

RAUL GONZÁLEZ LIMA

SISTEMA DE ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL
BASEADO EM UM MICROCOMPUTADOR IBM PC

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da USP para obtenção
do título de mestre em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Carlos Chien-Ching Tu, Depto. Mecânica

São Paulo, 1990

Dedico este trabalho a

Joana Luiz e a

Walter P. A. Ferreira

RESUMO

Este trabalho descreve um sistema de análise modal experimental, baseado num microcomputador PC compatível, composto de uma placa de aquisição de sinais, filtros "anti-aliasing", amplificadores de sinais, software de processamento de sinais e rotinas de estimação de parâmetros. Poupa-se a compra de um analisador de espectro, componente de elevado custo nos sistemas de análise modal experimental, implementando as rotinas de análise espectral no próprio microcomputador. Traz uma descrição detalhada da interface de aquisição de sinais, dos filtros e das rotinas de processamento de sinais. Apresentam-se resultados do modelo modal de uma viga livre obtido por este equipamento e comparam-se com resultados da literatura.

ABSTRACT

A system for experimental modal analysis based on an IBM PC compatible computer is presented in this work. It includes a pc-board for signal acquisition, anti-aliasing filter, signal amplifiers and the software for signal processing and parameter estimation. In this way, the purchase of a spectrum analyzer, an expensive component in experimental modal analysis systems, is avoided. The routines for spectral estimation are directly implemented on a microcomputer. Detailed descriptions of the signal acquisition interface, the filters and the routines for signal processing are given. Experimental results of the modal parameters of a free-free beam are obtained and compared with those published in the literature.

INDICE

1.	Introdução	4
2.	Revisão bibliográfica	8
3.	Modelos matemáticos	20
4.	Processamento digital de sinais	27
5.	Metodologia de identificação paramétrica no domínio da frequência	38
6.	Descrição do hardware empregado e desenvolvido	43
7.	Equipamento empregado	46
8.	Metodologia de ensaio	47
9.	Resultados obtidos na análise modal de uma viga livre	50
10.	Análise dos resultados	78
11.	Conclusão	79
	Referências bibliográficas	80
	Apêndice A Programas desenvolvidos	

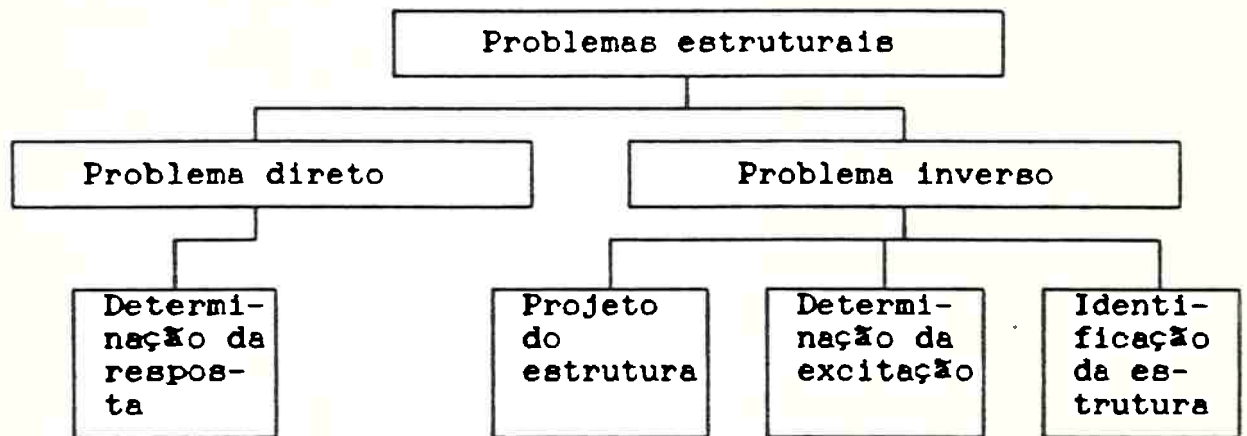
LISTA DE FIGURAS

Fig.	Título	Pg.
2.1	Classificação dos estimadores	10
2.2	Critério de classificação dos métodos	11
4.1	Sistema linear	27
4.2	Sistema linear com ruído	28
4.3	Algoritmo de FFT	33
4.4	"Aliasing"	36
4.5	Gráfico da transformada de Fourier da janela retangular	37
5.1	Circunferência gerada pela mobilidade	39
6.1	Diagrama da interface analógico-digital	44
9.1	Diagrama da estrutura e discretização espacial	50
9.2 a 9.16	FRF e funções de coerência	51 a 65
9.17 a 9.27	Diagramas de Nyquist	66 a 77-a
9.28	FRF da massa de calibração	77-b
10.1 a 10.3	Comparação entre modos experimentais e teóricos	78-c a 78-e

1. INTRODUÇÃO

A Análise Modal Experimental é um caso particular de identificação experimental de sistemas estruturais no qual o modelo matemático admite modos ortogonais de vibração.

Este problema insere-se no problema geral de identificação de sistemas, sendo que, neste caso, os sistemas são estruturas.



Os problemas estruturais podem ser classificados em:

- problema direto;
- problema inverso.

O problema direto consiste em determinar a resposta de uma estrutura dada a excitação e a descrição do sistema.

O problema inverso é sub-dividido em três :

- projeto do sistema, dadas a excitação e a resposta;
- determinação da excitação, conhecido o sistema e a resposta;
- identificação do sistema, conhecidas a excitação e a resposta.

Neste trabalho trataremos da identificação da estrutura

dada a excitação e a resposta da estrutura em vários pontos.

O interesse em determinar modelos modais é melhor entendido através de suas utilizações :

- refinar, ajustar ou validar modelos analíticos [60];
- obter um modelo matemático de subsistemas de difícil síntese analítica [5][60][59];
- avaliar o efeito dinâmico de modificações estruturais [31];
- determinar a resposta de estruturas submetidas a várias condições de excitação;
- determinação da excitação a que uma estrutura está sendo submetida [27];
- na fase de projeto de novas estruturas através de estudos de modelos reduzidos [70]; ou na otimização de produtos industriais [34].

Neste trabalho descreve-se em detalhe um sistema de Análise Modal Experimental baseado em um microcomputador PC compatível, que não requer o emprego de um analisador de espectro, uma vez que a aquisição de dados e a análise espectral são realizadas no próprio microcomputador. Desenvolveu-se, além da instrumentação analógica, uma interface de aquisição de dados de baixo custo, para tornar acessível o sistema às instituições de ensino, aos estudantes e consultores, uma vez que há uma tendência clara do emprego de microcomputadores no ensino de engenharia e também nas indústrias [79][72].

O sistema processa os sinais no domínio da frequência e o método empregado denomina-se "phase-separation"[6]. Implementou-se

o sistema para um tipo particular de excitação. A excitação é impulsiva, por motivos de custo. Não requer excitadores hidráulicos ou eletromagnéticos. Isto limita de certa forma a faixa possível de excitação no domínio da frequência, pois a excitação impulsiva gerada por um martelo instrumentado tem espectro limitado na frequência.

Assim como a resposta impulsiva de um sistema linear de um grau de liberdade caracteriza tal sistema, o modelo modal de uma estrutura de vários graus de liberdade pode ser identificado a partir de um conjunto apropriado de respostas impulsivas. Este é o cerne teórico do procedimento de análise modal aqui empregado. O procedimento de identificação de parâmetros foi implementado no domínio da frequência.

Estamos tratando portanto, de um sistema de identificação paramétrico, modal, de sistemas lineares estruturais. Isto pressupõe a escolha de modelos matemáticos, normalmente discretos, de um certo número de graus de liberdade, e com um modelo linear para o amortecimento. Estes modelos são analisados em detalhe no capítulo 3 deste trabalho.

Durante o processo de análise modal surgem várias questões:

- quantos são os graus de liberdade efetivos do modelo matemático discreto que descreve a estrutura contínua ? [61][74];
- como detectar não linearidades na fase de testes ? [52][61];
- como detectar que na particular discretização da estrutura sob teste algum modo não seja identificável? Qual seria um critério de identificabilidade da estrutura? [61];
- de que forma posso utilizar o modelo modal obtido

experimentalmente para validar e ajustar modelos obtidos via Método dos Elementos Finitos? [43][68][60], (ver revisão feita por Natke [78]);

- quais os tipos de excitação e de técnicas de identificação e de parâmetros mais apropriados para identificar modos de vibração próximos ? [61], [55], [26].

No próximo item faz-se uma revisão histórica do tema indicando também as tendências atuais às respostas das perguntas acima.

No final deste trabalho apresentam-se os resultados do modelo modal identificado pelo sistema aqui desenvolvido, de uma viga livre, comparado-o com resultados obtidos por outros pesquisadores [75].

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise modal experimental tem sido utilizada como instrumento de engenharia por cerca de cinquenta anos. Inicialmente, os objetivos eram identificar apenas as frequências de ressonância. A excitação, muitas vezes, era provocada pelo corte de um fio, preso à estrutura, que fora previamente tensionado. E os modos de vibração eram estimados pelo acúmulo de areia nas linhas nodais.

Dentre os textos básicos de análise modal podemos citar Ewins [52] e Natke [78]. Eles abordam os tipos de excitação, o processamento digital de sinais, os métodos de identificação de sistemas lineares estruturais paramétricos e não-paramétricos, no domínio do tempo e da frequência.

Para uma compreensão das técnicas de processamento de sinais digitais e processos estocásticos devemos mencionar Bendat [53], Stearns [17], Oppenheim [16] e Papuolis [3]. Um avanço na técnica de determinação de funções de resposta em frequência FRF foi proposto por Fabunmi [71]. A função de resposta em frequência pode ser obtida via FFT ou via paramétrica, por exemplo com modelos tipo AR. Braun estuda a precisão dos dois pontos de vista

[67].

Um dos textos básicos de identificação de sistemas é o livro de Eykhoff [10]. Ljung [62], em 1987, apresenta uma teoria unificada de identificação de sistemas lineares no domínio do tempo e no domínio da frequência.

Dada a enorme quantidade de trabalhos sobre o tema, várias revisões foram feitas, Ibañez [24], Füllekrug [66], Natke [61], Stroud [55], Ibrahim [65] e Brown [26]. Há também revisões sobre as aplicações [27].

Não há grandes divergências quanto à classe de modelos matemáticos a serem utilizados [52]. As divergências residem no tipo de informação a ser medida e nos métodos estatísticos de estimação. "Estimação" é entendida no sentido matemático: métodos estatísticos devem ser aplicados, pois as medidas estão distorcidas por erros aleatórios que devem ser reduzidos afim de obtermos resultados com elevado conteúdo de informação.

Natke [61] classifica os estimadores partindo do ponto de vista bayesiano, conforme a fig. 1. As setas indicam o sentido do estimador mais geral para o particular.

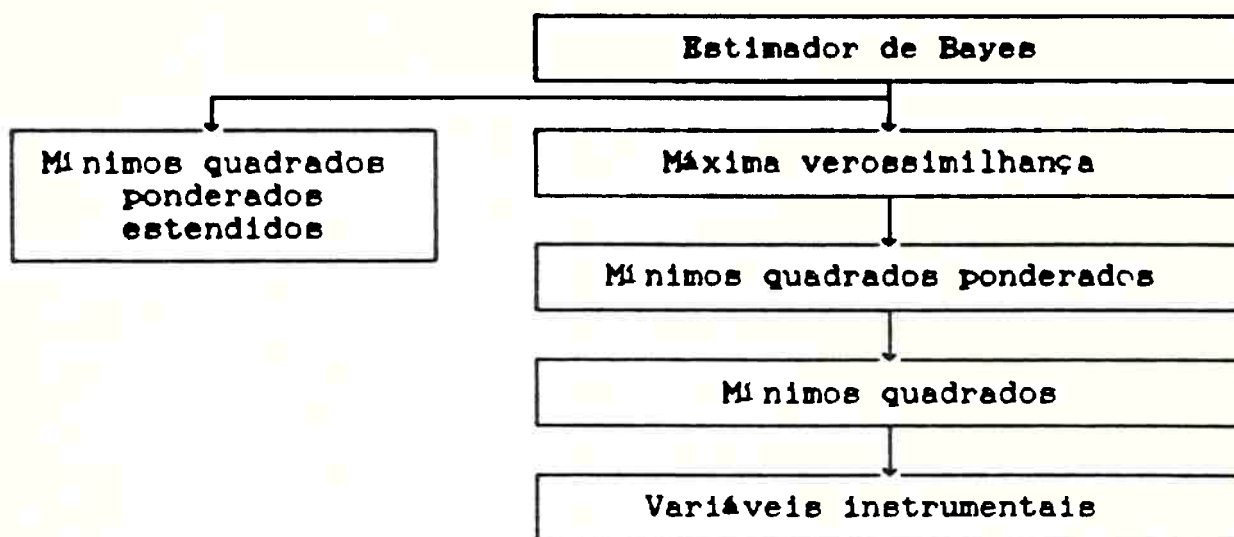


Fig.1 Classificação dos estimadores

Natke [61] comenta ainda o uso do filtro de Kalman no processo de estimação. Exemplo do emprego do estimador de máxima verossimilhança encontra-se no trabalho de Gersch [11].

Outro estimador citado é o da máxima entropia [36], empregado com sucesso na estimação da matriz de amortecimento.

O algoritmo de Prony [3], publicado em 1795, é utilizado com alguns melhoramentos em muitos dos procedimentos atuais [11], [16] e [28].

Em 1988, Mottershead [69] expõe uma teoria unificada para identificação de estruturas através de filtros recursivos no domínio da frequência. Neste mesmo ano, Mohan [69] propõe o uso de polinômios de Legendre ("shifted Legendre polynomials") na identificação de sistemas lineares.

Com o propósito de estabelecer uma linguagem comum vamos utilizar a classificação dos métodos de análise modal de Füllekrug [66], onde o critério de classificação baseia-se no tipo de

informação a ser medida (ver fig.2).



Fig. 2 Critério de classificação dos métodos de análise modal segundo o tipo de informação requerida.

Antes de abordar em detalhes esta classificação, convém ter em mente outros critérios de classificação :

- os parâmetros de interesse serem os do modelo modal ou os parâmetros do modelo matemático (matrizes $[M]$, $[C]$, $[K]$), chamado de método direto [39], [44], [46], [59] e [70];
- os cálculos dos parâmetros serem recursivos ou diretos;
- o processamento da informação medida ser feito simultaneamente (ponto de vista global [58]) ou ser baseado em medidas de excitação em um único ponto e resposta em um único ponto (SISO), (ponto de vista local [52]).

2.1 METODOS COM EXCITAÇÃO SENOIDAL

Os métodos com excitação senoidal requerem que sejam medidos vetores de força e de deslocamento, complexos, em frequências discretas. Foram desenvolvidos a partir do método de "phase-resonance", no desejo de evitar de ter que isolar os modos de vibração através de forças de excitação de difícil realização. O isolamento dos modos de vibração é postergado para a fase de tratamento computacional. E o modelo matemático da estrutura deve apresentar amortecimento histerético ou estrutural [55].

É considerado um marco na história da análise modal o artigo de Kennedy & Pancu [1] onde, em 1947, sugeria excitar estruturas de aplicação aeronáutica através de quatro excitadores para isolar um único modo de vibração.

Em 1950, é proposto um método de análise modal com múltiplos excitadores por Lewis e Wrisley, com um critério para detectar que um modo fora isolado. Propuseram usando dois ou mais excitadores, variando a frequência e a amplitude relativa das forças senoidais, isolar um único modo de vibração. Com a resposta de um único modo é possível a identificar os parâmetros modais. Estima-se o amortecimento, medindo o decaimento da resposta após o corte da excitação. O ajuste da excitação para isolar um modo é realizado por tentativa e erro até que a fase entre a força de excitação e a aceleração atinjam 90° [55].

Em 1958, Asher publicou um critério para determinar a distribuição apropriada de forças para isolar um único modo de vibração [55].

Outro critério foi proposto em 1984, por Hunt et al., para isolar um único modo automaticamente baseado em perturbações de cada um dos parâmetros da excitação para minimizar a relação entre a resposta em quadratura e a resposta coincidente da FRF.

Um exemplo de método de análise modal com excitação senoidal MIMO é detalhado por Lembrechts [64].

2.2 MÉTODOS BASEADOS EM FRFs

No final da década de 60, o desenvolvimento do algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT) e os avanços na tecnologia MOS provocaram uma alteração nas técnicas de análise modal. Torna-se possível a multiplexação de vários canais e o processamento de sinais digitalizados.

As técnicas de FRF requerem que sejam medidas um conjunto de funções de resposta em frequência (FRF). Foram desenvolvidas a partir da técnica com um único ponto de excitação e um ponto de resposta (SISO) do começo de década de 70. Posteriormente, no final da década de 70, surgiram os métodos com um ponto de excitação e vários pontos de resposta (SIMO), o que levou a menores tempos de teste. Finalmente, na década de 80, surgem métodos com múltiplos pontos de excitação e múltiplos pontos de resposta (MIMO), com a vantagem de assegurar melhores níveis de potência de excitação dos diversos modos de vibração.

Stroud [55] comenta a história dos métodos baseados em FRF dizendo que "em 1962, Stahel introduziu o método da separação de fase (phase-separation method), onde as frequências naturais e os coeficientes de amortecimento são identificados a partir das FRFs... Em 1971, Klosterman propôs um método para minicomputadores...O método no domínio da frequência que trata simultaneamente as FRFs é de autoria de Coppolino, em 1981." Comenta ainda a função indicadora de modo (mode indicator function), atribuída a Niedbal, e posteriormente aperfeiçoada por Breitbach [74], que permite discernir modos próximos uns dos outros.

Exemplos destes métodos podem ser encontrados em [8], [12] [14], [15], [18], [19], [23], [25], [26], [29], [35],[42], com estimação de parâmetros local e em [37], [38], [47], [49], com estimação de parâmetros global.

2.3 MÉTODOS NO DOMÍNIO DO TEMPO

Os métodos no domínio do tempo requerem medidas de força de excitação e de grandezas cinemáticas no tempo.

Esta seção trata de quatro métodos no domínio do tempo:

- a) Algoritmo exponencial complexo (Complex Exponential Algorithm);
- b) Método de Ibrahim no domínio do tempo (ITD) [20] e [21];
- c) Análise de Poli-referência (Polyreference Analysis);
- d) ERA (Eigensystem Realization Algorithm).

O algoritmo exponencial complexo utiliza o algoritmo de Prony [7] para estimar os parâmetros observáveis em uma resposta livre no tempo. Determinam-se os autovalores (frequência e amortecimento modal) através das raízes de um polinômio complexo que é igualado à resposta temporal. Com estas grandezas conhecidas procede-se a determinação das amplitudes modais via matriz de Toeplitz e matriz de Van der Monde. Uma descrição detalhada deste método é dada por Brown [26].

Na versão de mínimos quadrados do algoritmo exponencial complexo, o algoritmo de Prony é substituído por um procedimento de mínimos quadrados e a determinação das amplitudes modais também é realizada por mínimos quadrados. A vantagem é poder reduzir o erro gerado pela presença de ruído aleatório.

O maior problema deste método é estimar o número efetivo de modos de vibração [55] e [26].

O método de Ibrahim no domínio do tempo, ITD, foi

apresentado em 1973 e refinado no final da década de 70. A formulação original estabelecia que combinando matrizes da história temporal do vetor de estados e outra da primeira derivada da matriz com a história temporal do vetor de estados, teríamos os parâmetros modais. Esta formulação foi abandonada por uma série de problemas de ordem prática.

A formulação melhorada deste método utiliza matrizes sobre-dimensionadas para levar em conta o desconhecimento do número efetivo de modos e para redução de ruído [55][26].

A análise de poli-referência foi desenvolvida por Vold e Rocklin em 1981. É uma extensão multidimensional do algoritmo exponencial complexo com mínimos quadrados. Analisa respostas livres de vários pontos provocadas por excitação múltipla (MIMO), simultaneamente. Devido ao fato de que as frequências naturais e os coeficientes de amortecimento são grandezas globais é interessante considerar o conjunto total das respostas ao estimá-las. Uma vez estimados os parâmetros globais segue-se a estimação dos modos de vibração complexos por ajuste de curvas, no tempo ou na frequência. Este método é efetivo na determinação de modos próximos ou de elevado grau de amortecimento. Equacionamento detalhado encontra-se em [40] e um aperfeiçoamento é proposto em [58].

O método ERA (Eigensystem Realization Algorithm) descrito por Pappa e Juang em 1984, combina características de análise dinâmica de estruturas e teoria de controle moderno.

"System realization" é o processo de construir sistematicamente o modelo de um sistema, representado no espaço de

estado através dos dados experimentais. A realização assume a forma de três matrizes [A,B,C]. A matriz [A] define a resposta livre do sistema, a matriz [B] define a resposta forçada do sistema e a matriz [C] relaciona as variáveis de estado do sistema com as medidas físicas. Na prática, ERA utiliza a matriz de Hankel, uma matriz de histórias discretas de respostas livres de alguns pontos da estrutura, de mais de um conjunto de condições iniciais.

A menor ordem do sistema é determinada pela característica da matriz de Hankel. Esta matriz reduzida e deslocada no tempo é utilizada para determinar as três matrizes [A,B,C] das quais as propriedades modais podem ser deduzidas.

Natke [61] afirma que o método de Ibrahim no domínio do tempo é um caso particular do método ERA, que ambos tem desvios estatísticos e Juang propõe um procedimento para minimizar esse desvio estatístico. Neste mesmo trabalho Natke faz uma revisão dos métodos de identificação de estruturas não-lineares.

2.4 DESENVOLVIMENTO FUTURO E TRABALHOS RECENTES

No Japão, Kano [51] propôs e implementou [54] um método que estima os parâmetros de um polinômio que descreve a função de transferência, estimando primeiro o denominador e depois o numerador. A vantagem reside no fato de que estimar os parâmetros do denominador é um problema linear.

Ewins tem publicado resultados de análises de uma mesma estrutura realizados por laboratórios diferentes [32], [33] e [63], no âmbito europeu. Esses resultados mostram que é fácil cometer erros grosseiros em análise modal experimental. Segundo Natke [61] a análise modal experimental é um ramo bem desenvolvido da identificação de sistemas lineares. O ajuste de modelos computacionais está ainda no estágio de desenvolvimento, especialmente no que diz respeito a modelos de ordem elevada. A identificação de sistemas não-lineares é um tema pouco desenvolvido.

Natke termina a revisão dizendo "...parece que na identificação de sistemas não-lineares as conhecidas leis da mecânica devem ser utilizadas ao máximo no sentido de estabelecer a estrutura do modelo a priori ."

Foge ao escopo deste trabalho classificar com rigor os métodos de análise modal, parece oportuno entretanto, sugerir como trabalho futuro uma classificação rigorosa destes métodos uma vez que já apareceram algumas teorias unificadas [50], [69] e [62] de alguns subconjuntos das possibilidades teóricas e porque ainda não estão claras as vantagens e desvantagens de cada método.

3. MODELOS MATEMÁTICOS

Os modelos matemáticos empregados em análise modal são, com raras exceções, discretos. Isto é compreensível porque as medidas se dão em pontos discretos da estrutura [61].

Há três modelos lineares para o amortecimento:

a) amortecimento estrutural;

$$[M]\{\ddot{x}\} + [k]\{x\} + j[H]\{x\} = \{f\} \quad (3.1)$$

b) amortecimento proporcional;

$$[M]\{\ddot{x}\} + (\alpha[K] + \beta[M])\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (3.2)$$

c) amortecimento viscoso;

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (3.3)$$

O amortecimento proporcional (3.2), embora seja empregado com frequência em análises teóricas, não pode ser empregado em geral na análise modal experimental. Ele é válido apenas em estruturas com esta particular distribuição de amortecimento [52].

As outras duas fórmulas (3.1) e (3.3) são gerais e utilizadas na prática da análise modal experimental. Representam distribuições diferentes de amortecimento na estrutura.

3.1 RESPOSTA FORÇADA DE ESTRUTURA COM VÁRIOS GRAUS DE LIBERDADE E AMORTECIMENTO VISCOZO

Nesta seção deriva-se, a partir da equação (3.3), a resposta do nó - j - devido a uma excitação no nó - k , porque o método de separação de fase requer um conjunto de Funções de Resposta em Frequência FRF deste tipo.

O equacionamento segue o livro de Meirovich [4], até o teorema da expansão. O restante do equacionamento segue Ewins [25].

Inicialmente utilizaremos (3.3), porém introduzindo o vetor de estado :

$$\{y\} = \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix}$$

$$[C : M]\{\dot{y}\} + [K : 0]\{y\} = \{f\} \quad (3.4)$$

Esta equação contém N equações escalares e 2.N incógnitas escalares. Acrescenta-se, então, a equação identidade :

$$[M : 0]\{\dot{y}\} + [0 : -M]\{y\} = \{0\} \quad (3.5)$$

Obtemos :

$$\begin{bmatrix} C & M \\ M & 0 \end{bmatrix} \{\dot{y}\} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \{y\} = \begin{Bmatrix} f \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

Chamando :

$$[A] = \begin{bmatrix} C & M \\ M & 0 \end{bmatrix} ; \quad [B] = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} ;$$

A equação homogênea torna-se :

$$[A]\{\dot{y}\} + [B]\{y\} = 0 \quad (3.6)$$

Reconhece-se (3.4) como um problema padrão de valores característicos, sendo [A] e [B] reais, simétricas e positivo definidas.

Introduzindo uma solução do tipo $\{y\} = \{Y\}e^{st}$ em (3.6) :

$$[sA + B]\{Y\} = \{0\} \quad (3.7)$$

pré-multiplicando por $-[A]^{-1}$

$$[-sI - \bar{A}^{-1}B]\{Y\} = \{0\} \quad (3.8)$$

esta equação tem solução não trivial se

$$\det | -\bar{A}^{-1} B - sI | = 0 \quad (3.9)$$

Podemos obter então 2N autovalores e 2N autovetores L.I., pois [A] e [B] são reais e simétricas.

De fato, sendo s_r e s_s autovalores e $\{\psi\}_r, \{\psi\}_s$ autovetores, cada par $s_r, \{\psi\}_r$ é solução de (3.6):

$$s_r[A]\{\psi\}_r + [B]\{\psi\}_r = \{0\} \quad (3.10)$$

pré-multiplicando por $\{\psi\}_s^t$

$$s_r\{\psi\}_s^t[A]\{\psi\}_r + \{\psi\}_s^t[B]\{\psi\}_r = 0 \quad (3.11)$$

$$\text{vale também a solução } s_s\{\psi\}_s^t[A] + \{\psi\}_s^t[B] = \{0\}^t \quad (3.12)$$

pois [A] e [B] são simétricas.

pós-mult. (3.12) por $\{\psi\}_r$

$$s_s\{\psi\}_s^t[A]\{\psi\}_r + \{\psi\}_s^t[B]\{\psi\}_r = 0 \quad (3.13)$$

Subtraindo (3.13) de (3.11), teremos :

$$(\epsilon_r - \epsilon_s) \{\psi\}_s^\dagger [A] \{\psi\}_r = 0 \quad (3.14)$$

para $r \neq s$ $\{\psi\}_s^\dagger [A] \{\psi\}_r = 0 \quad (3.15)$

e também $\{\psi\}_s^\dagger [B] \{\psi\}_r = 0 \quad (3.16)$

Definindo $[\Psi]$ como a matriz dos autovetores, cada coluna desta matriz é um dos autovetores, vemos, a partir das últimas duas relações, que $[\Psi]$ diagonaliza $[A]$ e $[B]$ simultaneamente:

$$[\Psi]^\dagger [A] [\Psi] = \text{diag} [a_r] \quad (3.17)$$

$$[\Psi]^\dagger [B] [\Psi] = \text{diag} [b_r] \quad (3.18)$$

Isto quer dizer que cada $\{\psi\}_r$ é um vetor da base do espaço que contém cada estado $\{y\}$, então, $\{y\}$ pode ser escrito como uma combinação linear dos autovetores :

$$\{y\} = \sum_{r=1}^{2N} \gamma_r \{\psi\}_r \quad (3.19)$$

Esta relação é conhecida como o teorema da expansão.

Introduzindo a solução (3.19) na equação (3.7), obteremos :

$$[sA + B] \sum_{r=1}^{2N} \gamma_r \{\psi\}_r = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.20)$$

pré-mult. por $\{\psi\}_r^\dagger$

$$\{\psi\}_r^\dagger [sA + B] \sum_{j=1}^{2N} \gamma_j \{\psi\}_j = \{\psi\}_r^\dagger \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \rightarrow$$

$$\rightarrow (s \cdot a_r + b_r) \gamma_r = \{\psi\}_r^\dagger \{F\} \quad (3.21)$$

ou seja, cada coeficiente γ_r é

$$\gamma_r = \frac{\{\psi\}_r^t \{F\}}{(s \cdot a_r + b_r)} \quad (3.22)$$

a equação (3.19) torna-se então :

$$\{y\} = \sum_{r=1}^{2N} \frac{\{\psi\}_r^t \{F\} \{\psi\}_r}{(s \cdot a_r + b_r)} \quad (3.23)$$

Se a excitação atua apenas no ponto k :

$$\{y\} = \sum_{r=1}^{2N} \frac{r \psi_k F_k \{\psi\}_r}{a_r (s + b_r/a_r)} \quad (3.24)$$

A resposta no nó j devido a uma excitação em k , e considerando $s = j\omega$, será:

$$\alpha = \frac{X_j}{F_k} = \sum_{r=1}^{2n} \frac{r \psi_j \cdot r \psi_k}{a_r (j\omega + b_r/a_r)} \quad (3.25)$$

Normalizando os autovetores $r \psi_j$ através de $r \theta_j = (r \psi_j / a_r)$, chamando $b_r/a_r = \beta_r$ e observando que os autovalores e os autovetores ocorrem em pares conjugados :

$$\alpha_{jk} = \sum_{r=1}^N \frac{r \theta_k r \theta_j}{j\omega - \beta_r} + \frac{r \theta_k^* r \theta_j^*}{j\omega - \beta_r^*} \quad (3.26)$$

É costume expressar cada autovalor por $\beta_r = w_r (-\beta_r + j\sqrt{1 - \beta_r^2})$.

E se chamarmos $r \theta_j = c + jd$ e $r \theta_k = e + jf$,

(3.26) torna-se :

$$\alpha_{jk} = \sum_{r=1}^N \frac{r C_{jk} + j(w/w_r) r D_{jk}}{w_r^2 (1 - w^2/w_r^2 + j(w/w_r) 2\beta_r)} \quad (3.27)$$

onde $r C_{jk} = 2(w_r \beta_r (ce - df) - w_r \sqrt{1 - \beta_r^2} (de + cf))$ (3.28)

$$r_{Djk} = 2w_r(ce-df) \quad (3.29)$$

Esta é a expressão de Função de Resposta em Frequência do nó j quando a excitação é aplicada em k , deduzida para uma excitação harmônica. No próximo capítulo trataremos do procedimento de medida desta função.

A partir de um conjunto apropriado de FRFs é possível determinar todos os autovetores e autovalores do modelo modal.

Antes de mais nada devemos observar que pode-se medir a receptância, a mobilidade ou a inertância, em função dos transdutores que se empregam. E que estas funções estão relacionadas como segue :

$$\text{receptância} \quad \alpha_{jk} = X_j(w)/F_k(w)$$

$$\text{mobilidade} \quad Y_{jk} = \dot{X}_j(w)/F_k(w)$$

$$\text{inertância} \quad A_{jk} = \ddot{X}_j(w)/F_k(w)$$

$$Y_{jk}(w) = jw \cdot \alpha_{jk}(w)$$

$$A_{jk}(w) = jw \cdot Y_{jk}(w)$$

$$A_{jk}(w) = -w^2 \cdot \alpha_{jk}(w)$$

No equipamento descrito por este trabalho utilizamos acelerômetros como transdutores, isto quer dizer que medimos diretamente a inertância. Logo em seguida calculamos a mobilidade. Cada termo da mobilidade traça uma circunferência no diagrama de Nyquist e utilizaremos esta propriedade para estimar os parâmetros modais, W_r , B_r , r_{Cjk} , r_{Djk} .

Chamaremos as mobilidades que possuem mesmo ponto de

excitação e de resposta de mobilidades diretas. De cada mobilidade direta Y_{kk} pode-se estimar $w_r, \beta_r, r\theta_k$ com $r=1, \dots, N$.

De cada mobilidade do tipo Y_{jk} (de transferência $j \neq k$) podemos estimar, com ajuda dos elementos $r\theta_k$ estimados através da mobilidade direta, w_r, β_r , e os elementos $r\theta_j$ com $r=1, \dots, N$ dos autovetores. Isto será visto em detalhes no capítulo 5.

4. PROCESSAMENTO DE SINAIS DIGITAIS

4.1 DETERMINAÇÃO DA FRF

Neste capítulo estamos interessados em como estimar FRFs (funções de resposta em frequência), mais precisamente, estimar a segunda derivada da equação (3.27), deduzida no capítulo anterior, uma vez que optamos por utilizar um acelerômetro como sensor para medir a resposta de uma coordenada de um ponto da estrutura.

Da teoria de sistemas lineares sabemos que a resposta de um sistema linear SISO ("single input - single output") é a convolução da entrada pela função resposta impulsiva :

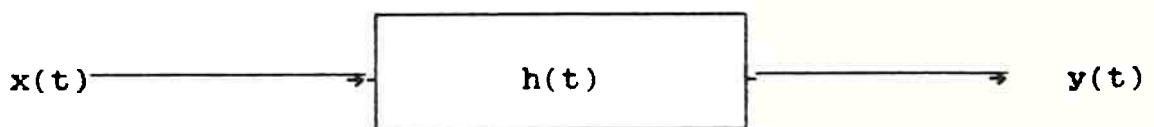


Fig. 4.1 Sistema linear não afetado por ruído

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad (4.1)$$

A transformada de Fourier, $F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j2\pi ft} dt$,

desta última expressão torna-se:

$$Y(w) = H(w).X(w) \quad (4.2)$$

Então, podemos calcular a FRF, $H(w)$, através de (4.2) se os sinais $x(t)$ e $y(t)$ admitirem transformada de Fourier. A transformada de Fourier requer que o sinal satisfaça as condições

de Dirichlet:

- a) o sinal deve conter um número finito de descontinuidades na região $-\infty \leq t \leq \infty$;
- b) o sinal deve ter um número finito de máximos e mínimos na região $-\infty \leq t \leq \infty$;
- c) o sinal deve ser integrável no sentido de

$$\int_{-\infty}^{\infty} |h(t)| dt < \infty$$

Estas condições são satisfeitas, para todos os propósitos práticos, por qualquer sinal fisicamente realizável [23]. Particularmente, quando a excitação é provocada pelo impacto de um martelo estas condições também são satisfeitas.

Entretanto, com o objetivo de minimizar o desvio nas medidas de FRFs causados pela presença de ruído na leitura da excitação e na leitura da resposta podemos utilizar uma abordagem estocástica .

Admite-se a presença de ruído, $m(t)$, na leitura do sinal de excitação, $u(t)$, e de ruído, $n(t)$, na leitura do sinal de resposta, $v(t)$ (ver fig. 4.2).

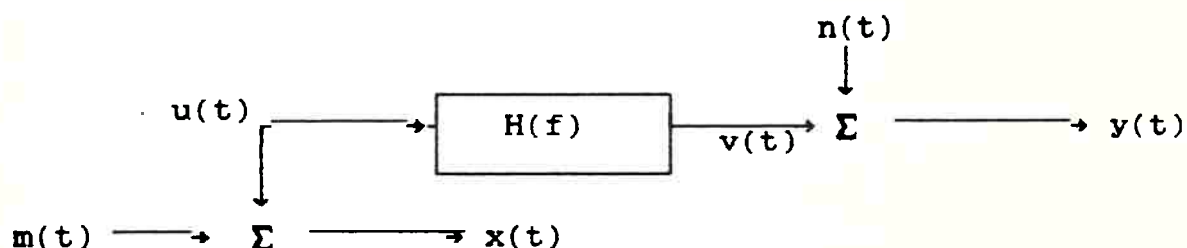


Fig. 4.2 Sistema linear com ruído na leitura da excitação e na leitura da resposta

$$x(t) = u(t) + m(t) \quad (4.3)$$

$$y(t) = v(t) + n(t) \quad (4.4)$$

Vamos considerar dois processos estocásticos $\{x^*(t)\}$ e $\{y^*(t)\}$. Sempre é possível transformá-los em processos de média nula através de (4.5) e (4.6) :

$$x'(t) = x(t) - E [x(t)] \quad (4.5)$$

$$y'(t) = y(t) - E [y(t)] \quad (4.6)$$

Doravante os sinais serão considerados de média nula.

Definem-se as funções de autocorrelação e correlação cruzada, (que satisfazem as condições de Dirichlet) :

a) autocorrelação

$$R_{xx}(t, \tau) = E [x(t-\tau/2) \cdot x(t+\tau/2)] \quad (4.5)$$

b) correlação cruzada

$$R_{xy}(t, \tau) = E [x(t-\tau/2) \cdot y(t+\tau/2)] \quad (4.6)$$

Define-se ainda a densidade espectral cruzada de energia :

$$S_{xy}(f, g) = E [X^*(f-g/2) Y(f+g/2)] \quad (4.7)$$

Os sinais que trataremos não são estacionários, são transientes, assim, $x(t) = 0$ e $y(t) = 0$ para todo $t \geq T$ e $t \leq 0$. Aditem, portanto, transformada de Fourier.

O conjugado complexo da transformada de Fourier de $x(t-\tau/2)$ torna-se :

$$X^*(f-g/2) = \int x(t-\tau/2) e^{j2\pi(f-g/2)(t-\tau/2)} (d\tau/2) \quad (4.8)$$

Também podemos calcular $y(t+\tau/2)$ através da transformada inversa de Fourier de $Y(f+g/2)$:

$$y(t+\tau/2) = \int Y(f+g/2)e^{j2\pi(f+g/2)(t+\tau/2)} (dg/2) \quad (4.9)$$

Observando que $(f+g/2)(t+\tau/2) = (f-g/2)(t-\tau/2) + f\tau + gt$,

o produto de (4.9) por $e^{-j2\pi f\tau}$ torna-se :

$$y(t+\tau/2)e^{-j2\pi f\tau} = \int Y(f+g/2)e^{j2\pi(f-g/2)(t-\tau/2)} e^{j2\pi gt} (dg/2) \quad (4.10)$$

Multiplicando (4.10) por $x(t-\tau/2)$, integrando ambos os lados em $t+\tau/2$ e tomando a expectância:

$$\int E [x(t-\tau/2)y(t+\tau/2)] e^{-2\pi f\tau} (d\tau/2) = \int E \left[\int x(t-\tau/2)e^{j2\pi(f-g/2)(t-\tau/2)} (d\tau/2) Y(f+g/2) \right] e^{j2\pi gt} (dg/2) \quad (4.11)$$

Esta última, pode ser lida com o auxílio de (4.8) e (4.6):

$$\int R_{xy}(\tau, t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \int \mathcal{S}_{xy}(f, g) e^{j2\pi gt} dg \quad (4.12)$$

Ao segundo membro de (4.12) dá-se o nome de "frequency-time function" e denota-se por :

$$\mathcal{W}_{xy}(f, t) = \int \mathcal{S}_{xy}(f, g) e^{j2\pi gt} dg \quad (4.13)$$

De (4.13) :

$$\mathcal{S}_{xy}(f, g) = \int \mathcal{W}_{xy}(f, t) e^{-j2\pi gt} dt \quad (4.14)$$

Quando o sistema linear é invariante no tempo, sua resposta impulsiva tampouco varia no tempo, $h(t, \tau) = h(\tau)$. E a relação entre a correlação cruzada e a autocorrelação adquire a forma :

$$R_{xy}(t, \tau) = \int h(\beta) R_{xx}(t, \tau - \beta) d\beta \quad (4.15)$$

Aplicando a transformada de Fourier em (4.15), lembrando

de (4.12) e (4.13) :

$$\mathcal{V}_{xy}(f,t) = H_j(f)\mathcal{V}_{xx}(f,t) \quad (4.16)$$

Integrando (4.16) no tempo, teremos:

$$\int \mathcal{V}_{xy}(f,t)dt = H_j(f) \int \mathcal{V}_{xx}(f,t)dt \quad (4.17)$$

De (4.14) e (4.17) :

$$\mathcal{S}_{xy}(f,0) = H_j(f) \mathcal{S}_{xx}(f,0) \rightarrow$$

$$H_j(f) = \frac{E [X^*(f)Y(f)]}{E [X^*(f)X(f)]} = \frac{\mathcal{S}_{xy}}{\mathcal{S}_{xx}} \quad (4.18)$$

Este estimador para $H(f)$ é ótimo no sentido de mínimos quadrados quando se admite a existência de ruído na resposta $n(t)$. É conhecido por H_1 . Analogamente a (4.18) podemos escrever :

$$H_2(f) = \frac{\mathcal{S}_{yy}(f)}{\mathcal{S}_{yx}(f)} \quad (4.19)$$

O estimador $H_2(f)$ minimiza $\mathcal{S}_{mm}(f)$ e o estimador $H_1(f)$ minimiza $\mathcal{S}_{nn}(f)$. Porém na presença de ruído na leitura da excitação $n(t)$, $H_1(f)$ subestima $H(f)$. Analogamente, na presença de ruído na leitura da resposta, $n(t)$, $H_2(f)$ superestima $H(f)$.

Fabunmi [70] propõe um estimador que minimiza simultaneamente ambos os ruídos $m(t)$ e $n(t)$, conforme a fig. 4.2. Os outros dois estimadores $H_1(f)$ e $H_2(f)$ são casos particulares de $H_4(f)$. Define o erro quadrático em função de uma função de ponderação $F(f)$:

$$E^2 = F(f) \cdot |E_1|^2 + |E_2|^2 \quad (4.20)$$

$$\text{onde } E_1(f) = \mathcal{S}_{xy}(f) - \mathcal{S}_{xx}(f)H(f) \\ E_2(f) = \mathcal{S}_{yy}(f) - \mathcal{S}_{yx}(f)H(f)$$

Ao impor $\frac{\partial E^2}{\partial H_r} = 0$ e $\frac{\partial E^2}{\partial H_i} = 0$ obtemos :

$$H_r = \frac{\mathcal{G}_{xyr}(f)[F(f)\mathcal{G}_{xx}(f) + \mathcal{G}_{yy}(f)]}{F(f)\mathcal{G}_{xx}^2(f) + \mathcal{G}_{yr}^2(f) + \mathcal{G}_{yi}^2(f)} \quad (4.21)$$

$$H_i = \frac{\mathcal{G}_{xyi}(f)[F(f)\mathcal{G}_{xx}(f) + \mathcal{G}_{yy}(f)]}{F(f)\mathcal{G}_{xx}^2(f) + \mathcal{G}_{yi}^2(f) + \mathcal{G}_{yr}^2(f)} \quad (4.22)$$

onde $\mathcal{G}_{xy}(f) = \mathcal{G}_{xyr}(f) + \mathcal{G}_{xyi}(f)$

Agrupando (4.21) e (4.22) :

$$H_4(f) = \frac{F(f)\mathcal{G}_{xx}(f)\mathcal{G}_{xy}(f) + \mathcal{G}_{xy}(f)\mathcal{G}_{yy}(f)}{F(f)|\mathcal{G}_{xx}(f)|^2 + |\mathcal{G}_{xy}(f)|^2} \quad (4.23)$$

Resta ainda definir a função $F(f)$. A equação (4.23) pode ser reescrita em termos de H_1 e H_2 :

$$H_4 = \frac{H_2[\gamma_{xy}^2 F/|H_1|^2 + 1]}{F/|H_1|^2 + 1} \quad (4.24)$$

onde $\gamma_{xy}^2 = H_1/H_2$ é chamada de função de coerência

Se na ressonância H_1 é suficientemente elevada, então $F/|H_1|^2 \ll 1$ e H_4 aproxima-se de H_2 . Se nas antirressonâncias $\gamma_{xy}^2 F/|H_1|^2 \gg 1$, então H_4 aproxima-se de H_1 . Neste caso teríamos um estimador que otimiza ambas as regiões. Para FRFs de aceleração vemos que o recíproco da parte imaginária de H_2 seria uma $F(f)$ adequada :

$$F(f) = \left[\frac{-(\mathcal{G}_{xy}(f) - \mathcal{G}_{yx}(f))}{2\mathcal{G}_{yy}(f)} \right]^2$$

Estes estimadores requerem o cálculo de transformadas de Fourier. Implementou-se a transformada rápida de Fourier através do algoritmo "decimation in time" [16]. A fig.4.3 mostra um diagrama deste algoritmo. Cada linha vertical representa um vetor que vai sendo atualizado segundo elementos deste mesmo vetor. O

código pode ser visto no apêndice.

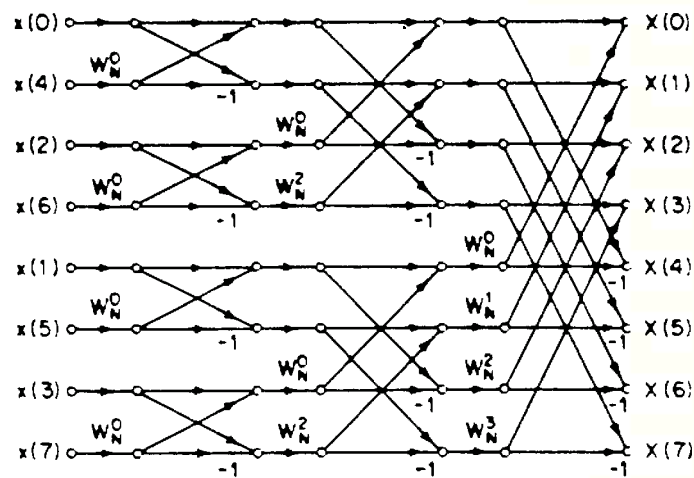


Fig. 4.3 Algoritmo de FFT "decimation in time"

Quando realizamos a FFT de dois sinais reais $x(t)$ e $y(t)$ simultaneamente o resultado da FFT de cada sinal deve ser calculado como mostra Bendat [53] :

$$X(k) = \frac{Z(k) + Z^*(N-k)}{2} \quad (4.24)$$

$$Y(k) = \frac{Z(k) - Z^*(N-k)}{2j} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

onde $Z(k)$ é o resultado da FFT

$X(k)$ é a FFT de $x(t)$

$Y(k)$ é a FFT de $y(t)$

4.2 CONVERSÃO ANALÓGICO-DIGITAL

Os conversores de sinal analógico digital colhem amostras equi-espaciaadas no tempo do sinal contínuo e associam a cada amostra um número binário proporcional ao valor do sinal contínuo.

Espera-se não perder informação durante a operação de amostragem. Espera-se que a transformada de Fourier do sinal contínuo seja igual à transformada de Fourier discreta do sinal discretizado. Para tanto, a taxa de amostragem deve respeitar o critério de Nyquist.

Vamos comparar a transformada de Fourier de um sinal contínuo $X_c(j\Omega)$ com a transformada de Fourier discreta do sinal discretizado $X(e^{j\omega})$ [16].

Sendo T o período de amostragem, $x(n) = x_c(nT)$

onde $x(n)$ é uma particular leitura do sinal discretizado

$x_c(nT)$ é um particular valor do sinal contínuo

O sinal discretizado pode ser calculado através da inversa da DFT,

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (4.25)$$

ou pela inversa da integral de Fourier,

$$x(n) = x_c(nT) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_c(j\Omega) e^{j\Omega n T} d\Omega \quad (4.26)$$

A integral (4.26) pode ser expressa como a soma de integrais de comprimento $2\pi/T$,

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \int_{(2r-1)\pi/T}^{(2r+1)\pi/T} X_c(j\Omega) e^{j\Omega n T} d\Omega \quad (4.27)$$

Cada termo desta integral pode ser calculado sobre a faixa de $-\pi/T$ a $+\pi/T$ através de uma substituição de variáveis,

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \int_{-\pi/T}^{\pi/T} X_c(j\Omega + j\frac{2\pi r}{T}) e^{j\Omega n T} e^{j2\pi r n} d\Omega \quad (4.28)$$

Trocando a ordem da somatória e da integral e observando que $e^{j2\pi r n} = 1$, para todos os valores inteiros de r e n ,

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/T}^{\pi/T} \left[\sum_{r=-\infty}^{\infty} X_c(j\Omega + j\frac{2\pi r}{T}) \right] e^{j\Omega n T} d\Omega \quad (4.29)$$

Finalmente, substituindo $\Omega = w/T$,

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[\sum_{r=-\infty}^{\infty} X_c\left(\frac{jw}{T} + j\frac{2\pi r}{T}\right) \right] e^{jw n} dw \quad (4.30)$$

Comparando (4.28) e (4.30),

$$X(e^{jw}) = \frac{1}{T} \sum_{r=-\infty}^{\infty} X_c\left(\frac{jw}{T} + j\frac{2\pi r}{T}\right) \quad (4.31)$$

Para interpretar (4.31), observemos a figura 4.1. Na fig. 4.1 vemos que $X(e^{jw})$ reproduz $X(j\Omega)$ em cada intervalo de comprimento 2π se a taxa de amostragem $1/T$ obedecer a seguinte relação, conhecida como taxa de Nyquist,

$$\Omega_0/2 > \pi/T \quad (4.32)$$

onde Ω_0 é a maior frequência presente no sinal no sinal analógico.

Caso não se respeitasse esta relação, ocorreria uma superposição das altas frequências de $X_c(j\Omega)$ com as baixas

frequências, como se observa na fig. 4.4.c. Este fenômeno é chamado de "aliasing". Para evitá-lo utilizam-se filtros "anti-aliasing".

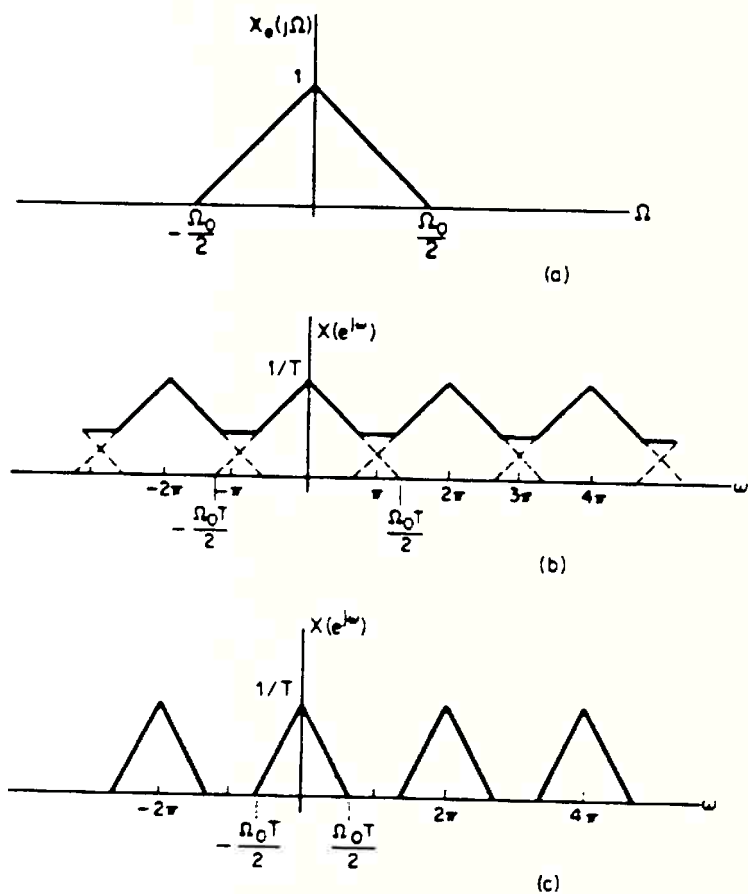


Fig. 4.4 (a) transformada de Fourier do sinal contínuo
 (b) DFT do sinal discretizado
 (c) DFT do sinal discretizado, respeitando a taxa de Nyquist

4.3 "LEAKAGE"

A transformada de Fourier de um sinal $x(t)$ limitado no tempo pode ser vista como a transformada de um sinal ilimitado no tempo $v(t)$ multiplicado por uma janela retangular $u(t)$,

$$x(t) = v(t) \cdot u(t) \quad (4.33)$$

Disto decorre que a transformada de Fourier de $x(t)$ é a convolução das transformadas de $v(t)$ e $u(t)$,

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} U(\alpha) V(f-\alpha) d\alpha \quad (4.34)$$

sendo

$$U(f) = T \left(\frac{\text{sen } \pi f T}{\pi f T} \right) e^{-j\pi f T}$$

cujo gráfico é mostrado na fig. 4.5

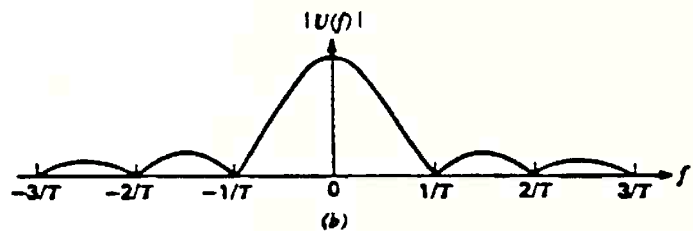


Fig. 4.5 Gráfico da transformada de Fourier da janela retangular

A convolução de $V(f)$ com $U(f)$ irá drenar potência dos picos de $V(f)$. Este fenômeno é chamado de "leakage". Para minimizar a distorção causada pelo "leakage" utilizam-se janelas como a de Hann :

$$u_h = \begin{cases} 1 - \cos^2 \left(\pi t / T \right) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{n.c.} \end{cases} \quad (4.35)$$

Esta janela irá introduzir uma redução nas magnitudes de $V(f)$ da ordem de $\sqrt{3/8}$ [53].

5. METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO PARAMÉTRICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Chamaremos as mobilidades Y_{kk} que possuem mesma coordenada de excitação que de resposta de mobilidade direta.

A partir das mobilidades diretas Y_{kk} é possível através de algum processo de ajuste curvas estimar w_r , β_r , $r\theta_k$ para $r = 1, \dots, N$. Sendo N o número efetivo de graus de liberdade na faixa de frequência de medida. Conhecidos w_r , β_r , rC_{jk} , rD_{jk} podemos calcular $r\theta_k$ a partir de (3.28) e (3.29) :

$$\text{sendo } r\theta_k = c + jd$$

$$c^2 - d^2 = rD_{kk}/2W_r \quad (5.1)$$

$$2cd = \frac{\beta_r \cdot rD_{kk} - rC_{kk}}{2W_r \sqrt{1 - \beta_r^2}} \quad (5.2)$$

A partir das mobilidades de transferência Y_{jk} ($j \neq k$), podemos, com o auxílio dos elementos k do autovetor r , $r\theta_k$, estimados por (5.1) e (5.2), estimar o restante dos elementos dos autovetores $r\theta_j$, se houverem sido medidas todas as mobilidades de transferência Y_{jk} para $j = 1, \dots, N$, $j \neq k$, através de (3.28) e (3.29) :

$$\text{chamando } w = rD_{jk}/2W_r \quad ; \quad q = \frac{\beta_r \cdot rD_{kk} - rC_{kk}}{2W_r \sqrt{1 - \beta_r^2}}$$

$$r\theta_j = e + jf$$

$$f = \frac{qc - wd}{c^2 + d^2} \quad e = \frac{d(qc - wd)}{c(d^2 + c^2)} + \frac{w}{c} \quad (5.3)$$

No próximo item vamos tratar de como estimar w_r , β_r , rC_{jk} e rD_{jk} pelo método do ajuste de círculo.

5.1 ALGORITMO DE AJUSTE DE CIRCULO

Numa primeira aproximação admitiremos que próximo a frequência de ressonância ω_r vale [52] e [26] :

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{rC_{jk} + j(\omega/\omega_r)rD_{jk}}{\omega_r^2(1-(\omega/\omega_r)^2 + 2j(\omega/\omega_r)\beta_r)} \cong \frac{rC_{jk} + j.rD_{jk}}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\omega_r\beta_r\omega} + R' + jI' \quad (5.4)$$

Isto é, na região da ressonância de um modo os outros modos contribuem apenas como um número complexo ($R + jI$).

A equação (5.4) multiplicada por $j\omega$ torna-se a expressão de mobilidade :

$$Y(\omega)_{jk} \cong \frac{j\omega(rC_{jk} + jrD_{jk})}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\omega_r\beta_r\omega} + R + jI \quad (5.5)$$

Demonstra-se que (5.5) traça uma circunferência no diagrama de Nyquist (ver fig. 5.1). O efeito de $R + jI$ é de transladar a circunferência e o efeito de $rC + jrD$ é de provocar uma rotação além de uma ampliação do raio. Analisemos então apenas o termo :

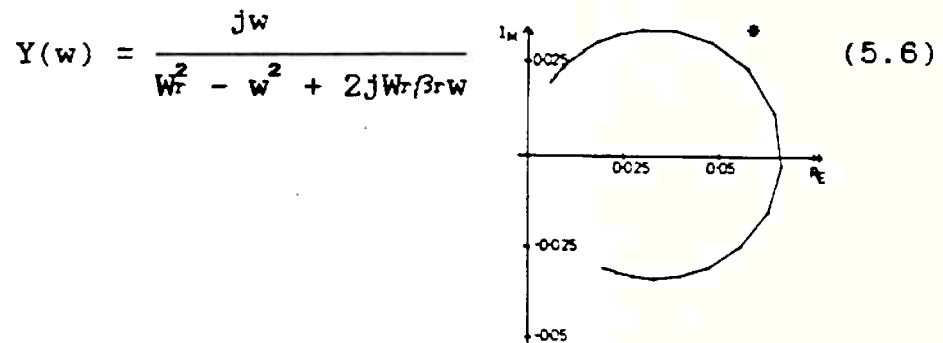


Fig. 5.1 Circunferência gerada pela mobilidade $Y(\omega)$

$$\operatorname{Re}[Y(w)] = \frac{2W_r\beta_r w^2}{(W_r^2 - w^2)^2 + 4W_r^2\beta_r^2 w^2} \quad (5.7)$$

$$\operatorname{Im}[Y(w)] = \frac{(W_r^2 - w^2)w}{(W_r^2 - w^2)^2 + 4W_r^2\beta_r^2 w^2} \quad (5.8)$$

$$(\operatorname{Re}[Y(w)] - 1/4W_r\beta_r)^2 + \operatorname{Im}[Y(w)]^2 = (1/4W_r\beta_r)^2 \quad (5.9)$$

As coordenadas do centro desta circunferência, levando em conta $R + jI$ e $rC + jrD$, serão:

$$\left(R + \frac{rC}{4W_r\beta_r}, I + \frac{rD}{4W_r\beta_r} \right) \quad (5.10)$$

O diâmetro do círculo é dado por :

$$d = \frac{\sqrt{rC^2 + rD^2}}{2W_r\beta_r} \quad (5.11)$$

A partir da FRF medida podemos ajustar uma circunferência de menor erro quadrático.

Uma circunferência na sua forma geral é,

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (5.12)$$

Tomando como somatória do erro quadrático,

$$\sum_{k=1}^m E^2 = \sum_{k=1}^m (x_k^2 + y_k^2 + ax_k + by_k + c)^2 \quad (5.13)$$

e derivando em relação a cada uma das incógnitas,

$$\frac{\partial \sum E^2}{\partial a} = 2\sum(x^2 + y^2 + ax + by + c)x = 0 \quad (5.14)$$

$$\frac{\partial \sum E^2}{\partial b} = 2\sum(x^2 + y^2 + ax + by + c)y = 0$$

$$\frac{\partial \Sigma R^2}{\partial c} = 2\Sigma(x^2 + y^2 + ax + by + c) = 0$$

Rearranjando na forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \Sigma x^2 & \Sigma xy & \Sigma x \\ \Sigma xy & \Sigma y^2 & \Sigma y \\ \Sigma x & \Sigma y & n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Sigma(x^2 + xy^2) \\ -\Sigma(xy^2 + y^3) \\ -\Sigma(x^2 + y^2) \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Desta forma obtemos as coordenadas do centro da circunferência e seu diâmetro.

A frequência natural não amortecida pode ser estimada através da taxa de variação de w^2 em relação ao ângulo θ . A frequência natural é próxima daquela em que $\partial w^2 / \partial \theta$ atinge seu mínimo. De fato :

$$\operatorname{tg}(\theta/2) = \frac{\operatorname{Im}[Y]}{\operatorname{Re}[Y]} = \frac{(1 - (w/w_r)^2)}{2\beta_r w/w_r} \quad (5.16)$$

Para $w \cong w_r \rightarrow w/w_r \cong 1$, então :

$$\operatorname{tg}(\theta/2) \cong \frac{w_r^2 - w^2}{2\beta_r w_r^2} \rightarrow \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{dw^2}{d\theta} &\cong \frac{-2\beta_r w_r^2}{\cos^2 \theta} = -2\beta_r w_r^2 [1 + \operatorname{tg}^2(\theta/2)] = \\ &= -2\beta_r w_r^2 \left[1 + \frac{(w_r^2 - w^2)^2}{4\beta_r^2 w_r^4} \right] \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\frac{d^2(w^2)}{d\theta^2} = \frac{2w(w_r^2 - w^2)}{w_r} = 0 \rightarrow w_r = w$$

e $dw^2/d\theta < 0$

Para estimar o fator de amortecimento β_r utilizamos a equação (5.16) :

$$\beta_r = \frac{w_a^2 - w_b^2}{2Wr(w_b \operatorname{tg}(\theta_a/2) - w_a \operatorname{tg}(\theta_b/2))} \quad (5.19)$$

onde θ_a , θ_b , w_a , w_b são dados experimentais .

É necessário calcular a média de várias estimativas de β_r .

6. DESCRIÇÃO DO HARDWARE DESENVOLVIDO

Desenvolveu-se uma interface de aquisição de sinais de baixo custo. Seguiram-se as recomendações do livro de Eggebrecht [48] e catálogo técnico do circuito integrado AD573 da Analog Devices.

A interface possui dois canais, A e B, taxa máxima de aquisição de sinais de 31 kHz, para os dois canais simultaneamente. A taxa mínima de aquisição é da ordem de 250 Hz.

Os sinais devem estar modulados em voltagem numa faixa de -5 a +5 V.

Obteve-se uma interface de aquisição de baixo custo utilizando-se o sistema de endereçamento do próprio microcomputador, o controlador de DMA ("direct memory access") 8237A-5, e também o sinal de "clock" para marcar os intervalos de aquisição, são obtidos no contador 8253 do próprio microcomputador.

Conforme a fig. 6.1, a interface consta de dois conversores analógico-digital AD573, associados em paralelo, e precedidos por dois "sample & hold AD582". Quando ambos os conversores acabaram o processo de conversão um contador, 74HC393, e um seletor de canais, 74LS138, solicitam, através do terminal DRQ1, quatro ciclos de DMA.

Para cada ciclo de DMA, o seletor de canais, 74LS138, através dos terminais 19 e 20 dos conversores analógico digital (HBE LBE) conecta terminais diferentes à via de dados ("data bus") No primeiro ciclo de DMA ("direct memory access") são transmitidos os oito bits mais significativos do canal A; no

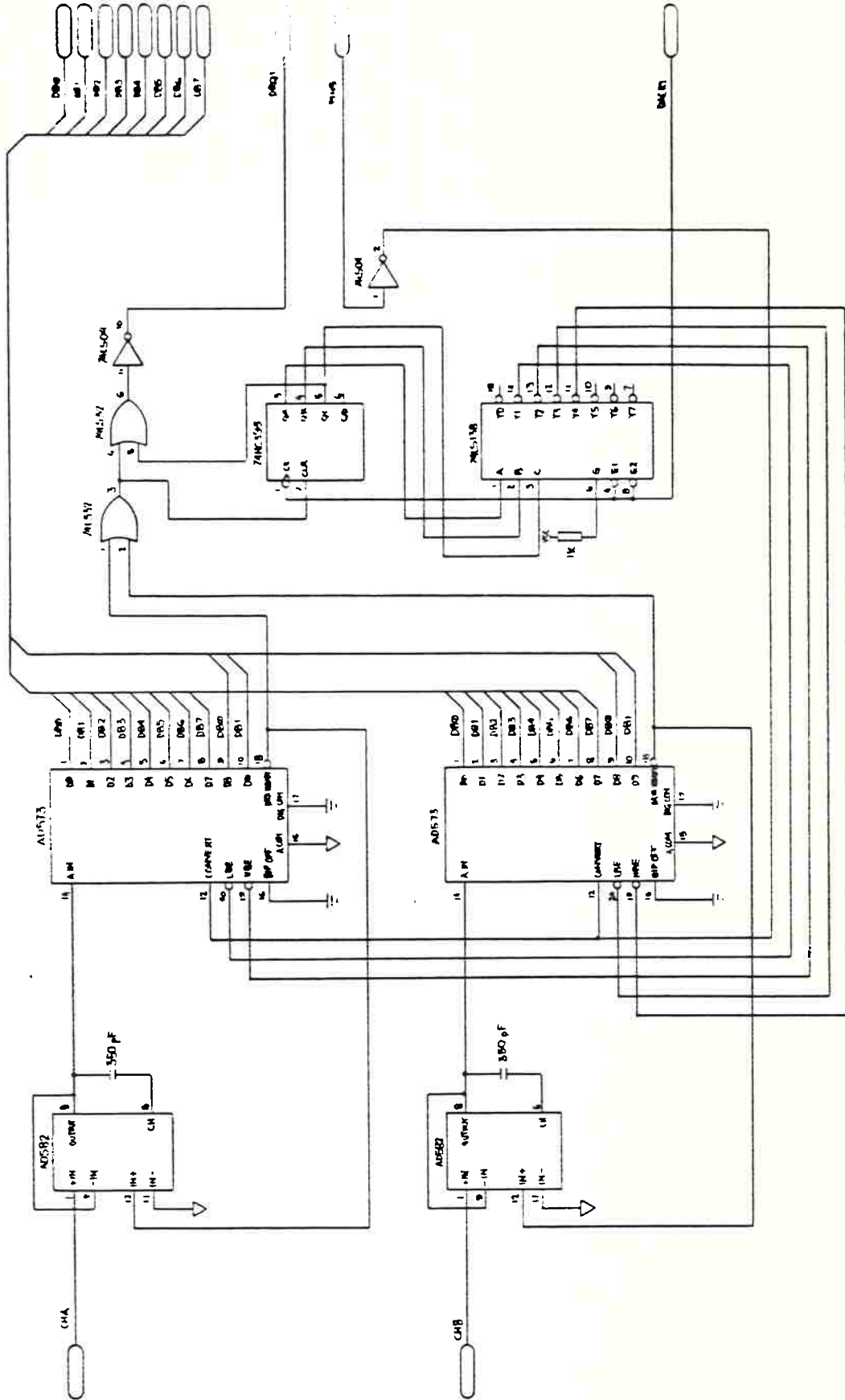


Fig. 6.1 Diagrama de sinais da interface analógico-digital

segundo ciclo de DMA, são transmitidos os dois bits restantes; no terceiro ciclo de DMA, são transmitidos os oito bits mais significativos do canal B ; e finalmente no quarto ciclo de DMA , são transmitidos os dois bits menos significativos do canal B.

Forma-se assim uma sequência de dados na memória do microcomputador. Esta memória tem tamanho limitado e é preenchida ciclicamente. Após o último ponto a ser preenchido retorna-se ao inicial. Com isto é possível obter registros de tempos anteriores a excitação impulsiva.

Surge a necessidade de evitar que sejam gravados sinais posteriores sobre o sinal de interesse. Para tanto após ser detectado início de excitação impulsiva gravam-se um número predefinido de pontos e interrompe-se a gravação. Na rotina de aquisição de sinais há um "looping" que constantemente verifica o nível do sinal de força e se este ultrapassar o nível de disparo, inicia-se a contagem regressiva para interromper a gravação.

7. EQUIPAMENTO EMPREGADO

O sistema de análise modal experimental empregado neste trabalho é composto de :

- 1) 1 microcomputador CCE, IBM PC compatível, com "clock" de 4,77 MHz e dois "drivers" de disco flexível;
- 2) 1 monitor de vídeo, CGA;
- 3) 2 amplificadores de sinais , Robotron ;
- 4) 2 filtros passa-baixa , Butterworth de quarta ordem ;
- 5) 1 interface analógico-digital , de dois canais, 31kHz de taxa máxima de amostragem (descrição no capítulo anterior);
- 6) 1 acelerômetro piezoelétrico, frequência natural de 21kHz;
- 7) 1 transdutor de cargas impulsivas piezoelétrico, Kiestler, frequência natural 45kHz;
- 8) 1 massa de calibração do sistema, $m = 0,4059$ kg;
- 9) 1 estrutura ensaiada, 330×60×10 mm, aço 1020;
- 10) 1 martelo, cabo de alumínio;

8 METODOLOGIA DE ENSAIO

8.1 AJUSTE DO EQUIPAMENTO

Devem-ser ajustados os filtros de forma a não ocorrer "aliasing". No caso de filtros com aproximação de Butterworth, de n-ésima ordem, a atenuação em função da frequência segue :

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^{2n}}} \quad (8.1)$$

Utilizei um filtro de quarta ordem, com frequência de corte ajustada em 2,5 kHz e taxa de amostragem de 10.000 amostragens por segundo.

Os amplificadores devem ser ajustados de tal forma que a relação sinal/ruído seja máxima porém não ocorram saturações frequentes dos filtros, amplificadores ou da interface de aquisição de sinais.

8.2 PREPARAÇÃO DA ESTRUTURA

A estrutura, um prisma retangular de 330x60x10 mm, foi suspensa por tiras de borracha para simular uma viga livre.

Um acelerômetro foi parafusado no ponto 1 da estrutura conforme fig. 9.1. A massa do acelerômetro deve provocar alterações nas frequências naturais.

8.3 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

Segundo a norma ANSI 52-32-1982, a calibração operacional deve ser feita medindo-se a FRF de um bloco de massa conhecida suspenso e livre. Todos os componentes do sistema devem estar conectados da mesma forma que estarão durante a série de testes.

O fator de calibração global do sistema é :

$$FRF = \frac{V_a(\omega)}{V_f(\omega)} = \frac{A(\omega)S_a}{F(\omega)S_f} = \frac{S_a}{m S_f} \quad (8.2)$$

$$\frac{S_f}{S_a} = \frac{1}{m FRF} \quad (8.3)$$

8.4 COLETA DE DADOS

O número de leituras temporais do sinal de força e de aceleração pode ser determinado com um pouco de experiência observando a melhoria da função de coerência.

Os dados apresentados neste trabalho são o resultado de médias de 3 a 5 realizações.

8.5 PROCESSAMENTO DE SINAIS

Utilizo no sinal de força uma janela chamada de "janela de força", que é a aplicação de 50 vezes da segunda metade da janela de Hann [23] (ver fórmula no código do programa).

Sobre o sinal de aceleração utilizo uma janela exponencial que adiciona um fator τ ao fator de amortecimento. Esta janela é

definida por:

$$W(t) = e^{-t/\tau} \quad (8.4)$$

onde T é o tempo de amostragem

Nestas medidas foi empregado $\tau = 10$.

9. RESULTADOS

As figuras de 9.2 a 9.12 mostram as inertâncias e as respectivas funções de coerência medidas nos pontos 1 a 11 da estrutura conforme a fig. 9.1. Foram calculadas através do estimador H_4 .

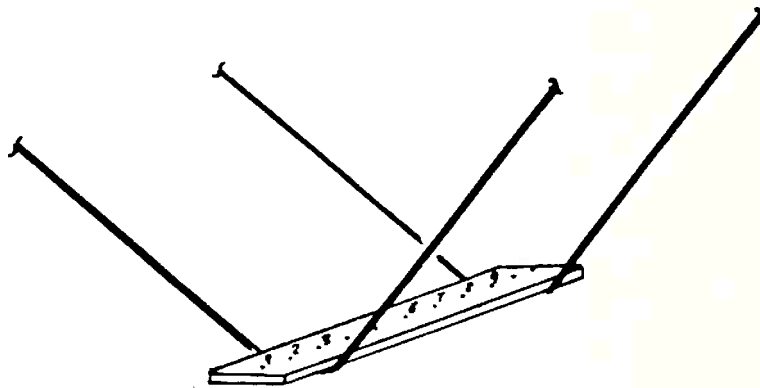


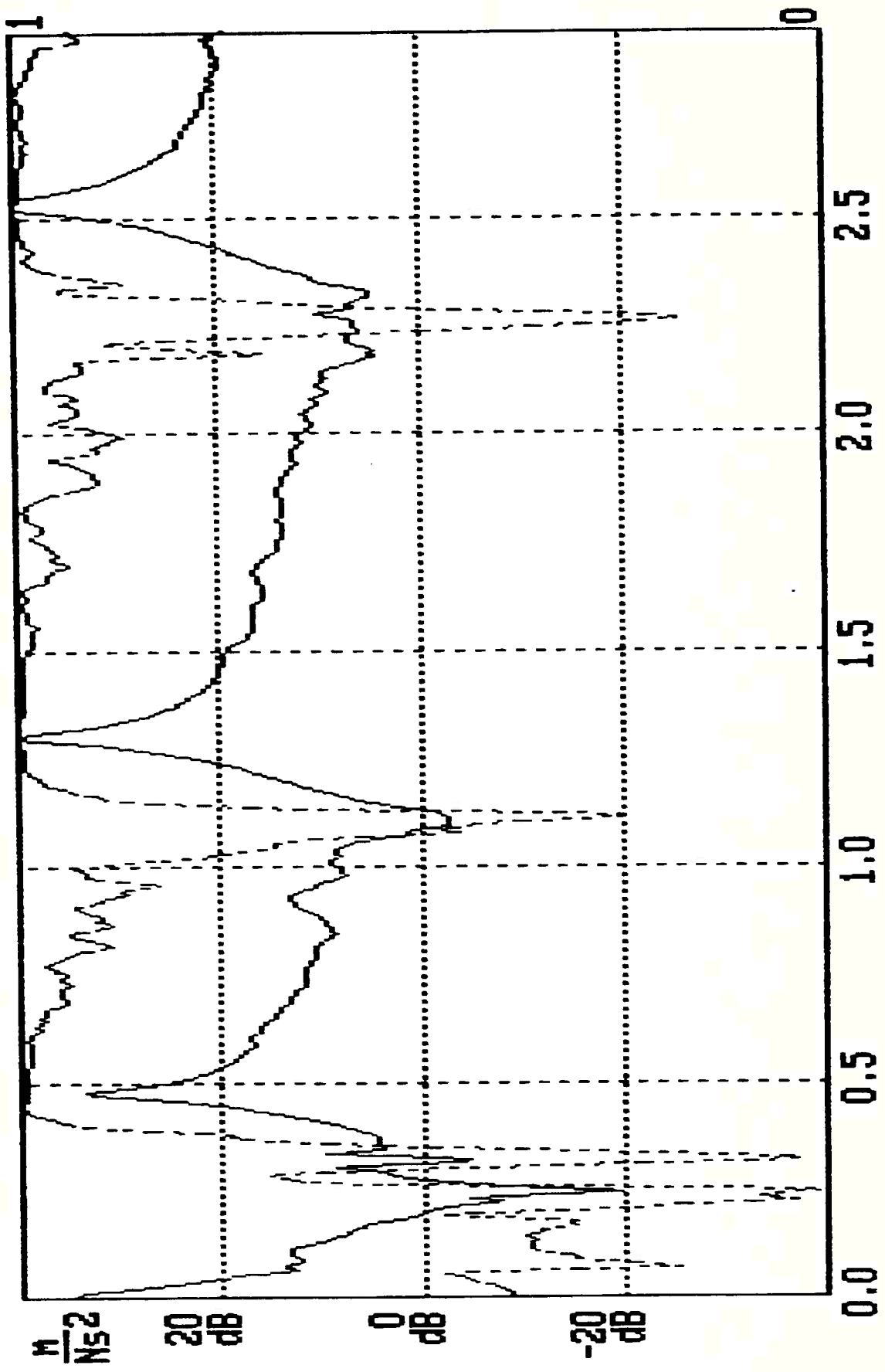
Fig. 9.1 Diagrama da estrutura e discretização espacial

As figuras 9.13 e 9.14 referem-se ao ponto 1 da estrutura e as figuras 9.15 e 9.16 referem-se ao ponto 6 da estrutura. Foram processadas pelos estimadores H_1 e H_2 respectivamente.

Nas figuras de 9.17 a 9.27 estão os diagramas de Nyquist dos dados experimentais das FRFs dos pontos 1 a 11 da estrutura.

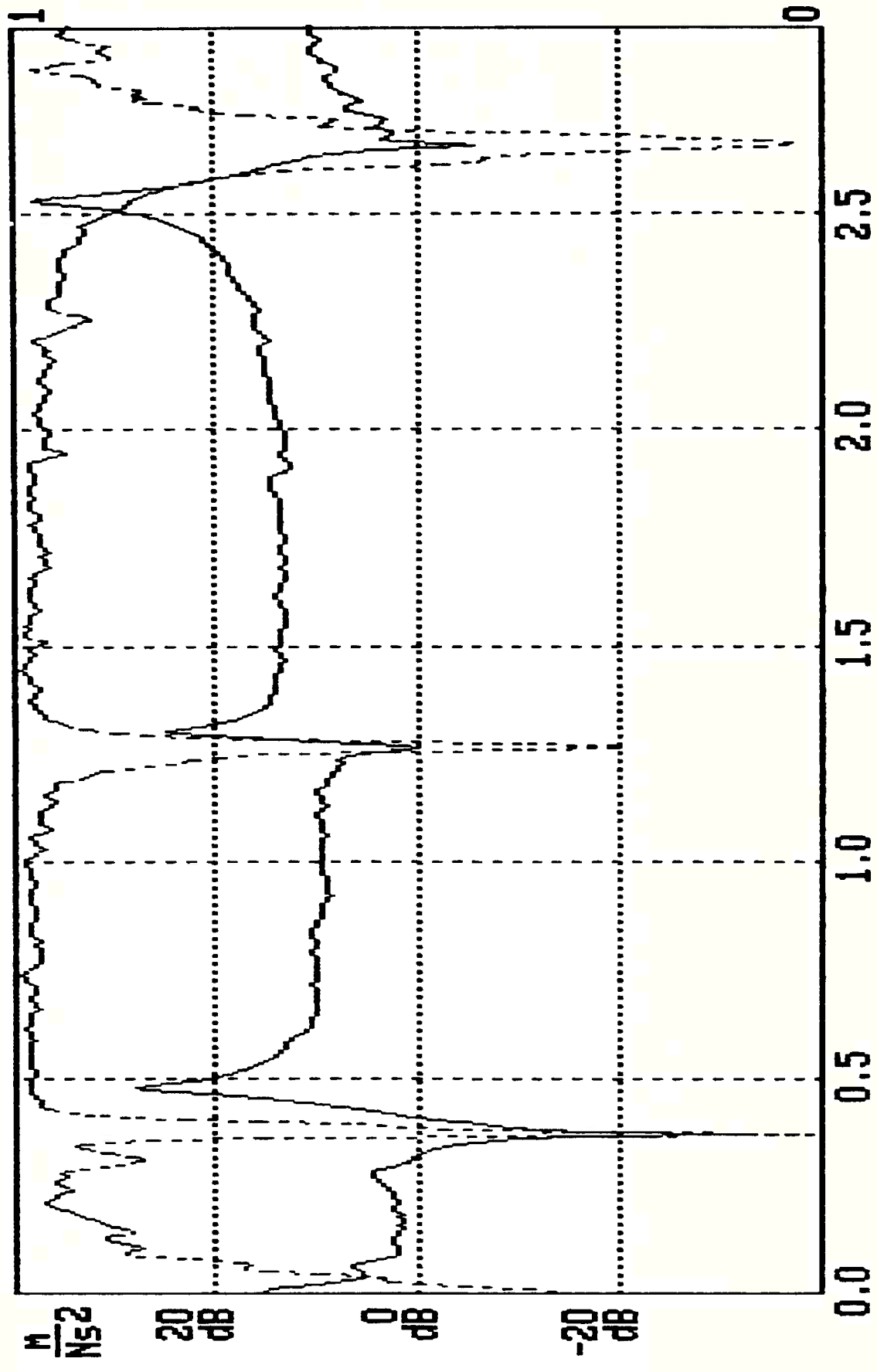
A tabela I mostra os valores estimados de \hat{f}_r , $\hat{\beta}_r$, e dos $|\hat{\theta}_{jk}|$ com $r = 1, 2, 3$ e $j = 1, \dots, 11$; $k = 1, \dots, 11$. Ao lado de valores tomados da ref. [75].

A fig. 9.28 mostra a FRF da massa de calibração. Espera-se uma linha horizontal, comportamento de massa.



FREQUÊNCIA (kHz)

FIG. 9.02 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 01



FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 02

FIG. 9.03 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 02

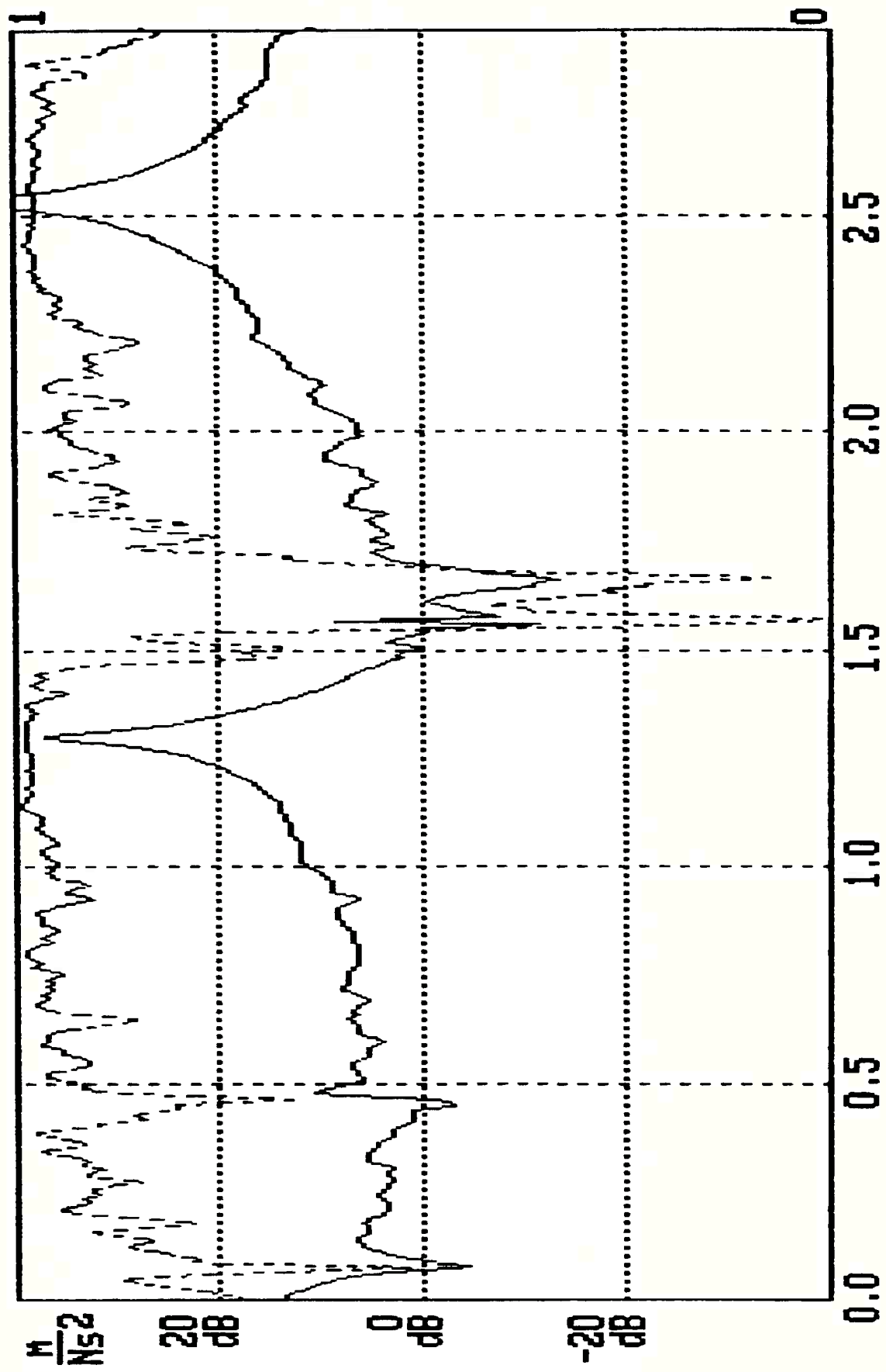
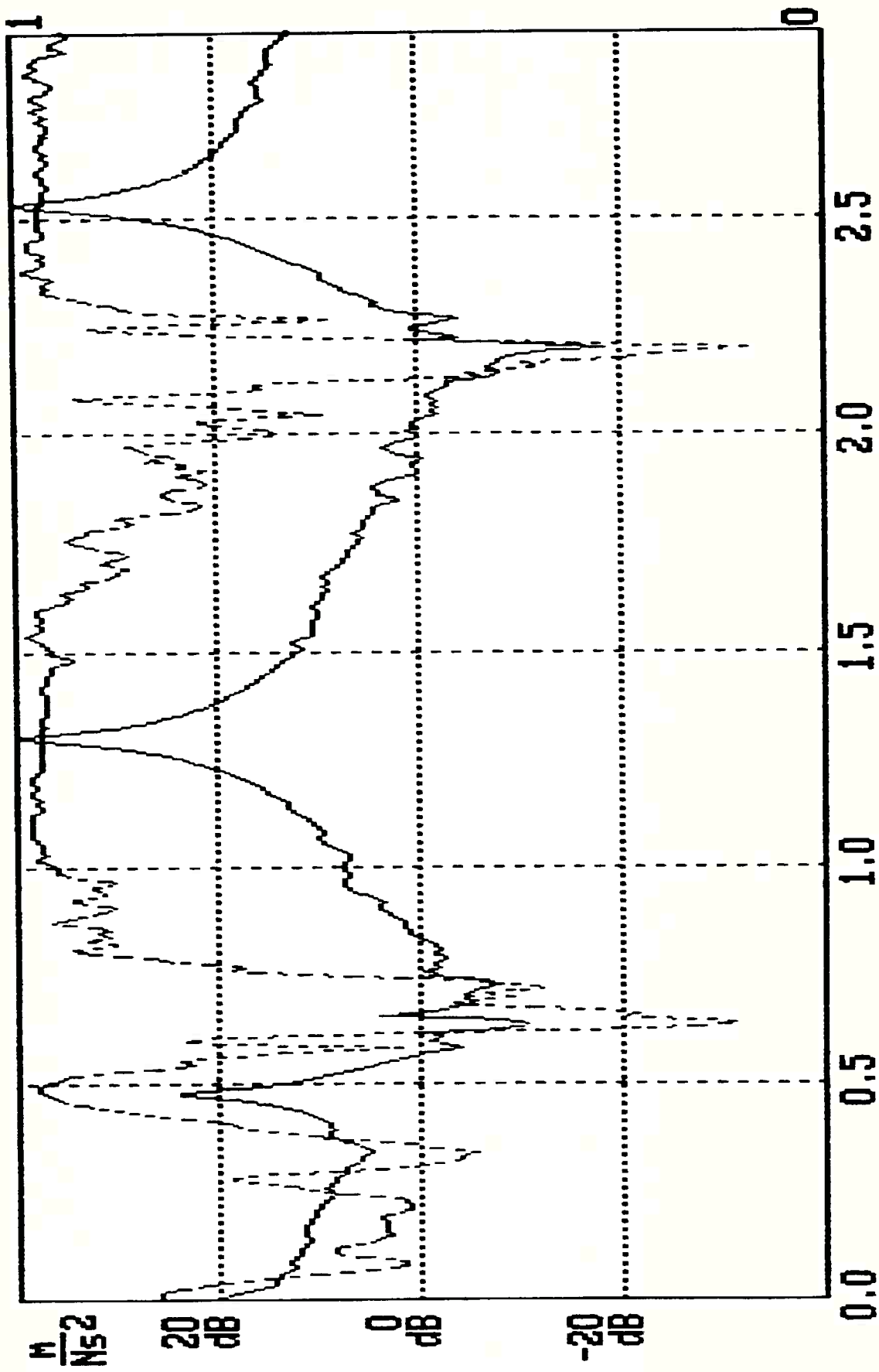


FIG. 9.04 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 03



FRF E FUNÇÃO DE COERÊNCIA - PONTO 04

FIG. 9.05

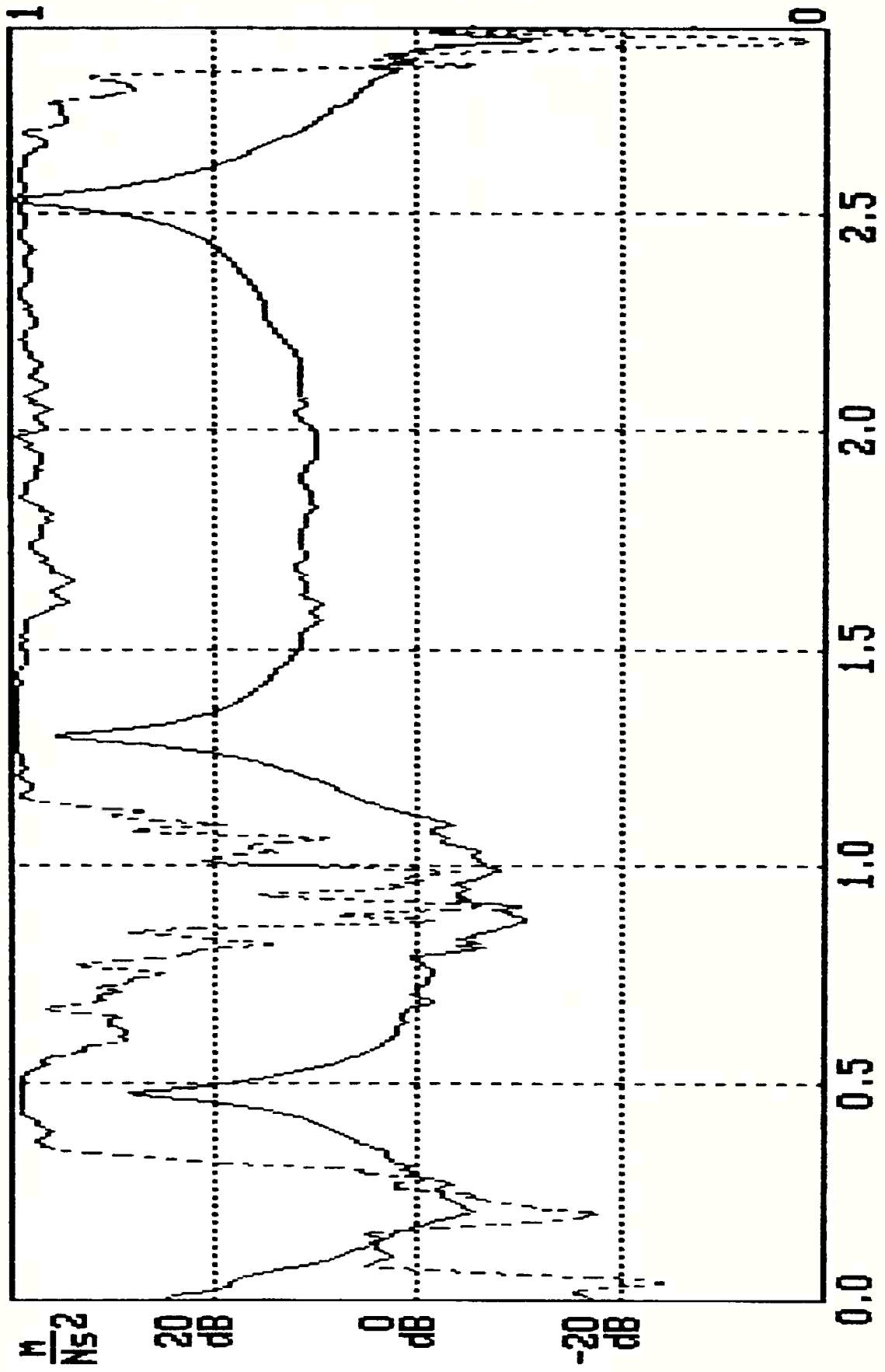


FIG. 9.06 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 05

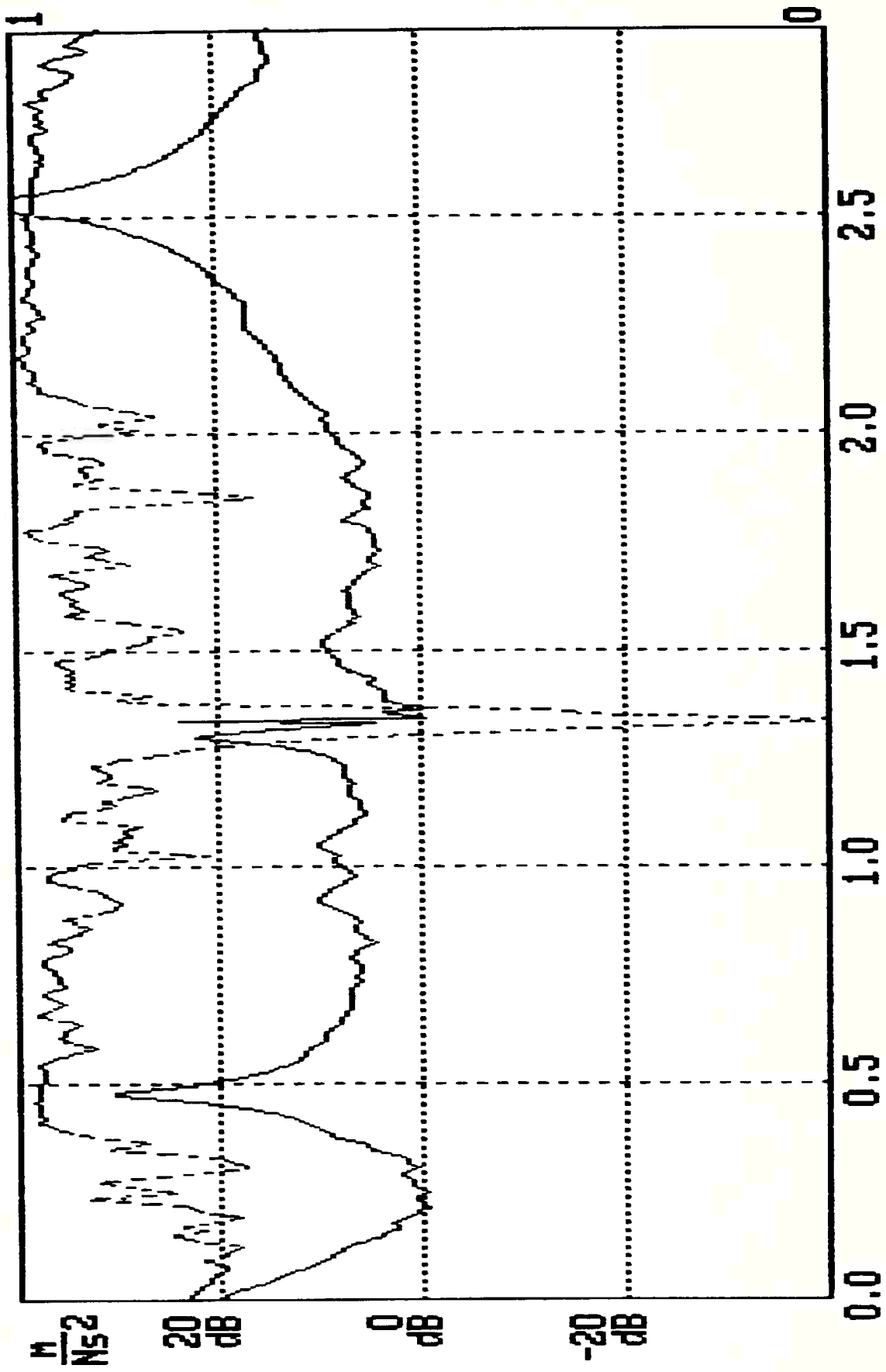


FIG. 9.07 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 06

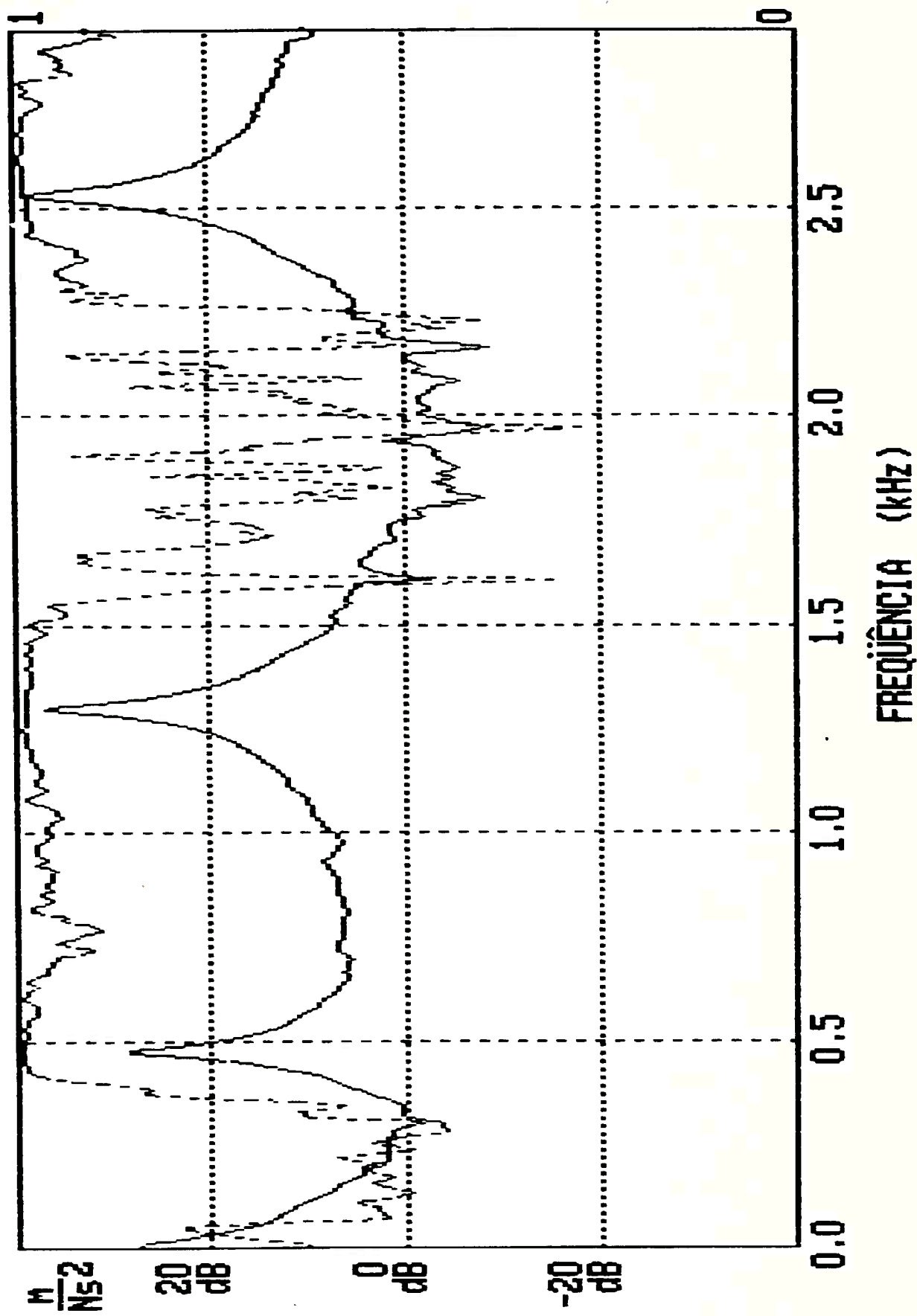


FIG. 9.08 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 07

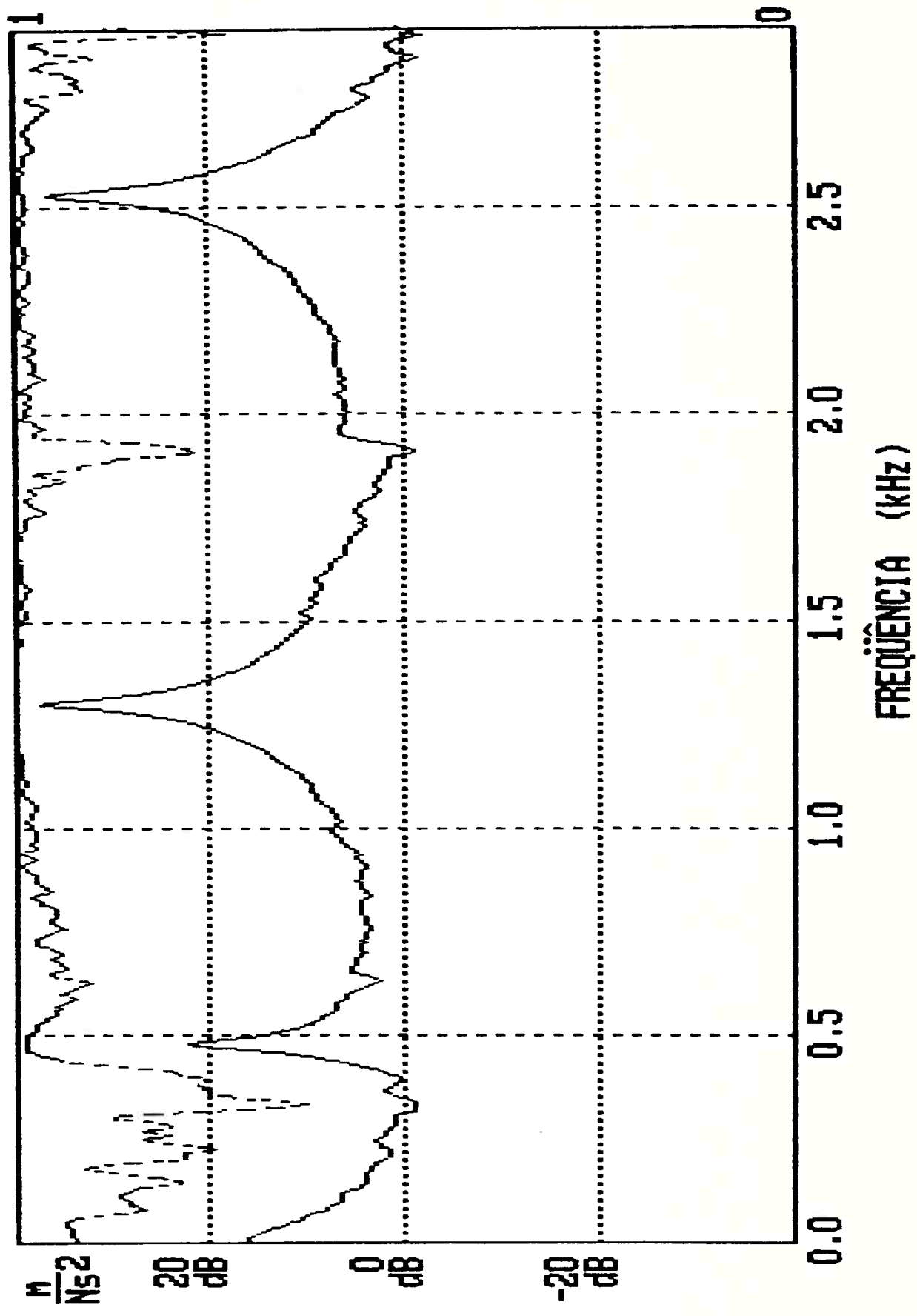
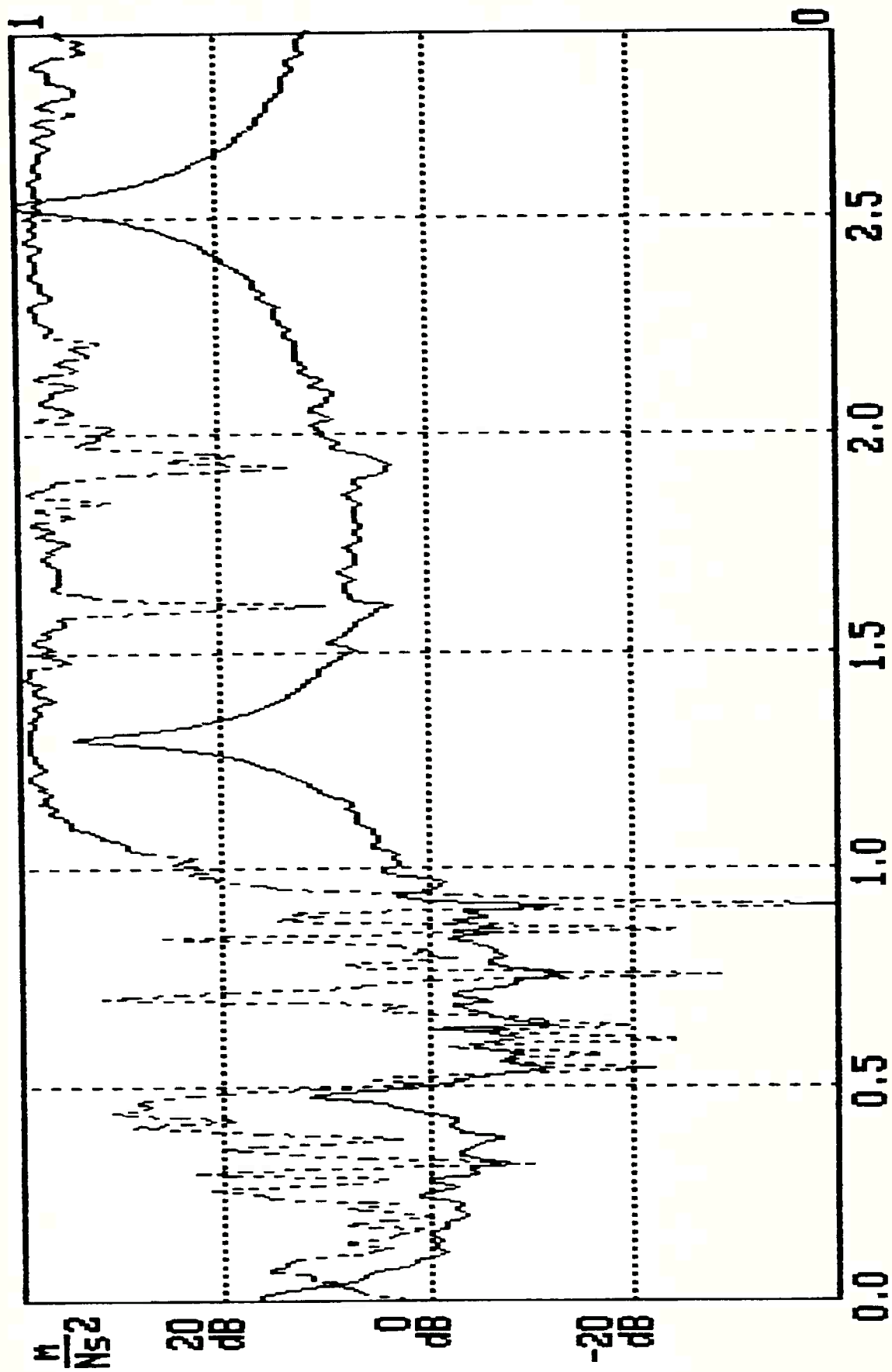


FIG. 9.09 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 08



FREQUÊNCIA (kHz)

FIG. 9.10 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 09

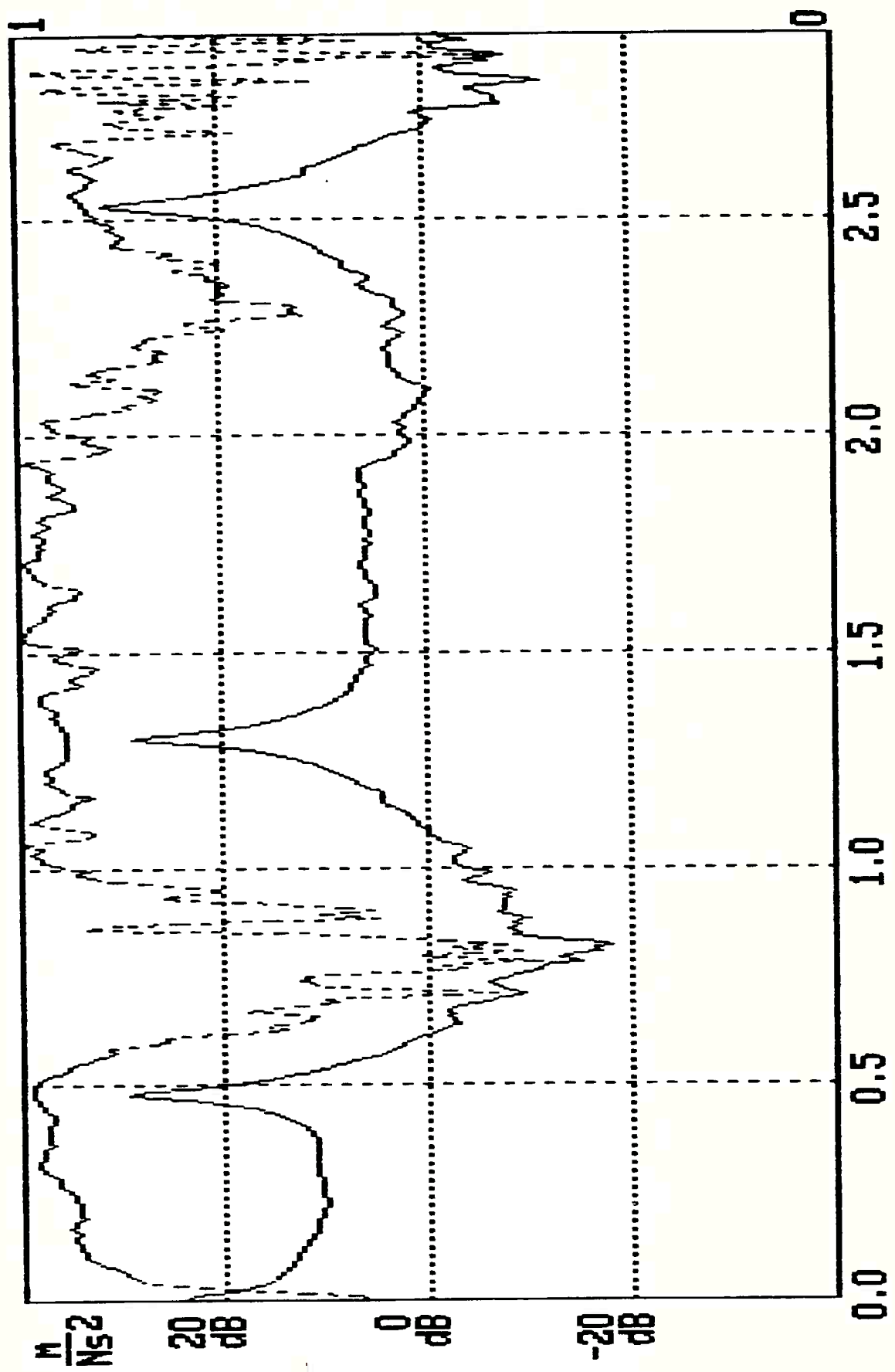


FIG. 9.11 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 10

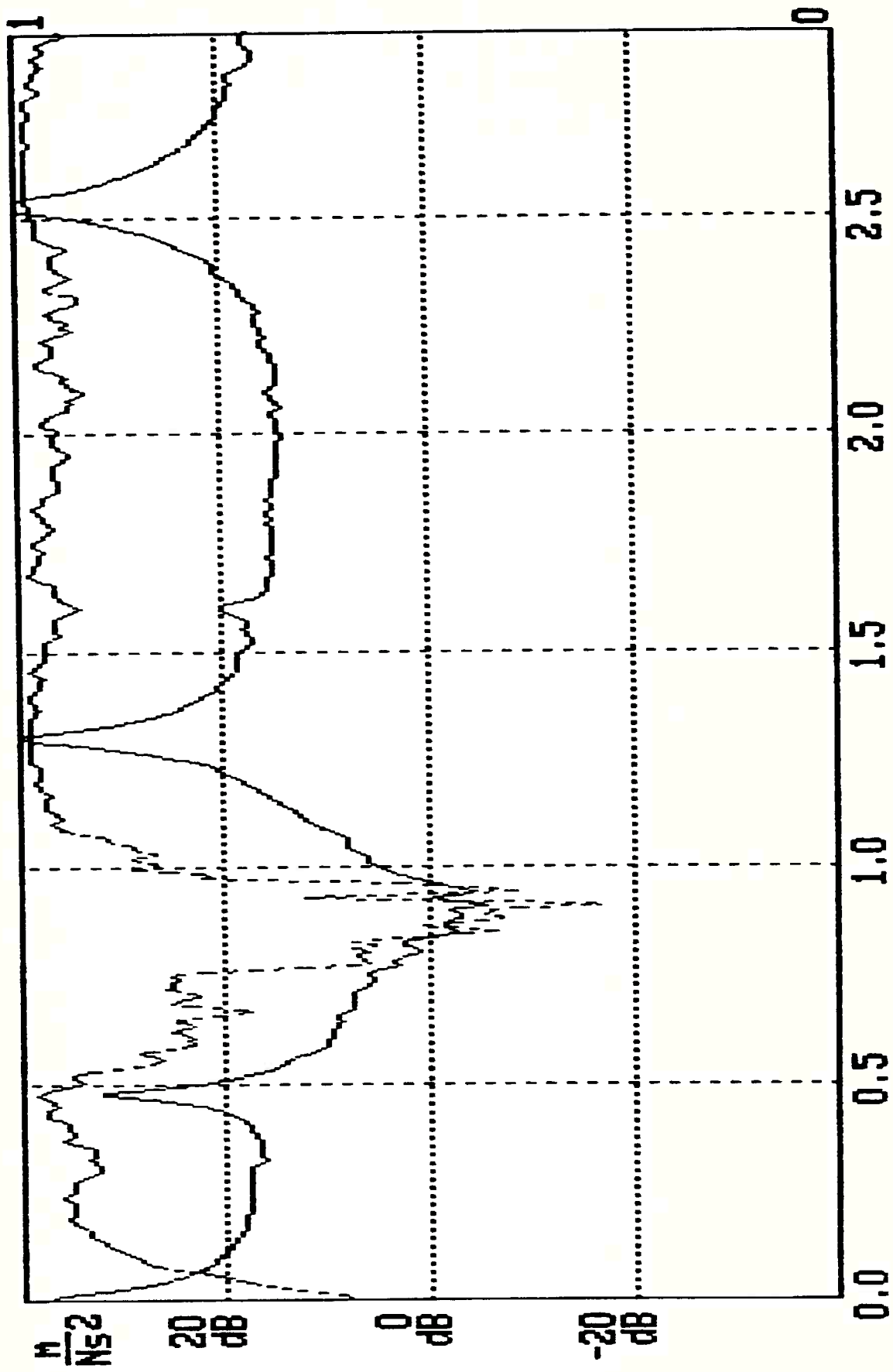


FIG. 9.12 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 11

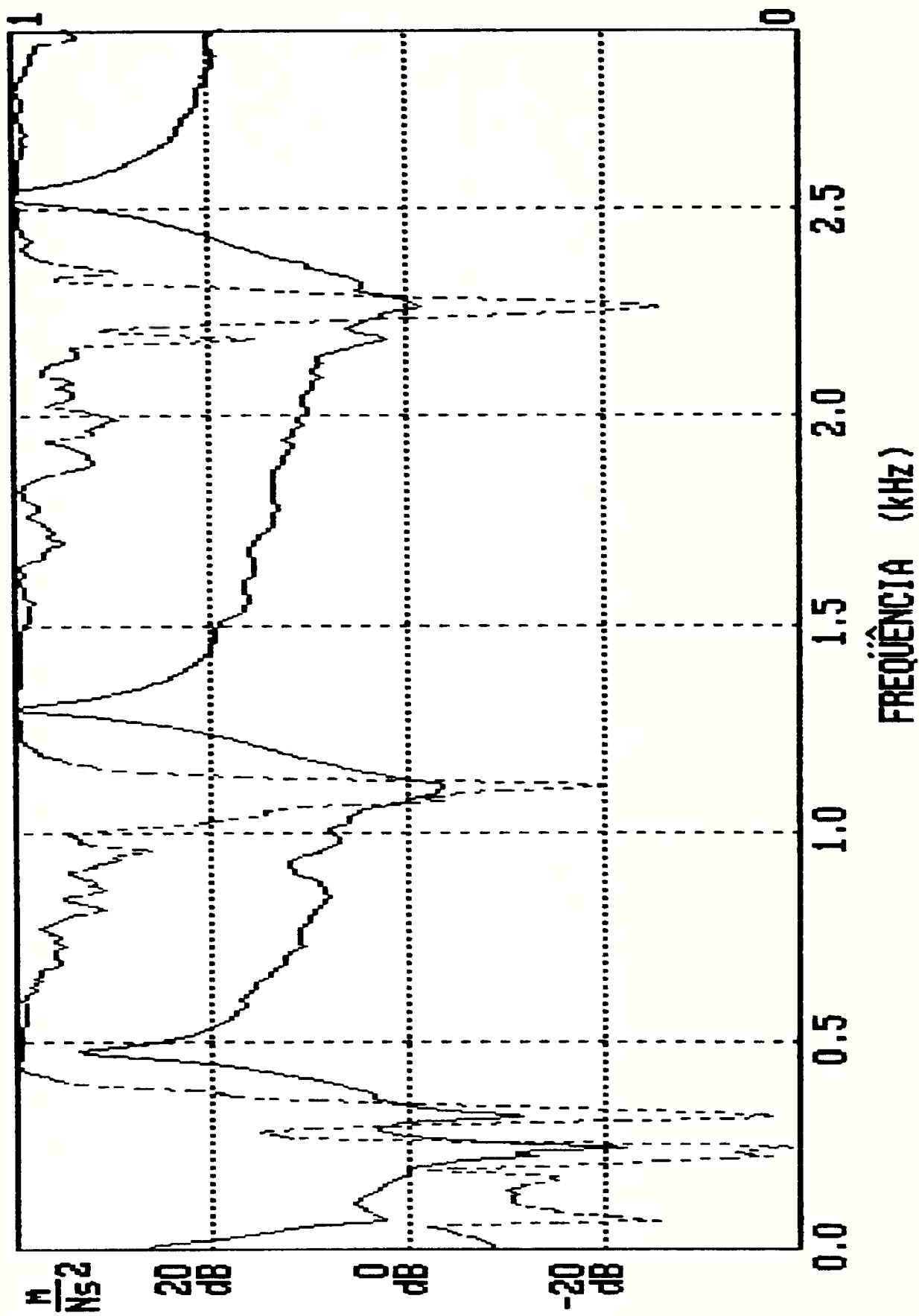


FIG. 9.13 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 01

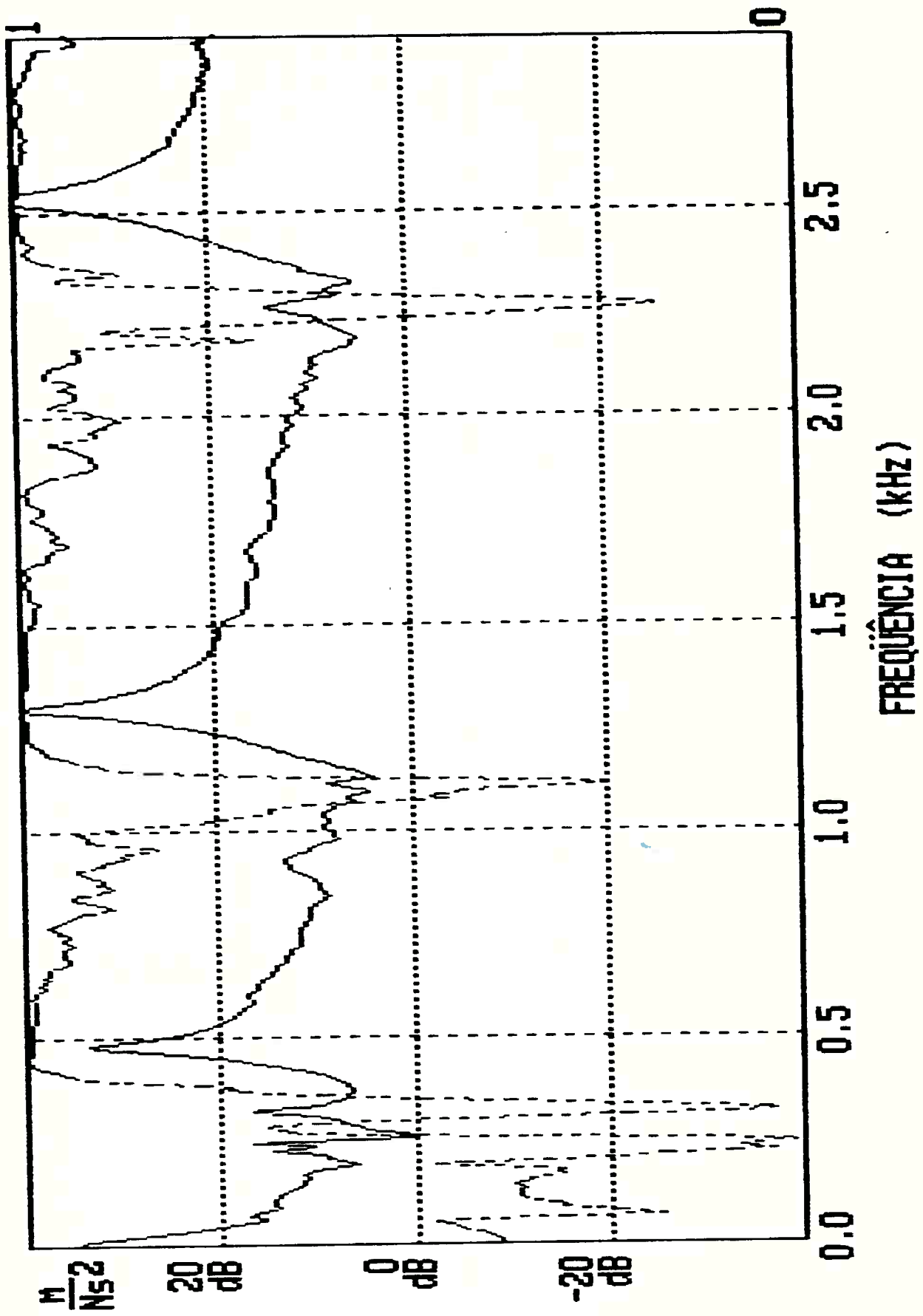


FIG. 9.14 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 01

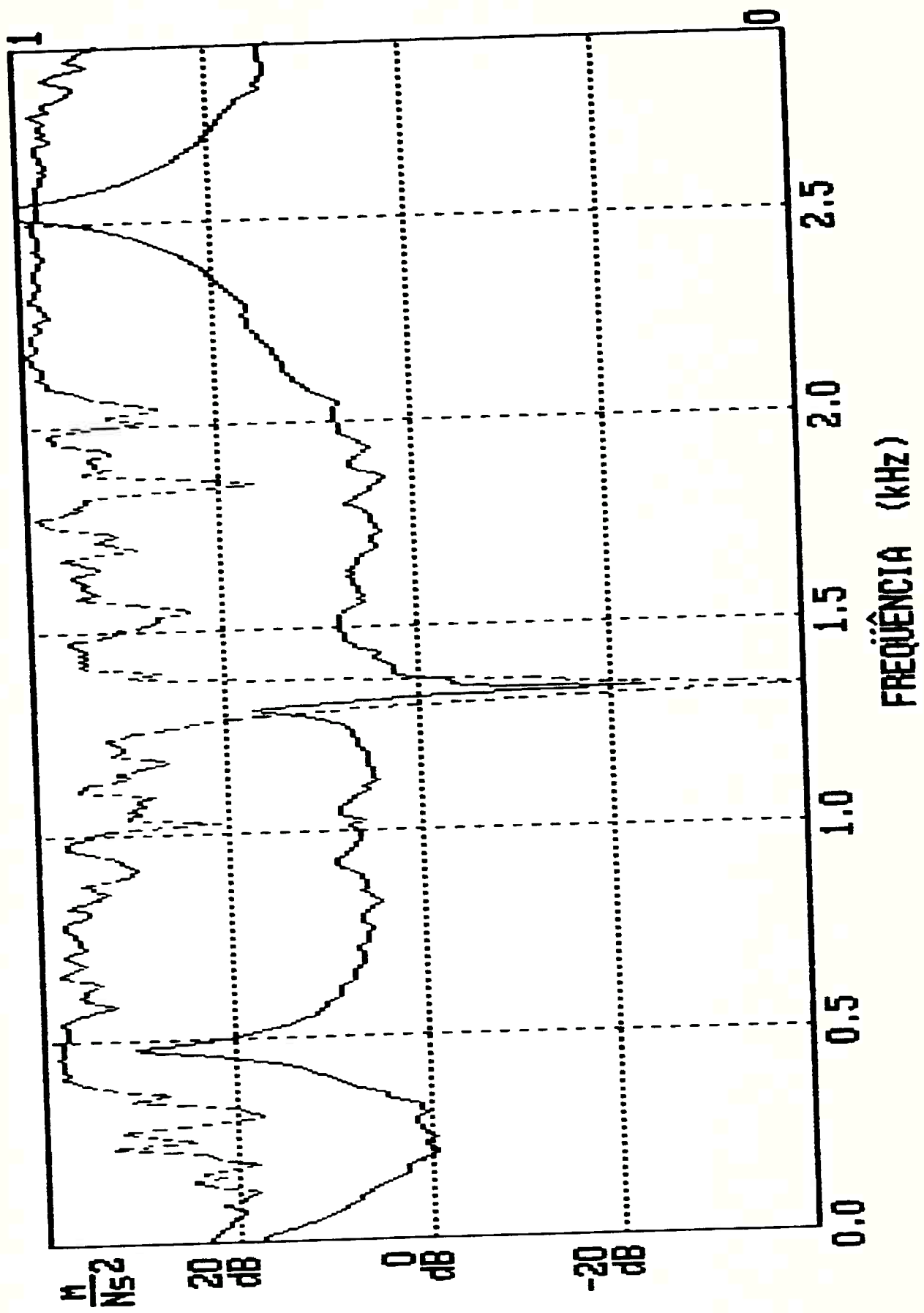


FIG. 9.15 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 06

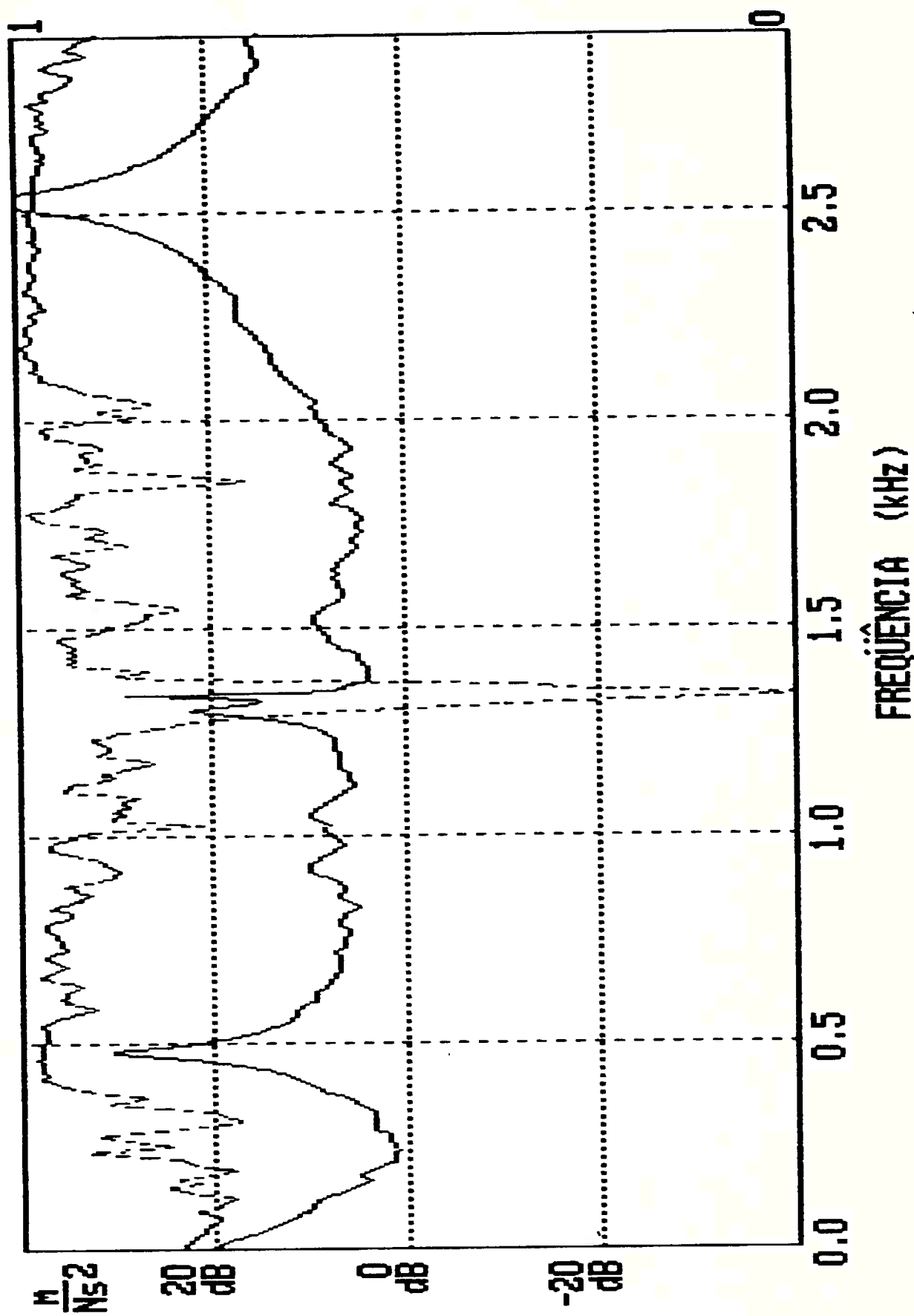


FIG. 9.16 FRF E FUNÇÃO DE COERENCIA - PONTO 06

DIAGRAMA DE NYQUIST

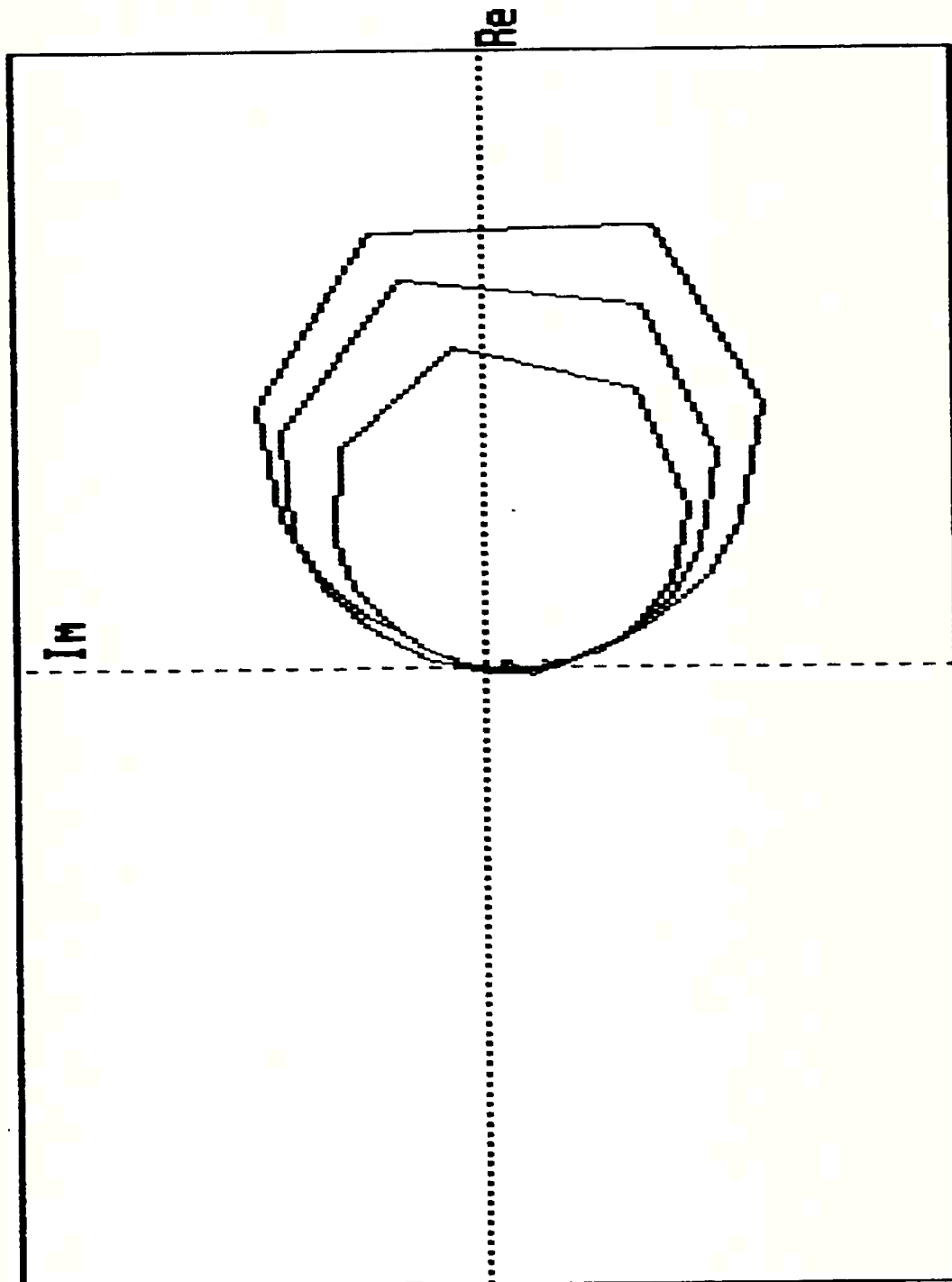


FIG 9.17 FRF PONTO 01

DIAGRAMA DE NYQUIST

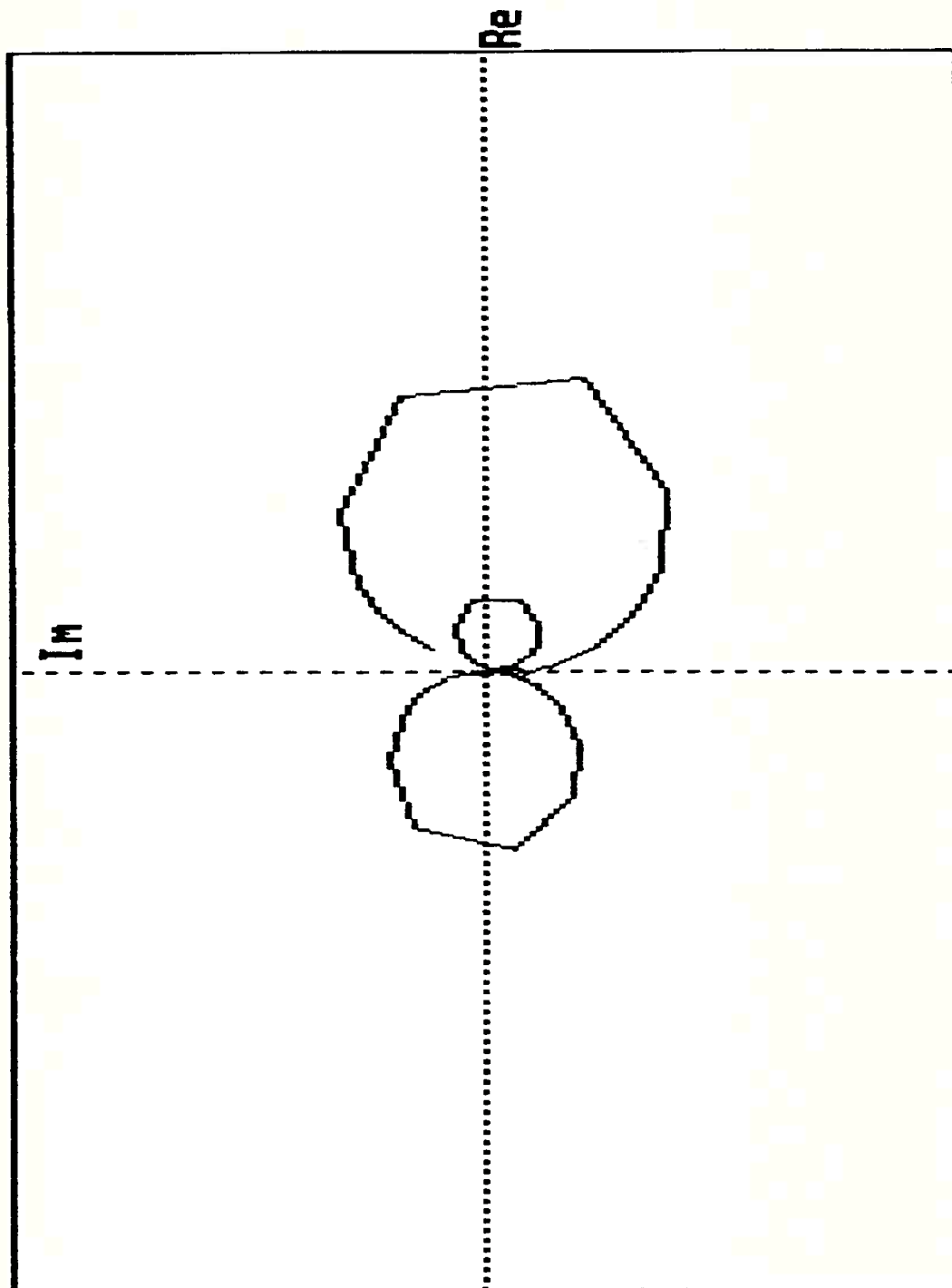


FIG 9.18 FRF PONTO 02

DIAGRAMA DE NYQUIST

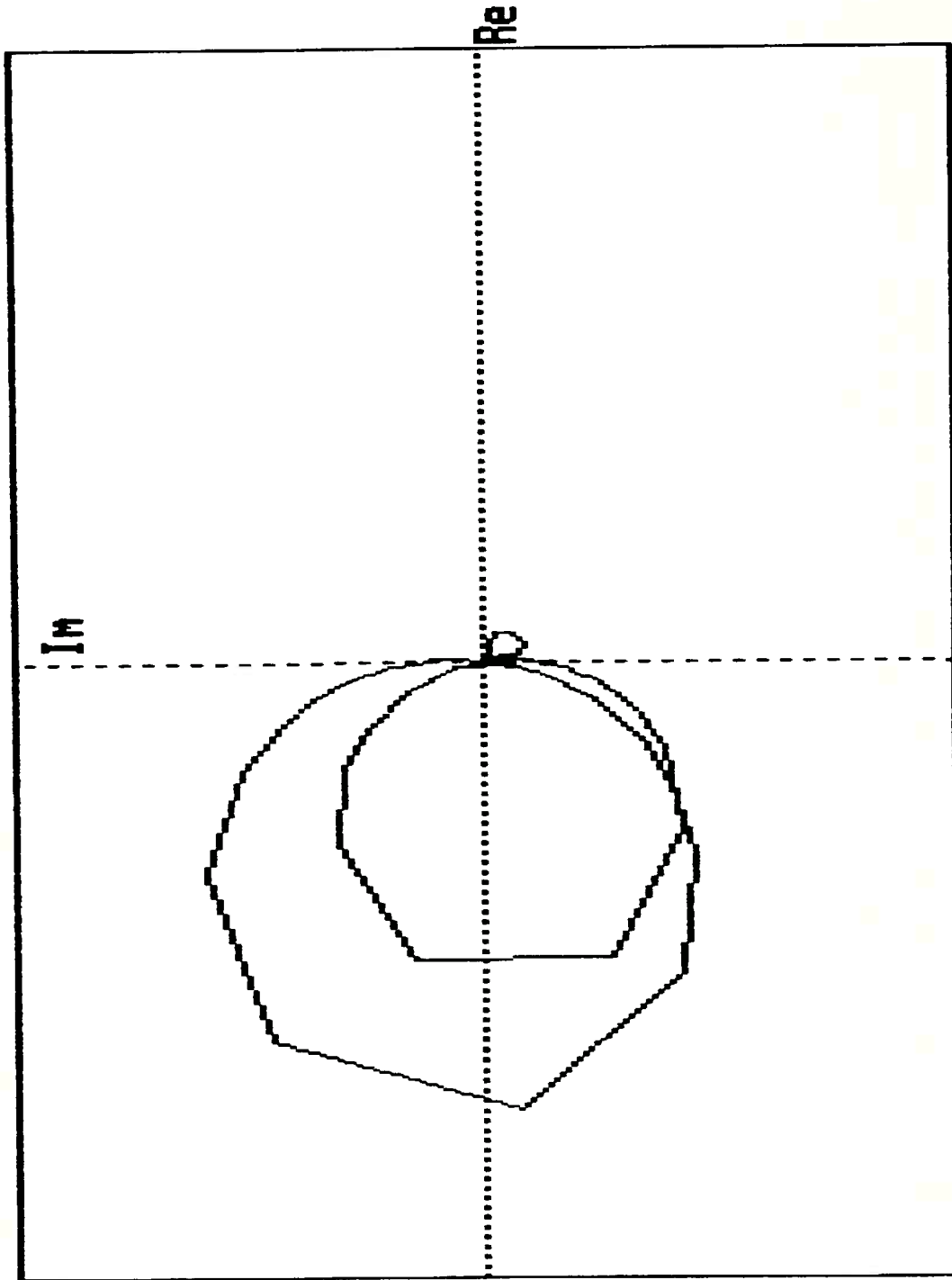


FIG 9.19 FRF PONTO 03

DIAGRAMA DE NYQUIST

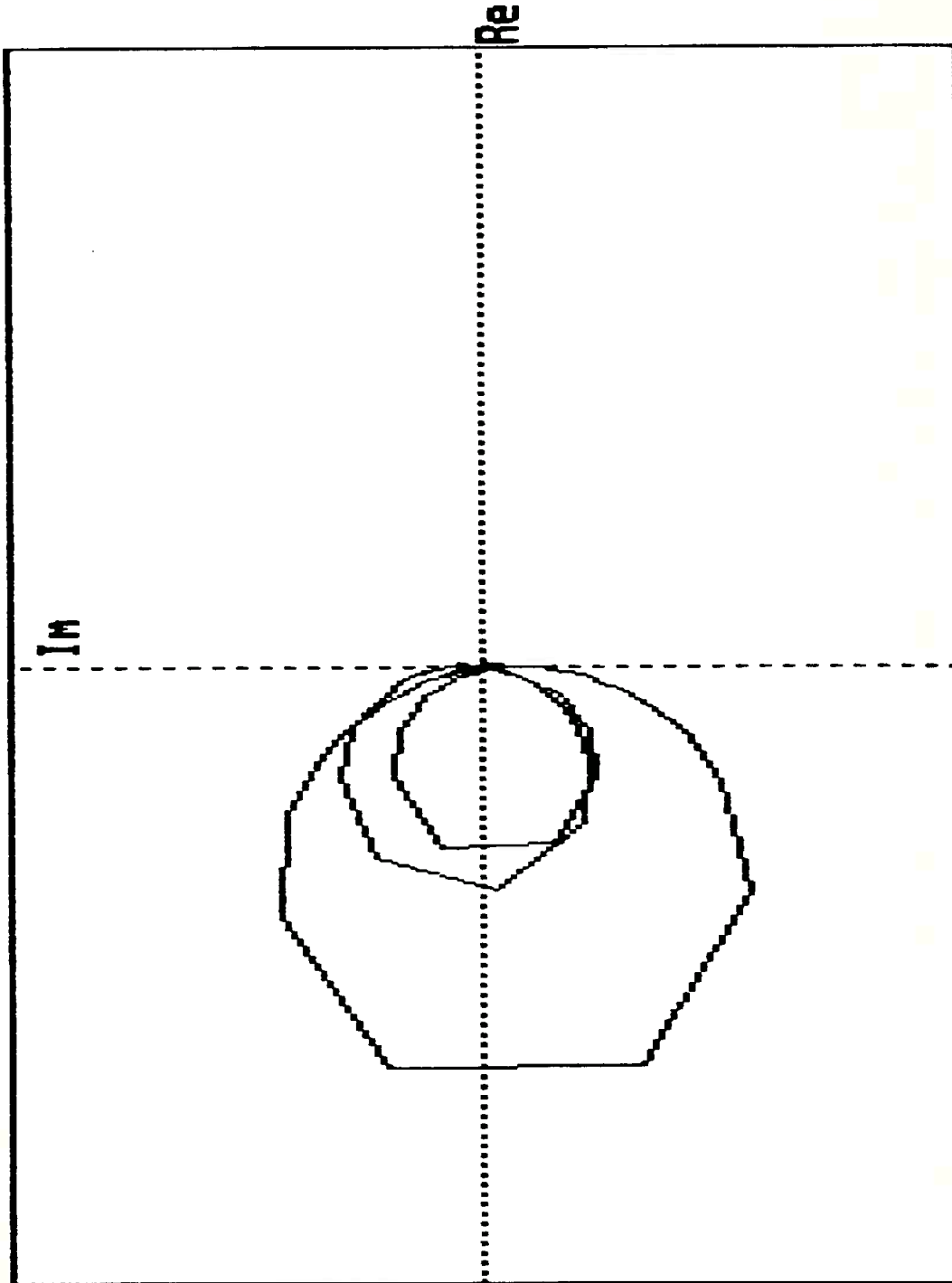


FIG 9.20 FRF PONTO 04

DIAGRAMA DE NYQUIST

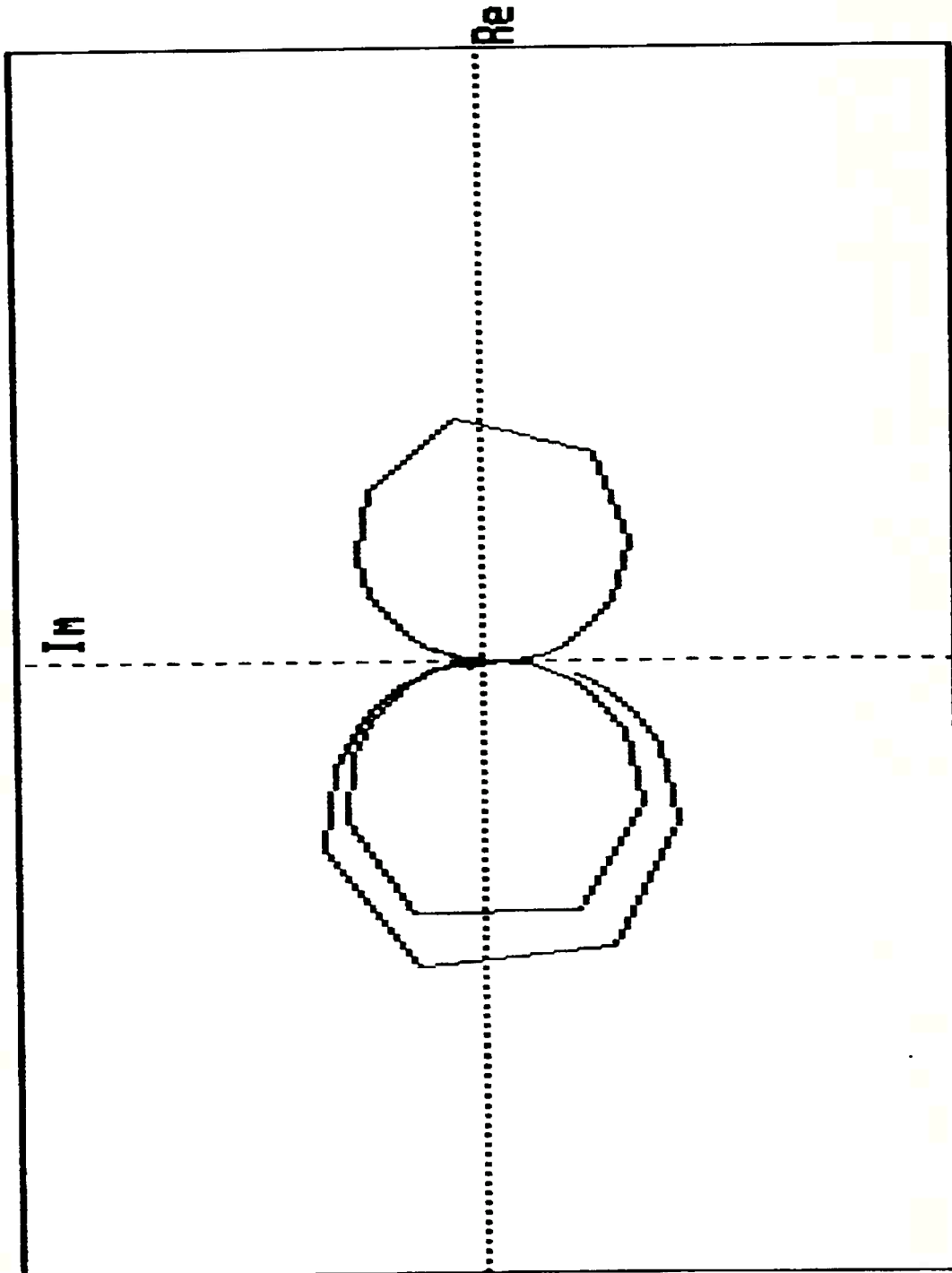


FIG 9.21 FRF PONTO 05

DIAGRAMA DE NYQUIST

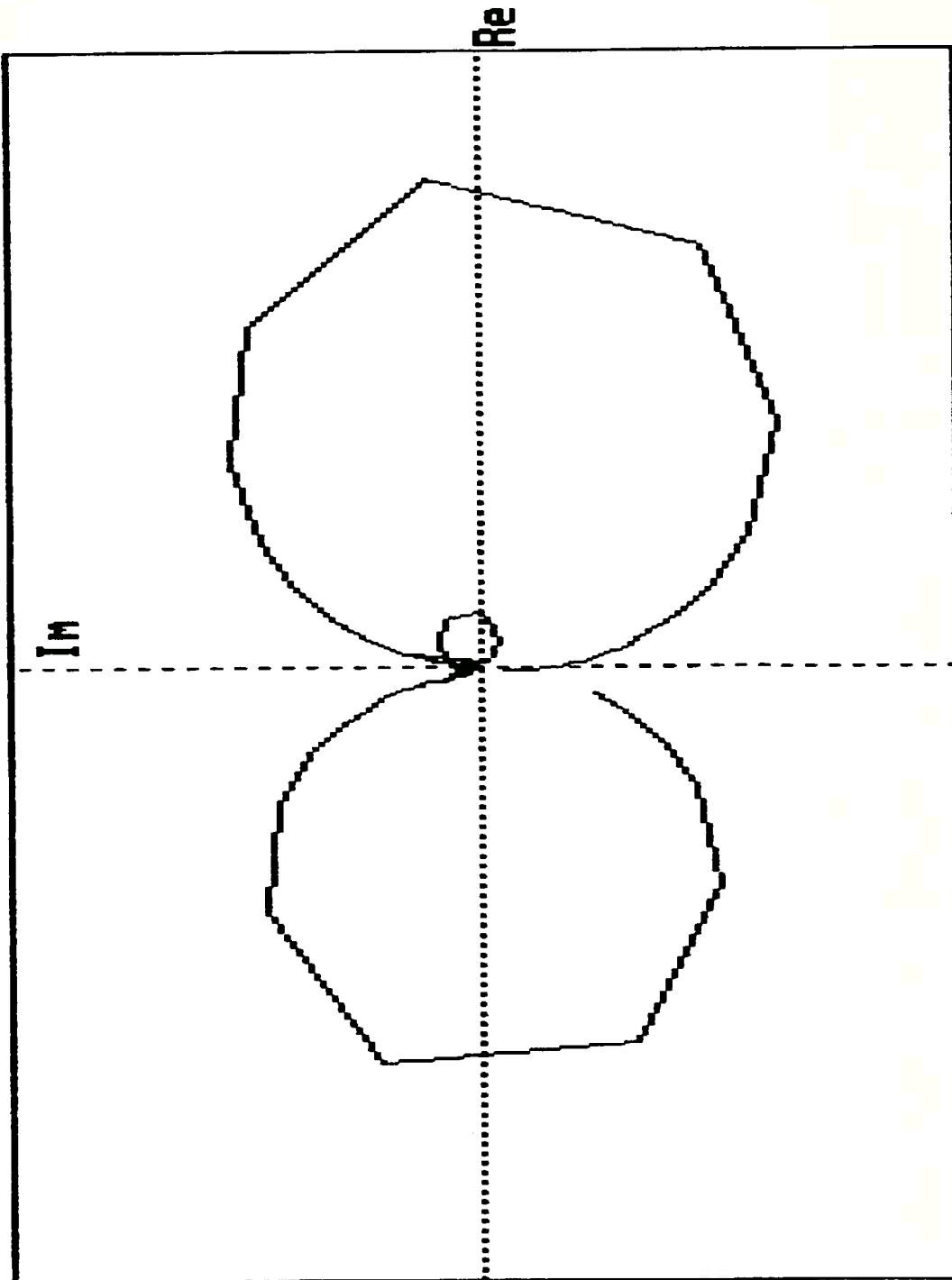


FIG 9.22 FRF PONTO 06

DIAGRAMA DE NYQUIST

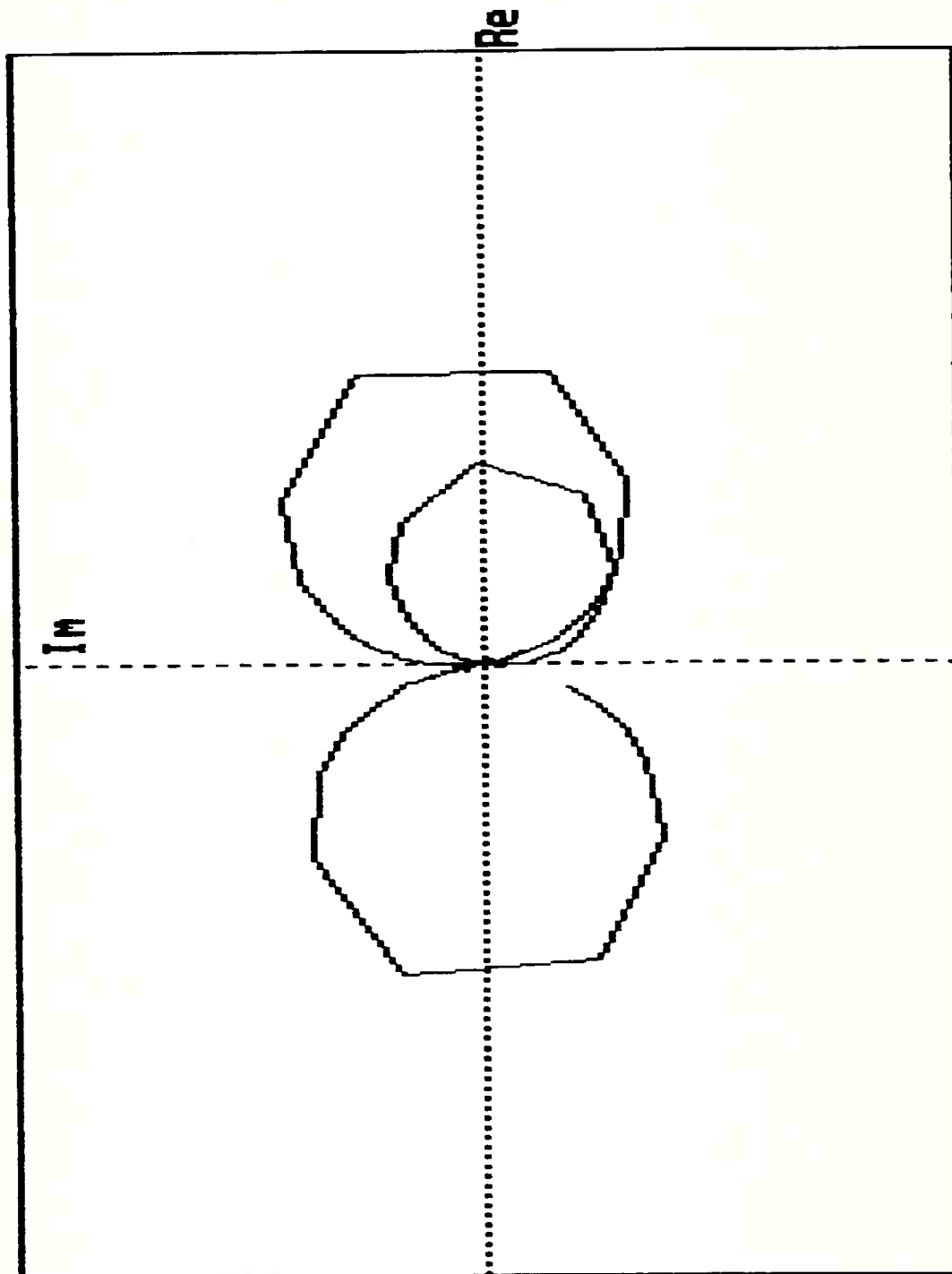


FIG 9.23 FRF PONTO 07

DIAGRAMA DE NYQUIST

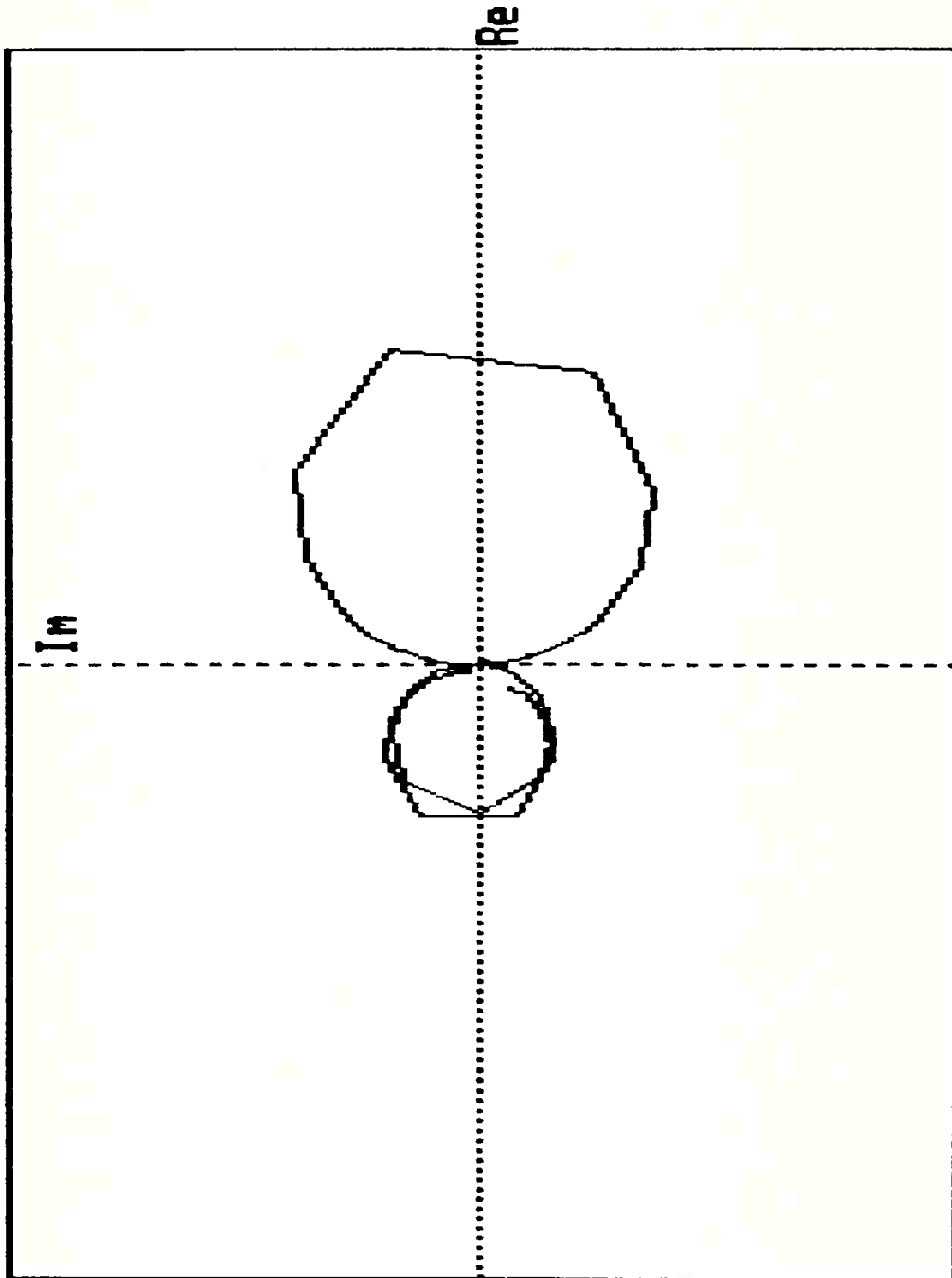


FIG 9.24 FRF PONTO 08

DIAGRAMA DE NYQUIST

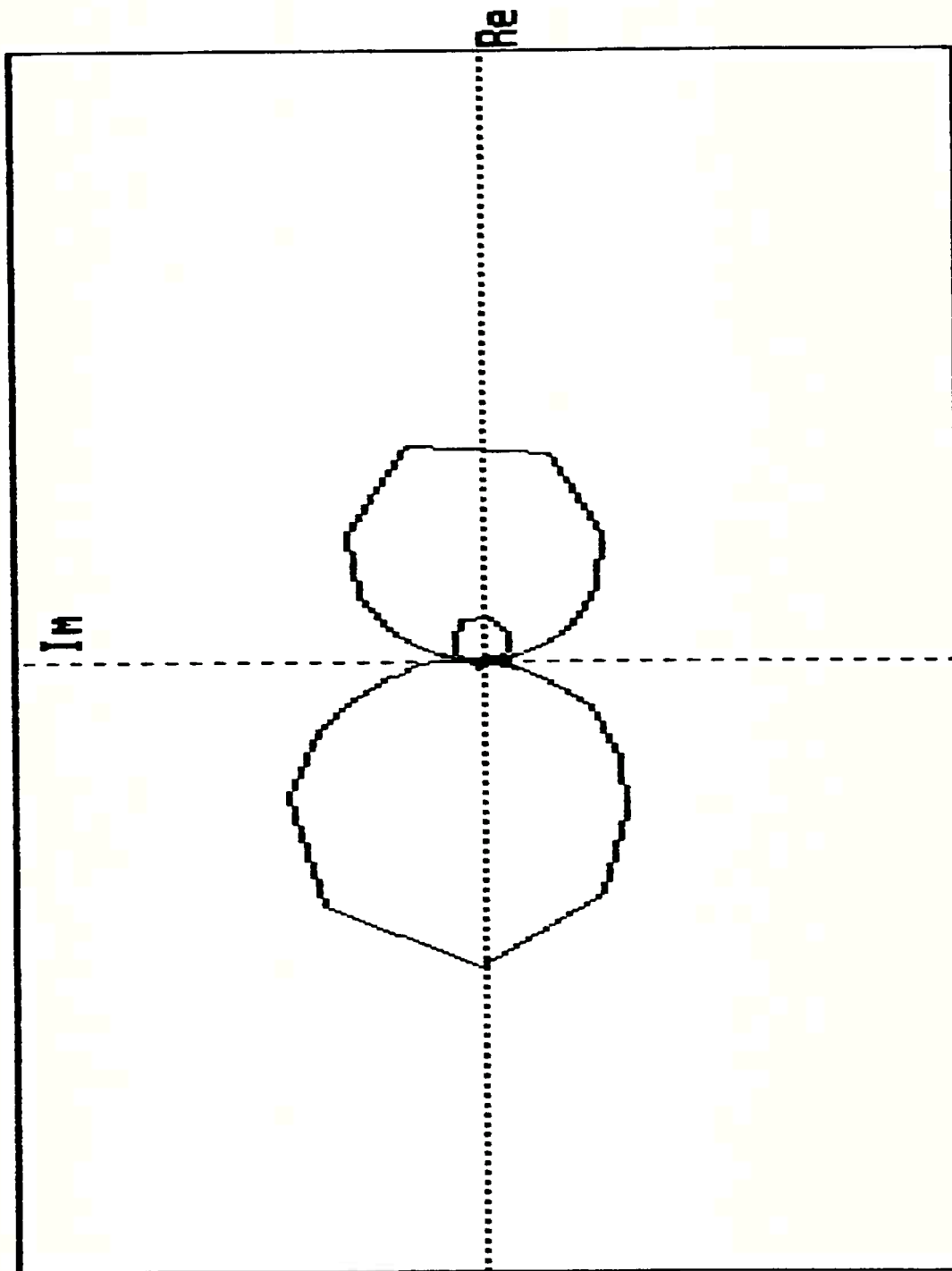


FIG 9.25 FRF PONTO 09

DIAGRAMA DE NYQUIST

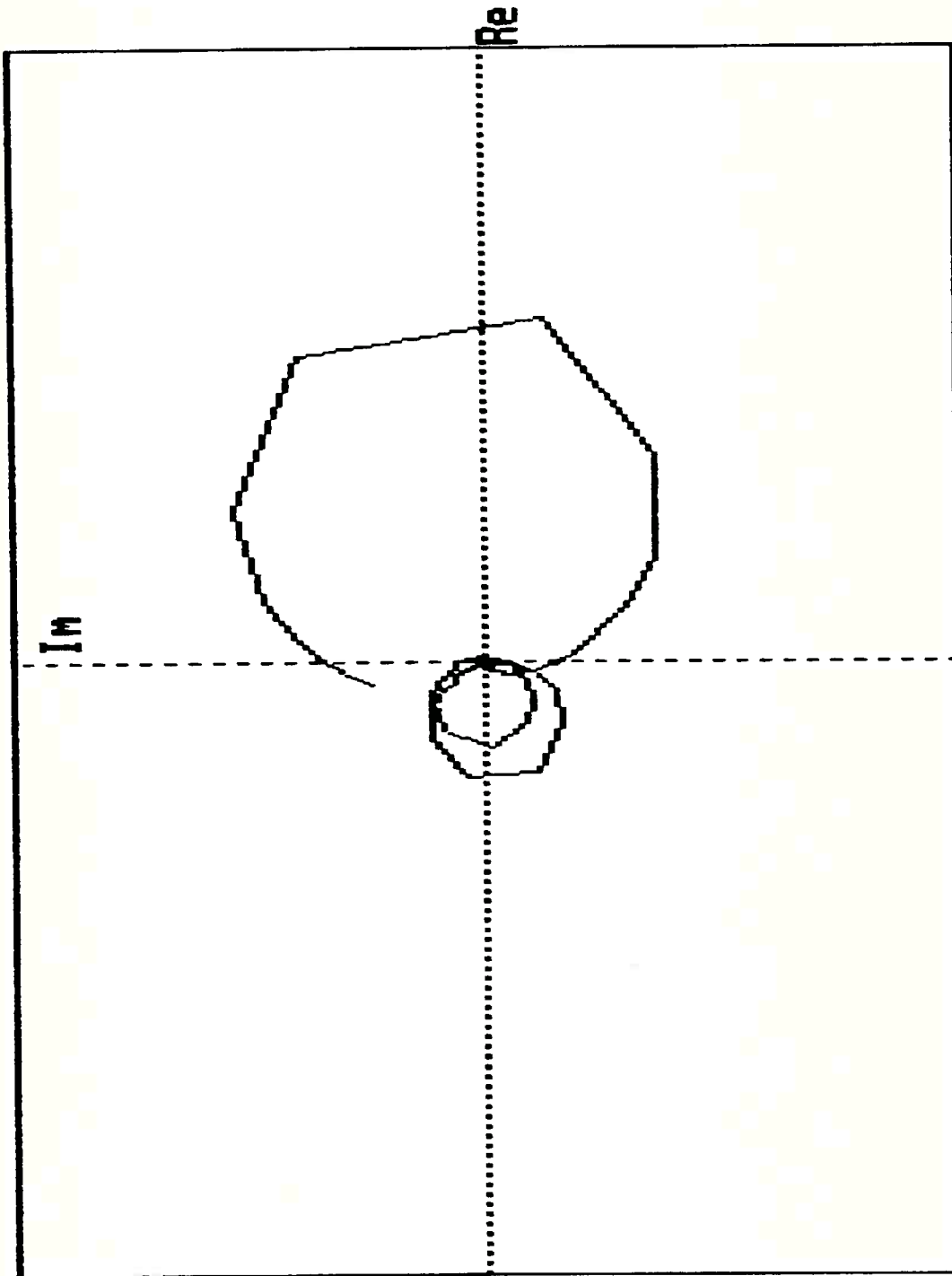


FIG 9.26 FRF PONTO 10

DIAGRAMA DE NYQUIST

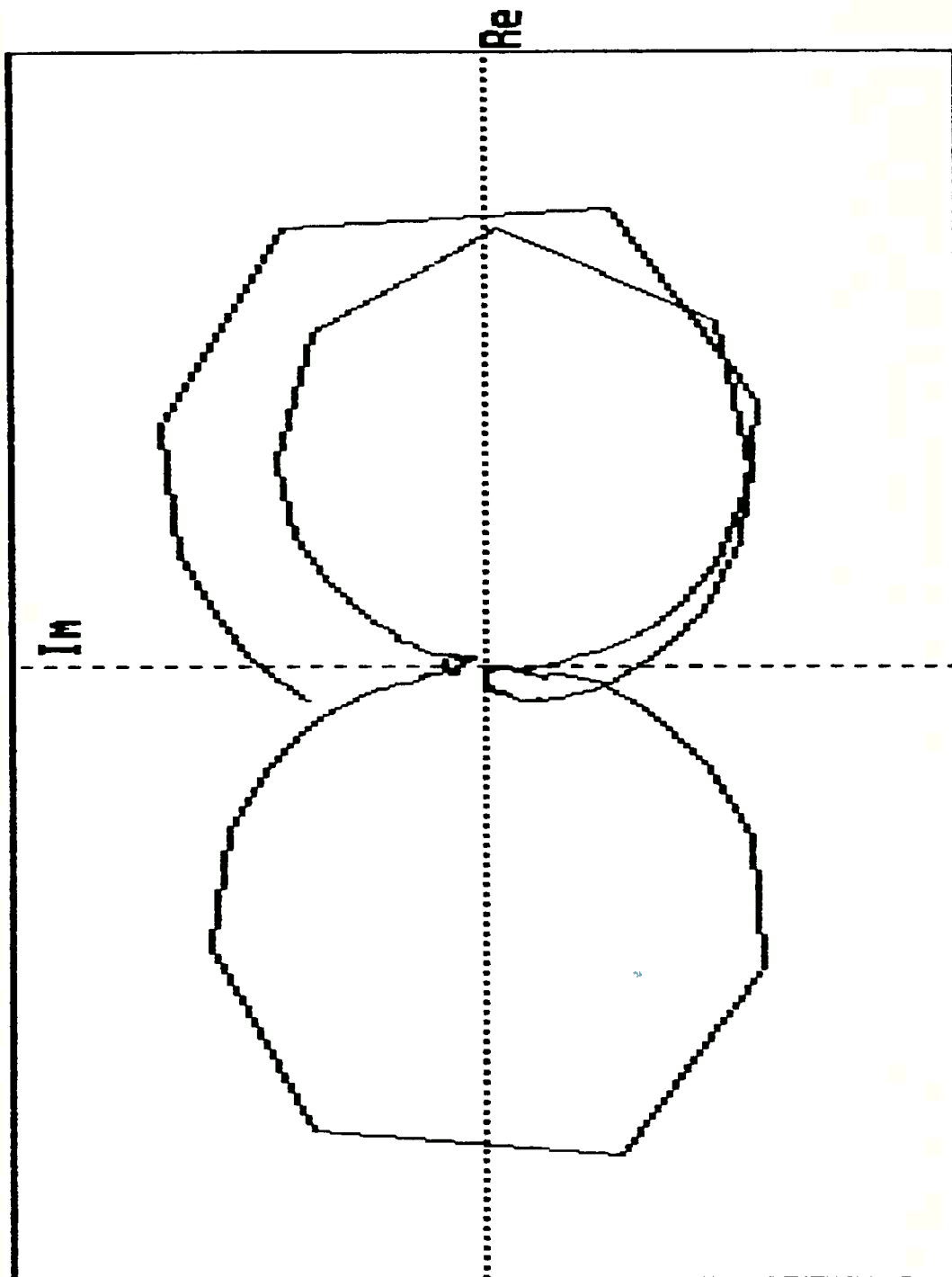


FIG. 9.27 FRF PONTO 11

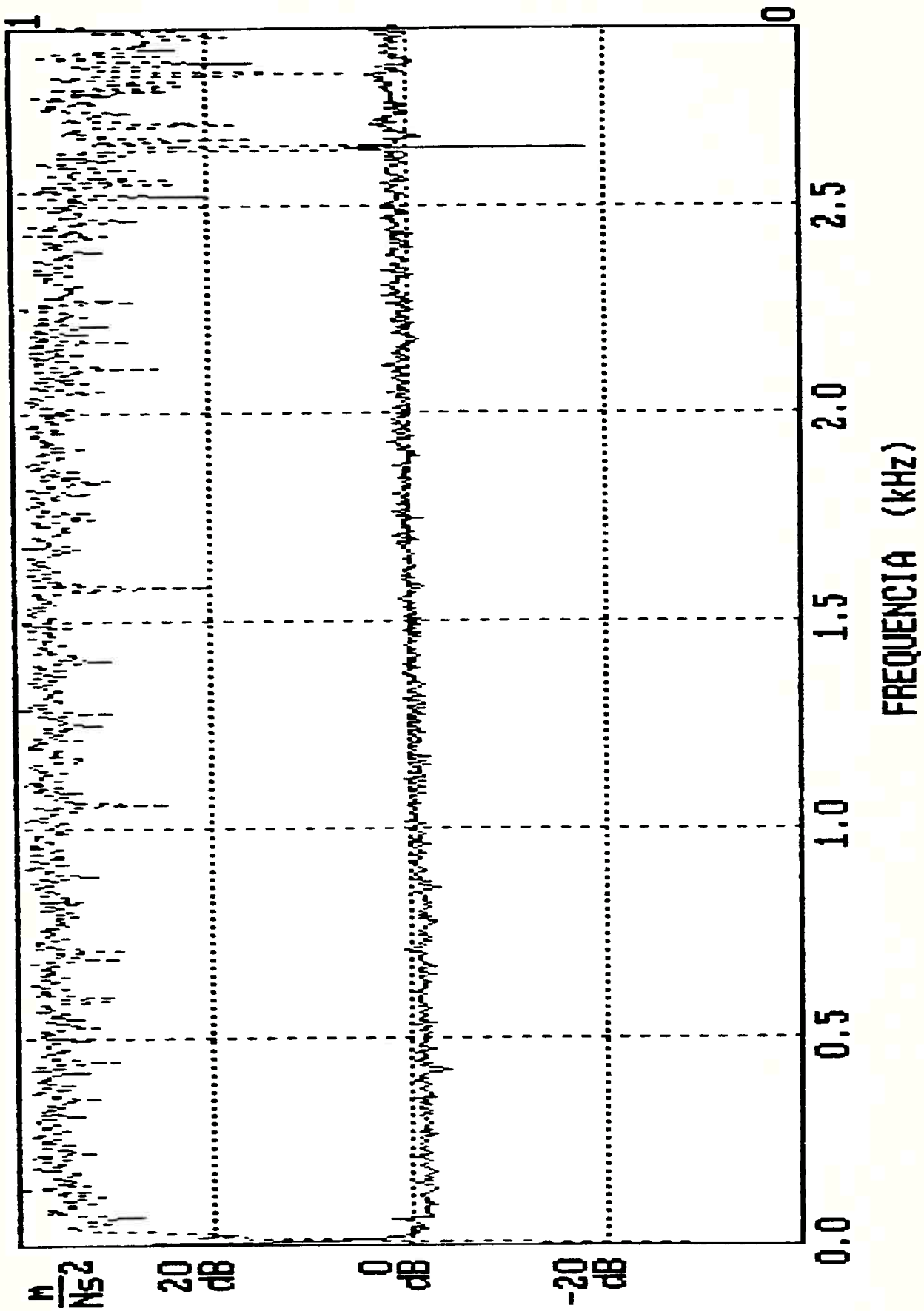


Fig. 9.28 FRF da massa de calibração

Tab. I Comparação dos resultados experimentais e teóricos

r	ele.	teórico	experimental	diferença
1	1	47,158	43,983	-3,175
	2	24,446	23,579	-0,867
	3	3,066	2,378	-0,688
	4	-14,762	-14,671	0,091
	5	-26,654	-25,469	1,185
	6	-30,835	-32,001	-1,166
	7	-26,654	-25,399	1,254
	8	-14,762	-12,015	2,747
	9	3,066	3,959	0,894
	10	24,446	29,824	5,378
	11	47,158	48,893	1,735
2	1	44,69	42,901	-1,790
	2	7,074	6,470	-0,604
	3	-22,265	-27,387	-5,121
	4	-33,660	-36,556	-2,896
	5	-23,925	-23,269	0,656
	6	0,000	4,901	4,901
	7	23,925	26,957	3,032
	8	33,925	27,597	-6,063
	9	22,265	19,472	-2,793
	10	-7,074	-10,187	-3,113
	11	-44,690	-44,625	0,065
3	1	42,283	34,551	-7,732
	2	-8,126	-15,723	-7,597
	3	-33,265	-39,213	-5,948
	4	-18,218	-19,761	-1,543
	5	17,680	21,724	4,044
	6	36,081	43,294	7,213
	7	17,680	17,754	0,074
	8	-18,218	-12,554	5,664
	9	-33,265	-26,900	6,365
	10	-8,126	-7,455	0,671
	11	42,283	39,296	-2,987
1	Frequência Natural: 471,2 Hz (experimental) 486,6 Hz (teórico) 483,2 Hz (exp. [75]) Fator de Amortecimento : 0,0008			
2	Frequência Natural: 1296,1 Hz (experimental) 1332,9 Hz (teórico) 1328,3 Hz (exp. [75]) Fator de Amortecimento : 0,0006			
3	Frequência Natural: 2526,4 Hz (experimental) 2589,9 Hz (teórico) 2589,9 Hz (exp. [75]) Fator de Amortecimento : 0,0004			

10. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A referência [75] apresenta resultados experimentais e teóricos da análise modal de uma viga de aço das mesmas dimensões que a analisada neste trabalho.

A comparação dos resultados tem como objetivo detectar a existência de eventuais erros grosseiros no equipamento aqui proposto.

A tabela I e as figuras 10.1 a 10.3 revelam que a diferença relativa ao maior deslocamento, entre o módulo dos elementos dos autovetores complexos (experimentais) e os elementos dos autovetores (teóricos) é da ordem de 7 % no primeiro modo, 11 % no segundo modo e de 18 % no terceiro modo.

Estes desvios percentuais podem parecer consireráveis, porém, se levarmos em conta que o modelo físico do espécime ensaiado difere do modelo matemático, pois este último não leva em consideração a massa do acelerômetro, estes desvios passam a ser até mesmo esperados. Nota-se uma rotação horária entre do autovetor experimental do segundo modo em relação ao autovetor teórico e uma rotação anti-horária no autovetor experimental do terceiro modo, conforme as figuras 10.2 e 10.3.

Compararam-se os módulos de $r_{\theta j}$ com os valores teóricos pois como mostra a referência [75], a parcela imaginária dos $r_{\theta j}$ é da ordem de 1 %. Portanto, imperceptível nos cálculos de desvio relativos.

O desvio relativo nos dados de frequência natural é de -3,1% no primeiro modo de vibração, -2,8 % no segundo modo e de

-2.5 % no terceiro modo.

Esta primeira aproximação do modelo modal pode ser agora refinada iterativamente através da equação (3.27) isolando cada termo da somatória e introduzindo valores de $\alpha(w)_{jk}$ de elevada confiança.

Figura 10.1: Comparação entre o 1º Modo Experimental e Teórico

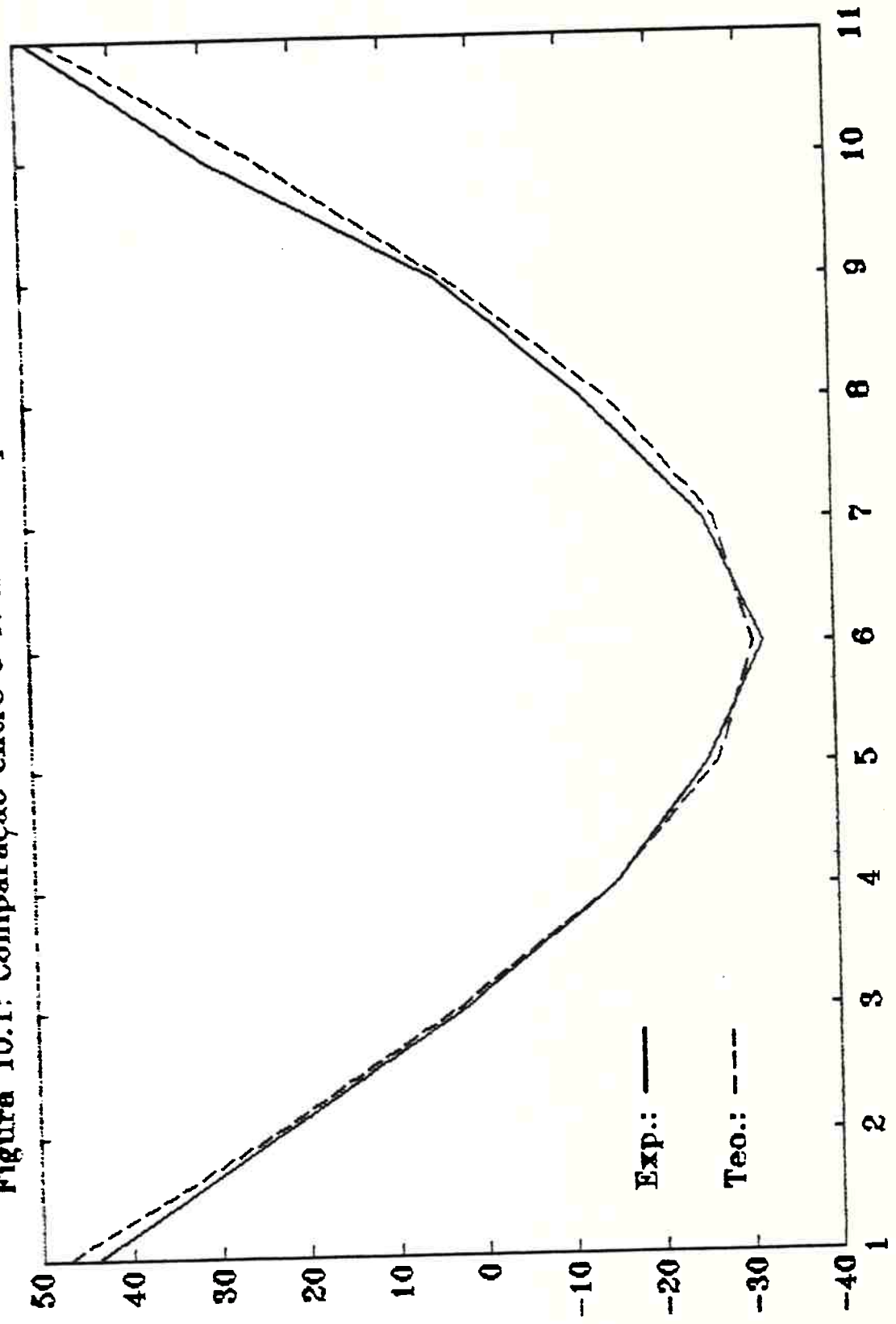


Figura 10.2: Comparação entre 2º Modo Experimental e Teórico

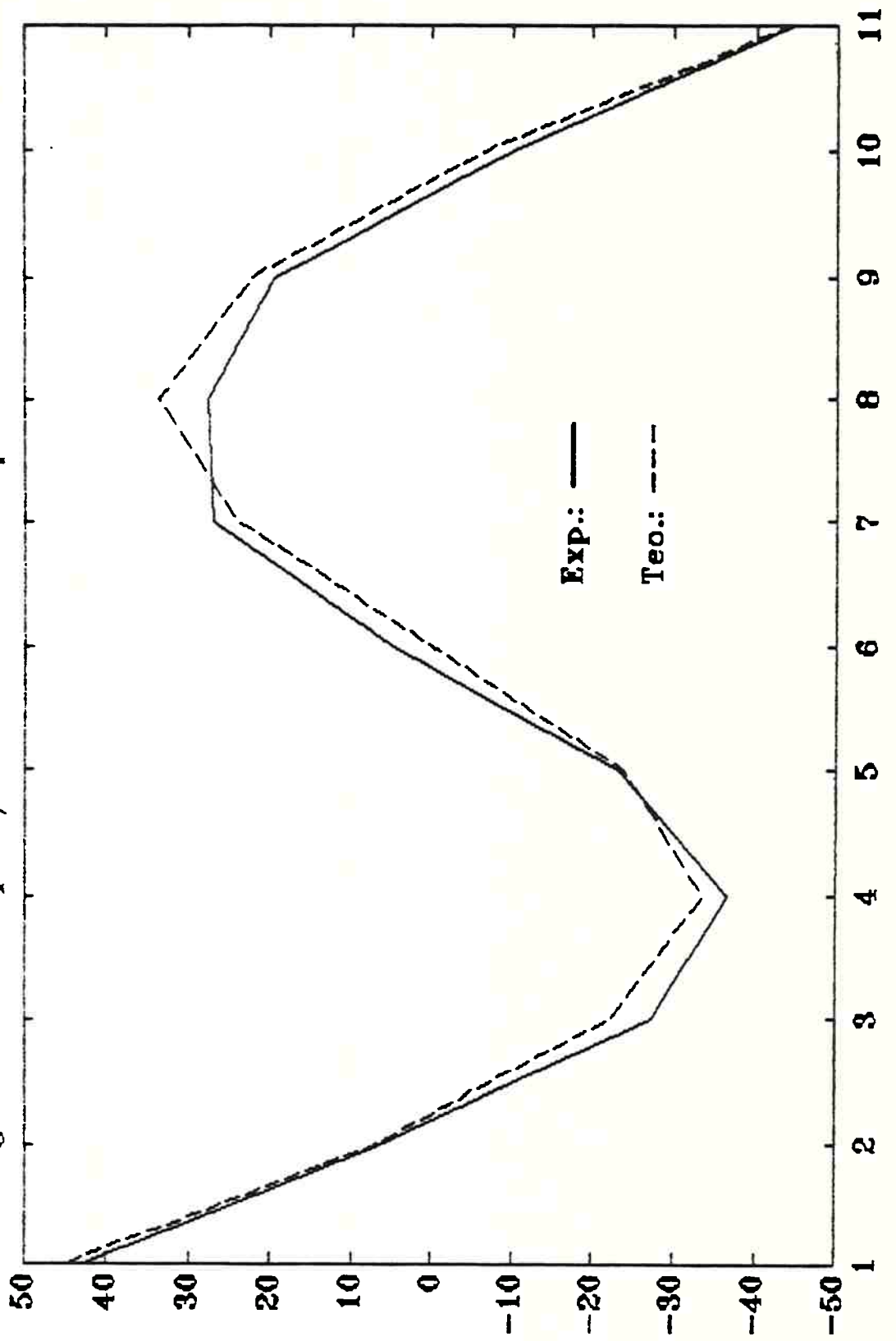
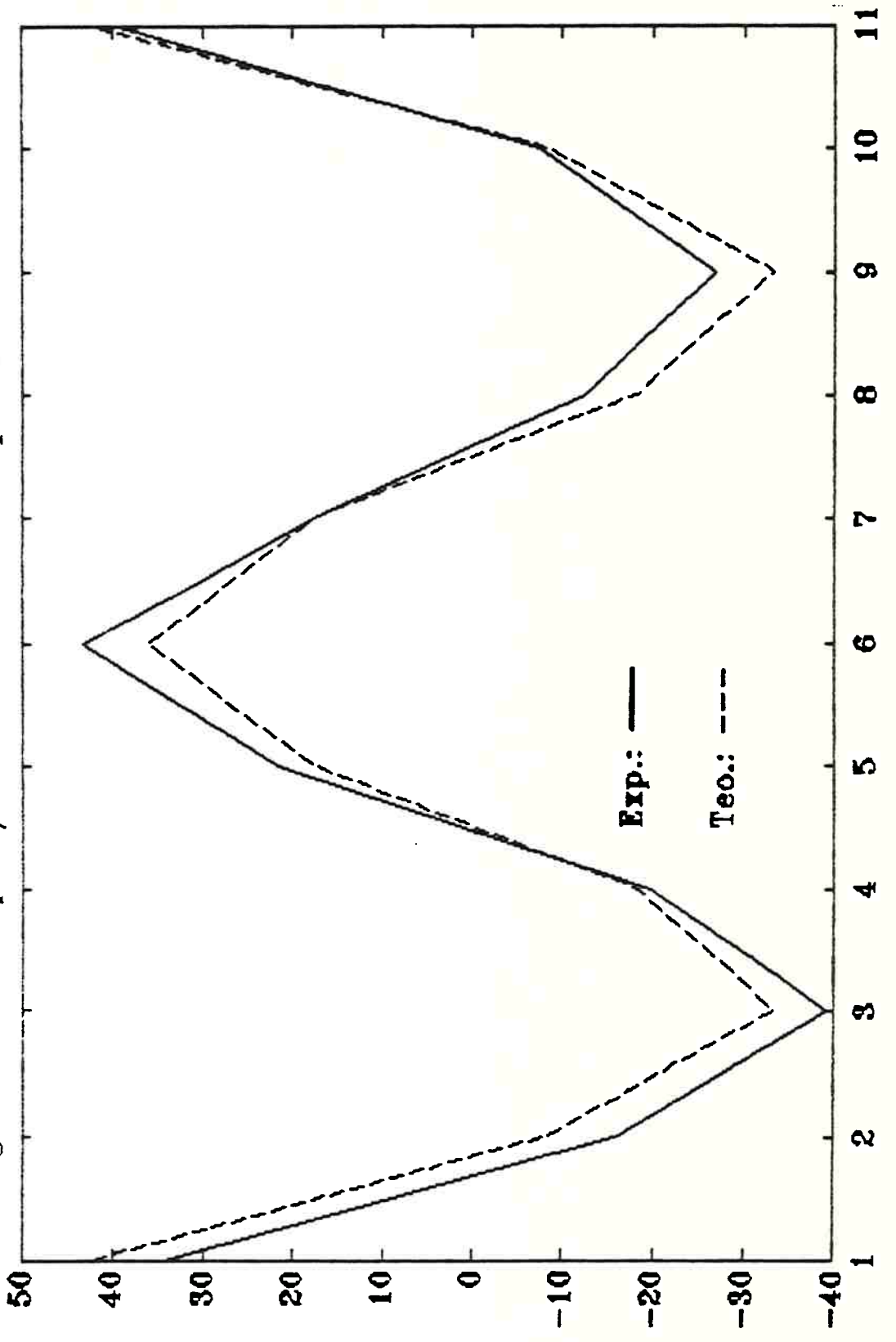


Figura 10.3: Comparação entre o 3º Modo Experimental e Teórico



11. CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

- a) É possível desenvolver um sistema de análise modal de baixo custo para fins didáticos e profissionais;
- b) Embora lento comparado à velocidade de aquisição e de processamento de um analisador de espectro dedicado, a utilização de um microcomputador tem a vantagem de oferecer flexibilidade nos parâmetros de processamento de sinais;
- c) O estimador H_4 apresenta bons resultados quando comparado com os resultados obtidos por H_1 e H_2 . Neste trabalho entretanto a melhoria nas FRF não foi significativo pois as ressonâncias apresentaram elevada coerência;

A título de sugestões de trabalhos futuros podemos citar:

- i) Utilização deste analisador em problemas de acústica;
- ii) Aumentar a taxa máxima de aquisição através do uso de apenas três bytes para introduzir os dados na memória
- iii) Aumento da velocidade de processamento através do emprego de uma rotina de FFT otimizada.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] KENNEDY C.C.; PANCU C.D.P. Use of Vectors in Vibration Measurement and Analysis J. of the Aeronautical Sciences, v.14 ,n.11,pp.603-625,1947.
- [2] BOX, G.E.P.; MULLER, M.E. A note on the generation of random normal deviates Ann. Math. Stat., v.29, pp.610-612, 1958.
- [3] PAPOULIS, A. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, McGraw Hill, Tokyo, 1965.
- [4] MEIROVITCH, L. Analytical Methods in Vibrations, Mcmillan Publishing Co., New York, 1967.
- [5] HOU, S.N. Review of modal Syn`thesis techniques and a new aproach Shock and Vibration Bulletin, v.40, n.40, 1969.
- [6] STAHLER, C.V. Phase Separation Technique for Ground Vibration Testing Aerospace Engineering, July, pp.56-57 e 91-96, 1962.
- [7] WEISS, L.; McDONOUGH,R.N. Prony's method, Z-transforms, and Padé aproximation Siam Review, v.5, n.2, April, 1963.
- [8] SANATHANAN, C.K.; KOERNER, J. Tranfer function as a ratio of two complex polynomials IEEE Transac. on Automatic Control, January, pp.56-58, 1963.
- [9] BRIGHAM, E.O. The Fast Fourier Transform, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1974.
- [10] EYKHOFF, P. System Identification Parameter and State Estimation, John Wiley & Sons, Bristol, 1974.
- [11] GERSCH, W. Parameter identification: Stochastic Process Techniques The Shock and Vibration Digest, v.7, n.11,

Nov., 1975.

- [12] POTTER, R. A general theory of modal analysis for linear systems The Shock and Vibration Digest, v.7, n.11, pp.3-11, 1975
- [13] RAMSEY, K.A. Accelerometer calibration using random noise and transfer function measurements ISA ASI, 75256, pp.299-313, 1975.
- [14] EWINS, D.J. Measurement and application of mechanical impedance data : part 1 Introduction and ground rules J. of the Soc. of Environmental engineers, Dec., pp.3-12, 1975.
- [15] EWINS, D.J. Estimation of peak resonant amplitudes J. of Sound and Vibration, v.43, n.4, pp.595-605, 1975.
- [16] OPPENHEIM, A.V.; SCHAFFER, R.W. Digital Signal Processing. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1975.
- [17] STEARNS, S.D. Digital Signal Analysis, Hayden Book Co., Rochelle Park, New Jersey, 1975.
- [18] EWINS, D.J. Measurement and application of mechanical impedance data: part 2 Measurement Technics J. of The Soc. of Environmental Eng. March, pp.23-33, 1976.
- [19] EWINS, D.J. Measurement and application of mechanical impedance data: part 3 Interpretation and application of measured data J. of The Soc. of Environmental Eng. Jun., pp.7-17, 1976.
- [20] IBRAHIM, S.R.; MILKULCIK, E.C. The experimental Determination of Vibration Parameters from Time Responses, The Shock and Vibration Bulletin, b.46, Part. 5, pp. 187-196, Aug., 1976.
- [21] IBRAHIM, S.R.; MILKULCIK, E.C. A Method for Direct

- Identification of Vibration Parameters from the Free Response, The Shock and Vibration Bulletin, b.47, Part. 4, pp.183-198, Sept., 1977
- [22] BLARICUM, M.L. VAN; MITTRA, R. Problems and Solutions Associated with Prony's method for processing transient data IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v.ap26, n.1, Jan, 1978.
- [23] SMITH, C.C.; THORNHILL, JOE Fourier and Spectral Analysis in Dynamic Systems - Short Course, Mechanical Engineering Dept., University of Texas, Austin 1978.
- [24] IBANEZ, P. Review of Analytical and experimental techniques for improving structural dynamic models Welding Research Council, bulletin 249, Jun, 1979.
- [25] EWINS, D.J. Whys and Wherefores of Modal Testing J. of The Soc. of Environmental Eng. Sept, pp.3-14, 1979.
- [26] BROWN, D.L.; ALLEMANG, R.J.; MERGEAY, M. Parameter estimation techniques for modal analysis SAE Trans., v.88, sect.1, pp.828-846, 1979.
- [27] SNOEYS, R. et al. Survey of modal applications Annals of the CIRP, v.28, Feb, 1979.
- [28] BRITTINGHAM, J.N.; MILLER, E.K.; WILLOWS, J.L. Pole extraction from real-frequency information Proceedings of the IEEE, v.68, n.2, Feb, 1980.
- [29] EWINS, D.J. On predicting point mobilityplots from measurements of other mobility parameters J. of Sound and Vibration, v.70, n.1, pp.69-75, 1980.
- [30] HOROWITZ, P.; WINFIELD H. The art of electronics, Cambridge University Press, Cambridge, 1980.

- [31] HERBERT, M.R.; KIENZKY, D.W. Applications of structural dynamics modification SAE 801125, pp.3416-22, 1981.
- [32] EWINS, D.J. State-of-the-art Assessment of mobility measurement techniques (SAMB) - Summary of Results J. of the Soc. of Environmental Eng March, pp.3-13, 1981.
- [33] EWINS, D.J.; GRIFFIN J. A state-of-the-art assesment of mobility measurement techniques - results for the mid-range structures J. of Sound and Vifration, v.78, n.2, pp.197-222, 1981.
- [34] RICHARDSON, M.H.; RAMSEY, K.A. Integration of dynamic testing into the product design cycle Sound and Vibration, Nov.,pp.14-27, 1981.
- [35] EWINS, D.J. A method for identification of lightly damped structures J. of Sound and Vibration, v.84, n.1, pp.57-79, 1982.
- [36] CAMPBELL, R.B.; VANDIVER, J.K. The determination of modal damping ratios from maximum entropy spectral estimates Trans. of The ASME, v.104, March, pp.78-85, 1982.
- [37] LIN, P.L.; WU,Y.C. Identification of multi-input multi-output linear systems from frequency response data Trans. of The ASME, v.104, March, pp.58-64, 1982.
- [38] ALLEMANG, R.J.; ROST,R.W.; BROWN, D.L. Dual input estimation of frequency functions for automotive structures SAE Technical papers, 820193, Feb., 1982.
- [39] LEURIDAN, J.M.; BROWN, D.L.; ALLEMANG, R.J. Direct system parameter identification of mechanical structures with application to modal analysis AIAA technical paper 82-0767CP, New York, May, 1982

- [40] VOLD, H. et al. A multi-input modal estimation algorithm for minicomputers SAE Trans., v.91, sect.1, pp.815-21, 1982.
- [41] KUMERASAN, R.; TUFTS, D.W. Estimating the parameters of exponentially damped sinusoids and pole-zero modeling in noise IEEE Trans. on Acous., Speech, and Signal Processing, v.ASSP-30, n.6, Dec, 1982.
- [42] NATKE, H.G. Two principle methods for identification of elastomechanical systems without using the results of system analysis, Curt-Risch-Institut, Universität Hannover, 1982.
- [43] DOBSON, B. et al. Comparison of predicted and measured modal properties J. of The Soc. of Environmental Eng., Jun, pp.3-11, 1984.
- [44] WOLF, B. Identification of linear structures Trans. of The ASME, v.106, Dec., pp.300-304, 1984.
- [45] OLSEN, N. Excitation functions for structural frequency response measurements, 2nd International Modal Analysis Conf., pp.894-901, 1984.
- [46] NATKE, H.G.; ROTERT, D. Determination of normal modes from identified complex modes, Z. Flugwiss. Weltraumforsch., 9, Heft 2, pp.82-88, 1985.
- [47] ZHANG, L. et al. A polyreference domain method for modal parameter identification, ASME Design Eng. Div. Conference and Exhibit on Mech. Vibration and Noise, Sept., 1985.
- [48] EGGBRECHT, L.C. Interfacing to the IBM Personal Computer, Howard W. Sams & Co., Indianapolis, Indiana, 1985.
- [49] ZAVERI, K. Modal Analysis of Large Structures - Multiple Exciter Systems, Brüer & Kjaer, Naerum, Denmark, April,

1985.

- [50] LEURIDAN, J.M.; BROWN, D.L.; ALLEMANG, R.J. Time domain parameter identification methods for linear modal analysis : A unifying approach, J. of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, v.108, Jan., pp.1-8, 1986.
- [51] KANO, H. Identification method of MIMO linear dynamical systems for modal analysis of mechanical structures, Proc Am. Control Conference, Seattle, USA, June, 1986.
- [52] EWINS, D.J. Modal Testing : Theory and Practice, Research Studies Press Ltd., Letchworth, Hertfordshire, England, 1986.
- [53] BENDAT, J.S.; PIERSOL, A.G. Random Data, Wiley-Interscience, New York, 1986.
- [54] KANO, H.; MATSUMOTO, F.; KANEKO, J. Experimental modal analysis of vibrating systems : A method for modal parameter identification and its software package, Fujitsu Sci. Tech. J., v.23, n.1, pp.55-69, March, 1987.
- [55] STROUD, R.C. Excitation, Measurement, and Analysis Methods for Modal Testing, Sound and Vibration, Aug., pp.12-27, 1987.
- [56] SMITH, S.; MCGINN, S. The design of high-performance data acquisition systems, Sound and Vibration, Nov., pp.18-24, 1987.
- [57] LALLY, M.J.; BROWN, D.L. Structcel - A new instrumentation system, Sound and Vibration, Nov., pp.28-33, 1987.
- [58] YOSHIMURA, T.; NAGAMATSU, A. Modal parameter estimation with multi-reference curve fitting, JSME International Journal,

v.30, n.261, pp.476-81, 1987.

- [59] OOKUMA, M.; NAGAMATSU, A. Experimental identification of a mechanical structure with characteristic matrices, JSME International Journal, v.30, n.264, pp.970-975, 1987.
- [60] NAGAMATSU, A. Recent Advances of Modal Analysis in Japan, JSME International Journal, v.30, n.268, pp.1526-33, 1987.
- [61] NATKE, H.G. Identification of Structures : Measurement, Excitation, Time series and Modal Analysis, Lab. de Din. de Sistemas Mecânicos e Estruturas, I.T. Univ. Fed. Espírito Santo, 1987.
- [62] LJUNG, L. System Identification, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
- [63] EWINS, D.J.; IMREGUN, M. On the reliability of computational dynamic response prediction capabilities (DYNAS), J. of The Soc. of Environmental Eng., March, pp.3-28, 1988.
- [64] LEMBREGTS, F.; LEURIDAN, J.; MERGEAY, M. Multiple input broad band and stepped-sine modal analysis, J. of The Soc. of Environmental Eng., March, pp.15-22, 1988.
- [65] IBRAHIM, S.R. Correlation of analysis and test in modelling of structures: Assesment and Review, J. of the Soc. of Environmental Eng., March, pp.39-44, 1988.
- [66] FULLEKRUG, U. Survey of parameter estimation methods in experimental modal analysis, J. of The Soc. of Environmental Eng., March, pp.31-34, 1988.
- [67] BRAUN, S.; SNEOR, A. On the accuracy of parametric and classical Spectra, J. of Vibration, Acoustic, Stress, and Reliability in Design, v.110, April, pp.213-219, 1988.
- [68] LAWRENCE, C. Identification of differences between finite

- element analysis and experimental vibration data, J. S. Dyn. Eng., June, pp.13-19., 1988.
- [69] MOTTERSHEAD, J.E. A unified theory of recursive, frequency domain filters with application to system identification in structural dynamics, Trans. of the ASME, v.110, July, pp.360-365, 1988.
- [70] FABUNMI, J.; CHANG, P.; VORWALD, J. Damping matrix identification using the spectral basis technique, Trans. of the ASME, v.110, July, pp.332-337, 1988.
- [71] FABUNMI, J.A.; TASKER, F.A. Advanced techniques for measuring structural mobilities, J. of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, v.110, July, pp.345-49, 1988.
- [72] MITAL, N.K. PC - based Dynamic Analysis, Computers in Mechanical Engineering, Sept/Oct., pp.18-25, 1988.
- [73] ECKEL, B. Delving into the black arts : Buildd a PC card adapter in an hour, or so, Micro Cornucopia, Sept./Oct., pp.42-47, 1988.
- [74] BREITBACH, E.J. Recent developments in multiple input modal analysis, Trans. of the ASME, v.110, Oct., pp.478-484, 1988.
- [75] EBERSBACH, P.; IRRETIER, H. Some applications of modal parameter estimation techniques, 2nd German/Brazilian Symposium on Dynamical Systems in Mechanics, Kleinwalsertal, Germany, Sept., 1988.
- [76] MOHAN, B.M.; DATTA, K.B. Lumped and distributed parameter system identification via shifted Legendre Polynomials, Trans. of the ASME, v.110, Dec., pp.436-440, 1988.
- [77] NATKE, H.G. Updating computational models in the frequency

- domain based on measured data : a survey, Probabilistic Engineering Mechanics, v.3, n.1, pp.28-35, 1988.
- [78] NATKE, H.G. Einführung in theorie und praxis der zeitreihen und modalanalyse, 2. Auflage, Vieweg & Sohn, Braunschweig, Wiesbaden, 1988.
- [79] TRETHERWEY, M.W. et al. The PC as a laboratory tool Computers in Mechanical Engineering, Sept., pp.26-33, 1988.
- [80] PERTENCE, A. Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos, McGraw Hill, São Paulo, 1989.
- [81] NOLAN, T. Real Time Data Acquisition Using DMA, Dr. Dobb's Journal, Jan., pp.28-37 94-96, 1990.

APENDICE A: PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

PROGRAMA DE ANALISE MODAL EXPERIMENTAL PARA IBM PC

```
-----  
| {analise_modal realiza as seguintes funcoes: adquire dados, abre arqu  
| mostra grafico, prepara os sinais, determina a funcao de resposta  
| em frequencia, estima parametros modais}  
-----
```

```
program Anal_modal;
```

```
  {$N+}{$E+}{$M 65520,0,655360}  
  uses Graph,Crt;  
  Const ESC = #27;  
  var  menu : Char;
```

```
  procedure Cria_arquivo;
```

```
{ Cria arquivo em disco a partir dos dados coletados  
que se encontram na memória a partir do endereço $ 4000:0000.  
Prestar atenção em guardar o endereço do trigger dado pela  
"procedure" "adquire dados". Este é o offset do endereço no qual o  
sinal do canal A ultrapassou pela primeira vez o nível do  
trigger.}
```

```
  type Nome_arquivo = String[12];  
       Arquivo_dados = file of Integer;
```

```
  var  nome_arq,nome_arq1 : Nome_arquivo;  
       arq_dad1,arq_dad2 : Arquivo_dados;  
       cont: word;  
       valor,  
       num_amo,off : Integer;
```

```
begin
```

```
  Write(' Numero de amostras (inteiro de 1 a 8000) = ');  
  Readln(num_amo);  
  Write(' Offset do endereco inicial (multiplo de 4) = ');  
  Readln(off);  
  write(' Nome do arquivo do canal A = ');  
  Readln(nome_arq);  
  Write(' Nome do arquivo do canal B = ');
```



```

Readln(nome_arq1);
Assign(arq_dad1,nome_arq);
Rewrite(arq_dad1);
cont:=0;
{Lê dados de força}
While (cont<num_amo*4) do
  begin
    valor:=mem[$4000:cont+off]*4+(mem[$4000:cont+off+1])shr(6);
    cont:=cont+4;
    Write(arq_dad1,valor);
  end;
Close(arq_dad1);
cont:=0;
{ Lê dados de aceleração}
Assign(arq_dad2,nome_arq1);
Rewrite(arq_dad2);
While (cont<num_amo*4) do
  begin
    valor:=mem[$4000:cont+off+2]*4+(mem[$4000:cont+off+3])shr(6);
    cont:=cont+4;
    Write(arq_dad2,valor);
  end;
Close(arq_dad2);
end;{Cria_arquivo}

```

{Calcula a FFT de sinais temporais e posteriormente as densidades espectrais de energia. Observar que o numero de pontos da FFT precisa ser um numero da forma 2^n }

```

procedure espectro;

```

```

  type Nome_arq = String[10];
       Arq_nome = file of integer;
       Arq_real = file of real;
       Vetor = Array[1..4096] of real;
  var  var_arq1,var_arq2 : Arq_nome;
       var_arq3,var_arq4,var_arq5,var_arq6 : Arq_real;
       arq1,arq2,arq3,arq4,arq5,arq6 : Nome_arq;
       cont,num_pontos,c,NN,IP,II : integer;
       EE,LE,L,LE1,JJ,Mi,Nv2,NM1,I,J,K,NNN : Integer;
       x,y : Vetor;
       valor,Ure,UU,Uim,Wre,Wim,Tre,Tim,T,F,xr,xi,yr,yi,dec : real
       dado : integer;

```

{ O algoritmo empregado para a FFT é chamado de "decimation in time".

```

  begin
    WriteLn;

```

```

Write(' Numero de pontos do arquivo =');
Readln(NN);
Write(' Nome do arquivo real =');
Readln(arq1);
Write(' Nome do arquivo imaginario =');
Readln(arq2);
write(' Entre com o decaimento logaritmico da janela exp. =');
readln(dec);
Write(' Nome do arquivo da Gyx parte real =');
Readln(arq3);
Write(' Nome do arquivo da Gyx parte imag. =');
Readln(arq4);
Write(' Nome do arquivo da Gxx =');
Readln(arq5);
Write(' Nome do arquivo da Gyy =');
Readln(arq6);
write('Numero de pontos de Gyx, Gxx e Gyy =');
Readln(NNN);
Assign(var_arq1,arq1);
Reset(var_arq1);
{carrega memoria com dados dos arquivos arq1 e arq2 e
 multiplica pela janela de forca}
For I:=1 to NN-1 do
  begin
    read(var_arq1,dado);
    X[I]:=-((dado-512)/512)*5*exp(50*ln(1-sin(pi/2*(I-1)/(NN-1
)))

  end;
  X[NN]:=0;
Close(var_arq1);
Assign(var_arq2,arq2);
Reset(var_arq2);
For I:=1 to NN do
  begin
    read(var_arq2,dado);
    Y[I]:=((dado-512)/512)*5*exp(-dec*(I-1)/(NN-1));
  end;
Close(var_arq2);
{calculo das ffts*****}
M1:=round(Ln(NN)/Ln(2));
NV2:=round(NN/2);
NM1:=NN-1;
J:=1;
I:=1;
While (I<=NM1) do
  begin
    If (I<J) then
      begin
        Tre:=X[J];
        Tim:=Y[J];
        X[J]:=X[I];
        Y[J]:=Y[I];
        X[I]:=Tre;
        Y[I]:=Tim;
      end;
    K:=NV2;
    While (K<J) do
      begin
        J:=J-K;

```

```

        K:=round(K/2);
    end;
    J:=J+K;
    I:=I+1;
end;          {fim do processo de bit reversal}
For L:=1 to M1 do
begin
    LE:=round(exp(L*Ln(2)));
    LE1:=round(LE/2);
    Ure:=1;
    Uim:=0;
    Wre:=cos(Pi/LE1);
    Wim:=sin(-Pi/LE1);
    For JJ:=1 to LE1 do
        begin
            II:=JJ;
            While (II<=NN) do
                begin
                    IP:=II+LE1;
                    Tre:=Ure*X[IP]-Uim*Y[IP];
                    Tim:=Ure*Y[IP]+Uim*X[IP];
                    X[IP]:=X[II]-Tre;
                    Y[IP]:=Y[II]-Tim;
                    X[II]:=X[II]+Tre;
                    Y[II]:=Y[II]+Tim;
                    II:=II+LE;
                end;
                UU:=Ure;
                Ure:=Ure*Wre-Uim*Wim;
                Uim:=UU*Wim+Uim*Wre;
            end;
        end;
        WriteLn;
        Write(' Fim da fft ');
        Assign(var_arq3,arq3);
        Rewrite(var_arq3);
        Assign(var_arq4,arq4);
        Rewrite(var_arq4);
        Assign(var_arq5,arq5);
        Rewrite(var_arq5);
        Assign(var_arq6,arq6);
        Rewrite(var_arq6);
        X[NN+1]:=X[1];
        Y[NN+1]:=Y[1];
{Calcula Gxyr, Gxyi, Gxx, Gyy e cria arquivos}
        writeln;
        For c:=1 to NNN do
            begin
                valor:=1/2*(X[c]*Y[NN+2-c]+X[NN+2-c]*Y[c]);
                Write(var_arq3,valor);
                valor:=1/4*(-sqr(X[c])+sqr(X[NN+2-c])-sqr(Y[c])+sqr(Y[NN+
c]]));
                Write(var_arq4,valor);
                valor:=1/4*(sqr(X[c]+X[NN+2-c])+sqr(Y[c]-Y[NN+2-c]));
                Write(var_arq5,valor);
                valor:=1/4*(sqr(Y[c]+Y[NN+2-c])+sqr(X[NN+2-c]-X[c]));
                Write(var_arq6,valor);
            end;

```

```

Close(var_arq3);
Close(var_arq4);
Close(var_arq5);
Close(var_arq6);
sound(400);
delay(50);
nosound;
end;{procedure espectro, calcula Gyx -- Gxx --}

```

```

procedure FFT;
{Calcula a FFT de um sinal real e envia dois arquivos para o
disco. Um real e outro da parte imaginária da FFT}

```

```

type Nome_arq = String[10];
Arq_nome = file of integer;
Arq_real = file of real;
Vetor = Array[1..4096] of real;
var var_arq1 : Arq_nome;
var var_arq3,var_arq4 : Arq_real;
arq1,arq3,arq4 : Nome_arq;
cont,num_pontos,c,NN,IP,II : integer;
EE,LE,L,LE1,JJ,M1,Nv2,NM1,I,J,K,dado : Integer;
x,y : Vetor;
valor,Ure,UU,Uim,Wre,Wim,Tre,Tim,T,F : real;
begin
WriteLn;
Write(' Numero de pontos do arquivo = ');
Readln(NN);
Write(' Nome do arquivo real = ');
Readln(arq1);
Write(' Nome do arquivo da FFT parte real = ');
Readln(arq3);
Write(' Nome do arquivo da FFT parte imag. = ');
Readln(arq4);
Assign(var_arq1,arq1);
Reset(var_arq1);
{carrega memoria com dados do arq1 e
multiplica pela janela de Hanning}
For I:=1 to NN do
begin
Read(var_arq1,dado);
X[I]:=((dado-512)/512)*5*(1-sin(pi/2*(I-1)/(NN-1)));
Y[i]:=0;
end;
Close(var_arq1);
{calculo das ffts*****}
M1:=round(Ln(NN)/Ln(2));
NV2:=round(NN/2);
NM1:=NN-1;
J:=1;
I:=1;
While (I<=NM1) do
begin
If (I<J) then
begin
Tre:=X[J];

```

```

        Tim:=Y[J];
        X[J]:=X[I];
        Y[J]:=Y[I];
        X[I]:=Tre;
        Y[I]:=Tim;
    end;
    K:=NV2;
    While (K<J) do
    begin
        J:=J-K;
        K:=round(K/2);
    end;
    J:=J+K;
    I:=I+1;
end; {fim do processo de bit reversal}
For L:=1 to Mi do
begin
    LE:=round(exp(L*Ln(2)));
    LE1:=round(LE/2);
    Ure:=1;
    Uim:=0;
    Wre:=cos(Pi/LE1);
    Wim:=sin(-Pi/LE1);
    For JJ:=1 to LE1 do
    begin
        II:=JJ;
        While (II<=NN) do
        begin
            IP:=II+LE1;
            Tre:=Ure*X[IP]-Uim*Y[IP];
            Tim:=Ure*Y[IP]+Uim*X[IP];
            X[IP]:=X[II]-Tre;
            Y[IP]:=Y[II]-Tim;
            X[II]:=X[II]+Tre;
            Y[II]:=Y[II]+Tim;
            II:=II+LE;
        end;
        UU:=Ure;
        Ure:=Ure*Wre-Uim*Wim;
        Uim:=UU*Wim+Uim*Wre;
    end;
end;
Assign(var_arq3,arq3);
Rewrite(var_arq3);
Assign(var_arq4,arq4);
Rewrite(var_arq4);
For c:=1 to NV2 do
begin
    valor:=X[c];
    Write(var_arq3,valor);
    valor:=Y[c];
    Write(var_arq4,valor);
end;
Close(var_arq3);
Close(var_arq4);
end;{procedure FFt}

```

```

procedure Grafico;
{Exibe gráfico de um sinal real com valores de -5 a + 5}

Const ESC = #27;

type Nome_arq = file of integer;
      Arq_nome = String[10];

var var_arq : Nome_arq;
    menu : Char;
    grdriver, grmode : integer;
    valor, inicio, fim, contador, dado : Integer;
    arquivo : Arq_nome;
begin
  Writeln;
  Write(' Nome do arquivo : ');
  Readln(arquivo);
  Write(' Ponto inicial do arquivo a ser plotado : ');
  Readln(inicio);
  Write(' Ponto final a ser plotado (MAX 645) : ');
  Readln(fim);
  Assign(var_arq, arquivo);
  Reset(var_arq);
  grdriver:=1;
  grmode:=4;
  Initgraph(grdriver, grmode, '');
  line(0,0,0,199);
  line(0,0,639,0);
  line(639,0,639,199);
  line(0,199,639,199);
  For contador:=1 to inicio-1 do
  begin
    Read(var_arq, dado);
  end;
  moveto(0,100);
  For contador:=inicio to fim do
  begin
    Read(var_arq, dado);
    valor:=200-round(dado*(0.2));
    lineto(contador-inicio, valor);
  end;
  Close(var_arq);
  menu:=Readkey;
  Closegraph;
  If (menu=ESC) then
  begin
    Write('Fim do Programa ');
  end;
end; {grafico}

```

```
procedure graficopsdmod;
```

```
Const ESC = #27;
```

```
type Nome_arq = file of real;
```

```
Arq_nome = String[10];
```

```
var x,menu : Char;
```

```
var_arq1,var_arq2,var_arq3 : Nome_arq;
```

```
dado1,dado2 : real;
```

```
p,i,valor,driver,col,mode,inicio,fim,contador : Integer;
```

```
arq,arquivoreal,arqimg : Arq_nome;
```

```
ps : string[10];
```

```
dado3 : real;
```

```
begin
```

```
Writeln;
```

```
Write(' Nome do arquivo real: ');
```

```
Readln(arquivoreal);
```

```
Write(' Nome do arquivo imaginario: ');
```

```
Readln(arqimg);
```

```
Write(' Nome da funcao de coerencia: ');
```

```
Readln(arq);
```

```
Write(' Ponto inicial do arquivo a ser plotado :');
```

```
Readln(inicio);
```

```
Write(' Ponto final a ser plotado (MAX 645) : ');
```

```
Readln(fim);
```

```
Assign(var_arq1,arquivoreal);
```

```
Reset(var_arq1);
```

```
Assign(var_arq2,arqimg);
```

```
Reset(var_arq2);
```

```
Assign(var_arq3,arq);
```

```
Reset(var_arq3);
```

```
driver:=1;
```

```
mode:=4;
```

```
initgraph(driver,mode,'');
```

```
rectangle(30,0,629,159);
```

```
Outtextxy(16,68,'0');
```

```
Outtextxy(8,75,'dB');
```

```
Outtextxy(8,28,'20');
```

```

Outtextxy(8,36,'dB');
Outtextxy(0,108,'-20');
Outtextxy(8,116,'dB');
outtextxy(20,162,'0.0');
outtextxy(122,162,'0.5');
outtextxy(225,162,'1.0');
outtextxy(327,162,'1.5');
outtextxy(430,162,'2.0');
outtextxy(530,162,'2.5');
Outtextxy(290,176,'FREQUENCIA (kHz)');
Outtextxy(4,0,'m');
Outtextxy(17,8,'2');
Outtextxy(0,1,'_');
Outtextxy(0,10,'Ns');
outtextxy(632,0,'1');
outtextxy(632,152,'0');
Setlinestyle(1,0,1);
Line(132,0,132,159);
Line(235,0,235,159);
Line(337,0,337,159);
Line(440,0,440,159);
Line(542,0,542,159);
Line(30,39,629,39);
Line(30,79,629,79);
Line(30,119,629,119);
Setlinestyle(0,0,1);
for contador:=1 to inicio do
  begin
    Read(var_arq1,dado1);
    Read(var_arq2,dado2);
    Read(var_arq3,dado3);
  end;
  valor:=79-round(40*ln(sqrt(sqr(dado1)+sqr(dado2)))/ln(10));
  moveto(30,valor);
for contador:=inicio+1 to fim do
  begin
    Read(var_arq1,dado1);
    Read(var_arq2,dado2);
    valor:=79-round(40*ln(sqrt(sqr(dado1)+sqr(dado2)))/ln(10));

```



```

    lineto(30+contador-inicio+1,valor);
    end;
Close(var_arq1);
Close(var_arq2);
setlinestyle(1,0,1);
moveto(30,159-round(dado3*159));
for contador:=inicio+1 to fim do
    begin
        Read(var_arq3,dado3);
        lineto(30+contador-inicio+1,159-round(dado3*159));
        end;
    Close(var_arq3);
p:=31;
repeat
{
    Outtextxy(0,184,'Pressione d ou e p/ mov. o cursor ou ESC ESC p/
sair');
    Outtextxy(0,192,'Pressione m p/ marcar o numero da coluna do curs
x:=Readkey;
setwritemode(1);
setlinestyle(0,0,1);
If (x<>ESC) then
    case x of
        'D','d' : begin
            Line(p,0,p,159);
            p:=p+1;
            Line(p,0,p,159);
            str(p-31,ps);
            setviewport(560,170,639,180,clipon);
            clearviewport;
            Outtextxy(1,1,ps);
            graphdefaults;
        end;
        'e','E' : begin
            Line(p,0,p,159);
            p:=p-1;
            Line(p,0,p,159);
            str(p-31,ps);
            setviewport(560,170,639,180,clipon);
            clearviewport;
            Outtextxy(1,1,ps);

```

```

graphdefaults;
end;

end;(case)
until (x=ESC);
Closegraph;
window(1,1,80,25);
clrscr;
end; (graficopsdmod)

```

```

procedure graficomplex;

```

```

Const ESC = #27;

```

```

type Nome_arq = file of real;
Arq_nome = String[10];

```

```

var menu : Char;
var_arq1,var_arq2 : Nome_arq;
dado1,dado2 : real;
valor,driver,mode,inicio,fim,contador : Integer;
arquivoreal,arqimg : Arq_nome;

```

```

begin

```

```

Writeln;
Write(' Nome do arquivo real: ');
Readln(arquivoreal);
Write(' Nome do arquivo imaginario: ');
Readln(arqimg);
Write(' Ponto inicial do arquivo a ser plotado :');
Readln(inicio);
Write(' Ponto final a ser plotado (MAX 645) : ');
Readln(fim);
Assign(var_arq1,arquivoreal);
Reset(var_arq1);
Assign(var_arq2,arqimg);
Reset(var_arq2);
driver:=1;
mode:=4;
initgraph(driver,mode,'');
line(0,0,0,199);

```

```

line(0,0,639,0);
line(639,0,639,199);
line(0,199,639,199);
line(0,99,639,99);
for contador:=1 to inicio-1 do
  begin
    Read(var_arq1,dado1);
    Read(var_arq2,dado2);
    end;
for contador:=inicio to fim do
  begin
    Read(var_arq1,dado1);
    Read(var_arq2,dado2);
    valor:=50-round(10*dado1);
    line(contador-inicio+1,50,contador-inicio+1,valor);
    valor:=150-round(10*dado2);
    line(contador-inicio+1,150,contador-inicio+1,valor);
    end;
Close(var_arq1);
Close(var_arq2);
menu:=Readkey;
Closegraph;
If (menu=ESC) then
  WriteLn('Fim do Programa ');

end; (graficomplex)

```

```

procedure Nyquist;

```

```

  Const ESC = #27;

```

```

  type Nome_arq = file of real;

```

```

    Arq_nome = String[10];

```

```

  var menu : Char;

```

```

    var_arq1,var_arq2 : Nome_arq;

```

```

    dado1,dado2,cx,cy,rr : real;

```

```

teta,fe,valor1,valor2,driver,mode,inicio,fim,contador : Integ
arquivoreal,arqimg : Arq_nome;
deltaf,ft : real;
begin
  Writeln;
  Write(' Nome do arquivo real: ');
  Readln(arquivoreal);
  Write(' Nome do arquivo imaginario: ');
  Readln(arqimg);
  Write(' Ponto inicial do arquivo a ser plotado : ');
  Readln(inicio);
  Write(' Ponto final a ser plotado (MAX 645) : ');
  Readln(fim);

  Write('Entre com a resolucao em frequencia (dF=taxa_amostragem/
  Readln(deltaf);
  Write(' Coordenada real da circunferencia ajustada =');
  readln(cx);
  Write(' Coordenada imag. da circunferencia ajustada =');
  readln(cy);
  Write(' Raio da circunferencia ajustada =');
  readln(rr);
  Write(' Fator de ajuste da escala =');
  readln(fe);
  Assign(var_arq1,arquivoreal);
  Reset(var_arq1);
  Assign(var_arq2,arqimg);
  Reset(var_arq2);
  driver:=1;
  mode:=4;
  initgraph(driver,mode,'');
  Rectangle(50,0,550,150);
  Setlinestyle(1,0,1);
  line(300,0,300,150);
  outtextxy(552,79,'Re');
  line(50,79,550,79);
  outtextxy(305,5,'Im');
  read(var_arq1,dado1);
  read(var_arq2,dado2);

```

```

type Nome_arq = file of real;
   Arq_nome = String[10];

var menu : Char;
   var_arq1, var_arq2 : Nome_arq;
   wr, br, tr, QQ, DD, WW,
   tt, AA, BB, CC, a, b, c, d, e, f, p, q, r, dd1, dd2, raio, df : real;
   x0, y0 : real;
   pa, pb, inc, i, fim, pt : Integer;
   arqreal, arqimg : Arq_nome;
   t, w, dt, dwdt, d1, d2 : array[-1..1000] of real;
   lst : text;

begin
   assign(lst, 'lpt1');
   rewrite(lst);
   Writeln;
   Write(' Nome do arquivo real: ');
   Readln(arqreal);
   writeln(lst, arqreal);
   Write(' Nome do arquivo imaginario: ');
   Readln(arqimg);
   writeln(lst, arqimg);

   Write(' Entre com a resolucao em frequencia (dF=taxa_amost./N):
   Readln(df); >df:=4.8828125;
   repeat
   Write(' Ponto inicial do arquivo a ser plotado :');
   Readln(inc);
   Write(' Ponto final a ser plotado : ');
   Readln(fim);
   Assign(var_arq1, arqreal);
   Reset(var_arq1);
   Assign(var_arq2, arqimg);
   Reset(var_arq2);
   for i:=1 to inc-1 do
      begin
         Read(var_arq1, dd1);
         Read(var_arq2, dd2);
      end;
   a:=0; b:=0; c:=0; d:=0; e:=0; f:=0; p:=0; q:=0; r:=0;

```

```

moveto(300,79);

for contador:=1 to inicio-1 do
  begin
    Read(var_arq1,dado1);
    Read(var_arq2,dado2);
  end;

setlinestyle(0,0,1);
ft:=0.453;
read(var_arq1,dado1);
read(var_arq2,dado2);
  valor1:=round(fe*dado2/(contador*deltaf*2*pi));
  valor2:=round(-fe*dado1/(contador*deltaf*2*pi));
moveto(300+valor1,79-round(valor2*ft));
for contador:=inicio+1 to fim do
  begin
    Read(var_arq1,dado1);
    Read(var_arq2,dado2);
    valor1:=round(fe*dado2/(contador*deltaf*2*pi));
    valor2:=round(-fe*dado1/(contador*deltaf*2*pi));
    lineto(300+valor1,79-round(valor2*ft));
  end;

Close(var_arq1);
Close(var_arq2);
moveto(300+round(fe*(cx+rr)),79-round(fe*ft*(cy)));
for teta:=1 to 360 do
  begin
    lineto(300+round(fe*(cx+rr*cos(teta*pi/180))),79-round(fe*
      ft*(cy+rr*sin(teta*pi/180))));
  end;
menu:=Readkey;
Closegraph;

end; (Nyquist)

```

```

procedure Ajusta_circ;(ajusta circulo de menor erro quadratico
  e calcula constantes modais)

```

```

Const ESC = #27;

```

```

f:=fim-inc+1;
for i:=0 to fim-inc do
  begin
    w[i]:=(i+inc-1)*2*pi*df;
    Read(var_arq1,dd1);
    Read(var_arq2,dd2);
    d1[i]:=dd2/w[i];
    d2[i]:=-dd1/w[i];
    a:=a+sqr(d1[i]);
    b:=b+sqr(d2[i]);
    c:=c+d1[i]*d2[i];
    d:=d+d1[i];
    e:=e+d2[i];
    p:=p-d1[i]*sqr(d1[i])-d1[i]*sqr(d2[i]);
    q:=q-d2[i]*sqr(d1[i])-d2[i]*sqr(d2[i]);
    r:=r-sqr(d1[i])-sqr(d2[i]);
  end;
Close(var_arq1);
Close(var_arq2);
AA:=(((p*e-q*d)/(c*e-b*d))*(b*f/e-e)-(q*f/e-r))/
      (((a*e-c*d)/(c*e-b*d))*(b*f/e-e)-(c*f/e-d));
BB:=((q*f-r*e)-AA*(c*f-d*e))/(b*f-e*e);
CC:=(r-d*AA-e*BB)/f;
raio:=sqrt(sqr(AA/2)+sqr(BB/2)-CC);
x0:=-AA/2;
y0:=-BB/2;
Writeln(' Centro da circunferencia (' ,x0,' ',y0,')');
Writeln(' Raio da circunferencia r =',raio);
writeln('r:',raio,' x0:',x0,' y0:',y0);
writeln(' Pressione alguma tecla ');
menu:=readkey;

for i:=0 to fim-inc do
  begin
    d1[i]:=d1[i]-x0;
    d2[i]:=d2[i]-y0;
  end;
t[0]:=arctan(d2[0]/d1[0]);
if (d2[0]>=0) then

```

```

begin
  if (t[0]<0) then
    t[0]:=pi+t[0];
  end;
if (d2[0]<0) then
  begin
    if (t[0]>=0) then
      t[0]:=pi+t[0];
    if (t[0]<0) then
      t[0]:=2*pi+t[0];
    end;
  tt:=t[0];
  for i:=0 to fim-inc do
    begin
      a:=d1[i];
      d1[i]:=d1[i]*cos(t[0])+d2[i]*sin(t[0]);
      d2[i]:=-a*sin(t[0])+d2[i]*cos(t[0]);
    end;
  for,i:=0 to fim-inc do
    begin
      t[i]:=arctan(d2[i]/d1[i]);
      if (d2[i]>=0) then
        begin
          if (t[i]<0) then
            t[i]:=-pi+t[i];
          if (t[i]>=0) then
            t[i]:=-2*pi+t[i];
          end;
        if (d2[i]<0) then
          begin
            if (t[i]>=0) then
              t[i]:=-pi+t[i];
            end;
          end;
        end;
      end;
    write('Ponto          Del sqr(Freq)          Teta          Dw_delTeta'
  for i:=1 to fim-inc do
    begin
      dt[i]:=t[i]-t[i-1];
      DwDt[i]:=(sqr(w[i])-sqr(w[i-1]))/dt[i];

```



```

        writeln;
        write(i+inc,' ',w[i]/(2*pi),' ',(t[i]+tt)*180/pi
            , ' ',abs(DwDt[i]));
    end;
for i:=0 to fim-inc do
    t[i]:=t[i]+tt;
writeln;
write(' Entre com o ponto de menor DwDt :');
readln(pt);

```

```

(   a:=0; c:=0; d:=0; e:=0; f:=0; p:=0; q:=0; r:=0;
    f:=fim-inc+1;
    for i:=2 to fim-inc do
        begin
            a:=a+sqr(sqr(w[i]));
            c:=c+sqr(w[i])*w[i];
            d:=d+sqr(w[i]);
            e:=e+w[i];
            r:=r+dwdt[i];
            q:=q+dwdt[i]*w[i];
            p:=p+dwdt[i]*sqr(w[i]);
        end;
    b:=d;
    AA:=((b*f-sqr(e))*(p*e-q*d)-(c*e-b*d)*(q*f-r*e))/((b*f-sqr(e))
        *(a*e-d*c)-(c*e-b*d)*(c*f-d*e));
    BB:=((q*f-r*e)-AA*(c*f-d*e))/(b*f-e*e);

    bb:=(dwdt[pt-inc+1]-dwdt[pt-inc-1])/(4*pi*df);
    aa:=(dwdt[pt-inc-1]+dwdt[pt-inc+1]-2*dwdt[pt-inc])/
        sqr(2*pi*df);
    wr:=-bb/(2*aa)+w[pt-inc]-df*pi;
    writeln('Frequencia natural :',wr/(2*pi));
    writeln(1st,'fr:',wr/(2*pi));
    pt:=round(wr/(2*pi*df));
    tr:=t[pt-inc]-((t[pt-inc]-t[pt-inc+1])*(wr-w[pt-inc]))
        /(2*pi*df);
    write(' Argumento =',tr);
    writeln(' Determinacao do fator de amortecimento');

```

```

repeat
  writeln(' Escolha um ponto para det. Br , menor que',pt);
  readln(pa);
  writeln(' Escolha um ponto para det. Br , maior que',pt);
  readln(pb);
  a:=sin((t[pa-inc]-tr)/2)/cos((t[pa-inc]-tr)/2);
  b:=sin((t[pb-inc]-tr)/2)/cos((t[pb-inc]-tr)/2);
  Br:=(sqr(w[pb-inc])-sqr(w[pa-inc]))/(2*wr*(w[pa-inc]*a
    -w[pb-inc]*b));
  writeln(' Fator de amortecimento Br =' ,Br);

```

```

writeln(' Pressione ESC para sair ou R para fazer novo calculo Br

```

```

  menu:=Readkey;

```

```

until (menu=esc);

```

```

(  writeln(' Entre com a melhor estimativa de Br = ');

```

```

  readln(Br);)

```

```

  writeln(lst,'br: ',br);

```

```

  writeln(' Argumento de (rC + jrD) =',tr);

```

```

  writeln(' Modulo de ( rC + jrD ) =', raio*4*Br*Wr);

```

```

(  DD:=raio*4*br*wr*cos(tr);

```

```

  CC:=raio*4*br*wr*sin(tr); )

```

```

  Writeln(' Se a constante modal provem de FRF cuja excitacao e no');

```

```

  Writeln(' mesmo ponto que a resposta pressione D, caso contrario T ');

```

```

  menu:=readkey;

```

```

  case menu of

```

```

    'D','d' :   begin

```

```

(      WW:=DD/2;

```

```

      QQ:=(Br*DD-CC)/(2*sqr(1-sqr(br)));

```

```

      c:=sqr((WW+sqr(sqr(WW)+sqr(QQ)))/2);

```

```

      d:=QQ/(2*c);)

```

```

      c:=sqr(raio*4*Br*Wr); d:=0;

```

```

      writeln(' Elemento do vetor modo de vib.= ');

```

```

      writeln(c,' + j ',d);

```

```

      writeln(lst,'c: ',c);

```

```

    end;

```

```

    'T','t' :   begin

```

```

writeln(' Parte real do elemento conhecido do vetor =
      readln(c);

writein(' parte imag. do elemento conhecido do vetor
      readln(d);
      WW:=DD/(2);
      QQ:=(Br*DD-CC)/(2*sqr(1-sqr(br)));
      e:=(WW/c+(QQ*d-WW*sqr(d)/c)/(sqr(c)+sqr(d));
      f:=(QQ*c-WW*d)/(sqr(c)+sqr(d));

      e:=4*Br*Wr*raio/c;f:=0;
      writeln(' Elemento do vetor modo de vibracao =');
      writeln(e,' + j ',f);
      writeln(lst,'e:',e);

      end;
end;(case)
writeln(' Pressione ESC para sair');
menu:=readkey;
until (menu=esc);
close(lst);
end; (Ajusta uma circunferencia no diagrama de Nyquist e calcula
      as constantes modais )

```

```

procedure Adquire_dados ;

{Inicializa o controlador de DMA
  Inicializa o contador 8253
  Adquire dados a partir do endereço $4000:0000 da memória de forma
  cíclica. Informa o endereço do trigger}

  const zero=0;
        num_pontos=2048;
        clock=838.097E-9;

var nivel : Byte;
    duracao, lsb, hsb : Integer;
    Ultimo,nc,lc,hc,valor : Integer;
    Level,frequencia : Real;
    i : word;
    current : longint;
begin
  For i:=0 to 65535 do
    begin
      MemW[$4000:i]:=0;
    end;
  Writeln;
  Write(' Frequencia de aquisição= ');
  Readln(frequencia);
  Writeln;
  Write(' Nivel de trigger de 0-5 volts =');
  Readln(Level);
  Nivel:=round(128 +128*level/5);
  duracao:=round(num_pontos/frequencia*1000);
  port[11]:=85;

{modo de DMA - single mode, adress increment, autoinicialização,
write transfer}

  port[131]:=4;{dma page}

{escolhe a pagina de DMA, 4000:0000, segmento 4 - endereço
inicial}

```

```

    port[12]:=0;
{clear flip flop - para que a proxima entrada de dados seja low
bit}

    port[02]:=00;{endereço inicial 50000}
{carrega low bits do offset, do endereço inicial}
    port[02]:=00;
{carrega high bits do offset do endereço inicial}
    port[03]:=255;
{low bits do numero de bytes da memoria dinamica}
    port[03]:=255;
{high bits do numero de bytes da memoria dinamica}
    port[08]:=00;
{command register}
    port[10]:=01;
{clear mask do canal 1 do DMA}
    I:=0;
    Ultimo:=128;
    {geracao de som}
    nc:=round((1/frequencia)/clock);
{periodo de aquisicao - clock/frequencia}
    hc:=nc shr 8;
    lc:=(nc shl 8) shr 8;
    port[$43]:=$B4;{modo 2 do canal 2 do contador}
{seleciona o modo 2 de contagem do canal 2 do contador 8253}
    port[$42]:=lc; {carrega periodo de contagem}
{low bit}
    port[$42]:=hc;
{escreve os high bit do valor de contagem}
    valor:=port[$61];
{guarda o valor da porta $6}
    port[$61]:=valor+3;
{permite a entrada do sinal de clock no contador 8253}
{verifica o nivel do trigger de cada ponto de memoria}

    repeat
        inc(i,4);
        until (Mem[$4000:i]>Nivel);
        Delay(duracao);
        port[$61]:=valor;
{retorna ao estado anterior/ reset di canal 1 de DMA}
        Writeln;
        Write('Endereço do trigger =',i);

```

```
port[10]:=5;
end;{Adquire_dados}
```

```
procedure FRF;
```

```
{ Calcula FRF e Funcao de Coerencia a partir de Gyx, Gxx, Gyy
e multiplica Gyx pela Funcao de Calibracao: }
```

```
type arq_dad = File of real;
```

```
var N,I,J : Integer;
    valor,cal : real;
    GO,G1,G2,G3,G4 : array[1..1024] of real;
    var_arq0,var_arq1,var_arq2,var_arq3,
    var_arq4,var_arq5,var_arq6,var_arq7 : arq_dad;
    Nome_arq0,nome_arq1,nome_arq2,nome_arq3,
    nome_arq4,nome_arq5,nome_arq6,nome_arq7 : string[12];
    menu, caso : char;
```

```
begin
```

```
{ Entradas: }
```

```
writeln;
writeln(' *** Arquivos de Entrada: ***');
writeln;
Write(' Nome da Gyx real = ');
Readln(nome_arq1);
Write(' Nome da Gyx imaginaria = ');
Readln(nome_arq2);
Write(' Nome da Gxx = ');
Readln(nome_arq3);
Write(' Nome da Gyy = ');
Readln(nome_arq4);
write(' Multiplica pela funcao de calibracao? (S ou N) : ');
readln(menu);
if (menu='s') or (menu='S')
then
begin
Write(' Nome do arquivo de calibracao = ');
Readln(nome_arq0);
end;
Write(' Numero de pontos da FRF = ');
Readln(N);
writeln;
writeln(' *** Arquivos de Saida: ***');
writeln;
Write(' Nome da frf -- parte real = ');
Readln(nome_arq5);
Write(' Nome da frf -- parte imaginaria = ');
Readln(nome_arq6);
write(' Nome da funcao de coerencia = ');
readln(nome_arq7);
```

```
{ Le Arquivos de Entrada: }
```

```

if (menu='s') or (menu='S')
  then
    begin
      Assign(var_arq0,nome_arq0);
      Reset(var_arq0);
      cal:=0;
      j:=1;
      for i:=1 to round(n/20)-1 do
        read(var_arq0,G0[i]);
      for i:=round(N/20) to round(N/3) do
        begin
          read(var_arq0,G0[i]);
          cal:=(cal*(j-1)+G0[i])/j;
          j:=j+1;
        end;
      close(var_arq0);
    end
  else
    cal:=1.0;
    Assign(var_arq1,nome_arq1);
    Reset(var_arq1);
    Assign(var_arq2,nome_arq2);
    Reset(var_arq2);
    Assign(var_arq3,nome_arq3);
    Reset(var_arq3);
    Assign(var_arq4,nome_arq4);
    Reset(var_arq4);
{lê arquivos}
    for i:=1 to N do
      read(var_arq1,G1[i]);
    for i:=1 to n do
      read(var_arq2,G2[i]);
    for i:=1 to n do
      read(var_arq3,G3[i]);
    for i:=1 to n do
      read(var_arq4,G4[i]);
    close(var_arq1);
    close(var_arq2);
    close(var_arq3);
    close(var_arq4);

{ Calcula FRF e Guarda em Arquivo: }

    Assign(var_arq5,nome_arq5);
    Rewrite(var_arq5);
    Assign(var_arq6,nome_arq6);
    Rewrite(var_arq6);
    writeln;
    write(' Escolha o estimador para FRF ? (H1=1, H2=2 ou H4=4) : ');
    readln(caso);
    case caso of
      '1' :
        For i:=1 to N do
          begin
            valor:=cal*G1[i]/G3[i];
            write(var_arq5,valor);

```

```

        valor:=cal*G2[i]/G3[i];
        write(var_arq6,valor);
    end;
'2' :
    For i:=1 to N do
        begin
            valor:=cal*G4[i]*G1[i]/(sqr(G1[i])+sqr(G2[i]));
            write(var_arq5,valor);
            valor:=cal*G4[i]*G2[i]/(sqr(G1[i])+sqr(G2[i]));
            write(var_arq6,valor);
        end;
'4' :
    For i:=1 to N do
        begin
            valor:=(cal*((G4[i]+sqr(G2[i]/G4[i]))*G3[i])*G1[i])/
                (+sqr(G2[i]/G4[i])*sqr(G3[i])+sqr(G1[i])+sqr(G2[i])));
            Write(var_arq5,valor);
            valor:=(valor*G2[i])/G1[i];
            Write(var_arq6,valor);
        end;
    end;{case}
    close(var_arq5);
    close(var_arq6);

```

{ Calcula Funcao de Coerencia e Guarda em Arquivo: }

```

    Assign(var_arq7,nome_arq7);
    Rewrite(var_arq7);
    For i:=1 to N do
        begin
            valor:=(sqr(G1[i])+sqr(G2[i]))/(G3[i]*G4[i]);
            Write(var_arq7,valor);
        end;
    close(var_arq7);

    sound(400);
    delay(50);
    nosound;
end;{ Calcula FRF e Funcao de Coerencia }

```

procedure FRFreq;

{calcula frf a partir da aceleraçao e do sinal de força}

type arq_dad = File of real;

```

var N,I : Integer;
    GG3,GG4,GG5,GG6,valor,cal : real;
    G3,G4,G5,G6 : array[1..1024] of real;
    var_arq1,var_arq2,
    var_arq3,var_arq4,var_arq5,var_arq6 : arq_dad;
    Nome_arq : string[12];
    menu : char;

```

```

begin
    Writeln;
    Write(' Nome da A(w) real = ');

```



```

Readln(nome_arq);
Assign(var_arq3,nome_arq);
Reset(var_arq3);
Writeln;
Write(' Nome da A(w) imaginaria = ');
Readln(nome_arq);
Assign(var_arq4,nome_arq);
Reset(var_arq4);
Writeln;
Write(' Nome da F(w) real = ');
Readln(nome_arq);
Assign(var_arq5,nome_arq);
Reset(var_arq5);
Writeln;
Write(' Nome da F(w) imag. = ');
Readln(nome_arq);
Assign(var_arq6,nome_arq);
Reset(var_arq6);
Writeln;
Write(' Numero de pontos da FRF = ');
Readln(N);
for i:=1 to n do
begin
read(var_arq3,g3[i]);
end;
for i:=1 to n do
begin
read(var_arq4,g4[i]);
end;
for i:=1 to n do
begin
read(var_arq5,g5[i]);
end;
for i:=1 to n do
begin
read(var_arq6,g6[i]);
end;
close(var_arq3);
close(var_arq4);
close(var_arq5);
close(var_arq6);
Writeln;
Write(' Nome da frf -- parte real = ');
Readln(nome_arq);
Assign(var_arq1,nome_arq);
Rewrite(var_arq1);
Write(' Nome da frf -- parte imaginaria = ');
Readln(nome_arq);
Assign(var_arq2,nome_arq);
Rewrite(var_arq2);
For i:=1 to N do
begin
valor:=(G3[i]*G5[i]+G6[i]*G4[i])/(sqr(G5[i])+sqr(G6[i]));
Write(var_arq1,valor);
valor:=(G4[i]*G5[i]-G6[i]*G3[i])/(sqr(G5[i])+sqr(G6[i]));
Write(var_arq2,valor);
end;
close(var_arq1);

```

```

    close(var_arq2);

    end;{calcula FRF a partir de A(w)/F(w)}

procedure pondera_arq;

{ Pondera Arquivos para obtencao das Espectancias das Densidades Espec
ais
segundo a formula  $arq1 = \frac{(n-1) arq1 + arq2}{n}$  }

type  arq_dad = File of real;

var  N,M,I,J : Integer;
     var_arq1,var_arq2 : arq_dad;
     Nome_arq1,nome_arq2 : string[12];
     valor1,valor2 : array[1..2048] of real;

begin

{ Entradas: }

Writeln;
write(' Numero de arquivos a ponderar = ');
Readln(M);
Write(' Nome do arquivo de saida da ponderacao = ');
Readln(nome_arq1);
Assign(var_arq1,nome_arq1);
Rewrite(var_arq1);
Write(' Numero de pontos dos arquivos = ');
Readln(N);

{ Le primeiro arquivo: }

writeln;
Write(' Nome do 1. arquivo a ser somado = ');
Readln(nome_arq2);
Assign(var_arq2,nome_arq2);
Reset(var_arq2);
for i:=1 to n do
    begin
        read(var_arq2,valor1[i]);
    end;

{ Le demais arquivos e calcula media ponderada: }

for J:=2 to M do
    begin
        Writeln;
        Write(' Nome do ',J,'. arquivo a ser somado = ');
        Readln(nome_arq2);
        Assign(var_arq2,nome_arq2);
        Reset(var_arq2);
        for i:=1 to n do
            begin
                read(var_arq2,valor2[i]);
                valor1[i]:=(valor1[i]*(j-1)+valor2[i])/j;
            end;
        close(var_arq2);
    end;

```

```

    end;

{ Guarda Media Ponderada: }

for i:=1 to n do
    begin
        write(var_arq1,valor1[i]);
    end;
close(var_arq1);
end;{pondera_arq}

procedure Modo; {calcula elementos dos vetores modo de vibracao a
partir de wr, br, C e D}

type arq_dad = File of real;

var    CC,DD,Wr,Br,W,Q,c1,c2,d1,d2,cr,dr,ee,ff : double;

begin
    Writeln;
    Write(' Valor de rC , parte real da constante modal = ');
    Readln(CC);
    Write(' Valor de rD , parte imag. da constante modal = ');
    Readln(DD);
    Write(' Frequencia natural , Wr = ');
    Readln(Wr);
    Write(' Fator de amortecimento, Br = ');
    Readln(Br);
end;{calcula elemento do modo de vibracao a partir
da constante modal}

procedure calibra; {gera curva de calibracao a partir da FRF de
uma massa de valor conhecido}

type arq_dad = File of real;

var    N,I : Integer;
        m : real;
        var_arq1,var_arq2,var_arq3 : arq_dad;
        Nome_arq : string[12];
        dado,valor,val : array[1..2046] of real;

begin
    Writeln;
    Write(' Nome do arquivo frfr real = ');
    Readln(nome_arq);
    Assign(var_arq1,nome_arq);
    Reset(var_arq1);
    Write(' Nome do arquivo frfi imag. = ');
    Readln(nome_arq);
    Assign(var_arq2,nome_arq);
    Reset(var_arq2);
    Writeln;

```

```

Write(' Numero de pontos dos arquivos = ');
Readln(N);
for i:=1 to n do
  begin
    read(var_arq1,valor[i]);
  end;
for i:=1 to n do
  begin
    read(var_arq2,val[i]);
  end;
close(var_arq2);
close(var_arq1);
writeln;
write(' Valor da massa de calibracao em Kg. = ');
readln(m);
Write(' Nome do arquivo de calibracao = ');
readln(nome_arq);
Assign(var_arq3,nome_arq);
Rewrite(var_arq3);
For i:=1 to N do
  begin
    dado[i]:=1/(sqrt(sqr(valor[i])+sqr(val[i]))*m);
  end;
for i:=1 to n do
  begin
    write(var_arq3,dado[i]);
  end;
close(var_arq3);

end;{gera arquivo de calibracao a partir do modulo de gyx}

```

```

begin
  Clrscr;
  checkbreak:=true;
  repeat

```

```

{ Menu Principal: }

```

```

  Writeln;
  WriteLn('Pressione A para Aquirir dados');
  WriteLn('          B      Criar Arquivo');
  WriteLn('          C      Grafico do sinal');
  WriteLn('          D      Calculo da FRF via H1, H2 ou H4');
  WriteLn('          E      Calculo da FFT');
  WriteLn('          F      Calcula Gyx-Gxx-Gyy');
  WriteLn('          G      Grafico real-imag. de funcao comple
a');
  WriteLn('          H      Grafico do Modulo de Funcao comple
');
  WriteLn('          I      Pondera arquivos');
  WriteLn('          J      Calcula elemento de vetor modo');
  WriteLn('          K      Diagrama de Nyquist');
  Writeln('          L      Ajuste de circulo');
  Writeln('          M      Gera curva de calibracao');
  WriteLn('          N      Calculo da FRF via A(w)/F(w)');
  WriteLn('          ESC    Encerrar');
  menu:=Readkey;
  If (menu=ESC) then
    WriteLn('Fim do Programa')

```

```

else
case menu of
'A', 'a' :
begin
writeln;
writeln(' ---> A');
Adquire_dados;
end;
'B', 'b' :
begin
writeln;
writeln(' ---> B');
Cria_arquivo;
end;
'C', 'c' :
begin
writeln;
writeln(' ---> C');
Grafico;
end;
'D', 'd' :
begin
writeln;
writeln(' ---> D');
FrF;
end;
'E', 'e' :
begin
writeln;
writeln(' ---> E');
FFt;
end;
'F', 'f' :
begin
writeln;
writeln(' ---> F');
Espectro;
end;
'G', 'g' :
begin
writeln;
writeln(' ---> G');
Graficomplex;
end;
'H', 'h' :
begin
writeln;
writeln(' ---> H');
Graficopsdmod;
end;
'I', 'i' :
begin
writeln;
writeln(' ---> I');
Pondera_arq;
end;
'J', 'j' :
begin

```

```
        writeln;
        writeln(' ----> J');
        Modo;
    end;
    'K', 'k' :
    begin
        writeln;
        writeln(' ----> K');
        Nyquist;
    end;
    'L', 'l' :
    begin
        writeln;
        writeln(' ----> L');
        Ajusta_circ;
    end;
    'M', 'm' :
    begin
        writeln;
        writeln(' ----> M');
        Calibra;
    end;
    'N', 'n' :
    begin
        writeln;
        writeln(' ----> N');
        FrFreq;
    end;
end;{case}
until (menu=ESC);

end.{analise_modal}
```