, a jusante do vertedor, é controlado por uma comporta tipo guilhotina.

O descarregador de cheias modelo, possui perfil da superfície do tipo Creager e uma bacia de dissipação do tipo I (USBR), nas dimensões características apresentadas na figura 4.2.

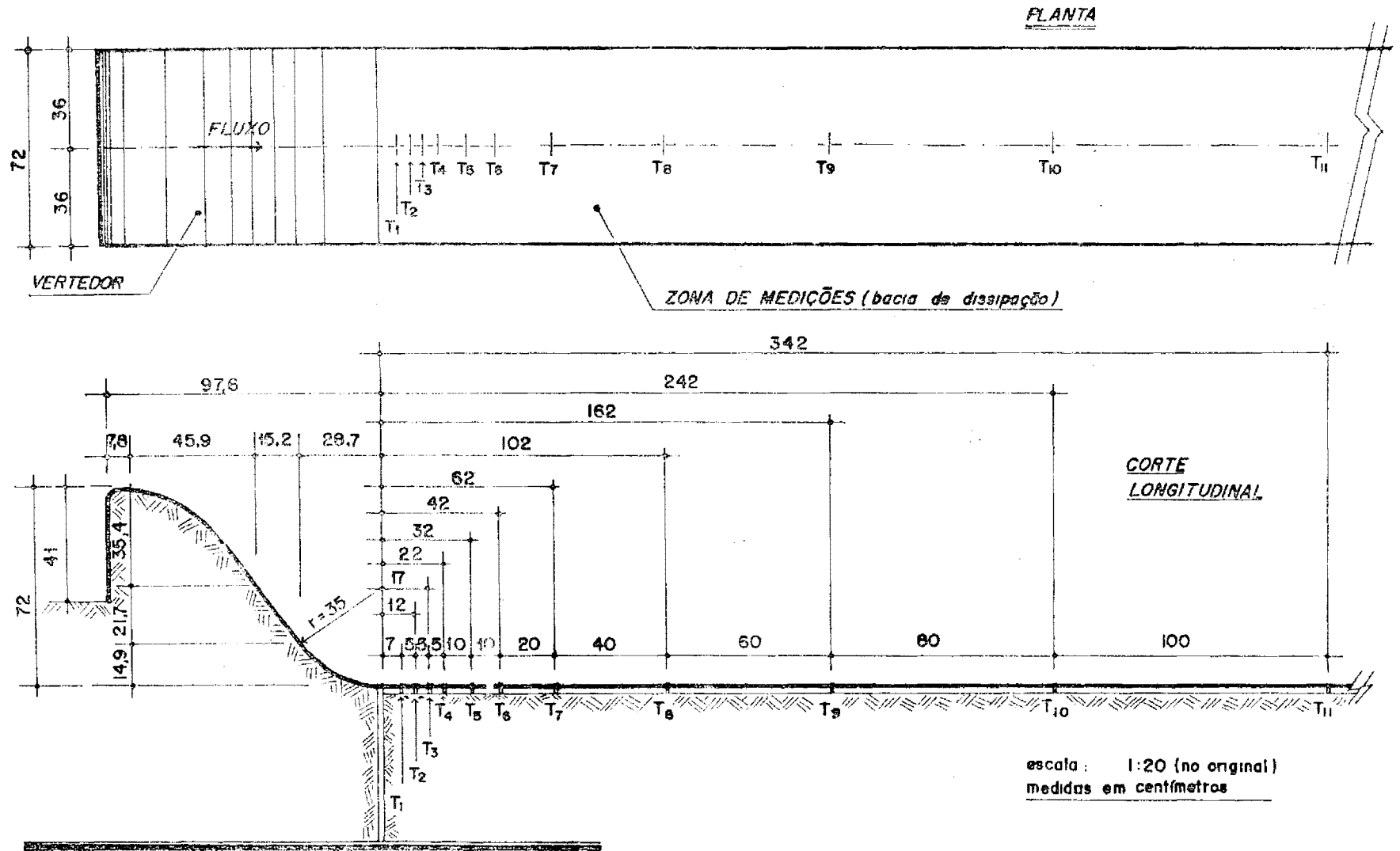
A zona de medição de pressões, ao longo da linha longitudinal central do canal, estende-se por 3,42 m. As tomadas de pressão, em número de 11, foram executadas em peças de acrílico, com orifícios de 1 mm, afixadas ao fundo do canal. As conexões aos transdutores foram feitas através de tubos plásticos (mangueira cristal) com 2,00 m de comprimento e 6,5 mm (1/4 ") de diâmetro interno. O espaçamento entre as tomadas T1, T2, T3, T4 é de 5 cm, entre T4, T5, T6 é de 10 cm e cresce, a partir da T6, entre cada par, até a tomada T11. O detalhe dos espaçamentos aparece na figura 4.2.

Figura 4.1: VISTA GERAL DAS INSTALAÇÕES



escala: 1 : 200 (no original)
medidas em metros

FIGURA 4.2: DETALHE DAS INSTALAÇÕES



A descarga máxima utilizada foi de 250 litros por segundo. A comporta tipo guilhotina, ao final do canal, possibilitou o controle do nível de jusante e a conseqüente posição do ressalto hidráulico, na zona de medição.

4.2.2 Instrumentação

O equipamento empregado (detalhes no item 3.1) foi um transdutor de pressão do tipo piezo-resistivo, marca Endevco, modelo S.8506-2 (faixa de trabalho de 0 a 13,8 kPa) e seu sinal condicionado por um Bell & Howell, modelo CEC-163. O sinal analógico condicionado foi convertido para o domínio digital por um Anamed AM13PC e registrado na memória de um Prológica/Solution-16 (compatível IBM-PC/XT) para posterior gravação em minidiscos flexíveis de diâmetro $5 \frac{1}{4}$ ". A análise, digital, foi realizada no mesmo micro-computador utilizado para registro.

4.2.3 Procedimento experimental

O procedimento experimental empregado neste estudo foi de caráter eminentemente investigativo, com ênfase voltada para a obtenção de valores representativos do fenômeno. Não é, aqui, dado destaque ao aspecto de interpretação dos resultados, uma vez que o laboratório do IPH ainda não conta com total domínio desta técnica. Aliás, a partir deste trabalho, pretende-se que o desenvolvimento destas técnicas tenha continuidade.

4.2.3.1 Condições hidráulicas

Inicialmente, foram estabelecidas as condições de escoamento desejadas, em termos de vazão, posição do ressalto e nível de água a jusante, tendo sido testadas cinco descargas, no entorno de 50, 100, 150, 200 e 250 litros por segundo.

Para cada vazão, partindo da igualdade entre energias totais do escoamento a montante e jusante do vertedor, calculou-se o nível de água e velocidade média do escoamento na seção inicial

do ressalto hidráulico, no pé do vertedor. A partir destes dados calculou-se o valor do número de Froude, F , na entrada do ressalto

$$F = v / \sqrt{(g \cdot d)}$$

onde v = velocidade média do escoamento na seção considerada;

g = aceleração gravitacional; e

d = profundidade do escoamento na seção considerada.

O número de Froude, assim calculado, foi utilizado como característica de identificação das séries de ensaios, conforme a apresentação usual de resultados (VASILIEV e BUKREYEV, 1967; KHADER e ELANGO, 1974; LOPARDO, 1986; e outros).

Então, para cada uma das descargas ensaiadas, com o manejo da comporta, posicionou-se o ressalto hidráulico de forma que seu início coincidisse, no final da curva de concordância do vertedor, com o plano da bacia de dissipação. Por ocorrerem deslocamentos de até 10 cm, para montante e jusante desta posição, utilizava-se uma posição intermediária.

Feito isto, inspecionavam-se as mangueiras e peças de conexão entre as tomadas de pressão e o transdutor, em busca de possíveis obstruções ou bolhas de ar em seu interior. Este procedimento garantia a propagação das flutuações de pressão, através da conexão, sem obstáculos e em um meio homogêneo, praticamente incompressível.

4.2.3.2 Calibração estática

Para cada conjunto de ensaios ajustou-se a sensibilidade e níveis de referência do transdutor pela imposição de níveis estáticos de água, utilizando a instalação esquematizada na figura 4.3.

As voltagens de saída do transdutor, foram relacionadas aos valores digitais convertidos e estes, por sua vez, relacionados

aos níveis de água empregados na excitação controlada do transdutor, nesta calibração estática. Para tal, uma observação preliminar do escoamento, na zona de cada tomada, indicou os níveis extremos necessários na calibração. Em cada caso, deviam ser respeitados os limites de 1,4 metros de coluna de água, do transdutor e 1,0 volt, na saída do condicionador, que são os limites de operação destes equipamentos (ver item 3.1).

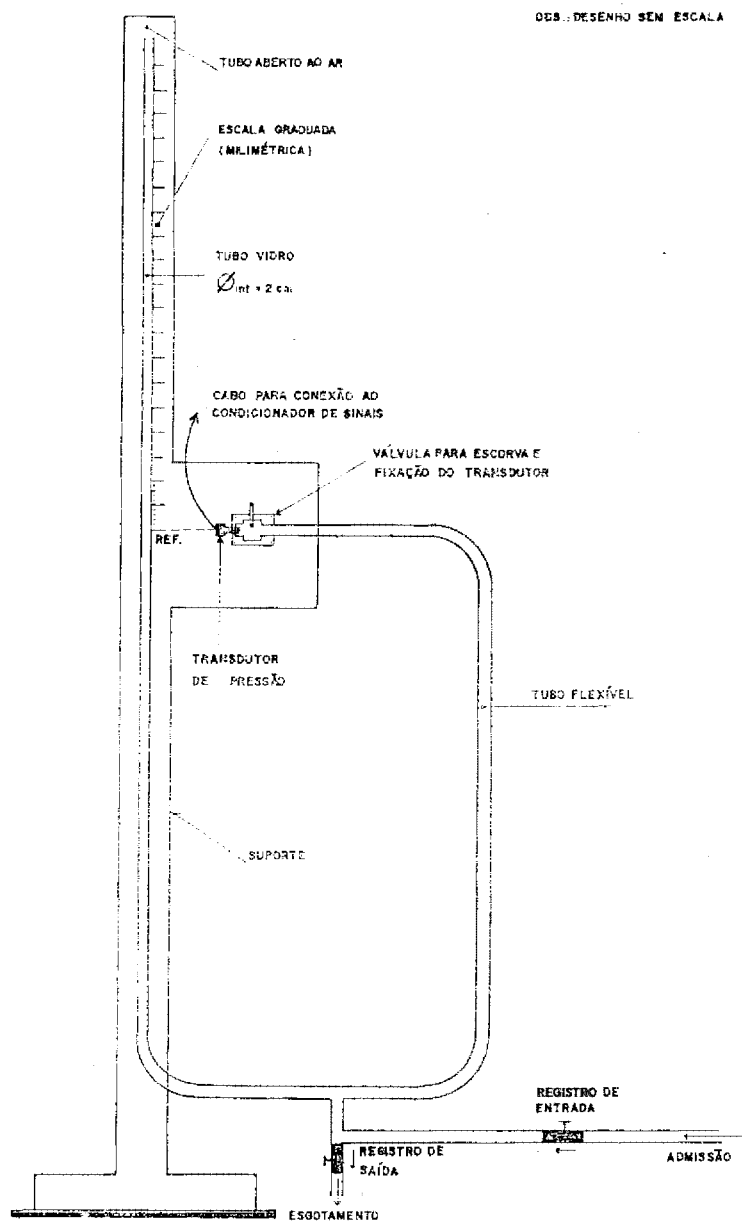


figura 4.3: APARATO PARA CALIBRAÇÃO ESTÁTICA

Os resultados desta calibração são os parâmetros angular (AA) e linear (BB) da equação da reta que possibilita a conversão, no domínio digital, de valores (VD) em níveis de resolução do conversor para valores (VF) em unidades de pressão

$$VF = AA \cdot VD + BB$$

já apresentado no item 3.2.1.1.

4.2.3.3 Aquisição

Durante o período de aquecimento do sensor, para cada uma das 11 tomadas, visualizou-se a entrada de dados em tempo real, durante 30 segundos e, em seguida, partiu-se para a aquisição propriamente dita. Esta visualização possibilitava um exame grosseiro do tipo e qualidade da aquisição.

O registro de valores era feito durante 100 segundos, para as tomadas de T1 a T9, e 50 segundos, para as tomadas T10 e T11, em função da representatividade desejada da amostra, a uma taxa de 100 valores por segundo. Assim, o número de dados registrados foi de 10000 ou 5000, respectivamente, conforme o caso.

Feito o registro e gravação dos valores em discos flexíveis, novamente visualizava-se a entrada na tela, com o objetivo de verificar, por comparação visual, possíveis falhas no sistema, que houvessem ocorrido durante os 100 ou 50 segundos de aquisição, o que indicaria a necessidade de repetição da etapa.

4.2.3.4 Análise

Para a análise digital dos dados aleatórios, representativos das pressões flutuantes, foi desenvolvido um conjunto de programas para micro-computador em linguagem BASIC-IBM/PC.

Em especial, quanto às estimativas da autocorrelação e densidade espectral, foram utilizados métodos de cálculo direto, que partem dos dados brutos, sem a utilização de algoritmos do

tipo transformada rápida de Fourier (ver item 1.2.4.5). O retardo máximo utilizado no cálculo das autocorrelações foi de 50 observações (meio segundo) e a estimativa do espectro contou com o alisamento proposto por Tukey, com ponto de truncamento igual a 25 (ver item 1.2).

A função de densidade espectral teve suas ordenadas avaliadas em 51 pontos de frequência angular w

$$w = \pi \cdot j / 50 \quad \text{com } j=0,1,\dots,50$$

medida em radianos por unidade de tempo. Como, neste caso, os dados foram adquiridos à razão de 100 por segundo, a unidade de tempo equivale a 0,01 segundo sendo, então, o valor de w em radianos por segundo, dado por

$$w = 100 \cdot \pi \cdot j / 50 = 2 \cdot \pi \cdot j \quad \text{com } j=0,1,\dots,50.$$

Assim, as frequências expressas em ciclos por segundo (Hz), representadas por f , são (ver item 1.2.4)

$$f = w / (2 \cdot \pi) = j \quad \text{com } j=0,1,\dots,50.$$

A frequência de Nyquist, conforme o item 1.2.4.3, nesta aplicação, resultou 50 Hz, valor que evita a ocorrência de dobramento devido à não existência de frequências desta ordem nas pulsações macroturbulentas da pressão na base de um ressalto hidráulico, a jusante de um descarregador de cheias (LOPARDO, 1986).

Conforme CHATFIELD, 1982, o comprimento da banda de resolução da janela de Tukey resulta 5,3 Hz para o ponto de truncamento adotado. Os intervalos de confiança para as estimativas do espectro podem ser obtidos sabendo-se que o produto do número de graus de liberdade da janela de retardo pela razão entre a estimativa e o valor real da ordenada espectral, em determinada frequência, é distribuído como χ^2_ν , onde ν é o número de graus de liberdade, igual a 1068 ou 534, conforme a amostra

possuísse 10000 ou 5000 valores, respectivamente. Ficava, assim, garantida uma faixa muito estreita de variação para as estimativas.

4.2.4 Resultados obtidos

Os resultados obtidos estão apresentados na forma como foram avaliados e organizados com referência ao número da série de ensaios que representam.

A tabela 1 apresenta as características das séries de ensaios realizadas.

tabela 1: RESUMO DOS ENSAIOS REALIZADOS

SÉRIE	VAZÃO	PROFUND. INICIAL	VELOCID. INICIAL	FROUDE INICIAL	REYNOLDS INICIAL
-	Q (l/s)	d _i (mm)	V _i (m/s)	F _i	R _i
1	49,6	17,2	4,005	9,76	6,85×10 ⁴
2	100,3	33,9	4,109	7,13	1,38×10 ⁵
3	149,2	49,6	4,178	5,99	2,06×10 ⁵
4	198,9	65,3	4,230	5,29	2,75×10 ⁵
5	248,7	80,9	4,276	4,80	3,44×10 ⁵

Para cada série de ensaios, foram efetuados os levantamentos e análises anteriormente referidos, em cada uma das 11 tomadas e os resultados estão apresentados nas tabelas 2 e 3.

tabela 2: ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO

		TOMADAS DE PRESSÃO e dist. (cm) do início										
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
PARAMETRO	SÉRIE	7	12	17	22	32	42	62	102	162	242	342
pressão média (piezômetro) [mm H ₂ O]	1	86	86	90	111	133	147	182	211	216	216	221
	2	110	101	121	129	148	163	204	256	299	310	315
	3	143	123	140	148	165	180	226	280	347	376	385
	4	183	146	157	167	190	201	254	307	376	423	437
	5	220	170	175	177	185	196	260	321	403	464	487
pressão média (transdutor) [mm H ₂ O]	1	51	54	75	86	109	131	167	191	201	205	214
	2	70	48	74	105	149	128	184	223	273	289	293
	3	138	99	122	131	152	168	228	291	347	370	392
	4	182	139	161	189	210	226	246	315	377	411	435
	5	230	163	174	177	198	212	263	328	400	463	483
desvio padrão [mm H ₂ O]	1	36	40	37	37	36	30	19	12	9	10	8
	2	26	38	35	43	46	46	33	16	10	7	7
	3	27	37	39	46	50	52	48	32	15	12	9
	4	26	31	37	38	45	46	51	37	19	11	7
	5	23	32	33	36	45	51	53	44	22	17	10
pressão com 1% de chance de ser igual ou superior [mm H ₂ O]	1	-33	-33	-18	-7	28	51	113	163	182	186	198
	2	21	-31	-5	6	41	13	89	180	245	275	280
	3	81	7	30	16	34	54	103	195	306	343	370
	4	128	67	84	100	104	115	121	215	323	383	419
	5	177	95	109	97	94	88	143	213	342	422	458
pressão com 99% de chance de ser igual ou superior [mm H ₂ O]	1	167	170	189	197	204	210	210	221	225	229	235
	2	160	174	190	238	287	267	278	267	300	307	309
	3	228	229	248	283	308	334	355	387	384	401	416
	4	263	244	286	313	350	364	391	417	426	438	452
	5	303	272	276	295	339	371	417	454	463	507	509

tabela 3: ANÁLISE ESPECTRAL DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO

PARAMETRO	SERIE	TOMADAS DE PRESSÃO e dist. (cm) do início										
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
		7	12	17	22	32	42	62	102	162	242	342
freqüência	1	17	19	7	5	4	3	0	0	42	42	42
dominante	2	9	7	6	5	4	4	3	0	0	0	0
[Hz]	3	0	5	5	5	4	3	2	0	0	0	0
	4	0	3	4	4	4	3	2	0	0	0	0
	5	0	0	0	3	3	3	3	0	0	0	0
ordenada	1	8	9	9	12	14	10	4	3	1	1	<1
máxima x 10 ²	2	5	11	11	17	20	24	11	5	4	2	1
[mm HzO] ²	3	9	15	19	27	33	39	31	20	7	4	2
	4	12	13	23	23	34	36	45	28	13	4	2
	5	17	25	24	25	41	53	53	38	17	12	5

4.2.5 Comentários sobre os resultados

A análise dos resultados obtidos, embora não faça parte dos objetivos imediatos deste trabalho, é feita, aqui, sob a forma de comentários gerais, sempre procurando analogias com os trabalhos de outros autores e, principalmente, com os de ABDUL KHADER e ELANGO, 1974 e LOPARDO, 1986, que inspiraram a montagem da instalação experimental utilizada.

4.2.5.1 Pressões médias, máximas e mínimas

Os valores de pressões médias, em cada tomada de pressão, normalmente, diferem para as duas formas como foram avaliadas, isto é, com a utilização de piezômetros convencionais e com transdutores.

Na medição com auxílio eletrônico são constatadas pressões negativas, nas tomadas mais a montante, para escoamentos com pequenos tirantes de, o que não ocorre na medição com

piezômetros. A tabela 2 salienta os fatos acima referidos.

Os valores de pressão, classificados de acordo com sua probabilidade de ocorrência, aparecem, como um exemplo, na plotagem das funções densidade e distribuição de probabilidade, para uma tomada e vazão quaisquer, da figura 4.4. Com base nestas informações, é possível avaliar valores extremos de pressão relativa, positivos ou negativos. Na tabela 2 estão apresentados valores de ocorrência excepcional, com 1 % e 99 % de probabilidade de serem iguais ou superiores a todos os outros da amostra, aqui utilizados para representar os mínimos e máximos, respectivamente.

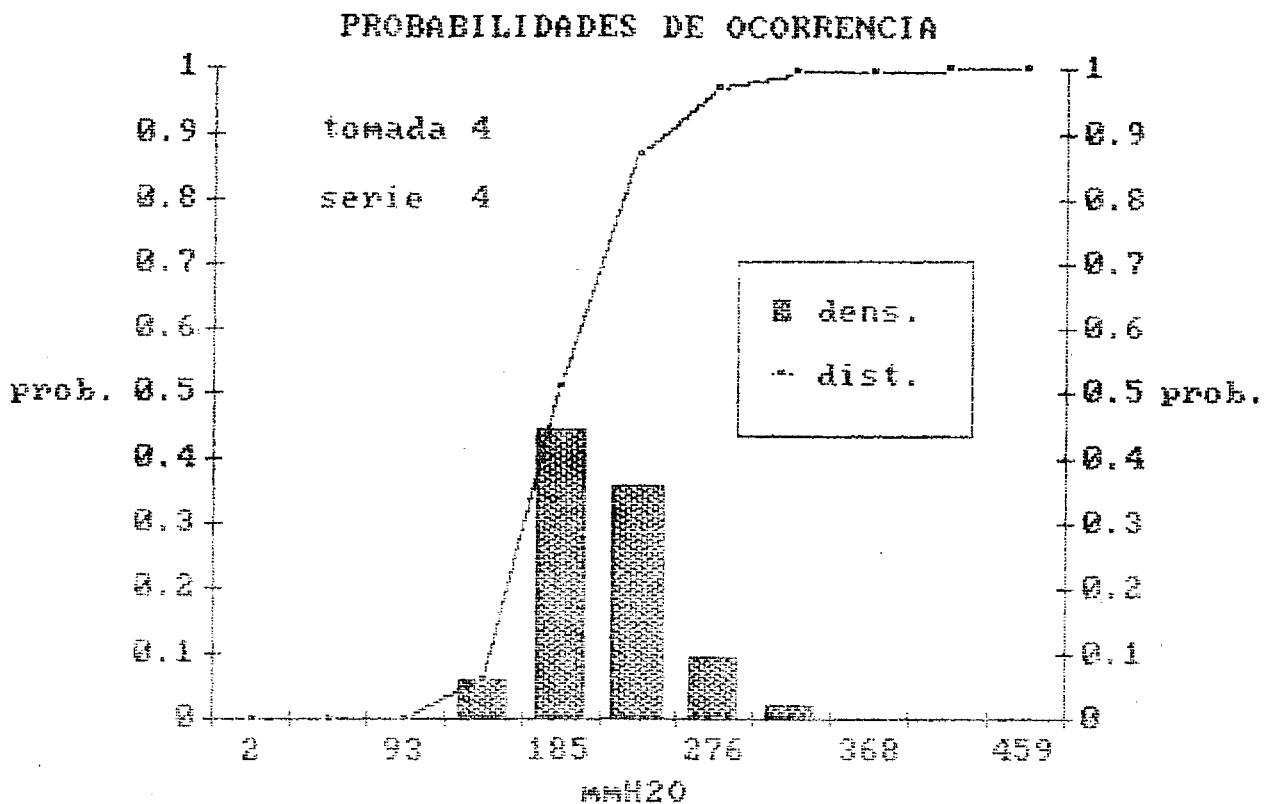


figura 4.4: DENSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES

4.2.5.2 Coeficiente de flutuação de pressão

Sob a denominação de coeficiente de flutuação de pressão, C_p' , encontra-se a grandeza adimensional, definida por

$$C_p' = \overline{(p' \cdot V)^2}^{1/2} / \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 \right)$$

em que p' é a componente flutuante da pressão e $(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2)$ é a pressão dinâmica na entrada do ressalto, sendo ρ a massa específica do fluido em escoamento e V_1 a velocidade na seção de entrada.

A aplicação mais comum deste coeficiente é na análise qualitativa de desempenho entre diferentes bacias de dissipação, comparando-se os decaimentos de seu valor em posições equivalentes das bacias.

Sua apresentação usual é em diagrama cartesiano, plotado contra a posição adimensionalizada da tomada de pressão. Para os dados constantes nas tabelas 1 e 2, o gráfico citado é o da figura 4.5.

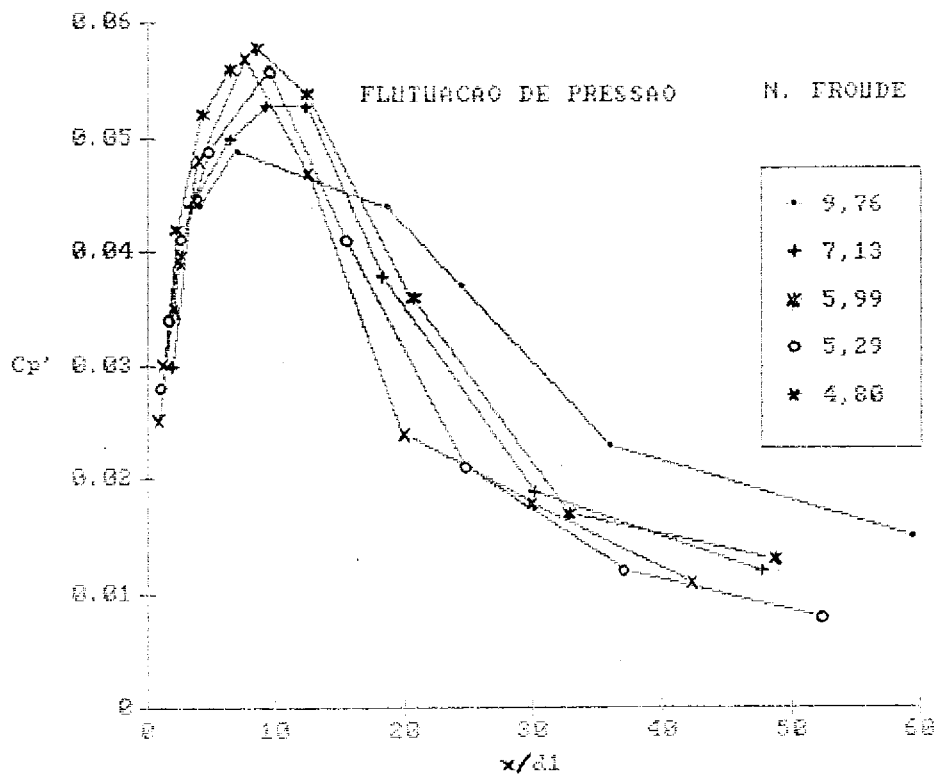


figura 4.5: COEFICIENTES DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO

O valor máximo obtido, aproximadamente 0,058, situa-se entre os valores de $x/d_1=8$ e $x/d_1=9$, onde d_1 é a profundidade inicial do ressalto. Em torno do valor $x/d_1=45$, o coeficiente Cp' cai a menos de 0,020. De maneira geral, a intensidade da flutuação

inicia o ressalto com magnitudes menores e, então, incrementa rapidamente até atingir seu pico em torno do valor 9 para x/d_1 , decaindo exponencialmente em direção a jusante. As flutuações mais intensas ocorrem sob a zona de formação dos rolos transversais do ressalto, conforme a visualização do escoamento, através da janela do canal, em relação às posições das tomadas de pressão.

A comparação com resultados de trabalhos similares, de outros autores (VASILIEV e BUKREYEV, 1967; KHADER e ELANGO, 1974; LOPARDO, 1986), apresenta discrepâncias tanto quanto a valores máximos e pontuais, bem como quanto às localizações de suas ocorrências. Um dos motivos para estas ocorrências, apontado por estes pesquisadores, e outros como RESH e LEUTHEUSSER, 1971 e LOPARDO e HENNING, 1986, é a diferença entre os estágios de desenvolvimento da camada limite junto aos pisos dos escoamentos de seus experimentos, na zona de medição.

4.2.5.3 Função de autocorrelação

O aspecto geral dos correlogramas obtidos, apresentados na figura 4.6, está de acordo com os obtidos pelos autores consultados (ver referências bibliográficas), e confirma alguns pontos referidos no decorrer deste trabalho.

O correlograma do primeiro tipo, apresenta um grande valor de correlação para retardo um, seguido de dois ou três mais coeficientes que, embora significativamente maiores do que zero, tendem a tornar-se sucessivamente menores. Além disso, as autocorrelações de longos retardos tendem a ser aproximadamente nulas. Este tipo de correlograma é característico das séries estacionárias e é denominado correlação de curto-termo, sendo o que ocorre nas tomadas submetidas, somente, ao efeito das pulsações macroturbulentas de pressão, devidas ao ressalto hidráulico (ver item 1.2.3.1).

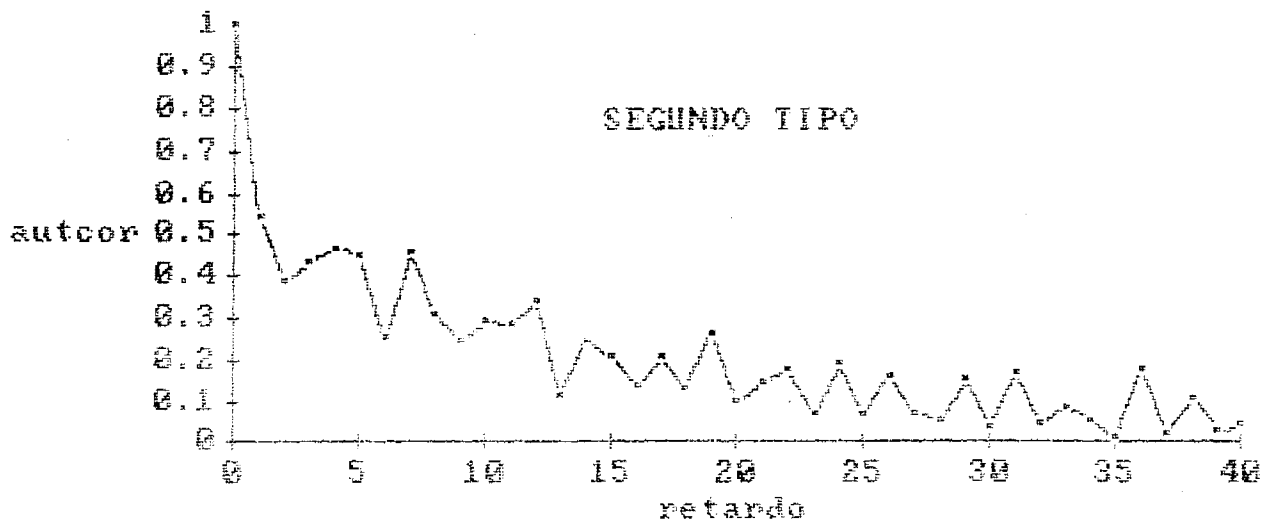
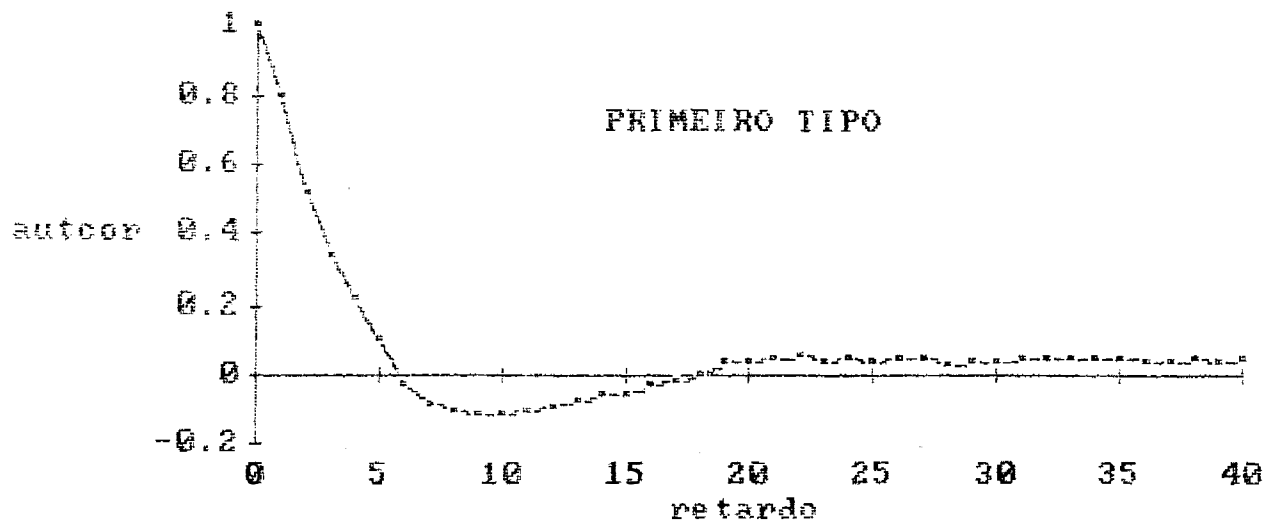


figura 4.6: CORRELOGRAMAS TIPO

O segundo tipo, em que as correlações são decrescentes, porém não chegam a anular-se, mesmo para longos retardos, caracteriza valores da amostra altamente relacionados, embora

passado um "longo" intervalo de tempo (CHATFIELD, 1982). É a que ocorre para as primeiras e últimas tomadas de pressão, no desenvolvimento do escoamento. As tomadas localizadas no início da bacia de dissipação estão submetidas ao efeito da localização instável do início do ressalto, ora mais a montante, ora mais a jusante (± 10 cm) e as no final, são sujeitas à formação de ondas superficiais, comuns após o término dos rolos do ressalto (PETERKA, 1974). Estes dois efeitos processam-se em frequências mais baixas do que as características à pulsação macroturbulenta, propriamente dita, mascarando seu efeito.

4.2.5.4 Função densidade de potência espectral

Conforme já mencionado, as funções autocorrelação (autocovariância) e densidade de potência espectral são formas equivalentes para descrever um processo estocástico estacionário, sendo complementares uma à outra (ver itens 1.2.3 e 1.2.4).

Na figura 4.7 estão os espectros de potência relativos aos correlogramas da figura 4.6. O do primeiro tipo, livre de influências estranhas ao escoamento no ressalto livre, apresenta suas maiores ordenadas na faixa de frequências normalmente aceitas como as mais importantes em bacias de dissipação do tipo I (USBR), de fundo horizontal, a jusante de descarregadores de cheias (KHADER e ELANGO, 1974 e LOPARDO, 1986). O diagrama espectral do segundo tipo, com ordenada máxima na frequência zero, confirma a não-estacionariedade da série de valores registrados (CHATFIELD, 1982), uma vez que a média dos valores de pressão, bem como a magnitude de suas oscilações, são alteradas pelos efeitos descritos no item 4.2.5.3, sobre a função de autocorrelação.

Valores de frequências dominantes muito altas (42 Hz), encontradas nas tomadas finais da primeira série, podem ser devidas às oscilações inerentes ao funcionamento do equipamento eletrônico, detectadas pelo tratamento, pois as ordenadas ocasionadas pelo escoamento reduziram-se a valores quase insignificantes.

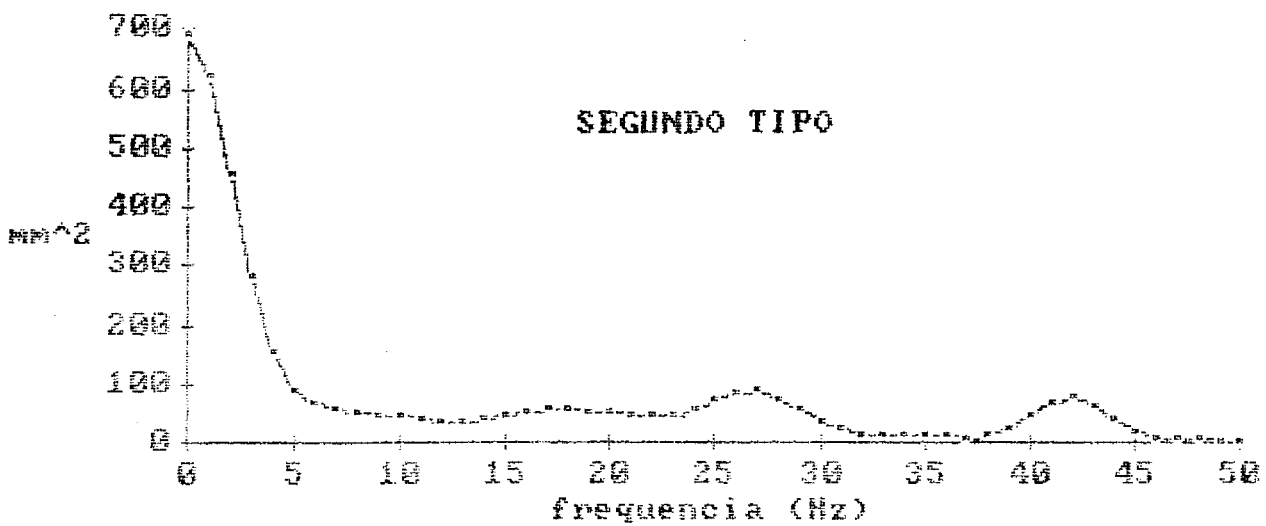
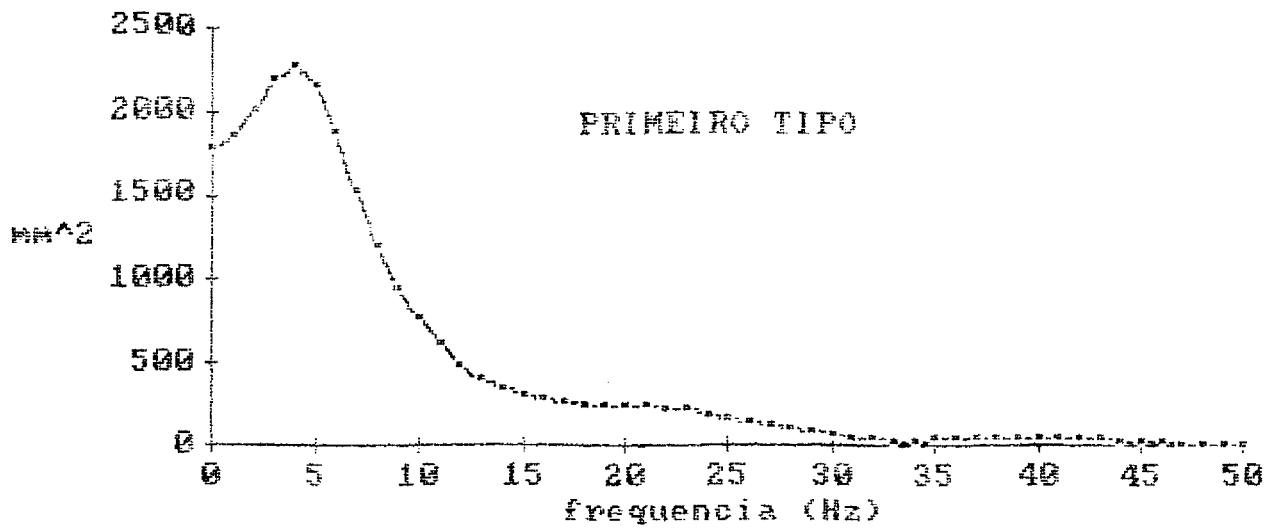


figura 4.7: ESPECTROS TIPO

4.3 TÉCNICAS USUAIS

Como parte integrante deste trabalho, foram pesquisados os últimos dez anos, da maioria de artigos publicados em periódicos como "Journal of Fluid Mechanics (Cambridge), Journal of Hydraulic Engineering (New York), Journal of Hydraulic Division (New York), Journal of Hydraulic Research (Delft), La Houille Blanche (Paris)" e "Water Power and Dam Construction (London)", além das apresentações em simpósios e congressos sobre o assunto.

Alguns trabalhos mais antigos, pioneiros ou inovadores na época, também foram investigados quanto à efetiva contribuição que poderiam dar ao desenvolvimento, em primeiro estágio, de um sistema para aquisição e tratamento de dados, como o aqui tratado.

Os resultados desta pesquisa aparecem, em seus diferentes aspectos, nos vários itens componentes do sistema e serão apresentados em forma de quadros-resumo, organizados de acordo com os assuntos abordados divididos em medições de pressão e outras medições; aplicação, instrumentação e conclusões, sempre com preferência a tratamentos digitais.

4.3.1 *Medições de pressão*

Na apresentação do quadro a seguir não se pretende esgotar a extensa lista de pesquisas já realizada nesta área. O objetivo é, isto sim, apresentar dados e conclusões sobre alguns sistemas de aquisição e tratamento e sua aplicação, utilizados para fins semelhantes aos que no laboratório de hidráulica do IPH se pretende atingir.

Os símbolos utilizados para as características da instrumentação são os seguintes:

N = número de dados de uma amostra;
 T_a = tempo total de aquisição de uma amostra, em segundos;
 f_a = frequência de aquisição de dados, em dados por segundo;
 L_m = retardo máximo para cálculo de correlações, em número de observações;
 ϕ_t = diâmetro do transdutor, em mm;
 r_t = faixa de trabalho do transdutor, em mHzO;
 ϕ_f = diâmetro da tomada de pressão, em mm;
 ϕ_c = diâmetro interno da conexão entre tomada e transdutor, em mm;
 e_c = espessura da parede da conexão entre tomada e transdutor, em mm;
 l_c = comprimento da conexão entre tomada e transdutor, em mm;
 FM = dados gravados em frequência modulada (fita magnética).

AUTOR	ANO	APLICAÇÃO	INSTRUMENTAÇÃO
ELDER	1961	amplitudes e frequências de flutuações de pressão em modelos 1:16	tratamento analógico com $T_a=1500$
THOMAS e LEAN	1963	forças induzidas por pressões sobre estruturas submersas	$\phi \cong 16$
VASILIEV e BUKREYEV	1967	estatística das pressões na base de um ressalto livre, a jusante de comporta de fundo	aquisição analógica e estatística via computador digital
WISNER	1967	comparação entre pressões em dutos fechados e canais abertos	tratamento analógico
HUVAL e NIELSON	1970	obtenção de dados para projetos de bacias de dissipação, a partir de modelos froudianos	-

continuação-----		
AUTOR ANO	APLICAÇÃO	INSTRUMENTAÇÃO

KHADER e ELANGO 1974	estatística das pressões na base de um ressalto formado a jusante de vertedor	$N=4 \times 500$, $L_m=N/10$ (Hanning), $f_a=200$ calibr. estática e dinâmica
NARASIMHAN e BHARGAVA 1976	pressões em ressaltos livres e a-fogados, a jusante de comporta de fundo	-
BEARMAN e OBASAJU 1982	relação entre pressões e deslocamentos para pilares submetidos a escoamentos	$\phi_t=1,6$; $\phi_c=2,4$; $l_c \leq 70$; $r_t = \pm 0,07$
SCHEWE 1983	efeito da resolução dos sensores nas medições de pressões	transdutores de diferentes tipos
LOPARDO, ANGELACCIO e CHIVIDINI 1984	caracterização da separação em escoamentos, através do coeficiente de assimetria da distribuição de pressões	-
LOPARDO, DE LIO e VERNET 1984	levantamentos e comparações de pressões entre modelos (1:50) e protótipos	$f_a=200$ e análise espectral através de FFT
LOPARDO e HENNING 1984	recomendações sobre a prática ideal de laboratório, para aquisição e tratamento de dados	$N=16 \times 512$; $f_a=200$; $T_a=41$; $r_t = \pm 1,75$; FFT/Bartlett; FM
LOPARDO, VERNET e HENNING 1984	estimativas de celeridades de ondas de pressão, em um ressalto livre, através de correlações espaço-temporais	-

continuação-----		
AUTOR ANO	APLICAÇÃO	INSTRUMENTAÇÃO

CHERRY, HILLIER e LATOIR 1984	identificação de relações entre flutuações de pressões e separação de escoamentos	$l_c=20$; $\phi_c=1,7$
KAYKAYOGLU e ROCKWELL 1985	identificação de relações entre flutuações de pressões e separação de escoamentos	dois transdutores em oito tomadas; $f_a=50$
LOPARDO e HENNING 1986	avaliação da influência das condi- ções de formação do ressalto nas estatísticas das pressões	$N=32 \times 512$; $f_a=100$ $l_c=500$; $\phi_c=5$; $e_c=1$
TOSO e BOWERS 1988	utilização de pressões extremas e carregamentos dinâmicos avaliados em modelos de bacias por ressalto	Apple / 8 bits $f_a=50$; $r_t=\pm 2,1$; $\phi=13$; BASIC
BOWERS e TOSO 1988	apresentam causas prováveis dos danos em um vertedor real e fazem recomendações quanto a pressões	modelo 1:60
BHARGAVA e NARASIMHAN 1989	avaliação das flutuações de pres- sões em comportas, variando parâ- metros hidráulicos	-
-----final		

Várias importantes conclusões são apresentadas nos trabalhos destes autores. Muitas delas influenciaram ou, até mesmo, definiram a escolha de procedimentos adotados na aplicação experimental aqui realizada. O quadro a seguir apresenta algumas delas e os artigos mencionados referem-se aos do quadro anterior.

AUTOR	ANO	CONCLUSÕES
ELDER	1961	<ul style="list-style-type: none"> * boa correspondência entre modelo e protótipo para \bar{p} e ruim para p'; * confirmação da semelhança de Froude para estudo de pressões; * sugere utilização de $Re \geq 10000$; * interpretação física dos parâmetros estatísticos.
THOMAS e LEAN	1963	<ul style="list-style-type: none"> * as frequências de flutuação mais perigosas são as de ressonância com as estruturas submersas * $f_d = 200$ é a maior que não sofre influência de Re.
VASILIEV e BUKREYEV	1967	<ul style="list-style-type: none"> * histórico da europa oriental sobre o assunto.
WISNER	1967	<ul style="list-style-type: none"> * comportamentos similares quanto ao C_p' em condutos forçados e canais abertos.
HUVAL e NIELSON	1970	<ul style="list-style-type: none"> * valores para obra real.
KHADER e ELANGO	1974	<ul style="list-style-type: none"> * histórico das avaliações feitas em ressalto; * relacionamento entre flutuações de pressão e arrasto no fundo da bacia; * interpretações físicas das estatísticas.
NARASIMHAN e BHARGAVA	1976	<ul style="list-style-type: none"> * comprovação da menor erosão provocada pelos ressaltos submersos.
LOPARDO, ANGELACCIO e CHIVIDINI	1984	<ul style="list-style-type: none"> * estado da arte para separação em blocos, pilares e dentes finais, com comprovações experimentais; * a função densidade de probabilidade é simétrica somente para turbulência isotrópica.

continuação-----		
AUTOR	ANO	CONCLUSÕES

LOPARDO, DE LIO e VERNET	1984	<ul style="list-style-type: none"> * quais os danos sobre estruturas submetidas a flutuações de pressão com lista de prejudicadas; * detecção da cavitação em modelos froudianos; * estabelecimento das transferências de frequências entre modelo e protótipo; * interpretação física das estatísticas.
LOPARDO e HENNING	1984	<ul style="list-style-type: none"> * recomendam $rt=±1,5$; $\phi r=1,5$; $50 \leq fa \leq 100$; $Ta=60$ e transdutor faceado; * apresentam a sensibilidade de parâmetros às diferentes digitizações e propriedades dos materiais.
LOPARDO, VERNET e HENNING	1984	<ul style="list-style-type: none"> * correlações espaço-temporais na obtenção de celeridades de ondas de pressão.
CHERRY, HILLIER e LATOUR & KAYKAYOGLU e ROCKWELL	1984 & 1985	<ul style="list-style-type: none"> * visualizações, com emissão de fumaça ou bolhas de hidrogénio, respectivamente, da separação, relacionando às flutuações de pressão medidas em diversas situações.
LOPARDO e HENNING	1986	<ul style="list-style-type: none"> * interpretação física de estatísticas e comentários sobre o desenvolvimento dos perfis de velocidade do escoamento influenciando os parâmetros.
TOSO e BOWERS & BOWERS e TOSO	1988	<ul style="list-style-type: none"> * salientam a necessidade da utilização de valores extremos de pressões, ainda que de curta duração, na otimização de projetos de bacias; * revisão histórica sobre pesquisas em ressaltos; * desempenho de transdutores faceados x conectados via condutos; * interpretam danos em obra real, baseados em resultados de modelo froudiano, escala 1:60.
-----final		

4.3.2 Outras medições

Neste item, estão listados alguns trabalhos em que a grandeza física avaliada é a velocidade do escoamento, deslocamento de posição, vibração estrutural, nível de água ou, até mesmo, a pressão, desde que visando investigações quanto a ocorrência de cavitação ou quando são baseados em pressões médias, obtidas a partir de equipamentos não-eletrônicos, convencionais.

Nesta etapa da pesquisa bibliográfica, buscou-se levantar o tipo de equipamento normalmente utilizado para as diversas aplicações de um sistema para aquisição em tempo real. Sendo assim, em cada trabalho, a atenção foi voltada, exclusivamente, aos itens descritivos dos objetivos, procedimentos e resultados.

Cabe voltar a ressaltar que não se pretendeu esgotar a lista completa de trabalhos existentes.

Quanto aos símbolos empregados, além dos já apresentados, no item anterior, são empregados:

- F = número ou semelhança de Froude;
- R = número ou semelhança de Reynolds;
- HFA= anemometria a filme quente;
- HWA= anemometria a fio quente;
- LDA= anemometria laser-dopler;
- CAD= conversor analógico digital; e
- NA = níveis de água.

AUTOR	ANO	APLICAÇÃO	INSTRUMENTAÇÃO
RESH e LEUTHEUSSER	1971	* medições de turbulência no interior do ressalto e de dependência das condições de entrada.	comprovação

continuação-----		
AUTOR ANO	APLICAÇÃO	INSTRUMENTAÇÃO

LEUTHEUSSER e KARTHA 1972	* ressalto a jusante de comporta de fundo, relação profundidade/ℓ e comprimento do ressalto.	sonda de Pitot
NAUDASCHER e LOCHER 1974	* estudo sobre separação e religação de escoamentos, aglutinando trabalhos dispersos.	cálculos estatísticos c/ 530 graus de librd.
ANWAR e ATKINS 1980	* medições de turbulência com simulação de marés.	HFA a $f_a=25$; FM; sonda Preston;
LIU e LIN 1982	* aplicação de um medidor laser.	N=8192 ou 16394 em 8 blocos; 30 graus libr.; 26 % de erro
KRISHNAPPAN 1984	* verificação experimental de um modelo de escoamento.	NA ponta convencional; velocidades a LDA N=8144; $f_a=100$
GEORGE, BEUTHER e ARNDT 1984	* medições turbulentas com uma sonda de Pitot com comentários sobre erros cometidos.	sonda Pitot
WILLMARTH e SHARMA 1984	* utilizam anemômetros reduzidos para otimizar resolução.	HWA; $f_a=10000$; FM
CASTRO 1985	* medições de amplitudes de grandezas turbulentas.	HWA; $f_a=300$; CAD=10 bits; $T_a=30$; clock=1MHz
LI, ZHANG e HAMMITT 1986	* estatística das pulsações de pressão em um Venturi.	N=2048; $f_a=2048$

continuação-----		
AUTOR ANO	APLICAÇÃO	INSTRUMENTAÇÃO

BROWNE, ANTONIA e SHAH 1987	* avaliação da dissipação de energia em uma esteira.	CAD=11 bits e filtro passa-baixa 2,4 kHz
TSINOBER, KIT e TEITEL 1987	* relações entre velocidade turbulenta e um campo elétrico.	HFA; N=50x512; f _a =250 a 1000 em 8 canais
TIEDERMAN e LUCHIK 1987	* ejeções no escoamento turbulento em um canal.	LDA; f _a ≥2000
NAGANO e TAGAWA 1988	* flutuações de velocidade e temperatura.	N=65536; FM; CAD=12 bits
CHINCHOLLE 1988	* medições de erosões instantâneas devidas à cavitação.	canal de cavitação
CALLANDER 1989	* vibrações de prismas submersos em escoamentos; * semelhanças de R e F; * amortecimento de vibrações.	transdutor de movimento (sens. 0,2 mm/V); N=4096; f _a =20
XINGKUI e NING 1989	* turbulência em canais com um Pitot adaptado.	N=8192; f _a =256; L _m =48 e FFT
LYN e RODI 1990	* turbulência em um jato plano; * semelhanças de R e F; * porquê grandezas instantâneas.	LDA; f _a =1 ou 2; N=600 (mínimo); T _a =400 (mínimo)
-----final		

5 CONCLUSÕES

Atingido o objetivo principal deste trabalho, isto é, desenvolver e aplicar um sistema para aquisição e tratamento de dados de pressões instantâneas, cumpriu-se a etapa de domínio da base das técnicas empregadas.

De posse dos detalhes sobre o desempenho do conjunto de equipamentos e programas desenvolvidos, além do levantamento das técnicas empregadas por outros autores nas investigações de outras grandezas, pode-se desenvolver a montagem de sistemas mais completos, para aplicação a situações fora do alcance do ora apresentado.

Os resultados aqui obtidos, entendidos como satisfatórios, permitirão a ligação entre equipes de suporte computacional, eletrônico e hidráulico que, uma vez estabelecida, possibilitará a incorporação de novos tipos de informações aos projetos e otimizações de estruturas hidráulicas.

Observando experiências de laboratórios mais adiantados, com tradição nas técnicas referidas, e do próprio IPH, comprova-se a garantia de retorno dos investimentos necessários, tanto em aspectos humanos como financeiros.

Quanto aos resultados alcançados na aplicação experimental

realizada, observa-se ser imprescindível a utilização de sistemas, como o aqui desenvolvido, para a avaliação de valores extremos e características oscilatórias dos campos de pressões, verificados na base de ressaltos hidráulicos formados a jusante de descarregadores de cheias.

O desempenho dos equipamentos, na avaliação dos campos de pressões, foi plenamente satisfatório, uma vez que os resultados obtidos apresentaram-se com as mesmas formas e magnitudes dos obtidos por outros investigadores. Sua adequação ao problema em questão ficou comprovada, pois, em momento algum foi necessário restringir a pesquisa proposta, devido a limitações dos equipamentos.

O sistema desenvolvido serve como base para um grande número de aplicações. No entanto, para avaliar características de outras grandezas físicas, diferentes da pressão, é necessário que se trabalhe com o sensor, níveis de condicionamento de sinais e velocidades de aquisição/conversão, adequados a cada caso.

Quanto ao tratamento matemático empregado cabe salientar que a análise conjunta de séries de dados, incluindo densidade de probabilidade conjunta, correlação cruzada e espectro cruzado são ferramentas indispensáveis em várias aplicações do sistema completo, que for desenvolvido a partir deste. Suas aplicações principais estão resumidas no item 1.3 e, no que diz respeito à aplicação em estruturas hidráulicas, vários trabalhos consultados apresentam importantes conclusões baseadas em seus resultados, por exemplo LOPARDO, VERNET e HENNING, 1984, com correlações espaço-temporais na obtenção de celeridades de ondas de pressão em uma bacia de dissipação, entre outros.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDUL KHADER, M. H., ELANGO, K. 1974. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, Delft, v.12, n.4, p.469-489.
- ANAMED. s. d. *Conversor analógico/digital de 12 bits AM13PC: manual de operação*. São Paulo. 28p.
- ANWAR, H. O., ATKINS, R. 1980. Turbulence measurements in simulated tidal flow. *Journal of the Hydraulics Division*, New York, v.106, n.8, p.1273-1289, Aug.
- BEARMAN, P. W., OBASAJU, E. D. 1982. An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v.119, p.297-321, June.
- BELL & HOWELL. CEC Division. s. d. *Transducer signal conditioner; CEC type 1-183*. Pasadena. 48p. (Publication Number 994013-1277).
- BENDAT, J. S., PIERSOL, A. G. 1971. *Random data: analysis and measurement procedures*. New York, Wiley-Interscience. 407p.

- BHARGAVA, V. P., NARASIMHAN, S. 1989. Pressure fluctuations on gates. *Journal of Hydraulic Research*, Delft, v. 27, n.2, p.215-231.
- BOWERS, C. E., TOSO, J. 1988. Karnafuli Project, model studies of spillway damage. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v.114, n.5, p.469-483, May.
- BROWNE, L. W. B., ANTONIA, R. A., SHAH, D. A. 1987. Turbulent energy dissipation in a wake. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v.179, p.307-326, June.
- CALLANDER, S. J. 1989. Flow-induced vibrations of rectangular cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v.115, n.10, p.1316-1331, Oct.
- CASTRO, I. P. 1985. Time-domain measurements in separated flows. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v.150, p. 183-201, Jan.
- CHATFIELD, C. 1982. *The analysis of time series: an introduction*. New York, Chapman and Hall. 268p.
- CHERRY, N. J., HILLIER, R., LATOUR, M. E. 1984. Unsteady measurements in a separated and reattaching flow. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v.144, p.13-46, July.
- CHINCHOLLE, L. H. 1988. Study of the instantaneous erosion of cavitation, versus flow, pressure and temperature. *Journal of Hydraulic Research*, Delft, v.26, n.1, p. 67-82.
- ELDER, R. A. 1961. Model-prototype turbulence scaling. In: ASSOCIATION INTERNATIONALE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES, 9., 1961, Dubrovnik. *Themes*. s.1. 1337p. p.24-31.

- ENDEVCO. 1981. *Piezoresistive pressure transducer*. Anaheim. 2p. (Series 8506).
- GEORGE, W. K., BEUTHER, P. D., ARNDT, R. E. 1984. Pressure spectra in turbulent free shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v.148, p.155-191, Nov.
- HUVAL, C. J., NEILSON, F. M. 1970. Discussion on "Fluctuating pressures in spillway stilling basins". *Journal of the Hydraulics Division*, New York, v.96, n.8, p.1754-1758, Aug.
- JENKINS, G. M., WATTS, D. G. 1968. *Spectral analysis and its applications*. San Francisco, Holden-Day. 525p.
- KAYKAYOGLU, R., ROCKWELL, D. 1985. Vortices incident upon a leading edge: instantaneous pressure fields. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v.156, p.439-461, July.
- KRISHNAPPAN, B. G. 1984. Laboratory verification of turbulent flow model. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v.110, n.4, p.500-514, Apr.
- KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS. 1988. *Kyowa products*. Tokyo. 6p. (Cat. n. 1004C).
- LEUTHEUSSER, H. J., KARTHA, V. C. 1972. Effects of inflow condition on hydraulic jump. *Journal of the Hydraulics Division*, New York, v.98, n.8, p.1367-1385, Aug.
- LI, S., ZHANG, Y., HAMMITT, F. G. 1986. Characteristics of cavitation bubble collapse pulses, associated pressure fluctuations, and flow noise. *Journal of Hydraulic Research*, Delft, v.24, n.2, p.109-122.
- LIU, H.-T., LIN, J.-T. 1982. On the spectra of high-frequency wind waves. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v.123, p.165-185, Oct.

- LOPARDO, R. A. 1986. *Apunte sobre fluctuaciones macro-turbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico*. São Paulo. 45f. Apostila do Curso de Turbulência, Cavitação e Aeração de Fenômenos Hidráulicos, agosto de 1986.
- LOPARDO, R. A., HENNING, R. E. 1986. Efecto de las condiciones de ingreso al resalto sobre el campo de presiones instantáneas. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDRAULICA, 12., 1986, São Paulo. *Anais*. São Paulo: Comité Regional Latino-Americano da AIPH. 4v. v.1, p.116-127.
- LOPARDO, R. A., HENNING, R. E. 1984. Temas prácticos de la medición y análisis de presiones instantáneas en laboratorio. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDRAULICA, 11., 1984, Buenos Aires. *Anales*. Buenos Aires: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. 2v. v.1, p.375-386.
- LOPARDO, R. A., ANGELACCIO, C. M., CHIVIDINI, M. F. 1984. Un aspecto del fenómeno de separación en escurrimientos macro-turbulentos. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDRAULICA, 11., 1984, Buenos Aires. *Anales*. Buenos Aires: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. 2v. v.1, p.47-58.
- LOPARDO, R. A., DE LIO, J.C., VERNET, G. F. 1985. Model-prototype comparisons on pressure fluctuations in hydraulic jump energy dissipators. In: SYMPOSIUM ON SCALE EFFECTS IN MODELLING HYDRAULIC STRUCTURES, 1984, Esslingen. Studgard: H. Kobus. Paginação irregular. Art.7.2.

- LOPARDO, R. A., VERNET, G. F., HENNING, R. E. 1984. Correlación de presiones instantáneas inducidas por un resalto hidráulico libre y estable. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDRAULICA, 11., 1984, Buenos Aires. *Anales*. Buenos Aires: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. 2v. v.1, p.23-34.
- LUCHIK, T. S., TIEDERMAN, W. G. 1987. Timescale and structure of ejections and bursts in turbulent channel flows. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v.174, p. 529-552, Jan.
- LYN, D. A., RODI, W. 1990. Turbulence measurements in model settling tank. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v.116, n.1, p.3-21, Jan.
- MALMSTADT, H. V., ENKE, C. G., CROUCH, S. R., HORLICK, G. 1974. *Electronic measurement for scientists*. Menlo Park, W. A. Benjamin. 906p.
- MARTINS, J. R. S., FADIGA JR., F. M. 1988. *Interfaceamento, aquisição e tratamento de dados*. / São Paulo / Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. 18f.
- NAGANO, Y., TAGAWA, M. 1988. Statistical characteristics of wall turbulence with a passive scalar. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v.196, p.157-185, Nov.
- NARASIMHAN, S., BHARGAVA, V. P. 1976. Pressure fluctuations in submerged jump. *Journal of the Hydraulics Division*, New York, v.102, n.3, p.339-350, Mar.
- NAUDASCHER, E., LOCHER, F. A. 1974. Flow-induced forces on protruding walls. *Journal of the Hydraulics Division*, New York, v.100, n.2, p.295-313, Feb.

- ORTIZ, J. P. 1986. *As pressões e velocidades instantâneas induzidas pelo escoamento turbulento*. São Paulo. 93f. Apostila do Curso de Turbulência, Cavitação e Aeração de Fenômenos Hidráulicos, agosto de 1986.
- PETERKA, A. J. 1974. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Denver, Bureau of Reclamation. 222p.
- RESCH, F. J., LEUTHEUSSER, H. J. 1971. Mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique. *La Houille Blanche*, Grenoble, v.26, n.1, p.17-32.
- SCHEWE, G. 1983. On the structure and resolution of wall-pressure fluctuations associated with turbulent boundary layer flow. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v. 134, p.311-328, Sept.
- TENNEKES, H., LUMLEY, J. L. 1980. *A first course in Turbulence*. Cambridge, M. I. T. 300p.
- THOMAS, A. R., LEAN, G. H. 1963. The vibration of a submerged wall exposed to a jet. In: ASSOCIATION INTERNATIONALE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES, 10., 1963, London. *Compte-rendu*. s.1.: UNESCO. 4v. v.3, p.89-100.
- TOSO, J. W., BOWERS, C. E. 1988. Extreme pressures in hydraulic-jump stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v.114, n.8, p.829-843, Aug.
- TSIBOBER, A., KIT, E., TEITEL, M. 1987. On the relevance of the potential-difference method for the turbulence measurements. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v. 175, p.447-461, Feb.

- VASILIEV, O., BUKREYEV, V. 1967. Statistical characteristics of pressure fluctuations in the region of hydraulic jump. In: ASSOCIATION INTERNATIONALE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES, 12., 1967, Fort Collins. *Compte-rendu*. Fort Collins. 5v. v.2, p.1-8.
- WILLMARTH, W. W., SHARMA, L. K. 1984. Study of turbulent structure with hot wires smaller than the viscous length. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v.142, p.121-149, May.
- WISNER, P. 1967. Sur les fluctuations de la pression au fond de ressauts hydrauliques en conduite et en écoulement libre. In: ASSOCIATION INTERNATIONALE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES, 12., 1967, Fort Collins, *Compte-rendu*. Fort Collins. 5v. v.2, p.46-53.
- XINGKUI, W., NING, Q. 1989. Turbulence characteristics of sediment-laden flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v.115, n.6, p.781-800, June.

ANEXOS

ANEXO A1: VISUALIZAÇÃO DA ENTRADA DE DADOS

```
1350 PRINT "VISUALIZACAO DA ENTRADA DE DADOS NA TELA":PRINT
1380 INPUT "numero de telas preenchidas ";TELA:PRINT
1390 INPUT "canal utilizado na placa ";CANAL
1400 DIM DIGITAL(640)
1410 MINIMO=4096
1420 MAXIMO=0
1430 OUT 784,2
1440 OUT 770,6
1450 OUT 769,CANAL + 16
1460 SCREEN 2
1470 FOR T=1 TO TELA
1480 CLS
1490 LOCATE 1,11:PRINT "MINIMO =":LOCATE 1,41:PRINT "MAXIMO ="
1500 LOCATE 1,20 : PRINT MINIMO:LOCATE 1,50:PRINT MAXIMO
1510 FOR I=0 TO 639
1520 OUT 768,0
1530 DIGITAL(I)=INP(768)+256*INP(770)
1540 IF DIGITAL(I)<MINIMO GOTO 1570
1550 IF DIGITAL(I)>MAXIMO GOTO 1580
1560 GOTO 1590
1570 MINIMO=DIGITAL(I):LOCATE 1,19:PRINT " " "":LOCATE
1,20:PRINT MINIMO:GOTO
1590
1580 MAXIMO=DIGITAL(I):LOCATE 1,49:PRINT " " "":LOCATE
1,50:PRINT MAXIMO
1590 Y=200-DIGITAL(I)/20.48
1600 PSET(I,Y)
1610 NEXT I
1620 NEXT T
1630 SCREEN 0
```

ANEXO A2: AQUISIÇÃO DE DADOS EM TEMPO REAL

```
1900 PRINT "AQUISICAO DE DADOS EM TEMPO REAL ":PRINT
2020 INPUT "numero do canal utilizado
";CANAL:PRINT
2030 INPUT "nome do arquivo para gravacao
";NOMARQ$:PRINT
2040 INPUT "numero de valores a adquirir (max. 15000)
";NUMVAL:PRINT
2050 INPUT "tecle ENTER para iniciar ";NADA:PRINT
2060 PRINT "ARQUIVO = ";NOMARQ$;" (ADQUIRINDO ";NUMVAL;" DADOS
NA RAZAO DE 100 POR SEGUNDO)":PRINT
2070 DIM DIGITAL2(NUMVAL)
2080 OUT 784,2
2090 OUT 770,6
2100 OUT 769,CANAL + 16
2120 FOR I=1 TO NUMVAL
2130 OUT 768,0
2140 DIGITAL2(I)=INP(768)+256*INP(770)
2145 ATRASO=13
2150 FOR DEMORA=0 TO ATRASO
2160 NEXT DEMORA
2170 NEXT I
2180 PRINT "AQUISICAO CONCLUIDA":PRINT
2190 PRINT "GRAVANDO...":PRINT
2200 OPEN NOMARQ$ FOR OUTPUT AS #3
2210 WRITE #3,NUMVAL
2220 FOR I=1 TO NUMVAL
2230 WRITE #3,DIGITAL2(I)
2240 NEXT I
2250 CLOSE #3
```

ANEXO A3: CONVERSÃO DE VALORES NO DOMÍNIO DIGITAL

```
1670 PRINT "CONVERSAO DE VALORES :  DOMINIO  DIGITAL  ->  DOMINIO
FISICO":PRINT
1680 PRINT "Uma funcao linear sera utilizada, na forma :":PRINT
1690 PRINT "(VALOR FISICO) = AA * (VALOR DIGITAL) + BB ":PRINT
1700 INPUT "entre com o valor AA =":AA:PRINT
1710 INPUT "entre com o valor BB =":BB:PRINT
1720 PRINT "NOMES DOS ARQUIVOS":PRINT
1730 INPUT "arquivo bruto (valores digitais) a ser convertido
";NOMARQ1$
1740 INPUT "arquivo resultante (valores fisicos)
";NOMARQ2$:PRINT
1750 OPEN NOMARQ1$ FOR INPUT AS #1
1760 OPEN NOMARQ2$ FOR OUTPUT AS #2
1770 INPUT #1,NUMVAL
1780 WRITE #2,NUMVAL
1790 PRINT
1800 FOR I=1 TO NUMVAL
1810 INPUT #1,A1
1820 A2=INT((AA*A1+BB)+.5)
1830 WRITE #2,A2
1840 PRINT A1;TAB(20) A2
1850 NEXT I
1860 CLOSE #1,#2
```

ANEXO A4: ANALISE ESTATISTICA DE DADOS

```

230 PRINT "ANALISE ESTATISTICA DE DADOS"
240 INPUT "numero de intervalos de classe para distribuicao de
probabilidade ";NUMINTERV
260 INPUT "nome do arquivo ";NOMARQ$
270 SOMAVAL = 0
280 OPEN NOMARQ$ FOR INPUT AS #3
290 INPUT #3,NUMVAL
300 FOR I=1 TO NUMVAL
310 INPUT #3,A(I)
320 SOMAVAL=SOMAVAL+A(I)
330 NEXT I
340 CLOSE #3
360 MEDIAVAL=SOMAVAL/NUMVAL
380 MINIVAL=1E+37;MAXIVAL=1E-37;SOMAVAL2=0;SOMAVAL3=0;SOMAVAL4=0
390 FOR I=1 TO NUMVAL
400 valor=A(I)-MEDIAVAL
410 SOMAVAL2=SOMAVAL2+valor*valor
420 SOMAVAL3=SOMAVAL3+valor*valor*valor
430 SOMAVAL4=SOMAVAL4+valor*valor*valor*valor
440 IF A(I)<MINIVAL THEN GOTO 470
450 IF A(I)>MAXIVAL THEN GOTO 480
460 GOTO 490
470 MINIVAL=A(I):GOTO 490
480 MAXIVAL=A(I)
490 NEXT I
510 DESVIO=SQR(SOMAVAL2/NUMVAL)
520 ASSIMETRIA=SOMAVAL3/(DESVIO*DESVIO*DESVIO)/NUMVAL
530 CURTOSE=SOMAVAL4/(DESVIO*DESVIO*DESVIO*DESVIO)/NUMVAL
550 TAMINTERV=(MAXIVAL-MINIVAL)/NUMINTERV
570 FOR K=0 TO NUMINTERV
580 D(K)=MINIVAL + K*TAMINTERV
590 NEXT K
610 FOR I=1 TO NUMVAL
620 IF A(I)<=MINIVAL THEN K=0:GOTO 660
630 K=(A(I)-MINIVAL)/TAMINTERV
640 IF INT(K)=K THEN GOTO 660
650 K=INT(K)+1
660 NSMPL(K)=NSMPL(K)+1
670 NEXT I
690 SOMACUM=0
700 FOR K=0 TO NUMINTERV
710 SOMACUM=SOMACUM+NSMPL(K)
720 NACUM(K)=SOMACUM
730 DISPROB(K)=NACUM(K)/NUMVAL
735 DNSPROB(K)=NSMPL(K)/NUMVAL
740 NEXT K
760 PRINT:PRINT "NOME DO ARQUIVO      ";NOMARQ$
770 PRINT "NUMERO DE PONTOS      ";NUMVAL

```

```
780 PRINT "VALOR MAXIMO           ";MAXIVAL
790 PRINT "VALOR MINIMO          ";MINIVAL
800 PRINT "VALOR MEDIO           ";MEDIIVAL
810 PRINT "DESVIO PADRAO        ";DESVIO
820 PRINT "ASSIMETRIA            ";ASSIMETRIA
830 PRINT "CURTOSE               ";CURTOSE:PRINT
840 PRINT "RESULTADOS DA DISTRIBUICAO DE PROBABILIDADE":PRINT
NUMINTERV;"INTERVALOS DE CLASSE DE TAMANHO = ";TAMINTERV:PRINT
850 PRINT "final intervalo";" ";"ocorr. simples";" ";"ocorr.
acum.;" " ";"dns. prob.;" " ";"dis. prob"
860 FOR K=0 TO NUMINTERV
870
                                                    PRINT
D(K);TAB(19)NSMPL(K);TAB(36)NACUM(K);TAB(50)DNSPROB(K);TAB(65)DIS
PROB(K)
880 NEXT K
```

ANEXO A5: DETERMINAÇÃO DO AUTOCORRELOGRAMA

```
3410 PRINT "DETERMINAÇÃO DO AUTOCORRELOGRAMA":PRINT
3420 PRINT "ARQUIVO ANALISADO : ";NOMARQ$:PRINT
3430 INPUT "retardo maximo ";LAG:PRINT
3440 DIM RO(LAG+1)
3450 SOMAVAL=0
3460 FOR I=1 TO NUMVAL
3470 SOMAVAL=SOMAVAL+C(I)
3480 NEXT I
3490 MEDIAVAL=SOMAVAL/NUMVAL
3500 SOMAVAR=0
3510 FOR I=1 TO NUMVAL
3520 SOMAVAR=SOMAVAR+(C(I)-MEDIAVAL)*(C(I)-MEDIAVAL)
3530 NEXT I
3540 PRINT "-----"
3550 PRINT "retardo (leituras)";TAB(25)"autocorrelacao"
3560 PRINT "-----":PRINT
3570 FOR K=0 TO LAG
3580 SOMAPROD=0
3590 FOR J=1 TO (NUMVAL-K)
3600 SOMAPROD=SOMAPROD+(C(J)-MEDIAVAL)*(C(J+K)-MEDIAVAL)
3610 NEXT J
3620 RO(K)=SOMAPROD/SOMAVAR
3630 PRINT TAB(7) K;TAB(26) RO(K)
3640 NEXT K
```

ANEXO A6: DETERMINAÇÃO DO ESPECTRO DE POTENCIA

```

2550 PRINT "DETERMINAÇÃO DO ESPECTRO DE POTENCIA":PRINT
2560 PRINT "ARQUIVO ANALISADO : ";NOMARQ$:PRINT
2570 INPUT "frequencia de aquisicao das amostras (Hz)
";FREQ:PRINT
2580 DELTAT=1/FREQ
2590 PRINT "intervalo de tempo da amostragem (s)
";(INT(DELTAT*10000+.5))/10000:PRINT
2600 INPUT "ponto de truncamento
";TRUNCPT:PRINT
2610 INPUT "numero de ordenadas
";NUMORD:PRINT
2620 DIM LAMBDA(NUMORD+1),FREQ(NUMORD+1),SPEC(NUMORD+1)
2630 PRINT
2640 PI=3.141592
2650 PRINT "aguarde pelos resultados obtidos...":PRINT
2660 SOMAVAL=0
2670 FOR I=1 TO NUMVAL
2680 SOMAVAL=SOMAVAL+C(I)
2690 NEXT I
2700 MEDIAVAL=SOMAVAL/NUMVAL
2710 FOR K=0 TO TRUNCPT
2720 SOMAPROD=0
2730 FOR I=1 TO (NUMVAL-K)
2740 SOMAPROD=SOMAPROD+(C(I)-MEDIAVAL)*(C(I+K)-MEDIAVAL)
2750 NEXT I
2760 LAMBDA(K)=.5*(1+COS(PI*K/TRUNCPT))*SOMAPROD/NUMVAL
2770 NEXT K
2780 PRINT "-----"
2790 PRINT "freq (Hz)";TAB(15)"ord espec (un^2)";TAB(33)"ampl
(un)"
2800 PRINT "-----";PRINT
2810 MXSPEC=0
2820 FOR I=0 TO NUMORD
2830 FREQ(I)=I/(2*NUMORD)
2840 SOMASPEC=0
2850 FOR K=1 TO TRUNCPT
2860 SOMASPEC=SOMASPEC+LAMBDA(K)*COS(2*PI*FREQ(I)*K)
2870 NEXT K
2880 SPEC(I)=(LAMBDA(0)+2*SOMASPEC)/PI
2890 IF SPEC(I) <= MXSPEC GOTO 2930
2900 MXSPEC=SPEC(I)
2910 FREQDM=FREQ(I)
2920 ORDMAX=I
2930 PRINT
(FREQ(I)/DELTAT);TAB(17)SPEC(I);TAB(31)(SQR(2*ABS(SPEC(I))/NUMVAL
))
2940 NEXT I:PRINT

```



```
2950 PRINT "-----":PRINT
2960 TMPREG=DELTAT*NUMVAL
2970 PRINT "tempo total de registro (s) ";TMPREG:PRINT
2980 CMPBRS=4/(3*TRUNCPT*DELTAT)
2990 PRINT "resolucao (Hz) ";CMPBRS:PRINT
3000 GRLBRD=2.67*NUMVAL/TRUNCPT
3010 PRINT "graus de liberdade ";INT(GRLBRD):PRINT
3020 ERPDNR=SQR(2/GRLBRD)
3030 PRINT "erro padrao normalizado (un)";ERPDNR:PRINT
3040 IF SPEC(0) < = MXSPEC GOTO 3060
3050 MXSPEC=SPEC(0):FREQDM=FREQ(0):ORDMAX=0
3060 PRINT "frequencia dominante (Hz) ";FREQDM/DELTAT
3070 PRINT "ordenada espectral (un^2) ";MXSPEC
3080 PRINT "ocorre na ordenada n. ";ORDMAX:PRINT
```