

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ACELERÔMETRO
EM PVDF
E SUA APLICAÇÃO A SISTEMAS VIBRATÓRIOS**

Autor: Carlos Minor Tomiyoshi
Departamento de Engenharia Agrícola/CCT/UFPb.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR Carlos minor
Tomiyoshi E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 10/03/94.

Carlos Amadeu Pallerosi
ORIENTADOR

Trabalho apresentado à Comissão
de Pós-Graduação da Faculdade de
Engenharia Mecânica como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

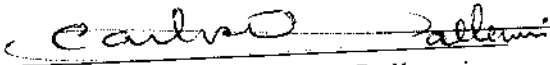
TESE DE DOUTORADO

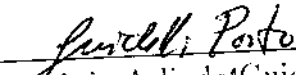
DESENVOLVIMENTO DE UM ACELERÔMETRO
EM PVDF
E SUA APLICAÇÃO A SISTEMAS VIBRATÓRIOS

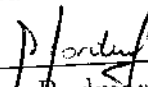
Autor: Carlos Minor Tomiyoshi

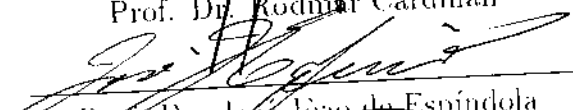
Orientador: Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi

Aprovada por :


Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi


Prof. Dr. Antônio Arlindo Guidetti Porto


Prof. Dr. Rodmar Cardinali


Prof. Dr. José João de Espíndola


Prof. Dr. Moysés Zindeluk

Campinas, 10 de janeiro de 1994.

- À minha filha Talissa, fonte de inspiração e alegria.
- À minha esposa Ivanete, pela amizade e apoio durante todos os momentos.
- Ao meu pai Yoshiji (*in memoriam*) meu maior incentivador.
- À minha mãe Tamako, meus irmãos Koju, Roberto e Lucy, familiares e amigos que sempre torceram por esse momento.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do curso de graduação em Engenharia de Software, sob a orientação do professor Dr. Roberto de Almeida, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof.Dr. Carlos Amadeu Pallerosi que, além de orientar, é um bom amigo, sempre disposto a colaborar e a ensinar;
- Ao Departamento de Engenharia Agrícola/CCT/UFPA, pela oportunidade oferecida para realizar esse Doutorado;
- A CAPES pelo apoio financeiro, importante para o sucesso deste trabalho;
- Aos Departamento de Projeto Mecânico da Faculdade de Engenharia Mecânica - FEM - UNICAMP, por todas as facilidades colocadas à disposição;
- Ao Prof. Dr. João Plaza pela ajuda inestimável em todos momentos deste trabalho;
- Ao Prof. Janito do Departamento Computacional pela configuração de todo o sistema de aquisição de dados, amizade e orientação.
- Ao Prof. Dr. Fausto Rodrigues, Prof. Anteliano e ao técnico Almiro, por terem colocado sempre a nossa disposição o Laboratório Ferroviário;
- Ao Eng. Kazume, Eng. Henrique (estagiário), do Centro de Tecnologia /Unicamp, pela orientação, apoio e amizade durante a realização dos ensaios realizados naquele Centro;
- Ao amigos Italo, Bernadino, Adilson, Cláudio, Acires, Ruy, Portela, Roberto, Nelson, Miro, Chico, Rosangela, Raquel, Claudete, Alexandre, Geraldo, Henrique pelo companheirismo demonstrado nestes anos;
- Aos amigos Hans Raj, José Geraldo Guimarães, Nelma, Márcio, Severino e Izinete pelo apoio nos momentos mais importantes do trabalho.

Conteúdo

CONTEÚDO	i
LISTA DE TABELAS	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
1 Introdução	1
1.0.1 Acelerômetro em PVDF (novo método).	4
2 Piezoeletricidade.	7
2.1 Generalidades.	7
3 Características do Polyvinylidene Fluoride.	11
3.1 Estrutura do PVDF.	11
3.2 Polarização da película de PVDF.	17
3.3 Fenômeno de transdução no PVDF.	19
3.3.1 Introdução.	19
3.3.2 Modelo ferroelétrico dipolar do PVDF.	21
3.3.3 Conceito de transdução.	22
3.3.4 Formulação de respostas piezoelétricas.	23
3.4 Processos de interação entre sistemas elétrico, mecânico e térmico.	24
3.5 Comparação do Polyvinylidene Fluoride com outros materiais piezoelétricos.	30

4	Materiais e Métodos.	35
4.1	Generalidades.	35
4.2	Metodologia de medida do fluxo de energia.	36
4.2.1	Aspectos gerais e constitutivos da Mesa Absorvedora de Vibração.	38
4.2.2	Medidas das forças estáticas e dinâmicas.	41
4.2.3	Características dimensionais da Mesa Absorvedora de Vibração.	41
4.2.4	Características do corpo elástico do dinamômetro.	43
4.2.5	Aferição estática do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.	45
4.2.6	Análise de regressão dos valores da aferição estática.	45
4.2.7	Inversão da Reta de Regressão.	48
4.2.8	Aferição dinâmica do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.	51
4.2.9	Determinação do fator de amplificação e da distorção de fase.	55
4.2.10	Características dinâmicas da Mesa Absorvedora de Vibração.	55
4.2.11	Metodologia de medida e processamento dos sinais da força e da aceleração da Mesa Absorvedora de Vibração.	57
4.2.12	Processamento dos sinais da força e da aceleração via referência interna.	63
4.2.13	Cálculo do fluxo de energia gerado pelo sistema dinâmico.	63
4.3	Metodologia de qualificação do sistema dinâmico.	64
4.3.1	Características dinâmicas do acelerômetro em PVDF.	66
4.3.2	Análise de regressão dos valores da aferição dinâmica.	71
4.3.3	Inversão da Reta de Regressão.	71
4.3.4	Equipamentos utilizados no levantamento das características dinâmicas do acelerômetro em PVDF.	73
4.3.5	Geração e tratamento dos sinais gerados pelo acelerômetro em PVDF.	73
4.3.6	Instrumentação utilizada na metodologia de qualificação do sistema dinâmico.	75
5	Resultados - metodologia de medida do fluxo de energia.	77
5.1	Introdução.	77
5.1.1	Aferição estática do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.	77
5.1.2	Inversão da Reta de Regressão.	79

5.1.3	Aferição dinâmica do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.	81
5.1.4	Caracterização dinâmica da Mesa Absorvedora de Vibração.	84
5.1.5	Valores medidos da força, aceleração e cálculo do fluxo de energia.	87
5.1.6	Dispersão dos dados da força e aceleração.	87
6	Resultados - metodologia de qualificação de sistemas dinâmicos.	95
6.1	Introdução.	95
6.2	Qualificação do sistema dinâmico utilizando o acelerômetro em PVDF.	95
6.2.1	Características dinâmica do acelerômetro em PVDF.	95
6.2.2	Inversão da Reta de Regressão.	96
6.3	Verificação da metodologia de qualificação do sistema dinâmico.	100
7	Discussão dos resultados.	119
7.1	Metodologia de medida do fluxo de energia.	119
7.1.1	Aferição estática do Dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.	119
7.1.2	Aferição dinâmica do Dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.	119
7.1.3	Características dinâmicas da Mesa Absorvedora de Vibração.	120
7.1.4	Valores medidos da força, aceleração e cálculo do fluxo de energia.	120
7.2	Metodologia de qualificação do sistema dinâmico.	120
7.2.1	Caracterização dinâmica do acelerômetro em PVDF.	120
7.2.2	Qualificação do sistema dinâmico utilizando o acelerômetro em PVDF.	121
8	Conclusões.	126
9	Sugestões para trabalhos futuros.	128
BIBLIOGRAFIA		129
10	Apêndice.	134

Lista de Tabelas

3.1	Dados cristalográficos para 4 formas modificadas do PVDF [17]	14
3.2	Propriedades da película de PVDF ...continua na Tabela 3.3.	32
3.3	 continuação da Tabela 3.2 - Propriedades da película de PVDF [55]	33
3.4	Comparação das propriedades acústicas do PVDF com outros materiais [55] . . .	33
3.5	Comparação das propriedades piezoelétricas do PVDF com outros materiais [55] .	34
3.6	Comparação das propriedades piroelétricas do PVDF com outros materiais [55] .	34
4.1	Denominação e valores das massas dos contrapesos.	38
5.1	Valores da Reta de Aferição Estática e do Erro Relativo da carga F_i aplicada no dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.	78
5.2	Resultados da análise pelo Método da Regressão Linear dos dados da Curva de Aferição Estática.	79
5.3	Valores das amplitudes das oscilações do movimento livre e das razões entre as amplitudes consecutivas (a_1/a_n).	82
5.4	Valores do Espectro em Frequência da Mesa Absorvedora de Vibração - sem o sistema dinâmico, para 4 níveis de carga.	84
5.5	Valores do espectro em Frequência da Mesa Absorvedora de Vibração, com siste- ma dinâmico, para 3 níveis de carga.	86
6.1	Valores do espectro em Frequência do acelerômetro em PVDF (aceleração = 1.0 g). 97	
6.2	Valores da Curva de Sensibilidade e do Erro Relativo na leitura do deslocamento do acelerômetro em PVDF.	98
6.3	Resultados da análise pelo Método da Regressão Linear dos dados da Curva de Sensibilidade.	99

6.4	Valores da voltagem acumulada em função da variação da massa dos contrapesos, para diversos tempos (t) de acumulação.	101
6.5	Resultado do método da regressão aplicado aos dados da voltagem acumulada em função do tempo de acumulação, para diversos valores do contrapeso.	117
6.6	Resultado do método da regressão aplicado aos dados da voltagem acumulada em função da variação dos contrapesos, para diversos tempo (t) de acumulação. . . .	118

Lista de Figuras

1.1	Diferentes princípios de medida para controle de produção de um motor.	2
1.2	Importância do posicionamento e montagem dos acelerômetros nas medidas de vibração.	3
1.3	Absorvedor mecânico de vibração [10].	3
1.4	Figura comparativa entre o método de medida do fluxo de energia e acelerômetro em PVDF (novo método).	6
2.1	Constante piezoelétrica (d) como função da permissividade elétrica, onde: PVC (polivinilclorido); PAN (poliacrilonitrile); PVF (polivinilfluoride); PMMA (polimetilmetacrilato); FEP (fluorinatado etilenopropileno); PE (polietileno) [30]. . . .	10
3.1	Estrutura semicristalina do PVDF mostrando cristais lamelares com segmentos moleculares normais às lamelas [9]	12
3.2	Estrutura molecular do PVDF [54]	13
3.3	Estrutura cristalina das formas I,II,II _g e III do PVDF projetadas sobre o plano ab da unidade celular. Os átomos de fluor são os círculos maiores; os átomos de carbono são os círculos menores; os átomos de hidrogênio foram omitidos [54] . .	13
3.4	Produção e conversão das formas cristalinas do PVDF [54]	16
3.5	Arranjo esquemático do cristal-liquído mostrando a direção da cadeia e dos dipolos [9]	16
3.6	Convenção dos eixos e suas direções em uma película de PVDF [9]	17
3.7	Procedimentos para transformar a forma II antipolar em piezoelétrica [47]	17
3.8	Representação geral de um polímero semicristalino do PVDF [46]	20

3.9	Modelo ferroelétrico: (a) película não orientada com os dipolos cristalinos em cada cristalino, apontando com igual probabilidade em qualquer uma das seis direções possíveis; (b) película polarizada, com os dipolos cristalinos alinhados; (c) P_s representa o vetor polarização [46]	21
3.10	Processos de interação entre os sistemas mecânico, elétrico e térmico [21]	25
4.1	Vista geral da bancada dinamométrica.	36
4.2	Figura esquemática da distribuição dos equipamentos utilizados na obtenção do fluxo de energia.	37
4.3	Mesa Absorvedora de Vibração.	39
4.4	Posição do acelerômetro sob a placa base da Mesa Absorvedora de Vibração.	39
4.5	Posição dos amortecedores em função da peças de junção.	40
4.6	Dimensões principais do dinamômetro e disposição dos extensômetros no corpo elástico.	41
4.7	Esquema elétrico do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.	42
4.8	Esquema da viga com extensômetros do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.	42
4.9	Características dimensionais da peça de junção.	43
4.10	Curva do Movimento Livre do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.	54
4.11	Atuador hidráulico - tipo PL (100 kN, utilizado no levantamento do espectro de frequência da Mesa Absorvedora de Vibração).	56
4.12	Atuador hidráulico agindo sobre a Mesa Absorvedora de Vibração.	58
4.13	Atuador hidráulico agindo sobre a Mesa Absorvedora de Vibração, com o sistema dinâmico (motor).	59
4.14	Conjunto Mesa Absorvedora de Vibração, atuador e painel de controle e aquisição de dados.	60
4.15	Princípio de funcionamento do atuador e o sistema de aquisição dos dados.	61
4.16	Vista da polia do motor com contrapesos, da referência inercial e do sensor de proximidade.	62
4.17	Desenho esquemático do acelerômetro.	65
4.18	Acelerômetro e o processador de sinais.	66
4.19	Circuito eletrônico do acelerômetro em PVDF.	67

4.20	Figura esquemática do sistema utilizado para obtenção da voltagem acumulada através do acelerômetro em PVDF.	68
4.21	Posição do acelerômetro em PVDF e do acelerômetro da B&K sobre o <i>shaker</i> . . .	69
4.22	Vista da montagem dos equipamentos utilizados no levantamento das características dinâmicas do acelerômetro em PVDF.	70
4.23	Influência do sentido de deslocamento na emissão dos impulsos.	74
4.24	Compensação da variação da direção dos deslocamentos, geradores de impulsos. .	74
4.25	Diagrama de blocos do esquema elétrico do acelerômetro em PVDF.	74
4.26	Figura esquemática de funcionamento do acelerômetro em PVDF.	75
5.1	Reta de Aferição Estática do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração. .	79
5.2	Curva do Erro Relativo da carga F_i aplicada no dinamômetro, em função da leitura L_i no multímetro digital.	81
5.3	Reta de Determinação do Decremento Logarítmico.	82
5.4	Curva do Espectro de Frequência da Mesa Absorvedora de Vibração, sem o sistema dinâmico.	85
5.5	Espectro de Frequência da Mesa Absorvedora de Vibração, com o sistema dinâmico.	85
5.6	Variação da força em função da rotação do motor e do nível de desbalanceamento, medida com a Dinamômetro.	87
5.7	Variação da aceleração em função da rotação do motor e do nível de desbalanceamento, medida com o Acelerômetro.	88
5.8	Variação do fluxo de energia em função da rotação do motor e do nível de desbalanceamento, calculado com as medidas da força e da aceleração.	88
5.9	Variação da força em função da rotação do motor, sem desbalanceamento ($M0 = 0.0$ gr).	89
5.10	Variação da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento ($M1 = 3.9922$ gr).	89
5.11	Variação da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento ($M2 = 6.1571$ gr).	90
5.12	Variação da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento ($M3 = 7.9617$ gr).	90
5.13	Variação da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento ($M4 = 8.5629$ gr).	91

6.12	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M2 = 6.1571$ gr. e $t = 3.0$ s.).	106
6.13	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M3 = 7.9617$ gr. e $t = 3.0$ s.).	106
6.14	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M4 = 8.5629$ gr. e $t = 3.0$ s.).	107
6.15	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M5 = 10.7347$ gr. e $t = 3.0$ s.).	107
6.16	Nível de voltagem acumulada, sem desbalanceamento ($M0 = 0.0$ gr. e $t = 4.0$ s.).	108
6.17	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M1 = 3.9922$ gr. e $t = 4.0$ s.).	108
6.18	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M2 = 6.1571$ gr. e $t = 4.0$ s.).	109
6.19	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M3 = 7.9617$ gr. e $t = 4.0$ s.).	109
6.20	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M4 = 8.5629$ gr. e $t = 4.0$ s.).	110
6.21	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M5 = 10.7347$ gr. e $t = 4.0$ s.).	110
6.22	Nível de voltagem acumulada, sem desbalanceamento ($M0 = 0.0$ gr. e $t = 8.0$ s.).	111
6.23	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M1 = 3.9922$ gr. e $t = 8.0$ s.).	111
6.24	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M2 = 6.1571$ gr. e $t = 8.0$ s.).	112
6.25	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M3 = 7.9617$ gr. e $t = 8.0$ s.).	112
6.26	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M4 = 8.5629$ gr. e $t = 8.0$ s.).	113
6.27	Nível de voltagem acumulada, sem desbalanceamento ($M0 = 0.0$ gr. e $t = 9.9$ s.).	114
6.28	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M1 = 3.9922$ gr. e $t = 9.9$ s.).	114
6.29	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M2 = 6.1571$ gr. e $t = 9.9$ s.).	115

6.30	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M3 = 7.9617$ gr. e $t = 9.9$ s.).	115
6.31	Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M4 = 8.5629$ gr. e $t = 9.9$ s.).	116
6.32	Comportamento da voltagem acumulada em função do tempo de acumulação de voltagem, para diversos valores dos contrapesos.	116
6.33	Comportamento da voltagem acumulada em função da variação da massa dos contrapesos (desbalanceamento), para diversos tempo (t) de acumulação.	118
7.1	Figura esquemáticas das 3 situações registrada pelo osciloscópio quando da medida da voltagem acumulada.	122
7.2	Figura esquemática de 3 (três) aplicações da Figura 6.32	124
7.3	Figura esquemática de 3 (três) aplicações da Figura 6.33	124

RESUMO

O nível de voltagem gerado pelo acelerômetro em PVDF foi utilizado como parâmetro referencial para verificação da conformidade de sistemas mecânicos, de modo simples e direto. O método desenvolvido foi baseado em um novo tipo de acelerômetro, de concepção original, composto por duas películas piezoelétricas em PVDF (*Polyvinylidene Fluoride*) e massa líquida (mercúrio) como elemento excitador. O acelerômetro em PVDF funcionou como um componente binário (*on/off*), para indicar se o nível de voltagem era inferior ou superior a um dado valor de calibração (referência). As medidas do nível de voltagem foram realizadas sobre um referencial fixo, desenvolvido especificamente para esse trabalho, que é a Mesa Absorvedora de Vibração. Os sinais elétricos emitidos pelo PVDF foram processados e armazenados por meio de um circuito eletrônico, que indicou por meio de uma lâmpada *Led*, se o sistema dinâmico foi aceito ou rejeitado. As principais características da metodologia desenvolvida para qualificação de sistemas dinâmicos, são a precisão, a rapidez, o baixo custo e a facilidade de uso e calibração.

ABSTRACT

The voltage level of PVDF accelerometer was utilized as a referencial parameter to verify the capacity of mechanical systems in simple and direct form. The developed method was based on a new type of accelerometer of original concept compost of piezoelectric films in PVDF (Polyvinylidene Fluoride) and liquid mass (mercury) as exciting element. The PVDF accelerometer worked when a binary component (on/off) to indicate if the voltage level was inferior or superior as compared to a determined value of calibration (reference). The measurements for the voltage level were perfomed over a fixed referential, developed specifically for this work that is the Vibration Absorber Table. The electrical signals emitted by PVDF were processed and stored by means of an electronic circuit, which indicated by Led if the dynamic system was accepted or rejected. The principal characteristics of developed methodology for avaliation of dynamic systems, by means of intelligent sensor are precision, rapidness, low cost, easy handling and calibration.

Capítulo 1

Introdução

Geralmente o defeito de uma máquina ou equipamento pode ser detectado pela mudança de sua temperatura, variação no nível de vibração, ruído ou radiação acústica. Variação da pressão, força, ou movimento relativo são outros importantes parâmetros. No aspecto subjetivo, a detecção da temperatura, da vibração ou do som pode ser realizada facilmente, porém quando esses parâmetros são utilizados objetivando qualificar o funcionamento de uma máquina ou de um motor, é necessário quantificá-los através de instrumentos capazes de relacionar parâmetros fundamentais de uma máquina, tais como a aceleração (m/s^2), a velocidade (m/s), o deslocamento (mm) e a frequência (Hz). A frequência, normalmente descreve como acontece um fenômeno, relacionando o sinal detectado a uma função do equipamento em teste. Analisadores de frequência apresentam hoje grande sofisticação, sendo capazes de separar em detalhes diferentes fenômenos de ciclos contínuos. Essa técnica tem sido muito utilizada nos últimos 20 anos, e popularizada pela introdução da técnica do analisador F.F.T (*Fast Fourier Transform*).

Em muitos processos a avaliação final de uma máquina, que em funcionamento gera um certo grau de vibração, consiste em analisar o ruído gerado. A medida e análise desse ruído, usando microfone, pode ser extremamente difícil ou impossível de ser efetuada, se o nível do ruído ambiental é significativo. A alternativa nestes casos, em vez de medir a pressão do som usando microfone, é usar uma sonda para medir a intensidade do fluxo do som (Figuras 1.1.a e 1.1.b). Com esse método obtém-se melhor resultado quando é reduzida em grande escala a influência do ruído ambiental. Ainda assim, para muitos casos, isso é insuficiente. Uma opção muito utilizada, e que tem dado ótimos resultados, é utilizar um acelerômetro, e através da análise vibracional, diagnosticar falhas (Figura 1.1.c). O inconveniente desse procedimento é que o espectro vibracional depende do posicionamento do acelerômetro, ou seja, para cada posição do acelerômetro há um modo de vibração diferente (Figura 1.2). Esse método envolve ainda, o uso de equipamentos e técnicas complexas de análise dinâmica.

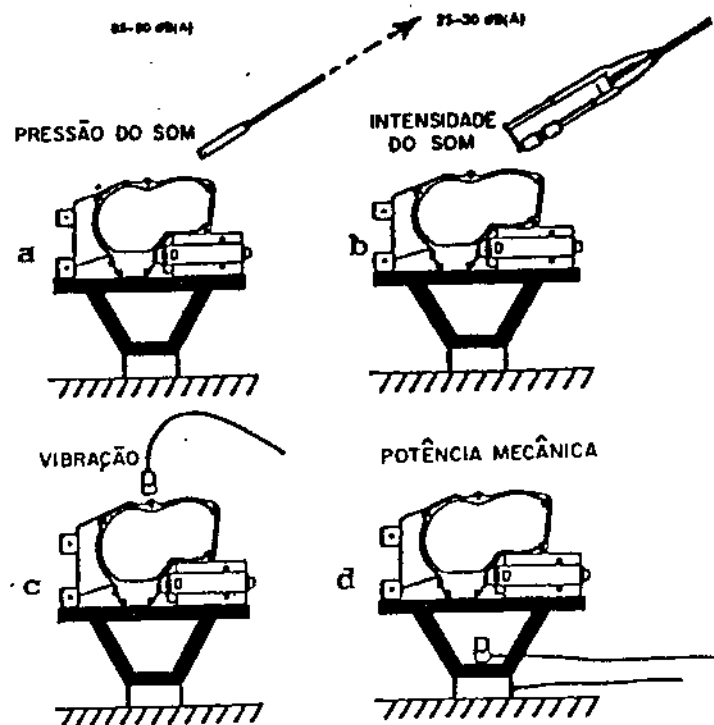


Figura 1.1: Diferentes princípios de medida para controle de produção de um motor.

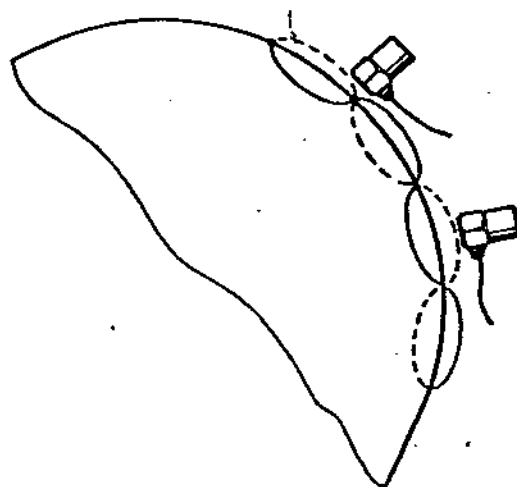


Figura 1.2: Importância do posicionamento e montagem dos acelerômetros nas medidas de vibração.

Recentemente, a técnica de medida do fluxo de energia, através de um analisador de intensidade, tem sido utilizada no setor de controle de qualidade (Figura 1.1.d). Ela permite uma melhor seleção, melhor correlação com os parâmetros mais importantes, e ainda, sofre pouca influência do ruído ou da vibração ambiental. Assim, a técnica de medida do fluxo de energia corresponde a um consistente parâmetro de medida quando o objetivo é detectar falhas de funcionamento em máquinas, motores, bombas, etc.

A utilização da técnica de medida do fluxo de energia no desenvolvimento e controle de produção, principalmente na indústria automobilística, tem sido desenvolvida por Brock [10].

Ele desenvolveu um absorvedor mecânico Figura 1.3, sobre o qual foi posicionado o equipamento a ser testado, e por meio de um acelerômetro e uma célula de carga, mediu o fluxo de energia. O cálculo do fluxo de energia foi realizado através de um analisador de intensidade de duplo canal.

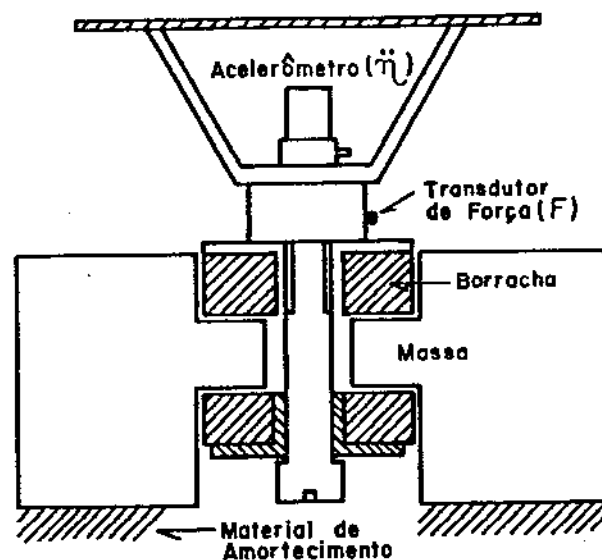


Figura 1.3: Absorvedor mecânico de vibração [10].

O desenvolvimento do absorvedor mecânico de vibração baseou-se na técnica de medir o fluxo de energia acústica total em uma sala anecóica, onde o som da unidade em teste é totalmente absorvido pelo ambiente. Assim, na aplicação dessa técnica, a influência do ruído ou da vibração externa pode ser desprezada. Deste modo, é possível usar a técnica de medida do fluxo de energia para fazer uma estimativa correta do fluxo de energia vibracional de um dado equipamento, possibilitando utilizá-lo como parâmetro de controle de qualidade.

Observa-se, portanto, que a qualidade da metodologia de qualificação de um sistema dinâmico está relacionado a eliminação da influência do ruído e/ou da vibração externa. Neste aspecto a metodologia desenvolvida por Brock [10] de utilizar um absorvedor mecânico para eliminar a influência do ruído e da vibração é a mais adequada.

Neste Trabalho de Tese foi desenvolvido uma técnica de qualificação de sistemas dinâmicos, que utiliza como parâmetro referencial o nível de voltagem gerado por um acelerômetro em PVDF. Para as medidas, do fluxo de energia gerado pelo sistema dinâmico e do nível de voltagem pelo acelerômetro em PVDF, foi construído uma Mesa Absorvedora de Vibração.

Os sinais elétricos emitidos pelo PVDF, para um dado intervalo de tempo, foram processados e armazenados por um circuito eletrônico e comparados a um valor referencial. Um sinal luminoso, lâmpada Led, indicava se o sistema dinâmico atendeu ou não o comportamento dinâmico pré-estabelecido.

Ainda, neste Trabalho, comparou-se a metodologia de qualificação de sistemas dinâmicos, utilizando a medida do fluxo de energia, com a metodologia de medida do nível de voltagem, utilizando o acelerômetro em PVDF.

Na Figura 1.4, é apresentado uma visão simplificada das duas técnicas de qualificação de sistema dinâmica : medida do fluxo de energia e acelerômetro em PVDF (nova tecnologia).

1.0.1 Acelerômetro em PVDF (novo método).

Para a medida direta e precisa do nível de voltagem, será apresentado do Capítulo 4 um novo tipo de acelerômetro em PVDF, com as seguintes vantagens:

1. Medida comparativa direta, ou seja, é um medidor do tipo *on/off*;
2. Para a sua utilização não precisa de instrumentação (analisadores de sinais, sistemas de aquisição de dados, etc.);
3. Baixo custo de construção e operação;
4. Portátil, com fonte própria de alimentação;

5. Pequenas dimensões (aproximadamente uma caixa de fósforo e baixo peso menos de 100 gramas);
6. Não precisa de operador especializado;
7. Pode ser aplicado a diferentes equipamentos, apenas com a modificação da regulação do nível de voltagem acumulada (previamente fixado);

O modelo experimental desenvolvido e testado apresentou resultados promissores, que justificam seu aperfeiçoamento para produção em escala industrial.

A caracterização de sua importância, equacionamento, desenvolvimento e testes de laboratório é mostrado nos Capítulos 2, 3, 4, . Nos Capítulos 5 e 6 (Resultados), Capítulo 7 (Discussão dos Resultados), Capítulo 8 (Conclusões), Capítulo 9 (Sugestões para trabalhos futuros) e no Capítulo 10 (Apêndice) são apresentados os principais resultados da pesquisa desenvolvida.

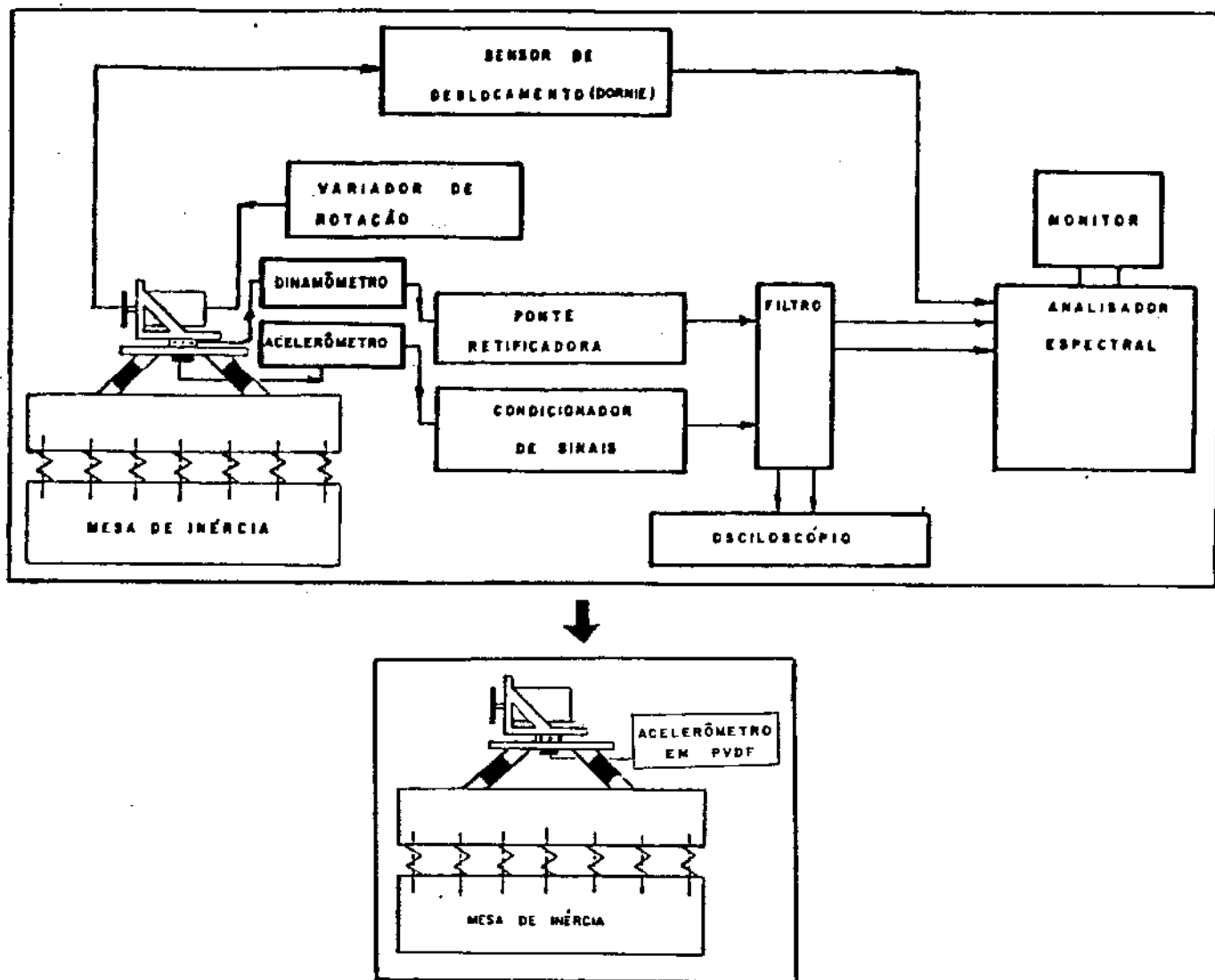


Figura 1.4: Figura comparativa entre o método de medida do fluxo de energia e acelerômetro em PVDF (novo método).

Capítulo 2

Piezoeletricidade.

2.1 Generalidades.

No ano de 1703, aproximadamente, a Europa tomou conhecimento do fenômeno apresentado pelo cristal de turmalina que, quando era colocado na cinza quente, primeiro a atraía e depois a repelia. Este fenômeno era comumente denominado como *Ceylon Magnet*, pois supunha-se conhecido há vários anos no Ceilão e na Índia. Em 1747 *Linnaeus* deu a esse fenômeno o nome científico de *lapis electricus*. Seu caráter elétrico foi estabelecido em 1756 por *Aepinus*, que notou a polaridade oposta nos extremos de um cristal de turmalina aquecida. Em 1824 *Brewster*, que tinha observado o efeito em várias espécies de cristal, introduziu o nome *pyroelectricity*. Entre os diversos cristais pesquisados ele encontrou o efeito piroelétrico foi o sal de Rochele [11].

A primeira teoria definitiva da piezoeletricidade foi estabelecida por *Lord Kelvin* que, baseado nas observações de *Canton* (1759), que tinha verificado polaridade opostas nas superfícies expostas dos cristais de turmalina recém fraturadas, postulou um estado permanente de polarização em cada cristal piroelétrico. De acordo com essa teoria, o efeito piroelétrico é simplesmente uma manifestação do coeficiente de temperatura de sua polarização.

O efeito piezoelétrico no quartzo e alguns outros materiais foi descoberto em 1880 pelos irmãos *Pierre e Jacques Curi*. Estudos anteriores de *Pierre Curi*, da relação entre o fenômeno piroelétrico e a simetria do cristal, levaram os dois irmãos não somente a procurar eletricidade devido à pressão, mas pesquisaram em que direção a pressão deveria ser aplicada, e em que classe o efeito seria esperado. Eles encontraram o efeito nos seguintes cristais: zinco blenda, cloreto de sódio, boracita, turmalina, quartzo, topázio, calamina, ácido tartárico, cristais

de cana-de-açúcar e sal de Rochelle [28].

A descoberta dos *Curi* gerou imediatamente grande interesse no meio científico. Dentre eles destaca-se *Hankel*, que afirmou que o efeito recém descoberto obedecia a uma lei própria do material e propôs o nome *piezoelectricity*.

Os *Curi* estudaram, ainda, o efeito piezoelétrico em outros cristais, efetuaram a primeira medida quantitativa do efeito no quartzo e na turmalina, a aplicação prática do cristal piezoelétrico e a verificação do efeito inverso. O efeito inverso da piezoelectricidade, que é a variação na dimensão do cristal devido a aplicação de uma voltagem, foi previsto teoricamente por *Lippman*, baseado em princípios termodinâmicos, e foi verificado pelos *Curi* no ano seguinte.

Embora algumas das relações entre piezoelectricidade e a estrutura cristalina tenham sido estabelecidas pelos *Curi*, uma investigação mais rigorosa foi realizada por *Woldemar Voigt* em 1894. Combinando os elementos simétricos do tensor elástico e do vetor elétrico com a geometria simétrica dos elementos do cristal, ele esclareceu em qual das 32 (trinta e duas) classes de cristal os efeitos piezoelétricos podiam existir e para cada classe mostrou qual dos 18 (dezoito) possíveis coeficientes piezoelétricos podiam ter valores diferentes de zero [11].

Ainda que o efeito piezoelétrico tenha sido usado para medir carga, por exemplo, *Pierre Curi* mediu a carga emitida pelo rádio, esse efeito não foi usado para qualquer aplicação prática durante um terço de século. Naquele tempo, durante a I Guerra Mundial, em consequência da perda de grande número de navios, devido aos submarinos alemães, um concentrado esforço foi feito com o propósito de encontrar um meio de localizar submarinos. Dado que as ondas de rádio não penetram na água do mar, o único meio prático foi usar ondas acústicas. O melhor resultado foi obtido por *Paul Langevin* que usou a piezoelectricidade do cristal de quartzo para gerar ondas acústicas. Enquanto promissores resultados foram obtidos antes do fim da Guerra, não havia tempo para aplicar os resultados em uma maneira prática. Transdutores do tipo *Langevin* foram usados como sonda subaquática de profundidade. O transdutor de quartzo foi usado em duas aplicações depois da I Guerra Mundial. O primeiro avanço foi feito por *G.W. Pierce*, de Harvard, quando ele produziu o interferômetro ultrasônico em 1925. Em 1927 a primeira aplicação de ultrasônicos de alta potência foi feita por *Wood e Loomis*, no Laboratório de Loomis, em Tuxedo Park [28]. Apesar do quartzo ter sido logo abandonado como um transdutor de som subaquático, ele foi usado onde eram requeridas grande estabilidade e baixa frequência do coeficiente de temperatura. As duas largas aplicações do quartzo foram no controle da frequência de oscilação e em muitos filtros de onda. O primeiro controlador de cristal foi produzido pelo professor *Cady*, em 1919.

Retornando aos transdutores de som subaquáticos, o sal de Rochele logo substituiu o quartzo e foi usado até o advento da II Guerra Mundial. Embora o sal de Rochele tenha um alto acoplamento eletromecânico, ele era mais instável e tinha tendência a se queimar, se uma potência muito alta fosse aplicada. Pelo lado teórico, o sal de Rochele foi o primeiro cristal que tinha a propriedade de um material ferroelétrico, isto é, um que tinha uma polarização espontânea ao longo de um eixo do cristal. Por muitos anos o sal de Rochele foi o único material ferroelétrico conhecido, mas atualmente mais de 100 (cem) materiais ferroelétricos são conhecidos.

Durante a II Guerra Mundial, devido a escassez do quartzo, muitos cristais piezoelétricos sintéticos foram desenvolvidos, dentre eles o fosfato de amônia dihidrogênio (ADP), sulfato de lítio e tartarato etilene diamine [19].

Entre 1941 e 1947, uma série de estudos sobre um composto de óxido de bário e óxido de titânio, realizados independentemente nos USA, na USSR e no Japão resultaram na descoberta da polarizada cerâmica ferroelétrica titanato de bário (TiO_3Ba) que apresentava boas características piezoelétricas. Essa descoberta registra o marcante início do desenvolvimento de materiais cerâmicos policristalinos, que continuam até hoje. A característica básica desse material é a ferroeletricidade do cristal simples, ou seja, apresenta momento elétrico espontâneo, que pode ser orientado em uma direção preferencial pela aplicação de um campo elétrico externo. Esse processo de polarização faz o material ferroelétrico tornar-se piezoelétrico. Além disso, materiais ferroelétricos apresentam uma alta constante dielétrica, que resulta em uma baixa impedância acústica, geralmente uma característica importante nos transdutores ultrasônicos.

Essa descoberta abriu o campo das cerâmicas piezoelétricas e suas aplicações como transdutores ultrasônicos. Depois do TiO_3Ba , apareceu o niobato de zinco em 1952, descoberto por G. Goodman e, um pouco mais tarde, em 1954, o composto titanato zirconato-chumbo (PZT), descoberto por Jaffe *et al.* A descoberta desse material foi o marco no desenvolvimento das cerâmicas piezoelétricas por causa de sua forte e estável característica piezoelétrica.

Durante os últimos trinta anos o PZT e materiais afins (PZT com vários aditivos) constituíram os materiais cerâmicos dominantes na aplicação ultrasônica. Na década passada, novos tipos de cerâmica baseadas em $PbTiO_3$ foram desenvolvidos. Na década atual, compostos cerâmicos e os polímeros têm atraído muito interesse por causa do potencial que um material multifase oferece. Mais recentemente, dois outros tipos de transdutores piezoelétricos têm se destacado. Um deles é o PVDF (*Polyvinidene Fluoride*) e o outro o cristal ferroelétrico Niobato de lítio ($LiNbO_3$), um cristal com alto acoplamento eletromecânico e uma baixa atenuação acústica.

Segundo SLESSER [47], embora as propriedades piezoelétricas dos materiais chamados polímeros, já tenha sido investigada em 1924 por *K.R. Brain*, até os trabalhos de *Fukuda*, desenvolvidos no período de 1950 a 1960, este tópico não vinha recebendo atenção. A ruptura veio em 1969, quando KAWAI [22] descobriu o efeito piezoelétrico no PVDF.

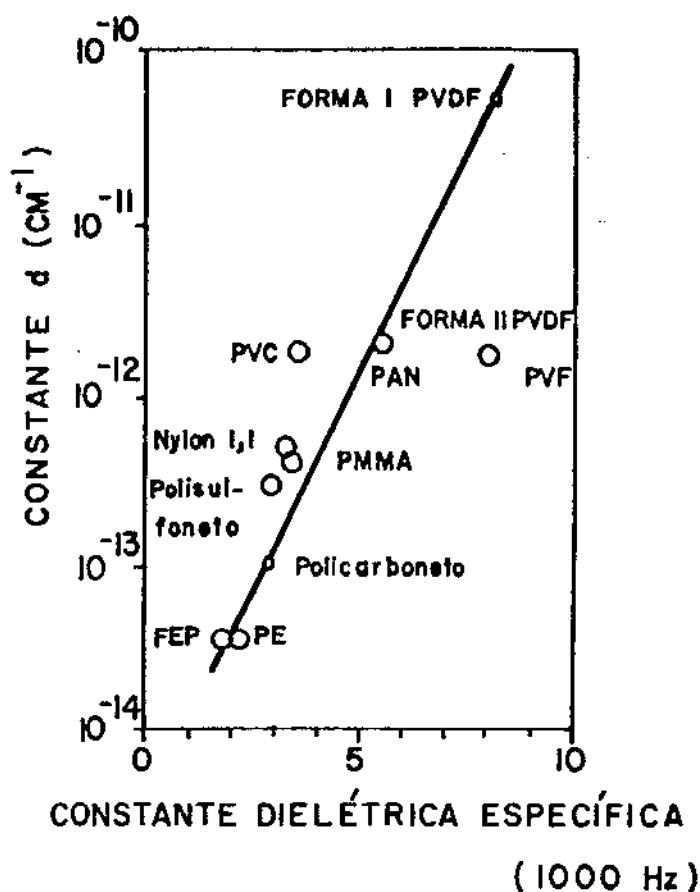


Figura 2.1: Constante piezoelétrica (d) como função da permissividade elétrica, onde: PVC (polivinilclorido); PAN (poliacrilonitrile); PVF (polivinilfluoride); PMMA (polimetilmetacrilate); FEP (fluorinatado etilenopropilene); PE (polietilene) [30].

Como ilustra a Figura 2.1 o PVDF exibe uma atividade piezoelétrica consideravelmente mais forte do que outros polímeros. Esse comportamento está, pelo menos em parte, relacionado com sua alta constante dielétrica [30]. A descoberta das propriedades piezoelétricas e mais tarde das propriedades piroelétricas e óticas não-lineares do PVDF gerou um rápido uso desse material, e um extenso desenvolvimento de atividades afins.

Capítulo 3

Características do Polyvinylidene Fluoride.

3.1 Estrutura do PVDF.

O PVDF é um polímero semicristalino constituído de longa cadeia molecular com a repetida unidade - $\text{CF}_2\text{-CH}_2$ -. Seu peso molecular é de aproximadamente 10^5 mol, correspondendo a 2000 repetidas unidades ou um comprimento de $0,5 \cdot 10^{-4}$ cm [47]. É um dos polímeros que apresenta maior polaridade. O momento dipolar de C-F é de 1.4 *Debye* [30]. A cadeia molecular do PVDF tem aproximadamente 10 % de anormalidade estrutural ou seja:

- 90% - $-\text{CH}_2 - \text{CF}_2 - \text{CH}_2 - \text{CF}_2-$ - estrutura normal de cabeça a ponta;
- 10% { $-\text{CH}_2 - \text{CF}_2 - \text{CF}_2 - \text{CH}_2-$ - estrutura defeituosa de cabeça a cabeça ;
 $-\text{CF}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CF}_2-$ - estrutura defeituosa de ponta a ponta .

Em consequência de sua alta normalidade estrutural o PVDF tem um momento dipolar muito elevado, aproximadamente $7,56 \cdot 10^{-28}$ C.cm ou 2.27 *Debye* [32]. Os cristais estão embutidos em uma fase amorfa que tem a propriedade de líquido super-esfriado com a temperatura de transição cristalina T_g de aproximadamente -40°C , quando medido a baixa frequência [47].

A estrutura cristalina do PVDF resultante do fundido tem uma estrutura esferulítica [39]. Dependendo do tratamento térmico, aproximadamente 50% do volume do PVDF é formado por material cristalino [31].

As esferulitas consistem de pilhas de lamelas que crescem para fora de um centro comum durante a cristalização. Essas lamelas, dependendo das condições de cristalização, têm

de 10 a 20 nm de espessura. As cadeias moleculares são aproximadamente normais às largas superfícies lamelares e ao raio das esferulitas. A maior parte do material líquido está localizado entre as lamelas cristalinas. Isto é, uma típica região é constituída de camadas paralelas alternadas de cristal e material líquido, cada uma com espessura de 10 a 20 nm, Figura 3.1.

Como as moléculas têm um comprimento várias vezes maior que a espessura da lamela, cada molécula passa muitas vezes através de uma ou mais camadas cristalinas. Enquanto na camada cristalina, o segmento molecular fica preso, na camada líquida, a molécula está livre para assumir configurações flexíveis e irregulares [9].

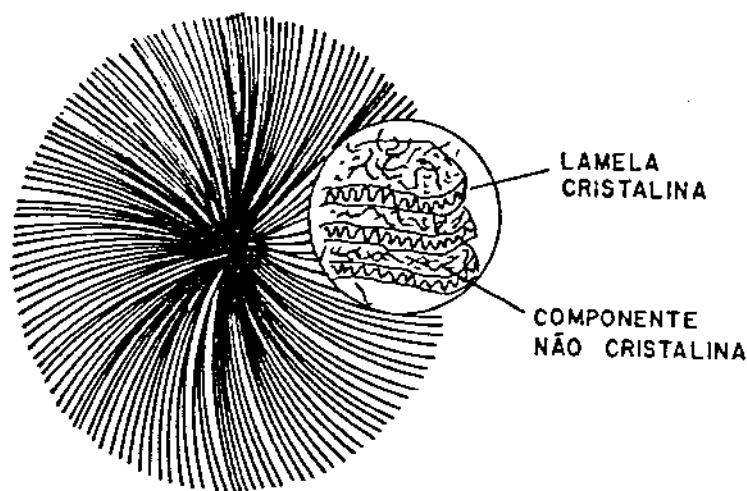


Figura 3.1: Estrutura semicristalina do PVDF mostrando cristais lamelares com segmentos moleculares normais às lamelas [9]

O PVDF é essencialmente polar. Os átomos de hidrogênio são carregados positivamente e os átomos de fluor são carregados negativamente em relação ao átomo de carbono no polímero. O momento dipolar médio de um grupo de moléculas em uma região líquida do PVDF será zero quando não há nenhum campo aplicado, por causa da orientação aleatória dos dipolos, individualmente.

Atualmente, 4 (quatro) formas cristalinas do PVDF são conhecidas. Esses são referidos como forma I, II, III, II_g (ocasionalmente chamado forma IV) ou β , α , γ e α_g respectivamente. As propriedades do PVDF, inclusive a piezoelectricidade, dependem principalmente do grau e do tipo de sua estrutura cristalina. As estruturas moleculares e cristalinas dessas formas, quando projetadas sobre um plano normal em relação ao eixo molecular é mostrada nas Figuras 3.2 e 3.3 [54]. Na Tabela 3.1 estão listados os dados cristalográficos das formas cristalinas [17].

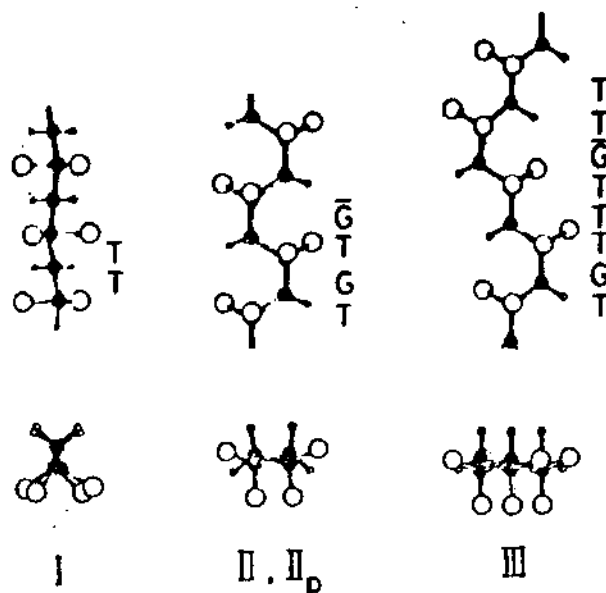


Figura 3.2: Estrutura molecular do PVDF [54].

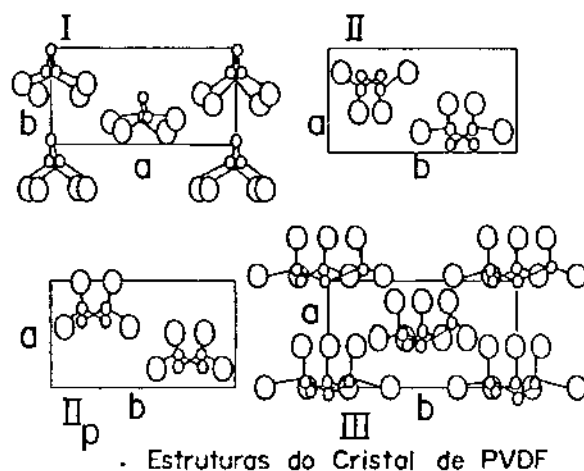


Figura 3.3: Estrutura cristalina das formas I,II,II_p e III do PVDF projetadas sobre o plano *ab* da unidade celular. Os átomos de fluor são os círculos maiores; os átomos de carbono são os círculos menores; os átomos de hidrogênio foram omitidos [54].

Tabela 3.1: Dados cristalográficos para 4 formas modificadas do PVDF [17].

Forma cristalina	Constante celular	Grupo espacial	C	Conformação molecular
I(β)	$a=8.58 \text{ \AA}$; $b=4.91 \text{ \AA}$ $c(\text{f.e}) = 2.56 \text{ \AA}$	Cm2m-C	2	leve deflexão planar-zigzag
II(α)	$a=4.96 \text{ \AA}$; $b=9.64 \text{ \AA}$ $c(\text{f.e})=4.62 \text{ \AA}$; $\beta = 90^\circ$	P2 ₁ /c-C	2	TGTG'
II _P (α_g)	equiv. a forma II	-	2	TGTG'
III(γ)	$a=0.87 \text{ \AA}$; $b=0.49 \text{ \AA}$ $c(\text{f.e})=0.26 \text{ \AA}$; $\beta = 97^\circ$	Cc-C	2	T^3GT^3G'
C: número de cadeias dipolares por unidade celular (f.e) = eixo da fibra				

A forma I tem uma conformação zig-zag plana, com leve deflexão entre as repetidas unidades. Todas as cadeias têm orientação essencialmente paralelas em relação ao eixo (b) da unidade celular com os dipolos apontando na mesma direção, resultando em um cristal de simetria não central. O valor do momento dipolar paralelo ao eixo (b) é 2.1 *Debye* [32].

A forma II, a mais comum, resulta quando o polímero é esfriado do seu fundido. Tem uma conformação *sis-trans-sis-trans* (TGTG') com cadeia individual arranjada para produzir uma unidade celular de simetria central. Isso resulta em um cristal antipolar. Enquanto a repetida unidade apresenta um momento dipolar de 1.2 *Debye*, perpendicular ao eixo (b) é igual a 1.0 *Debye*, paralelo ao eixo (b), o cristal todo não apresenta polaridade, piezoelectricidade e nem piroelectricidade [12], [24].

DAVIS *et alii* [14] e DAS-GUPTA [13] mostraram que, utilizando-se uma alta voltagem na polarização, a forma II transforma-se em uma nova forma cristalina. A cadeia molecular tipo TGTG' sofre uma rotação de modo que os momentos dipolares tornam-se paralelos. Essa nova forma polar é chamada de forma II_g. Ao contrário da forma II, a forma II_g apresenta alguma piezoelectricidade, porém mais fraca do que a da forma I (4/7 da forma I ou 1.3 *Debye*) [33].

A forma III tem a conformação T³GT³G' [51]. As cadeias moleculares são empacotadas em paralelo, com simetria não central e cristalização polar. Essa forma é menos conhecida do que as outras formas, mas tem sido assunto de alguns estudos [2], [27], [35].

Transformações na fase cristalina podem ocorrer através de tração mecânica, temperatura à alta temperatura ou aplicação de campo elétrico (Figura 3.4).

Além da mudança de fase, uma mudança na orientação do momento dipolar do cristal pode ocorrer devido a um forte campo elétrico. A mudança na orientação e na fase do campo induzido, ocorre devido a rotação na ligação carbono-carbono, ou pela rotação do segmento molecular sobre seu eixo ou ambos os casos. A força motriz para essa mudança é devido ao decréscimo na energia de interação entre o campo elétrico aplicado e o momento dipolar, que é extremamente alto [9].

A polarização do cristal, então, é melhor realizada quando os segmentos moleculares são normais ao campo polarizador, isto é, no plano da película. Normalmente, o processo consiste de extrusão seguido de estiramento ou laminação, que tende a alinhar o eixo 1' do cristal paralelo (vide Figura 3.5) e a direção do estiramento, dando ao cristal a orientação desejada. Isso também quebra as esferulitas e as converte em formas irregulares, alinhadas com as camadas alternadas de material líquido e cristalino. A convenção dos eixos para processar uma película de PVDF é

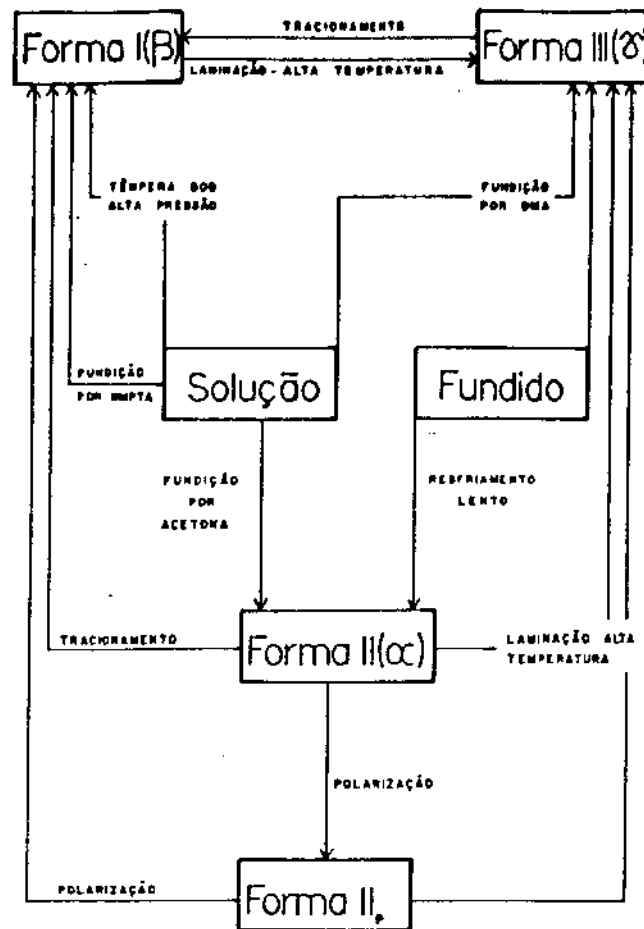


Figura 3.4: Produção e conversão das formas cristalinas do PVDF [54].

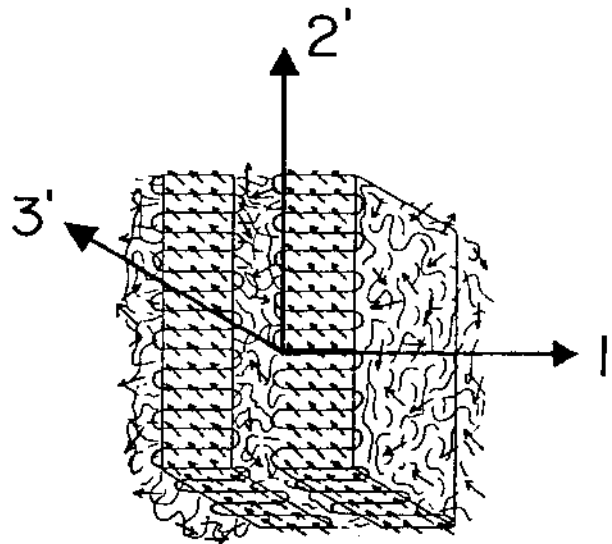


Figura 3.5: Arranjo esquemático do cristal-líquido mostrando a direção da cadeia e dos dipolos [9].

mostrada na Figura 3.6 [9].

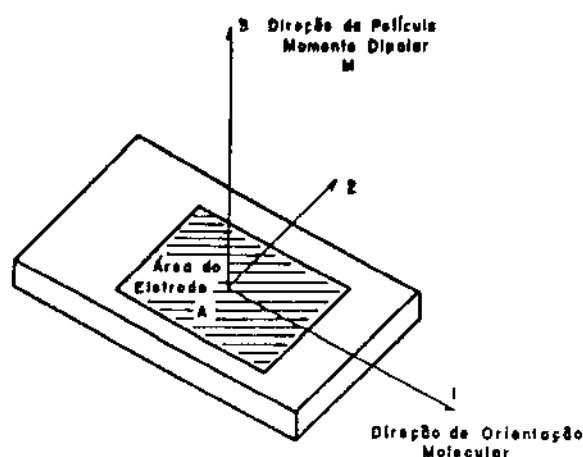


Figura 3.6: Convenção dos eixos e suas direções em uma película de PVDF [9].

3.2 Polarização da película de PVDF.

O método usual de polarizar o PVDF para produzir propriedades piezoelétricas e piroelétricas, é geralmente realizado aquecendo-se a película estirada e eletrolizada a uma temperatura de polarização T_p de aproximadamente 100°C . Aplica-se uma corrente elétrica contínua I_p de $30 - 200 \text{ MV.m}^{-1}$ por um período t_p de vários minutos e finalmente, esfria-se a película à temperatura ambiente sem remover o campo aplicado, [22], [6], [15], [37].

A polarização pode ser também realizada à temperatura ambiente, usando altos valores de I_p e t_p , [29], ou por carga Corona [49].

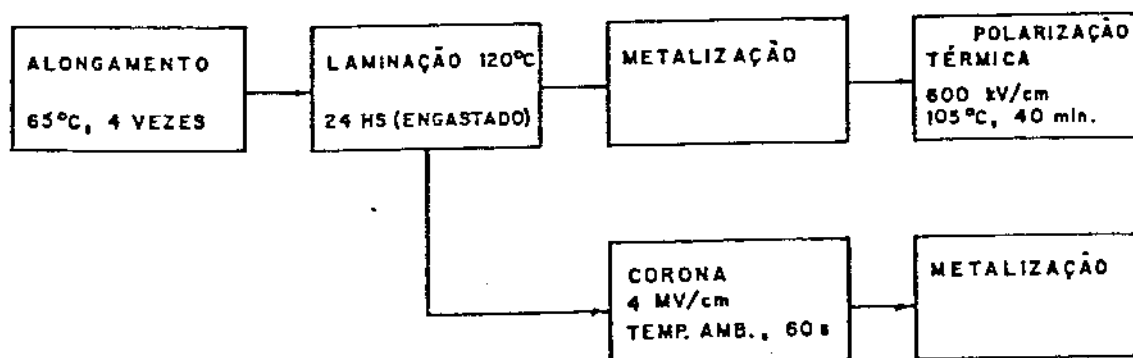


Figura 3.7: Procedimentos para transformar a forma II antipolar em piezoelétrica [47].

Geralmente a película comercial do PVDF consiste na forma II antipolar. A Figura

3.7, mostra uma sequência de procedimentos para tornar esse material piezoelétrico. A película é primeiro estirada uniaxialmente, à temperatura de 60° a 65° C, de 3 a 5 vezes seu comprimento original e como consequência, a película se recristaliza na forma I. Na etapa seguinte, a película é reaquecida a 120° C, ainda estirada, para curar os danos decorrentes do estiramento, estabilizando a película.

Na polarização Corona, a amostra não metalizada ou com uma superfície metalizada, é submetida a uma descarga Corona através de uma agulha eletródica a uma distância de poucos centímetros. A carga acumulada sobre a película provoca um alto campo no volume da amostra. Esse campo alinha as cadeias dipolares à temperatura ambiente [49].

Na polarização térmica, a polarização obtida depende do campo aplicado, da temperatura e do tempo de polarização. Para tempo de polarização suficientemente longo, a polarização é uma função unicamente do campo de polarização, enquanto a temperatura de polarização, afeta simplesmente a velocidade na qual a polarização se estrutura [7].

O alinhamento dipolar, durante cada processo de polarização ocorre pela reorientação da região cristalina aleatoriamente orientada na direção do campo [23]. Esse processo não envolve uma reorientação do cristalino como um todo, desde que os cristais vizinhos são interconectados por uma cadeia molecular e impedidos em seu movimento. A orientação é causada principalmente pela rotação da cadeia sobre o eixo da cadeia C-C.

A polarização Corona é muito mais fácil de se realizar, porque somente um lado da película precisa ser inicialmente metalizada. Toda a película pode ser rapidamente polarizada, bastando passá-la sob a carga Corona aplicada, enquanto que por um campo convencional de polarização, apenas pequenas porções da película podem ser usadas em cada vez. Além disso, o desarranjo que pode ocorrer com a polarização térmica pode ser evitado, e assim, maiores valores de campo elétrico podem ser usados.

A polarização Corona é eficiente por que o campo interno, durante o processo de carregamento, na maior parte da espessura da amostra, é maior do que o campo aplicado. A carga aprisionada perto da superfície cria um campo que se soma ao campo aplicado à frente da carga. Enquanto o campo atrás do principal *front* da carga for menor do que o campo aplicado, a profundidade de penetração da carga durante o processo Corona é no máximo 10 % da espessura da amostra [3].

Na polarização térmica, se um desarranjo ocorrer em algum ponto da película, ele cria um curto-circuito. Assim a película fica intercalada entre dois eletrodos metálicos. Na polarização Corona não há contato direto entre o eletrodo e uma superfície da película. Assim,

não há nenhum curto-circuito e a carga mantém-se preso perto da superfície. A polarização Corona injeta somente um sinal de carga para dentro da película, que pode posteriormente auxiliar na conservação do alinhamento dipolar. Na polarização térmica, carga de ambas as polaridades pode ocorrer em cada eletrodo [4].

3.3 Fenômeno de transdução no PVDF.

3.3.1 Introdução.

A escolha de um material piezoelétrico depende da específica aplicação para o qual o transdutor será destinado. Eficiência para emitir e sensibilidade para receber são características fundamentais que precisam ser maximizadas em transdutores.

O processo de transdução da piezoelectricidade e piroelectricidade envolve a interação das propriedades estruturais em vários níveis, como mostra a Figura 3.8. Sob o aspecto estrutural, o momento dipolar tem uma propriedade micromolecular (monomérica). A conformação da cadeia (planar zig-zag para a fase β) tem uma propriedade macromolecular e a natureza ferroelétrica, que envolve orientação cooperativa entre dipolos e tem uma propriedade cristalina [46]. Na Figura 3.8, os eixos Cartesianos 1,2,3 são da película e a,b,c são do cristalino onde:

- (a) - mostra o dipolo macromolecular do monômero;
- (b) - é um segmento de cadeia, mostrando os dipolos (representado pelas flexas);
- (c) - mostra a orientação dos dipolos com um segmento de cadeia adjacente, em um cristalino, resultando em momento dipolar cristalino;
- (d),(e) e (f) - mostram a relação entre os eixos do cristalino e os eixos da película no estado fundido, na película tracionada mecanicamente (orientada) e polarizada eletricamente.

As propriedades de transdução envolvem deformações induzidas mecanicamente ou termicamente, mas essas deformações são caracterizadas pelo coeficiente do material, que depende das propriedades da fase amorfa, composta de emaranhados de cadeias macromoleculares.

Devido as propriedades elétricas, mecânicas e térmicas dependerem do método de processamento e do pós-tratamento, incluindo a polarização ou têmpera, o alcance das propriedades dos transdutores de PVDF são grandes. Principalmente, por que no PVDF a transformação da fase cristalina pode ser realizada por tração mecânica, por alto campo de polarização, ou ambos. Assim, tracionando a película várias vezes, além do seu comprimento inicial, não somente

induz favoravelmente a orientação mecânica (cadeias macromoleculares paralelas à direção de tração, eixo 1 da Figura 3.8) mas também, transforma a forma antipolar α para a forma β , que é polar e ferroelétrica. Dependendo se o estiramento for uniaxial ou biaxial, as propriedades mecânicas e elétricas, e assim, as propriedades de transdução, são altamente anisotrópicas ou isotrópicas no plano da película.

As características estruturais, as propriedades dependentes dos tratamentos e o largo alcance dos possíveis tratamentos (razão de tração de até 10 vezes), todos indicam que, apesar do material PVDF ter uma clara identidade química (bem definida estrutura macromolecular), as propriedades de transdução do PVDF não são imediatamente aparentes através da identidade química. Essa circunstância implica no desenvolvimento de um transdutor, uma oportunidade e um problema. A oportunidade encontra-se no longo alcance das possibilidades. O problema encontra-se em prever *in situ* o desempenho e a calibração. De qualquer modo, nos casos onde o tratamento não é totalmente conhecido (para materiais comerciais alguns aspectos do tratamento não são disponíveis), a previsão do desempenho não pode ser realizada e o processo de modelagem de um transdutor deve ser feito por um extenso número de testes.

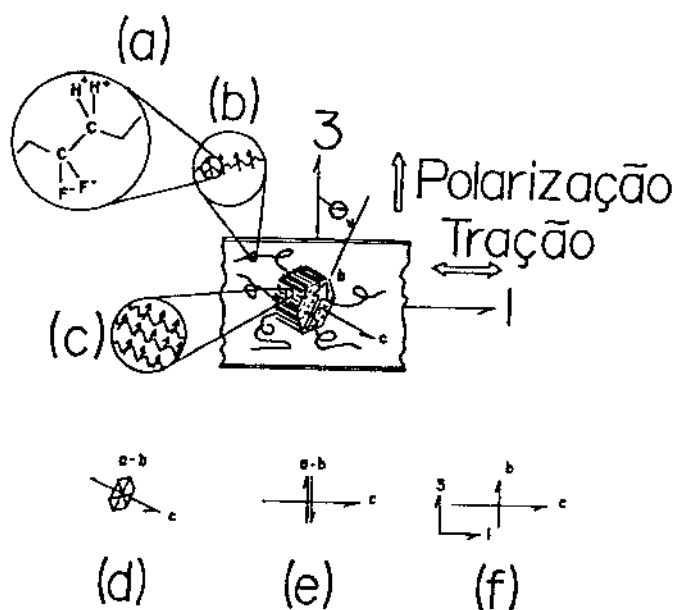


Figura 3.8: Representação geral de um polímero semicristalino do PVDF [46].

3.3.2 Modelo ferroelétrico dipolar do PVDF.

REGGI [46] no estudo das características de transdução do PVDF, principalmente na aplicação de medidas de pressões dinâmicas e temperaturas, inicialmente estabeleceu as seguintes considerações quanto ao modelo ferroelétrico dipolar:

- No modelo ferroelétrico dipolar, todos os cristalinos têm seu eixo c ou eixo da cadeia normal ao plano da Figura 3.9.
- Cada dipolo elétrico está representado por uma flexa (Figura 3.9 a,b) e pode ser considerado como a resultante do momento dipolar, μ , obtido somando-se vetorialmente todos os momentos dipolares elementares (macromoleculares) em um cristalino (há um dipolo por unidade $\text{CH}_2\text{-CF}_2$).
- Cada cristalino é considerado ser um simples ferroelétrico, tal que a orientação de equilíbrio de todos os dipolos elementares, no cristalino, são os mesmos.
- Todos os cristalinos contêm o mesmo número de dipolos, tal que os momentos dipolares na película são todos de mesma magnitude. Em qualquer momento, os dipolos elementares, individualmente ou coletivamente, estão em um estado de vibração, e a amplitude vibracional (ângulo entre o dipolo e seu estado orientacional de equilíbrio) é uma função da temperatura e do volume.
- O momento dipolar cristalino permanece restrito ao plano perpendicular ao macromolecular eixo da cadeia.

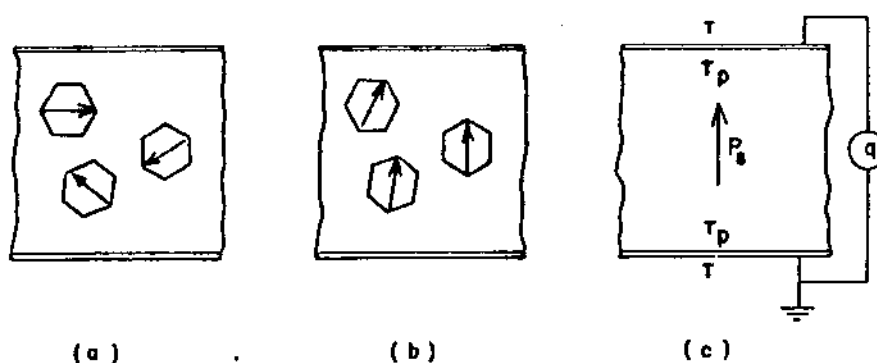


Figura 3.9: Modelo ferroelétrico: (a) película não orientada com os dipolos cristalinos em cada cristalino, apontando com igual probabilidade em qualquer uma das seis direções possíveis; (b) película polarizada, com os dipolos cristalinos alinhados; (c) P_s representa o vetor polarização [46].

Antes da polarização o momento dipolar pode apontar em qualquer uma das seis direções da unidade celular que tem simetria quase hexagonal, simbolizado por um hexágono na Figura 3.9 a. Após a polarização por saturação, cada dipolo apontará na direção mais próxima ao campo polarizado (Figura 3.9 b) e a amostra estará em um estado de orientação elétrica. Um vetor polarização terá a magnitude $P_s = (N\mu/V) \cdot \sum_{i=1}^N \cos\theta_i$, onde N , é o número de dipolos por unidade de volume V . Sendo a soma sobre todo o cristalino. A vantagem da orientação mecânica induzida por estiramento é que o fator de orientação $\cos\theta_i$ está próximo da unidade. Se a cadeia foi aleatoriamente orientada, o fator de orientação envolverá um ângulo adicional médio sobre o eixo orientacional, e assim o fator dipolar de orientação será de $1/3$. Como mostra a Figura 3.9(c), a polarização acarreta uma densidade dipolar de tensão superficial $\pm T_p$, nas superfícies da amostra ($\pm T_p = P_s$.) Se as superfícies da película, cada uma com área A , são metalizadas e ligadas juntas, uma carga positiva compensadora, $q = T_p \cdot A$, será atraída para um eletrodo com carga dipolar negativa, e uma carga $(-q)$ para o outro eletrodo.

3.3.3 Conceito de transdução.

Um transdutor é um sistema que converte energia de uma forma em outra com o objetivo de medi-la ou interpretá-la. A entrada mecânica e saída elétrica é a base de muitos instrumentos para a medição de aceleração, força e pressão. A reprodução fiel destas grandezas, pelo equipamento de medida, é o objetivo do projeto de transdutores. Uma resposta elétrica ocorrerá se qualquer estímulo externo produzir uma mudança em P_s . São chamados *efeitos de respostas primárias* aqueles que estão associados com a variação em P_s , sem que ocorra qualquer variação no volume. Além do efeito de cisalhamento há outras fontes plausíveis para o efeito primário: (1) o efeito do movimento médio (*motional-averaging effect*) que é dependente da temperatura e da pressão; (2) em uma película mecanicamente não-orientada ou parcialmente orientada, a orientação do eixo da cadeia, e portanto a orientação dipolar, pode ser medido devido à tensão aplicada na direção 1, Figura 3.9. Esse efeito atua de forma semelhante ao mecanismo que produz a orientação mecânica. Nele as deformações envolvidas são pequenas e presumivelmente reversíveis. A diferença está no fato de que tudo isso ocorre à temperatura ambiente, enquanto que a temperatura de tração varia entre 70^0 a 100^0 C.

Respostas secundárias são aquelas que estão associadas com a variação de P_s devido a variação de volume - chamada de efeito dimensional. Essas respostas são dominadas pelo efeito da diluição dipolar, onde uma mudança no volume produz uma mudança na densidade dipolar (número de dipolos por unidade de volume).

BROADHURST *et alii* [8], WADA & HAYAKAWA [61] ao propuserem o desen-

volvimento teórico da característica piezoelétrica e piroelétrica do PVDF, embora baseando-se em modelos diferentes, enfatizaram um mecanismo comum, o efeito dimensional, que assume que as atividades piro e piezoelétricas que surgem da mudança macroscópica dimensional, quando uma película é deformada, muito embora o momento dos dipolos moleculares constituintes permaneçam constantes. TASAKA & MIYATA [53] mostraram que a atividade piezoelétrica do PVDF, expressada pela teoria de WADA & HAYAKAWA [61], depende de 3 (três) efeitos: Razão de *Poisson*, Constante de Eletrostricção e piezoeletricidade do cristal. Entre eles, o efeito da Razão de *Poisson* foi responsável por mais de 50 % da atividade piezoelétrica.

3.3.4 Formulação de respostas piezoelétricas.

Por simplicidade, chama-se de resposta o diferencial de carga (dq) que é transferido de um eletrodo para outro, quando a película reage à mudança de temperatura e ou mudança de pressão. Esse diferencial pode ser calculado por:

$$dq = T.A = P_s.A = \frac{N.\mu. < \cos\theta >}{V}.A. \quad (3.1)$$

Numa película de espessura (t), eletrodo com área (A), contendo N dipolos de momento μ , alinhados na direção da espessura, com coeficiente de orientação $< \cos\theta >$, a polarização é dada por:

$$P_s = \frac{N.\mu. < \cos\theta >}{A.h}. \quad (3.2)$$

A carga induzida total (q) sobre o eletrodo é:

$$q = P_s.A = \frac{N.\mu. < \cos\theta >}{h}. \quad (3.3)$$

No efeito dimensional associado com o efeito direto assume-se que os dipolos são rígidos. Isto é, os parâmetros N , μ e $< \cos\theta >$, permanecem constantes quando a película sofre deformação. Nessa situação, uma mudança em (q) ocorre devido unicamente a uma mudança na espessura [46].

Em geral, para uma película em que as dimensões l , b e h , representam respectivamente o comprimento, a largura e a espessura, onde a área do eletrodo coincide com a área do sensor $A = l.b$, existem as seguintes relações:

$$\frac{dV}{V} = \frac{dA}{A} + \frac{dh}{h} , \quad (3.4)$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{dl}{l} + \frac{db}{b} , \quad (3.5)$$

$$\frac{dh}{h} = \frac{dV}{V} - \frac{dA}{A} . \quad (3.6)$$

3.4 Processos de interação entre sistemas elétrico, mecânico e térmico.

Sabe-se que a piezoelectricidade é uma interação linear entre os sistemas elétricos e mecânicos; piroelectricidade, é uma interação entre os sistemas elétricos e térmicos.

Os possíveis processos de interação entre quaisquer dois dos três sistemas elétrico, mecânico e térmico, são mostrados na Figura 3.10. Nos vértices do triângulo maior estão as *variáveis intensivas*, enquanto nos vértices do triângulo menor estão as *variáveis extensivas* dos respectivos sistemas. A linha ligando duas variáveis indica acoplamento entre as respectivas variáveis, onde a notação sem asterístico indica o *efeito direto* e com asterístico indica o *efeito inverso* [21].

Com a aplicação de uma tensão mecânica à película do PVDF, após a polarização, este desenvolverá um momento dipolar elétrico, cuja magnitude é proporcional à tensão aplicada. Isso é conhecido como *efeito piezoelétrico direto*. Por exemplo, a aplicação de uma tensão uniaxial T ao longo do eixo de polarização da película de PVDF, a magnitude do momento elétrico por unidade de volume, ou a carga de polarização por unidade de área é dada por,

$$Ps_i = e_{ijk}.T_{jk} , \quad (3.7)$$

onde (e) é uma constante denominada módulo piezoelétrico.

Desta equação é possível deduzir que uma mudança de uma tensão de tração para uma tensão de compressão de mesmo módulo reverte o sentido de polarização.

Quando um campo elétrico é aplicado ao PVDF, este sofre uma pequena alteração. Isso é conhecido como *efeito piezoelétrico inverso*. Sua existência é uma consequência termodinâmica do efeito direto. Existe, então uma relação linear entre os componentes do vetor I_i , que

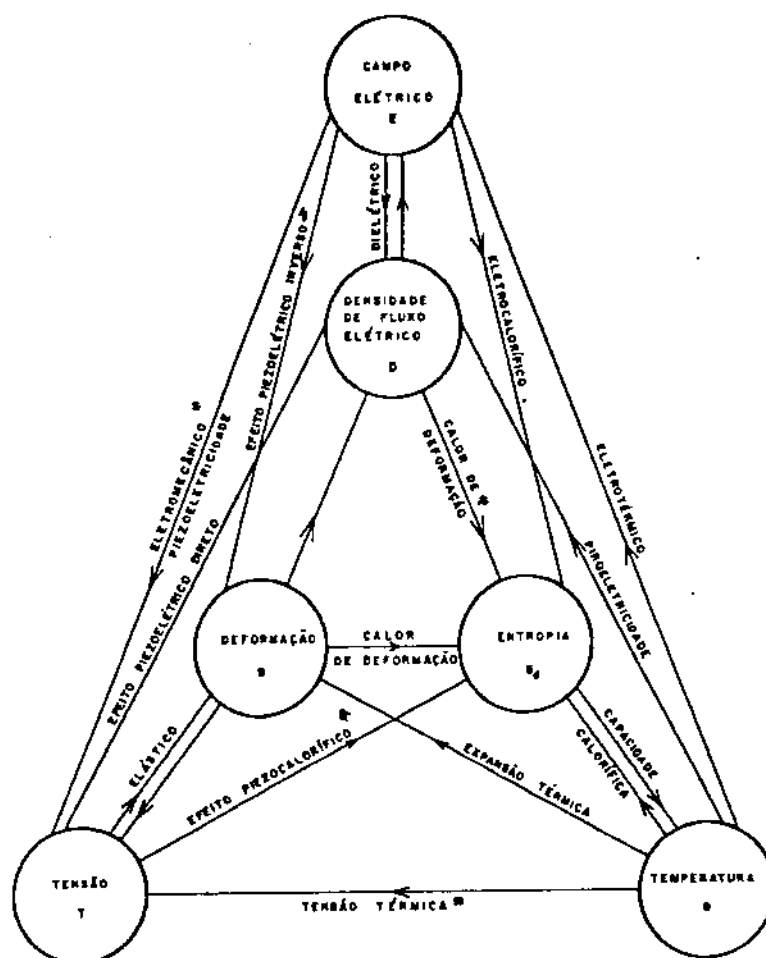


Figura 3.10: Processos de interação entre os sistemas mecânico, elétrico e térmico [21].

dá a intensidade do campo elétrico dentro do PVDF, e os componentes do tensor deslocamento elétrico D_{ij} , que descrevem a mudança do formato. Além disso, os coeficientes que conectam o campo elétrico e o de deformação no efeito inverso são os mesmos que conectam a tensão e a polarização no efeito direto,

$$D_{jk} = e_{ijk} \cdot I_i . \quad (3.8)$$

Através do estudo do efeito piezolétrico direto de uma casca polarizada piezolétrica, submetida a vibração mecânica, Tzou [59], [58] desenvolveu a equação geral do campo elétrico I_3 e da distribuição da voltagem v_3 .

As equações constitutivas 3.9 e 3.10, foram formuladas assumindo-se que as mesmas estavam balanceadas elétrica e mecanicamente, em qualquer instante, podendo ser desacopladas. Indica, ainda, que foram linearizadas por uma aproximação quase-estática.

Em geral, uma equação piezoelétrica dimensional linear tridimensional pode ser escrita como equações 3.9 e 3.10:

$$\begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & c_{45} & c_{55} & c_{56} \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & c_{46} & c_{56} & c_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_{11} \\ u_{22} \\ u_{33} \\ u_{23} \\ u_{13} \\ u_{12} \end{Bmatrix} - \begin{pmatrix} e_{11} & e_{21} & e_{31} \\ e_{12} & e_{22} & e_{32} \\ e_{13} & e_{23} & e_{33} \\ e_{14} & e_{24} & e_{34} \\ e_{15} & e_{25} & e_{35} \\ e_{16} & e_{26} & e_{36} \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{Bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & e_{15} & e_{16} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & e_{25} & e_{26} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & e_{35} & e_{36} \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_{11} \\ u_{22} \\ u_{33} \\ u_{23} \\ u_{13} \\ u_{12} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

Elas podem ser simplificadas em duas equações:

$$\{T\} = [c^I]\{u\} - [e]\{I\} , \quad (3.11)$$

$$\{D\} = [e]^T \{u\} + [e^s] \{I\} , \quad (3.12)$$

onde:

$\{T\}$ = vetor tensão;

$\{u\}$ = vetor deformação;

$\{I\}$ = vetor campo elétrico;

$\{D\}$ = vetor deslocamento elétrico;

e^I = matriz elasticidade, medido no campo elétrico constante;

e = matriz coeficiente piezoelétrico (permissividade dielétrica);

e^s = matriz dielétrica, medido a deformação constante;

Observa-se que a intensidade elétrica é:

$$I = dt/dQ \text{ (N/C) ou (V/m)}$$

$$D = (\text{Coulomb}/m^2).$$

As equações 3.11 e 3.12 são formuladas assumindo-se que ambas são mecanicamente e eletricamente balanceadas em qualquer instante e elas podem ser desacopladas por uma aproximação quase linear.

Para um meio eletromecânico, a entalpia H é substituída pela energia interna U na equação de *Lagrange*. Assim, o lagrangeano L para o meio piezoelétrico é definido por:

$$L = \int_V (T - U) dV = \int_V \left(\frac{1}{2} \rho \cdot \{\dot{\eta}\}^T \{\dot{\eta}\} - \frac{1}{2} (\{u\}^T \cdot \{T\} - \{I\}^T \cdot \{D\}) \right) dV , \quad (3.13)$$

onde V é o volume da película piezoelétrica.

O trabalho virtual δW feito pelas forças externas e a carga superficial aplicada (σ) é

$$\delta W = \int_V \{\delta \eta\}^T \cdot \{F_b\} \cdot dV + \int_{S_1} \{\delta \eta\}^T \cdot \{F_s\} \cdot dS_1 + \{\delta \eta\}^T \cdot \{F_C\} - \int_{S_2} \delta \theta \cdot \sigma \cdot dS_2 , \quad (3.14)$$

onde $\{F_b\}$ é a força de corpo (*body force*), $\{F_S\}$ a força superficial, $\{F_C\}$ é a carga concentrada e (σ) carga superficial. A equação que define o comportamento de um película piezoelétrica foi obtida usando o Princípio de *Hamilton*,

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(L + W).dt = 0, \quad (3.15)$$

onde t_1 e t_2 são instantes temporais. De acordo com o Princípio de *Hamilton* [62], todas as variações de energia são iguais a zero, exceto para $t = t_1$ e $t = t_2$. Assim ao substituir as equações 3.13 e 3.14 na equação 3.15, resulta a equação variacional 3.16, da qual obtém-se, através da simplificação do Princípio de *Love* [48], a equação geral do campo elétrico I_3 para uma casca piezoelétrica [62]:

$$\begin{aligned} \int_V [\delta.\{\delta\dot{\eta}\}^T.\{\dot{\eta}\} - \{\delta u\}^T[c]\{u\} + \{\delta u\}^T[e]\{I\} + \{\delta I\}^T[e]\{u\} + \{\delta I\}^T[c]\{I\} + \{\delta\eta\}^T[F_b]].dV \\ + \int_{S_1} \{\rho\eta\}^T\{F_S\}.dS_1 - \int_{S_2} \rho.\theta.\sigma.dS_2 + \{\rho\eta\}^T\{F_C\} = 0, \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} I_3 = & \frac{e_{31}}{\epsilon_{33}} \left(\left(\frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial \eta_1}{\partial \alpha_1} + \frac{\eta_2}{A_1 \cdot A_2} \cdot \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} + \frac{\eta_3}{R_1} \right) + \alpha_3 \cdot \left(\frac{1}{A_1 \cdot R_1} \cdot \frac{\partial \eta_1}{\partial \alpha_1} - \frac{1}{A_1^2} \cdot \frac{\partial^2 \eta_3}{\partial \alpha_1^2} \right. \right. \\ & + \left. \frac{1}{A_1 \cdot A_2} \cdot \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \cdot \left(\frac{\eta_2}{R_2} - \frac{1}{A_2} \cdot \frac{\partial \eta_3}{\partial \alpha_2} \right) \right) + \frac{e_{32}}{\epsilon_{33}} \left(\left(\frac{1}{A_2} \cdot \frac{\partial \eta_2}{\partial \alpha_2} + \frac{\eta_1}{A_1 \cdot A_2} \cdot \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} + \frac{\eta_3}{R_2} \right) \right. \\ & + \left. \alpha_3 \cdot \left(\frac{1}{A_2 \cdot R_2} \cdot \frac{\partial \eta_2}{\partial \alpha_2} - \frac{1}{A_2^2} \cdot \frac{\partial^2 \eta_3}{\partial \alpha_2^2} + \frac{1}{A_1 \cdot A_2} \cdot \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} \cdot \left(\frac{\eta_1}{R_1} - \frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial \eta_3}{\partial \alpha_1} \right) \right) \right). \end{aligned} \quad (3.17)$$

A distribuição de voltagem da casca de PVDF na direção 3 resulta da integração de I_3 na direção 3.

$$\begin{aligned} v_3 = & \int_{\alpha_3} \left(\frac{e_{31}}{\epsilon_{33}} \left(\left(\frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial \eta_1}{\partial \alpha_1} + \frac{\eta_2}{A_1 \cdot A_2} \cdot \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} + \frac{\eta_3}{R_1} \right) + \alpha_3 \cdot \left(\frac{1}{A_1 \cdot R_1} \cdot \frac{\partial \eta_1}{\partial \alpha_1} - \frac{1}{A_1^2} \cdot \frac{\partial^2 \eta_3}{\partial \alpha_1^2} \right. \right. \right. \\ & + \left. \frac{1}{A_1 \cdot A_2} \cdot \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \cdot \left(\frac{\eta_2}{R_2} - \frac{1}{A_2} \cdot \frac{\partial \eta_3}{\partial \alpha_2} \right) \right) + \frac{e_{32}}{\epsilon_{33}} \left(\left(\frac{1}{A_2} \cdot \frac{\partial \eta_2}{\partial \alpha_2} + \frac{\eta_1}{A_1 \cdot A_2} \cdot \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} + \frac{\eta_3}{R_2} \right) \right. \\ & + \left. \left. \alpha_3 \cdot \left(\frac{1}{A_2 \cdot R_2} \cdot \frac{\partial \eta_2}{\partial \alpha_2} - \frac{1}{A_2^2} \cdot \frac{\partial^2 \eta_3}{\partial \alpha_2^2} + \frac{1}{A_1 \cdot A_2} \cdot \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} \cdot \left(\frac{\eta_1}{R_1} - \frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial \eta_3}{\partial \alpha_1} \right) \right) \right) \right) .d\alpha_3, \end{aligned} \quad (3.18)$$

onde:

A_1 , A_2 e A_3 são parâmetros de Lamé e α_1 , α_2 e α_3 são as coordenadas superficiais da superfície neutra da casca piezoelétrica e R_1 e R_2 seus raios de curvaturas

3.5 Comparação do Polyvinylidene Fluoride com outros materiais piezoelétricos.

O PVDF difere significativamente dos materiais piezoelétricos convencionais. Por exemplo, ele é disponível em finas películas de tamanho variável. Assim, transdutores de larga área e alta capacitância podem ser projetados e são facilmente manuseados do ponto de vista da amplificação.

A lâmina de PVDF pode ser feita com geometria variada, plana ou curva, características muito importantes em muitas aplicações. Outra característica do PVDF é sua impedância acústica relativamente baixa, o qual combina rigorosamente com a da água e assim permite bom acoplamento acústico do polímero na água e vice-versa. Finalmente, a máxima deformação alcançável com esse material é muito grande devido ao seu alto campo de despolarização.

Nesses aspectos o PVDF é superior aos convencionais materiais piezoelétricos. Essas vantagens têm estimulado a pesquisa para aplicação do PVDF, apesar do fato de que o tamanho e a estabilidade térmica de suas respostas piezoelétricas são inferiores para às correspondentes características do material cerâmico.

Sua característica piezoelétrica é muito importante quando se trata da sua utilização como transdutor, pois, tanto a sua polarização espontânea como a sua polarização induzida são muito sensíveis quando ela sofre a ação de um campo elétrico. A natureza piezoelétrica da película de PVDF estirada foi demonstrada por diversas experiências [6], [32], [52].

Entre as principais características do PVDF, destacam-se:

- largo espectro de frequência, de aproximadamente 0 (zero) a 10^9 Hz;
- vasta gama de sensibilidade dinâmica, de $(10^{-8}$ a 10^6 psi) ou a (μtorr);
- baixa impedância acústica, condizente com a da água e pele humana;
- alta deformação elástica, reproduz fielmente as forças de entrada (*input forces*);
- alta voltagem de saída, 10 vezes mais alta do que de uma piezocerâmica, para uma mesma força;
- alta resistência dielétrica, resiste a forte campo ($75 \text{ V}/\mu\text{m}$), onde muito das piezocerâmicas falham;
- alta estabilidade, resiste à umidade, agentes químicos, oxidantes e intensa radiação ultravioleta (0.01 % de absorção da água);
- alta resistência mecânica e resistência a impacto (10^9 a 10^{10} Pascal);
- baixo custo da matéria prima e fabricação;
- facilmente cortada, moldada e manufaturada, em diversas formas;

As propriedades do PVDF estão na Tabela 3.2.

A comparação das propriedades acústicas, piezoelétricas, e piroelétricos do PVDF com alguns outros materiais são mostradas nas Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6. Na Tabela 3.4, (G) é a amplitude do coeficiente de reflexão entre dois materiais de impedância específicas Z_1 e Z_2 ($G = |(Z_1 - Z_2)/(Z_1 + Z_2)|$).

Embora o PVDF tenha magnitude da constante de deformação (d) menor do que o PZT, o campo de força que pode ser aplicado ao polímero é aproximadamente 100 vezes maior. Desde que na aplicação de transdutores a deformação é proporcional à constante (d) e ao campo, a máxima deformação alcançada com o transdutor de PVDF é 10 vezes maior do que para sistema cerâmico. Deve-se acrescentar, ainda, que a atividade piezoelétrica do PVDF é reversível até a pressão de 9.0 Kbar, fazendo com que ele seja um material promissor para ser usado como transdutor com pressão dinâmica, por exemplo, em balística [5].

Outra importante característica do PVDF é o fato de que a aplicação de um alto campo elétrico variável não despolariza a película. Experiências feitas por LINVILL [26] revelou que a aplicação de um campo de 30 Volts/ μm não deteriorou a película. Dessa experiência resulta, que o PVDF exibe como transdutor, uma alta potência de saída por unidade de volume.

A máxima temperatura de trabalho do PVDF é limitado a aproximadamente 80°

C. Para temperaturas superiores a este valor, os transdutores cerâmicos são os mais indicados.

Tabela 3.2: Propriedades da película de PVDF ...continua na Tabela 3.3.

Propriedade	Símbolos	Valores	Unidades	Condições
Espessura	h	9, 16, 28, 52 110, 220, 800	μm	
Const. de Deform.	d_{31} d_{32} d_{33} d_t e_{33}	23×10^{-12} 3×10^{-12} -33×10^{-12} -22×10^{-12} 0.16	$(m/m)/(V/m)$ $(m/m)/(V/m)$ " $(C/m^2)/(N/m^2)$ $(C/m^2)/(m/m)$ ou $(N/m^2)/(V/m)$	engastada lateralmente
Const. de Tensão	g_{31} g_{32} g_{33} g_t	216×10^{-3} 19×10^{-3} -339×10^{-3} -207×10^{-3}	$(V/m)/(N/m^2)$ " " "	engastada lateralmente
Acopla. Eletro-mecânico	k_{31} k_t	12.0 29.0	% %	@100 Hz @100 MHz
Permissiv.	e	106×10^{-12}	F/m	@10 KHz
Permis. Relat.	e/e_o	12.0		@10 KHz
Capacitância	C	379×10^{-12}	F/cm ²	película de 28 μm (@10 KHz)
Impedância Acústica	Z_a "	3.9×10^6 2.7×10^6	kg/m ² .sec "	direção 3 direção 1
Impedância elétrica	Z_e	1350	ohms	100 cm ² para película de 9 μm (@ 1.0 KHz)
Veloc. do Som	v_s "	2.2×10^3 1.5×10^3	m/sec "	direção 3 direção 1
Coef. Piroel.	j	-30×10^{-6}	$C/(m^2 K)$	@20°C
Resis. Vol.	ρ_v	1.5×10^{13}	ohm-m	@20°C
Resist. Superf. dos Eletrodos	ρ_s	< 2.0 < 0.5	ohms/quadrado "	alumínio prata

Tabela 3.3: continuação da Tabela 3.2 - Propriedades da película de PVDF [55].

Fator de Dissipação	$\tan \delta_e$	0.015 - 0.02		@10 KHz
Perda Mecânica Tangencial	$\tan \delta_m$	0.10		
Deformação Dielétrica	D_B	75.0	V/ μm	
Máximo Campo de Operação	E_0	10.0 30.0	V/ μm ,,	@d.c @a.c
Densidade	ρ	1.78×10^3	kg/m ³	
Absorção d'agua	0.02	%		por pêsso
Módulo de Young	Y	2.10^9	N/m ²	
Elongação na Flexão	S_v	2 - 5	%	
Resistência de Tensão na Ruptura	T_B ,,	$140 - 210 \times 10^6$ $30 - 55 \times 10^6$	N/m ² ,,	direção 1 direção 2
Alongamento de Ruptura	S_B ,,	2.5 - 4.0 380 - 430	% %	direção 1 direção 2

Tabela 3.4: Comparação das propriedades acústicas do PVDF com outros materiais [55].

	ρ ($10^3 kg/m^3$)	V_s ($10^3 m/s$)	Z_a ($10^6 kg/s.m^2$)	G água	G PVDF
água	1.0	1.5	1.5	0.0	0.44
PVDF	1.8	2.2	3.9	0.43	0.0
Epoxi	1.2	2.5	3.0	0.33	0.13
Bronze	8.5	4.4	37.0	0.92	0.81
PZT	7.5	3.2	24.0	0.88	0.72

Tabela 3.5: Comparação das propriedades piezoelétricas do PVDF com outros materiais [55].

Propriedades	Unidade	PVDF	PZT	$BaTiO_3$
Densidade	$10^3 kg/m^3$	1.78	7.5	5.7
Permissividade Relativa	ϵ/ϵ_0	12.0	1.200	1.700
Constante d_{31}	$(10.0^{-12}) C/N$	23.0	110.0	78.0
Constante g_{31}	$(10.0^{-3}) Vm/N$	216.0	10.0	5.0
Constante k_{31}	% à 1.0 KHz	12.0	30.0	21.0
Impedância Acústica	$(10.0^6) kg/m^2.sec$	2.7	30.0	30.0

Tabela 3.6: Comparação das propriedades piroelétricas do PVDF com outros materiais [55].

Propriedades	Unidade	PVDF	PLZT	TGS
Permissividade Relativa	ϵ/ϵ_0	12.0	3.700	30.0
Resistividade Volumétrica	ohm-cm	10^{15}	10^7	10^{10}
Calor Específico	$J/(cm^3K)$	2.4	2.6	2.5
Coefficiente Piroelétrico	$10^{-6} C/m^2K$	-30	-170	-300
Condutividade Térmica	W/m K	0.19	-	-

Capítulo 4

Materials e Métodos.

4.1 Generalidades.

Neste trabalho desenvolveu-se uma nova metodologia que utilizou como parâmetro de referência, o nível de voltagem gerado pelo acelerômetro em PVDF, para qualificar o comportamento dinâmico de um dado sistema vibrante, de forma simples, rápida, acurada e baixo custo.

O trabalho foi desenvolvido em duas fases. Na primeira fase, denominada **Metodologia de medida do fluxo de energia**, desenvolveu-se uma metodologia de medida do fluxo de energia, em função da rotação e do nível de desbalanceamento do sistema dinâmico. Nesta fase as seguintes etapas foram cumpridas:

- desenvolvimento de um sistema mecânico, que permitiu a obtenção do fluxo de energia, denominado Mesa Absorvedora de Vibração;
- aferição estática e dinâmica do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração;
- desenvolvimento da metodologia de medida da força, aceleração e cálculo do fluxo de energia;
- caracterização dinâmica da Mesa Absorvedora de Vibração.

Na segunda fase, denominada **Metodologia de qualificação do sistema dinâmico**, desenvolveu-se a metodologia de qualificação do sistema dinâmico através do acelerômetro em PVDF. As principais etapas desta fase foram:

- desenvolvimento do novo tipo de acelerômetro e do circuito eletrônico responsável pelo processamento e armazenamento dos sinais, emitidos pelas películas piezoelétricas do acelerômetro;
- caracterização dinâmica do acelerômetro em PVDF;
- obtenção das variáveis de qualificação do sistema dinâmico em teste.

Para o desenvolvimento das duas fases montou-se uma bancada dinamométrica, conjunto formado pelos instrumentos de medida e controle (Figura 4.1). Utilizou-se a bancada, também para obter o fluxo de energia e o nível de voltagem gerado pelo acelerômetro em PVDF, em função do desbalanceamento e rotação do sistema dinâmico, sobre a Mesa Absorvedora de Vibração.

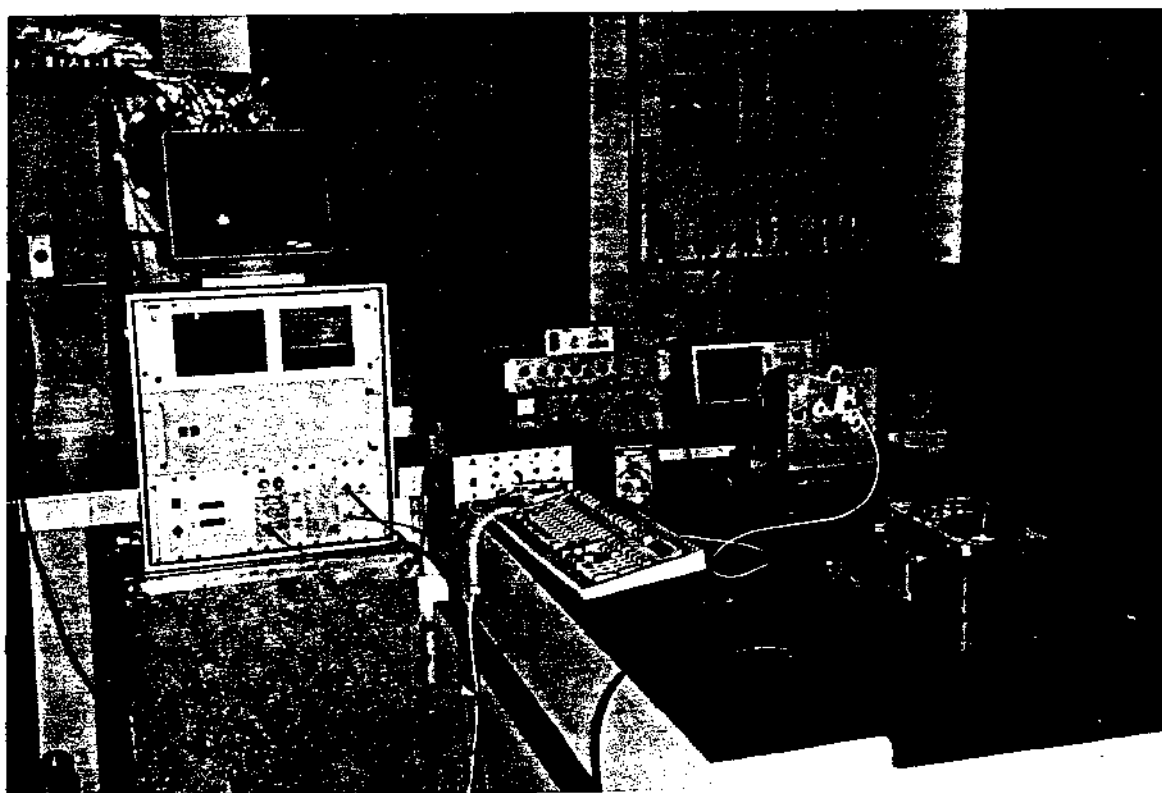


Figura 4.1: Vista geral da bancada dinamométrica.

4.2 Metodologia de medida do fluxo de energia.

Para a medida do fluxo de energia desenvolveu-se uma Mesa Absorvedora de Vibração (Figura 4.3), ou seja, desenvolveu-se um sistema que atuou de forma semelhante

ao absorvedor mecânico desenvolvido por Brock [10]. O sistema absorveu a energia mecânica gerada pelo sistema dinâmico, possibilitando calcular o fluxo de energia, medindo-se a força e a aceleração.

Os sinais elétricos emitidos pelo acelerômetro e pelo dinamômetro, em função do desbalanceamento e rotação do sistema dinâmico, foram amplificados pelos condicionadores de sinais, passaram pelo filtro de frequência e foram enviados simultaneamente ao analisador espectral e ao osciloscópio. O controle da rotação do motor foi feito utilizando-se um variador de rotação, enquanto a variação do nível de desbalanceamento foi realizada colocando-se contrapesos na polia do motor. O analisador espectral controlava o sistema de aquisição de sinais através de um sensor de deslocamento, posicionada à frente da polia do motor (Figura 4.16).

A Figura 4.2 mostra, esquematicamente, a distribuição dos equipamentos utilizados na medição e processamento dos sinais gerados pelo sistema dinâmico.

Simulou-se o sistema dinâmico com um motor de 0.5 HP (Kuper - modelo K57.L2) de corrente contínua. Considerou-se como nível referencial do sistema dinâmico, a vibração gerada pelo motor, quando não havia contrapeso na polia do motor ($M_0 = 0.0$ gr.).

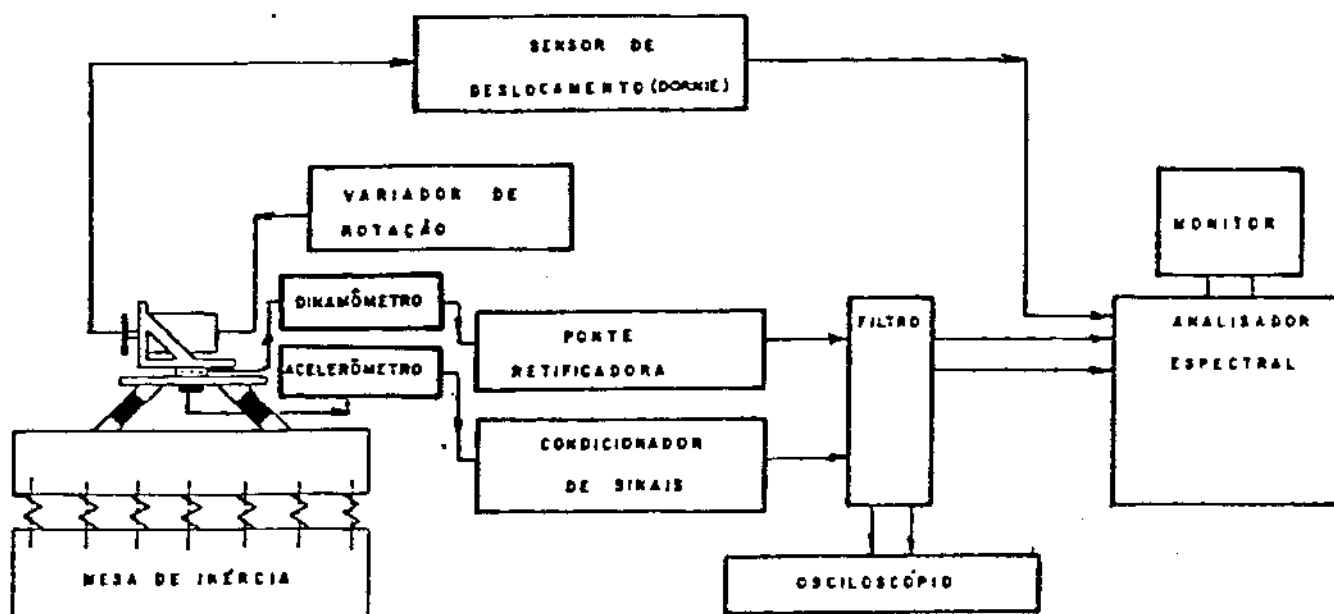


Figura 4.2: Figura esquemática da distribuição dos equipamentos utilizados na obtenção do fluxo de energia.

Os contrapesos foram classificados em 6 (seis) diferentes tipos, em função da variação da sua massa (Tabela 4.1). As massas dos contrapesos foram medidas através de uma balança analítica de precisão (Mettler A33AR).

Tabela 4.1: Denominação e valores das massas dos contrapesos.

Contrapesos		
item	denominação	massa (gr.)
1	M0	0.0
2	M1	3.9922
3	M2	6.1571
4	M3	7.9617
5	M4	8.5629
6	M5	10.7347

4.2.1 Aspectos gerais e constitutivos da Mesa Absorvedora de Vibração.

A Mesa Absorvedora de Vibração (Figura 4.3) é constituída basicamente de uma plataforma e de dois amortecedores (2). A plataforma é formada pela placa base (1) e a placa suporte (10). Sobre a placa suporte instalou-se o sistema dinâmico (5). Entre as duas placas montou-se o dinamômetro (6). Na parte inferior e central da placa base (1) instalou-se o acelerômetro (Figura 4.4). Todo o conjunto foi montado sobre uma mesa de inércia (4).

Os amortecedores de borracha (2) estavam presos à placa base e à mesa de inércia (4), através de peças de junção (8), construídas de forma a manter a plataforma sempre na posição horizontal e os amortecedores com inclinação de 45° (Figura 4.5). Devido a inclinação, rigidez e dimensões, os amortecedores trabalharam simultaneamente à carga de compressão e cisalhamento. Essas características dão aos amortecedores da Mesa Absorvedora de Vibração, melhor desempenho, quanto à capacidade de armazenar energia específica [20].

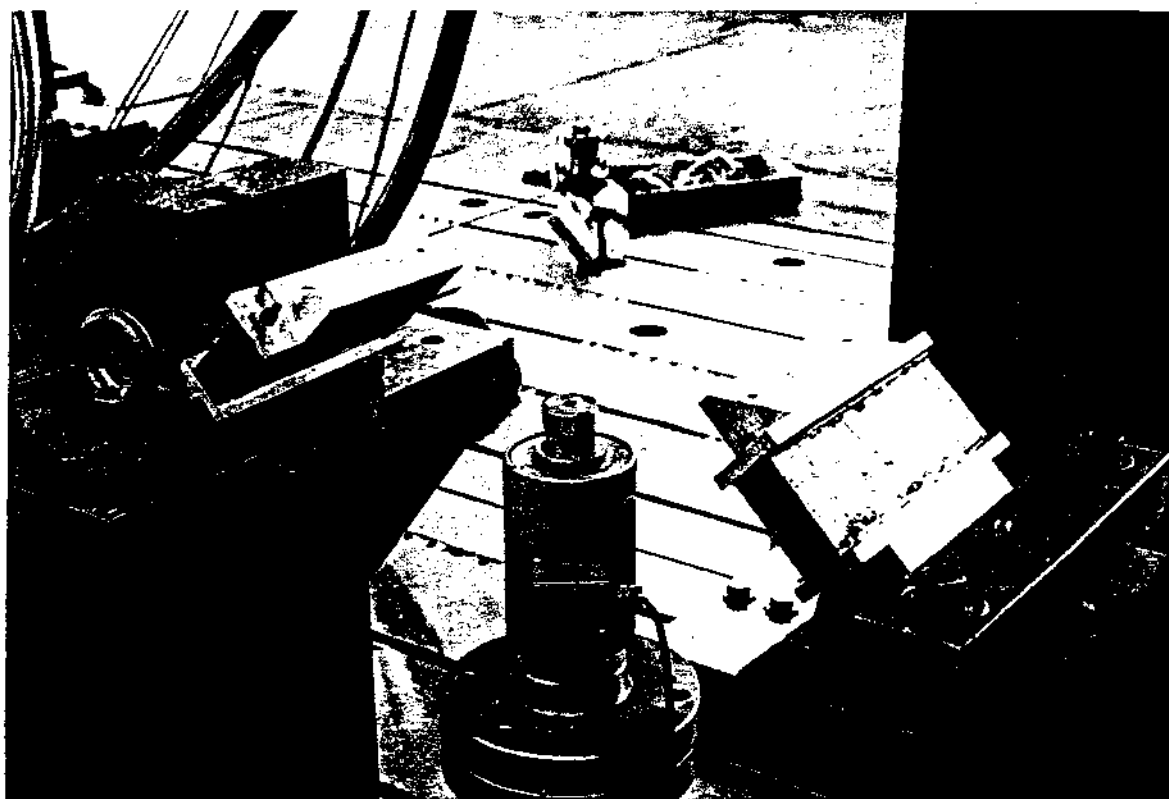


Figura 4.5: Posição dos amortecedores em função da peças de junção.

4.2.2 Medidas das forças estáticas e dinâmicas.

As medidas das forças estáticas e dinâmicas geradas pelo sistema dinâmico foram feitas através de um dinamômetro resistivo (Figura 4.6) desenvolvido por Plaza [38]. O dinamômetro possui como elementos sensíveis, corpos elásticos (Figura 4.8), cuja forma de construção atendeu às exigências da sensibilidade e da rigidez a serem alcançadas. Os elementos sensíveis são duas vigas de aço de alto carbono, em balanço, cuja deformação microscópica é transformada em sinal elétrico, através de 4 (quatro) extensômetros. Os extensômetros foram colados na sua extremidade engastada, formando uma ponte de *Wheatstone* completa (Figura 4.7). A flexão da viga devido ao deslocamento do lado livre (em relação a extremidade engastada), solicita uma superfície à tração e outra à compressão, cujas deformações são medidas pelos extensômetros.

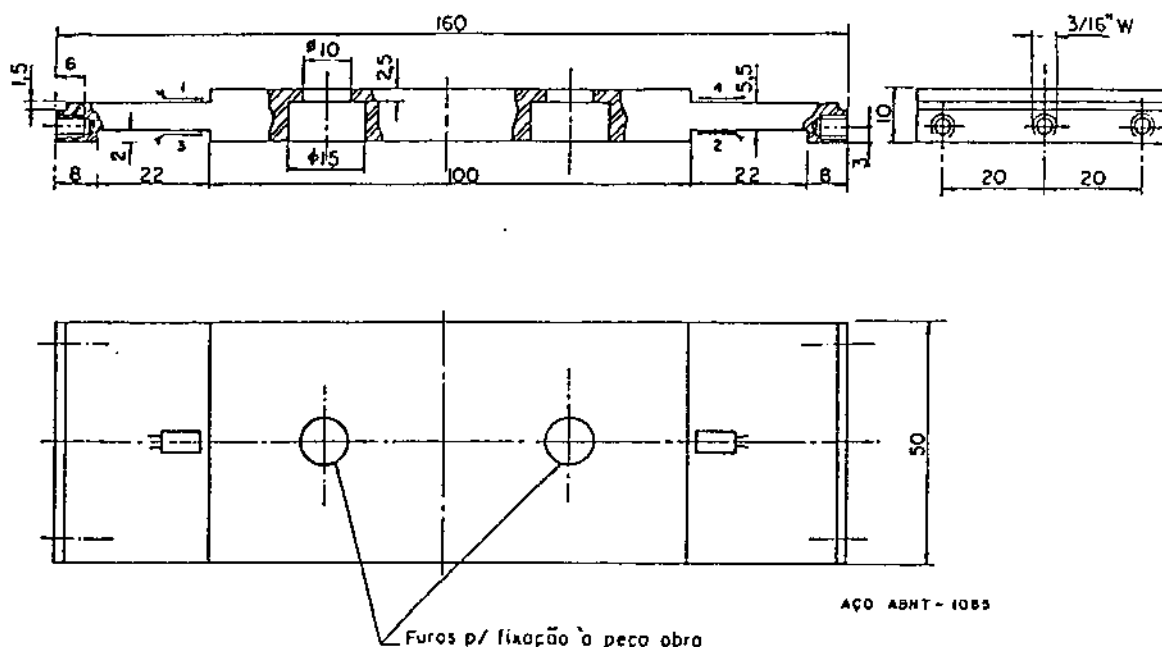


Figura 4.6: Dimensões principais do dinamômetro e disposição dos extensômetros no corpo elástico.

4.2.3 Características dimensionais da Mesa Absorvedora de Vibração.

– Placa base (1):

Aço SAE 1045

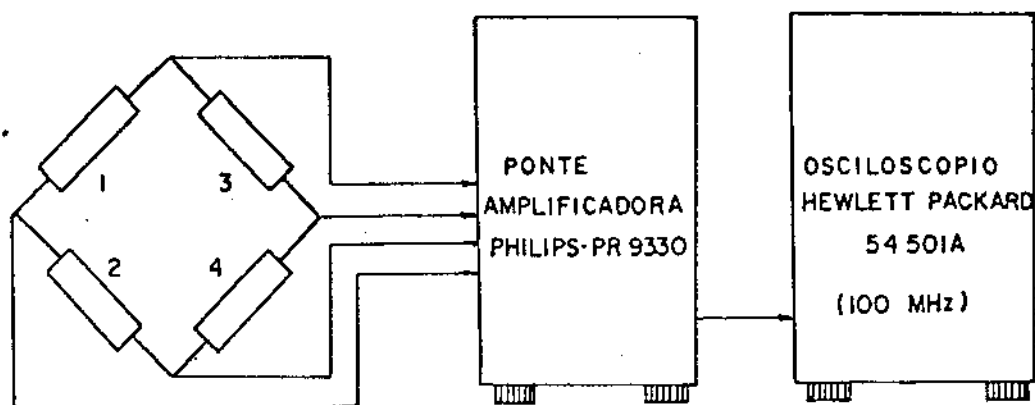


Figura 4.7: Esquema elétrico do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.

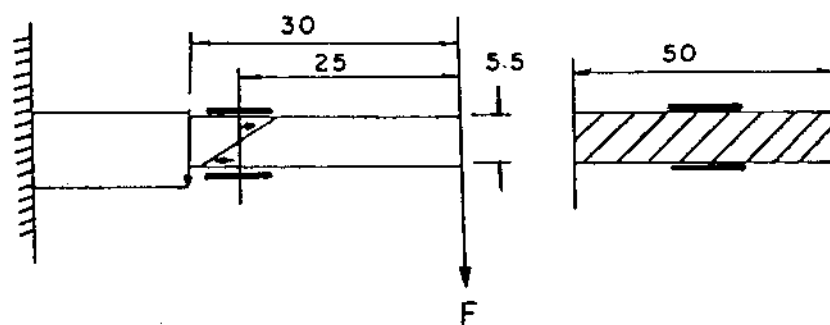


Figura 4.8: Esquema da viga com extensômetros do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.

Dureza Brinell - DB = 337.0 Kgf/mm²

Limite de Resistência - σ_r = 88.5 Kgf/mm²

Alongamento = 3.0 %

- Características dos extensômetros:

Marca: Kyowa - Tipo KFC-5-C1-11

Resistência: 120 Ω

Fator de Alongamento = 2.1 %

Dimensões da grade = 5.0 x 1.4 mm²

4.2.5 Aferição estática do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.

A aferição estática foi feita aplicando-se forças externas, por meio de pesos aferidos, sobre a placa suporte, lendo-se diretamente com um multímetro digital, o valor do deslocamento em mV. A ponte *Wheatstone* do dinamômetro foi alimentada com 4.0 V, através da ponte amplificadora, que trabalhou com a sensibilidade de 0.2 mV. Variou-se os pesos aferidos de 1.0 N a 55.0 N. Na aferição estática, a força aplicada (F), expressa por:

$$F = K.(u_1 - u_2) , \quad (4.1)$$

onde ($u_1 - u_2$) é a deformação do elemento sensível e (K) a constante de rigidez elástica.

4.2.6 Análise de regressão dos valores da aferição estática.

A análise de regressão linear consiste em obter a função na forma linear:

$$y(x) = \alpha + \beta.(x - \bar{x}) + \varepsilon_\sigma \quad (4.2)$$

que dá a distribuição de (y) para cada (x), a partir de uma amostra de N pares de valores. Os parâmetros α , β e σ são os parâmetros da distribuição, e

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} . \quad (4.3)$$

Utilizando o método dos mínimos quadrados e os teoremas da média e da variância, obtém-se os valores de $\bar{y}$ e b :

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} , \quad (4.4)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N y_i.(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.5)$$

que são estimativas justas de α , β .

Resultando, portanto a estimativa da regressão

$$y_{cal} = \bar{y} + b.(x_i - \bar{x}), \quad (4.6)$$

pode-se então obter a estimativa média de y

$$\mu(y) = \alpha + \beta.(x_i - \bar{x}), \quad (4.7)$$

apresentando uma distribuição por amostragem de variância.

Sendo as variáveis y_{cal} , $\bar{y}$ e b , os resultados da soma das variáveis aleatórias independentes, pelo Teorema do Limite Central, deverão apresentar distribuição normal em grandes amostras. Pode-se então calcular o intervalo de confiança das mesmas, com a probabilidade (p).

$$\bar{y} - \varepsilon_p \frac{\sigma}{\sqrt{N}} < \alpha < \bar{y} + \varepsilon_p \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4.8)$$

$$b - \varepsilon_p \frac{\sigma}{\sqrt{S_{xx}}} < \beta < b + \varepsilon_p \frac{\sigma}{\sqrt{S_{xx}}} \quad (4.9)$$

$$|\mu(y/x_i) - y_{cal}| < \varepsilon_p \sigma \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (4.10)$$

onde,

σ = desvio padrão;

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}.$$

Como neste caso, da aferição estática, o número de variáveis independentes é maior que 30 ($N > 30$), pode-se substituir σ pela sua estimativa (s),

$$s = \sqrt{\frac{S_{yy} - \frac{S_{xy}^2}{S_{xx}}}{N - 2}}. \quad (4.11)$$

A expressão do intervalo de confiança é

$$|\alpha - \bar{y}| < \varepsilon_p \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (4.12)$$

$$|\beta - b| < \varepsilon_p \frac{s}{\sqrt{S_{xx}}} \quad (4.13)$$

$$|\mu(y/x_i) - y_{cal}| < \varepsilon_p \cdot s \cdot \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}}}. \quad (4.14)$$

Através do Intervalo de Confiança de $\mu(y/x_i)$ pode-se calcular entre que limites está $\mu(y)$ para um dado x_i , bastando substituir na expressão deste intervalo y_{cal} por seu valor

$$y_{cal} = \bar{y} + b.(x_i - \bar{x}).$$

A precisão da estimativa de $\mu(y/x_i)$, de um modo geral, é tanto maior quanto:

- a) menor for s , isto é, quanto mais reduzida for a dispersão dos valores observados na amostra sobre a regressão;
- b) maior for N , isto é, o número de observações da amostra;
- c) maior for S_{xx} , ou seja, a dispersão dos valores observados de x_i sobre sua média $\bar{x}$.

4.2.7 Inversão da Reta de Regressão.

A reta de regressão é dada pela expressão $y_i = f(x_i)$, onde y_i é uma variável aleatória e x_i variável independente. Para inversão da reta de regressão, torna-se necessário a determinação da função $x_i = f(y_i)$. O intervalo de confiança da função $x_i = f(y_i)$ é estimado pelo Teorema de *Fieller*, citado por [01].

A equação da reta de regressão,

$$y_i = a + b.(x_i - \bar{x}) \quad (4.15)$$

é obtida a partir do conjunto de pontos

$$\begin{array}{lll} x_1 - y_{11} & y_{12} \dots, y_{1j} & \dots y_{1n_1} \\ x_2 - y_{12} & y_{22} \dots, y_{2j} & \dots y_{2n_2} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ x_N - y_{N1} & y_{N2} \dots, y_{Nj} & \dots y_{Nn_k} \end{array}$$

onde x é uma variável não aleatória de tamanho N . Para cada variável x_i de x , corresponde um número n_i de observações da variável aleatória de y .

Aplicando o Teorema de *Fieller* tem-se a equação da reta inversa.

$$F_i = \bar{x} + \frac{b \cdot (y_{ij} - a)}{b^2 - \frac{t^2 \cdot S_x^2}{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2}} \quad (4.16)$$

O erro de x_i é dado por

$$\Delta F_i = \frac{t \cdot S_x}{b^2 - \frac{t^2 \cdot S_x^2}{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2}} \left(\left(b^2 - \frac{t^2 \cdot S_x^2}{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{N} \right) + \frac{(y_{ij} - a)^2}{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.17)$$

onde,

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot x_i}{N \cdot n_i} \quad (4.18)$$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}}{n_i} \quad (4.19)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i}{N} \quad (4.20)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x}) \cdot \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.21)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N + n_i - N} \quad (4.22)$$

n_i = número de observações para cada carga;

$t = \epsilon_p$ para $N > 30$;

$m = 1$ (para uma leitura, em cada carga aplicada durante a utilização do dinamômetro);

y_{ij} = média baseada em m observações, todas elas pressupostas como proveniente de um mesmo, porém desconhecido valor de x_i .

4.2.8 Aferição dinâmica do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.

Como os valores da massa e do amortecimento da placa base do dinamômetro (Figura 4.3) são pequenos em relação ao valor da constante de rigidez elástica (K), pode-se desprezar as forças de inércia e de amortecimento, em comparação com as forças de deformação, resultando uma força dinâmica

$$F_d = K.(u_1 - u_2) . \quad (4.23)$$

isto é, o dinamômetro se comporta igualmente em regime estático e dinâmico. Portanto, uma aferição estática é suficiente para medir o valor instantâneo da força dinâmica.

Para não haver deformação de imagem da força dinâmica, a rigidez (K) deve ser constante na faixa de operação, isto é a relação força/deformação deve ser linear.

No caso específico, como o dinamômetro estava apoiado em uma estrutura rígida, a equação do movimento é dada por:

$$-\frac{w^2}{w_n^2} \cdot \chi + 2 \cdot j \cdot a \cdot \frac{w}{w_n} \cdot \chi + \chi = \frac{F}{K} , \quad (4.24)$$

$$F = K \cdot \chi \cdot \left(-\frac{w^2}{w_n^2} + 2 \cdot j \cdot a \cdot \frac{w}{w_n} + 1 \right) , \quad (4.25)$$

onde:

F = força a medir;

w_n = frequência angular natural;

$$w_n = \sqrt{\frac{K}{M}};$$

a = fator de amortecimento;

$K \cdot \chi$ = indicação do dinamômetro;

Em regime estático, para o qual $w = 0$, a força se reduz a $F = K \cdot \chi$, existindo deste modo, uma correspondência perfeita entre a força aplicada e a leitura dinamométrica. No regime dinâmico, entra em jogo a força de aceleração e a força de amortecimento. A correspondência é válida se w/w_n for muito menor do que a unidade e o fator de amortecimento (a) for desprezível.

Assim, os ensaios dinâmicos foram realizados para determinar os parâmetros dinâmicos do dinamômetro que são;

1. fator de amortecimento - a ;
2. frequência natural - w_n .

A determinação do fator de amortecimento do dinamômetro foi feito através do decremento logarítmico do seu sistema equivalente. O decremento é definido como o logarítmico natural da razão de duas amplitudes sucessivas no movimento vibratório livre, dado por:

$$\delta = \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} \quad (4.26)$$

ao ser considerado n vibrações sucessivas, como no caso de vibrações pouco amortecidas, escreve-se:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{a_0}{a_n} \quad (4.27)$$

Segundo [56], duas amplitudes sucessivas praticamente coincidem em

$$x_t = A.e^{-a.w_n.t} \quad (4.28)$$

$$x_{t+T} = A.e^{-a.w_n.(t+T)}, \quad (4.29)$$

verifica-se que a segunda amplitude é igual a primeira amplitude multiplicada pelo fator $e^{-a.w_n.T}$, constante esta menor do que a unidade.

Esse fator é o mesmo para duas amplitudes consecutivas quaisquer, independente do tempo. Quando,

$$T = 2.\pi/w \text{ (período de vibração livre);}$$

$a = c/c_{cr}$, (fator de amortecimento);

w_n = frequência angular natural.

A frequência amortecida é,

$$w' = w_n \cdot \sqrt{1 - a^2} \quad (4.30)$$

Assim sendo o decremento logarítmico resulta em,

$$\delta = \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} = \ln \frac{A \cdot e^{-a \cdot w_n \cdot t}}{A \cdot e^{-a \cdot w_n \cdot (t+T)}} \quad (4.31)$$

Substituindo a equação (4.32) em (4.31)

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{w_n \cdot \sqrt{1 - a^2}} \quad (4.32)$$

tem-se,

$$\delta = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\sqrt{1 - a^2}} \quad (4.33)$$

Desenvolvendo essa expressão resulta no fator de amortecimento do dinamômetro,

$$a = \frac{\delta}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 - \delta^2}} = \frac{c}{c_{cr}} \quad (4.34)$$

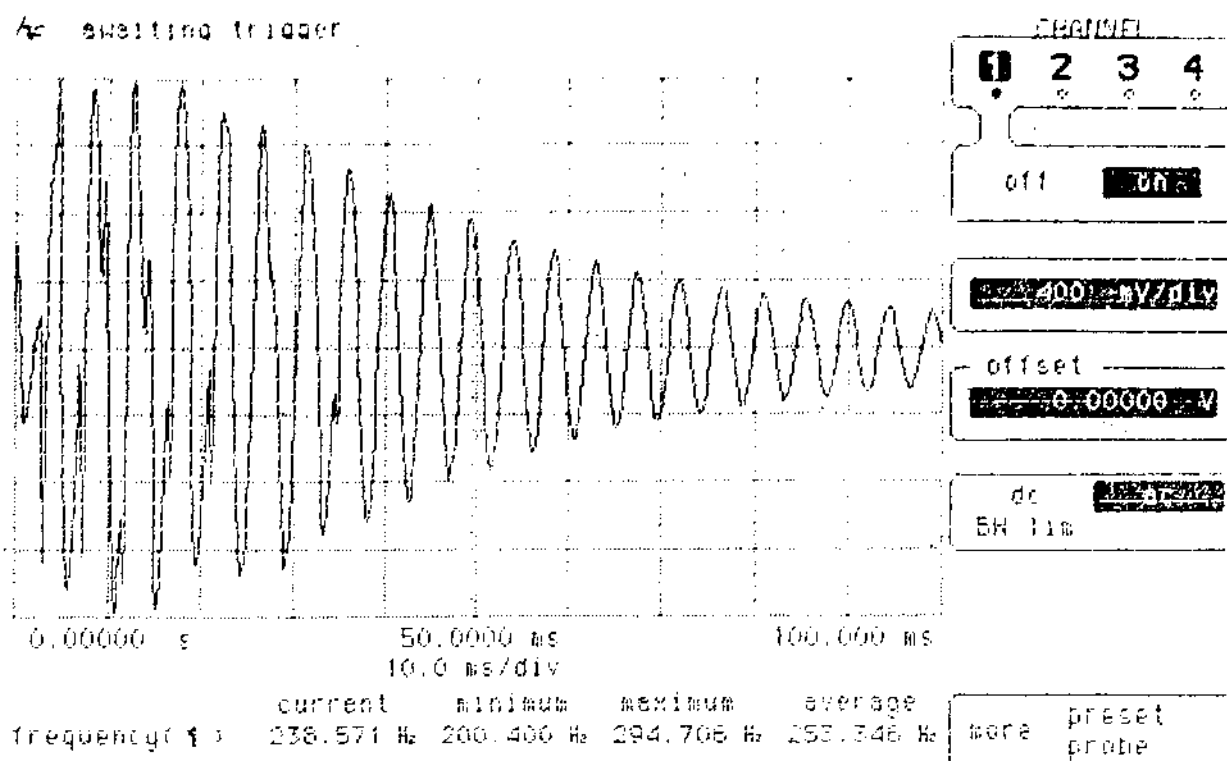


Figura 4.10: Curva do Movimento Livre do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.

que é o fator de amortecimento do dinamômetro.

A determinação experimental do decremento logarítmico foi feita, medindo-se as amplitudes consecutivas (a_i), da Curva do Movimento Livre (Figura 4.10) do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração. A Curva do Movimento Livre da Mesa Absorvedora de Vibração foi obtida aplicando-se impactos concentrados na região central da placa suporte, fazendo-o vibrar livremente. O sinal elétrico proveniente dos extensômetros foi amplificado em uma ponte amplificadora e enviado à um osciloscópio cujo sinal foi registrado simultaneamente pela impressora acoplada ao sistema.

Com o auxílio da Curva do Movimento Livre obteve-se os valores das amplitudes da vibração para (n) ciclos sucessivos, e por meio desses valores traçou-se o gráfico para determinação do decremento logarítmico. Como os valores de (δ) não eram constantes, em razão do amortecimento ser muito pequeno, utilizou-se o seu valor médio, construindo-se um gráfico monologarítmico (a_1/a_n versus n) [38].

4.2.9 Determinação do fator de amplificação e da distorção de fase.

Tendo-se os valores do fator de amortecimento (a) e da frequência natural (w_n), pode-se obter o fator de amplificação (Φ), que é a relação entre as deformações dinâmicas, resultante da aplicação de uma força dinâmica periódica e a deformação estática (de frequência nula). Pode-se, ainda, calcular o erro dinâmico (φ) cometido na leitura do valor da força, para a faixa de frequência de operação do dinamômetro.

O fator de amplificação de fase é

$$\Phi_1 = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{w^2}{w_n^2})^2 + (2.a.\frac{w}{w_n})^2}} \quad (4.35)$$

O erro dinâmico ou distorção de fase (φ) é dado por;

$$tg\varphi = \frac{2.a.\frac{w}{w_n}}{1 - \frac{w^2}{w_n^2}}, \quad (4.36)$$

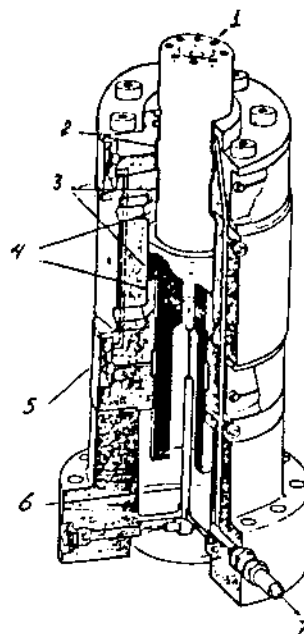
$$\varphi = arctg \frac{2.a.\frac{w}{w_n}}{1 - \frac{w^2}{w_n^2}} \quad (4.37)$$

Quando o fator de amortecimento (a) é muito pequeno e a frequência da vibração é sensivelmente abaixo da frequência natural do sistema, este erro é desprezível.

4.2.10 Características dinâmicas da Mesa Absorvedora de Vibração.

O levantamento das características dinâmicas da Mesa Absorvedora de Vibração foi realizado através do seu espectro de frequência.

Os ensaios para o levantamento do espectro de frequência consistiu em aplicar cargas constantes sobre a placa base da Mesa Absorvedora de Vibração, através de um atuador hidráulico (Figura 4.11), variando-se a frequência e obtendo-se os valores dos deslocamentos da placa base. Os valores dos deslocamentos (mV) foram registrados com um osciloscópio. Com os valores dos deslocamentos da placa base (mV), em função da frequência (Hz), para os diversos níveis de carga, traçou-se as Curvas do Espectro de Frequência da Mesa Absorvedora de Vibração. Essas curvas foram levantadas para duas condições: (1) somente da Mesa Absorvedora de Vibração (Figura 5.4); (2) Mesa Absorvedora de Vibração com o sistema dinâmico (motor) (Figura 5.5).



1. - Pistão;
2. - Mancal hidrostático;
3. - Revestimento plástico;
4. - Câmara do cilindro;
5. - Condutores de óleo para os mancais;
6. - Transdutor de deslocamento;
7. - Retorno de óleo (baixa pressão);

Figura 4.11: Atuador hidráulico - tipo PL (100 kN, utilizado no levantamento do espectro de frequência da Mesa Absorvedora de Vibração).

As Figura 4.12 e 4.13 mostram o atuador hidráulico atuando respectivamente sobre a Mesa Absorvedora de Vibração e sobre a Mesa Absorvedora de Vibração, com sistema o dinâmico (motor). A Figura 4.14 mostra a montagem da Mesa Absorvedora de Vibração sobre o atuador hidráulico e o painel de instrumentos responsável pelo controle dos equipamentos e aquisição dos dados.

A Figura 4.15 mostra esquematicamente o princípio de funcionamento do atuador hidráulico e o sistema de aquisição dos dados.

4.2.11 Metodologia de medida e processamento dos sinais da força e da aceleração da Mesa Absorvedora de Vibração.

Os sinais gerados pela célula de carga e pelo acelerômetro tinham as características de funções harmônicas, sendo suas frequências iguais à velocidade de rotação do motor, e suas amplitudes funções do desbalanceamento e da velocidade de rotação do motor. Essas características dos sinais medidos, possibilitaram que os valores das amplitudes e fases das forças e das amplitudes fossem obtidas aplicando-se a F.F.T nos sinais, após os mesmos terem passado num conversor analógico/digital. Com os valores das amplitudes e fases das forças e acelerações assim obtidos, traçou-se os gráficos que relacionam a velocidade de rotação do sistema dinâmico. Obteve-se, ainda, gráficos que relacionam a velocidade de rotação do motor ao fluxo de energia gerado, para as várias situações de testes realizados.

O sinal elétrico emitido pelo dinamômetro foi amplificado pela ponte amplificadora, filtrado e enviado ao canal vertical do osciloscópio. O sinal do acelerômetro, também amplificado pelo condicionador de sinais e filtrado, foi enviado ao canal horizontal do osciloscópio. Simultaneamente, ambos os sinais foram enviados ao Analisador Espectral (Figura 4.2). O analisador registrou os sinais elétricos emitidos pelo acelerômetro e pela célula de carga (dinamômetro), a partir da frequência de 20.0 Hz, com incremento sucessivo de 0.5 Hz, sendo interrompido quando a frequência alcançava 60.0 Hz. Para cada nível de vibração foi realizado 81 (oitenta e uma) medidas, com 20 (vinte) repetições. Cada repetição foi o resultado da média ponderada das amplitudes máximas de 8 (oito) ciclos completos. Em cada ciclo completo foi registrado 2048 pontos. Os sinais registrados pelo osciloscópio serviram para monitorar o comportamento do espectro vibracional. Na obtenção dos sinais, onde foram medidas a amplitude e a fase da aceleração e da força, foram utilizadas técnicas de tratamento de sinais para otimizar o número de aparelhos, e consequentemente diminuir os erros inerentes ao processo e ao tempo das medições.

Os sinais obtidos tinham as características de serem uma função harmônica, cujas



Figura 4.12: Atuador hidráulico agindo sobre a Mesa Absorvedora de Vibração.

frequências eram iguais à velocidade de rotação do motor e a amplitude era função do desbalanceamento e da velocidade de rotação.

Para obtenção dos valores da força e da aceleração escolheu-se um sistema referencial fixo (a polia do motor) que girava em relação a um referencial inercial. Toda representação vetorial foi feita em função deste referencial fixo do motor. O referencial foi obtido utilizando-se um fio de aço com secção circular de 0.1 mm, altura de 10.0 mm e comprimento 15.0 mm, maior que o diâmetro do sensor de proximidade, como mostra a Figura 4.16. O sensor de proximidade de fabricação *Dornier*, é constituído de um sensor de deslocamento sem contacto modelo A11, sendo alimentado por um osciloscópio modelo 1WA-0110 e sua resposta foi condicionada para uma saída em Volts (Figura 4.2).

A amplitude e a fase dos sinais foram obtidas aplicando-se a F.F.T (*Fast Fourier Transform*) nos sinais, após os mesmos terem passado num conversor Analógico/Digital.

A vantagem de se aplicar a F.F.T em um sinal periódico, é que se este contiver um número inteiro de períodos, com número de pontos de amostragem igual a 2^n , obtém-se as componentes exatas das amplitudes das senóides e suas respectivas fases.

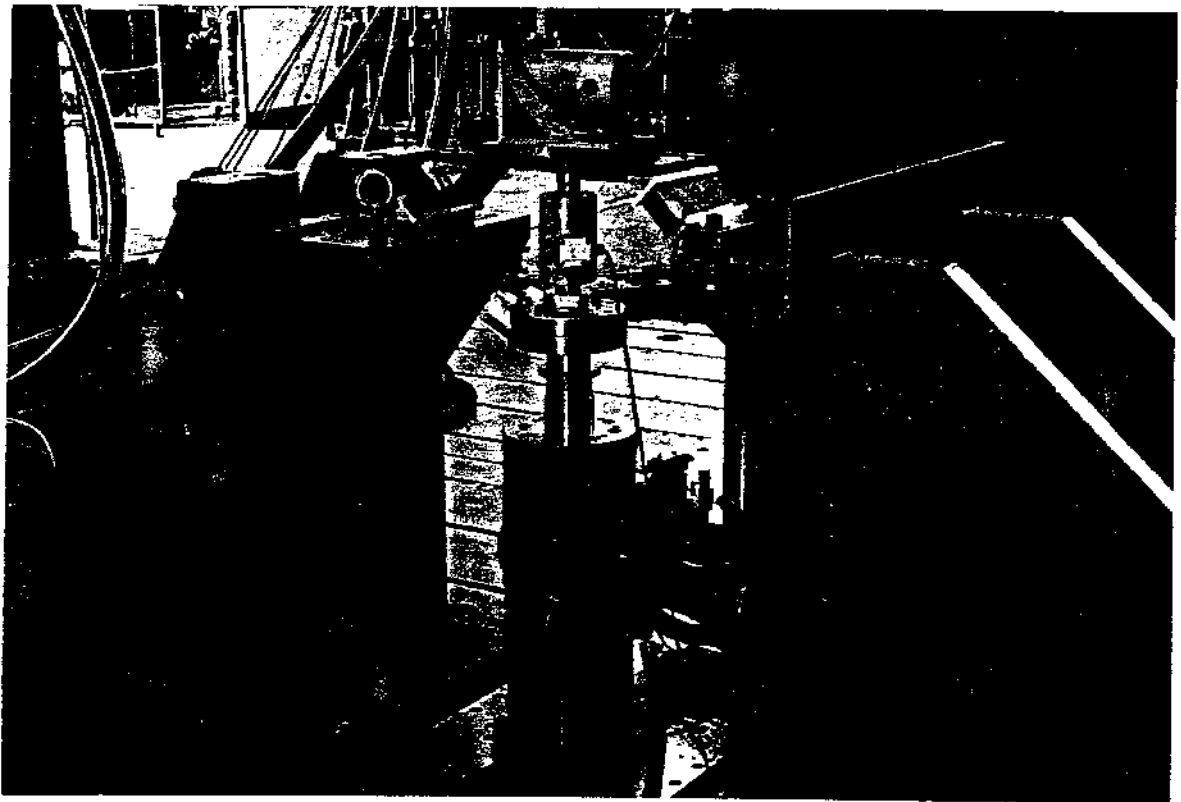


Figura 4.13: Atuador hidráulico agindo sobre a Mesa Absorvedora de Vibração, com o sistema dinâmico (motor).

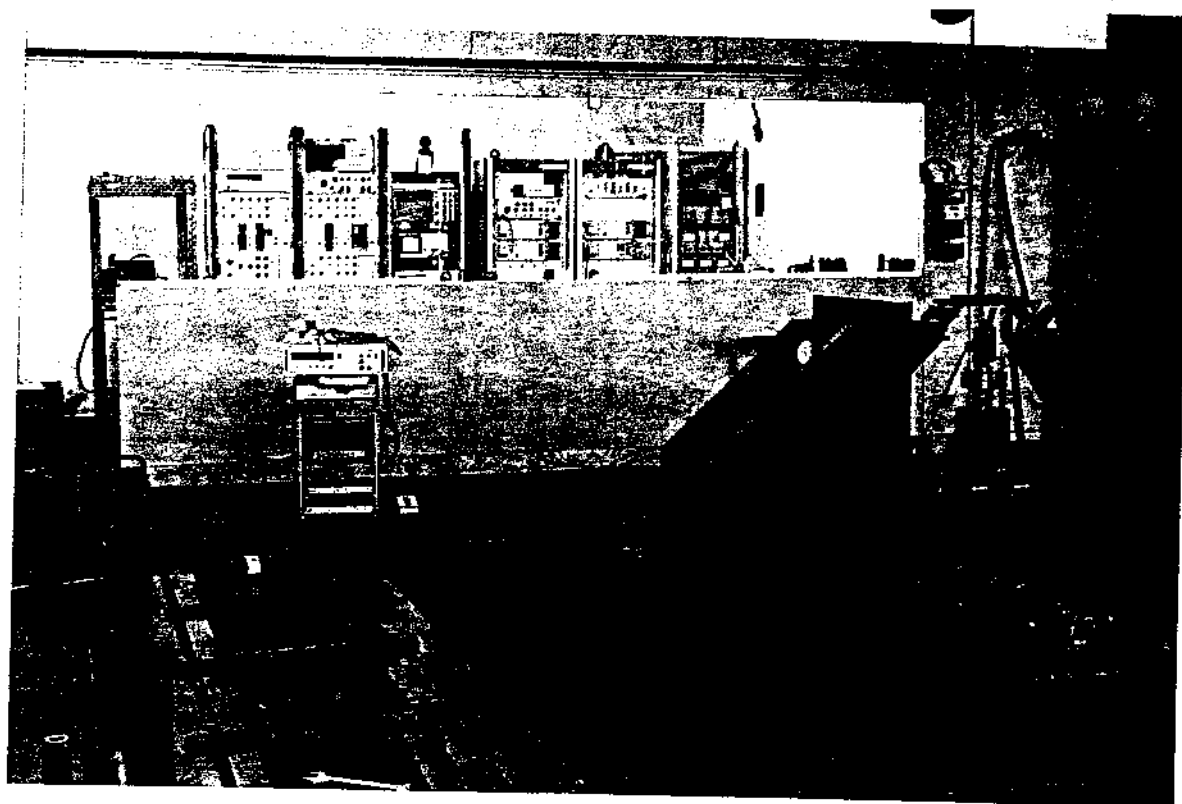


Figura 4.14: Conjunto Mesa Absorvedora de Vibração, atuador e painel de controle e aquisição de dados.

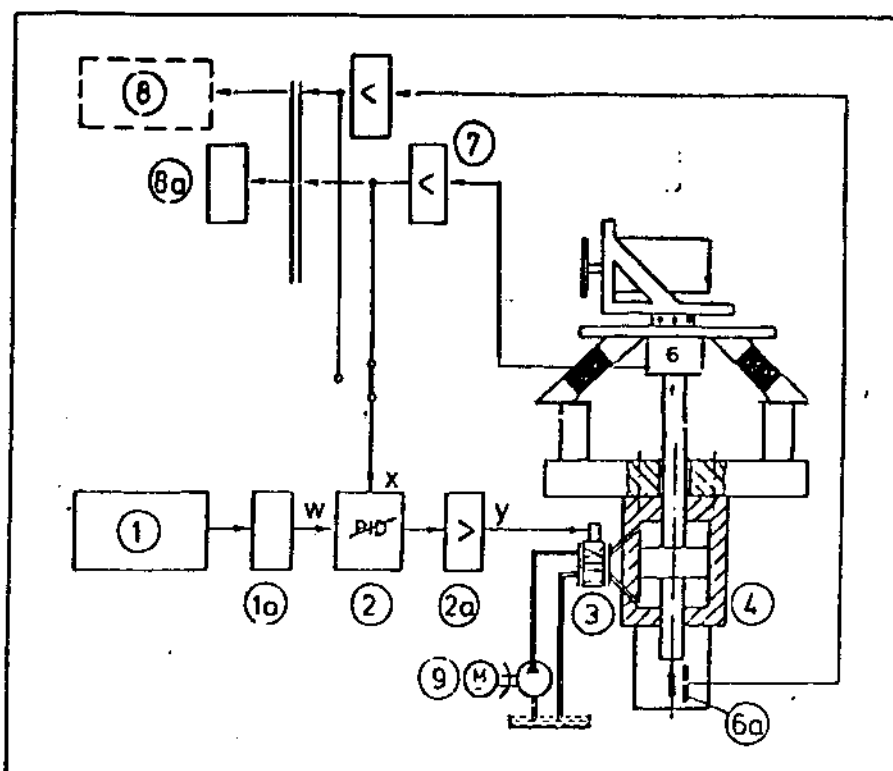


Figura 4.15: Princípio de funcionamento do atuador e o sistema de aquisição dos dados.

1. Gerador de sinais;
- 1^a. Controlador da carga ou deslocamento requerido;
2. Amplificador diferencial (valor requerido/valor final);
- 2^a. Amplificador final;
3. Servoválvula;
4. Atuador hidráulico;
5. Mesa Absorvedora de Vibração;
6. Transdutor de carga;
7. Condicionador de sinais;
8. Saída de sinal para monitoramento (osciloscópio, gravador);
- 8^a. Monitoramento interno dos sinais;
- 8^b. Contadores e sistema de proteção;
9. Agregados.

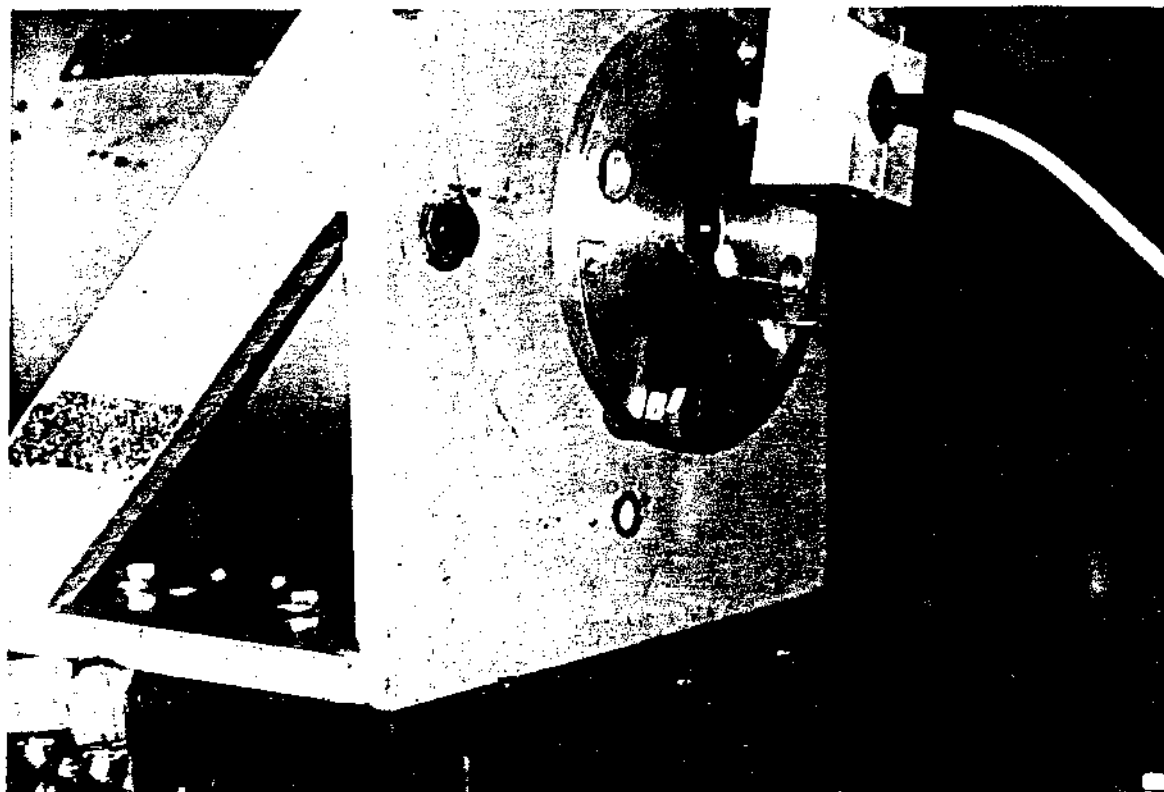


Figura 4.16: Vista da polia do motor com contrapesos, da referência inercial e do sensor de proximidade.

4.2.12 Processamento dos sinais da força e da aceleração via referência interna.

Na obtenção automática do número inteiro de períodos através de um programa computacional, superpos-se ao sinal de deslocamento medido, um sinal típico de referência, um pico por volta, que era o referencial fixo.

Adquiriu-se um número de períodos maior que o necessário e através de um programa computacional, localizou-se os picos de referência. A partir da distância entre dois picos consecutivos determinou-se o período. Este processo possibilitou especificar o número de períodos desejados, e também a variação da velocidade de rotação do motor.

Como a frequência de aquisição estava geralmente prefixada, não se tinha períodos com um número de pontos proporcional a 2^n pontos de amostragem. Gerou-se então pontos intermediários que correspondessem aos 2^n pontos de amostragem, através de interpolações polinomiais. Com este sinal discretizado utilizou-se uma rotina que calculou a F.F.T e obteve-se o vetor que continha as amplitudes e fases das componentes harmônicas, em relação ao referencial inercial.

4.2.13 Cálculo do fluxo de energia gerado pelo sistema dinâmico.

Segundo [16] se uma força de variação harmônica $F = F_0 \cdot \sin(w.t + \theta)$ atua sobre um corpo com movimento harmônico de mesma frequência $x = x_0 \cdot \sin(w.t)$, o trabalho W efetuado pela força durante um pequeno deslocamento é $F \cdot dx$.

Durante um ciclo de vibração, $w.t$ varia de 0 a 2π e, conseqüentemente, t varia de θ a $2\pi/w$. O trabalho W durante um ciclo é:

$$W_{\text{ciclo}} = \int_0^{\frac{2\pi}{w}} F \cdot \frac{dx}{dt} \cdot dt = \frac{1}{w} \int_0^{2\pi} F \cdot \frac{dx}{dt} \cdot d(w.t) \quad (4.38)$$

$$W_{\text{ciclo}} = F_0 \cdot x_0 \int_0^{2\pi} \sin(w.t + \theta) \cdot \cos(w.t) \cdot d(w.t) \quad (4.39)$$

$$W_{\text{ciclo}} = F_0 \cdot x_0 \int_0^{2\pi} \cos(w.t) [\sin(w.t) \cdot \cos(\theta) + \cos(w.t) \cdot \sin(\theta)] d(w.t) = \quad (4.40)$$

$$W_{ciclo} = F_0 \cdot x_0 \cdot \cos\theta \int_0^{2\pi} \sin(w.t) \cdot \cos(w.t) \cdot d(w.t) + F_0 \cdot x_0 \cdot \sin\theta \int_0^{2\pi} \cos^2(w.t) \cdot d(w.t) \quad (4.41)$$

$$W_{ciclo} = \pi \cdot F_0 \cdot x_0 \cdot \sin\theta \quad (4.42)$$

$$W_{ciclo} = -\pi \cdot F_0 \cdot \frac{\ddot{x}}{w^2} \cdot \sin\theta \quad (4.43)$$

Assim, uma rotina no analisador espectral, utilizou a equação (4.43), para cálculo do fluxo de energia. Para cada frequência (pré-definida) de rotação do motor, o analisador registrava os valores da força, da aceleração e calculava os valores do ângulo de fase entre eles e o valor do fluxo de energia. Este procedimento, foi utilizado para todos os níveis de desbalanceamento do sistema dinâmico.

4.3 Metodologia de qualificação do sistema dinâmico.

Na metodologia desenvolvida para qualificação de um sistema dinâmico desenvolveu-se um acelerômetro em PVDF unidirecional Figura 4.17 e 4.18. Chama-se de acelerômetro em PVDF o conjunto formado pelo acelerômetro em si mais o processador de sinais, responsável pela aquisição e processamento dos sinais emitidos pelo PVDF.

O acelerômetro, responsável pela emissão dos sinais elétricos, consiste de uma cápsula acrílica (3) envolta por um corpo rígido de alumínio (1). Na parte superior e inferior da cápsula são posicionados as películas de PVDF (LDT1 - 028K) (2). Na região central da cápsula há um furo cilíndrico onde é colocado a massa de mercúrio que, durante a vibração pressiona as películas de PVDF, gerando os sinais elétricos. Os sinais elétricos emitidos pelas películas são proporcionais à carga exercida pela massa de mercúrio em função do nível de desbalanceamento e da rotação do sistema dinâmico. Os terminais do PVDF são ligados a um circuito eletrônico, responsável pelo processamento dos sinais (Figura 4.19). O circuito eletrônico do processador de sinais capta e processa os sinais elétricos emitidos pelas películas de PVDF do acelerômetro (Figura 4.19) e utiliza-os como parâmetro referencial de qualificação.

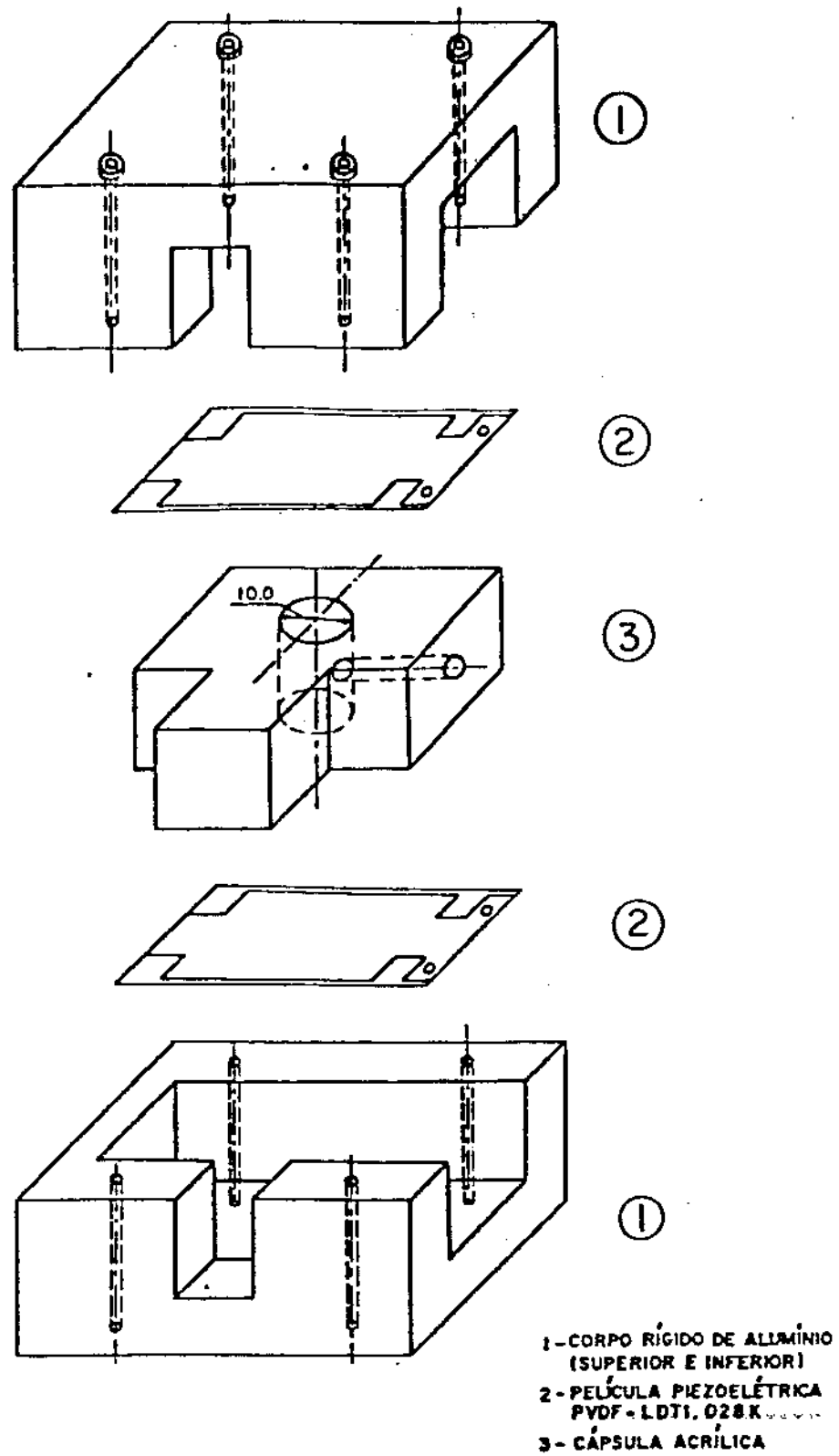


Figura 4.17: Desenho esquemático do acelerômetro.

O acelerômetro em PVDF é do tipo binário, ou seja, *on/off*. Indica se a voltagem acumulada, em dado tempo, é inferior ou superior ao valor de referência (calibração).

Nos ensaios realizados para verificação desta metodologia, fixou-se o acelerômetro em PVDF, na mesma posição onde fora colocado o acelerômetro, que mediu a aceleração utilizada no cálculo do fluxo de energia. Os valores da voltagem acumulada, para os diversos níveis de desbalanceamento e tempo de acumulação, foram enviados ao canal 4 do osciloscópio. Enquanto o valor do nível de referência, pré-fixado pelo *tripot* em 2.5 V, foi enviado ao canal 1 do osciloscópio. Os tempos de acumulação foi controlado com um temporizador. Os valores desses sinais, mostrado na tela do osciloscópio, foi registrado através de uma impressora acoplada ao sistema (Figuras 6.4 a 6.31).

A Figura 4.20 mostra esquematicamente a metodologia utilizada para obtenção do nível de voltagem acumulada através do acelerômetro em PVDF.

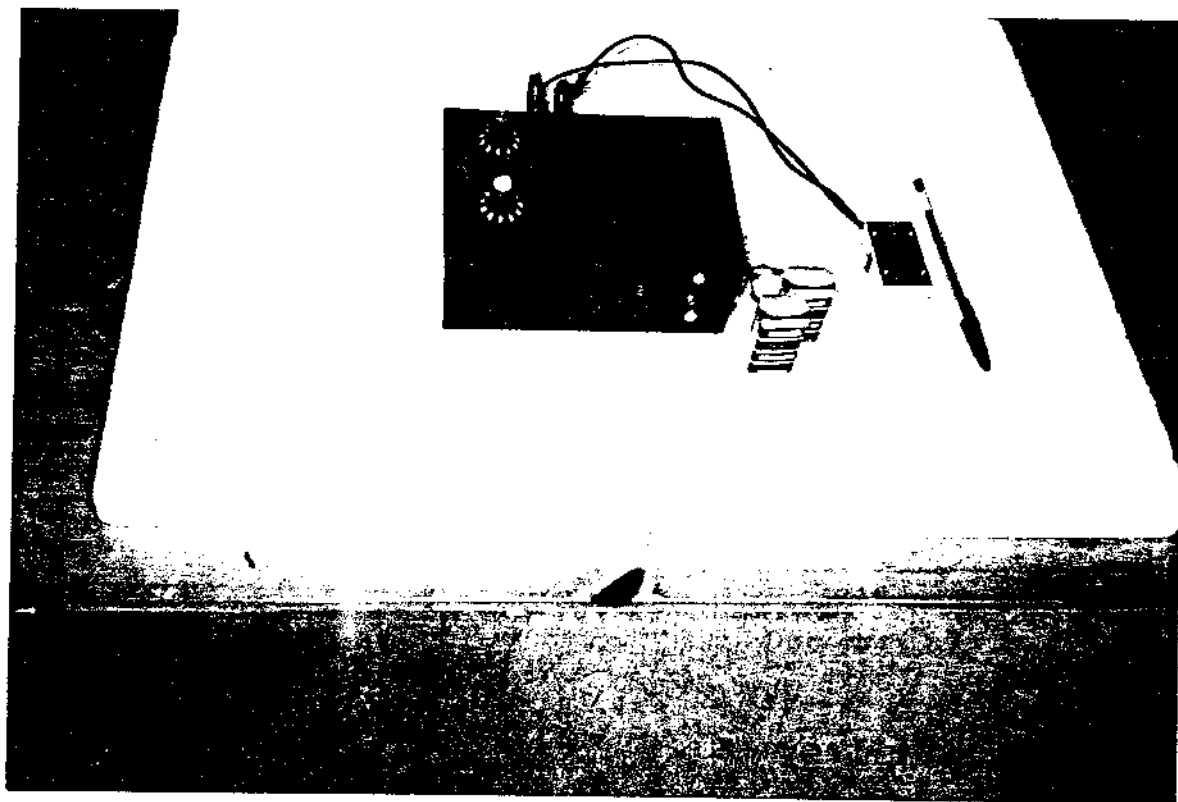


Figura 4.18: Acelerômetro e o processador de sinais.

4.3.1 Características dinâmicas do acelerômetro em PVDF.

A análise das características dinâmicas do acelerômetro em PVDF foi realizada através do levantamento do seu espectro de frequência e da sua aferição dinâmica.

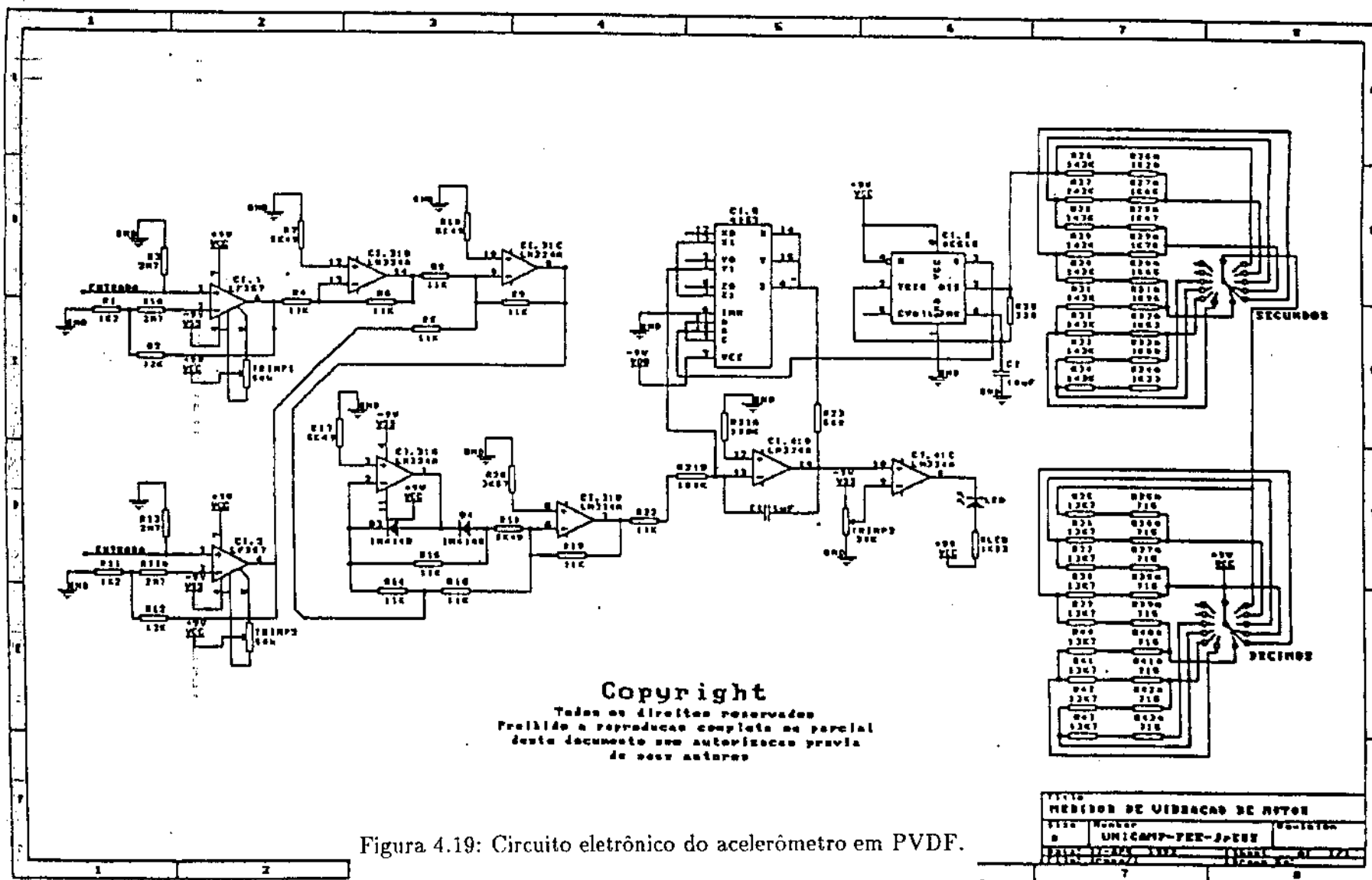


Figura 4.19: Circuito eletrônico do acelerômetro em PVDF.

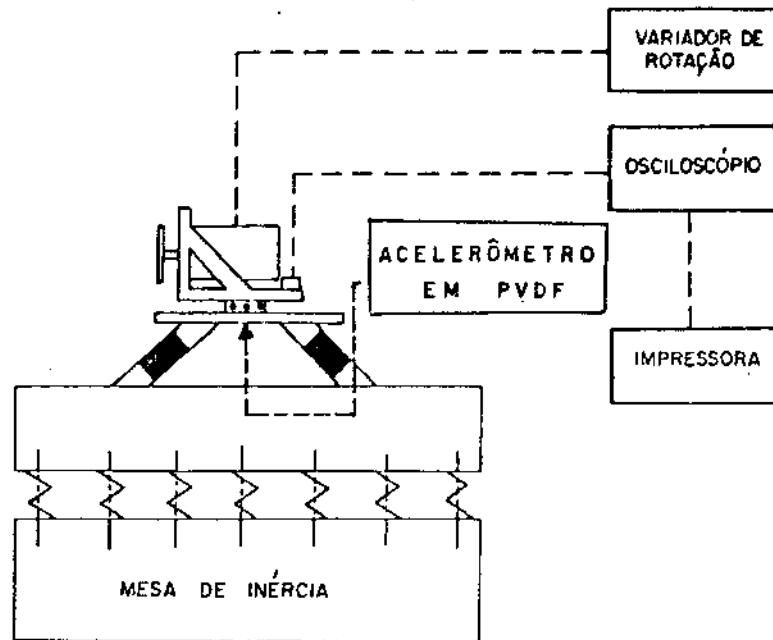


Figura 4.20: Figura esquemática do sistema utilizado para obtenção da voltagem acumulada através do acelerômetro em PVDF.

O levantamento do espectro de frequência foi realizado aplicando-se uma aceleração (g) constante ao vibrador (*shaker*), variando-se a frequência e anotando-se os valores do deslocamento (mV) da película piezoelétrica do acelerômetro em PVDF. Utilizou-se um acelerômetro padrão, para controlar constante a amplitude da aceleração. A Figura 4.21 mostra a montagem dos dois acelerômetros sobre o *shaker*.

No ensaio realizado para a obtenção do espectro de frequência, o sinal do acelerômetro padrão foi enviado a um canal 1 do osciloscópio e no canal 2 registrou-se o sinal do acelerômetro em PVDF, função da frequência e da aceleração (g). Os valores do sinal (mV) do acelerômetro em PVDF foram anotados, somente quando o valor da aceleração do acelerômetro padrão, registrava o valor pré-fixado. Esse controle foi feito, pelo gerador de sinais. A Figura 4.22 mostra a montagem dos equipamentos utilizados no levantamento das características dinâmico do acelerômetro em PVDF.

À aferição dinâmica do acelerômetro em PVDF foi realizada, aplicando-se acelerações variável ao vibrador, mantendo-se a frequência constante e, anotando-se os valores dos deslocamentos da película piezoelétrica. Assim, com as valores dos deslocamentos (mV) e das acelerações correspondentes, obtém-se a Curva de Sensibilidade do acelerômetro em PVDF (Figura 6.2).

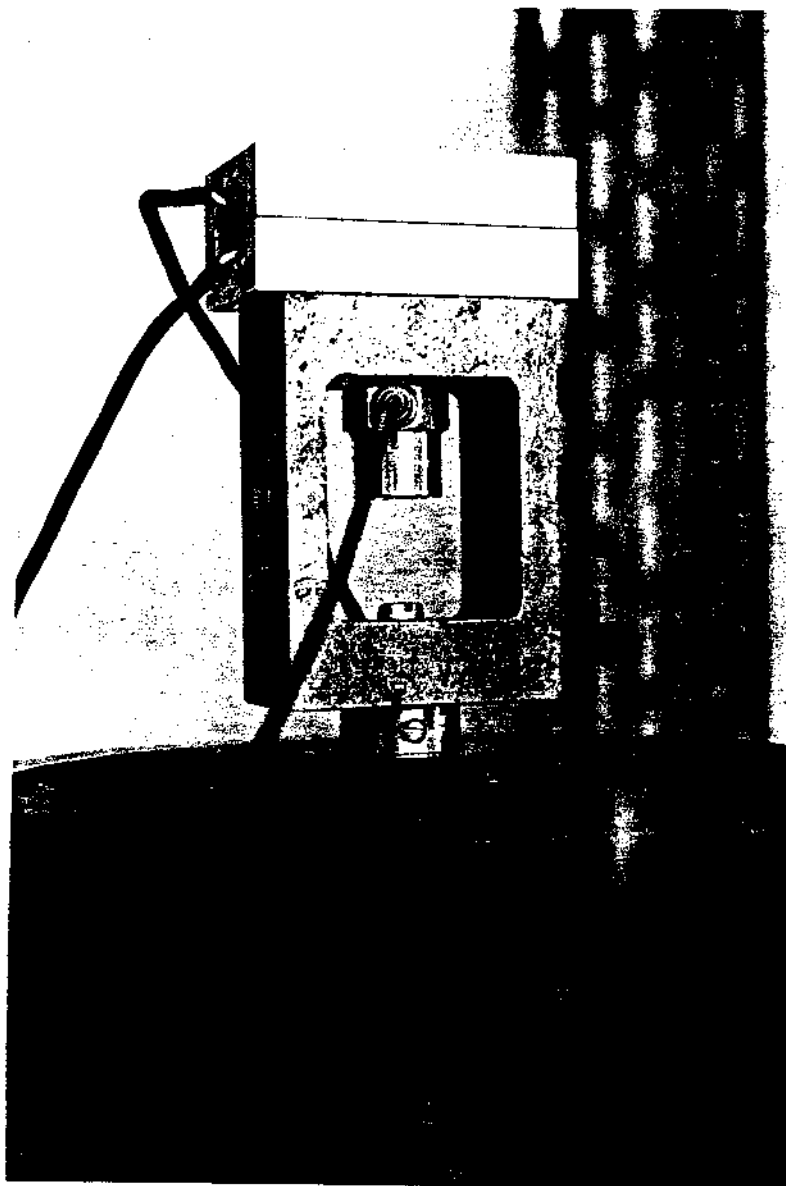


Figura 4.21: Posição do acelerômetro em PVDF e do acelerômetro da B&K sobre o *shaker*.

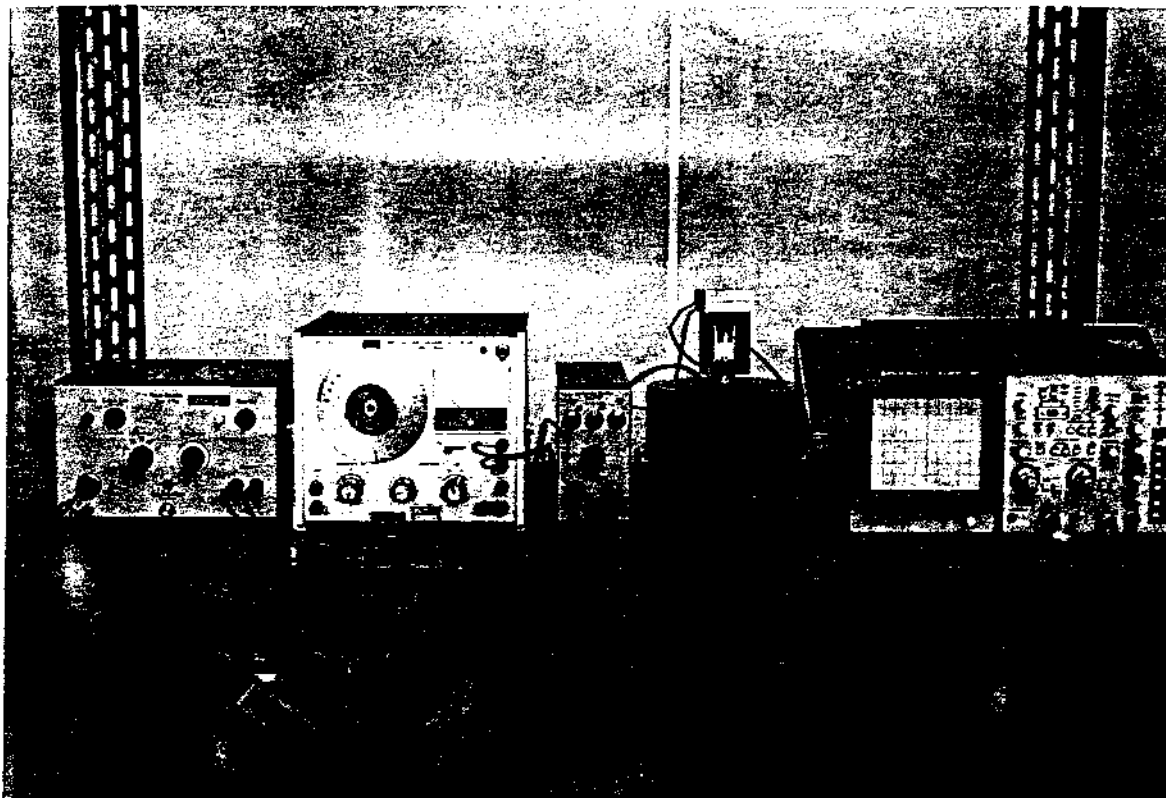


Figura 4.22: Vista da montagem dos equipamentos utilizados no levantamento das características dinâmicas do acelerômetro em PVDF.

4.3.2 Análise de regressão dos valores da aferição dinâmica.

Como neste caso, o número de variáveis independentes é menor que 30 ($N < 30$), o valor de (s) pode diferir muito do valor de σ . Deve-se então utilizar a teoria de pequenas amostras, através da distribuição de *Student*. Define-se para tanto a variável t_p

$$t_p = \varepsilon_p \frac{\sigma}{s}. \quad (4.44)$$

Esta variável t_p depende da confiança que se deseja depositar na afirmativa

$$|\bar{x} - x_i| < t_p \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (4.45)$$

e depende também da precisão da estimativa (s) de σ que é utilizada. Esta precisão é função do número de graus de liberdade Φ , a partir do qual é calculado (s). Neste caso em que uma estimativa de s de σ é obtida a partir de uma pequena amostra, pode-se substituir, na equação (4.44), σ por s e ε_p por t_p .

4.3.3 Inversão da Reta de Regressão.

Para inversão da reta de regressão torna-se necessário a determinação da função $x_i = f(y_i)$.

Aplicando o Teorema de *Fieller* tem-se a equação da reta inversa.

$$g_i = \bar{x} + \frac{b \cdot (y_{ij} - a)}{b^2 - \frac{t^2 \cdot S_x^2}{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2}} \quad (4.46)$$

O erro de x_i é dado por

$$\Delta g_i = \frac{t \cdot S_x}{b^2 - \frac{t^2 \cdot S_x^2}{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2}} \left(\left(b^2 - \frac{t^2 \cdot S_x^2}{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{N} \right) + \frac{(y_{ij} - a)^2}{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.47)$$

onde,

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot x_i}{N \cdot n_i} \quad (4.48)$$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}}{n_i} \quad (4.49)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i}{N} \quad (4.50)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x}) \cdot \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.51)$$

$$S_*^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N * n_i - N} \quad (4.52)$$

n_i = número de observações para cada aceleração;

$t = t_p$ para $N \leq 30$;

$m = 1$ (para uma leitura, em cada aceleração aplicada durante a utilização do acelerômetro em PVDF);

y_{ij} = média baseada em m observações, todas elas pressupostas como proveniente de um mesmo, porém desconhecido valor de x_i .

4.3.4 Equipamentos utilizados no levantamento das características dinâmicas do acelerômetro em PVDF.

- Acelerômetro, Tipo 4343 - Bruel & Kjaer;
- Vibrador (*shaker*), Tipo 4809 - Bruel & Kjaer;
- Gerador de Sinal PM 5126, Philips
- Condicionador de sinais 2626, Bruel & Kjaer;
- Amplificador 2706, Bruel & Kjaer;
- Osciloscópio VC 6065, Hitachi.

4.3.5 Geração e tratamento dos sinais gerados pelo acelerômetro em PVDF.

Na condição de carregamento estático as películas de PVDF não geram impulsos elétricos. Sob vibração, a massa líquida desloca-se na direção do movimento, como mostra a Figura 4.23. As películas foram dispostas de tal modo que os impulsos elétricos gerados pelas deformações elásticas se somam na direção principal do movimento (eixo x) e se anulam nas outras direções (eixos y,z), como mostrado na Figura 4.24. As deformações devidas à variação de temperatura também se anulam, dado que a temperatura se estabiliza, equivalendo a um carregamento estático, e não geram impulsos elétricos.

Na Figura 4.25 é apresentado o diagrama de blocos do esquema elétrico do acelerômetro em PVDF. O circuito pode ser dividido basicamente em 7 (sete) blocos. Na entrada (bloco B1) tem-se dois amplificadores não inversores. Estes devem ser não inversores, pois a impedância de saída do sensor era muito alta e o sinal gerado tinha pequena amplitude.

O acelerômetro em PVDF mede as vibrações verticais e horizontais. No caso da vibração horizontal os sinais são iguais, e opostos quando a vibração é vertical. Como o acelerômetro em PVDF devia somente medir as vibrações verticais, um dos sinais era invertido (bloco B2) e somado ao outro (bloco B3), anulando assim as vibrações horizontais.

Como o objetivo do circuito é medir a ordem de grandeza da voltagem absoluta gerada pela vibração no motor, e o sinal assume valores positivos e negativos, é necessário sua retificação (bloco B4).

Através do integrador (bloco B5) obtém-se a voltagem acumulada do sinal, durante um certo tempo definido pelo usuário.

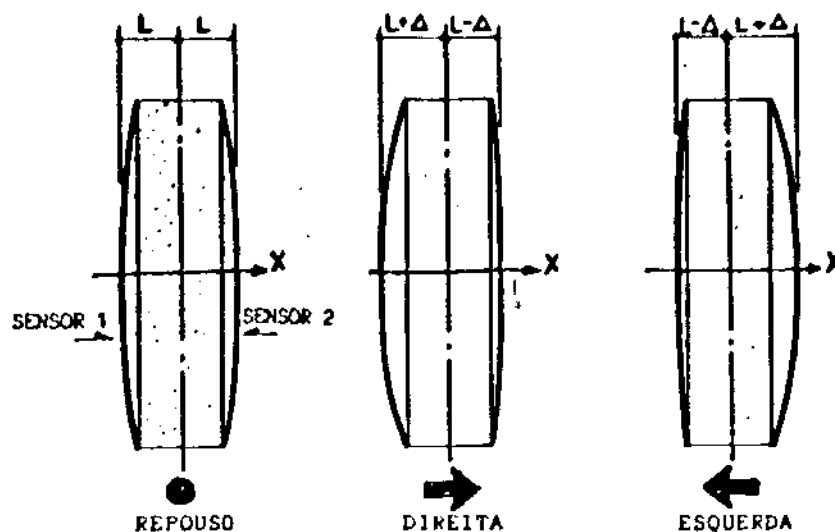


Figura 4.23: Influência do sentido de deslocamento na emissão dos impulsos.

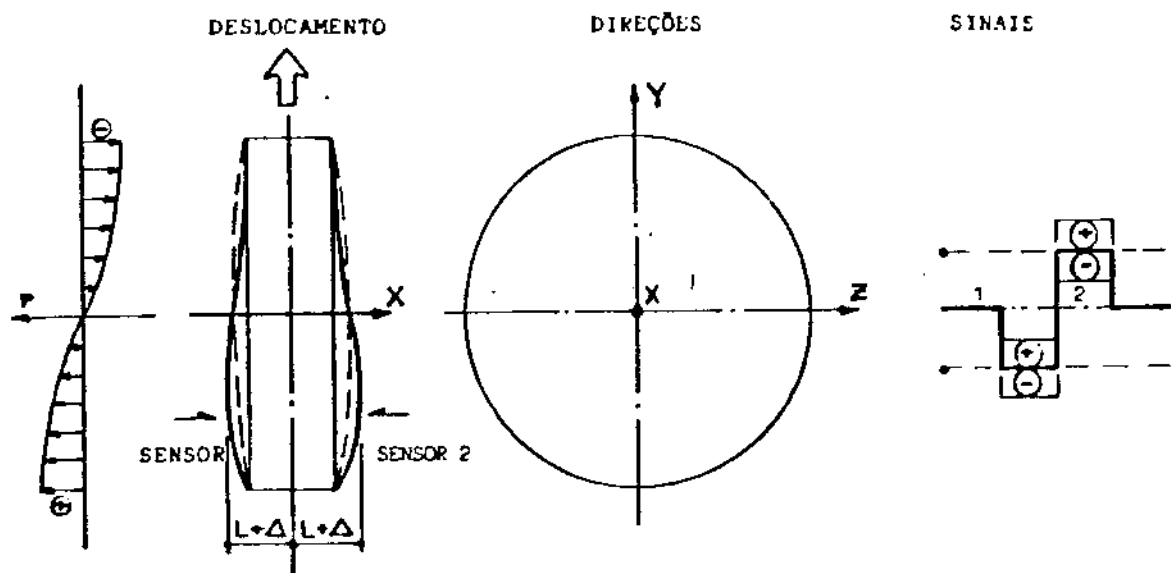


Figura 4.24: Compensação da variação da direção dos deslocamentos, geradores de impulsos.

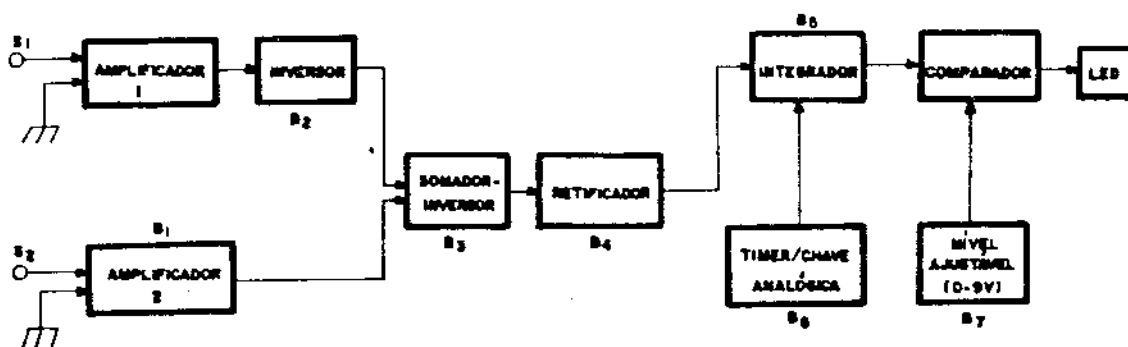


Figura 4.25: Diagrama de blocos do esquema elétrico do acelerômetro em PVDF.

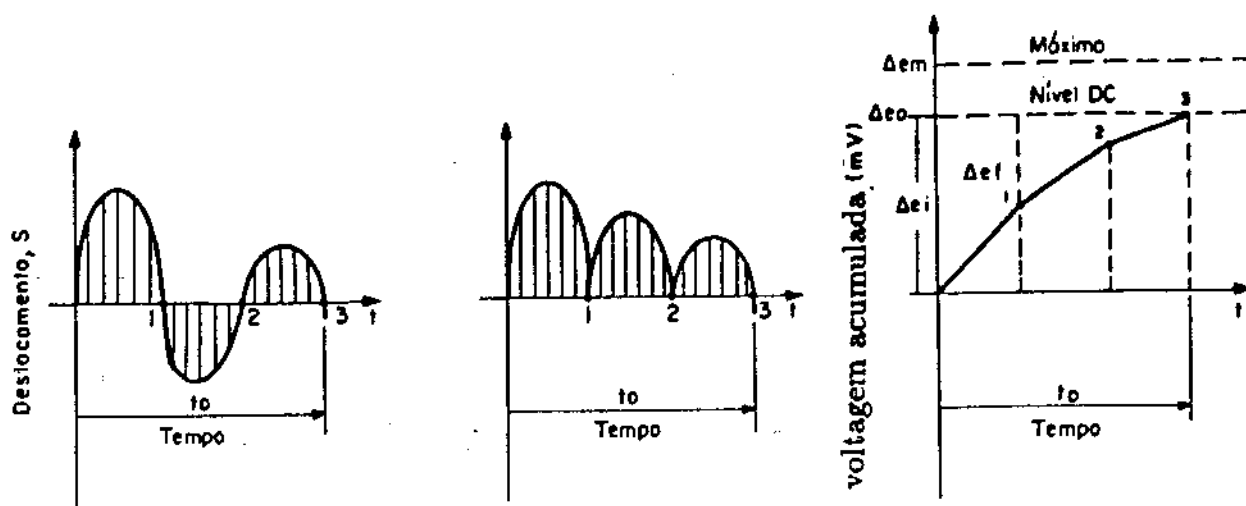


Figura 4.26: Figura esquemática de funcionamento do acelerômetro em PVDF.

A voltagem gerada é função das vibrações (deslocamento da massa líquida) e o tempo padrão de acumulação definido pelo gerador de tempo (temporizador, bloco B6). O tempo de integração pode ser variado de 0.1 a 9.9 segundos, com incremento de 0.1 s.

Para ajustar-se o período desejado na integração utilizou-se duas chaves de onda do circuito. Uma chave controla os segundos de 1 a 9 e a outra os décimos de segundos de 0.1 a 0.9. A saída do temporizador gera uma onda quadrada com *duty cycle* variável. O período com nível lógico 1 corresponde ao tempo de integração. Ao final da integração a saída do temporizador gera um sinal de nível lógico 0, que fecha a chave analógica (bloco B6). Ao fechar a chave o capacitor se descarrega através de uma resistência.

A saída do integrador é comparada (bloco B7) com um nível DC (tensão mV) que pode ser ajustado pelo *trimpot* de precisão (Figura 4.25).

Quando o sinal de entrada do comparador é maior que o nível DC ajustado em módulo, um sinal luminoso *Led* vermelho acende até o final do período de integração. Caso contrário permanece aceso somente o *Led* verde, pois este serve para indicar se o sistema eletrônico está sendo alimentado. A Figura 4.26 mostra esquematicamente o funcionamento do acelerômetro em PVDF.

4.3.6 Instrumentação utilizada na metodologia de qualificação do sistema dinâmico.

— Analisador Espectral AE.100 - 04 canais

Soma Instrumentos S.A

- Acelerômetro Bruel & Kjaer - Tipo 4332
 - Sensibilidade de referência: 50 Hz $1 \text{ } 23^0$
 - Sensibilidade de carga: 71.8 pC/g
 - Sensibilidade de Voltagem: 64.6 mV/g
- Condicionador de Sinais Unholtz Dickie - Modelo D22
- Estroboscópio General Radio - 1538 A.
 - Faixa de trabalho: 100 r.p.m a 150 000 r.p.m
- Motor:
 - Pêso: 4.3 Kg
 - Potência: 0.5 Hp
 - Rotação Máxima: 3 300 r.p.m
- Ponte Amplificadora Philips - PR 9330
 - Número de canais: 04 canais
 - Voltagem de Alimentação: 1.0 a 10.0 V
 - Sensibilidade: 0.2 a 200 mV
- Osciloscópio Digital Hewlett Packard 54 501 A de 100 MHz.
- Filtro de Frequência Kemo - Tipo UBF/8
- Impressora Hewlett Packard - Think Jet
- Variador de rotação do motor

Capítulo 5

Resultados - metodologia de medida do fluxo de energia.

5.1 Introdução.

Os resultados apresentados referem-se:

1. Aferição estática e dinâmica do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração;
2. Levantamento das características dinâmicas da Mesa Absorvedora de Vibração;
3. Valores medidos da força e da aceleração, e calculado do fluxo de energia, através do analisador espectral, em função do nível de desbalanceamento e frequência de rotação do sistema dinâmico sobre a Mesa Absorvedora de Vibração.

5.1.1 Aferição estática do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.

A aferição estática do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração visou estabelecer a sua faixa de operação, para um máximo erro permissível na leitura da medida da força.

Os valores dos deslocamentos (mV), função da variação dos pesos aferidos, utilizados no levantamento da Curva de Aferição Estática (Figura 5.1), foi o resultado da média de 10 (dez) repetições (Tabela 5.1).

Os dados da Tabela 5.2 referem-se ao resultados da análise estatística dos valores da Curva de Aferição Estática do dinamômetro.

Tabela 5.1: Valores da Reta de Aferição Estática e do Erro Relativo da carga F_i aplicada no dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.

Peso Aferido F_i	Leitura L_i	Erro Relativo $\Delta F_i/F_i$	Peso Aferido F_i	Leitura L_i	Erro Relativo $\Delta F_i/F_i$
(N)	(mV)	%	(N)	(mV)	%
1	16.0	0.098126	29	463.5	0.006174
2	32.5	0.088966	30	482.2	0.005934
3	48.6	0.059315	31	496.1	0.005768
4	64.6	0.044553	32	510.3	0.005608
5	80.5	0.035717	33	528.6	0.005414
6	96.7	0.029711	34	543.6	0.005264
7	112.6	0.025502	35	560.6	0.005105
8	130.0	0.022078	36	567.2	0.005046
9	144.8	0.019814	37	591.6	0.004838
10	158.2	0.018131	38	607.3	0.004713
11	176.3	0.016264	39	624.6	0.004583
12	198.9	0.014411	40	642.4	0.004456
13	207.4	0.013819	41	655.8	0.004365
14	224.1	0.012787	42	670.96	0.004267
15	238.8	0.011997	43	689.2	0.004155
16	254.3	0.011264	44	706.76	0.004052
17	272.4	0.010514	45	722.6	0.003964
18	288.6	0.009923	46	734.9	0.003898
19	305.1	0.009385	47	751.1	0.003814
20	321.3	0.008911	48	769.4	0.003724
21	335.0	0.008546	49	782.92	0.00366
22	351.8	0.008137	50	802.7	0.00357
23	367.6	0.007787	51	817.2	0.003508
24	383.9	0.007455	52	831.4	0.003448
25	401.1	0.007135	53	848.2	0.00338
26	415.6	0.006886	54	865.1	0.003315
27	430.4	0.006649	55	881.9	0.003253
28	447.0	0.006402			

Tabela 5.2: Resultados da análise pelo Método da Regressão Linear dos dados da Curva de Aferição Estática.

Regressão Linear	
Constante linear	9.282987
Constante angular	15.99713
Número de observações	55
Graus de liberdade	53
Desvio padrão	1.912289
Desvio padrão do coeficiente angular	0.016249
R quadrado	0.999945

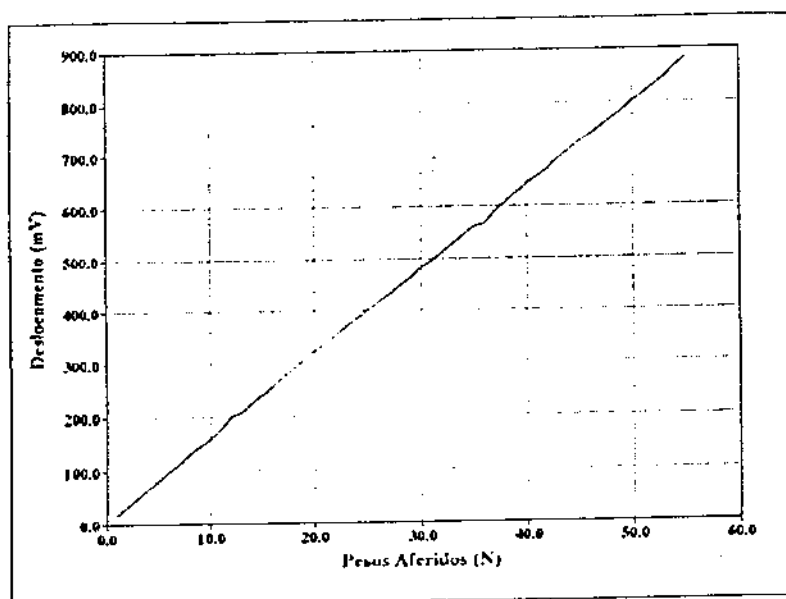


Figura 5.1: Reta de Aferição Estática do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.

5.1.2 Inversão da Reta de Regressão.

Com os pares de valores obtidos durante a aferição estática do dinamômetro (F_i = carga aplicada; L_i = leitura no multímetro digital) e aplicando-se as equações 4.18 a 4.22 obtém-se a Reta do Erro Relativo (Figura 5.2).

Os valores das variáveis foram:

$N = 55$ (número de variáveis independentes);

$n_i = 10$ (número de observações para cada carga);

$N \cdot n_i = 550$ (número total de observações);

$t = \varepsilon_p = 1.96$ para $N > 30$, com 95% de confiança;

$m = 1$ (para uma leitura, em cada carga aplicada durante a utilização do dinamômetro).

Substituindo-se os valores nas equações (4.18) a (4.22) obtém-se:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} = 28.0$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i}{N} = 448.22$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x}) \cdot \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2} = 16.0$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N \cdot n_i - N} = 2.13$$

$$F_i = 28.0 + 0.062 \cdot (L_i - 448.22) \quad (5.1)$$

$$\Delta F_i = 0.011 \sqrt{256.40 + \frac{(L_i - 448.22)^2}{138600.00}} \quad (5.2)$$

onde,

L_i = leitura no multímetro digital - mV;

F_i = carga aplicada no dinamômetro - N;

ΔF_i = erro da carga aplicada F_i , em função de uma determinada leitura L_i no dinamômetro.

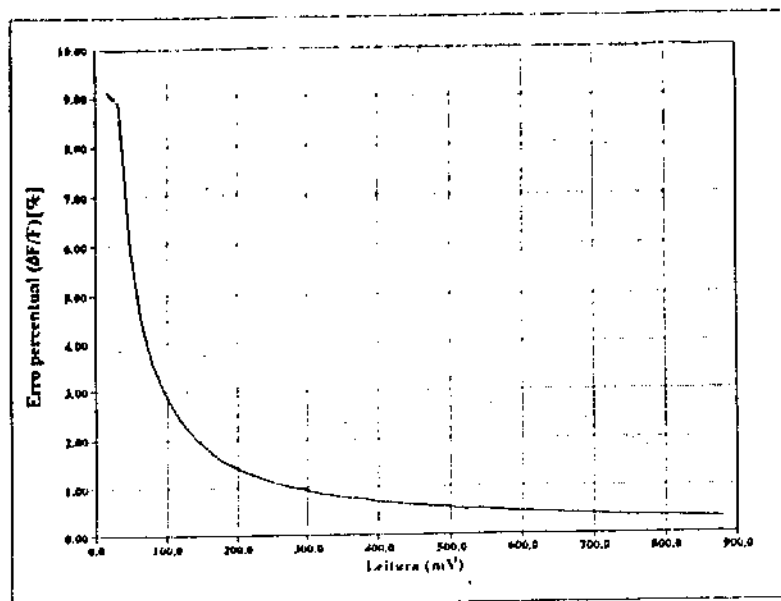


Figura 5.2: Curva do Erro Relativo da carga F_i aplicada no dinamômetro, em função da leitura L_i no multímetro digital.

5.1.3 Aferição dinâmica do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.

Com a aferição dinâmica, estabeleceu-se as faixas de frequências de utilização do dinamômetro, para que as distorções de amplitude e fase estejam dentro de um valor especificado.

Através da Curva do Movimento Livre, obteve-se as medidas das amplitudes das oscilações. Como os valores do decremento (δ), obtidos através das medidas das amplitudes não eram constantes, obtém-se um valor médio, traçando-se no papel monologarítmico (a_1/a_n versus n) a Reta de Determinação do Decremento Logarítmico - Figura 5.3. A Tabela 5.3 contém os valores das amplitudes das oscilações do movimento livre da Mesa Absorvedora de Vibração e das razões entre as amplitudes consecutivas, utilizadas na determinação do decremento logarítmico (δ).

Da Figura 5.3 para $n = 10$ oscilações sucessivas do movimento amortecido livre o valor da razão $a_1/a_n = 2.78$, obtém-se o valor do decremento (δ),

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{a_1}{a_n} = \frac{1}{10} \ln 2.78 = 0.10. \quad (5.3)$$

Conhecendo-se o valor do decremento (δ) obtém-se o fator de amortecimento (a),

Tabela 5.3: Valores das amplitudes das oscilações do movimento livre e das razões entre as amplitudes consecutivas (a_1/a_n).

n	a_n	a_1/a_n	$\frac{1}{n} \cdot \ln(a_1/a_n)$	n	a_n	a_1/a_n	$\frac{1}{n} \cdot \ln(a_1/a_n)$
1	25.0	1.00	0	10	9.0	2.78	0.102
2	22.0	1.14	0.065	11	8.0	3.13	0.103
3	19.7	1.27	0.079	12	7.0	3.57	0.106
4	17.4	1.44	0.091	13	6.5	3.85	0.104
5	15.4	1.62	0.096	14	5.7	4.39	0.106
6	14.0	1.80	0.098	15	5.0	5.00	0.107
7	12.4	2.02	0.100	16	4.5	5.56	0.107
8	11.2	2.23	0.100	17	4.0	6.25	0.108
9	10.0	2.50	0.102	18	3.5	7.14	0.109

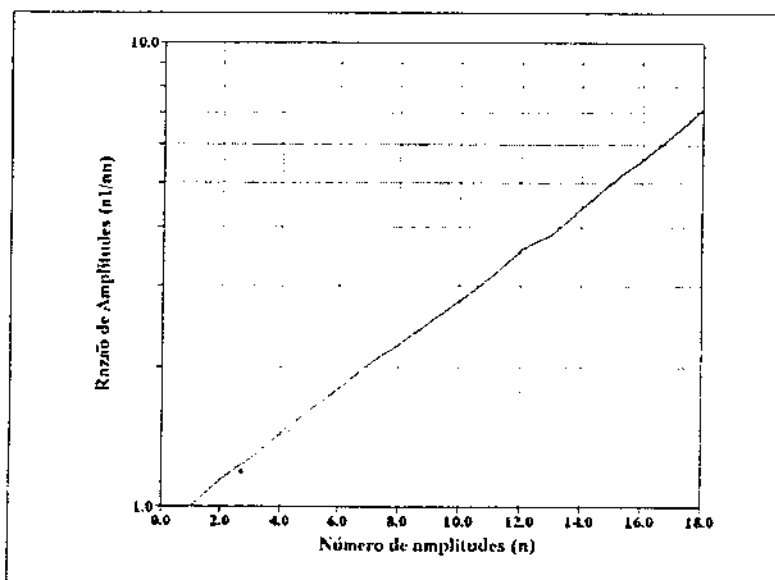


Figura 5.3: Reta de Determinação do Decremento Logarítmico.

$$a = \frac{\delta}{\sqrt{4.\pi^2 + \delta^2}} = \frac{0.10}{\sqrt{4.\pi^2 + 0.10^2}} = 0.016 . \quad (5.4)$$

A frequência natural (w_n) do dinamômetro obtida por [35] foi de 593.0 Hz.

$$w_n = 593.0 Hz .$$

Com os valores da frequência natural w_n e do fator de amortecimento obtém-se os valores do fator de amplificação Φ_1 e da distorção de fase φ . Para $w = 60$ Hz, frequência máxima utilizada,

$$\Phi_1 = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{60^2}{593^2}) + (2.0,016 \cdot \frac{60}{593})^2}} = 1.01$$

$$\varphi = \arctg \frac{2.0,016 \cdot \frac{60}{593}}{1 - \frac{60^2}{593^2}} = 0.19$$

5.1.4 Caracterização dinâmica da Mesa Absorvedora de Vibração.

O espectro de frequência da Mesa Absorvedora de Vibração foi levantado aplicando-se cargas de 50.0, 100.0, 150.0 e 200.0 N (Tabela 5.4). Quando a Mesa Absorvedora de Vibração estava com o sistema dinâmico montado sobre a placa base, o espectro de frequência foi levantado aplicando-se 3 (três) níveis de carga, 50.0, 100.0 N e 150.0 N (Tabela 5.5). Nos dois casos variou-se a frequência de 5.0 a 150.0 Hz. As Curvas do espectro de frequência para as duas situações são mostradas nas Figuras 5.4 e 5.5.

Tabela 5.4: Valores do Espectro em Frequência da Mesa Absorvedora de Vibração - sem o sistema dinâmico, para 4 níveis de carga.

Frequência (Hz)	Deslocamento (mV)			
	Carga - (N)			
	50.0	100.0	150.0	200.0
5	3.45	11.93	15.48	20.07
10	3.8	12.18	14.45	21.7
20	4.52	13.05	15.95	23.56
30	4.08	16.68	19.96	28.06
40	4.79	32.36	33.5	37.95
45	6.76	36.34	43.76	61.34
50	11.07	38.81	55.35	69.93
55	15.21	57.76	64.83	90.23
60	21.5	26.61	35.13	40.54
70	10.53	13.88	14.37	28.17
80	5.6	8.3	9.06	16.7
90	2.9	5.76	6.17	10.5
100	2.7	3.87	4.64	7.6
110	2.3	2.93	4.11	6.23
120	1.58	2.43	3.69	5.68
130	1.12	1.79	2.45	3.58
140	1.08	1.32	1.87	2.76
150	0.78	1.05	1.43	2.09

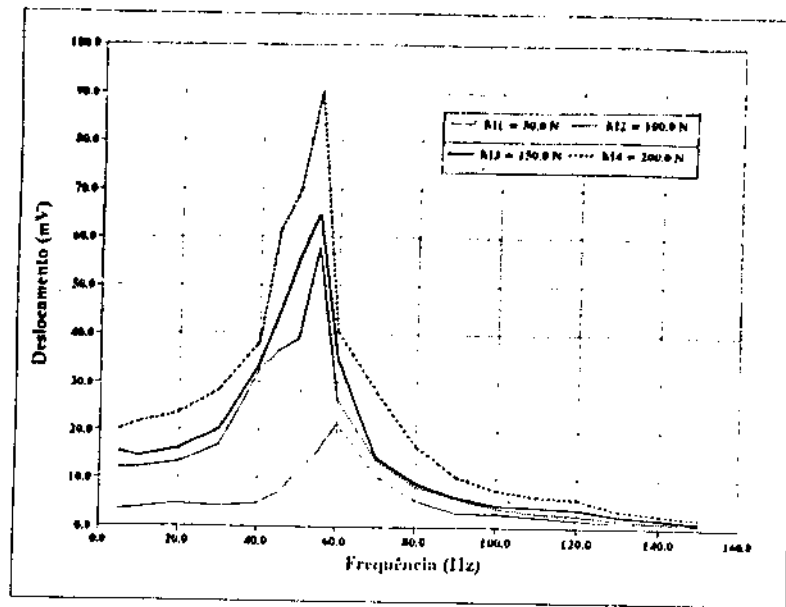


Figura 5.4: Curva do Espectro de Frequência da Mesa Absorvedora de Vibração, sem o sistema dinâmico.

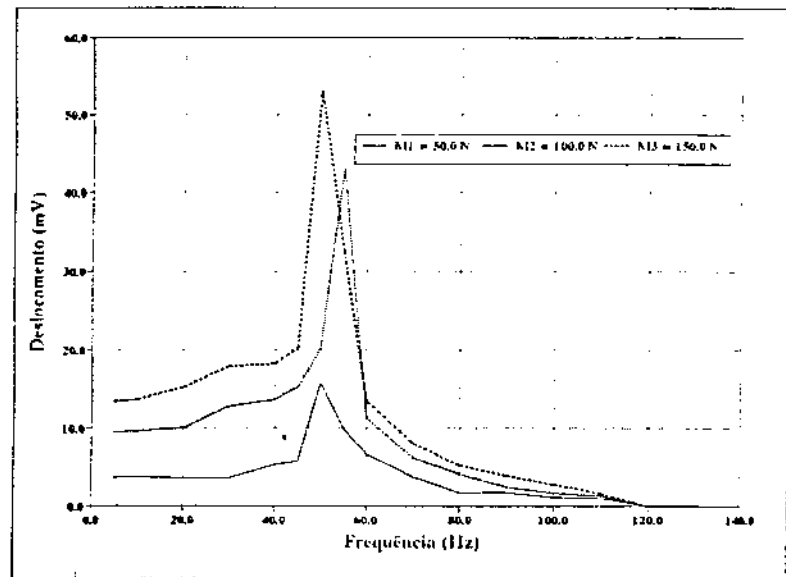


Figura 5.5: Espectro de Frequência da Mesa Absorvedora de Vibração, com o sistema dinâmico.

Tabela 5.5: Valores do espectro em Frequência da Mesa Absorvedora de Vibração, com sistema dinâmico, para 3 níveis de carga.

Frequência (Hz)	Deslocamento (mV)		
	Carga - (N)		
	50.0	100.0	150.0
5	3.79	9.42	13.41
10	3.82	9.54	13.64
20	3.68	10.01	15.14
30	3.65	12.74	17.91
40	5.4	13.65	18.26
45	5.88	15.32	20.33
50	15.75	20.04	53.18
55	9.88	43.23	32.73
60	6.79	11.27	13.31
70	3.89	6.31	8.05
80	1.8	4.13	5.16
90	1.82	2.47	3.91
100	1.13	1.71	2.14
110	0.93	1.35	1.34
120	0.0	0.0	0.0
130	0.0	0.0	0.0
140	0.0	0.0	0.0
150	0.0	0.0	0.0

5.1.5 Valores medidos da força, aceleração e cálculo do fluxo de energia.

Com os valores obtidos através da rotina que calculou a F.F.T dos sinais e os vetores que continham as amplitudes e fases da força e da aceleração, traçou-se os gráficos que relacionavam a variação da velocidade do motor com a força (Figura 5.6) e com a aceleração (Figura 5.7), para os diversos níveis de vibração do motor.

Conhecendo-se os valores da força, da aceleração e do ângulo de fase entre eles, e utilizando a equação (4.40), obtém-se os valores do fluxo de energia (Figura 5.8).

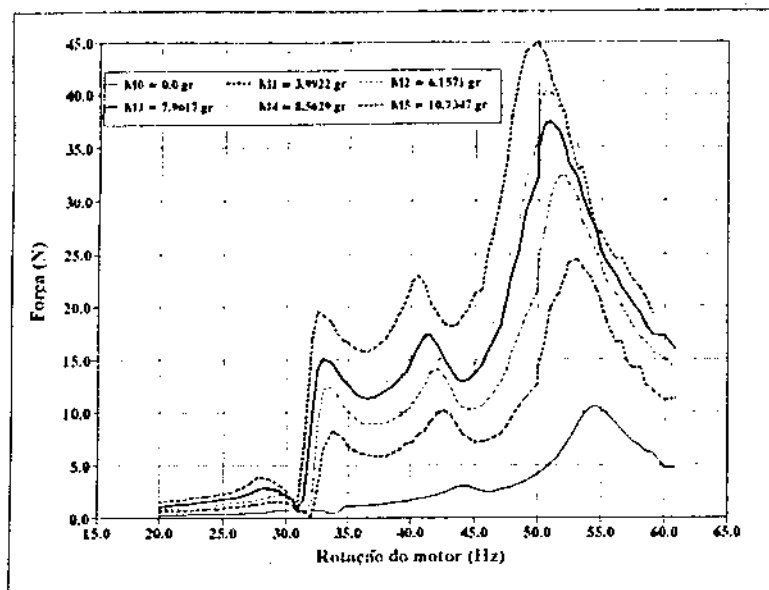


Figura 5.6: Variação da força em função da rotação do motor e do nível de desbalanceamento, medida com a Dinamômetro.

5.1.6 Dispersão dos dados da força e aceleração.

As curvas das Figuras 5.9 a 5.14 (Variação da força em função da rotação do motor) e as Curvas 5.15 a 5.20 (Variação da aceleração em função da rotação do motor), mostram a dispersão dos dados obtidos na medida da força e da aceleração, quando considerou-se o valor máximo correspondente a 3 (três) desvios padrões.

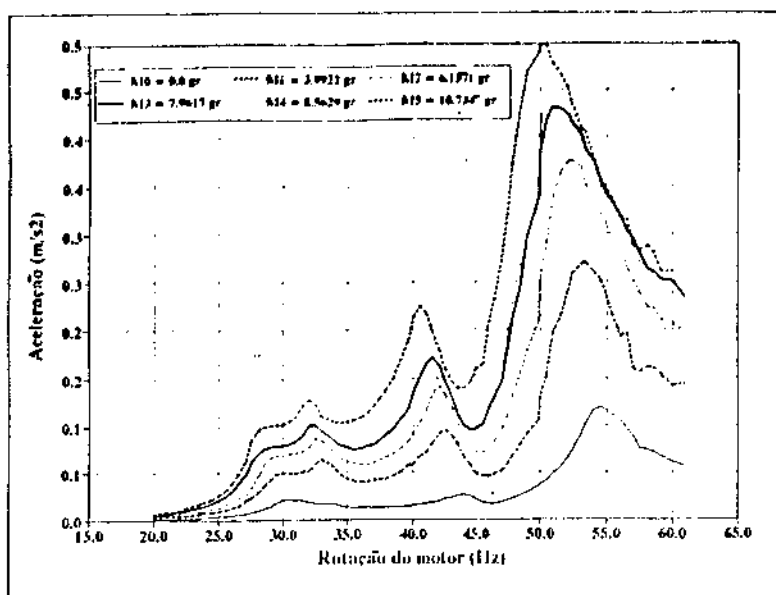


Figura 5.7: Variação da aceleração em função da rotação do motor e do nível de desbalanceamento, medida com o Acelerômetro.

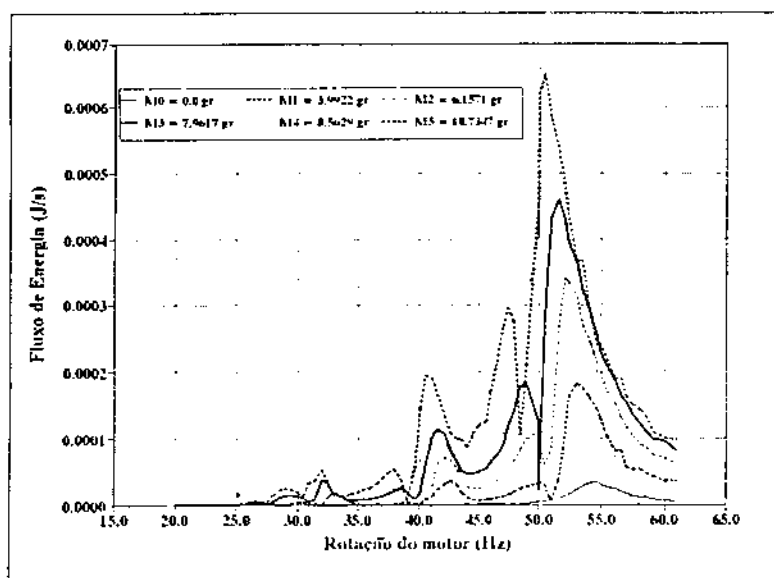


Figura 5.8: Variação do fluxo de energia em função da rotação do motor e do nível de desbalanceamento, calculado com as medidas da força e da aceleração.

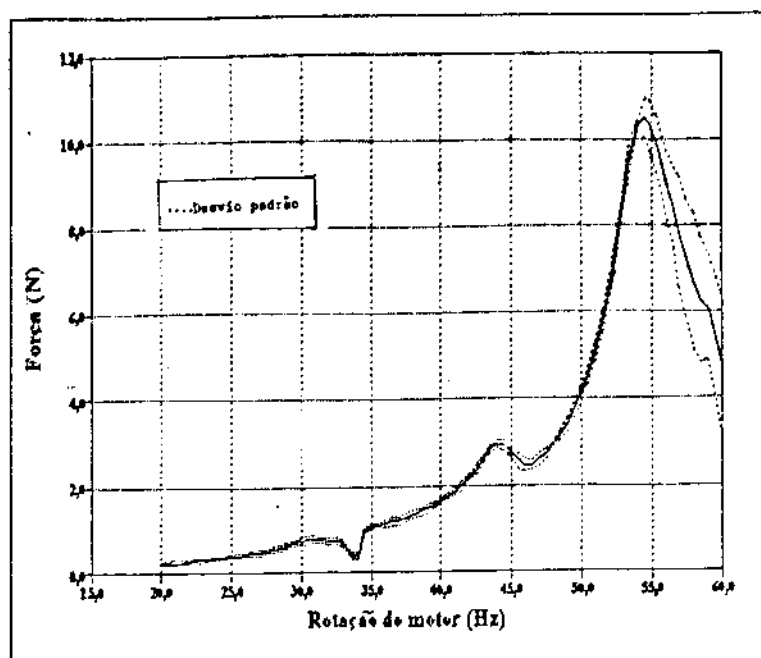


Figura 5.9: Variação da força em função da rotação do motor, sem desbalanceamento ($M_0 = 0.0$ gr).

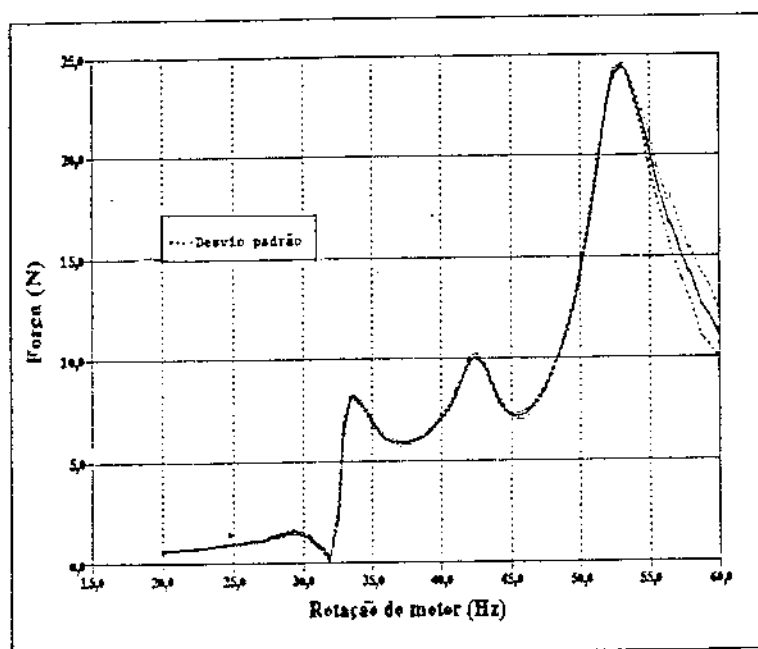


Figura 5.10: Variação da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento ($M_1 = 3.9922$ gr).

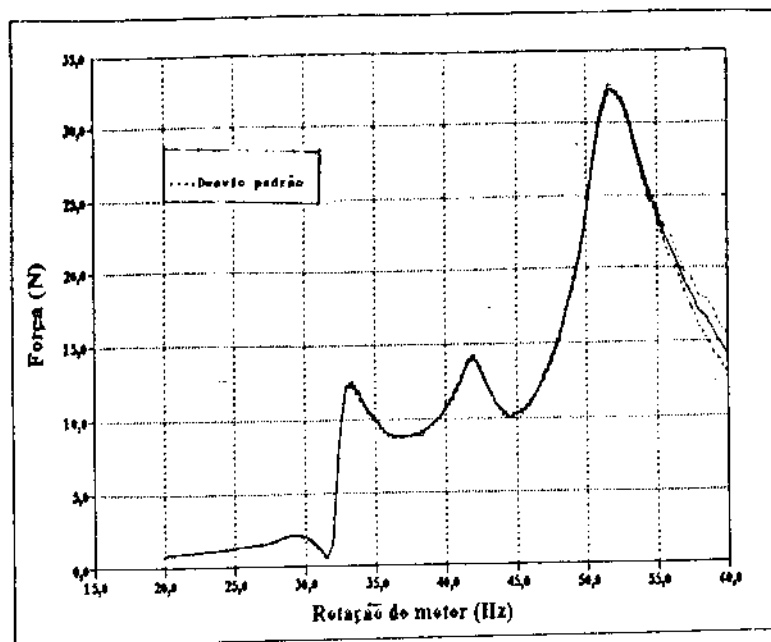


Figura 5.11: Variação da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento ($M2 = 6.1571 \text{ gr}$).

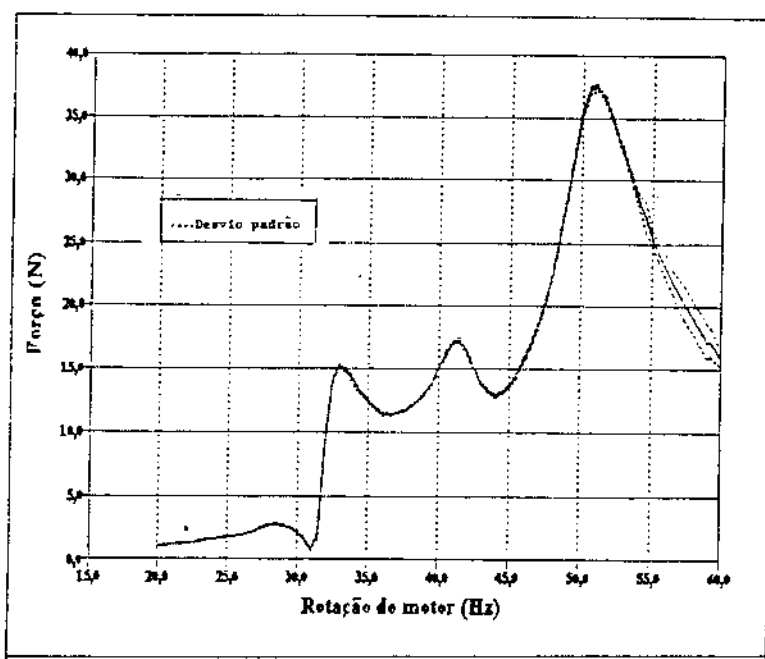


Figura 5.12: Variação da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento ($M3 = 7.9617 \text{ gr}$).

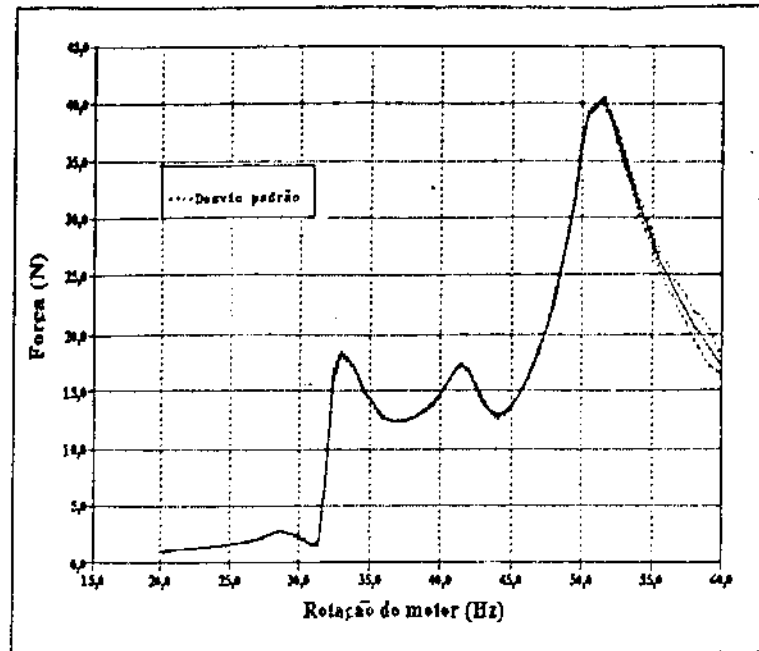


Figura 5.13: Variação da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento ($M4 = 8.5629 \text{ gr}$).

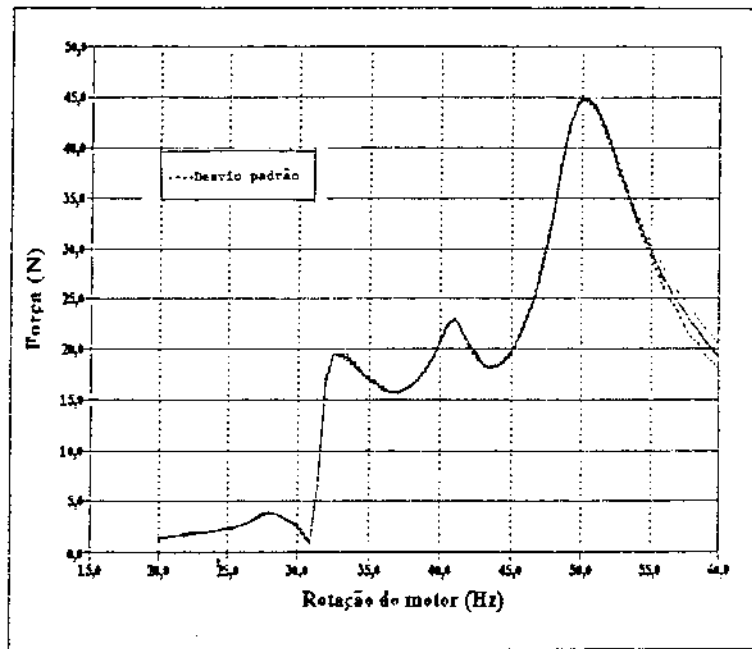


Figura 5.14: Variação da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento ($M5 = 10.7347 \text{ gr}$).

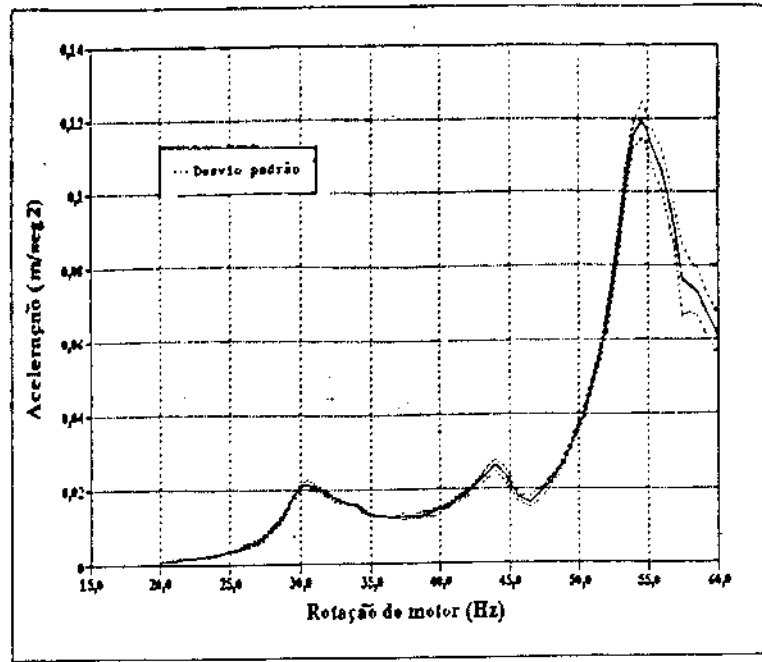


Figura 5.15: Variação da aceleração em função da rotação do motor, sem desbalanceamento ($M_0 = 0.0 \text{ gr}$).

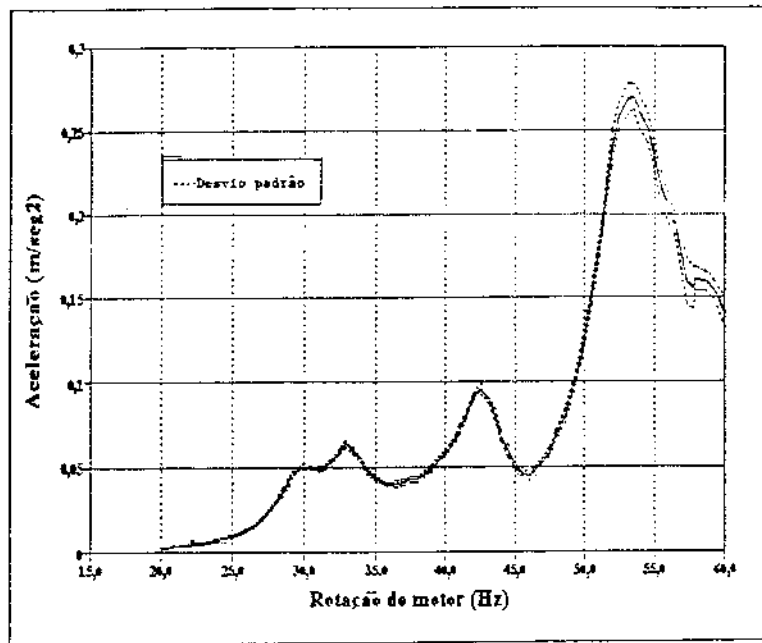


Figura 5.16: Variação da aceleração em função da rotação do motor, com desbalanceamento ($M_1 = 3.9922 \text{ gr}$).

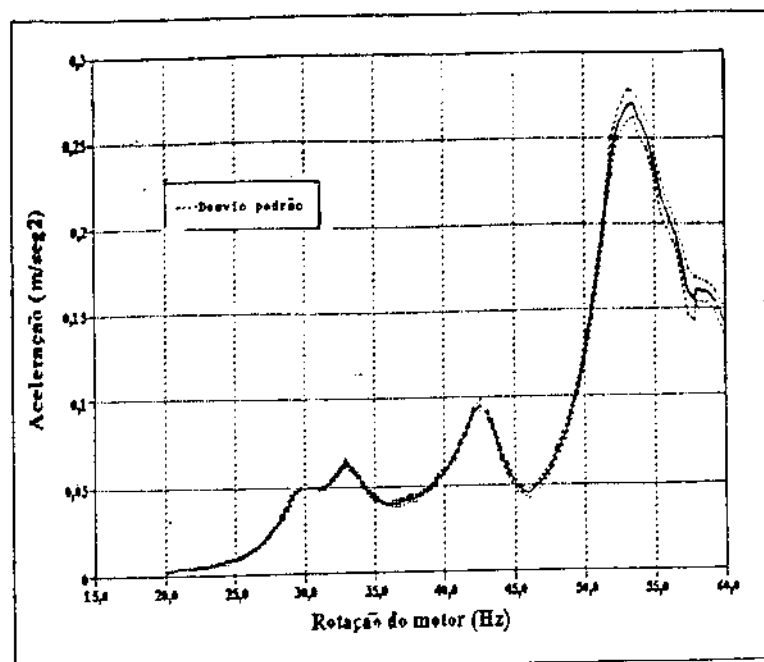


Figura 5.17: Variação da aceleração em função da rotação do motor, com desbalanceamento (M2 = 6.1571 gr).

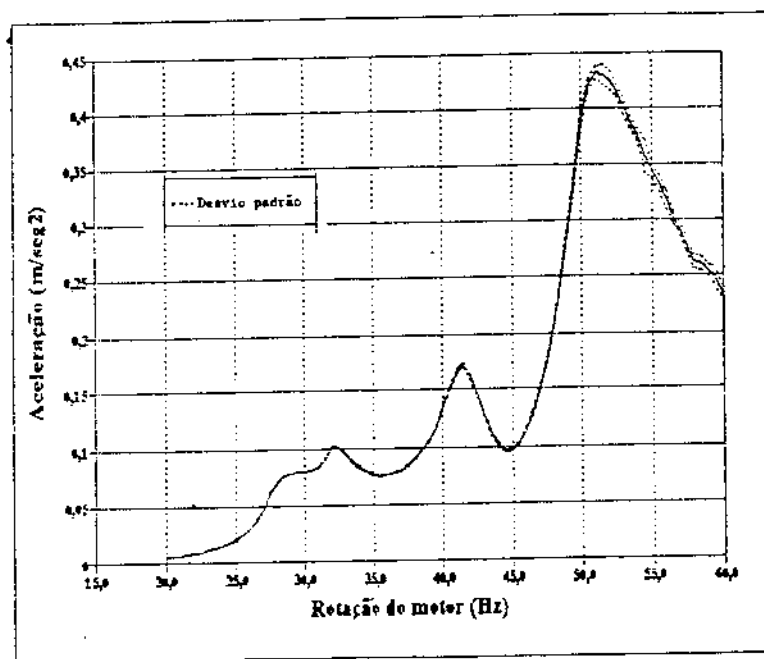


Figura 5.18: Variação da aceleração em função da rotação do motor, com desbalanceamento (M3 = 7.9617 gr).

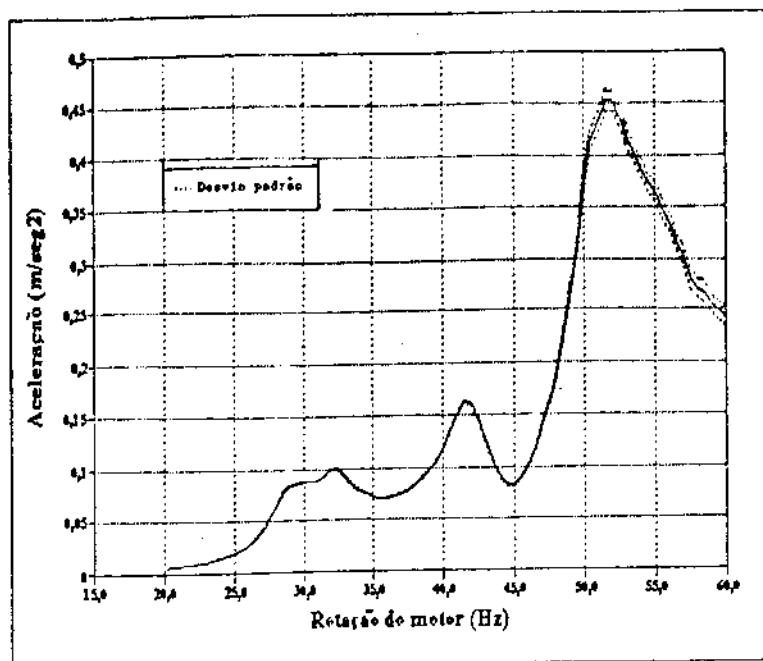


Figura 5.19: Variação da aceleração em função da rotação do motor, com desbalanceamento ($M_4 = 8.5629$ gr).

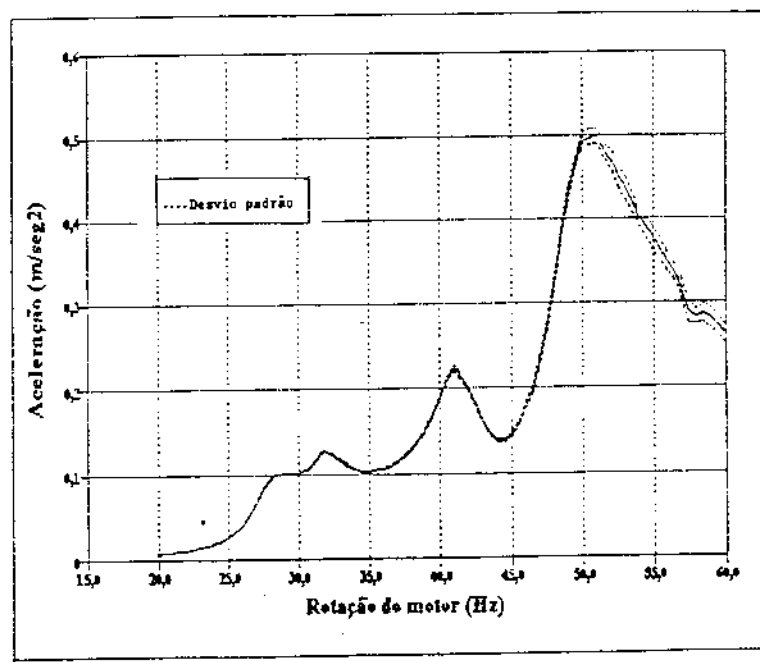


Figura 5.20: Variação da aceleração em função da rotação do motor, com desbalanceamento ($M_5 = 10.7347$ gr).

Capítulo 6

Resultados - metodologia de qualificação de sistemas dinâmicos.

6.1 Introdução.

Os resultados apresentados referem-se:

1. Ao levantamento das características dinâmicas do acelerômetro em PVDF.
 - Espectro de frequência;
 - Aferição dinâmica - Curva de Sensibilidade;
2. Ao nível de voltagem acumulada pelo acelerômetro em PVDF, em função do desbalanceamento do sistema dinâmico e do tempo de acumulação, objetivando verificar a utilização do acelerômetro em PVDF para qualificar sistemas dinâmicos.

6.2 Qualificação do sistema dinâmico utilizando o acelerômetro em PVDF.

6.2.1 Características dinâmica do acelerômetro em PVDF.

O levantamento do espectro de frequência do acelerômetro em PVDF foi realizado aplicando-se uma aceleração constante de 1.0 g. (g = aceleração gravidade), variando-se a frequência de 15.0 a 460.0 Hz e registrando-se através do osciloscópio, os deslocamentos da película piezoelétrica (Tabela 6.1).

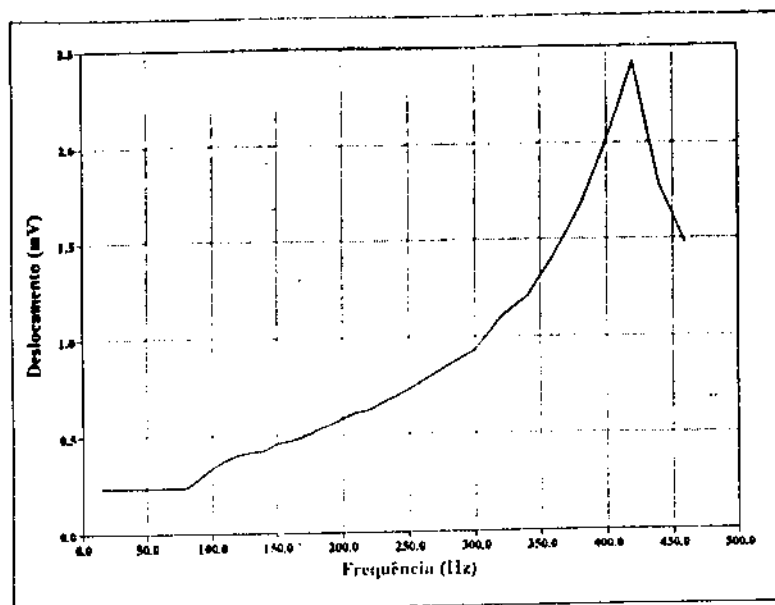


Figura 6.1: Curva do Espectro de Frequência do acelerômetro em PVDF.

A Curva do Espectro de Frequência do acelerômetro em PVDF é mostrada na Figura 6.1.

Para aferição dinâmica do acelerômetro em PVDF fixou-se a frequência em 35,0 Hz e variou-se a aceleração 1,0 g. a 4,0 g., registrando-se o deslocamento da película do PVDF (Tabela 6.2). Utilizou-se a frequência de 35,0 Hz para aferição dinâmica por duas razões: (1) realizar as medidas na mesma ou frequência muito próxima da utilizada na obtenção da voltagem acumulada; (2) o gerador de frequência utilizado permitia um ajuste mais preciso quando o valor é inteiro.

Com os valores dos deslocamentos (mV) e das acelerações correspondentes levantou-se a Curva de Sensibilidade, mostrada na Figura 6.2.

A Tabela 6.3 apresenta os resultados da análise pelo Método da Regressão dos dados da Curva de Sensibilidade.

6.2.2 Inversão da Reta de Regressão.

Com os pares de valores obtidos durante a aferição dinâmica do acelerômetro em PVDF (g_i = aceleração aplicada; L_i = leitura do deslocamento (mV) no osciloscópio) e aplicando-se as equações 4.48 a 4.52 obtém-se a Reta do Erro Relativo na leitura do deslocamento (mV) do acelerômetro em PVDF (Figura 6.3).

Tabela 6.1: Valores do espectro em Frequência do acelerômetro em PVDF (aceleração = 1.0 g).

Frequência (Hz)	Deslocamento (mV)	Frequência (Hz)	Deslocamento (mV)
15	0.23	190	0.55
20	0.23	200	0.58
30	0.23	210	0.61
40	0.23	220	0.62
50	0.23	230	0.66
60	0.23	240	0.69
70	0.23	260	0.77
80	0.23	280	0.85
90	0.28	300	0.93
100	0.33	320	1.10
110	0.37	340	1.21
120	0.40	360	1.42
130	0.41	380	1.67
140	0.42	400	2.02
150	0.46	420	2.42
160	0.47	440	1.78
170	0.49	460	1.47
180	0.52		

Tabela 6.2: Valores da Curva de Sensibilidade e do Erro Relativo na leitura do deslocamento do acelerômetro em PVDF.

Aceleração (g)	Deslocamento (mV)	Erro Relativo %
1.0	0.80	6.5782494464E-02
1.2	0.94	5.5530446844E-02
1.4	1.18	4.4129929891E-02
1.6	1.36	3.8362687102E-02
1.8	1.53	3.4301461595E-02
2.0	1.68	3.1214659247E-02
2.2	1.90	2.7677960327E-02
2.4	2.09	2.5209898777E-02
2.6	2.19	2.4114738110E-02
2.8	2.38	2.2307235475E-02
3.0	2.58	2.0743742841E-02
3.5	3.03	1.8038659243E-02
4.0	3.39	1.6435590559E-02

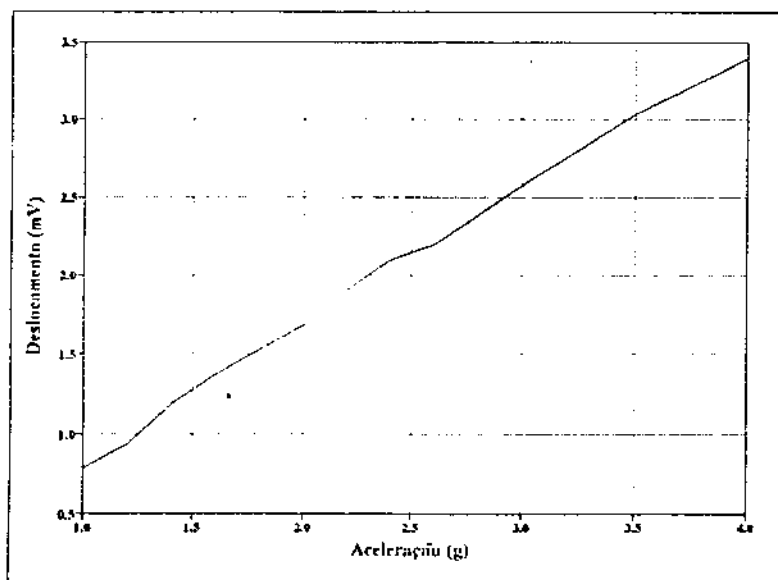


Figura 6.2: Curva de Sensibilidade do acelerômetro em PVDF.

Tabela 6.3: Resultados da análise pelo Método da Regressão Linear dos dados da Curva de Sensibilidade.

Regressão Linear	
Constante linear	- 0.05644
Constante angular	0.874025
Número de observações	13
Graus de liberdade	11
Desvio padrão	0.032437
Desvio padrão do coeficiente angular	0.010411
R quadrado	0.998442

Os valores das variáveis foram:

$N = 13$ (número de variáveis independentes);

$n_i = 3$ (número de observações para cada aceleração);

$N \cdot n_i = 39$ (número total de observações);

$t = t_p = 2.203$ para $N < 30$, com 95% de confiança [25];

$m = 1$ (para uma leitura, em cada carga aplicada durante a utilização do dinamômetro).

Substituindo os valores nas equações 4.48 a 4.52, obtém-se:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} = 2.27$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i}{N} = 1.93$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x}) \cdot \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2} = 0.87$$

$$S_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N \cdot n_i - N} = 5.92E - 04$$

$$g_i = 2.27 + 1.14.(L_i - 1.93) \quad (6.1)$$

$$\Delta g_i = 6.98E - 02 \sqrt{0.79 + \frac{(L_i - 1.93)^2}{29.12}} \quad (6.2)$$

onde,

L_i = leitura no osciloscópio (mV);

g_i = aceleração aplicada no acelerômetro, através do vibrador *shaker*;

Δg_i = erro na leitura L_i do deslocamento da película piezoelétrica do acelerômetro em PVDF.

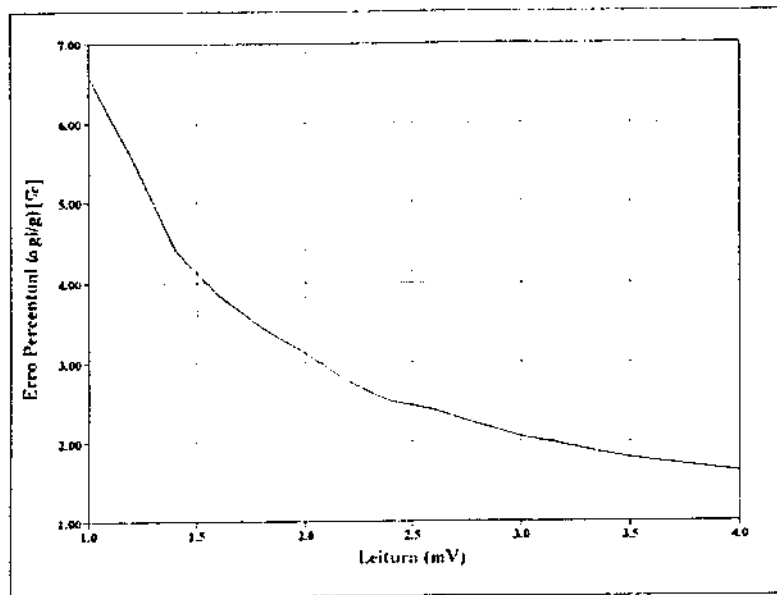


Figura 6.3: Curva do Erro Relativo na leitura do deslocamento (mV) do acelerômetro em PVDF.

6.3 Verificação da metodologia de qualificação do sistema dinâmico.

Realizou-se a verificação da metodologia de qualificação do sistema dinâmico analisando-se o comportamento do acelerômetro em PVDF quanto à sua capacidade de acumular voltagem em função dos vários níveis de desbalanceamento do motor e do tempo de acumulação.

As Figuras 6.4 a 6.31 mostram os níveis de acumulação de voltagem quando variou-se os contrapesos e o tempo de acumulação. A velocidade de rotação do motor foi de 36.5 Hz, o

nível de comparação DC = 2.5 V e a voltagem de alimentação do circuito eletrônico de 9.0 V. Os tempos de acumulação foram de $t = 2.5, 3.0, 4.0, 8.0$ e 9.9 s.

A Tabela 6.4 contém os valores, da voltagem acumulada pelo acelerômetro em PVDF - Vmin(4), obtidos graficamente através de um osciloscópio.

As Tabelas 6.6 e 6.5 apresentam os resultados da análise de regressão aplicadas aos dados da voltagem acumulada, em função do tempo de acumulação e da variação dos contrapesos, respectivamente.

As Figuras 6.33 e 6.32 apresentam graficamente o comportamento da voltagem acumulada pelo acelerômetro em PVDF, em função da variação da massa dos contrapesos (desbalanceamento) e do tempo de acumulação, respectivamente.

Tabela 6.4: Valores da voltagem acumulada em função da variação da massa dos contrapesos, para diversos tempos (t) de acumulação.

massa contrapeso (gr.)	Voltagem Acumulada - (mV)				
	$t = 2.5$ s.	$t = 3.0$ s.	$t = 4.0$ s.	$t = 8.0$ s.	$t = 9.9$ s.
0.0	312.50	406.25	468.75	937.50	1093.75
3.9922	812.50	1000.00	1343.75	2656.25	3218.75
6.1571	1406.25	1593.75	2156.25	4375.00	5187.50
7.9617	1906.25	2406.25	2531.25	6093.75	7500.00
8.5629	2281.25	2906.25	3156.25	8125.00	9687.50
10.7347	2625.00	3187.50	4406.25	clipped	clipped

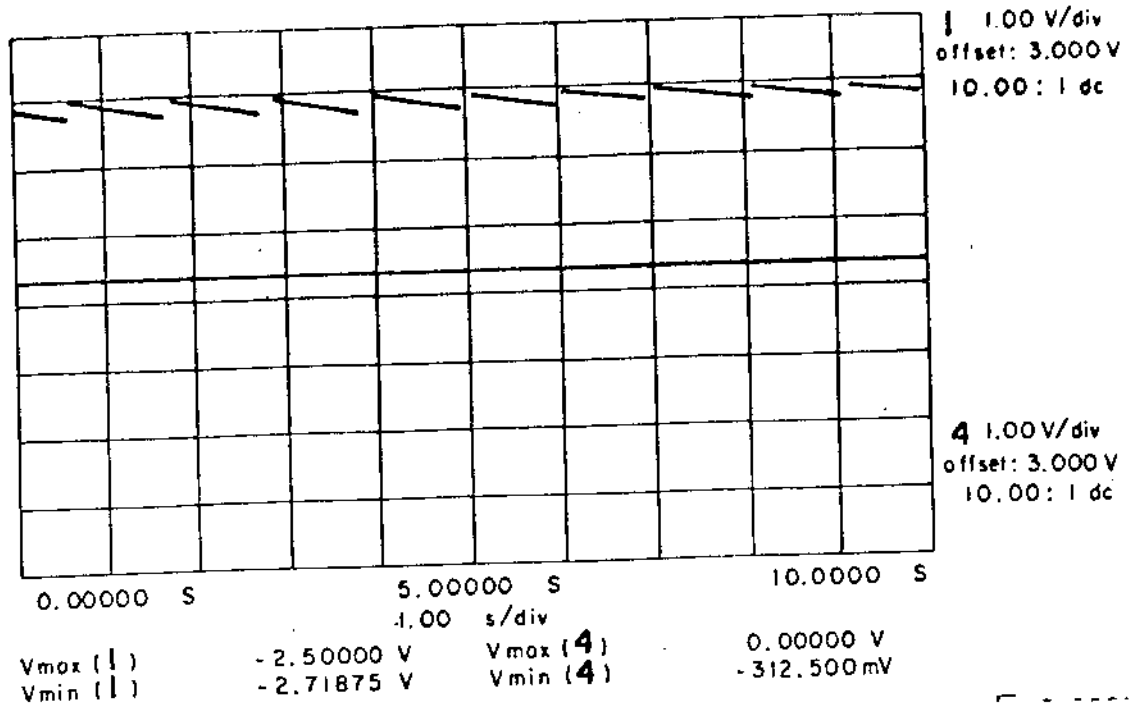


Figura 6.4: Nível de voltagem acumulada, sem desbalanceamento ($M0 = 0.0$ gr. e $t = 2.5$ s.).

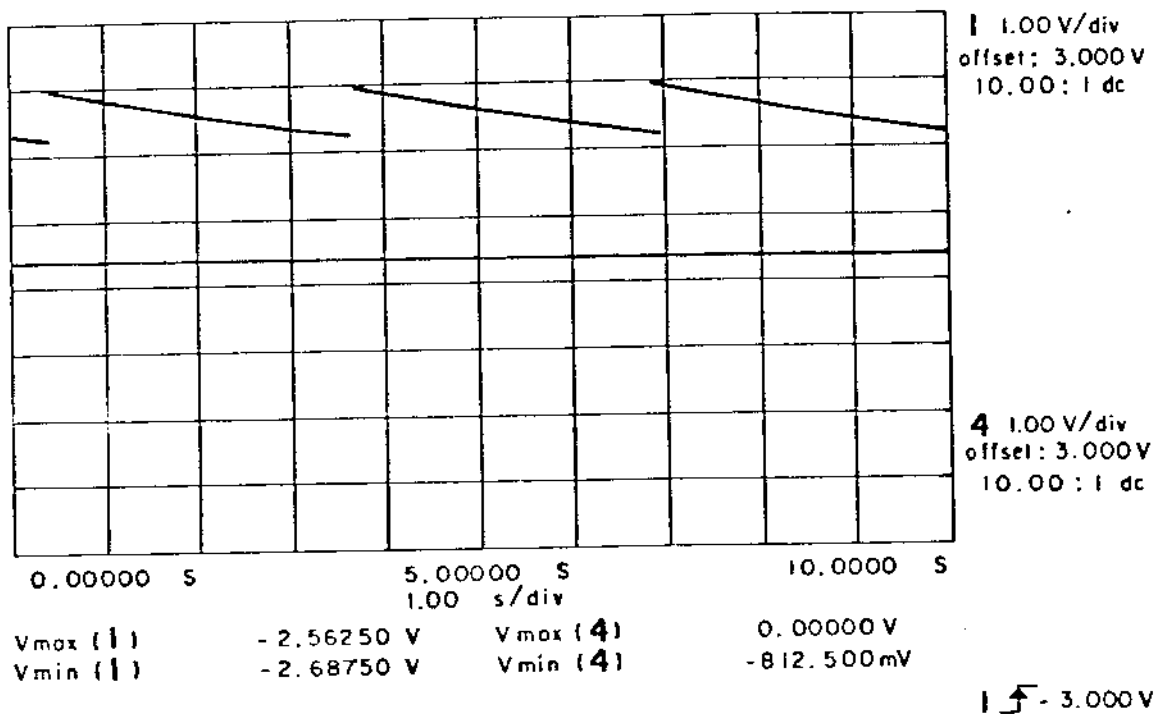


Figura 6.5: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M1 = 3.9922$ gr. e $t = 2.5$ s.).

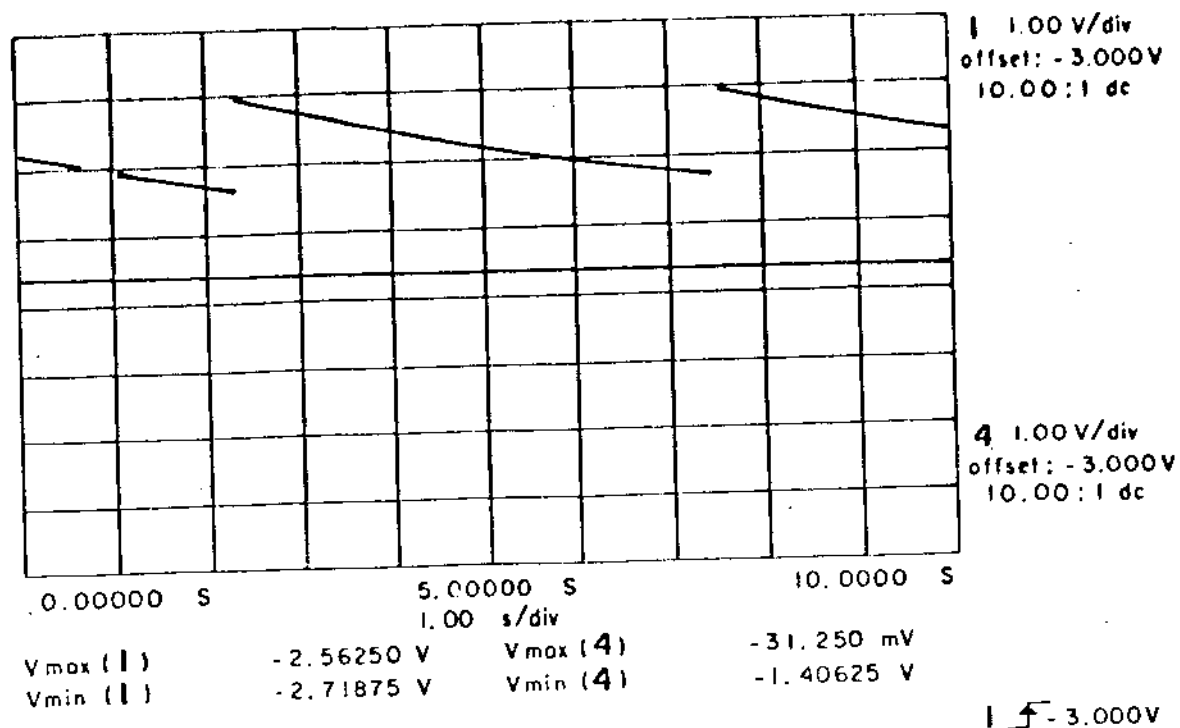


Figura 6.6: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M2 = 6.1571$ gr. e $t = 2.5$ s.).

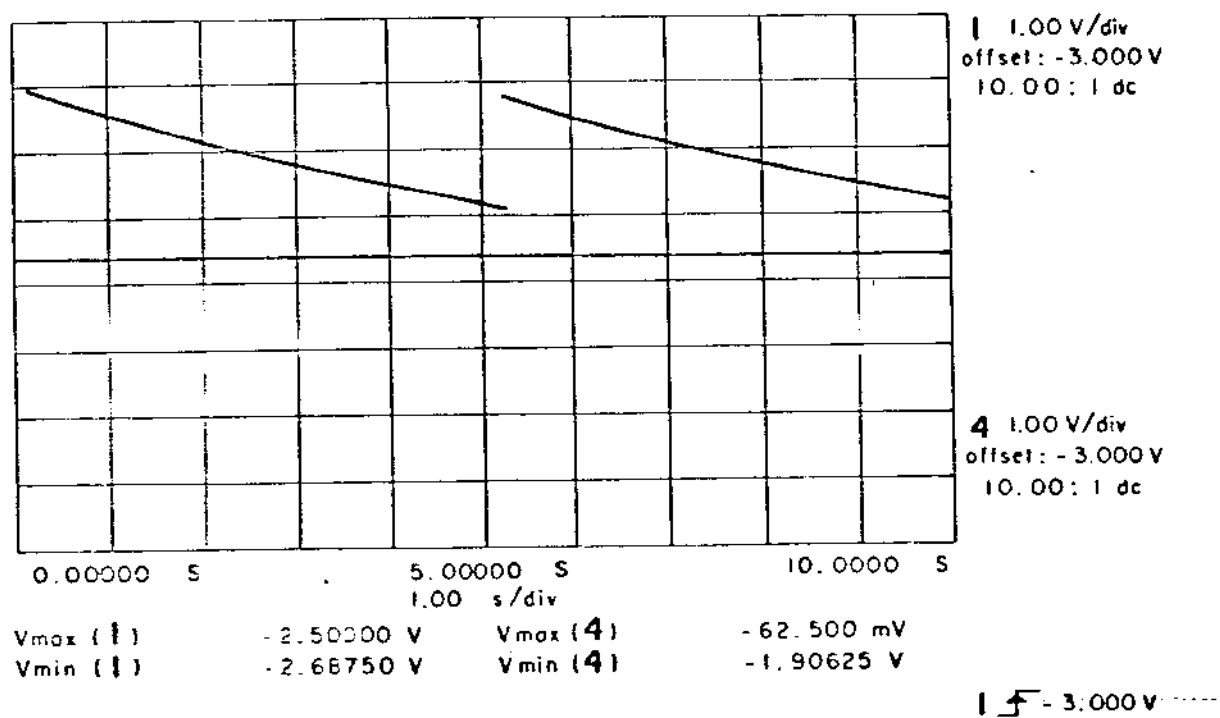


Figura 6.7: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M3 = 7.9617$ gr. e $t = 2.5$ s.).

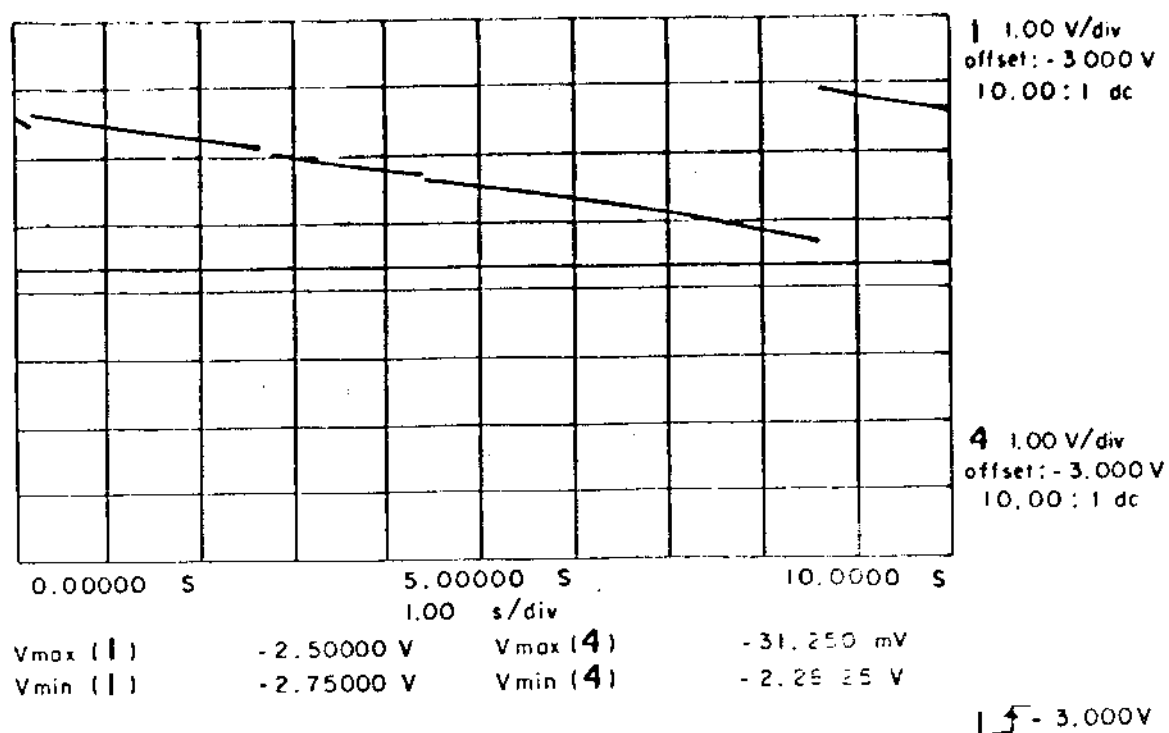


Figura 6.8: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M = 8.5629$ gr. e $t = 2.5$ s.).

hp triggered

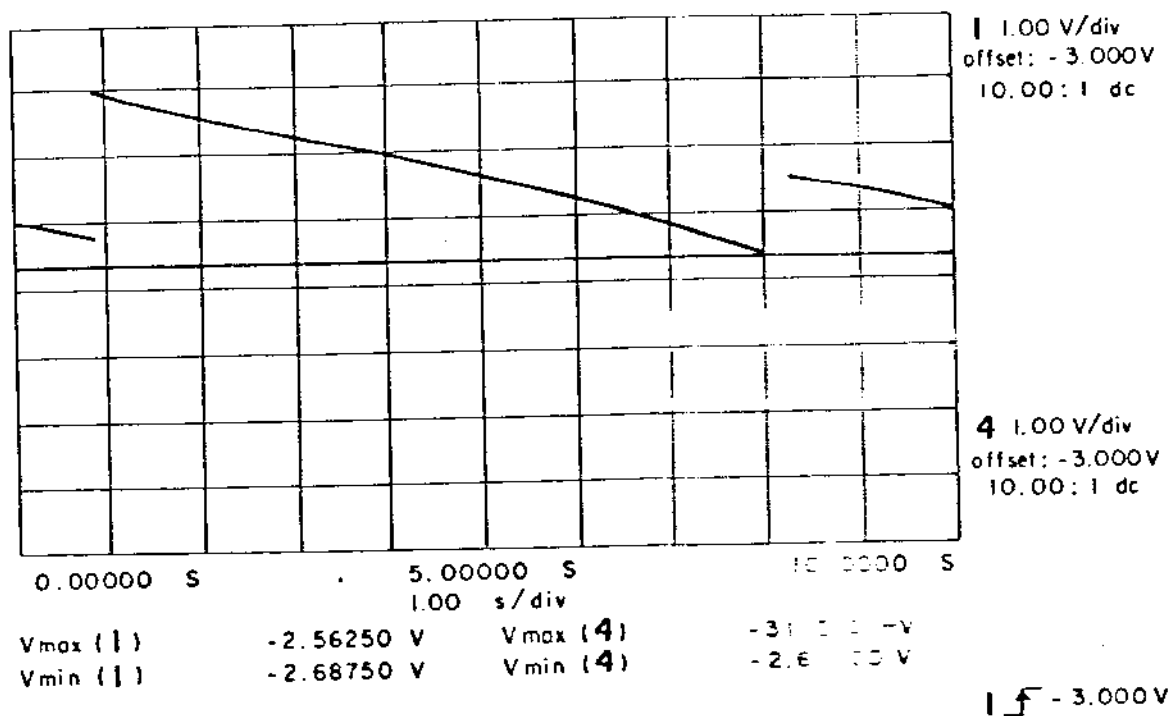


Figura 6.9: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M = 10.7347$ gr. e $t = 2.5$ s.).

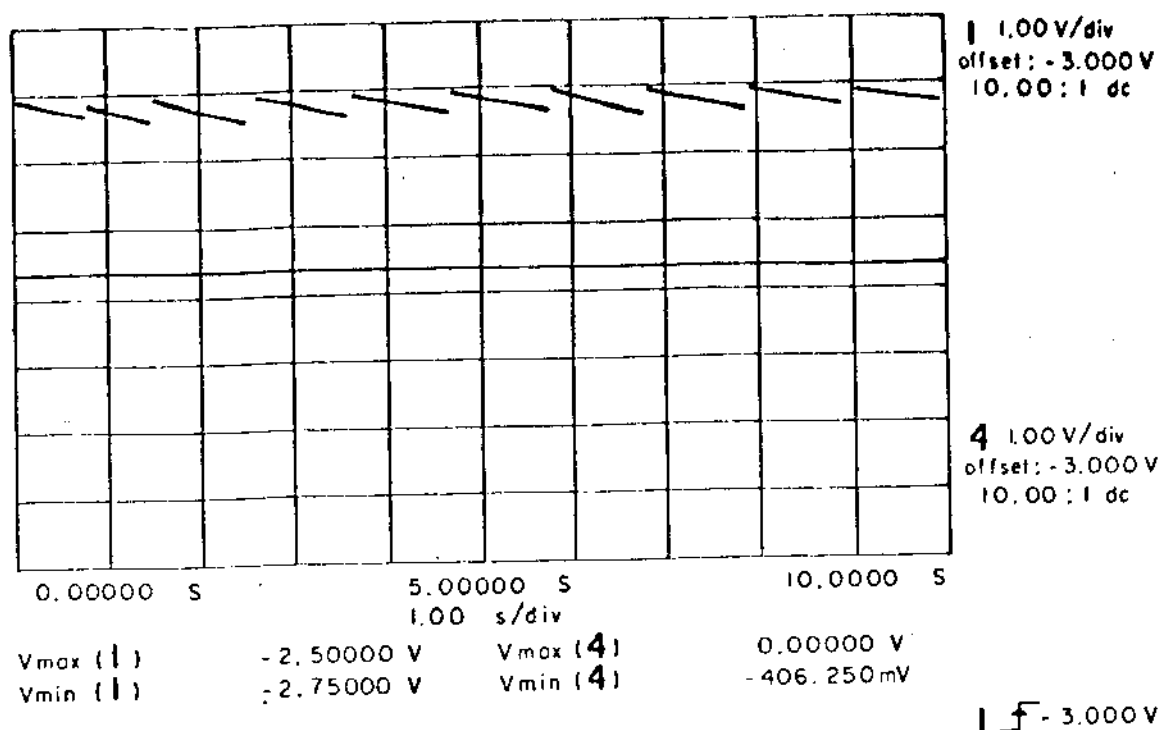


Figura 6.10: Nível de voltagem acumulada, sem desbalanceamento ($M0 = 0.0$ gr. e $t = 3.0$ s.).

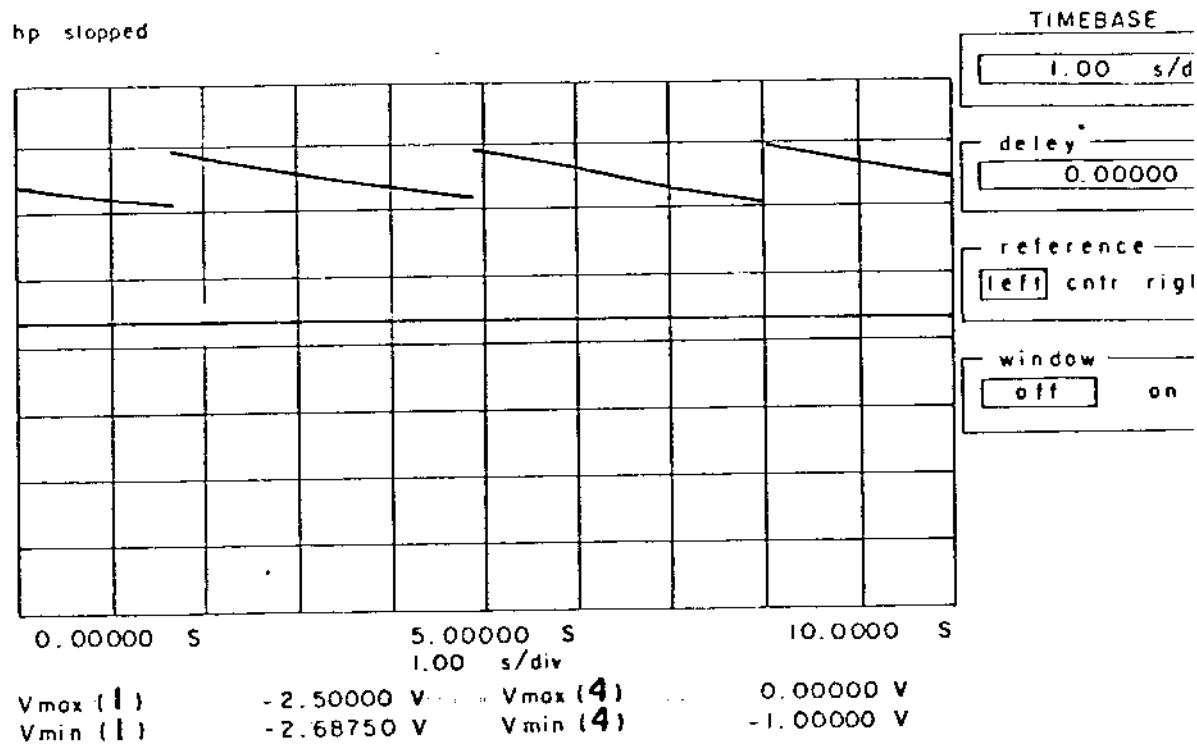
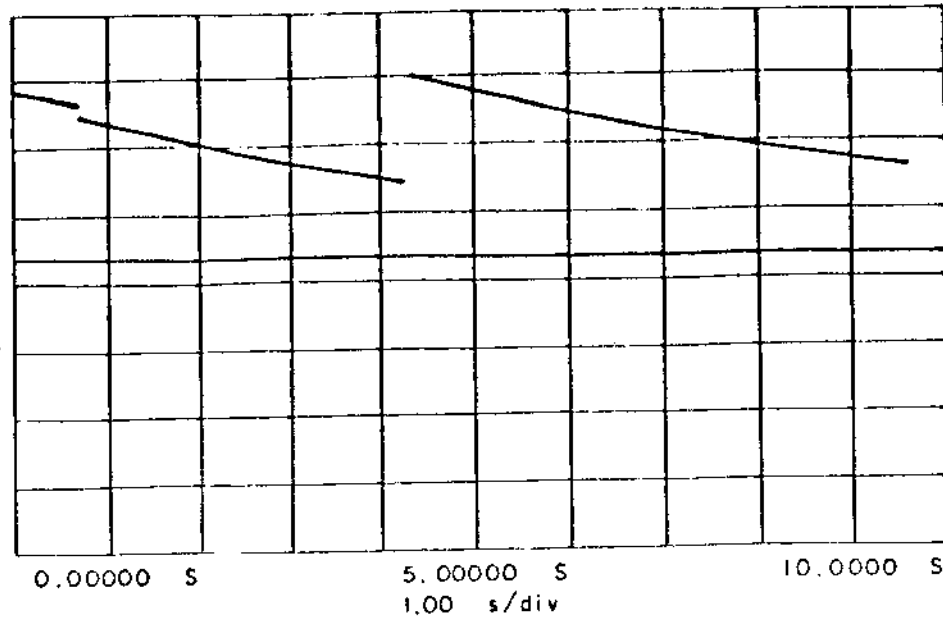


Figura 6.11: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M1 = 3.9922$ gr. e $t = 3.0$ s.).

hp triggered scroll



Vmax (1)	-2.56250 V	Vmax (4)	-31.250 mV
Vmin (1)	-2.71875 V	Vmin (4)	-1.59375 V

TIME BASE

1.00 s/div

delay

0.00000 s

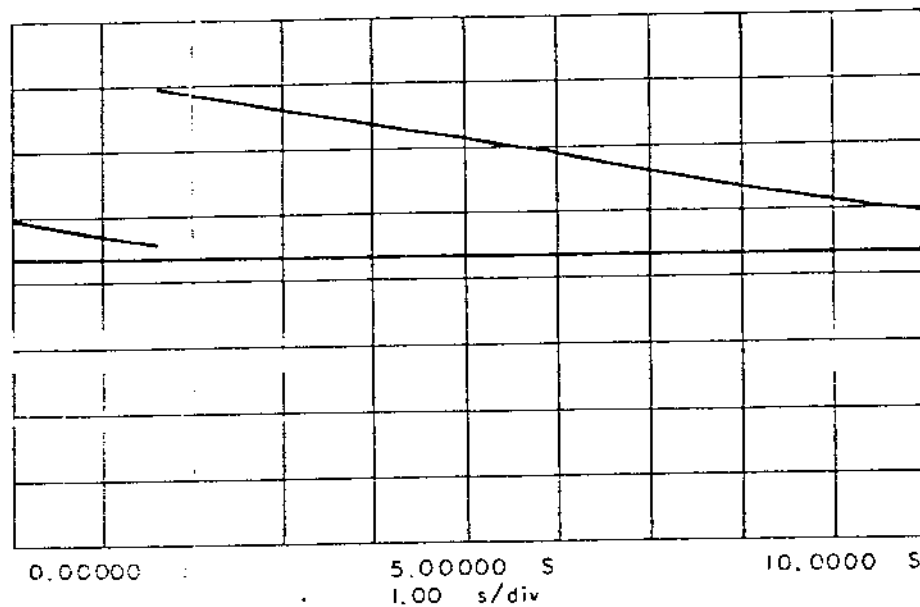
reference

left cntr right

Window

off on

Figura 6.12: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M2 = 6.1571$ gr. e $t = 3.0$ s.).



1 1.00 V/div
offset: -3.000 V
10.00 : 1 dc

4 1.00 V/div
offset: -3.000 V
10.00 : 1 dc

Vmax (1)	-2.56250 V	Vmax (4)	-62.500 mV
Vmin (1)	-2.68750 V	Vmin (4)	-2.40625 V

1 5 - 3.000 V

Figura 6.13: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M3 = 7.9617$ gr. e $t = 3.0$ s.).

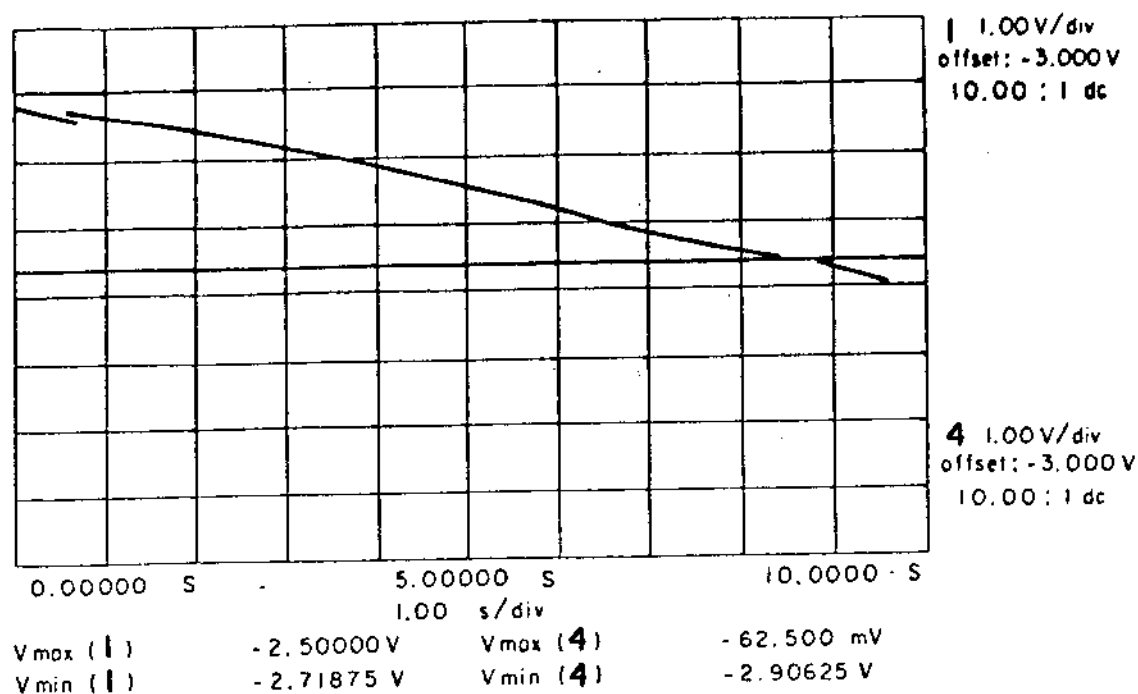


Figura 6.14: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M4 = 8.5629$ gr. e $t = 3.0$ s.).

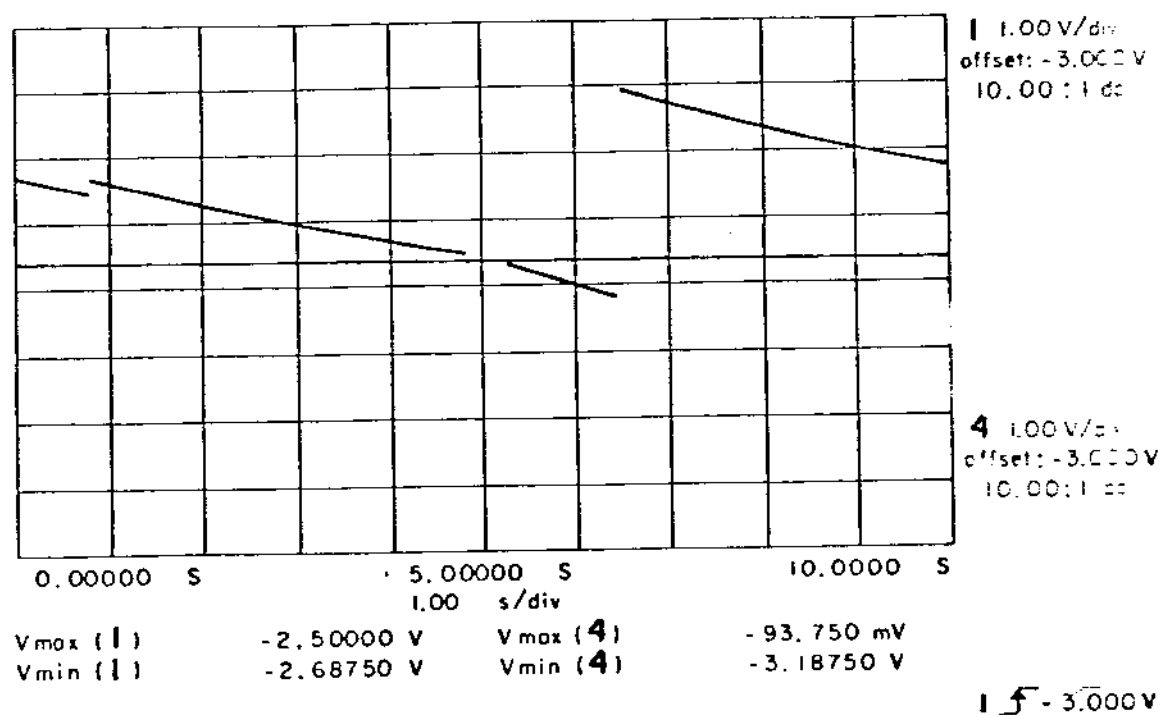


Figura 6.15: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M5 = 10.7347$ gr. e $t = 3.0$ s.).

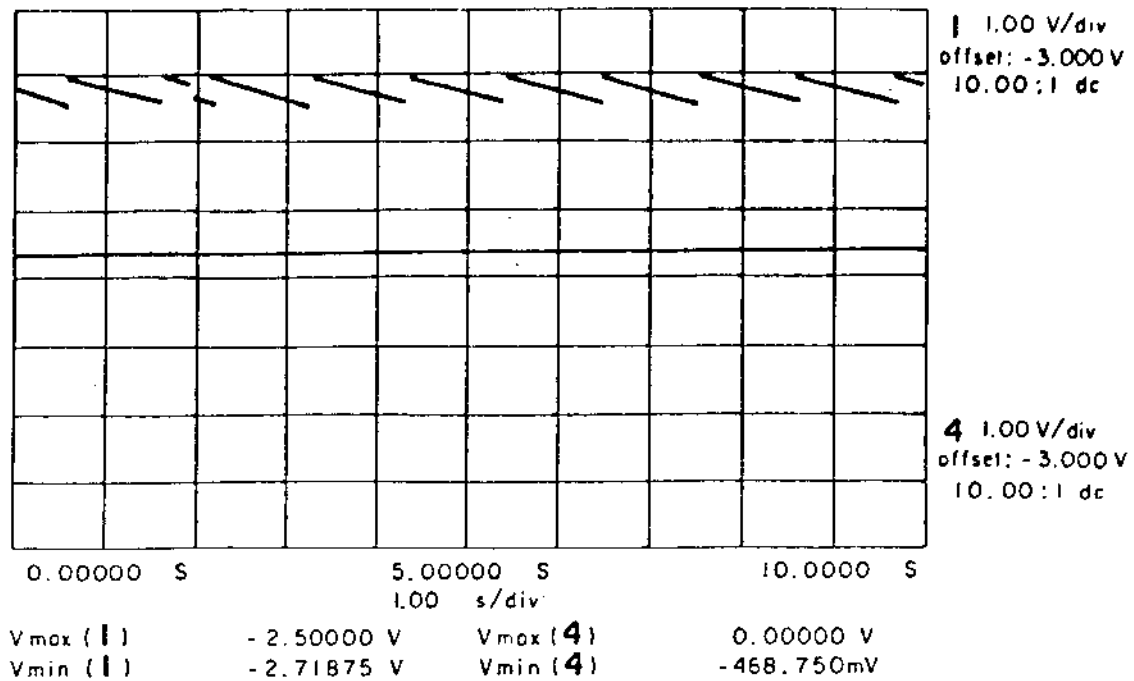


Figura 6.16: Nível de voltagem acumulada, sem desbalanceamento ($M0 = 0.0$ gr. e $t = 4.0$ s.).

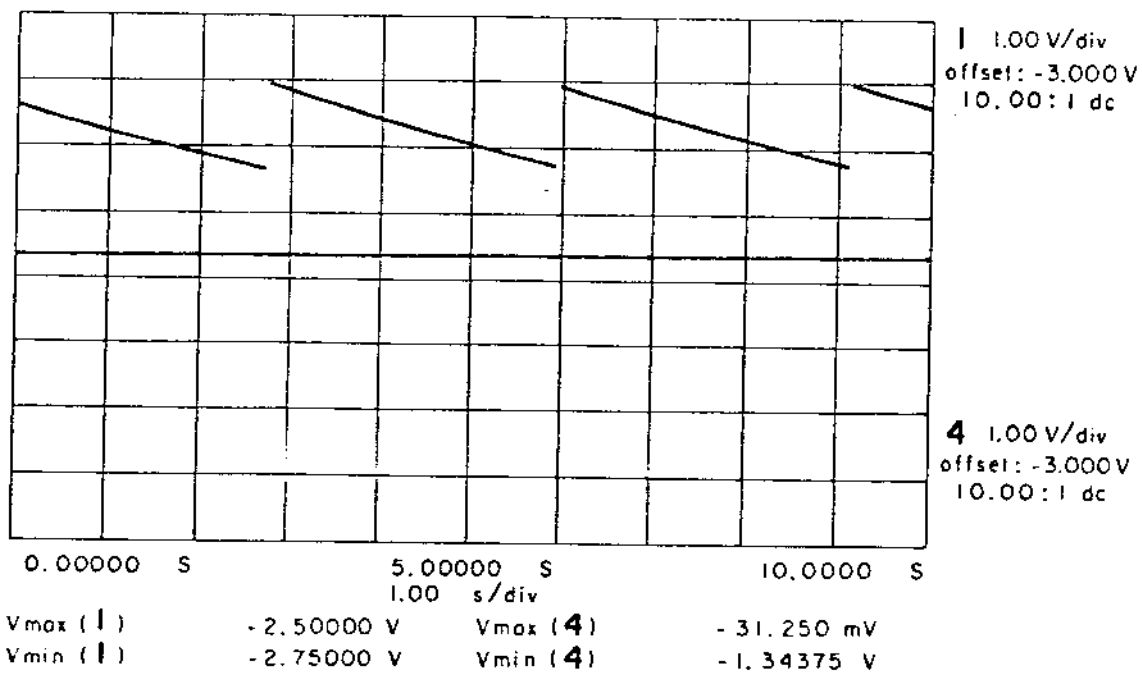


Figura 6.17: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M1 = 3.9922$ gr. e $t = 4.0$ s.).

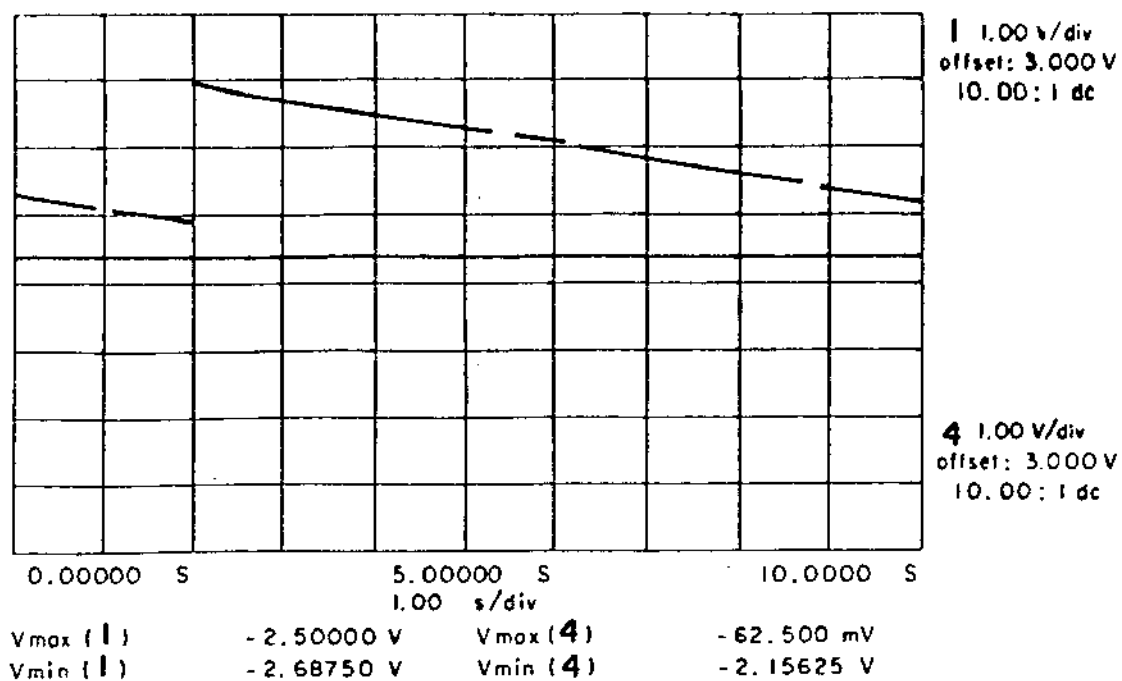


Figura 6.18: Nível de tensão acumulada, com desbalanceamento ($M2 = 6.1571$ gr. e $t = 4.0$ s.).

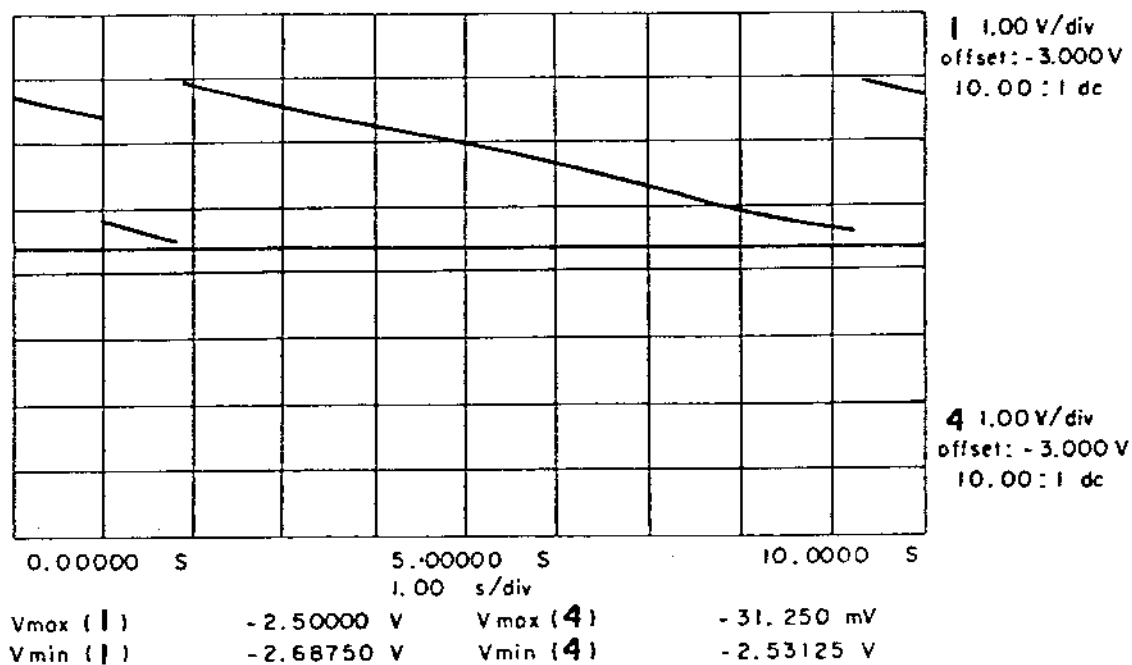


Figura 6.19: Nível de tensão acumulada, com desbalanceamento ($M3 = 7.9617$ gr. e $t = 4.0$ s.).

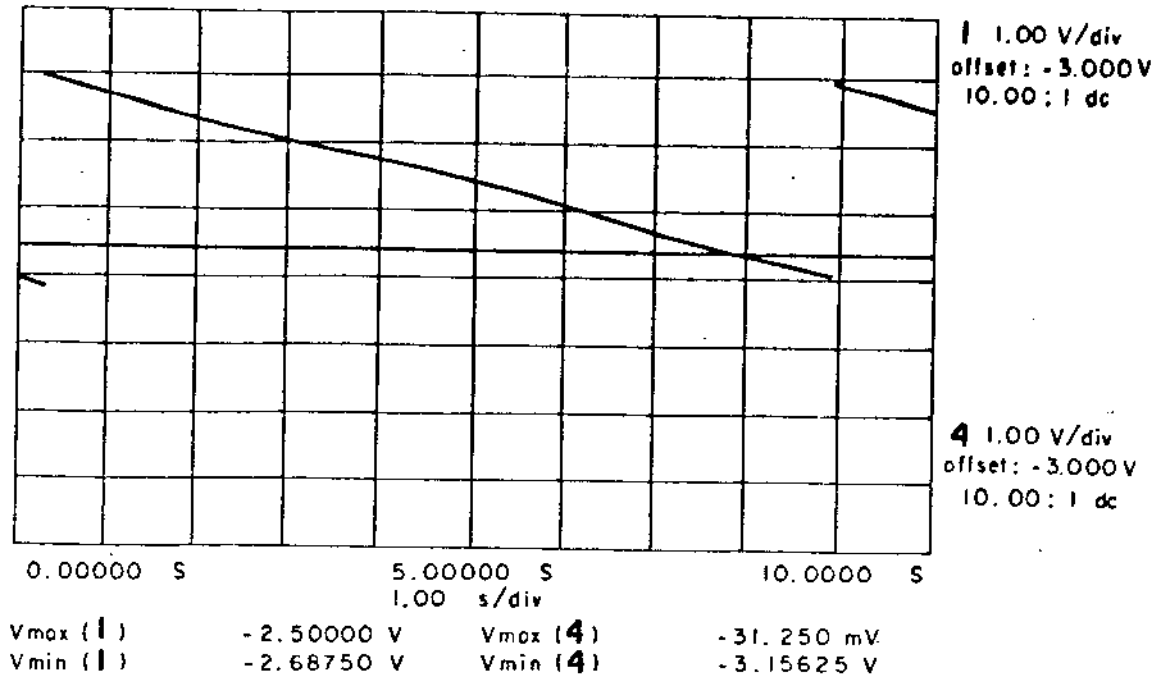


Figura 6.20: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M4 = 8.5629$ gr. e $t = 4.0$ s.).

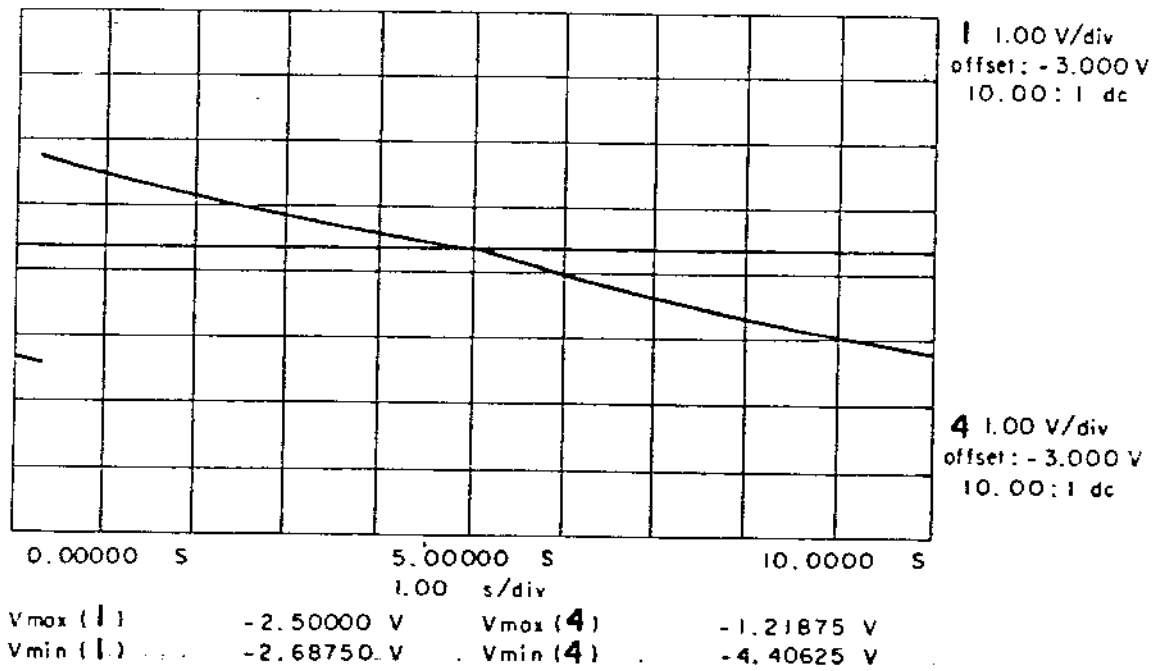


Figura 6.21: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M5 = 10.7347$ gr. e $t = 4.0$ s.).

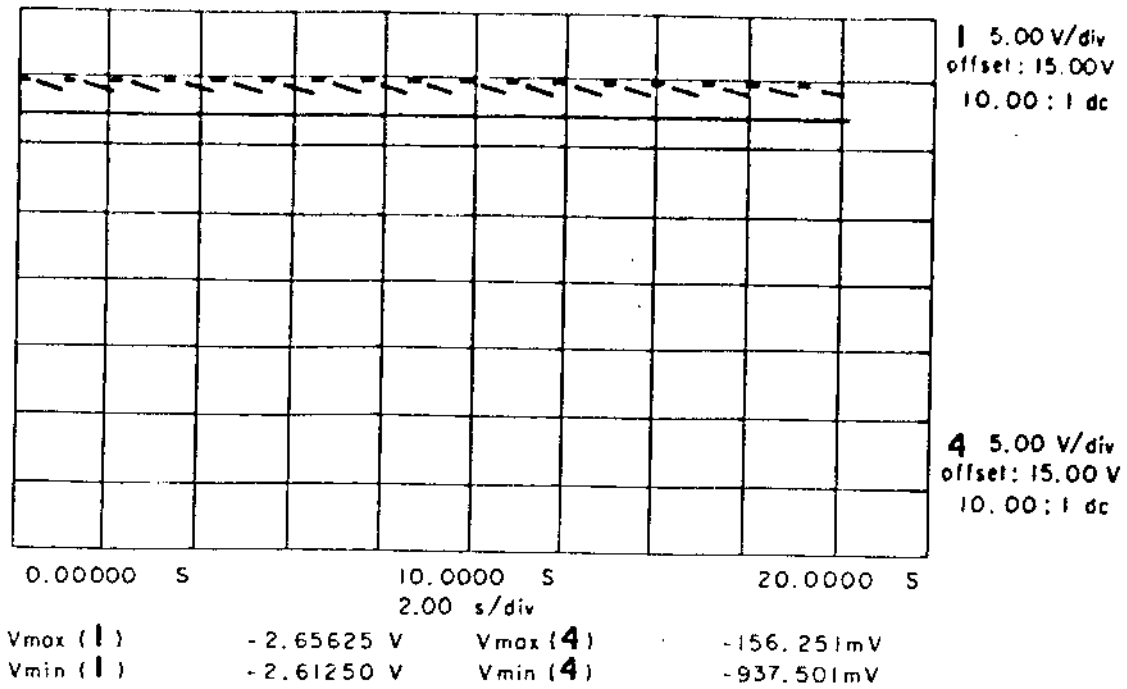


Figura 6.22: Nível de voltagem acumulada, sem desbalanceamento ($M0 = 0.0$ gr. e $t = 8.0$ s.).

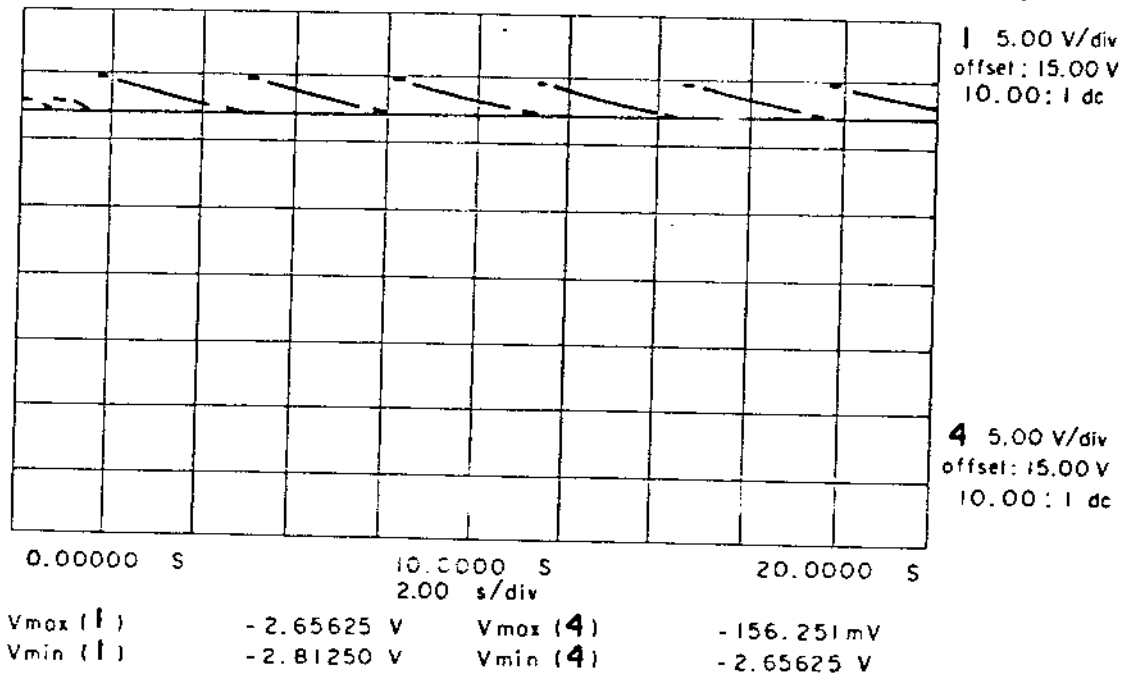


Figura 6.23: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M1 = 3.9922$ gr. e $t = 8.0$ s.).

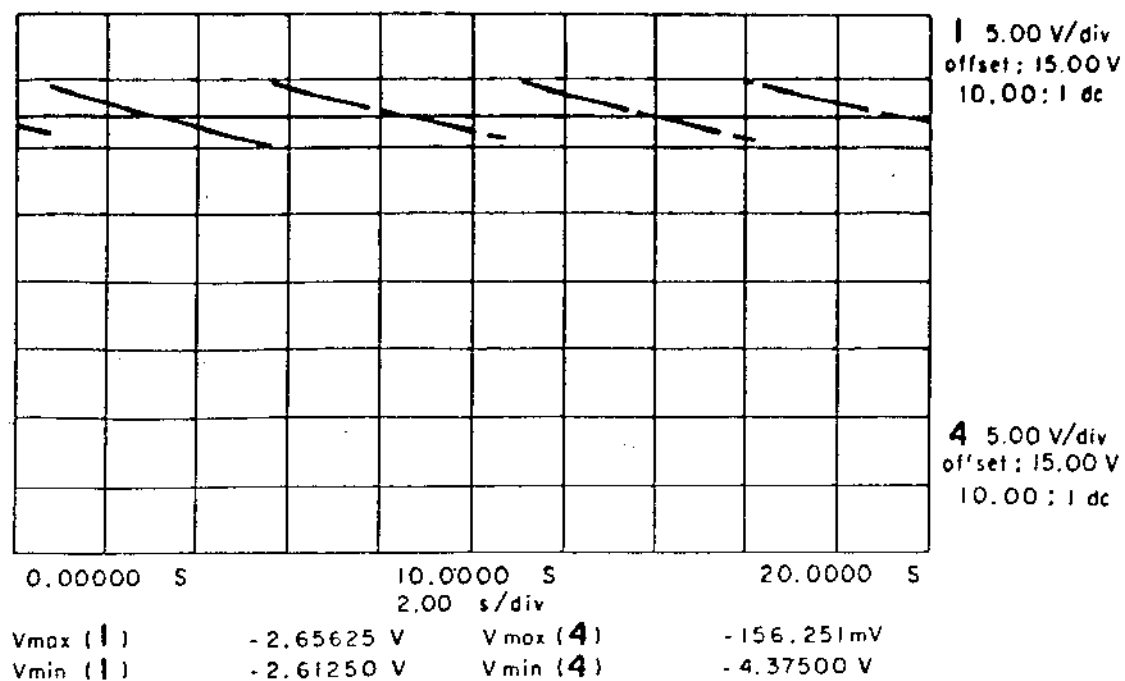


Figura 6.24: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M2 = 6.1571$ gr. e $t = 8.0$ s.).

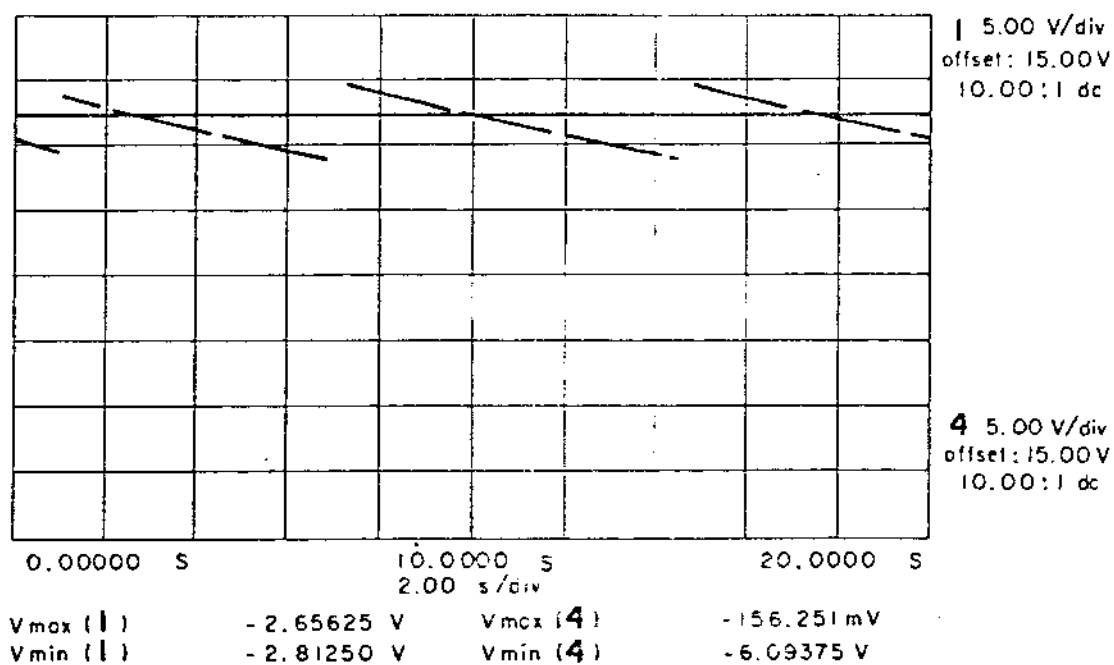


Figura 6.25: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M3 = 7.9617$ gr. e $t = 8.0$ s.).

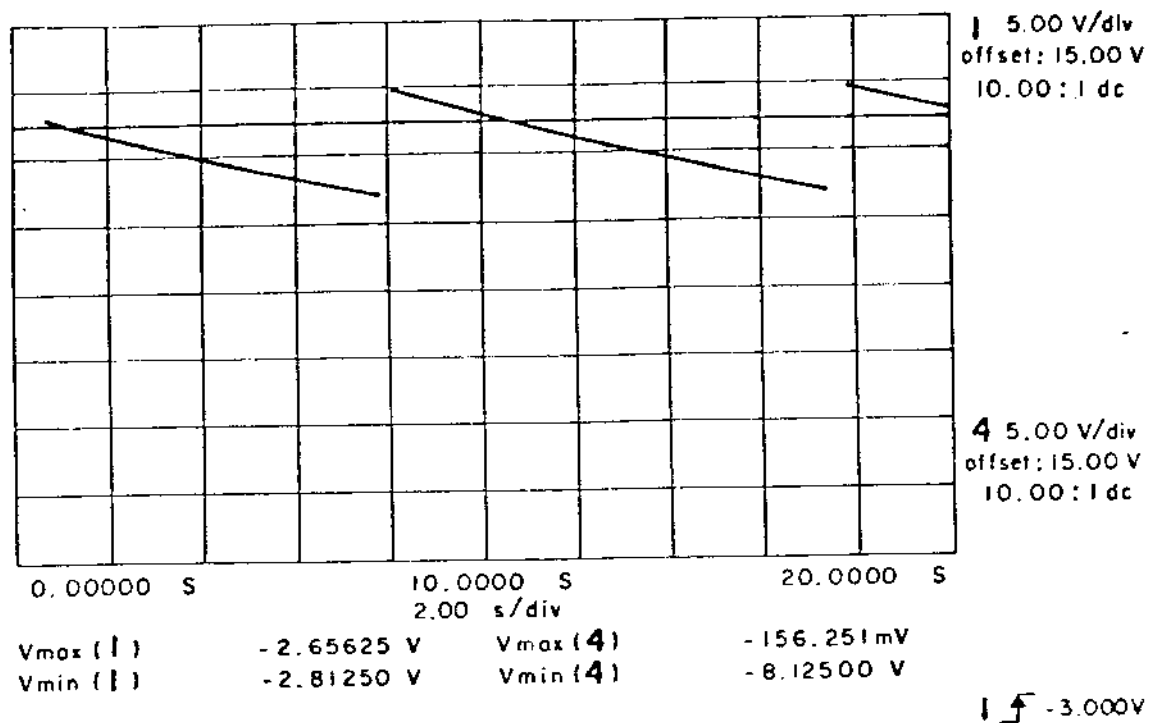


Figura 6.26: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M4 = 8.5629$ gr. e $t = 0$ s.).

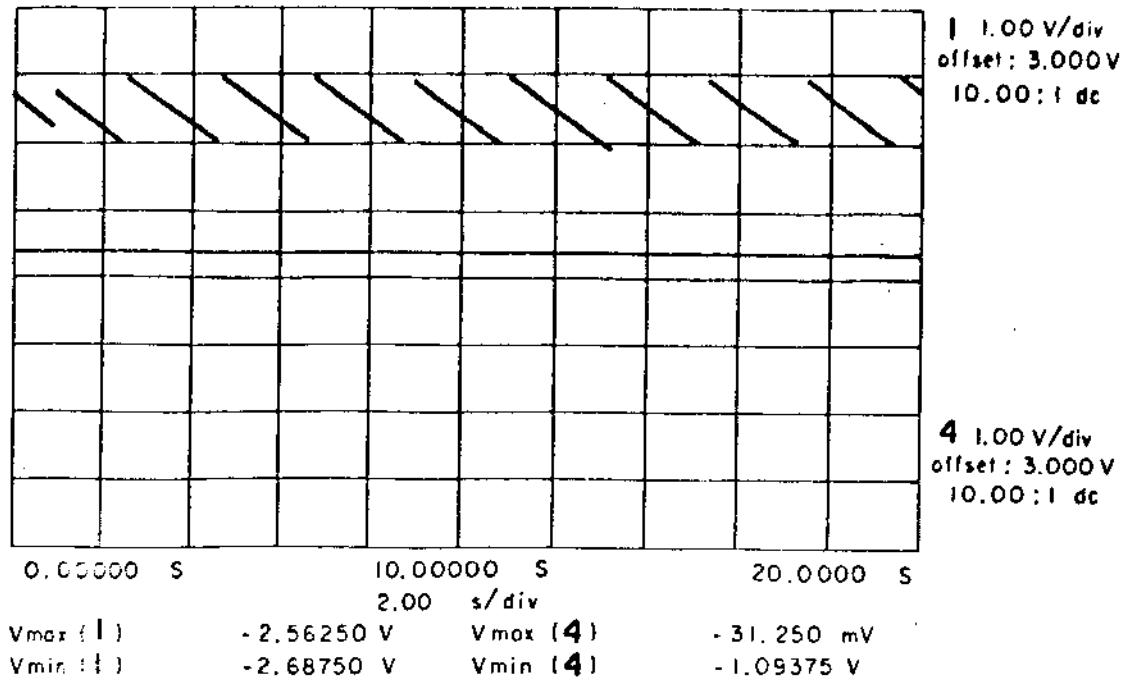


Figura 5.27: Nível de voltagem acumulada, sem desbalanceamento ($M0 = 0.0$ gr. e $t = 9.9$ s.).

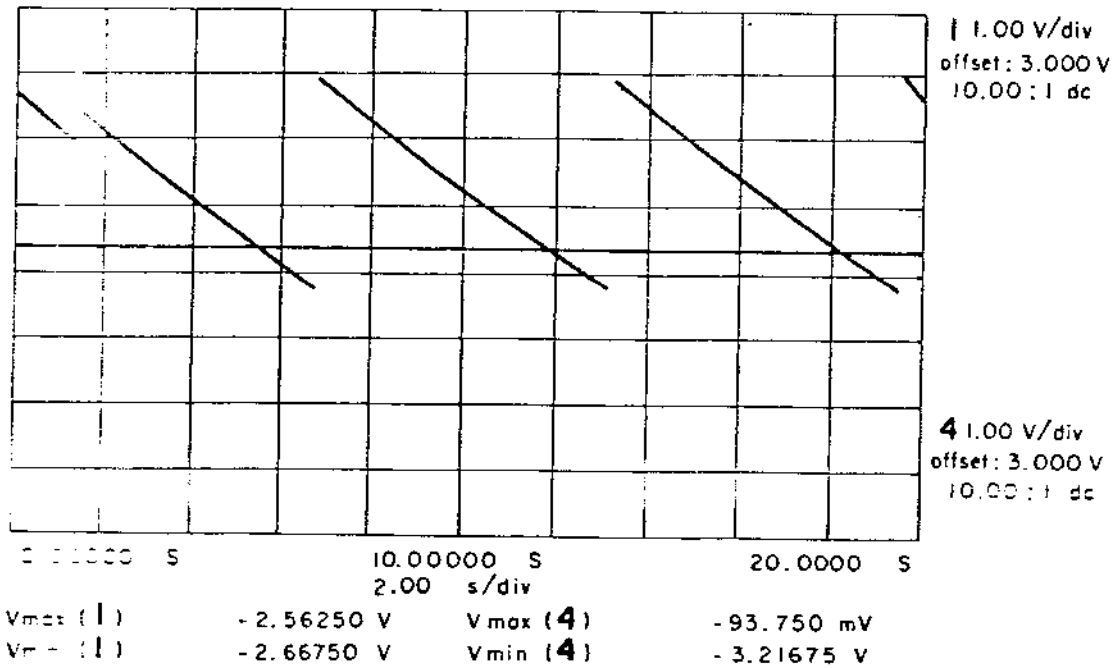


Figura 5.28: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M1 = 3.9922$ gr. e $t = 9.9$ s.).

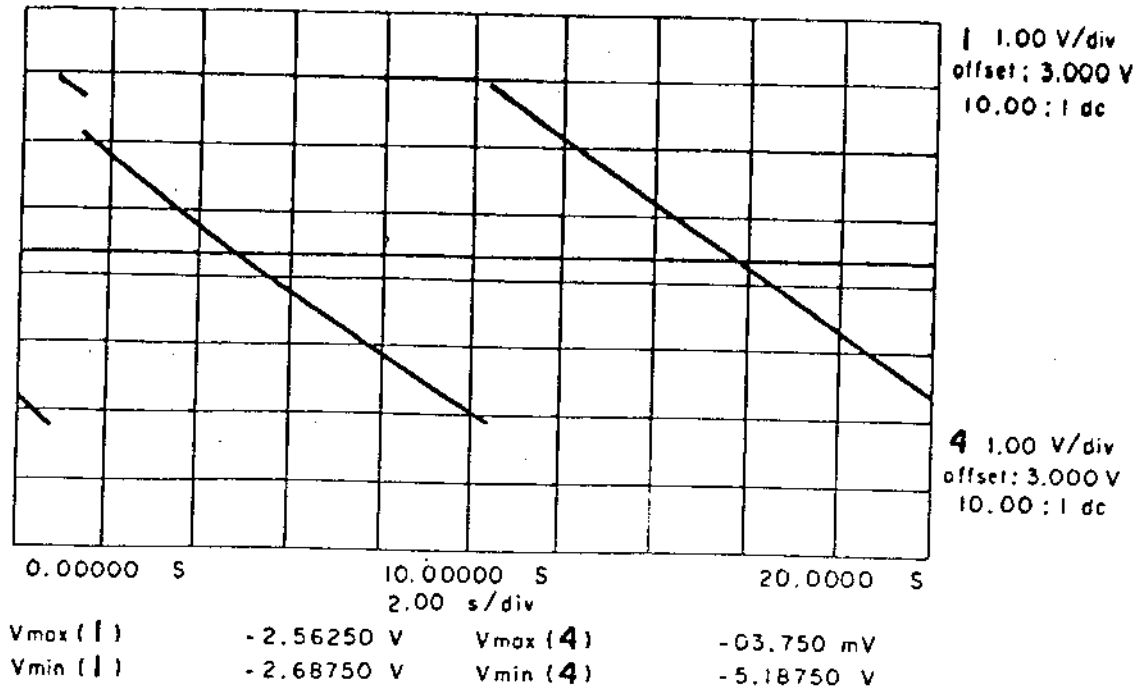


Figura 6.29: Nível de voltagem acumulada, com de- balanceamento (M2 = 6.1571 gr. e t = 9.9 s.).

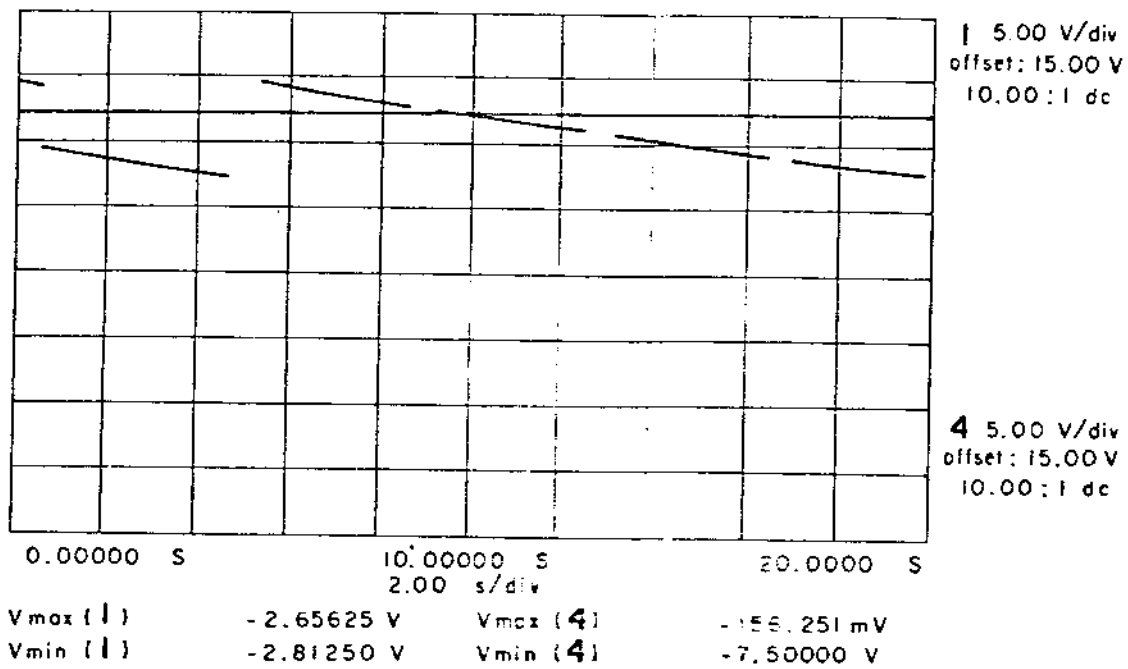


Figura 6.30: Nível de voltagem acumulada, com de- balanceamento (M3 = 7.9617 gr. e t = 9.9 s.).

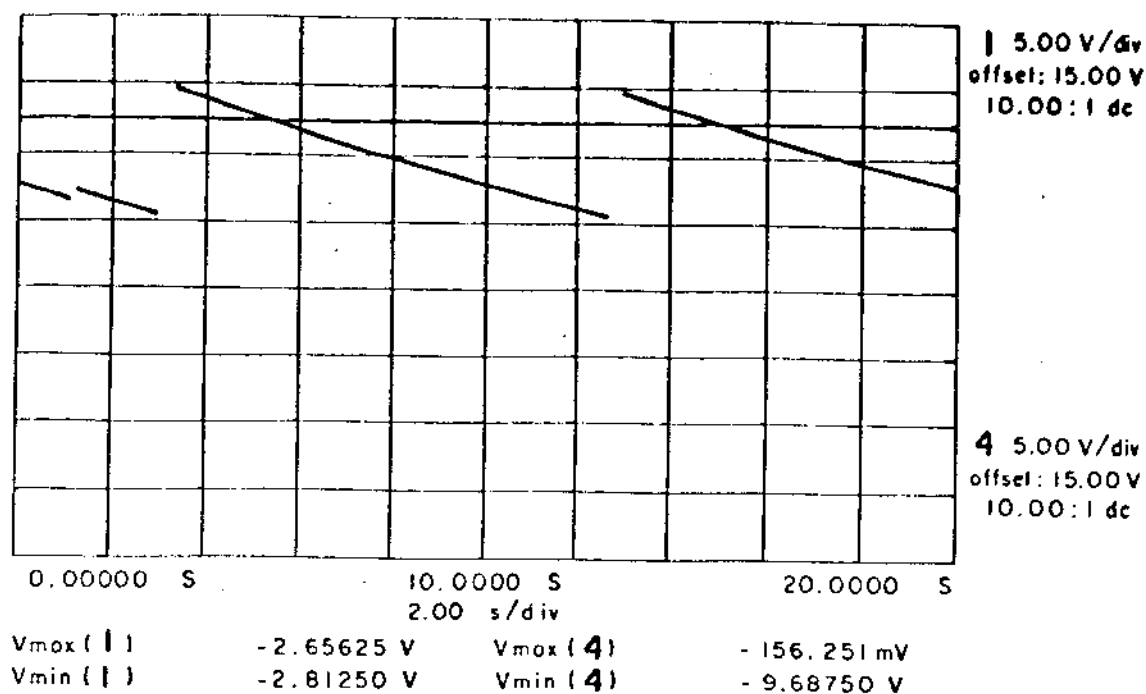


Figura 6.31: Nível de voltagem acumulada, com desbalanceamento ($M4 = 8.5629$ gr. e $t = 9.9$ s.).

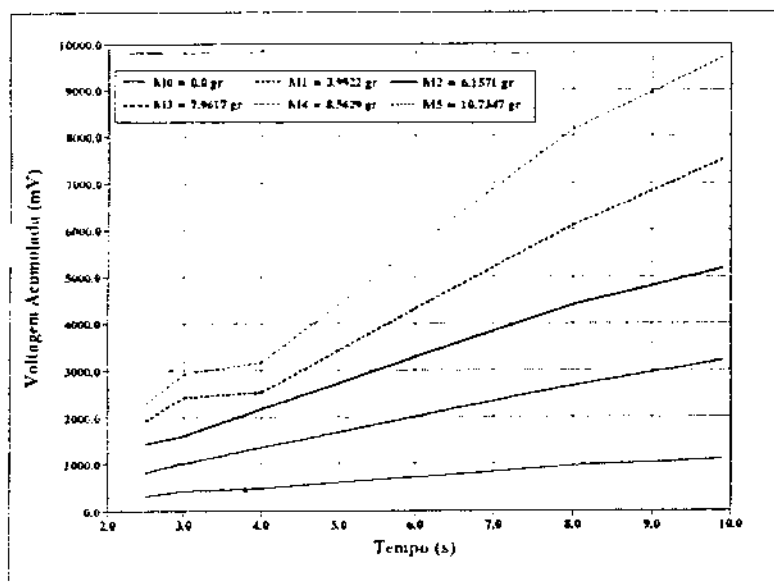


Figura 6.32: Comportamento da voltagem acumulada em função do tempo de acumulação de voltagem, para diversos valores dos contrapesos.

Tabela 6.5: Resultado do método da regressão aplicado aos dados da voltagem acumulada em função do tempo de acumulação, para diversos valores do contrapeso.

Massa (gr.)	Voltagem Acumulada - Vmin(4)					Y = b0 + b1 . X	
	Tempo (s)						
	2.5	3.0	4.0	8.0	9.9		
0.0	312.50	406.25	468.75	937.50	1093.75	b0	63.5149
						b1	105.8823
						R ²	0.99534
3.9922	812.50	1000.0	1343.75	2656.25	3218.75	b0	22.6370
						b1	325.4765
						R ²	0.99945
6.1571	1406.25	1593.75	2156.25	4375.0	5187.50	b0	68.3167
						b1	524.7141
						R ²	0.99825
7.9617	1906.25	2406.25	2531.25	6093.75	7500.0	b0	- 121.7668
						b1	768.114
						R ²	0.99054
7.929	2281.25	2906.25	3156.25	8125.0	9687.5	b0	- 440.562
						b1	1035.002
						R ²	0.98990
13.7347	2625.0	3187.50	4406.25	clipped	clipped	b0	- 368.3034
						b1	1191.964
						R ²	0.99962

Tabela 6.6: Resultado do método da regressão aplicado aos dados da voltagem acumulada em função da variação dos contrapesos, para diversos tempo (t) de acumulação.

Tempo (s)	Voltagem Acumulada - Vmin(4)						Y = b0 . e ^(b1.X)	
	Massa (gr.)							
	0.0	3.9922	6.1571	7.9617	8.5629	10.7347		
2.5	312.50	812.50	1406.25	1906.25	2281.25	2625.0	b0	346.2564
							b1	0.20766
							R ²	0.97451
3.0	406.25	1000.0	1593.75	2406.25	2906.25	3187.50	b0	437.5731
							b1	0.20392
							R ²	0.97524
4.0	468.75	1343.75	2156.25	2531.25	3156.25	4406.25	b0	527.038
							b1	0.20611
							R ²	0.98097
8.0	937.50	2656.25	4375.00	6093.75	8125.00	clipped	b0	959.3411
							b1	0.24361
							R ²	0.99523
9.9	1093.75	3218.75	5187.50	7500.00	9687.50	clipped	b0	1126.796
							b1	0.24720
							R ²	0.99618

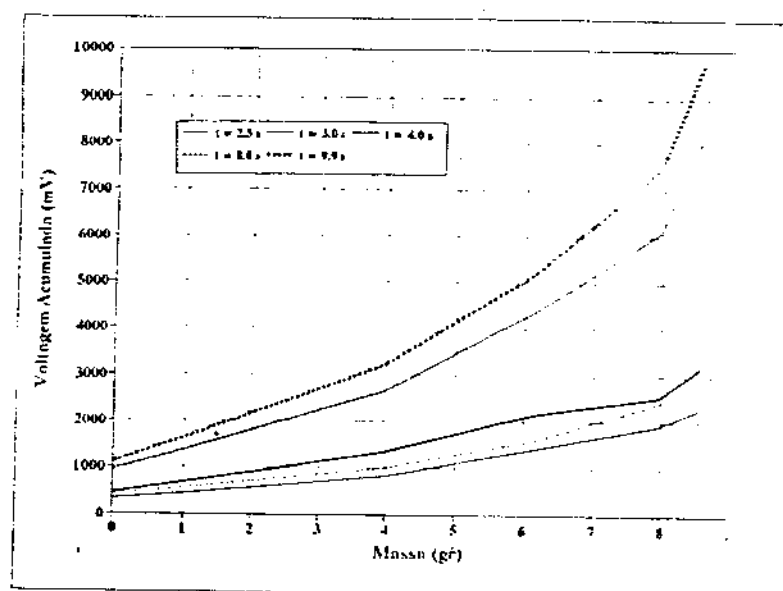


Figura 6.33: Comportamento da voltagem acumulada em função da variação da massa dos contrapesos (desbalanceamento), para diversos tempo (t) de acumulação.

Capítulo 7

Discussão dos resultados.

7.1 Metodologia de medida do fluxo de energia.

7.1.1 Aferição estática do Dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.

A Reta de Aferição Estática (Figura 5.1) e os resultados do método da regressão linear, revelam como principais características da aferição estática, a linearidade, a boa sensibilidade e a boa reprodução da onda de força, consequente da ótima linearidade da sua curva característica de força/deformação.

Os resultados obtidos, com o emprego do dinamômetro, levam a concluir que o mesmo permite medir, com precisão, pequenas amplitudes de força, devido à sua grande sensibilidade (16.0 mV/N), não deformando a onda de força por sua excelente linearidade de resposta, e medindo a verdadeira força transmitida à estrutura, sem distorção de fase, graças ao seu mínimo amortecimento.

A Figura 5.2 mostra que o erro relativo da força é inferior 1.5 % para leituras superior a 200.0 mV , e inferior a 5 % para leituras entre 50.0 mV a 200.0 mV , com 95% de confiança.

7.1.2 Aferição dinâmica do Dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.

A aferição dinâmica revela que o amortecimento é muito pequeno, demonstrando com isso que as forças medidas são resultado principalmente da deformação das vigas elásticas, que são os elementos sensíveis, onde estão colocados os extensômetros de resistência elétrica (Figura 4.8).

Como a relação entre a frequência máxima admitida e a frequência natural do dinamômetro ($w/w_n = 60/593 = 0.10$) é bem menor que a unidade e ainda, o fator de amortecimento é muito pequeno, o dinamômetro também pode ser utilizado para medidas das forças dinâmicas.

7.1.3 Características dinâmicas da Mesa Absorvedora de Vibração.

Através das Figuras 5.4 e 5.5 observa-se que a frequência natural da Mesa Absorvedora de Vibração está entre 57.0 a 60.0 Hz, e com o sistema dinâmico sobre a Mesa a frequência natural diminuiu para a faixa entre 52.0 a 55.0 Hz. Indicando portanto que o limite máximo de rotação do sistema dinâmico a ser testado não deve ultrapassar 45.0 Hz.

7.1.4 Valores medidos da força, aceleração e cálculo do fluxo de energia.

Verifica-se através da Curva do Espectro de Frequência da Mesa Absorvedora de Vibração (Figuras 5.4 e 5.5), que os picos de valores da força e da aceleração, na faixa de frequência de 50.0 a 55.0 Hz (Figuras 5.6 e 5.7), são consequência da frequência de ressonância.

Observa-se das Figuras 5.6 e 5.7, que na faixa de 35.0 a 38.0 Hz, os valores da força e da aceleração não sofrem interferência da frequência de ressonância da Mesa Absorvedora de Vibração, indicando portanto a melhor faixa de frequência para a obtenção dos valores calculado do fluxo de energia.

Verifica-se, ainda das Figuras 5.9 a 5.20, que a dispersão dos valores medidos da força e da aceleração são muito pequenos, comprovando a boa sensibilidade e a boa reprodução da onda de força do dinamômetro da Mesa Absorvedora de Vibração.

7.2 Metodologia de qualificação do sistema dinâmico.

7.2.1 Caracterização dinâmica do acelerômetro em PVDF.

O levantamento do espectro de frequência do acelerômetro em PVDF mostra que a sua frequência natural está próximo de 420.0 Hz. Observa-se, portanto da Figura 6.1 que a faixa de frequência adequada para se trabalhar com esse novo acelerômetro está entre 15.0 a 70.0 Hz. Observou-se, ainda que no levantamento do espectro de frequência nas direções

horizontais e transversais os valores do deslocamento eram constantes e muito pequeno (0.11 mV).

Os resultados estatísticos (Tabela 6.3) obtidos, utilizando-se o método da regressão linear nos valores da aferição dinâmica demonstram que, o acelerômetro em PVDF, na frequência de 35.0 Hz, tem uma resposta com ótima linearidade (Figura 6.2). O Erro Relativo cometido na leitura (mV) do acelerômetro em PVDF é superior a 4 % quando o valor da leitura for menor que 1.5 mV e, 4% a 1.7 % quando a leitura variar de 1.5 mV a 4.0 mV (Curva do Erro Relativo - Figura 6.3).

7.2.2 Qualificação do sistema dinâmico utilizando o acelerômetro em PVDF.

A análise da metodologia de qualificação do sistema dinâmico, é realizada objetivando verificar o comportamento do acelerômetro em PVDF, quanto a sua capacidade de armazenar voltagem e utilizá-la como parâmetro de referência para qualificação de sistemas dinâmicos.

Definiu-se como parâmetro referencial, quanto à normalidade de funcionamento do sistema dinâmico, quando o nível de voltagem acumulada (nível DC) pelo acelerômetro em PVDF era no máximo 2.5 V. O nível de acumulação pode ser variado de 0.0 a 9.0 V e seu ajuste é feito através do *tripot*.

Escolheu-se a frequência de 36.5 Hz, para análise do sistema dinâmico, pois este valor representa o valor médio da faixa de frequência (35.0 Hz a 38.0 Hz) fora da frequência natural da Mesa Absorvedora de Vibração.

Analizou-se o comportamento do acelerômetro em PVDF fixando-o à na parte central placa superior da Mesa Absorvedora de Vibração (Figura 4.20). Os sinais elétricos emitidos pela películas piezoelétricas de PVDF, foram processados pelo circuito eletrônico e enviados ao canal 4 do osciloscópio na forma de voltagem acumulada - V_{min} (4). O canal 1 do osciloscópio registrou o valor do nível de comparação DC - V_{max} (1).

De acordo com as Figuras 6.4 a 6.31 o comportamento do nível de voltagem acumulada, em relação ao nível DC, para um dado tempo (t), pode ser resumido em 3 (três) diferentes situações (Figura 7.1), onde:

- Δe_0 representa o valor do nível DC de referência (valor prefixado - $V_{max}(1)$);
- Δe_i é o valor inicial da voltagem acumulada;

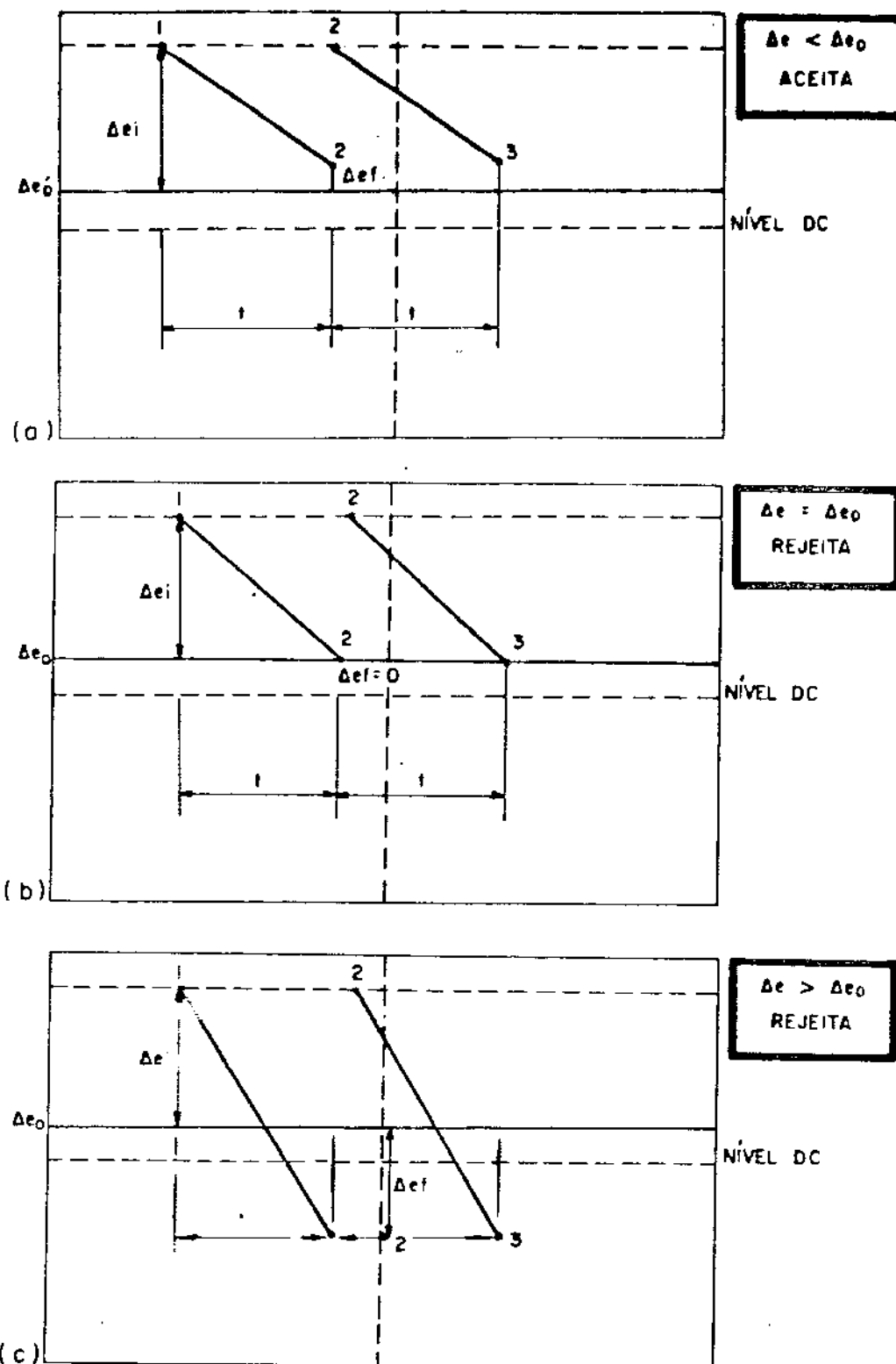


Figura 7.1: Figura esquemática das 3 situações registrada pelo osciloscópio quando da medida da voltagem acumulada.

- $\Delta\epsilon_f$ é o valor final da voltagem acumulada;
- $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_f - \Delta\epsilon_i =$ representa a voltagem acumulada (reta 1-2) para um dado tempo (t).

Observa-se da Figura 7.1 que:

- (a) nessa situação a reta 1-2 não alcança a reta do nível DC, ou seja, o nível da voltagem acumulada é menor que o nível de referência ($\Delta\epsilon < \Delta\epsilon_o$ ou $V_{min}(4) < V_{max}(1)$). O sistema dinâmico em teste é **aceito**;
- (b) a reta 1-2 alcança a reta do nível DC, mas não a ultrapassa, significando que nível de voltagem acumulada é igual ao nível referencial ($\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_o$ ou $V_{min}(4) = V_{max}(1)$). O sistema dinâmico em teste é **rejeitado**;
- (c) a reta 1-2 ultrapassa a reta do nível DC, ou seja, o nível de voltagem acumulada é maior que nível de referência DC ($\Delta\epsilon > \Delta\epsilon_o$ ou $V_{min}(4) > V_{max}(1)$). Sistema dinâmico em teste é **rejeitado**.

Verifica-se, assim, que na nova metodologia desenvolvida, é possível também realizar a qualificação de sistemas dinâmicos através de um osciloscópio digital.

A inovação principal, porém, da nova metodologia de qualificação é a sua forma direta, rápida e precisa. Nos casos apresentados pelas Figuras 6.4 a 6.31 o acelerômetro em PVDF atua da seguinte forma, quando o nível de voltagem acumulada é igual ou maior que o nível de referência DC (Figuras 7.1, b e c), um indicador luminoso acende (*Led* vermelho), indicando que o sistema dinâmico em teste não é aceito. Caso o nível da voltagem acumulada é menor que o nível de referência (Figura 7.1, a), somente o *Led* verde permanece aceso, indicando que o sistema dinâmico em teste é aceito. O *Led* vermelho fica aceso a partir do momento em que o nível de voltagem é igual ao nível DC (reta 1-2 toca a reta do nível DC (Figuras 7.1, b e c) até esgotar o tempo de acumulação (t).

Verifica-se da Tabelas 6.5 que, quando foi aplicado o método da regressão aos dados que relacionam o nível de voltagem acumulada em função do tempo de acumulação, resulta uma função linear, com coeficiente de determinação R^2 igual a 0.99. Aplicando-se o método aos dados da Tabela 6.6, que relacionam o nível de voltagem acumulada em função da variação da massa dos contrapesos, resulta uma função exponencial, com coeficiente de determinação R^2 entre 0.97 a 0.99. Verifica-se, assim, que a capacidade de acumulação de voltagem pelo acelerômetro em PVDF é uniforme em relação ao nível de desbalanceamento do sistema dinâmico e ao tempo de acumulação.

Analisando-se a Figura 6.32, que relaciona o nível de voltagem acumulada em função do tempo de acumulação, para cada valor da massa do contrapeso, verifica-se 3 (três) situações:

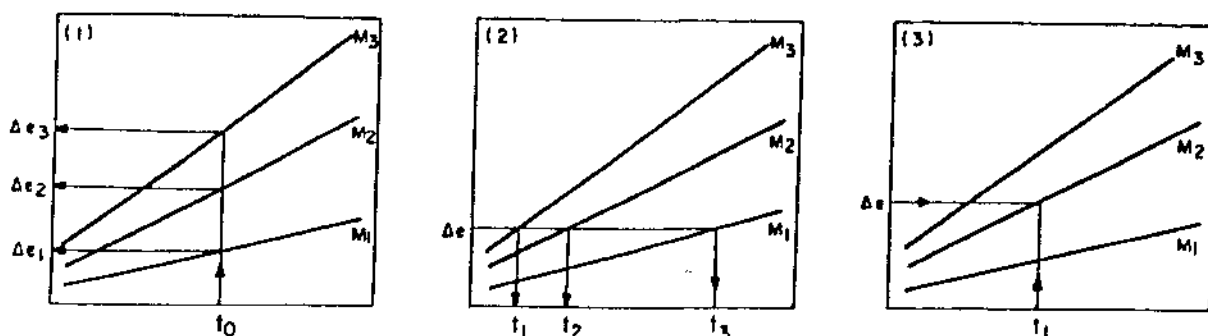


Figura 7.2: Figura esquemática de 3 (três) aplicações da Figura 6.32.

- (1) conhecendo-se o tempo de acumulação, obtém-se o valor preciso de voltagem acumulada para cada contrapeso (Figura 7.2, a);
- (2) conhecendo-se a voltagem acumulada ($\Delta \epsilon$), obtém-se o valor preciso do tempo de acumulação de voltagem, para cada valor do contrapeso (Figura 7.2, b);
- (3) definindo-se os valores limites do nível de acumulação de voltagem ($\Delta \epsilon$) e o tempo de acumulação, obtém-se o valor da massa do contrapeso que causa um desbalanceamento no sistema dinâmico acima do prefixado (Figura 7.2, c).

A Figura 6.33 que relaciona o nível de voltagem acumulada em função da massa do contrapeso, para cada tempo de acumulação, permite também 3 (três) interpretações:

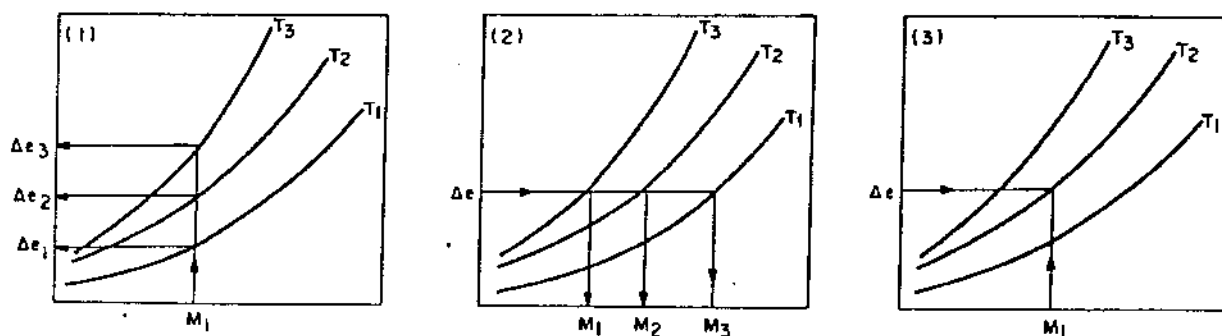


Figura 7.3: Figura esquemática de 3 (três) aplicações da Figura 6.33.

- (1) nesse caso, conhecendo-se o valor da massa do contrapeso, obtém-se o valor preciso do nível de voltagem acumulada, para cada tempo de acumulação (Figura 7.3, a);

- (2) conhecendo-se o valor de voltagem acumulada, obtém-se o valor da massa do contrapeso para cada tempo de acumulação (Figura 7.3, b);
- (3) conhecendo-se o valor de voltagem acumulada e da massa do contrapeso, obtém-se o tempo máximo de acumulação a partir de quando o nível da voltagem acumulada ultrapassa o limite préestabelecido (Figura 7.3, c).

Deste modo, para as condições utilizadas no desenvolvimento da nova metodologia de qualificação do sistema dinâmico, é possível obter-se os valores precisos do tempo (t) de acumulação e do nível de referência DC, para um dado limite máximo de desbalanceamento do sistema dinâmico para a calibração do acelerômetro em PVDF.

Capítulo 8

Conclusões.

Em vista do conjunto de resultados obtidos na metodologia desenvolvida pode-se concluir que:

- As lâminas piezoelétricas de *Polyvinylidene Fluoride* apresentam uma grande sensibilidade a pequenas deformações.
- Em razão da frequência de ressonância da Mesa Absorvedora de Vibração situar-se entre 55.0 a 60.0 Hz e do acelerômetro em PVDF ao redor de 70.0, o sistema desenvolvido é adequado para analisar sistemas dinâmicos que possam ser avaliados à rotação máxima de 40.0 Hz.
- Com a utilização do mercúrio como massa vibrante, as dimensões do acelerômetro bastante reduzidas. O atrito viscoso do mercúrio reduziu a sensibilidade a altas frequências.
- A metodologia desenvolvida para a qualificação de sistemas dinâmicos, através do acelerômetro em PVDF, resultou precisa, rápida, de baixo custo, de fácil uso e calibração. Essas características fazem-na indicada para linhas de controle de qualidade, em fábricas com produtos que em funcionamento geram um dado nível de vibração.
- A metodologia é aplicável a diferentes equipamentos através de uma simples calibração do tempo de acumulação (temporizador), e do nível de referência DC (temporizador).
- Para a sua utilização não necessita instrumentação (sistema de aquisição de dados, condicionadores de sinais, transdutores, etc), ambientes especiais (salas anecoicas, mesas inerciais, etc.).
- Suas características fazem-na indicada para controle preditivo de equipamentos.

- As duas metodologias, medida do fluxo de energia e do acelerômetro em PVDF, apresentaram uma *banda* de frequência de análise do sistema dinâmico, muito restrita. Necessitando, portanto, tanto a Mesa Absorvedora de Vibração como o acelerômetro em PVDF, um aperfeiçoamento a esse respeito.

Capítulo 9

Sugestões para trabalhos futuros.

- Desenvolver um acelerômetro em PVDF compacto (acelerômetro + circuito eletrônico + alimentador) embutidos usando *chips*, alimentado por minipilhas e com mostrador analógico do nível de voltagem acumulada;
- Levantamento de dados para alguns equipamentos, principalmente bombas centrífugas, compressores, eletrodomésticos, para compor um banco de dados;
- Desenvolver um acelerômetro em PVDF e uma Mesa Absorvedora de Vibração com alta frequência de ressonância, que permitam qualificar sistemas dinâmicos analisando larga faixa de frequências.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ARAUJO, SIDNEI *Dinamômetro para medidas de forças no torneamento*. - Publicação CT - n.5, 139p.,1975.
- [2] BACHMANN, M. A ;GORDON, W. L.; KOENIG, J. L. & LANDO, J. B. *A Infrared Stud of Phase-III Polyvinylidene Fluoride*. Journal Applied Physics, 50(10), 6106-6112, 1979.
- [3] BAMJI, S. S.; KAO, K. J. & PERLMAN, M. M. *Piezoelectricity and Pyroelectricity of Polyvinylidene Fluoride Corona - Poled at Elevated Temperature*. Journal of Polymer Science Physics Edition, Vol. 18, 945 - 1953, 1980.
- [4] BAMJI, S.S.& PERLMAN, M.M. *Piezoelectricity of Uniaxially Stretched Polyvinylidene Fluoride Corona of Poled at Elevated Temperature*. Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition, Vol. 19, 136 - 1369, 1981.
- [5] BAUER, F. *PVDF Polymers: Ferroelectric Polarization and Piezoelectric Properties Under Dynamic Pressure and Shock Wave Action*. Ferroelectrics, 49, 231 - 240. 1983.
- [6] BERGMAN Jr., J. G.; McFEE, J.H. & CRANE, G.R. *Piezoelectricit and Optical Second Harmonic Generation in Polyvinylidene Fluoride Films*. Applied Physics Letters, 18(5), 293 - 205, 1971.
- [7] BLEVIN, W. R. *Poling Rates for Films of Polyvinylidene Fluoride*. Applied Physics Letters. 31(1), 06 - 08, 1977.
- [8] BROADHURST, M.G.; DAVIS, G. T. & McKINNE. J. E. *Piezoelectricity and Pyroelectricity in Polyvinylidene Fluoride - A model*. Journal Applied Physics, 49(10), 4992 - 4997. 1978.
- [9] BROADHURST, M.G.; & DAVIS, G.T. *Physical Basis for Piezoelectricit in PVDF*. Ferroelectrics, 60, 03 - 13, 1984.
- [10] BROCK, M. *Mechanical Energy Flow Measurements on Automobiles. A Measuring Technique for Development and Production Control*. XXI Fisita Congress, Torino, 07-11/maio/1990, 849-854.

- [11] CADY, W.G. *Piezoelectricity*. Vol. I. Dover Publication, Inc. New York, 405 p., 1962.
- [12] DAS-GUPTA, D.K. & DOUGHTY, K. *Piezo and Pyroelectric Behaviour of Corona-Charged Polyvinylidene Fluoride*. Journal Physics D: Applied Physics, 11, 2415 - 2423, 1978.
- [13] DAS-GUPTA, D. K. & DOUGHTY, K. *Corona Charging and the Piezoelectric Effect in Polyvinylidene Fluoride*. Journal Applied Physics, 49(8), 4 601 - 4 603, 1978.
- [14] DAVIS, G.T; McKINNEY, J. E., BROADHURST, M. G. & ROTH, S. C. *Electric-field-induced Phase Changes in Polyvinylidene Fluoride*. Journal Applied Physics, 49(10), 4 998 - 5002, 1978.
- [15] DAY, G.W.; HAMILTON, C.; PETERSON, R.L.; PHELA Jr, R.J. & MULLEN, L.O. *Poling Conditions of Responsivity and Uniformity of Polarization of PVF₂ Pyroelectric detectors*. Applied Physics Letters, 24(10), 458 - 458, 1974.
- [16] DEN HARTOG, J. P. *Vibrações nos Sistemas Mecânicos*. Editora Edgar Blucher Ltda, São Paulo, 267 p, 1972.
- [17] FUKADA, E. & FURUKAWA, T. *Piezoelectricity and Ferroelectricity in Polyvinyliden Fluoride*. Ultrasonics, 19, 31 - 39, 1981.
- [18] FURUKAWA, T. & SEO, N. *Electrostriction as the Origin of Piezoelectricity in Ferroelectric Polymers*. Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 29, N.4, April, 675- 680, 1990.
- [19] GALLEG0-JUAREZ, J.A. *Piezoelectric Ceramics and Ultrasonics Transducers*. Journal Physics E.: Sci. Instrum., 22, 804 - 816, 1989.
- [20] GOBEL, E. F. *Rubber Springs Design*. John Wiley & Sons. 211 p, 1974.
- [21] IKEDA, T. *Fundamental of Piezoelectricity*. Oxford University Press, Tokyo, 263 p., 1990.
- [22] KAWAI, H. *The Piezoelectricity of Polyvinylidene Fluoride*. Japanese Journal Applied Physics, 975 - 976, 1969.
- [23] KEPLER, R. G. & ANDERSON, R. A. *Ferroelectricit in Polyvinylidene Fluoride*. Journal Applied Physics, 49(3), 1978.
- [24] LEAVER, P.; CUNNINGHAM, M. J. & JONES, B. E. *Piezoelectric Polymer Pressure Sensors*. Conference Capteurs 86. 45 - 50, 1986.
- [25] LEME, R. A. S. *Curso de Estatística - Elementos*. Ao Livro Técnico S.A. Rio de Janeiro. 292 p., 1965.
- [26] LINVILL, J. G. *PVF₂ Models, Measurements and Devices*. Ferroelectrics, 28, 291 - 296, 1980.

- [27] LOVINGER, A. J. *Unit Cell of the γ Phase of Polyvinylidene Fluoride*. *Macromolecules*, 14, 321 - 325, 1981.
- [28] MASON, W.P. *Piezoelectricity, its History and Application*. *Journal Acoust. Soc. Am.*, 70(6), 1561-1566, 1981.
- [29] MIZUTANI, T.; YAMADA, T. & IEDA M. *Thermally Stimulated Currents in Polyvinylidene Fluoride: I. Unstretched α -form PVDF*. *Journal Physics. D: Applied Physics*, 14, 1139 - 1147, 1981.
- [30] MURAYAMA, N.; NAKAMURA, K.; SEGAWA, M. & OBARA, H. *The Strong Piezoelectricity in Polyvinylidene Fluoride (PVDF)*. *Ultrasonics*, 14, 15 - 23, 1976.
- [31] NAKAGAWA, K. & ISHIDA, Y. *Annealing Effects in Polyvinylidene Fluoride as Revealed by Specific Volume Measurements, Differential Scanning Calorimetry, and Electron Microscopy*. *Journal Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 11, 2153 - 2171, 1973.
- [32] NAKAMURA, K. & WADA, Y. *Piezoelectricity, Pyroelectricity, and the Electrostriction Constant of Polyvinylidene Fluoride*. *Journal of Polymer Science: Part A-2*, 9, 161-173, 1971.
- [33] NEWMAN, B. A.; YOON, C. H.; PAE, K. D. & SCHEINBEIM, J. I. *Piezoelectric Activity and Field-Induced Crystal Structure Transitions in Poled Polyvinylidene Fluoride Films*. *Journal Applied Physics*, 50(10), 6 095 - 6 100, 1979.
- [34] NOISEUX, D.U. *Measurement of Power Flow in Uniform Beams and Plates*. *JASA*, V.47(1), Número 1 (parte 2), 238 - 247, 1970.
- [35] OSAKI, S. & KOTAKA, T. *Electrical Properties of Form II Polyvinylidene Fluoride*. *Ferroelectric*, 32, 1 - 11, 1981.
- [36] PAVIC, G. *Measurement of Structure Borne Wave Intensity. Part 1: Formulation of the Methods*. *Journal of Sound and Vibration*, 49(2), 221-230, 1976.
- [37] PFISTER, G.; ABKOWITZ, M. & CRYSTAL, G. *Pyroelectricity in Polyvinylidene Fluoride*. *Journal of Applied Physics*, 44(5), 2064 - 2071, 1973.
- [38] PLAZA, J. *Contribuição ao Estudo da Rigidez Dinâmica de um Torno Mecânico*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos/USP. 230p, 1972.
- [39] PREST, W. M. Jr. & LUCA, D. J. *The Morphology and Thermal Response of High-Temperature-Crystallized Polyvinylidene Fluoride*. *Journal of Applied Physics*, 46(10), 4134 - 4143, 1975.

- [40] PUST, L. *Energy Flow in the Vibration System*. Proceeding of the Sixth World Congress on Theory of Machines Mechanisms, 580 - 583, 1983.
- [41] RASMUSSEN, G. & RASMUSSEN, P. *Hand-Arm Vibration Measurements*. Proceedings Inter- Noise, 1039 - 1042, 1983.
- [42] RASMUSSEN, G. *Instrumentation for Machinery Diagnostics and its Application*. IMAC, 997 - 1001, 1984.
- [43] RASMUSSEN, G. *Identification of Energy Sources and Absorbers*. IMAC, 970 - 976, 1984.
- [44] RASMUSSEN, P. *Vibrational Power Flow Measurement*. SIRA Vibration Course, Bruel & Kjaer, 153 - 160, 1985.
- [45] RASMUSSEN, P. *Application of Power Flow Measurement*. SIRA Vibration Course, Bruel & Kjaer, 161 - 175, 1985.
- [46] REGGI, A.S. *Transduction Phenomena in Ferroelectric Polymers and theirs Role in Bio-medical Applications*. Ferroelectrics, V.60, 83 - 105, 1984.
- [47] SESSLER, G. M. *Piezoelectricity in Polyvinylidene Fluoride*. J. Acoust. Soc. Am., 70(6), 1596 - 1607, 1981.
- [48] SOEDEL, W. *Vibration of the Shells and Plates*. Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, 366 p., 1981.
- [49] SOUTHGATE, P. D. *Room-Temperature Poling and Morphology Changes in Piroelectric Polyvinylidene Fluoride*. Applied Physics Letters, 28(5), 250 - 252, 1976.
- [50] SUSSNER, H. *Physical Interpretation of the Anisotropy and Temperature Dependence of the Piezoelectric Constants of Polyvinylidene Fluoride*. Physics Letters, 58(A), 426 - 428, 1976.
- [51] TAKAHASHI, Y. & TADOKORA, H. *Crystal Structure of Form III of Polyvinylidene Fluoride*. Macromolecules, 13, 1318 - 1318, 1980.
- [52] TAMURA, M.; OGASAWARA, K.; ONO, N. & HAGIWARA, S. *Piezoelectricity in Uniaxially Stretched Polyvinylidene Fluoride*. Journal of Applied Physics, 45(9), 3768 - 3771, 1974.
- [53] TASAKA, S. & MIYATA, S. *The Origin of Piezoelectricity in Polyvinylidene Fluoride*. Ferroelectrics, 32, 17 - 22, 1981.
- [54] TASHIRO, K.; TODAEGORO, H. & KOBAYASHI, M. *Structure and Piezoelectricity of Polyvinylidene Fluoride*. Ferroelectrics, 32, 167 - 175, 1981.

- [55] TECHNICAL NOTES ATOCHEN SENSORS, INC. P.P Box 799, Valley Forge, PA 19 482, 1992.
- [56] THONSON, W.T. *Teoria da Vibração*. Editora Interciência, 462 p., 1978.
- [57] TZOU, H. & TSENG, C. I. *Advanced Dynamic Measurements of Distributed Mechanical Systems. Part 2: Finite Element Analysis*. Symposium of Advanced Manufacturing. Lexington, Kentucky. September 26-28, 95 - 98, 1988.
- [58] TZOU, H. G. & ZHONG, J. P. *Advanced Dynamics Measurements for Distributed Mechanical Systems. Part I: Theoretical Development*. Symposium on Advanced Manufacturing. Lexington, Kentuck, 91 - 94, 1988.
- [59] TZOU, H. & TSENG, C. I. *Distributed Piezoelectric Sensor/Actuator Design for Dynamics Measurement/Control of Distributed Parameter Systems: a Piezoelectric Finite Element Approach*. Journal of Sound and Vibration, 138(1), 17 - 34, 1990.
- [60] VERHEIJ, J. W. *On the Measurement of Energy Flow along Liquid Filled Pipes*. Senlis: Recueil de Conférences, CETIM, Senlis, France, 201 - 206, 1985.
- [61] WADA, Y. & HAYAKAWA, R. *Model Theory of Piezo and Pyroelectricity of Polyvinylidene Fluoride Electret*. Ferroelectrics, 32, 115 - 118, 1981.
- [62] WANG, C. *Applied Elasticity*. McGraw-Hill Book Co., New Yor . Capitulo 11, 1953.

Capítulo 10

Apêndice.

Neste Apêndice são apresentados os valores medidos, da força, da aceleração, do desvio padrão e do ângulo de fase, em função da rotação do motor e do nível de desbalanceamento do sistema dinâmico. Também, são apresentados os valores calculados do fluxo energia.

Tabela 10.1: Valores da força em função da rotação do motor, sem desbalanceamento - ($M_0 = 0,0 \text{ gr.}$).

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	N	padrão	Radianos	Graus
19,969917	0,224424	0,012014	3,415233	97,838989687
20,44336	0,238738	0,011573	3,424728	98,111000764
20,92172	0,252256	0,014373	3,463049	99,20881398
21,421377	0,265161	0,009488	3,443562	98,650553858
21,908632	0,274975	0,011925	3,462896	99,204430863
22,503219	0,303689	0,011135	3,500932	100,29407945
22,890708	0,309515	0,016278	3,487053	99,896476318
23,554626	0,330613	0,011716	3,514195	100,67403552
23,835566	0,341774	0,0156	3,529661	101,11710275
24,511936	0,369726	0,013797	3,531427	101,16769481
25,009465	0,396415	0,015372	3,549667	101,69023109
25,532354	0,413273	0,019587	3,580852	102,58361345
26,079959	0,431933	0,015681	3,573235	102,36540298
26,486255	0,454235	0,020971	3,592935	102,92976509
27,080514	0,487948	0,021071	3,601769	103,18283995
27,486276	0,509456	0,013314	3,608674	103,38065317
28,009372	0,558261	0,024664	3,616747	103,61192704
28,518709	0,598815	0,020495	3,658214	104,79986631
28,988601	0,644316	0,019486	3,683656	105,52872422
29,449383	0,703799	0,018647	3,743999	107,25741979
30,004275	0,749556	0,02912	3,81481	109,28600076
30,50798	0,775494	0,029633	3,923357	112,39563598
30,933155	0,783844	0,028505	3,984706	114,15315126
31,387247	0,773093	0,024914	4,044539	115,86723644
32,006709	0,760401	0,023234	4,102702	117,53347976
32,502527	0,741114	0,023801	4,161594	119,22060733
32,888658	0,712429	0,023322	4,216471	120,7927139
33,668457	0,410311	0,026382	4,367609	125,12248854
34,066795	0,402353	0,027367	3,270711	93,698749045
34,451629	0,938628	0,02738	3,390812	97,139381207
34,883755	1,075489	0,029201	3,66341	104,9487204

Tabela 10.2..... continuação da Tabela 10.1.

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
			Radianos	Graus
35,403641	1,113133	0,016767	3,778415	108,24336325
36,022328	1,142329	0,028856	3,855981	110,46546028
36,537706	1,190984	0,032572	3,89484	111,57868602
36,960597	1,214434	0,032859	3,937073	112,78856952
37,462119	1,264007	0,032496	3,954066	113,27538197
37,964399	1,335963	0,033669	3,97802	113,96161192
38,509461	1,402008	0,029849	4,008726	114,84127196
38,999547	1,47743	0,030306	4,024402	115,29035523
39,659945	1,586333	0,021509	4,057562	116,24031704
40,057813	1,653705	0,021506	4,080751	116,9046314
40,549399	1,756879	0,025313	4,096774	117,36365546
41,048148	1,878636	0,02991	4,13025	118,32266998
41,503531	2,006566	0,03912	4,159513	119,16099121
42,070022	2,19941	0,019733	4,200196	120,32647059
42,574547	2,387387	0,03781	4,256076	121,92731092
43,128599	2,616745	0,027843	4,339094	124,30559587
43,512934	2,828821	0,026974	4,422254	126,68794882
43,959108	2,955953	0,031675	4,544807	130,19882544
44,527185	2,928627	0,041304	4,070348	116,6066081
44,985142	2,759938	0,042463	1,513808	43,367303285
45,591562	2,561641	0,059407	1,487833	42,623176089
45,945411	2,486802	0,045148	1,490421	42,697316654
46,465198	2,481147	0,036974	2,174757	62,302053094
47,041697	2,616833	0,054542	2,335463	66,905930099
47,502064	2,735356	0,030271	4,070477	116,61030367
47,856865	2,871959	0,024676	4,692502	134,42996562
48,464836	3,155463	0,040331	3,438567	98,507457983
48,951933	3,403706	0,051224	3,123971	89,494967532
49,889649	4,037604	0,065947	1,529948	43,829679144
49,951324	4,105389	0,052837	1,51875	43,508880825

Tabela 10.3..... continuação da Tabela 10.2.

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	N	padrão	Radianos	Graus
50,419568	4,524674	0,068924	1,482944	42,483116883
50,947086	5,08301	0,080732	1,421062	40,710332315
51,521858	5,8105	0,083077	1,344548	38,518372804
52,028669	6,602452	0,080779	1,247553	35,739677235
52,326459	7,195815	0,091344	1,16816	33,465240642
53,066704	8,71071	0,0467	0,940727	26,949780367
53,404934	9,5041	0,149396	0,784731	22,480834607
53,98525	10,305587	0,038465	0,489438	14,021333079
54,580282	10,493819	0,161859	0,227547	6,5187261268
54,854872	10,32386	0,204386	0,107088	3,0678380443
55,389238	9,871275	0,223108	-0,096727	- 2,771017953
56,03511	9,009853	0,243168	-0,29996	- 8,593200917
56,551805	8,38468	0,312257	-0,433699	- 12,42453209
56,943818	7,846026	0,430184	-0,519822	- 14,89176853
57,455246	7,256786	0,446734	-0,612445	- 17,54521581
58,046455	6,683535	0,525695	-0,716088	- 20,51436211
58,493517	6,283715	0,482389	-0,765018	- 21,91610008
59,075881	6,079258	0,401252	-0,802703	- 22,99569328
60,011266	4,73868	0,537505	-0,923974	- 26,46984339
60,906092	4,71912	0,484111	-1,003405	- 28,7453686

Tabela 10.4: Valores da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento - ($M_1 = 3,9922 \text{ gr.}$).

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
			Radianos	Graus
20,51118	0,576128	0,019575	4,110118	117,745932
20,98385	0,61252	0,01659	4,103462	117,555252
21,47212	0,644279	0,014842	4,088526	117,127368
21,97319	0,655038	0,015632	4,082397	116,951786
22,50236	0,699705	0,016339	4,06395	116,423319
22,95529	0,744126	0,020711	4,054226	116,144748
23,45162	0,769356	0,019565	4,047355	115,947909
24,00408	0,812237	0,01868	4,029125	115,425659
24,47784	0,860239	0,015434	4,018899	115,132706
24,95306	0,89801	0,02194	4,010437	114,890288
25,55225	0,941461	0,014954	3,989755	114,297794
25,97235	0,992261	0,019656	3,977307	113,941186
26,49883	1,036733	0,014104	3,976905	113,92967
27,08752	1,087121	0,013244	3,966416	113,629183
27,52675	1,157585	0,015689	3,949661	113,149188
27,99941	1,22674	0,025202	3,926312	112,48029
28,51379	1,305121	0,019229	3,903789	111,835055
28,958	1,401797	0,016791	3,845819	110,174341
29,44084	1,478389	0,025341	3,759957	107,714582
29,88222	1,517817	0,027158	3,646003	104,450048
30,56579	1,440626	0,02185	3,554317	101,823443
31,43183	1,246315	0,0217	3,419901	97,9727177
31,5052	0,658533	0,033515	3,205606	91,8336325
31,96928	0,634083	0,02635	3,181261	91,1362013
32,55269	0,162435	0,026617	2,51573	72,0701872
32,96139	2,421289	0,089176	-0,160046	-4,5849694
33,51233	6,449126	0,133267	-1,011842	-28,98707
33,95588	8,19709	0,020652	4,593806	131,60254
34,48124	8,05922	0,045353	4,271078	122,357086
34,99139	7,691458	0,071609	4,017149	115,082573

Tabela 10.5..... continuação da Tabela 10.4.

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	N	padrão	Radianos	Graus
35,52249	6,973616	0,041809	3,867397	110,792504
36,04203	6,441279	0,041281	3,753571	107,531637
36,50879	6,127166	0,035468	3,675773	105,302893
37,01443	5,978155	0,038885	3,623295	103,799513
37,4871	5,854391	0,038659	3,575584	102,432697
37,95837	5,84887	0,017756	3,536528	101,313827
38,5276	5,909295	0,042427	3,501392	100,307257
39,0477	6,090207	0,032123	3,463148	99,2116501
40,01156	6,339383	0,033003	3,428281	98,2127865
40,02128	7,022073	0,048945	3,35382	96,0796409
40,7541	7,033325	0,038897	3,351641	96,0172173
41,06798	7,83922	0,042571	3,275509	93,8362013
41,58296	8,271472	0,050853	3,224266	92,3682009
42,05438	9,097713	0,035524	3,169851	90,8093296
42,55683	9,848851	0,066128	3,299142	94,5132353
43,15533	10,13894	0,045301	3,500033	100,268325
43,56769	9,643087	0,051985	3,686273	105,603696
44,0522	8,909595	0,056789	3,772377	108,070388
44,53907	8,099279	0,062404	3,811548	109,192552
45,15288	7,522934	0,044221	3,81013	109,151929
45,56357	7,15634	0,031097	3,772082	108,061937
46,01663	7,141263	0,052727	3,735246	107,006665
46,47154	7,26459	0,072375	3,701817	106,048997
46,96104	7,529713	0,058171	3,668152	105,084568
47,53088	7,965297	0,061601	3,64393	104,390661
47,932	8,638277	0,061602	3,62705	103,907086
48,56819	9,258613	0,04706	3,62917	103,967819
48,9653	10,40261	0,034704	3,643719	104,384616
49,47193	11,26904	0,088867	3,667788	105,074141

Tabela 10.6..... continuação da Tabela 10.5.

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	N	padrão	Radianos	Graus
50,04668	12,58411	0,087699	3,710765	106,305338
50,50893	14,31501	0,12029	3,781004	108,317532
51,33252	16,38727	0,103894	3,886491	111,339505
51,52493	19,80874	0,12081	4,087165	117,088379
51,92963	21,02089	0,047794	4,19044	120,046982
52,41885	22,81904	0,090446	4,370609	125,208432
53,04033	24,09942	0,075018	4,594301	131,616721
53,48978	24,47916	0,036524	1,429826	40,9614018
53,92729	23,83949	0,036111	1,256645	36,0001432
54,47338	22,92766	0,102093	1,113901	31,9108384
54,83508	21,61668	0,17931	0,958603	27,4618888
55,51745	20,6297	0,317525	0,86847	24,8797746
56,42246	18,66913	0,26448	0,720502	20,6408136
56,43616	16,59154	0,29622	0,572473	16,400105
57,35576	16,7112	0,445613	0,570279	16,3372517
57,82787	14,97782	0,385726	0,452691	12,9686115
57,89512	14,13388	0,423003	0,40364	11,5634072
58,77151	14,22385	0,412064	0,385776	11,0516425
59,29457	12,62012	0,528387	0,302042	8,65284568
60,00375	12,03128	0,488383	0,274744	7,87081742
60,0032	11,12	0,397202	0,206898	5,92717723
60,0032	11,23762	0,273197	0,206011	5,90176662

Tabela 10.7: Valores da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento - ($M_2 = 6,1571 \text{ gr.}$).

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	N	padrão	Radianos	Graus
19,919678	0,805666	0,01443	4,228016	121,123453
20,416038	0,853129	0,014756	4,215329	120,7599981
20,992056	0,902068	0,016426	4,199229	120,2987681
21,465433	0,943397	0,014601	4,187249	119,9555672
21,958962	0,996575	0,011733	4,169116	119,4360963
22,496671	1,044265	0,011388	4,159976	119,1742552
22,991268	1,09371	0,016593	4,149579	118,8764037
23,532508	1,147979	0,013328	4,132104	118,375783
23,936565	1,187705	0,016153	4,118259	117,9791539
24,51128	1,248519	0,018003	4,10427	117,5783995
24,937461	1,30705	0,015259	4,089887	117,1663579
25,47314	1,367458	0,014485	4,080762	116,9049465
25,964823	1,43274	0,020583	4,063478	116,4097976
26,502324	1,502052	0,015501	4,049444	116,007754
26,883567	1,550001	0,013164	4,041355	115,7760218
27,405489	1,642986	0,018143	4,021191	115,1983671
28,005226	1,783958	0,024921	3,982933	114,1023587
28,536797	2,022829	0,015705	3,883658	111,2583461
29,024163	2,08858	0,017315	3,769757	107,9953304
29,527595	2,12925	0,029331	3,65886	104,8183728
30,006668	2,009852	0,032518	3,586869	102,7559874
30,527519	1,705311	0,031141	3,524771	100,9770149
30,910117	1,369311	0,026196	3,489766	99,97419786
31,512589	0,504777	0,024099	3,492268	100,0458747
31,964225	1,462688	0,049998	-0,214587	-6,14745034
32,459376	8,573719	0,103773	-0,931506	-26,6856188
32,957658	12,17197	0,037697	-1,518035	-43,4883976
33,379055	12,38537	0,085531	4,430226	126,9163293
33,896228	11,66472	0,090358	4,185383	119,9021104
34,471479	10,72003	0,035863	3,997679	114,5247995
34,991104	10,1673	0,052903	3,880084	111,1559587

Tabela 10.8..... continuação da Tabela 10.7.

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	N	padrão	Radianos	Graus
35,366084	9,514645	0,039607	3,828169	109,668707
35,983067	8,966246	0,028126	3,751959	107,4854565
36,460613	8,899856	0,026416	3,704407	106,1231952
36,977205	8,899015	0,023762	3,662859	104,9329354
37,499891	8,926553	0,019185	3,623958	103,8185065
38,335018	9,0635	0,044308	3,58621	102,7371085
38,523312	9,2744	0,034756	3,554503	101,828772
39,021011	9,62163	0,041028	3,520041	100,8415107
39,540073	10,13082	0,036986	3,477632	99,62658518
40,012358	10,73488	0,04906	3,432415	98,33121658
40,532694	11,59773	0,062797	3,366462	96,44180672
40,986249	12,545	0,057552	3,277917	93,90518526
41,56873	13,77024	0,028851	3,179284	91,07956455
41,989421	14,15576	0,039739	3,349852	95,96596639
42,402138	13,36472	0,068261	3,519581	100,8283327
42,961299	12,23154	0,031921	3,632677	104,0682869
43,484668	11,1517	0,033009	3,670624	105,1553858
44,013758	10,42593	0,042824	3,654531	104,6943564
44,533921	10,18631	0,058924	3,604877	103,2718774
45,020454	10,23892	0,06717	3,558331	101,9384358
45,378481	10,48174	0,056668	3,525751	101,0050898
45,987765	11,10319	0,063849	3,487285	99,90312261
46,457421	11,77848	0,040003	3,471552	99,45240642
47,02197	12,86867	0,086905	3,467499	99,33629679
47,525648	14,02057	0,077065	3,475874	99,57622231
48,078848	15,49412	0,102541	3,501064	100,297861
48,553413	17,26722	0,061604	3,546801	101,6081264
49,006032	18,98534	0,075576	3,595093	102,9915871
49,534632	21,44077	0,065754	3,681154	105,4570474

Tabela 10.9..... continuação da Tabela 10.8.

Rotação	Força	Desvio padrão	Ângulo de fase	
Hz	N		Radianos	Graus
50,03531	24,3585	0,07353	3,795634	108,7366501
50,427934	27,29751	0,093049	3,964354	113,5701108
50,954003	30,36773	0,105939	4,200711	120,3412242
51,540066	32,27831	0,106899	4,472577	128,1295932
51,997932	32,37468	0,104109	4,673013	133,8716482
52,519347	31,55519	0,051406	1,412787	40,47327158
52,985858	30,28283	0,081614	1,264918	36,23714668
53,595914	27,93013	0,100254	1,083409	31,03730901
53,997075	26,69436	0,130287	0,996929	28,5598453
54,524849	25,07863	0,1212	0,892677	25,57325248
54,870679	24,23568	0,129236	0,841411	24,1045932
55,514019	22,42038	0,198863	0,740132	21,20317036
55,985402	21,29633	0,278186	0,676227	19,37243125
56,536307	20,1589	0,236406	0,612982	17,56059969
56,974922	19,13302	0,238632	0,564626	16,17530558
57,454957	18,24953	0,323176	0,509937	14,6085848
58,03707	17,07136	0,342216	0,461271	13,21440985
58,465626	16,70344	0,441361	0,428638	12,27954545
59,020664	15,64993	0,478934	0,373863	10,71036096
59,409918	15,08988	0,402321	0,344378	9,865679908
60,010682	14,14222	0,475508	0,316671	9,071934683

Tabela 10.10: Valores da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento - ($M3 = 7,9617 \text{ gr.}$).

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	N	padrão	Radianos	Graus
20,01262	1,037673	0,013699	4,296763	123,092905
20,47809	1,095927	0,016355	4,287529	122,828371
21,00103	1,162395	0,010811	4,273256	122,419481
21,50937	1,231997	0,013924	4,256967	121,952836
22,05059	1,296194	0,015089	4,244576	121,597861
22,50195	1,365585	0,009147	4,229493	121,165766
23,02059	1,435878	0,011004	4,221058	120,924121
23,48425	1,501554	0,01292	4,209551	120,594471
23,99376	1,58073	0,014191	4,197824	120,258518
24,47125	1,65729	0,016483	4,186188	119,925172
25,02644	1,751294	0,015736	4,178606	119,707964
25,53223	1,820851	0,012195	4,170564	119,477578
26,00713	1,914144	0,017616	4,16576	119,339954
26,56309	2,071469	0,015082	4,1477	118,822574
27,01507	2,280667	0,01836	4,102219	117,519643
27,50553	2,515185	0,018493	4,029452	115,435027
27,98065	2,749425	0,019323	3,918552	112,257983
28,55136	2,827361	0,026432	3,811516	109,191635
29,02733	2,7485	0,021101	3,733651	106,960972
29,48502	2,534464	0,02035	3,677764	105,359931
30,018	2,15043	0,023746	3,63167	104,039439
30,41273	1,789541	0,03975	3,59912	103,106952
30,99645	0,773835	0,024955	3,599215	103,109673
31,43304	1,817244	0,124291	-0,432411	-12,387634
31,99751	9,541419	0,111067	-0,836614	-23,96717
32,46919	14,01581	0,051832	-1,393751	-39,927932
32,96779	15,19172	0,064199	4,512855	129,28347
33,49412	14,75424	0,077415	4,253246	121,846238
33,9725	13,99691	0,080279	4,093991	117,283929
34,46202	13,15426	0,038045	3,98051	114,032945
34,86214	12,76859	0,027085	3,901901	111,780968

Tabela 10.11..... continuação da Tabela 10.10.

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
			Radianos	Graus
Hz	N	padrão		
35,53112	11,87151	0,037953	3,814675	109,282133
36,08262	11,44045	0,038902	3,761204	107,750306
36,69694	11,37762	0,021174	3,70821	106,232143
36,94481	11,4582	0,020401	3,688949	105,680357
37,50484	11,68069	0,027664	3,646938	104,476833
38,02952	12,02596	0,036616	3,607709	103,353008
38,47804	12,42494	0,01628	3,572219	102,336297
39,0076	13,08406	0,040648	3,523441	100,938913
39,46057	13,85309	0,034165	3,469624	99,3971734
40,01131	15,04345	0,038363	3,378937	96,7991883
40,49086	16,20574	0,052935	3,251128	93,1377387
40,96612	17,19353	0,040988	3,179872	91,0964095
41,51365	17,23886	0,04233	3,366749	96,4500286
41,95313	16,37863	0,053044	3,483188	99,7857525
42,46489	15,05284	0,03614	3,563698	102,092189
42,94665	13,97686	0,040061	3,587387	102,770827
43,45247	13,25227	0,025931	3,572834	102,353915
44,01081	12,92567	0,031747	3,535778	101,292341
44,51938	13,08036	0,045002	3,494378	100,106322
45,0107	13,59067	0,063371	3,457586	99,0523109
45,52006	14,45321	0,0618	3,431827	98,3143717
46,0266	15,57266	0,070589	3,419474	97,9604851
46,46316	16,76235	0,069251	3,42516	98,1233766
46,93826	18,17748	0,072987	3,440733	98,5695092
47,552	20,56527	0,043929	3,484622	99,8268335
48,02195	22,78007	0,035272	3,540368	101,423835
48,46121	25,38749	0,076468	3,620323	103,714372
49,02131	29,00853	0,067457	3,755337	107,582229
49,44944	32,12077	0,092689	3,911167	112,046419
49,91008	35,072	0,087327	4,101546	117,500363

Tabela 10.12..... continuação da Tabela 10.11.

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	N	padrão	Radianos	Graus
50,47541	37,2739	0,100838	4,353276	124,711879
50,98174	37,43528	0,091991	4,57739	131,132257
51,53718	36,58186	0,090896	1,507117	43,1756207
52,05946	35,03233	0,082633	1,346978	38,587987
52,51839	33,53212	0,076465	1,229914	35,2343583
52,91177	32,13914	0,05772	1,139994	32,6583461
53,43399	30,36386	0,09843	1,034046	29,6231665
53,98766	28,61701	0,165002	0,939655	26,9190699
54,48943	27,18542	0,37191	0,863484	24,7369366
55,01758	25,4632	0,221398	0,791152	22,6647823
55,49578	24,20957	0,209466	0,732125	20,9737872
55,99939	23,07287	0,309861	0,673646	19,2984912
56,52857	21,82781	0,321789	0,619119	17,7364114
56,84774	21,28411	0,401745	0,589974	16,9014706
57,39253	20,2298	0,452274	0,541579	15,5150592
57,83091	19,41893	0,455075	0,5036	14,4270435
58,49627	18,23353	0,469597	0,457508	13,1066081
59,02423	17,25092	0,464754	0,416006	11,9176662
59,28323	17,1537	0,359769	0,390082	11,175
60,02801	15,87613	0,194665	0,351268	10,0630634

Tabela 10.13: Valores da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento - ($M_4 = 8,5629 \text{ gr.}$).

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	N	padrão	Radianos	Graus
20,17843	1,004684	0,014461	1,511603	43,304135
20,55631	1,046806	0,017708	1,510728	43,279068
21,07336	1,109859	0,01101	1,492906	42,768506
21,57001	1,166801	0,017464	1,485495	42,556197
22,11268	1,232932	0,010339	1,464656	41,959206
22,48904	1,283112	0,022231	1,462994	41,911593
22,96422	1,351871	0,013839	1,450684	41,558938
23,4133	1,41065	0,01832	1,434392	41,092208
24,00371	1,495254	0,021095	1,432792	41,046371
24,95628	1,630052	0,015051	1,413065	40,481236
25,39918	1,699826	0,014065	1,415282	40,544748
25,94808	1,7911	0,017365	1,41274	40,471925
26,43829	1,892691	0,020046	1,413032	40,48029
26,97697	2,035686	0,022415	1,406983	40,307
27,4488	2,238418	0,018064	1,375085	39,393191
27,90742	2,492781	0,018615	1,296017	37,128065
28,47009	2,704428	0,019702	1,179232	33,782429
28,94222	2,687825	0,022845	1,116537	31,986354
29,45422	2,55005	0,030825	1,080791	30,962309
29,88654	2,339914	0,059931	1,105583	31,672546
30,47319	1,956352	0,024583	1,211218	34,698759
30,95261	1,574035	0,02693	1,471254	42,148224
31,40455	1,733168	0,045943	3,996293	114,48509
31,87417	7,0644	0,162528	3,654249	104,68628
32,40188	16,09942	0,240411	4,236127	121,35582
32,89531	18,2491	0,046155	4,66453	133,62863
33,3805	17,97381	0,076183	1,351735	38,724265
33,87765	16,96295	0,052397	1,171534	33,561898
34,62717	15,11645	0,059791	0,999571	28,635533

Tabela 10.14..... continuação da Tabela 10.13.

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	N	padrão	Radianos	Graus
35,06587	14,31734	0,043449	0,922943	26,440307
35,54374	13,37517	0,030568	0,8763	25,104087
36,00745	12,77675	0,029977	0,841604	24,110122
36,55214	12,51124	0,042291	0,80249	22,989591
36,97831	12,50382	0,02357	0,775312	22,211001
37,50411	12,50664	0,033601	0,744603	21,331255
37,98001	12,67397	0,036582	0,718832	20,592972
38,48915	12,96499	0,024302	0,686637	19,670655
38,98101	13,36458	0,039902	0,657277	18,829555
39,52344	13,98225	0,045781	0,611123	17,507343
40,02813	14,8075	0,050003	0,551071	15,786984
40,45017	15,61639	0,03619	0,481514	13,794328
41,05272	16,91991	0,043895	0,337676	9,6736822
41,49608	17,3216	0,047076	0,177526	5,0857334
41,95829	16,82368	0,048106	0,035531	1,0178858
42,50074	15,40387	0,048889	-0,069562	-1,9928
42,88442	14,38192	0,079721	-0,089869	-2,574551
43,55461	13,16004	0,064251	-0,069408	-1,988388
44,01006	12,86768	0,063482	-0,020695	-0,592867
44,5358	13,06688	0,050449	0,036564	1,047479
45,00538	13,6828	0,049858	0,079248	2,2702827
45,5862	14,64313	0,024527	0,111506	3,1944041
45,9788	15,56601	0,048123	0,123095	3,5264037
46,53706	17,09259	0,056169	0,125047	3,5823243
46,97982	18,47425	0,090116	0,113795	3,259979
47,59312	20,71636	0,059734	0,08062	2,3095875
48,02374	22,7123	0,125623	0,036453	1,0442991
48,52824	25,53485	0,063618	-0,037316	-1,069022
48,98108	28,36221	0,074371	-0,123013	-3,524055
49,44944	31,91395	0,10057	-0,254845	-7,300754
49,93436	35,925	0,110849	-0,448852	-12,85863

Tabela 10.15..... continuação da Tabela 14.

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	N	padrão	Radianos	Graus
50,39389	38,95832	0,073562	-0,680836	-19,50447
51,61371	40,42675	0,058752	-1,172043	-33,57648
51,43515	40,16359	0,129504	-1,131323	-32,40994
52,00771	38,7774	0,062119	-1,333118	-38,19093
52,49429	37,05995	0,166743	-1,470446	-42,12508
53,0255	35,05451	0,211009	4,682871	134,15406
52,95979	35,33573	0,095847	4,696894	134,55579
54,09888	30,87534	0,272937	4,466116	127,9445
54,51726	29,67395	0,285704	4,404295	126,17346
54,97939	28,15862	0,185126	4,336332	124,22647
55,58737	26,21781	0,290134	4,255169	121,90133
56,15288	24,70132	0,366078	4,188362	119,98745
56,55841	23,77302	0,248214	4,146591	118,7908
56,97707	22,98457	0,359857	4,105659	117,61819
57,51684	21,8605	0,34415	4,051777	116,07459
58,055	20,63872	0,385864	4,009977	114,87711
58,43127	20,21553	0,468827	3,979992	114,01811
59,16033	18,7089	0,540494	3,927986	112,52825
59,99361	17,32508	0,224344	3,865813	110,74713
60,44477	16,75491	0,328027	3,839274	109,98684

Tabela 10.16: Valores da força em função da rotação do motor, com desbalanceamento - ($M_5 = 10,7347 \text{ gr.}$).

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	N	padrão	Radianos	Graus
19,996511	1,429409	0,012681	4,356903	124,815785
20,56724	1,521627	0,009436	4,33887	124,2991788
21,011412	1,593973	0,014007	4,32304	123,8456837
21,424932	1,663865	0,01393	4,317806	123,695741
21,93728	1,742243	0,012437	4,306406	123,3691558
22,503096	1,843135	0,011744	4,294056	123,0153552
22,993025	1,926202	0,011646	4,283344	122,7084798
23,463555	2,007587	0,01267	4,278882	122,5806532
23,936058	2,097993	0,015769	4,265675	122,2023014
24,368439	2,179783	0,019351	4,26311	122,1288197
24,93601	2,300122	0,01724	4,252188	121,8159282
25,402593	2,405698	0,021106	4,244148	121,5855997
25,96297	2,619129	0,021957	4,227981	121,1224503
26,406628	2,849513	0,022729	4,209872	120,6036669
26,920608	3,236412	0,025099	4,143544	118,7035141
27,524468	3,665274	0,014424	4,03054	115,4661956
28,027098	3,810512	0,018769	3,92523	112,4492934
28,501052	3,716681	0,022785	3,839505	109,9934587
29,017469	3,459555	0,02026	3,758859	107,6831264
29,502219	3,034683	0,039558	3,695661	105,8726413
30,000723	2,589626	0,041992	3,582218	102,6227464
30,494663	1,702571	0,065138	3,528717	101,0900592
30,889971	0,984304	0,046713	-0,88621	-25,3880443
31,393099	6,921543	0,129357	-0,5173	-14,8194614
31,920539	16,86533	0,151598	-1,18622	-33,9825917
32,441954	19,52033	0,023285	4,666144	133,6748663
33,462247	19,19214	0,093785	4,209832	120,602521
34,02841	18,47467	0,059026	4,058492	116,2669595
34,563477	17,52763	0,065153	3,95548	113,31589

Tabela 10.17..... continuação da Tabela 10.16.

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
			Radianos	Graus
35,057032	16.82934	0,058391	3,888708	111,4030176
35,384507	16.72677	0,043689	3,850177	110,2991883
35,962963	16,06604	0,040994	3,792812	108,655806
36,442627	15,79487	0,022597	3,754205	107,5497995
36,993595	15,74579	0,034387	3,715592	106,4436211
37,517038	16,03646	0,038068	3,674612	105,2696333
38,023911	16,50683	0,028576	3,632374	104,0596066
38,429049	17,05404	0,03799	3,596017	103,0180577
38,947471	17,9422	0,049148	3,544066	101,5297746
39,476682	19,18812	0,047213	3,467797	99,34483384
40,00466	20,795	0,026594	3,355444	96,12616501
40,504462	22,3854	0,041401	3,204659	91,80650306
41,003746	22,96139	0,039624	3,266006	93,56396104
41,427848	22,01104	0,051958	3,40227	97,46762796
42,005929	20,40188	0,050133	3,504357	100,3921982
42,579539	19,25419	0,071541	3,541308	101,4507639
43,08914	18,35176	0,04552	3,522534	100,9129297
43,556645	18,18782	0,033358	3,48791	99,9210275
43,961766	18,25392	0,036819	3,458411	99,07594538
44,587418	18,87005	0,054587	3,422702	98,05296028
45,088446	19,82333	0,072137	3,403178	97,49364018
45,575571	21,14394	0,036115	3,395578	97,27591673
45,680059	21,55939	0,070144	3,398273	97,35312261
46,550745	24,81349	0,069823	3,42681	98,17064553
47,003426	27,09646	0,096357	3,463773	99,229555
47,568231	30,67859	0,086429	3,549738	101,6922651
48,002388	34,02669	0,044842	3,649857	104,5604565
48,476475	37,85884	0,093702	3,784614	108,4209511
49,040432	41,90512	0,07995	3,989708	114,2964477
49,559677	44,23244	0,081007	4,225217	121,0432678
49,992691	44,94905	0,0682	4,407093	126,2536192

Tabela 10.18..... continuação da Tabela 10.17.

Rotação	Força	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	N	padrão	Radianos	Graus
50,499573	44,66492	0,067474	4,599649	131,7699293
51,037977	43,83884	0,084089	1,509577	43,24609435
51,687467	41,58294	0,126114	1,322309	37,88127387
52,185725	39,61044	0,095966	1,208015	34,60699962
52,607171	37,91582	0,192683	1,127356	32,29629488
53,104169	36,07995	0,1059	1,038438	29,74898778
53,924758	32,81561	0,059624	0,914536	26,19946524
53,899117	33,25337	0,154581	0,9229	26,43907563
54,935441	29,87109	0,221265	0,791944	22,68747135
55,960168	26,91047	0,342604	0,683419	19,57846639
55,931423	27,12133	0,292178	0,690989	19,7953304
56,403908	25,96124	0,353681	0,646063	18,50829832
56,993483	24,57131	0,312342	0,595744	17,06676853
56,966547	24,7245	0,325524	0,597986	17,13099694
57,438336	23,64844	0,438955	0,558661	16,00442131
57,974547	22,54705	0,475109	0,515877	14,77875286
58,511046	21,71123	0,390703	0,486381	13,93375668
58,946204	20,91409	0,434119	0,463145	13,26809587
60,003077	19,22059	0,390602	0,385604	11,04671505

Tabela 10.19: Valores da aceleração em função da rotação do motor, sem desbalanceamento
- ($M_0 = 0,0$ gr.).

Rotação	Aceleração	Desvio padrão	Ângulo de fase	
Hz	m/s		Radianos	Graus
19,96992	0,000951	2,6E-05	0,207729	5,950984
20,44336	0,001064	2,2E-05	0,091996	2,635485
20,92172	0,001193	3,9E-05	0,039654	1,136001
21,42138	0,001383	6,8E-05	-0,196007	-5,61517
21,90863	0,001596	6,9E-05	-0,189672	-5,43369
22,50322	0,001693	5,7E-05	-0,28932	-8,28839
22,89071	0,001933	6,8E-05	-0,32701	-9,36812
23,55463	0,002283	8,1E-05	-0,499721	-14,3159
23,83557	0,002605	8E-05	0,761616	21,81864
24,51194	0,003025	9,2E-05	0,772758	22,13783
25,00947	0,003581	9,2E-05	0,676682	19,38547
25,53235	0,004079	9,3E-05	0,553354	15,85239
26,07996	0,004819	0,000148	0,426433	12,21638
26,48626	0,005263	0,00018	0,480142	13,75502
27,08051	0,006159	0,000218	0,405452	11,61532
27,48628	0,007403	0,000244	0,251444	7,203323
28,00937	0,009481	0,000157	0,160382	4,594595
28,51871	0,01133	0,000248	-0,045382	-1,3001
28,9886	0,014021	0,00022	-0,337077	-9,65652
29,44938	0,017595	0,000325	-0,576146	-16,5053
30,00428	0,020709	0,000232	-0,929081	-26,6161
30,50798	0,021435	0,00036	-1,272902	-36,4659
30,93316	0,021078	0,000236	-1,534088	-43,9483
31,38725	0,020415	0,00026	4,5002	128,9209
32,00671	0,018855	0,0002	4,21934	120,8749
32,50253	0,017548	0,000199	4,044291	115,8601
32,88866	0,016787	0,000125	3,926635	112,4895
33,66846	0,016102	0,000124	3,692785	105,7903
34,0668	0,016099	0,000207	3,526885	101,0376
34,45163	0,014709	0,000168	3,400315	97,41162
34,88376	0,013539	0,000129	3,321574	95,15586

Tabela 10.20..... continuação da Tabela 10.19.

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
			Radianos	Graus
35,40364	0,013225	0,000118	3,218634	92,20686
36,02233	0,012882	0,000101	3,194376	91,51192
36,53771	0,012711	9,3E-05	3,290083	94,25371
36,9606	0,01278	0,000166	3,383183	96,92083
37,46212	0,012831	0,000267	3,479917	99,69205
37,9644	0,012889	0,000191	3,580966	102,5869
38,50946	0,012953	0,000229	3,701086	106,0281
38,99955	0,013522	0,000216	3,802137	108,9229
39,65995	0,013933	0,000288	3,943128	112,962
40,05781	0,014531	0,000252	4,031263	115,4869
40,5494	0,01534	0,000275	4,155973	119,0596
41,04815	0,016798	0,000257	4,254241	121,8747
41,50353	0,017821	0,000334	4,363852	125,0149
42,07002	0,019319	0,000276	4,511358	129,2406
42,57455	0,021236	0,000286	4,519798	129,4824
43,1286	0,023513	0,000427	1,421391	40,71976
43,51293	0,024663	0,000524	1,255532	35,96826
43,95911	0,026195	0,000522	0,990964	28,38896
44,52719	0,024611	0,000563	0,694681	19,9011
44,98514	0,021992	0,000554	0,546778	15,664
45,59156	0,018336	0,000472	0,486885	13,9482
45,94541	0,017242	0,00039	0,549413	15,73949
46,4652	0,016718	0,000521	0,614338	17,59945
47,0417	0,018121	0,000532	0,656918	18,81927
47,50206	0,019893	0,000418	0,667949	19,13528
47,85687	0,021363	0,000477	0,663339	19,00322
48,46484	0,024646	0,000405	0,641373	18,37394
48,95193	0,028163	0,000479	0,613466	17,57447
49,88965	0,035801	0,000388	0,508289	14,56137
49,95132	0,036533	0,000526	0,493056	14,12498

Tabela 10.21..... continuação da Tabela 10.20.

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	m/s	padrão	Radianos	Graus
50,41957	0,041181	0,000641	0,427742	12,25388
50,94709	0,04835	0,000434	0,337514	9,669041
51,52186	0,056179	0,000659	0,200722	5,750248
52,02867	0,065688	0,001058	0,047071	1,348482
52,32646	0,072751	0,00107	-0,049951	-1,43099
53,0667	0,090819	0,001328	-0,342804	-9,82059
53,40493	0,101823	0,001364	-0,538524	-15,4275
53,98525	0,115562	0,001224	-0,870394	-24,9349
54,58028	0,119697	0,001669	-1,183175	-33,8954
54,85487	0,117997	0,001452	-1,317836	-37,7531
55,38924	0,112116	0,0018	-1,239417	-35,5066
56,03511	0,106033	0,001774	4,494348	128,7533
56,55181	0,096576	0,002063	4,335083	124,1907
56,94382	0,090061	0,001802	4,220654	120,9125
57,45525	0,076257	0,003248	4,028401	115,4049
58,04646	0,074451	0,00235	3,92041	112,3112
58,49352	0,073038	0,002192	3,851992	110,3512
59,07588	0,068098	0,001984	3,790079	108,5775
60,01127	0,060803	0,00183	3,63994	104,2764
60,90609	0,056588	0,001495	3,549825	101,6948

Tabela 10.22: Valores da aceleração em função da rotação do motor, com desbalanceamento
- (M1 = 3,9922 gr.).

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	m/s	padrão	Radianos	Graus
19,98741	0,002699	0,000162	3,783784	108,397173
20,51118	0,002931	0,000136	3,818695	109,397298
20,98385	0,003443	0,000108	3,916833	112,208738
21,47212	0,003522	0,000249	3,955251	113,30933
21,97319	0,003928	0,000251	3,970977	113,759845
22,50236	0,004975	0,000235	4,077995	116,825678
22,95529	0,005345	0,000364	4,07724	116,804049
23,45162	0,005966	0,000295	4,155134	119,035542
24,00408	0,007099	0,000414	4,236241	121,359081
24,47784	0,008057	0,000443	4,314404	123,598281
24,95306	0,009199	0,000414	4,360606	124,921868
25,55225	0,010943	0,000389	4,463627	127,873195
25,97235	0,012669	0,000319	4,546406	130,244633
26,49883	0,014803	0,000354	4,521157	129,521304
27,08752	0,019404	0,000363	1,468976	42,0829641
27,52675	0,023252	0,00049	1,300995	37,2706742
27,99941	0,028378	0,000435	1,114813	31,9369652
28,51379	0,03547	0,000921	0,795947	22,8021486
28,958	0,042002	0,001024	0,44706	12,8072956
29,44084	0,048075	0,000527	0,080648	2,31038961
29,88222	0,050107	0,000512	-0,226436	-6,4868984
30,56579	0,050126	0,000463	-0,606912	-17,386707
31,43183	0,049263	0,000427	-0,980862	-28,099561
31,5052	0,05061	0,000509	-0,998065	-28,592389
31,96928	0,052772	0,000574	-1,130216	-32,378228
32,55269	0,059398	0,000692	-1,324065	-37,931579
32,96139	0,064108	0,000778	4,5941	131,610963
33,51233	0,059233	0,000652	4,217723	120,828581
33,95588	0,054708	0,000586	4,01425	114,999523
34,48124	0,048126	0,000629	3,833573	109,82352
34,99139	0,043961	0,000605	3,733523	106,957305

Tabela 10.23..... continuação da Tabela 10.22.

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	m/s	padrão	Radianos	Graus
35,52249	0,041004	0,000272	3,695746	105,875076
36,04203	0,040004	0,000356	3,643474	104,377597
36,50879	0,04016	0,000516	3,583799	102,668039
37,01443	0,041361	0,000625	3,542326	101,479927
37,4871	0,042917	0,000572	3,459893	99,1184015
37,95837	0,043191	0,000634	3,356857	96,1666444
38,5276	0,046026	0,00071	3,271202	93,7128151
39,0477	0,049139	0,000727	3,175346	90,9667494
40,01156	0,057668	0,000891	3,3397	95,6751337
40,02128	0,058074	0,000627	3,345617	95,8446429
40,7541	0,06728	0,000804	3,553562	101,801814
41,06798	0,072512	0,000826	3,662346	104,918239
41,58296	0,081437	0,000827	3,86752	110,796028
42,05438	0,091825	0,000656	4,107752	117,678151
42,55683	0,096045	0,001094	4,438913	127,165193
43,15533	0,089441	0,00102	1,517991	43,4871371
43,56769	0,081172	0,001249	1,344774	38,5248472
44,0522	0,067788	0,001108	1,21703	34,8652597
44,53907	0,05864	0,00136	1,139746	32,6512414
45,15288	0,04914	0,001126	1,143965	32,7721066
45,56357	0,047033	0,00065	1,221307	34,9877865
46,01663	0,045218	0,000897	1,291389	36,9954832
46,47154	0,047807	0,000841	1,370683	39,2670837
46,96104	0,051742	0,00101	1,448121	41,4855138
47,53088	0,058803	0,000973	1,501405	43,0119843
47,932	0,06715	0,001433	1,506169	43,1484626
48,56819	0,079013	0,001166	1,480857	42,4233289
48,9653	0,090414	0,001484	1,457926	41,7664057
49,47193	0,105625	0,001485	1,387312	39,7434683

Tabela 10.24..... continuação da Tabela 10.23.

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	m/s	padrão	Radianos	Graus
50,04668	0,127019	0,00198	1,291442	36,9970015
50,50893	0,15268	0,00193	1,156933	33,1436115
51,33252	0,195171	0,002239	0,896082	25,6707983
51,52493	0,213709	0,002199	0,785641	22,5069041
51,92963	0,239345	0,003751	0,582514	16,6877578
52,41885	0,257726	0,002819	0,335708	9,61730328
53,04033	0,268582	0,003127	0,040814	1,16923224
53,48978	0,270125	0,002651	-0,156886	-4,4944423
53,92729	0,261239	0,003667	-0,330337	-9,4634358
54,47338	0,251314	0,002848	-0,518056	-14,841176
54,83508	0,241029	0,003018	-0,630198	-18,053801
55,51745	0,216036	0,003274	-0,816675	-23,395961
56,42246	0,193684	0,002572	-1,011017	-28,963436
56,43616	0,195361	0,002379	-1,010599	-28,951461
57,35576	0,159734	0,004617	-1,153112	-33,034148
57,82787	0,155492	0,003959	-1,24686	-35,719824
57,89512	0,161153	0,002403	-1,262418	-36,165527
58,77151	0,160223	0,002096	-1,370797	-39,27035
59,29457	0,154299	0,002012	-1,431478	-41,008728
60,00375	0,141192	0,002472	-1,509694	-43,249446
60,0032	0,143577	0,002565	-1,512351	-43,325563

Tabela 10.25: Valores da aceleração em função da rotação do motor, com desbalanceamento
- (M2 = 6,1571 gr.).

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	m/s	padrão	Radianos	Graus
19,91968	0,003637	2,1E-05	3,583759	102,666893
20,41604	0,004118	2E-05	3,638863	104,245502
20,99206	0,004737	2,6E-05	3,697733	105,932
21,46543	0,005332	1,9E-05	3,752513	107,501327
21,95896	0,00601	3,1E-05	3,807243	109,069223
22,49667	0,00689	2,1E-05	3,867112	110,784339
22,99127	0,007829	2E-05	3,930009	112,586201
23,53251	0,00904	5,7E-05	3,999777	114,584903
23,93657	0,010072	2,7E-05	4,053977	116,137615
24,51128	0,011813	3E-05	4,137782	118,538445
24,93746	0,013355	4,7E-05	4,206408	120,504431
25,47314	0,015756	7,7E-05	4,30359	123,288484
25,96482	0,018502	8,1E-05	4,395402	125,918697
26,50232	0,022338	0,000128	4,521493	129,53093
26,88357	0,026526	0,000181	4,638365	132,879058
27,40549	0,033425	0,000347	1,449515	41,5254488
28,00523	0,045488	0,000244	1,12356	32,1875477
28,5368	0,059119	0,00017	0,643139	18,4245321
29,02416	0,06623	0,000115	0,180961	5,18413866
29,5276	0,068447	0,000102	-0,134109	-3,8419309
30,00667	0,068518	0,000284	-0,396577	-11,361068
30,52752	0,070353	0,000101	-0,628875	-18,0159
30,91012	0,071128	9,2E-05	-0,763949	-21,885476
31,51259	0,073	6,4E-05	-0,943113	-27,018134
31,96423	0,07831	8,2E-05	-1,095681	-31,388875
32,45938	0,087393	0,000178	-1,436644	-41,156723
32,95766	0,085003	0,000356	4,491026	128,658117
33,37906	0,076365	0,000474	4,264707	122,17457
33,89623	0,070382	0,000455	4,080626	116,90105
34,47148	0,064952	0,000202	3,933257	112,679249
34,9911	0,061684	0,000181	3,822782	109,514381

Tabela 10.26..... continuação da Tabela 10.25.

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
			Radianos	Graus
35,36608	0,059909	0,000128	3,763449	107,81462
35,98307	0,058386	0,000122	3,6826	105,498472
36,46061	0,058853	0,000111	3,613532	103,519824
36,97721	0,060197	0,000132	3,542782	101,492991
37,49989	0,062492	0,000107	3,461806	99,1732047
38,33502	0,066066	0,000151	3,364362	96,3816463
38,52331	0,070429	0,00013	3,268616	93,6387319
39,02101	0,07587	0,000283	3,168344	90,7661574
39,54007	0,083147	0,000486	3,227752	92,4680672
40,01236	0,091653	0,000375	3,34925	95,9487204
40,53269	0,103167	0,000467	3,508086	100,499026
40,98625	0,116652	0,000295	3,68935	105,691845
41,56873	0,134002	0,000368	3,988469	114,260953
41,98942	0,14086	0,000377	4,263135	122,129536
42,40214	0,132589	0,000666	4,576578	131,108995
42,9613	0,118651	0,000592	1,470603	42,1295741
43,48467	0,102007	0,000576	1,330455	38,114639
44,01376	0,087682	0,000945	1,277631	36,6013464
44,53392	0,077777	0,000496	1,30298	37,3275401
45,02045	0,07207	0,000331	1,373721	39,3541157
45,37848	0,071876	0,00036	1,451513	41,5826872
45,98777	0,075374	0,000323	3,607515	103,34745
46,45742	0,082787	0,000609	4,645198	133,074809
47,02197	0,095463	0,000706	4,604499	131,908871
47,52565	0,110281	0,00071	4,60281	131,860485
48,07885	0,129988	0,001223	4,628489	132,596133
48,55341	0,153677	0,000844	4,697931	134,585495
49,00603	0,177018	0,00092	1,518597	43,5044977
49,53463	0,210216	0,000949	1,407075	40,3096352

Tabela 10.27..... continuação da Tabela 10.26

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	m/s	padrão	Radianos	Graus
50,03531	0,249068	0,00146	1,254136	35,9282659
50,42793	0,291494	0,001491	1,060161	30,3713044
50,954	0,337377	0,001884	0,791428	22,6726891
51,54007	0,365647	0,002479	0,481476	13,7932391
51,99793	0,374864	0,002589	0,255072	7,30725745
52,51935	0,37605	0,003533	0,035938	1,02954545
52,98586	0,369485	0,002013	-0,135351	-3,8775115
53,59591	0,351181	0,002306	-0,354332	-10,15084
53,99708	0,340715	0,002513	-0,458346	-13,130615
54,52485	0,32245	0,002307	-0,587295	-16,824723
54,87068	0,312157	0,002158	-0,659195	-18,884502
55,51402	0,294718	0,002035	-0,790792	-22,654469
55,9854	0,283332	0,002268	-0,878896	-25,178457
56,53631	0,262676	0,001753	-0,967365	-27,712901
56,97492	0,251623	0,00161	-1,030508	-29,521811
57,45496	0,238334	0,002319	-1,105211	-31,661889
58,03707	0,22344	0,002656	-1,196889	-34,288264
58,46563	0,222745	0,001762	-1,234881	-35,376652
59,02066	0,211385	0,001623	-1,307027	-37,443478
59,40992	0,206594	0,002714	-1,344143	-38,50677
60,01068	0,197414	0,001705	-1,403424	-40,205042

Tabela 10.28: Valores da aceleração em função da rotação do motor, com desbalanceamento
- ($M3 = 7,9617 \text{ gr.}$).

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	m/s	padrão	Radianos	Graus
20,01262	0,005023	3E-05	3,602088	103,191979
20,47809	0,005643	1,9E-05	3,654049	104,680548
21,00103	0,006465	2,4E-05	3,712586	106,357506
21,50937	0,007351	2,6E-05	3,770038	108,00338
22,05059	0,008511	2,7E-05	3,830045	109,72245
22,50195	0,00963	2,2E-05	3,885368	111,307334
23,02059	0,011098	3E-05	3,955779	113,324456
23,48425	0,012704	3,2E-05	4,024854	115,303304
23,99376	0,014744	7,2E-05	4,106132	117,631742
24,47125	0,017106	5,7E-05	4,182859	119,829803
25,02644	0,020531	0,000123	4,294038	123,01484
25,53223	0,024638	6,2E-05	4,415129	126,483833
26,00713	0,029726	0,000114	4,557085	130,550563
26,56309	0,038438	0,000245	1,492615	42,76017
27,01507	0,047954	0,000231	1,253252	35,9029412
27,50553	0,060122	0,000236	0,910843	26,0936688
27,98065	0,070083	0,000206	0,536357	15,3654603
28,55136	0,076456	0,000126	0,146422	4,1946715
29,02733	0,077773	8,6E-05	-0,13176	-3,7746658
29,48502	0,07925	0,000222	-0,36744	-10,526356
30,018	0,07952	0,000104	-0,5834	-16,713197
30,41273	0,080572	6,8E-05	-0,71507	-20,485141
30,99645	0,083012	0,000138	-0,8936	-25,599637
31,43304	0,089342	0,00023	-1,03828	-29,744576
31,99751	0,101231	0,000238	-1,35831	-38,912624
32,46919	0,101749	0,000163	4,584224	131,328037
32,96779	0,095509	0,000414	4,314693	123,60656
33,49412	0,088179	0,000252	4,120044	118,03029
33,9725	0,08332	0,000298	3,984752	114,154469
34,46202	0,07992	0,000134	3,86112	110,612681
34,86214	0,077847	0,000182	3,779244	108,267112

Tabela 10.29..... continuação da Tabela 10.28.

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	m/s	padrão	Radianos	Graus
35,53112	0,075677	0,000162	3,667347	105,061507
36,08262	0,076371	0,000136	3,585814	102,725764
36,69694	0,078562	0,000165	3,49405	100,096925
36,94481	0,079879	0,000169	3,454015	98,9500095
37,50484	0,084336	0,000159	3,359934	96,2547937
38,02952	0,090441	0,00019	3,261678	93,4399733
38,47804	0,096942	0,000267	3,167616	90,7453018
39,0076	0,10659	0,000342	3,240334	92,8285141
39,46057	0,11748	0,000416	3,367364	96,4676471
40,01131	0,134272	0,000459	3,553429	101,798004
40,49086	0,151065	0,000597	3,771643	108,04936
40,96612	0,165894	0,000621	4,0304	115,462185
41,51365	0,171824	0,000586	4,35164	124,665011
41,95313	0,162273	0,000695	4,57522	131,070092
42,46489	0,145583	0,000446	1,519831	43,5398491
42,94665	0,128502	0,000283	1,415568	40,5529412
43,45247	0,112703	0,00059	1,369317	39,2279507
44,01081	0,101166	0,000409	1,394366	39,94555
44,51938	0,09601	0,000449	1,465657	41,987882
45,0107	0,096397	0,000537	1,553408	44,5017571
45,52006	0,10281	0,000547	4,642005	132,983337
46,0266	0,115051	0,000494	4,590226	131,499981
46,46316	0,129253	0,000854	4,575072	131,065852
46,93826	0,146912	0,000809	4,578764	131,17162
47,552	0,179594	0,00096	4,631004	132,668182
48,02195	0,208958	0,001147	4,546161	130,237615
48,46121	0,244423	0,001085	1,481113	42,4306627
49,02131	0,295643	0,00182	1,314323	37,6524924
49,44944	0,33889	0,001993	1,131448	32,4135218
49,91008	0,382777	0,002121	0,909306	26,0496371

Tabela 10.30..... continuação da Tabela 10.29.

Rotação	Aceleração	Desvio padrão	Ângulo de fase	
Hz	m/s		Radianos	Graus
50,47541	0,419526	0,002119	0,631298	18,0853132
50,98174	0,431559	0,001935	0,374044	10,7155462
51,53718	0,429944	0,002956	0,151157	4,33031895
52,05946	0,424422	0,002841	-0,03674	-1,0523778
52,51839	0,415853	0,001773	-0,17572	-5,0338808
52,91177	0,403164	0,002774	-0,28626	-8,2007544
53,43399	0,387685	0,002182	-0,41091	-11,771591
53,98766	0,376162	0,001701	-0,53121	-15,217953
54,48943	0,357185	0,004936	-0,6311	-18,079612
55,01758	0,343949	0,002257	-0,72878	-20,877903
55,49578	0,333196	0,002357	-0,80813	-23,151251
55,99939	0,319107	0,002632	-0,88749	-25,424599
56,52857	0,301681	0,00188	-0,96662	-27,691616
56,84774	0,295204	0,001511	-1,00724	-28,855204
57,39253	0,278276	0,002149	-1,07851	-30,896849
57,83091	0,262612	0,002289	-1,13934	-32,639553
58,49627	0,26058	0,001791	-1,21098	-34,691969
59,02423	0,252824	0,001984	-1,26702	-36,297479
59,28323	0,250466	0,00269	-1,29146	-36,997374
60,02801	0,232794	0,002046	-1,36926	-39,226232

Tabela 10.31: Valores da aceleração em função da rotação do motor, com desbalanceamento
- (M4 = 8,5629 gr.).

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	m/s		Radianos	Graus
20,17843	0,005414	2,4E-05	-0,085381	-2,4459798
20,55631	0,005949	3,1E-05	-0,12091	-3,4638083
21,07336	0,006749	2,5E-05	-0,175004	-5,0134836
21,57001	0,007623	2,2E-05	-0,2304	-6,6004584
22,11268	0,008723	2,8E-05	-0,288676	-8,2699389
22,48904	0,009572	5,4E-05	-0,332127	-9,5147154
22,96422	0,010812	2,4E-05	-0,386023	-11,058718
23,4133	0,012167	3,1E-05	-0,441676	-12,653056
24,00371	0,014231	6,4E-05	-0,518614	-14,857162
24,95628	0,018631	8,7E-05	-0,666376	-19,090222
25,39918	0,021512	0,000106	-0,748461	-21,441778
25,94808	0,025903	0,000113	-0,868309	-24,875162
26,43829	0,03136	0,000202	-1,012544	-29,007181
26,97697	0,039806	0,000158	-1,211948	-34,719672
27,4488	0,050709	0,000203	-1,489165	-42,661335
27,90742	0,063549	0,000223	4,448089	127,428065
28,47009	0,078494	0,00042	3,925953	112,470006
28,94222	0,083561	0,000257	3,577553	102,489104
29,45422	0,085808	0,000206	3,286801	94,1596925
29,88654	0,086912	0,000233	3,211229	91,9947193
30,47319	0,087519	0,000175	3,445227	98,6982525
30,95261	0,088013	0,000229	3,608374	103,372059
31,40455	0,091439	0,000188	3,775814	108,16885
31,87417	0,098212	0,000207	3,999388	114,573759
32,40188	0,099909	0,000351	4,452192	127,545607
32,89531	0,093455	0,000496	1,502264	43,0365928
33,3805	0,085869	0,000367	1,285418	36,824427
33,87765	0,079839	0,000231	1,118689	32,0480042
34,62717	0,075399	0,000265	0,918798	26,3215623

Tabela 10.32..... continuação da Tabela 10.31.

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	m/s	padrão	Radianos	Graus
35,06587	0,072308	0,000215	0,84048	24,0779221
35,54374	0,070768	0,000209	0,769343	22,0400019
36,00745	0,070693	0,000115	0,702861	20,1354374
36,55214	0,072298	0,000241	0,627528	17,9773109
36,97831	0,074341	0,000195	0,557581	15,9734817
37,50411	0,077841	0,000263	0,47774	13,6862108
37,98001	0,08291	0,000344	0,388984	11,1435447
38,48915	0,088582	0,000465	0,293509	8,40839381
38,98101	0,09594	0,000537	0,199179	5,70604469
39,52344	0,106513	0,000368	0,064481	1,84724026
40,02813	0,119604	0,00049	-0,085485	-2,4489591
40,45017	0,132718	0,000679	-0,235143	-6,736335
41,05272	0,152765	0,000487	-0,512212	-14,673759
41,49608	0,163129	0,00068	-0,793522	-22,732678
41,95829	0,161702	0,000469	-1,059084	-30,340451
42,50074	0,144453	0,000505	-1,315298	-37,680424
42,88442	0,129546	0,000712	-1,427361	-40,890785
43,55461	0,104065	0,000693	-1,522808	-43,625134
44,01006	0,090805	0,000523	-1,490362	-42,695626
44,5358	0,08251	0,000474	-1,391453	-39,862099
45,00538	0,081929	0,000473	-1,254539	-35,939811
45,5862	0,089304	0,000544	-1,105877	-31,680968
45,9788	0,099357	0,000611	-1,037728	-29,728648
46,53706	0,117755	0,000592	-1,000957	-28,675239
46,97982	0,137126	0,00086	-0,997628	-28,57987
47,59312	0,165526	0,000885	-1,039994	-29,793564
48,02374	0,192371	0,001556	-1,102452	-31,58285
48,52824	0,227959	0,00172	-1,207075	-34,580071
48,98108	0,267343	0,002259	-1,324167	-37,934502
49,44944	0,313611	0,001951	-1,496423	-42,869261
49,93436	0,367851	0,003299	4,555942	130,517819

Tabela 10.33..... continuação da Tabela 10.32.

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	m/s	padrão	Radianos	Graus
50,39389	0,412694	0,003516	4.289839	122,894547
51,61371	0,453421	0,003549	3,735465	107,012939
51,43515	0,452618	0,003191	3,77632	108,183346
52,00771	0,453396	0,002853	3,545962	101,584091
52,49429	0,4387	0,003257	3,386523	97,0165107
53,0255	0,420826	0,003324	3,232988	92,6180672
52,95979	0,420981	0,003267	3,250233	93,1120989
54,09888	0,387224	0,003106	3,319585	95,0988827
54,51726	0,374787	0,003082	3,398333	97,3548415
54,97939	0,364283	0,002872	3,486203	99,8721257
55,58737	0,348028	0,003206	3,599932	103,130214
56,15288	0,330611	0,002915	3,679681	105,414849
56,55841	0,314701	0,002303	3,743689	107,248539
56,97707	0,305958	0,002804	3,804779	108,998634
57,51684	0,280634	0,00336	3,881908	111,208212
58,055	0,269926	0,002971	3,942701	112,949799
58,43127	0,268601	0,003451	3,983358	114,114534
59,16033	0,253714	0,00282	4,069773	116,590136
59,99361	0,243736	0,003211	4,151263	118,924647
60,44477	0,237525	0,003133	4,191786	120,085542

Tabela 10.34: Valores da aceleração em função da rotação do motor, com desbalanceamento
- ($M_5 = 10,7347 \text{ gr.}$).

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	m/s	padrão	Radianos	Graus
19,99651	0,006671	2,3E-05	3,510884	100,579183
20,56724	0,007704	4E-05	3,573407	102,37033
21,01141	0,008613	3,1E-05	3,623008	103,791291
21,42493	0,009541	4,4E-05	3,674654	105,270837
21,93728	0,010939	7,4E-05	3,733991	106,970712
22,5031	0,012735	5,6E-05	3,806131	109,037366
22,99303	0,014523	6,9E-05	3,876684	111,058556
23,46356	0,016539	6,5E-05	3,947311	113,081866
23,93606	0,018953	0,000178	4,024392	115,290069
24,36844	0,021754	0,00015	4,10241	117,525115
24,93601	0,026449	0,000134	4,227786	121,116864
25,40259	0,031298	0,000182	4,34413	124,449866
25,96297	0,039375	0,000157	4,52846	129,730519
26,40663	0,048889	0,000211	1,545956	44,2882735
26,92061	0,063532	0,000201	1,228431	35,1918736
27,52447	0,084472	0,000385	0,744733	21,334979
28,0271	0,095521	0,000456	0,368191	10,5478705
28,50105	0,100117	0,000298	0,061255	1,75482238
29,01747	0,101018	0,000369	-0,202976	-5,8148205
29,50222	0,102137	0,000314	-0,401471	-11,50127
30,00072	0,102511	0,000181	-0,573308	-16,424026
30,49466	0,104633	0,000165	-0,721106	-20,658117
30,88997	0,109037	0,000151	-0,850115	-24,353944
31,3931	0,120303	0,000245	-1,06779	-30,589859
31,92054	0,128696	0,000221	-1,500534	-42,987032
32,44195	0,123565	0,000337	4,478179	128,290078
33,46225	0,111055	0,000497	4,104273	117,578485
34,02841	0,10642	0,00016	3,959081	113,419051
34,56348	0,103738	0,000249	3,842971	110,092752

Tabela 10.35..... continuação da Tabela 10.34.

Rotação	Aceleração	Desvio	Ângulo de fase	
Hz	m/s	padrão	Radianos	Graus
35,05703	0,103449	0,000213	3,739872	107,13919
35,38451	0,104321	0,000222	3,679442	105,408002
35,96296	0,10574	0,00027	3,585809	102,725621
36,44263	0,108775	0,000253	3,501042	100,297231
36,9936	0,114162	0,000292	3,411639	97,7360294
37,51704	0,120521	0,000496	3,319451	95,0950439
38,02391	0,128995	0,00054	3,220463	92,2592532
38,42905	0,137207	0,000332	3,152291	90,3062739
38,94747	0,149694	0,000779	3,274758	93,8146868
39,47668	0,167529	0,000886	3,431306	98,2994461
40,00466	0,18914	0,00098	3,637502	104,206513
40,50446	0,211703	0,000981	3,890373	111,450716
41,00375	0,224646	0,001037	4,189891	120,031255
41,42785	0,216899	0,001042	4,436907	127,107725
42,00593	0,198545	0,000736	4,65722	133,419213
42,57954	0,178463	0,001223	1,498454	42,9274446
43,08914	0,158792	0,000544	1,450531	41,554555
43,55665	0,146232	0,000738	1,459437	41,8096925
43,96177	0,139529	0,000567	1,500924	42,9982047
44,58742	0,13837	0,000672	4,390489	125,777951
45,08845	0,145848	0,001156	4,64343	133,02416
45,57557	0,159015	0,001194	4,597161	131,698654
45,68006	0,163841	0,001148	4,59666	131,684301
46,55075	0,201041	0,002099	4,604274	131,902426
47,00343	0,230356	0,001923	4,637268	132,847632
47,56823	0,274995	0,002371	1,531034	43,8607907
48,00239	0,320137	0,002715	1,411019	40,4226222
48,47648	0,373155	0,002127	1,254971	35,9521868
49,04043	0,429474	0,003567	1,022628	29,2960657
49,55968	0,468288	0,001707	0,76586	21,9402215
49,99269	0,490668	0,002745	0,563948	16,1558824

Tabela 10.36..... continuação da Tabela 10.35.

Rotação	Aceleração	Desvio padrão	Ângulo de fase	
Hz	m/s		Radianos	Graus
50,49957	0,496797	0,003035	0,35143	10,0677044
51,03798	0,498037	0,002803	0,15253	4,36965241
51,68747	0,478589	0,003191	-0,067483	-1,933241
52,18573	0,467031	0,004521	-0,200556	-5,7454927
52,60717	0,451135	0,004599	-0,301542	-8,6385218
53,10417	0,435286	0,004726	-0,408434	-11,700745
53,92476	0,408212	0,003301	-0,578539	-16,573883
53,89912	0,406649	0,002783	-0,569783	-16,323042
54,93544	0,379113	0,004672	-0,739135	-21,174608
55,96017	0,349148	0,003979	-0,896351	-25,678505
55,93142	0,351197	0,003179	-0,88883	-25,463044
56,40391	0,337876	0,003206	-0,9539	-27,327158
56,99348	0,316323	0,003385	-1,04123	-29,828972
56,96655	0,314853	0,003846	-1,032363	-29,574952
57,43834	0,288273	0,004298	-1,111365	-31,835188
57,97455	0,283258	0,002874	-1,172435	-33,58771
58,51105	0,287805	0,003499	-1,217026	-34,865145
58,9462	0,282091	0,003942	-1,254856	-35,948892
60,00308	0,261316	0,003132	-1,356205	-38,85232
60,58882	0,260965	0,002049	-1,412558	-40,466711

Tabela 10.37: Valores da energia em função da rotação do motor, sem desbalanceamento - (M = 0,0 gr.) e com desbalanceamento (M1 = 3,9922 gr. e M2 = 6,1571 gr.).

Rotação	Fluxo de Energia (J/s)		
Hz	M0 = 0,0 gr.	M1 = 3,9922 gr.	M2 = 6,1571 gr.
19,969917	2,805E-09	9,929E-08	3,53E-07
20,44336	9,186E-09	9,54E-08	3,656E-07
20,92172	1,521E-08	6,85E-08	3,71E-07
21,421377	3,037E-08	5,05E-08	3,659E-07
21,908632	3,557E-08	4,205E-08	3,5E-07
22,503219	4,881E-08	1,383E-08	3,266E-07
22,890708	5,661E-08	1,856E-08	2,808E-07
23,554626	8,289E-08	8,812E-08	1,968E-07
23,835566	4,551E-08	1,819E-07	1,067E-07
24,511936	5,534E-08	2,876E-07	6,545E-08
25,009465	4,793E-08	4,011E-07	2,597E-07
25,532354	2,342E-08	6,185E-07	5,839E-07
26,079959	1,269E-09	8,355E-07	1,02E-06
26,486255	7,809E-09	9,606E-07	1,729E-06
27,080514	1,784E-08	1,495E-06	2,545E-06
27,486276	8,5E-08	1,479E-06	3,14E-06
28,009372	1,662E-07	1,298E-06	2,293E-06
28,518709	3,537E-07	4,457E-07	1,154E-06
28,988601	6,589E-07	1,005E-06	5,651E-06
29,449383	1,05E-06	2,755E-06	8,065E-06
30,004275	1,371E-06	3,837E-06	9,078E-06
30,50798	1,258E-06	4,119E-06	8,687E-06
30,933155	9,51E-07	2,26E-06	7,274E-06
31,387247	5,61E-07	2,216E-06	2,84E-06
32,006709	1,296E-07	3,225E-07	6,882E-06
32,502527	1,147E-07	9,919E-06	2,739E-05
32,888658	2,515E-07	1,898E-05	2,052E-05
33,668457	2,898E-07	1,264E-05	1,113E-05
34,066795	1,125E-07	7,73E-06	5,946E-06
34,451629	8,796E-09	4,523E-06	3,002E-06
34,883755	3,192E-07	2,659E-06	2,334E-06

Tabela 10.38..... continuação da Tabela 10.37.

Rotação	Fluxo de Energia (J/s)		
Hz	M0 = 0,0 gr.	M1 = 3,9922 gr.	M2 = 6,1571 gr.
35,403641	4,963E-07	9,626E-07	2,346E-06
36,022328	5,545E-07	4,849E-07	2,23E-06
36,537706	5,131E-07	5,66E- 07	2,845E-06
36,960597	4,756E-07	4,677E-07	3,735E-06
37,462119	4,199E-07	1,088E-06	5,096E-06
37,964399	3,677E- 07	2,03E-06	7,134E-06
38,509461	2,951E-07	2,867E-06	9,877E-06
38,999547	2,304E-07	4,069E-06	1,314E-05
39,659945	1,277E-07	2,842E-07	1,06E-05
40,057813	5,895E- 08	1,222E-07	4,062E-06
40,549399	7,717E-08	6,936E-06	8,18E-06
41,048148	1,843E-07	1,2E-05	2,772E-05
41,503531	3,352E-07	2,19E-05	6,15E-05
42,070022	5,849E- 07	2,943E-05	7,123E-05
42,574547	5,802E-07	3,453E-05	6,83E-05
43,128599	5,844E-07	3,047E-05	5,195E-05
43,512934	7,368E-08	1,986E-05	3,439E-05
43,959108	1,278E- 06	1,171E-05	2,6E-05
44,527185	6,71E-07	8,034E-06	2,366E-05
44,985142	1,965E-06	6,742E-06	2,368E-05
45,591562	1,514E-06	7,561E-06	2,55E-05
45,945411	1,306E- 06	8,243E-06	3,777E-06
46,465198	1,529E-06	9,914E-06	3,315E-05
47,041697	1,695E-06	1,206E-05	4,012E-05
47,502064	4,951E-07	1,521E-05	4,92E-05
47,856865	1,653E- 06	1,833E-05	6,263E-05
48,464836	8,896E-07	2,301E-05	8,18E-05
48,951933	1,878E-06	2,714E-05	9,742E-05
49,889649	3,942E-06	3,154E-05	0,0001115
49,951324	4,09E- 06	3,505E-05	0.0001089

Tabela 10.39..... continuação da Tabela 10.38.

Rotação	Fluxo de Energia (J/s)		
Hz	M0 = 0,0 gr.	M1 = 3,9922 gr.	M2 = 6,1571 gr.
50,419568	5,075E-06	3,125E-05	5,856E-05
50,947086	6,658E-06	5,776E-06	8,306E-05
51,521858	8,907E-06	3,503E-05	0,0002655
52,028669	1,189E-05	9,709E-05	0,0003418
52,326459	1,428E-05	0,0001617	0,0003359
53,066704	2,144E-05	0,0001829	0,0003125
53,404934	2,618E-05	0,0001769	0,0002693
53,98525	3,18E-05	0,0001626	0,0002466
54,580282	3,312E-05	0,000145	0,0002156
54,854872	3,187E-05	0,0001313	0,0001995
55,389238	2,612E-05	0,0001041	0,0001705
56,03511	2,413E-05	8,032E-05	0,0001532
56,551805	2,012E-05	8,156E-05	0,0001318
56,943818	1,733E-05	5,784E-05	0,000118
57,455246	1,331E-05	5,213E-05	0,0001047
58,046455	1,172E-05	5,426E-05	8,977E-05
58,493517	1,063E-05	4,634E-05	8,624E-05
59,075881	9,372E-06	4,163E-05	7,512E-05
60,011266	6,297E-06	3,433E-05	6,98E-05
60,906092	5,656E-06	3,527E-05	6,101E-05

Tabela 10.40: Valores da energia em função da rotação do motor, com desbalanceamento (M3 = 7,9617 gr., M4 = 8,5629 gr. e M5 = 10,7347 gr.).

Rotação	Fluxo de Energia (J/s)		
Hz	M3 = 7,9617 gr.	M4 = 8,5629 gr.	M5 = 10,7347 gr.
19,969917	6,63E-07	1,063E-06	1,421E-06
20,44336	6,947E-07	1,171E-06	1,528E-06
20,92172	7,21E-07	1,336E-06	1,594E-06
21,421377	7,289E-07	1,505E-06	1,65E-06
21,908632	7,272E-07	1,721E-06	1,707E-06
22,503219	6,973E-07	1,884E-06	1,729E-06
22,890708	6,274E-07	2,128E-06	1,666E-06
23,554626	5,055E-07	2,376E-06	1,562E-06
23,835566	2,95E-07	2,729E-06	1,32E-06
24,511936	1,254E-08	3,389E-06	1,017E-06
25,009465	5,262E-07	3,741E-06	1,9E-07
25,532354	1,326E-06	4,157E-06	9,268E-07
26,079959	2,553E-06	4,435E-06	3,603E-06
26,486255	4,199E-06	4,423E-06	7,309E-06
27,080514	3,44E-06	3,282E-06	5,07E-06
27,486276	3,656E-07	1,696E-07	4,674E-06
28,009372	4,667E-06	8,017E-06	1,488E-05
28,518709	1,055E-05	1,343E-05	2,167E-05
28,988601	1,337E-05	1,616E-05	2,415E-05
29,449383	1,444E-05	1,559E-05	2,314E-05
30,004275	1,327E-05	1,156E-05	1,993E-05
30,50798	1,143E-05	9,71E-06	1,364E-05
30,933155	5,193E-06	2,797E-06	3,23E-05
31,387247	7,447E-06	1,839E-05	3,517E-05
32,006709	3,741E-05	2,614E-05	5,241E-05
32,502527	3,235E-05	2,593E-06	3,408E-05
32,888658	2,091E-05	7,304E-06	1,596E-05
33,668457	1,226E-05	4,96E-06	1,341E-05
34,066795	8,767E-06	6,103E-06	1,36E-05
34,451629	8,39E-06	5,519E-06	1,672E-05
34,883755	7,963E-06	6,365E-06	1,884E-05

Tabela 10.41..... continuação da Tabela 10.40.

Rotação	Fluxo de Energia (J/s)		
Hz	M3 = 7,9617 gr.	M4 = 8,5629 gr.	M5 = 10,7347 gr.
35,403641	8,313E-06	7,667E-06	2,148E-05
36,022328	9,318E-06	9,378E-06	2,578E-05
36,537706	1,123E-05	1,169E-05	3,128E-05
36,960597	1,242E-05	1,452E-05	3,8E-05
37,462119	1,578E-05	1,878E-05	4,692E-05
37,964399	2,03E-05	2,363E-05	5,413E-05
38,509461	2,548E-05	2,97E-05	3,749E-05
38,999547	2,037E-05	3,944E-05	5,939E-06
39,659945	8,49E-06	5,229E-05	5,443E-05
40,057813	1,743E-05	6,621E-05	0,0001456
40,549399	5,91E-05	9,168E-05	0,0001948
41,048148	0,0001017	0,0001078	0,0001903
41,503531	0,000114	0,0001093	0,000167
42,070022	0,0001067	9,29E-05	0,0001343
42,574547	8,609E-05	7,843E-05	0,0001095
43,128599	6,391E-05	5,705E-05	0,0001001
43,512934	5,076E-05	4,776E-05	9,713E-05
43,959108	4,521E-05	4,282E-05	8,608E-05
44,527185	4,523E-05	4,281E-05	0,000107
44,985142	4,863E-05	4,698E-05	0,0001201
45,591562	5,34E-05	5,339E-05	0,0001255
45,945411	6,199E-05	6,676E-05	0,0001692
46,465198	7,289E-05	8,187E-05	0,0002073
47,041697	8,756E-05	0,0001085	0,0002674
47,502064	0,0001184	0,0001369	0,0002953
47,856865	0,0001387	0,0001811	0,0002748
48,464836	0,0001772	0,0002345	0,0001034
48,951933	0,0001831	0,0003082	0,0002097
49,889649	0,0001254	0,0004039	0,0004532
49,951324	2,171E-05	0,0004871	0,0006191

Tabela 10.42..... continuação da Tabela 10.41.

Rotação	Fluxo de Energia (J/s)		
Hz	M3 = 7,9617 gr.	M4 = 8,5629 gr.	M5 = 10,7347 gr.
50,419568	0,0002678	0,0005372	0,0006518
50,947086	0,0004319	0,0005364	0,0005831
51,521858	0,0004604	0,0005101	0,0005335
52,028669	0,000429	0,0004646	0,0004869
52,326459	0,0003968	0,0004145	0,0004398
53,066704	0,0003645	0,0004188	0,0003655
53,404934	0,0003255	0,0002963	0,0003693
53,98525	0,0002924	0,0002515	0,0002984
54,580282	0,0002595	0,0002029	0,0002388
54,854872	0,0002299	0,0001432	0,0002423
55,389238	0,0002083	0,0001004	0,0002193
56,03511	0,0001868	7,297E-05	0,00019
56,551805	0,000164	5,109E-05	0,0001906
56,943818	0,0001547	2,495E-05	0,0001636
57,455246	0,0001358	8,842E-06	0,0001502
58,046455	0,000121	4,26E-07	0,000144
58,493517	0,00011	1,525E-05	0,0001337
59,075881	9,9E-05	2,629E-05	0,0001094
60,011266	9,669E-05	2,993E-05	0,0001015
60,906092	8,071E-05	3,024E-05	9,756E-05