

FLÁVIO PEREIRA LALLI
Engenheiro de Eletrônica,
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1975

PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO PRELIMINAR
DE UM CALIBRADOR ACÚSTICO PORTÁTIL

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da USP
para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta
Professor Doutor do Departamento de
Engenharia Mecânica da EPUSP

São Paulo, 1985

Agradecimentos

Gostaríamos, em primeiro lugar, de manifestar nosso reconhecimento à orientação inestimável do Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta, sem a qual o presente trabalho jamais teria sido escrito. Gostaríamos, também, de agradecer à Sra. Vera Lúcia Assaiante de Souza pelo trabalho e paciência na datilografia, assim como do Sr. Juan Antonio Pérez Pujante pela execução dos desenhos. Nossa gratidão deve ser manifestada, ainda, à ajuda e dedicação sem limites dos técnicos Ivo Silva Xavier, na usinagem das peças, dispositivos e modificações necessárias no protótipo, Geraldo Ferreira, no desenvolvimento e confecção do cone transdutor e da mola de desacoplamento do calibrador e Albertino Pedro Filho, nas múltiplas montagens e modificações do circuito eletrônico. Resta, ainda, manifestar nosso reconhecimento às sugestões, idéias, apoio e total disponibilidade dos Arquitetos Abel Santos Vargas e José Fernando Cremonesi, sem os quais não teria sido possível chegar até o ponto onde chegamos com o projeto do calibrador acústico portátil. Agradecemos, ainda, ao Engenheiro Antonio Luiz Rigo pelo desenvolvimento do oscilador eletrônico utilizado.

Resumo

O presente trabalho apresenta o processo (ainda não concluído) de desenvolvimento de um calibrador acústico portátil para medidores de nível sonoro, incluindo: a) a análise teórica do comportamento em função da temperatura e da pressão atmosférica dos quatro tipos mais comuns de calibradores acústicos portáteis; b) a comparação entre eles e a decisão por desenvolver um calibrador denominado "ressonante"; c) o ante-projeto acústico desse dispositivo; d) um projeto de protótipo visando implementar o circuito acústico definido no ante-projeto e; e) os ensaios preliminares do protótipo construído que, basicamente, atende às características esperadas. Em vista do sucesso na implementação do protótipo, um modelo industrializado já está sendo desenvolvido.

Abstract

This work presents the development (still not finished) of a portable acoustical calibrator for sound level meters, including: a) the theoretical analysis of the performance as a function of temperature and barometric pressure of the four main types of portable acoustical calibrators; b) the comparison between them and the decision to design a model named "ressonating"; c) its acoustical design; d) the mechanical drawings for a prototype attempting to implement the acoustical elements defined in the acoustical design and; e) the results of the preliminary tests for this prototype which basically fulfill the expected characteristics. As the results with this prototype have been satisfactory, a new, industrial design, is being developed.

INDICE

Agradecimentos.....	1
Resumo.....	2
Abstract	3
Índice	4
Notação e Nomenclatura	9
Lista de Figuras	16
Lista de Tabelas	20

I. INTRODUÇÃO

I.1. Objetivos	23
I.2. A Importância do controle dos ruídos	23
I.3. A Importância das medições dos níveis sonoros	24
I.4. A Importância do projeto	25

II. CALIBRADORES ACÚSTICOS PORTÁTEIS

II.1. Sua Utilidade	26
II.2. Sua Utilização	26
II.3. Características importantes	26
II.4. Tipos Mais comuns	29
II.4.a. Pistonfone	31
II.4.b. Calibrador de ruídos pseudo-aleatório	32
II.4.c. Calibrador multitonal	33
II.4.d. Calibrador ressonante	34

III. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS CALIBRADORES ACÚSTICOS

III.1. A Metodologia: Circuitos Equivalentes	37
III.1.a. Analogia Dinâmica	38
III.1.b. Representação dos Elementos mecânicos nos circuitos equivalentes tipo impedância	39
i) Massa mecânica rígida movendo-se sem atrito	39
ii) Mola imponderável sem atrito com constante de rigidez K.	40

iii) Efeitos de atrito viscoso	41
iv) Fontes de Força constante F_i	41
v) Fontes de velocidade constante v_i	41
III.1.c. Representação dos elementos acústicos nos circuitos equivalentes tipo impedância.....	42
i) Volume de ar enclausurado	43
ii) Tubo de ar	44
iii) Efeitos de atrito viscoso	48
iv) Fontes de pressão sonora constante p_i	50
v) Fontes de velocidade de volume constante U_i	50
III.1.d. Representação dos elementos de transdução nos circuitos equivalentes tipo impedância.	
i) Transdução mecano acústica	50
ii) Transdução eletromecânica eletrostática	51
iii) Transdução eletromagnética	51
III.2. Análise do comportamento dos circuitos equivalentes dos vários calibradores.....	55
III.2.a. Pistonfone	56
i) Influência da temperatura	56
ii) Influência da pressão	57
III.2.b. Calibrador de ruído psêudo-aleatório	57
i) Variação com a temperatura	59
ii) Variação com a pressão atmosférica	59
III.2.c. Calibrador Multitonal	60
Caso 1) Transdutor Composto por uma membrana tensionada, atuada sem vínculo mecânico por um transdutor eletrostático ou eletromagnético de reatância variável.	60
i) Comportamento em função da temperatura	62
ii) Comportamento em função da pressão atmosférica..	62

Caso 2) Transdutor eletromecânico mecanicamente ligado a um diafragma rígido que atua como transdutor mécano acústico	63
i) Comportamento em função da temperatura	65
ii) Comportamento em função da pressão atmosférica..	65
III.2.d. Calibrador Ressonante	66
i) Influência da temperatura e da pressão atmosférica	69
III.3 - Comparação entre os vários tipos de calibradores e escolha do tipo a ser implementado	71
 IV. ANTEPROJETO	
IV.1. Especificação do Calibrador	73
IV.2. O elemento piezoelétrico	74
IV.3. Configuração do calibrador	77
IV.4. Cálculo da relação entre p e e_i	79
IV.5. Introdução da Influência das variações da temperatura e pressão atmosférica na relação entre p e e_i	84
IV.6. Descrição do programa de computador utilizado para dimensionar os elementos do calibrador.....	87
IV.7. Fatores de incerteza dos valores calculados.....	90
IV.8. Parâmetros otimizados do circuito equivalente e resultados esperados.....	91
IV.9. Comentários relativos aos resultados previstos....	97
 V. CONSTRUÇÃO DO CALIBRADOR	
V.1. Carcaça externa	98
V.2. Circuito de alimentação elétrica	99
V.3. Circuito oscilador eletrônico	100
V.4. Circuito eletroacústico	102
V.4.a. Descrição do conjunto	103
V.4.b. Ajustes no circuito eletroacústico.	103
V.5. Montagem do calibrador	105

VI. MONTAGEM E ENSAIOS PRELIMINARES

VI.1. Ensaio visando determinar a influência efetiva da variação do volume equivalente dos microfones acoplados sobre o nível sonoro produzido pelo calibrador..	106
VI.2. Ensaio preliminar visando determinar a influência da temperatura no nível sonoro produzido pelo calibrador	107
VI.3. Ensaio preliminar visando a determinação da influência da pressão atmosférica no nível sonoro.....	108
VI.4. Comentários sobre os resultados dos ensaios	109
VII. CONCLUSÃO	111

Apêndice 1a: Lei do Silêncio do Município de São Paulo. Lei 8106 de 30/08/84 e Decreto 11467 de 30/10/1974	112
Apêndice 1b: Portaria 92, de 19/06/1980 do Ministério do Interior.	129
Apêndice 2: Resolução 448 de 14/10/1961 do Ministério da Justiça - CONTRAN	131
Apêndice 3: Decreto Presidencial 89431 de 08/03/84, uso do solo no entorno de aeroportos.	142
Apêndice 4: Norma reguladora NR-15 da Portaria 3214 de 08/06/74 do Ministério do Trabalho.....	153
Apêndice 5: Norma ABNT - Medidores de nível de som emitido por veículos automotores-EB-386	156
Apêndice 6: Descrição sumária do calibrador B&K tipo ... 4230 retirado do B&K Technical review, 1971 nº 4	165
Apêndice 7: Descrição dos ensaios realizados para a determinação dos parâmetros do elemento transdutor	171
Apêndice 8: Ensaio para a determinação da variação dos parâmetros T_E e da frequência de ressonância do elemento piezoelétrico utilizado.	178

Apêndice 9: Análise da configuração do calibrador B&K tipo 4230 adaptada ao elemento piezoelétrico utilizado.....	180
Apêndice 10: Listagem do programa de computador utilizado para a otimização dos elementos acústicos e mecânicos do calibrador.....	184
Apêndice 11: Detalhes da construção do oscilador eletrônico	194
Apêndice 12: Desenho mecânico do calibrador.....	196
Apêndice 13: Método para a medição da frequência de ressonância do conjunto "cone transdutor - mola de desacoplamento - massa adicional" - C_N , M_N , C_L	198
Apêndice 14: Método utilizado no ajuste da Frequência de Ressonância do Ressorador de Helmholtz.....	200
Apêndice 15: Método de variação e monitoração da temperatura na fase de ajustes da compensação eletrônica.....	203
Apêndice 16: Listagem dos Equipamentos Utilizados.....	204

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

206,

Notação e Nomenclatura

- a - raio de um tubo ou orifício, (m)
- \bar{a} - aceleração (m/s^2)
- a_i - raio de um tubo ou orifício genérico i - (m)
- \bar{A} - relação entre duas pressões sonoras no circuito equivalente da configuração implementada do calibrador acústico ressonante (número puro)
- B - densidade de fluxo magnético
- \bar{B} - relação entre duas pressões sonoras no circuito equivalente da configuração implementada do calibrador acústico ressonante (número puro)
- c - velocidade de propagação do som - (m/s)
- c_p - calor específico a pressão constante para o ar - ($J/kg^{\circ}C$)
- c_v - calor específico a volume constante para o ar - ($J/kg^{\circ}C$)
- C - compliância acústica da associação série entre as compliâncias acústicas C' e C_A (m^5/N)
- C' - compliância acústica da associação série entre as compliâncias acústicas C_1 e C_2 (m^5/N)
- \bar{C} - relação entre duas pressões sonoras no circuito equivalente da configuração implementado do calibrador acústico ressonante (número puro)
- C_A - compliância acústica de um transdutor associada à sua compliância mecânica (m^5/N)
- C_E - capacitância elétrica de um transdutor (F)
- C'_E - capacitância elétrica de um transdutor (F)
- C_i - compliância acústica da cavidade genérica i (m^5/N)
- C_k - compliância mecânica associada ao k ésimo modo de vibração da membrana tensionada do calibrador pseudo-aleatório (m/N)
- C_L - compliância mecânica da suspensão do cone transdutor mecano-acústico do calibrador ressonante implementado (m/N)

- C_M - símbolo indicativo genérico da compliância mecânica de um transdutor (m/N)
- C_M' - compliância mecânica de um transdutor (m/N)
- C_N - compliância mecânica da mola de desacoplamento entre o elemento piezoelétrico e o cone transdutor mecano-acústico do calibrador ressonante implementado (m/N)
- C_R - símbolo indicativo da cavidade do ressoador e sua compliância (m^5/N)
- C_{EA} - compliância acústica de um transdutor, associada à sua capacitância elétrica (m^5/N)
- C_{LA} - compliância acústica associada à compliância mecânica C_L (m^5/N)
- C_{MA} - compliância acústica associada à compliância mecânica C_M (m^5/N)
- C_{NA} - compliância acústica associada à compliância mecânica C_N (m^5/N)
- C_m - compliância acústica associada ao volume equivalente do microfone (N/m^5)
- C_1 - símbolo indicativo tanto da cavidade de acoplamento dos calibradores como da compliância acústica dessa cavidade (m^5/N)
- C_2 - símbolo indicativo tanto da cavidade atrás do transdutor mecano acústico como de sua compliância acústica (m^5/N)
- e - tensão elétrica (V)
- \bar{e} - base dos logaritmos neperianos (número puro)
- e_i - tensão elétrica de excitação (V)
- e_{ace} - tensão elétrica gerada por um acelerômetro (V)
- e_{osc} - tensão elétrica gerada por um oscilador - (V)
- f - frequência de oscilação (cps ou Hz)
- f_0 - frequência de ressonância (cps ou Hz)

- f_1 - frequência de ressonância do transdutor piezoelétrico utilizado quando acoplado à massa adicional M_1 - (Hz)
- f_2 - idem à massa adicional M_2 - (Hz)
- F - força mecânica (N)
- \bar{F} - fase da função de transferência (rad)
- F_M - força mecânica agindo sobre a massa M_T - (N)
- F_D - fase de \bar{D} (rad)
- i - corrente elétrica (Ampère)
- j - número complexo puro ($j = (-1)^{1/2}$)
- K - constante de rigidez de uma mola mecânica (N/m)
- λ - comprimento de um tubo ou orifício - (m)
- λ_i - comprimento de um tubo ou orifício genérico i (m)
- L - nível sonoro em dB SPL dB re 2×10^{-5} (N/m²)
- L_E - taxa relativa da variação de T_E em função da temperatura (1/°C)
- L_{fr} - taxa relativa da variação da frequência de ressonância do transdutor em função da temperatura (1/°C)
- m - massa mecânica (kg)
- m_i - massa mecânica associada ao tubo ou orifício genérico i (kg)
- M_A - símbolo indicativo genérico da massa acústica associada à massa mecânica de um transdutor (kg/m⁴)
- M_D - módulo de \bar{D}
- M_i - massa acústica do tubo ou orifício genérico i (kg/m⁴)
- M_k - massa mecânica associada ao k -ésimo modo de vibração da membrana tensionada do calibrador pseudo-aleatório - (kg)
- M_M - símbolo indicativo da massa mecânica de um transdutor (kg)
- M_N - massa mecânica equivalente à soma da massa adicional com a massa vibrante do cone transdutor mecano-acústico no circuito equivalente do calibrador ressonante implementado (kg)

- M_R - massa acústica associada ao "pescoço do ressoador (kg/m^4)
 M_T - massa acústica associada ao tubo de equalização entre a cavidade de acoplamento e o meio externo (kg/m^4)
 M_1 - massa acústica associada aos orifícios de equalização entre a cavidade de acoplamento e o restante do circuito acústico (kg/m^4)
 p - pressão sonora (N/m^2)
 p_i - pressão sonora de excitação (N/m^2)
 p_1 - pressão sonora no ponto 1 do circuito equivalente da Fig. IV.5 (N/m^2)
 p_2 - ídem no ponto (2) (N/m^2)
 p_3 - ídem no ponto (3) (N/m^2)
 $P(t)$ - valor instantâneo da pressão sonora (N/m^2)
 P - valor estático da pressão, em geral igual à pressão atmosférica (N/m^2)
 P_0 - valor de referência da pressão atmosférica (N/m^2)
 $P(t)$ - valor instantâneo no instante t da pressão total (N/m^2)
 q - carga elétrica armazenada em um transdutor eletrostático (V.C)
 $q(t)$ - valor instantâneo da parte oscilatória do volume de uma cavidade (m^3)
 Q - vazão de ar pela amostra na medida da resistência a fluxo dos materiais porosos (m^3/s)
 Q_C - fator de qualidade da ressonância do elemento transdutor (número puro)
 Q_R - fator de qualidade da ressonância do ressoador de Helmholtz (número puro)
 r_A - resistividade acústica de um material poroso (Ns/m^4)
 \bar{R} - relação entre e_{osc}/e_{ace} no ensaio para a determinação de T_E (número puro)

- R_A - resistência acústica de um elemento (Ns/m^5)
 R_E - resistência elétrica de um elemento (Ohm)
 R_M - resistência mecânica associada a um elemento (Ns/m)
 R_N - resistência mecânica associada ao cone transdutor mecano-acústico (Ns/m)
 R_R - resistência acústica associada ao ressoador de Helmholtz (Ns/m^5)
 RA_i - parte resistiva da impedância acústica de um elemento genérico i (Ns/m^5)
 R_m - constante resistiva de um elemento mecânico (Ns/m)
 S - área de uma superfície (m^2)
 S_M - área efetiva de um transdutor mecano-acústico (m^2)
 S_{acc} - sensibilidade de um acelerômetro (Vs^2/m)
 t - tempo (s)
 T - temperatura absoluta ($^{\circ}K$)
 \bar{T} - módulo (em dB) da função de transferência entre a pressão sonora na cavidade C_1 do calibrador e a tensão elétrica de excitação do elemento piezoelétrico
 T_e - tensão mecânica de esticamento de uma membrana (N/m)
 T_E - fator de transdução eletromecânica de um transdutor (V/N)
 U - velocidade de volume (m^3/s)
 U_i - velocidade de volume de uma fonte de velocidade de volume constante (m^3/s)
 v - velocidade mecânica (m/s)
 V - valor médio do volume de uma cavidade (m^3)
 V' - volume associado à compliância C' (m^3)
 V_i - volume da cavidade genérica i (m^3)
 V_R - volume da cavidade C_R (m^3)
 V_1 - volume da cavidade C_1 (m^3)
 V_2 - volume da cavidade C_2 (m^3)

- V_{eq} - volume equivalente de um microfone (m^3)
 $V(t)$ - volume total instantâneo de um cavidade (m^3)
 x - deslocamento ou variação de comprimento (m)
 x_0 - amplitude do deslocamento ou de variação do comprimento (m)
 $x(t)$ - valor instantâneo do deslocamento ou variação do comprimento (m)
 X_{Ai} - reatância acústica do tubo ou orifício genérico i (Ns/m^5)
 Z_M - admitância mecânica de um transdutor (m/Ns)
 Z_L - admitância de carga de um transdutor (m/Ns)
 Z_A - impedância acústica (Ns/m^5)
 Z_{Ai} - impedância acústica de um elemento genérico i (Ns/m^5)
 Z_E - impedância elétrica de um transdutor (Ohm)
 Z_L - impedância mecânica da carga apresentada a um transdutor (Ns/m)
 Z_0 - impedância acústica de ($C_1 + C_m$) (Ns/m^5)
 Z_1 - impedância acústica do tubo de equalização da cavidade C_1 (M_T e R_T) - (Ns/m^5)
 Z_2 - impedância acústica da associação entre o ressoador de Helmholtz (C_R e M_R) e a cavidade C_2 - (Ns/m^5)
 Z_3 - impedância acústica do furo de equalização entre a cavidade C_1 e o resto do circuito - (Ns/m^5)
 Z_{4a} - impedância acústica associada à suspensão do cone transdutor mecano-acústico e à sua massa somada à massa adicional - (Ns/m^5)
 Z_{4b} - impedância acústica associada à mola de desacoplamento entre o transdutor piezoelétrico e o cone transdutor mecano-acústico (Ns/m^5)
 Z_4 - impedância acústica associada ao elemento piezoelétrico (Ns/m^5)
 Z_5 - impedância acústica associada à capacitância do elemento

- piezoelétrico (Ns/m^5).
- Z_6 - impedância acústica associada à resistência da saída do oscilador (Ns/m^5)
- Z_{10} - impedância acústica da associação entre Z_0 e Z_1 (Ns/m^2)
- Z_{11} - impedância acústica da associação entre Z_{10} , Z_2 e Z_3 (Ns/m^5)
- Z_{12} - impedância acústica da associação entre Z_{11} , Z_{4a} e Z_{4b} (Ns/m^5)
- Z_{13} - impedância acústica da associação entre Z_{12} , Z_4 e Z_5 - (Ns/m^5)
- α_i - fator de correção do comprimento acústico de um tubo referente à extremidade i (número puro)
- β - fator de transformação do circuito equivalente tipo mobilidade para tipo impedância, no cone do transdutor eletromagnético-mecânico (número complexo)
- γ - relação entre c_p e c_v para um gás (número puro)
- η - coeficiente de viscosidade do ar (Ns/m^3)
- θ - temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- λ - comprimento de onda (m)
- μ - coeficiente dinâmico de viscosidade do ar (m^2/s)
- ζ - fator de transdução eletrostática (N/C)
- ρ - densidade do ar (kg/m^3)
- σ - densidade superficial (kg/m^2)
- ω - frequência angular (rad/s)

LISTA DE FIGURAS

Capítulo II

Figura II.1	- Esquema básico de um pistonfone	31
Figura II.2	- Esquema de Implementação de um calibrador de ruído psêudo-aleatório	32
Figura II.3	- Esquema básico de um calibrador multitonal	34
Figura II.4	- Esquema básico de um calibrador ressonante	35

Capítulo III

Figura III.1	- Volume de ar enclausurado	43
Figura III.2	- Tubo de ar que se move com um pistão rígido	46
Figura III.3	- Medição de resistência afluxo de materiais resistivos acusticamente	48
Figura III.4	- Transdução Mecano-Acústica	50
Figura III.5	- Circuito equivalente de um transdutor eletrostático operando como "fonte" sonora ou de vibrações	51
Figura III.6	- Circuito equivalente de um transdutor eletrostático operando como receptor sonoro.	51
Figura III.7	- Representação do transdutor eletromagnético como um circuito equivalente tipo mobilidade	53
Figura III.8	- Circuito equivalente tipo mobilidade de um transdutor eletromagnético com suas cargas mecânicas e elétricas acopladas ..	53
Figura III.9	- Circuito equivalente tipo impedância de um transdutor eletromagnético.....	54
Figura III.10	- Circuito equivalente simplificado do Pistonfone	56
Figura III.11	- Circuito equivalente do calibrador psêudo-aleatório para o k-ésimo modo de vibração da membrana	57

Figura III.12	- Circuito equivalente do calibrador psêudo-aleatório para o k-ésimo modo de vibração da membrana contados os elementos transportados para o lado acústico do circuito	58
Figura III.13	- Circuito equivalente resultante para o k-ésimo modo de vibração da membrana, no caso do calibrador de ruído psêudo-aleatório	58
Figura III.14	- Circuito equivalente simplificado de um calibrador multitonal com membrana tensionada atuada à distância por um transdutor eletrostático ou eletromagnético de relutância variável	60
Figura III.15	- Circuito equivalente simplificado de um calibrador multitonal com membrana tensionada atuada à distância, com a parte mecânica transferida para o lado acústico do circuito	61
Figura III.16	- Circuito equivalente de um calibrador multitonal cujo transdutor eletromecânico atua sobre o diafragma rígido.....	64
Figura III.17	- Circuito equivalente de um calibrador multitonal cujo transdutor atua sobre um diafragma rígido	64
Figura III.18	- Circuito equivalente simplificado para um calibrador ressonante	67
Figura III.19	- Circuito equivalente simplificado para o calibrador ressonante com a parte mecânica transferida para o lado acústico	67
Figura III.20	- Circuito equivalente do calibrado ressonante na frequência de oscilação	68

Capítulo IV

Figura IV. 1	- Circuito Equivalente do elemento piezoelétrico escolhido (operando como fonte sonora)	75
--------------	---	----

Figura IV.2 - Configuração do calibrador projetado	77
Figura IV.3 - Circuito equivalente da configuração do ca librador projetado	78
Figura IV.4 - Circuito equivalente do calibrador com os elementos elétricos e mecânicos transferi- dos para o lado acústico do circuito	79
Figura IV.5 - Representação do circuito equivalente por meio de impedâncias	80

Capítulo V

Figura V.1 - Corte esquemático do calibrador	98
Figura V.2 - A carcaça externa do calibrador (desenho es- quemático)	99
Figura V.3 - Visão esquemática do circuito de alimenta- ção elétrica	100
Figura V.4 - Esquema elétrico do circuito de alimentação elétrica do calibrador	101
Figura V.5 - Esquema eletrônico do circuito oscilador ..	102
Figura V.6 - Corte esquemático do circuito eletroacústi- co	103

APÊNDICES

1. Apêndice 7

Figura 7.1 - Circuito equivalente da montagem realizada para o ensaio de determinação de T_E	173
Figura 7.2 - Montagem realizada para medição de S_M	175
Figura 7.3 - Circuito equivalente da montagem utilizada para medir S_M	175

2. Apêndice 8

Figura 8.1 - Montagem utilizada para medição da variação de T_E e da frequência de ressonância em fun- ção da temperatura	178
---	-----

3. Apêndice 9	
Figura 9.1. - Configuração do calibrador 4230 adaptada ao elemento piezoelétrico utilizado	180
Figura 9.2 - Circuito equivalente da configuração da Fig. 9.1	180
Figura 9.3 - Circuito equivalente a 25°C da configuração da Fig. 9.1 em função do fator Q da ressonância do elemento piezoelétrico	181
4. Apêndice 11	
Figura 11.1 - Lay-out do circuito impresso (visto por cima)	195
5. Apêndice 13	
Figura 13.1 - A montagem para a medição e ajuste da frequência de ressonância do cone	199
6. Apêndice 14	
Figura 14.1 - Dispositivo para variar o volume da cavidade C_R	200
Figura 14.2 - Esquema da montagem utilizada para a sintonização do ressoador de Helmholtz	201

LISTA DE TABELAS

Capítulo II

- Tabela II.1 - Erro introduzido na calibração pela presença de ruídos externos na câmara de acoplamento 27
- Tabela II.2 - Erro introduzido na calibração pela distorção harmônica do sinal senoidal 27
- Tabela II.3 - Influência do acoplamento de um microfone de volume equivalente $0,2\text{cm}^3$ em uma cavidade de volume V em função do volume da cavidade 28

Capítulo IV

- Tabela IV.1 - Parâmetros do circuito equivalente do elemento piezoelétrico. (média de 3 medições de cada parâmetro) 75
- Tabela IV.2 - Valores dos elementos acústicos e mecânicos do projeto utilizado a ser implementado (valores nominais) 91
- Tabela IV.3 - Valores em dB do módulo da função de transferência entre p e e_i calculados para o circuito equivalente do calibrador com os valores da tabela IV.2, em 1000 Hz, para várias condições de pressão atmosférica e temperatura ($V_{eq} = 0,14\text{ cm}^3$) 93
- Tabela IV.4 - Valores em dB do módulo da função de transferência entre p e e_i para o circuito equivalente do calibrador com os valores da tabela IV.2 em função do volume equivalente do microfone acoplado e da temperatura em 940 mbar sem compensação em temperatura. 94

Tabela IV.5 - Os valores em dB da função de transferência entre p e e_i para o circuito equivalente do calibrador com os valores da tabela IV.2 calculados em função do volume equivalente do microfone acoplado e da temperatura em 500 mbar, sem compensação de temperatura	95
Tabela IV.6 - Valores em dB da função de transferência entre p e e_i para o circuito equivalente do calibrador com os valores da tabela IV.2 calculados em função do volume equivalente do microfone acoplado e da temperatura em 1.100 mbar, sem compensação de temperatura	96
Tabela IV.7 - Valor em cm^3 do volume equivalente do acoplador (cavidade C_1) calculados através dos resultados das tabelas IV.4, IV.5 e IV.6.....	97

Capítulo VI

Tabela VI.1 - Resultado dos ensaios preliminares, visando determinar a influencia do volume equivalente do microfone no nível sonoro produzido pelo calibrador a 943 mbars e 22°C.	106
Tabela VI.2 - Resultados dos ensaios preliminares visando levantar a influência da pressão atmosférica no nível de pressão sonora produzido pelo calibrador, em um microfone com volume equivalente de $0,04 \text{ cm}^3$...	107
Tabela VI.3 - Resultado dos ensaios preliminares visando determinar a influência da temperatura no nível sonoro produzido pelo calibrador em um microfone de $0,04 \text{ cm}^3$ em 943 mbar.	108

APÊNDICES

Apêndice 11

Tabela 11.1 - Valores dos componentes eletrônicos do oscilador eletrônico do calibrador.....	194
--	-----

I. INTRODUÇÃO

I.1- Objetivos:

O objetivo dos trabalhos que originaram a presente Dissertação é o desenvolvimento de um modelo nacional de calibrador acústico portátil, para medidores de nível sonoro, trabalhos esses ainda em andamento no Núcleo de Estudos de Acústica da Divisão de Edificações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A - IPT.

O objetivo da presente Dissertação é a apresentação da parte desses trabalhos realizada, até o momento, e que diz respeito ao projeto, construção e avaliação preliminar do protótipo do calibrador portátil em desenvolvimento.

I.2- A importância do controle dos ruídos.

A importância do controle dos níveis sonoros, e de seus efeitos sobre o homem, tem se tornado cada vez mais evidente na sociedade moderna e industrializada, os efeitos desse fato atingindo de forma crescente a sociedade brasileira. A regulamentação dos níveis sonoros produzidos por fontes fixas já existe em várias cidades do Brasil, incluindo a cidade de São Paulo, onde vigora a "Lei do Silêncio do Município de São Paulo" (Lei nº 8.106 de 30/08/74 e Decreto 11.467 de 30/10/74) - ver Apêndice 1a : que estabelece, em função do zoneamento da cidade, e dos horários, os níveis sonoros máximos na divisa das fontes fixas. Também regulando os níveis sonoros produzidos por fontes fixas, já existe a Portaria nº 092 de 19/06/80, do Ministério do Interior (ver Apêndice 1b), que estabelece, em todo o território nacional, que os níveis sonoros máximos produzidos por uma fonte fixa não devem ultrapassar em mais de 10 dB(A) o nível de ruído de fundo no local.

Além das regulamentações sobre fontes fixas, o CONTRAN (Conselho Nacional do Trânsito) regula os níveis sonoros máximos produzidos pelos veículos automotores através da Portaria nº 448 de 14/10/1971, do Ministério da Justiça (ver Apêndice 2),

e o Decreto nº 89.431 de 08/03/1984 (ver Apêndice 3) regulamenta o uso do solo no entorno de aeroportos, em função do impacto sobre a população dos níveis sonoros produzidos por aeronaves.

O ruído ocupacional também já se acha regulamentado pela Norma Regulamentadora NR-15 da Portaria 3.214 de 08/06/78, do Ministério do Trabalho, (ver Apêndice 4), que estabelece a dose máxima de energia sonora a que o trabalhador deve ser exposto durante sua jornada de trabalho.

Além dessas regulamentações de caráter legal, existem normas e recomendações que prescrevem níveis sonoros máximos em determinados tipos de instalações, normas que estabelecem os níveis sonoros máximos recomendados em certos tipos de ambientes, como bibliotecas, restaurantes, quartos de hotel, hospitais, etc, e, atualmente, em função da necessidade de exportar máquinas e equipamentos, a preocupação com os níveis sonoros produzidos por esses elementos toma importância capital na competitividade dos mesmos, no mercado internacional.

1.3- A importância das medições dos níveis sonoros.

Em função de todas as regulamentações, normas e necessidades específicas do mercado, a importância das medições precisas, repetitivas e comparáveis internacionalmente fica óbvia: os níveis sonoros devem ser corretamente medidos, seja para evitar gastos financeiros com tratamentos acústicos desnecessários, seja para evitar problemas sociais junto a eventuais fontes ruidosas, seja para que os níveis sonoros produzidos por um equipamento a ser exportado produzam as mesmas leituras aqui e no exterior, além de poderem ser comparados, de forma justa e competitiva, com aquelas produzidas por equipamentos concorrentes.

Assim sendo, surgem duas necessidades básicas no Brasil:

i) o desenvolvimento de um sistema de normas que estabeleça os padrões e métodos de medição (compatíveis com o sistema utilizado internacionalmente, no caso da medição de ruídos produzidos por equipamentos) e;

ii) o desenvolvimento de instrumentação nacional, com características compatíveis com as dos equipamentos estrangeiros bastante difíceis de importar, na atual condição econômico-financeira do país.

I.4- A importância do projeto.

Dentre os instrumentos básicos que é preciso desenvolver e industrializar, encontram-se os Medidores de Nível Sonoro Portáteis, dos quais o modelo tipo II - ver Norma EB.386 no Apêndice 5. foi desenvolvido pelo IPT, entre 1978 e 1980, ainda com microfone importado) e o Calibrador Acústico Portátil, objetivo dos trabalhos que originaram a presente Dissertação.

O primeiro desses instrumentos possibilita, em quaisquer condições, a medição dos níveis sonoros, mas é através da utilização do Calibrador de Nível Sonoro que se ajusta a sensibilidade do aparelho, levando em conta toda a cadeia de medição, desde o microfone até o instrumento indicador, a fim de que as leituras sejam confiáveis, repetitivas e comparáveis, umas com as outras.

Em função da importância capital desse equipamento de apoio metrológico, na confiabilidade das leituras, é que se decidiu empreender a tarefa de desenvolver um modelo nacional, a fim de, em conjunto com outros equipamentos já desenvolvidos e ainda por desenvolver, lançar as bases de uma instrumentação nacional que viabilizará não só a fiscalização das regulamentações e normas já existentes, como também a difusão da aplicação das técnicas do controle de ruído, hoje bem pouco conhecidas em nosso país.

II - CALIBRADORES ACÚSTICOS PORTÁTEIS.

II.1- Sua utilidade.

Os calibradores acústicos portáteis foram desenvolvidos com o objetivo de possibilitar uma calibração mais precisa dos medidores de nível sonoro, que seu antigo método de calibração elétrica interna. A maior precisão na calibração é alcançada devido ao fato de ser possível, com a utilização dos calibradores acústicos, levar em consideração os cabos de extensão dos microfones e as próprias características atuais dos microfones, fatores difíceis de serem considerados no método antigo.

II.2- Sua utilização.

A utilização do calibrador acústico portátil é feita acoplando-se a ele o microfone do medidor de nível sonoro, de forma a que o seu diafragma fique diretamente exposto ao sinal conhecido de pressão acústica, gerado em uma câmara interna ao calibrador. Ajusta-se, em seguida, a sensibilidade (ganho) do amplificador eletrônico de entrada do medidor de nível sonoro, até que o valor do nível de pressão sonora, indicado pelo medidor, coincida com o valor do nível sonoro conhecido, produzido pelo calibrador. Essa operação, como dito no parágrafo anterior, leva em consideração, automaticamente, todas as influências dos elementos existentes desde o microfone até a entrada do medidor de nível sonoro.

II.3- Características importantes.

Podemos destacar algumas características importantes nos calibradores acústicos:

- ausência de interferência de ruídos externos: A tabela II.1 apresenta a influência na precisão da calibração das diferenças entre o nível sonoro L_1 , gerado pelo calibrador, e o nível sonoro L_2 dos ruídos espúrios na câmara.

$L_1 - L_2$ (dB)	Erro introduzido (dB)
9	+ 0,5
10	+ 0,4
11	+ 0,3
13	+ 0,2
16	+ 0,1
19	+ 0,05

Tabela II.1 - Erro introduzido na calibração pela presença de ruídos externos, na câmara de acoplamento.

Isso implica que os níveis sonoros devem ser bastante elevados (acima de 94 dB SPL) e que se deve procurar isolar, o melhor possível, a câmara de acoplamento do microfone dos ruídos externos.

- baixa distorção harmônica: no caso de os sons gerados pelo calibrador serem tons puros, é importante que sejam isentos de distorção harmônica. A tabela II.2 apresenta a influência da distorção harmônica na precisão da calibração.

Distorção harmônica total (%)	Erro na Calibração (dB)
12	+ 0,5
10	+ 0,4
7	+ 0,3
5	+ 0,2
2,5	+ 0,1
1,2	+ 0,05

Tabela II.2 - Erro introduzido na calibração pela distorção harmônica do sinal senoidal.

Desta forma a distorção máxima admissível é de 1% para que a contribuição desse fator seja inferior a 0,05 dB.

- nível sonoro independente de variações na pressão atmosférica e temperatura: é importante que o nível sonoro produzido pelo calibrador não varie com a pressão e com a temperatura a serem acrescentadas em cada caso.
- nível sonoro independente do microfone acoplado: é muito interessante que o nível sonoro produzido pelo calibrador seja o mesmo, independentemente do microfone a ele acoplado. Essa característica está ligada ao volume da câmara de acoplamento, que deve ser muito maior que o volume equivalente* dos microfones a serem calibrados. No caso de microfones condensadores de uma polegada, o volume equivalente máximo, previsto pelas normas, é de $0,2 \text{ cm}^3$. A tabela II.3 apresenta a influência de um microfone com volume equivalente de $0,2 \text{ cm}^3$ no valor do nível sonoro em função do volume da câmara de acoplamento.

V (cm^3)	Variação no nível sonoro (dB)
1	- 1,6
2	- 0,83
3	- 0,56
4	- 0,42
5	- 0,34
6	- 0,28
7	- 0,24
8	- 0,21
9	- 0,19
10	- 0,17
15	- 0,11
20	- 0,09

Tabela II.3 - Influência do acoplamento de um microfone de volume equivalente $0,2 \text{ cm}^3$ em uma cavidade de volume V em função do volume da cavidade.

Assim, o volume da câmara de acoplamento deve ser superior a 20 cm^3 para que a influência do volume equivalente dos microfones, acoplados no nível sonoro, seja inferior a 0,1 dB.

*Ver definição na norma ANSI no S1.12-1967.

- frequências de operação: seria muito interessante que o calibrador oferecesse calibração numa ampla gama de frequências. No entanto, é fundamental que entre essas frequências esteja incluída a frequência de 1 kHz, referência das curvas de ponderação A, B, C e D (ver Apêndice 4).
- geometria de entrada para microfones: é muito importante que seja possível o acoplamento de microfones condensador de uma polegada tipo L*, que são facilmente calibráveis em acopladores por reciprocidade e que, portanto, podem ser utilizados para aferir os calibradores periodicamente, de modo a corrigir o valor nominal do nível sonoro produzido pelo calibrador, que varia com seu envelhecimento. Dessa forma, o diâmetro de entrada do microfone deve ser de 24 mm e a abertura para a entrada da câmara, onde o sinal acústico é produzido, de 18,6 mm.
- parâmetros práticos de utilização: ele deve ser imune aos níveis normais de vibração e choque, oriundos do manuseio e transporte do equipamento; o usuário deve ser alertado, sempre que a carga de baterias (se for o caso) for insuficiente para o perfeito funcionamento do aparelho; além disso, é importante que o tempo pelo qual perdura o sinal acústico, em cada operação de calibração, seja suficiente para o ajuste do ganho do medidor de nível sonoro, o que, em geral, leva cerca de 60 segundos.

II.4- Tipos mais comuns.

São três os tipos de calibradores acústicos portáteis, de conhecimento generalizado entre os profissionais da área de controle de ruído: o pistonfone, o calibrador multitonal e o calibrador ressonante:

- O primeiro deles é um instrumento clássico, considerado como uma fonte primária de som, sendo descrito na bibliografia (ver Referência 4), e fabricado por, pelo menos, duas indústrias especializadas no ramo: a Bruel & Kjaer Instruments Inc., (tipo 4220) [6] e Robotron Messelektronik (tipo 0003) [8].

Um calibrador multitonal (tipo 1562-A) é fabricado pela empresa GEN RAD (antiga General Radio) [8], não havendo de

*Ver norma ANSI no S1-12-1967.

meu conhecimento, uma descrição detalhada desse tipo de equipamento na bibliografia.

O calibrador que denominamos ressonante conta com uma descrição sumária pelo fabricante mais conhecido, a Bruel & Kjaer Instruments Inc. (ver Referência [7] com cópia no Apêndice 6), que fabrica o calibrador acústico tipo 4230. Também a Robotron Messelektronik [8] fabrica um calibrador acústico, que, pelas especificações, deduz-se do tipo ressonante (modelo 05000).

Aos modelos mais conhecidos decidimos incluir, na análise, o calibrador que denominamos "de ruído psêudo-aleatório", com que tivemos contacto uma única vez através de um modelo fabricado pela firma inglesa CASTLE, e do qual não conseguimos encontrar nenhuma referência bibliográfica. No entanto, seu princípio de funcionamento é de fácil dedução e as características do calibrador bastante interessantes e, por isso, decidimos incluir na análise preliminar para a escolha do calibrador a ser implementado.

Assim sendo, a descrição sumária apresentada abaixo conta com base em bibliografia apenas no caso do pistonfone [4], [5] e do calibrador ressonante [7]. No caso do calibrador multitonal, e no de ruído psêudo-aleatório, aplicamos nossos conhecimentos das possíveis formas de implementar os efeitos alcançados para "reconstruir" esses equipamentos.

Desses quatro tipos, o pistonfone e o calibrador de ruído psêudo-aleatório não apresentam um oscilador eletrônico para gerar os sinais acústicos. No caso de calibrador multitonal e do calibrador ressonante, no entanto, o sinal senoidal é produzido por osciladores eletrônicos e excita o transdutor eletroacústico para a geração do sinal acústico desejado.

Nenhum desses calibradores apresenta, na prática, restrições de projeto quanto a nível sonoro emitido (relação sinal/ruído) e distorção harmônica e é sempre possível construí-los de forma que apresentem imunidade aos níveis normais de vibração e choque, que alertem o usuário, quando a bateria estiver descarregada e que o sinal acústico perdure pelo tempo necessário. Como discutiremos no capítulo III, os problemas ocorrem, em geral, quanto à imunidade a variações no valor da pressão atmosférica, temperatura e, mesmo, quanto à utilização de microfones com dife-

rentes volumes equivalentes. Assim sendo apresentamos a seguir apenas as especificações básicas de nível sonoro e de influência da temperatura, pressão atmosférica e microfones acoplados.

a) Pistonfone: consiste basicamente no acoplamento de um ou mais pistões vibrantes (perfeitamente sincronizados) a uma cavidade de volume conhecido a qual é acoplado o microfone, o movimento senoidal dos pistões sendo gerado por um excêntrico que gira com velocidade constante excitada por um motor elétrico de rotação controlada, de forma que tanto a amplitude como a frequência de oscilação dos pistões é perfeitamente conhecida. A Figura II.1 apresenta um esquema básico de um pistonfone.

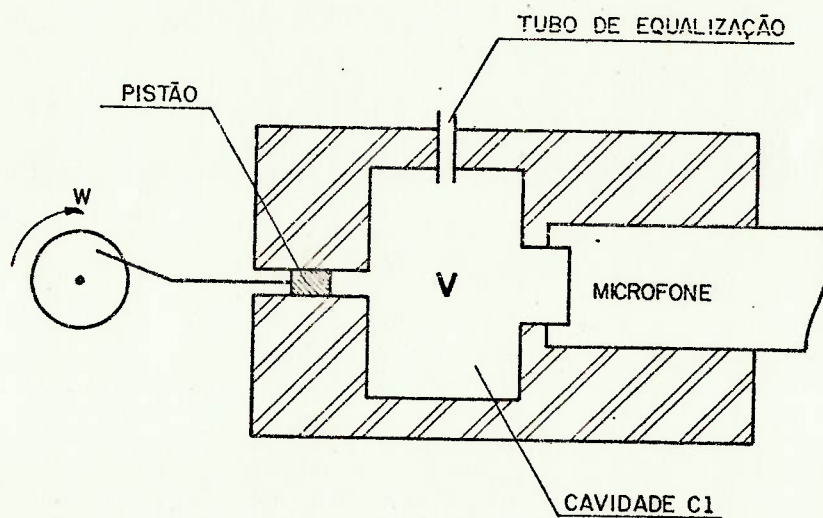


Figura II.1 - Esquema básico de um pistonfone.

As especificações do modelo B&K tipo 4220 são, a 1013 mbar, as seguintes:

tipo de sinal acústico: senoidal

frequência: 250 Hz

nível sonoro: 124 dB re $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$

precisão de calibração: $\pm 0,1 \text{ dB}$

b) Calibrador de Ruído Psêudo-Aleatório: No caso deste calibrador, o sinal acústico é obtido através do lançamento, contra uma membrana, de uma saraivada contínua de pequenas esferas de aço, resultando num ruído de caráter psêudo-aleatório. O ruído seria aleatório caso, além do nível sonoro instantâneo não ser previsível, as frequências geradas também não o fossem. No caso em questão as frequências são as frequências de ressonância da membrana nos múltiplos modos excitados pelo choque instantâneo e puntual das esferas e por isso classificamos o ruído como "psêudo-aleatório". Mantendo constante a quantidade de movimento com que as esferas atingem a membrana assim como o número de choques por unidade de tempo, é possível manter o nível sonoro estatisticamente constante. A Figura II.2 mostra um esquema básico possível para esse tipo de calibradores.

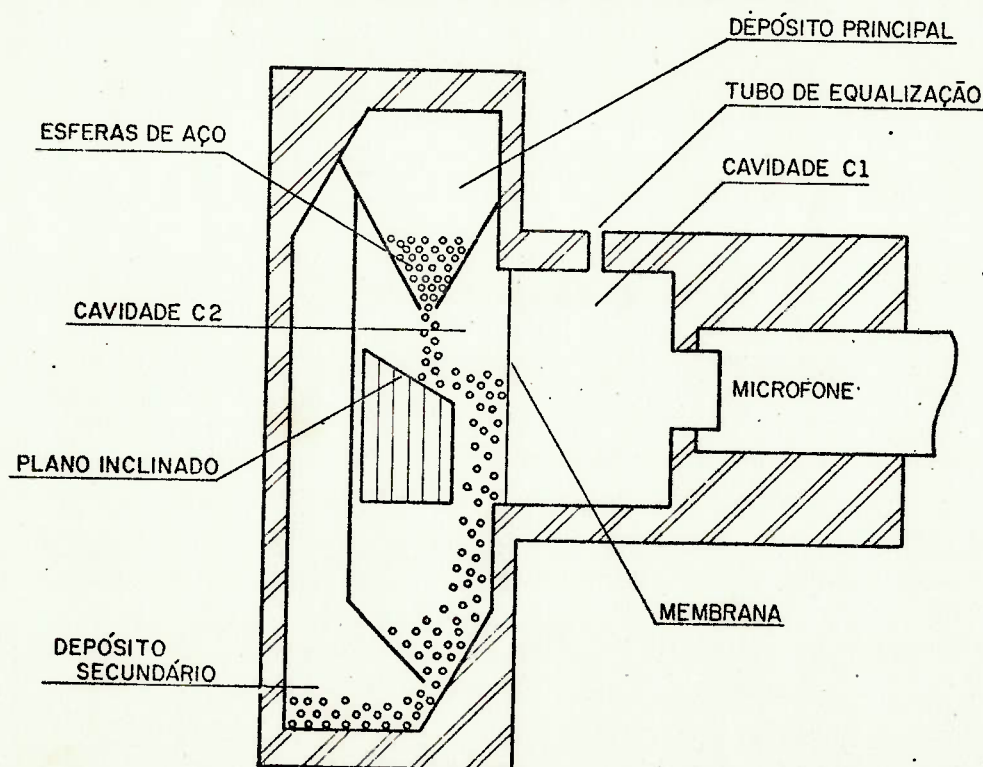


Figura II.2 - Esquema de implementação de um calibrador de ruído psêudo-aleatório.

Uma vez que são inúmeros os modos de vibração excitados, o som gerado será complexo, contendo um grande número de componentes senoidais, a amplitude de cada um deles dependendo da tensão e densidade superficial da membrana, da força de excitação, do ponto de excitação e do próprio modo de vibração em questão. A amplitude do sinal é flutuante uma vez que o nível sonoro passa por um máximo a cada choque, decrescendo ligeiramente até o próximo choque, e assim por diante. O fato de, no caso de membranas com dimensões finitas, as frequências naturais dos vários modos não se distribuírem de forma harmônica, contribui ainda mais para o caráter "aleatório" do som gerado.

As especificações para um calibrador desse tipo devem ser, segundo a opinião do candidato:

tipo de sinal acústico: psêudo-aleatório

faixa de frequências: 300 a 4000 Hz

nível sonoro: 114 dBA-120 dBA

precisão de calibração: $\pm 0,5$ dBA

c). Calibrador Multitonal: é um calibrador que gera vários tons puros nas frequências correspondentes, em geral, ao centro das faixas de oitava utilizadas nas medições acústicas. São compostos por vários osciladores eletrônicos, sintonizados, cada um, numa das frequências de interesse, chaveados para excitar o transdutor eletroacústico que gera o sinal acústico na cavidade onde vai acoplado o microfone do medidor de nível sonoro a ser calibrado. A Figura II.3 mostra um esquema básico possível de um desses calibradores.

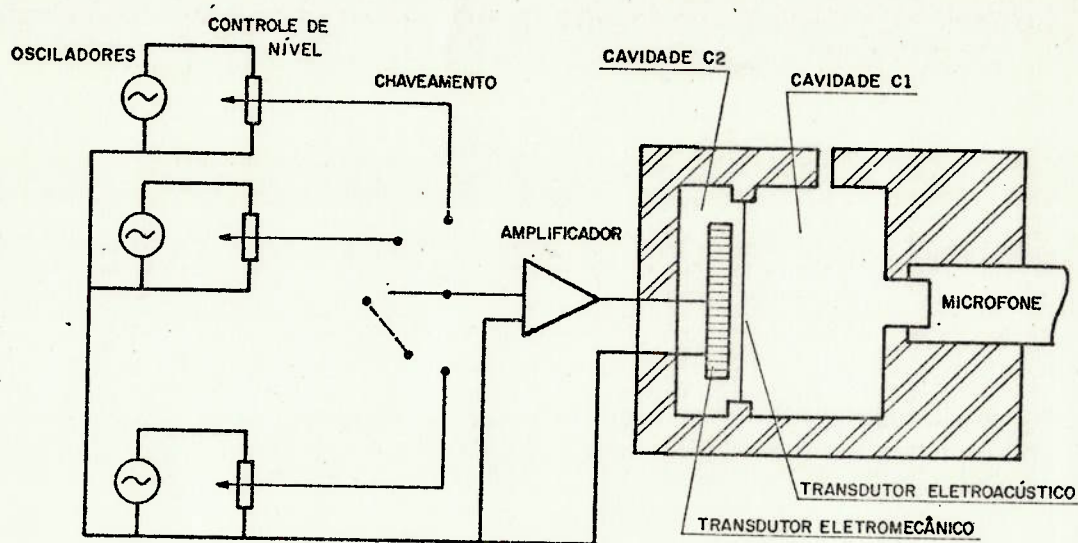


Figura II.3 - Esquema básico de um calibrador multitonar.

A razão para se utilizarem vários osciladores é a necessidade de compensar diferenças nas características do transdutor nas várias frequências de forma a que o nível sonoro seja o mesmo em todas elas. Os circuitos eletrônicos oferecem, também, a possibilidade de compensar automaticamente variações em função da temperatura no comportamento acústico, mecânico, do transdutor, e do próprio circuito eletrônico.

As especificações do modelo GR-1562-A são, a 1013 mbar e temperatura abaixo de 23°C:

tipo de sinal acústico: senoidal

frequências: 125, 250, 500, 1000, 2000 Hz

nível sonoro: 114 dB re 2×10^{-5} N/m²

precisão de calibração: +0,3dB em 500Hz, +0,5dB nas outras frequências.

d) Calibrador ressonante: é composto por um oscilador eletrônico senoidal de frequência fixa, compensado em temperatura, excitando um transdutor eletroacústico (em geral piezoelétrico)

responsável pela geração da pressão sonora na cavidade à qual o microfone é acoplado. Este tipo de calibrador é construído de forma que ao invés de a parte posterior do transdutor ser composta apenas por uma cavidade simples, como ocorre no calibrador multitonal, vai acoplada a essa cavidade um ressoador de Helmholtz, sintonizado na frequência de excitação do transdutor, cuja ressonância mecânica principal também é ajustada para essa frequência. A Figura II.4 apresenta um esquema básico desse tipo de calibrador. [7].

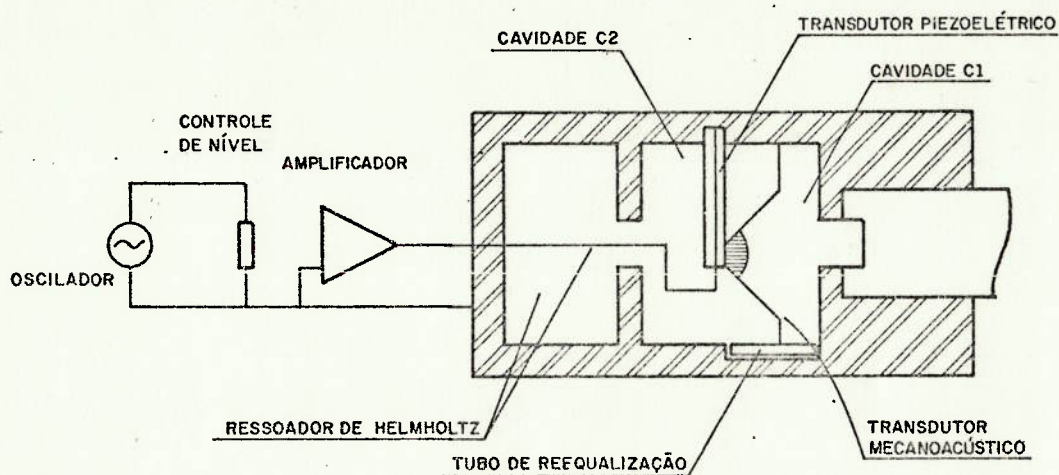


Figura II.4 - Esquema básico do calibrador ressonante.

As especificações típicas do modelo B&K tipo-4230 são, a 25°C:

tipo de sinal acústico: senoidal

frequência: 1000 Hz

nível sonoro: 94 dB re $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$

precisão de calibração: $\pm 0,25 \text{ dB}$

III. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS CALIBRADORES ACÚSTICOS.

No presente capítulo, faremos uma análise teórica do comportamento das configurações descritas de Calibradores Acústicos Portáteis, em função de variações nos valores da Pressão Atmosférica, temperatura e volume equivalente dos microfones acoplados.

Para isso, utilizaremos o circuito equivalente simplificado dessas configurações, estudando o comportamento desses circuitos em função dos parâmetros de interesse, como uma simulação do comportamento real dos calibradores.

O desenvolvimento descrito no parágrafo III.1 foi todo baseado nos desenvolvimentos constantes nas referências [3], [10], [12], [13], [16] e [17] utilizando uma tradução da terminologia de Beranek para as variáveis. O desenvolvimento da análise do comportamento do pistonfone foi baseado na referência [4] e o desenvolvimento da análise do comportamento do calibrador ressonante é calcado na descrição do calibrador 4230 (ver referência [7] no Apêndice 6).

Os desenvolvimentos relativos ao calibrador de ruídos psêudo-aleatórios, e ao calibrador multitonal são de autoria nossa.

III.1- A metodologia: Circuitos equivalentes.

No início dos desenvolvimentos do rádio e da telefonia, os fenômenos eletromagnéticos que ocorriam nos dispositivos eletrônicos utilizados, eram todos analisados com base no desenvolvimento direto das equações diferenciais dos circuitos. À medida, no entanto, que os equipamentos cresceram em complexidade, ficou cada vez mais claro que a utilização de uma representação esquemática era mais conveniente para a visualização do comportamento dos circuitos, que o desenvolvimento matemático completo até então realizado. Hoje o comportamento de sistemas eletrônicos extremamente complexos pode ser analisado com essa abordagem de maneira razoavelmente simples, enquanto sua análise, através de procedimentos puramente matemáticos, tornaria essa análise praticamente impossível.

Uma outra vantagem desses diagramas é que, além de facilitar a visualização dos sistemas, eles permitem escrever equações diferenciais que regem os circuitos basicamente por inspeção direta, ou seja, facilitam a análise matemática do circuito, quando isso é necessário, através das leis de Kirchhoff, teoremas de Têvenin, Norton e toda a teoria desenvolvida para análise de redes lineares.

Com o intuito de aplicar esse desenvolvimento na análise do comportamento dinâmico de dispositivos mecânicos e acústicos, desenvolveu-se a técnica de levantar seus "circuitos equivalentes", e, a partir desses diagramas esquemáticos, analisá-los, aplicando a teoria de redes lineares desenvolvida para circuitos elétricos e eletrônicos.

Tanto no caso elétrico como nos casos mecânico e acústico um mesmo elemento do circuito pode ser analisado de duas formas diferentes, dependendo da frequência considerada e das características do próprio elemento. Um mesmo elemento pode ser tratado como "discreto", no caso de frequências "baixas", ou como "distribuído", no caso de frequências "altas". A definição de frequências "altas" ou "baixas" depende das características do elemento. Por exemplo, em acústica um elemento será conside-

rado "discreto", quando suas dimensões físicas são muito menores que o comprimento de onda de uma onda sonora, na frequência considerada ($< 0,06\lambda$). Tanto num caso como no outro, é possível analisar os circuitos através dos diagramas esquemáticos e circuitos equivalentes. No entanto, para os efeitos do presente trabalho, trataremos apenas de elementos discretos e mesmo quando um determinado elemento mecânico não puder ser tratado, genericamente, dessa forma, faremos uma análise por partes, através da utilização de parâmetros discretos, superpondo, posteriormente, os resultados, tendo em vista que trataremos apenas de "circuitos" mecânicos e acústicos lineares.

III.1.a- Analogia Dinâmica.

Para o traçado desses "circuitos equivalentes", o que se faz é, em primeiro lugar, considerar os elementos mecânicos e acústicos como elementos de dois terminais, e, em segundo lugar, estabelecer uma analogia entre duas das grandezas físicas envolvidas nos dispositivos mecânicos e acústicos, e as grandezas corrente elétrica e tensão elétrica. A única restrição na escolha dessas grandezas é que seu produto tenha como resultado a grandeza física potência, como no caso elétrico. A escolha específica de um determinado tipo de analogia depende da facilidade de visualização no sistema físico desta ou daquela grandeza. No nosso caso utilizaremos os chamados circuitos equivalentes tipo "impedância", em que:

Circuitos mecânicos:

- a força é análoga à tensão elétrica
- a velocidade é análoga à corrente elétrica

Circuitos acústicos:

- a pressão sonora é análoga à tensão elétrica
- a velocidade de volume é análoga à corrente elétrica (ver parágrafo III.1.c, Equação III.7)

A razão dessa escolha é que, apesar de, na análise dos circuitos puramente mecânicos ser mais fácil a visualização da velocidade como analoga à tensão elétrica (circuitos equivalentes tipo "mobilidade"), no caso dos calibradores acústicos a parte mais complexa dos circuitos é a acústica onde a analogia utilizada é de mais fácil visualização, e tendo em vista que a relação entre uma força mecânica e a pressão sonora resultante tem como resultado uma área, é perfeitamente possível a interpretação dos circuitos mecânicos através da analogia escolhida.

III.1.b- Representação dos elementos mecânicos nos circuitos equivalentes tipo impedância

Devemos ter em consideração que todo o estudo visa apenas movimentos oscilatórios e não deslocamentos efetivos. Além disso, devido à possibilidade sempre presente de compor as mais diferentes formas de movimentos vibratórios a partir de senóides puras através da série ou da integral de Fourier, todo o estudo será realizado para um único componente senoidal, utilizando-se a notação complexa:

$$x = x_0 e^{+j\omega t} \quad (III.0)$$

onde:

- x = deslocamento instantâneo
- x_0 = amplitude do deslocamento
- ω = frequência angular do movimento oscilatório
- t = tempo
- $j = \sqrt{-1}$

i) Massa mecânica rígida movendo-se sem atrito

A equação que rege o movimento desse tipo de elemento mecânico é a segunda lei de Newton;

$$F = \frac{d}{dt} (m.v) \quad (III.1)$$

onde

F = força de excitação instantânea

m = é o valor da massa mecânica, e

v = é a velocidade instantânea do movimento oscilatório na direção de F

mas

$$v = \frac{dx}{dt} = + j\omega x$$

e

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = +j\omega (+j\omega x) = j\omega v$$

Portanto

$$F = j\omega m v \quad (\text{III.2})$$

Substituindo mentalmente F por (e) (a tensão elétrica análoga à força no circuito equivalente tipo impedância) e v por (i) , vemos que a equação (III.2) representa a equação de um "indutor elétrico" de valor m . Assim, uma massa mecânica rígida sem atrito de valor m é representada por um indutor m no circuito equivalente tipo impedância.

ii) Molar imponderável sem atrito com constante de rigidez K

A equação que rege o movimento de uma mola mecânica dentro dos limites de Hooke é:

$$F = K x \quad (\text{III.3})$$

onde:

F = força de excitação instantânea

x = variação instantânea no comprimento da mola em relação ao comprimento livre

K = constante de rigidez da mola

mas $v = \frac{dx}{dt} = j\omega x$ e portanto $x = \frac{1}{j\omega} v$

Assim

$$F = \frac{1}{j\omega \left(\frac{1}{K}\right)} v \quad (\text{III.4})$$

Substituindo mentalmente F por (e) e v por (i) , vemos que a equação (III.4) é a equação de um capacitor de valor $(1/K)$. Assim, uma mola imponderável sem atrito é representada por um condensador elétrico de valor igual ao da compliância da mola, ou seja, igual ao inverso de sua constante de rigidez $(1/K)$.

iii) Efeitos de atrito viscoso (constante resistiva R_m)

A equação que descreve os efeitos do atrito viscoso é:

$$F = R_m \cdot v \quad (\text{III.5})$$

onde

F = força de excitação instantânea

R_m = constante resistiva

v = velocidade instantânea do movimento oscilatório

Substituindo mentalmente F por (e) e v por (i) temos que a equação (III.5) é a equação de um resistor elétrico. Assim, a constante resistiva R_m é representado por um resistor elétrico do valor R_m .

iv) Fontes de força constante F_i

São representadas por fontes de tensão constante F_i .

v) Fontes de velocidade constante v_i

São representadas por fontes de corrente constante v_i .

III.1.c- Representação dos elementos acústicos nos circuitos equivalentes tipo impedância

É importante definir melhor as grandezas físicas representadas. Nesta analogia, a pressão sonora é análoga à tensão elétrica, e a velocidade de volume³⁾ é análoga à corrente elétrica. Dada uma superfície sólida vibrante de área S , cujo movimento vibratório apresenta uma velocidade instantânea v , e que, para movimentar-se, exerce sobre o ar adjacente uma força total instantânea F , definimos:

$$p = F/S \quad (III.6)$$

$$U = v.S \quad (III.7)$$

onde:

p = pressão sonora

F = força total de excitação do ar adjacente à superfície sólida

S = área da superfície sólida vibrante em contato com o ar

v = velocidade do movimento vibratório

U = velocidade de volume do movimento vibratório

Suporemos, como no caso mecânico, um movimento oscilatório de frequência angular ω .

Para que a análise abaixo seja válida é necessário supor que o comprimento de onda de uma onda sonora de frequência $(\omega/2\pi)$ propagando-se no ar seja muito maior (10 vezes) que a maior dimensão dos elementos considerados, pois trataremos apenas de elementos discretos.

i) Volume de ar enclausurado - V

Representamos na Figura III.1 um volume de ar enclausurado excitado por um pistão rígrado, sem massa, de área S e deslocamento vibratório instantâneo descrito por $x = x_0 \bar{e}^{j\omega t}$

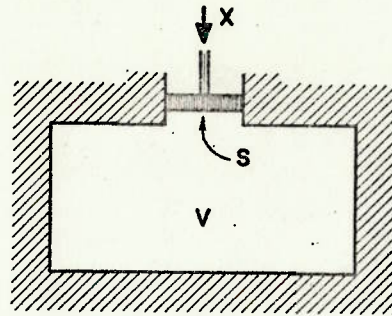


Figura III.1 - Volume de ar enclausurado.

Se a frequência angular ω for suficientemente alta as compressões e rarefações do ar enclausurado devido ao movimento do pistão ocorrerão de forma adiabática, podendo ser descritas pela equação:

$$P(t) \cdot V(t)^\gamma = \text{cte} \quad (\text{III.8})$$

onde

$$P(t) = P + p(t),$$

$$V(t) = V + q(t)$$

$P(t)$ = valor da pressão total instantânea interna ao volume enclausurado

P = valor estático da pressão no volume enclausurado

$p(t)$ = flutuações na pressão interna ao volume enclausurado devido ao movimento do pistão

$V(t)$ = valor instantâneo do volume enclausurado

V = valor médio do volume enclausurado

$q(t)$ = variação instantânea do volume enclausurado, igual ao produto da área S do pistão pelo deslocamento instantâneo $q(t) = -S \cdot x(t)$

γ = relação entre os valores específicos a pressão e volume constante do ar

E portanto, diferenciando a Equação (III.8)

$$\gamma P(t) \cdot V(t)^{\gamma-1} \cdot dV(t) + dP(t) \cdot V(t)^{\gamma} = 0 \quad (\text{III.9})$$

Mas em todos os casos reais

$$p(t) \ll P$$

$$q(t) \ll V$$

e portanto, além de

$$dP(t) = p(t) = p$$

$$dV(t) = q(t) = -Sx(t)$$

temos que

$$P(t) = P$$

$$V(t) = V$$

Substituindo na Equação (III.9)

$$\gamma P \cdot V^{\gamma-1} (-Sx(t)) + P \cdot V^{\gamma} = 0$$

ou

$$\frac{+ Sx(t)}{V} = \frac{p}{\gamma P}$$

Donde

$$p = \frac{Sx(t)}{(V/\gamma P)} \quad (\text{III.10})$$

Mas nos interessa U e não $x(t)$, e temos que

$$U = S \cdot v = S \cdot \frac{dx(t)}{dt}$$

mas

$$x = x_0 \bar{e}^{j\omega t}$$

e portanto

$$v = \frac{dx}{dt} = j\omega x$$

Donde

$$x = \frac{v}{j\omega}$$

Substituindo na equação (III.10)

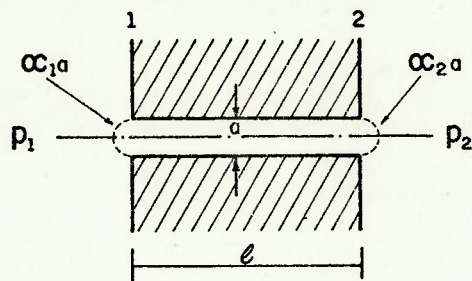
$$p = \frac{1}{j\omega \left(\frac{V}{\gamma P}\right)} \cdot U \quad (\text{III.11})$$

Substituindo mentalmente p por (e) e U por (i) temos que a equação (III.11) é análoga à equação de um condensador de valor $(V/\gamma P)$. Assim um volume de ar enclausurado é representado em um circuito equivalente tipo impedância por um condensador de valor $(V/\gamma P)$.

Observação: Da Figura III.1 poderíamos concluir que o volume enclausurado tem apenas um "terminal", já que apenas um acesso é visível ao meio externo. No entanto, assim como a tensão elétrica é uma diferença de potencial, consideramos a pressão $p(t)$ como a diferença entre a pressão sonora no acesso físico visível da Figura III.1 e a pressão sonora nula (ou Pressão Atmosférica). Assim sendo um dos terminais do capacitor que representa o volume de ar enclausurado deverá sempre estar ligado à linha de "terra" do circuito equivalente, que representa a linha onde a pressão sonora é nula ou a pressão total igual à pressão atmosférica.

ii) Tubo de ar de comprimento l e raio a

A derivação a seguir é válida para qualquer tipo de tubo "curto" e nos casos em que a seção reta não é circular, considera-se em geral um raio efetivo $a = \sqrt{S}/\pi$, onde S é a área da seção reta do tubo. Assim, a Figura III.2 apresenta um tubo de comprimento l e raio a .



- p_1 - pressão sonora na extremidade 1
- p_2 - pressão sonora na extremidade 2
- $\alpha_1 a$ - fator de correção na extremidade 1
- $\alpha_2 a$ - fator de correção na extremidade 2

Figura III.2 - Tubo de ar que se move como um pistão rígrado.

Como o comprimento l do tubo é muito pequeno em relação ao comprimento de onda λ da onda sonora de frequência $(\omega/2\pi)$, temos que o pistão de ar interno ao tubo se move como um pistão rígrado de ar, desde que o raio a seja suficientemente grande para permitir desprezar o efeito de atrito com as paredes do tubo e ainda suficientemente pequeno para que o único modo de vibração no tubo seja o longitudinal. Neste caso temos que o movimento do pistão é dado pela segunda lei de Newton.

$$F = \frac{d}{dt} (m.v) = m \frac{d}{dt} v \quad (\text{III.12})$$

mas, chamando

$$p = p_1 - p_2$$

temos que

$$F = p \cdot \pi a^2$$

Além disso

$$\frac{dv}{dt} = j\omega v$$

E portanto

$$p \cdot \pi a^2 = j\omega m v$$

ou seja

$$p = j\omega \frac{m}{\pi a^2} v = j\omega \frac{m}{(\pi a^2)^2} \cdot (\pi a^2 \cdot v)$$

donde

$$p = j\omega \cdot \frac{m}{(\pi a^2)^2} \cdot U \quad (\text{III.13})$$

Substituindo mentalmente p por (e) e U por (i) , vemos que a equação (III.13) é a de um indutor cujo valor é $(m/(\pi a^2)^2)$.

Mas m é a massa de ar contida no tubo mais parte do ar adjacente às extremidades desse tubo.

Assim

$$m = \rho \cdot (\ell + (\alpha_1 + \alpha_2)a) \cdot (\pi \cdot a^2)$$

onde α_1, α_2 - dependem da geometria das extremidades, podendo variar desde 0,85 (tubo terminado em flange infinito) até 0,613 (extremidade de um tubo infinito de espessura infinitesimal)

Assim

$$p = j\omega \cdot \rho \frac{\ell + (\alpha_1 + \alpha_2)a}{\pi a^2} \cdot U \quad (\text{III.14})$$

E portanto um tubo de comprimento ℓ e raio a , desprezando-se os efeitos de atrito, é representado por um indutor de valor $(\rho/\pi a^2) \cdot (\ell + (\alpha_1 + \alpha_2)a)$, denominada "massa acústica" do tubo.

iii) Efeitos de atrito viscoso - Constante resistiva R_A

Identicamente ao caso mecânico, os elementos de atrito viscoso são representados por resistores de valor R_A . Em Acústica os elementos de atrito viscoso são em geral redes ou tecidos para os quais se define uma grandeza denominada Resistência Específica ao Fluxo de Ar,⁴ definida a partir de uma diferença de pressão manométrica ΔP aplicada entre as faces de uma amostra de área S e espessura ℓ e da vazão de ar resultante, Q

$$r_A = \frac{\Delta P \cdot S}{Q \cdot \ell} \quad (\text{III.15})$$

onde

r_A = resistência específica à passagem de ar

ΔP = diferença de pressão manométrica aplicada entre as faces da amostra

S = área da superfície da amostra

ℓ = espessura da amostra

Q = vazão de ar que atravessa a amostra, como na

Figura III.3

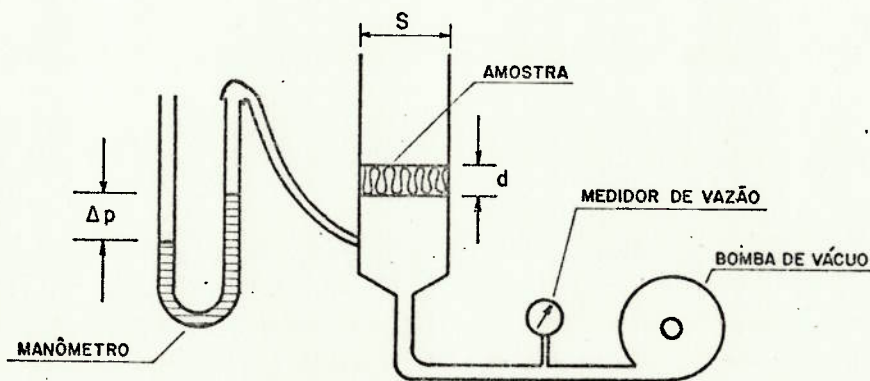


Figura III.3 - Medição da resistência a fluxo de materiais resistivos acusticamente.

Dado um material com resistividade acústica r_A , a resistência acústica no caso prático será

$$R_A = \frac{\tilde{r}_A}{S} \cdot \ell \quad (\text{III.16})$$

onde

R_A = resistência acústica do elemento

r_A = resistividade acústica do material de que é feito o elemento

ℓ = espessura do elemento

S = área da seção reta do elemento

Além de elementos porosos, no caso em que os diâmetros dos tubos são relativamente pequenos e médios, a impedância acústica (relação p/U) deixa de obedecer à equação III.13. e de acordo com a região em que o raio a do tubo se encontra em relação à frequência escolhe-se uma fórmula para calcular a parte resistiva da impedância: Se $a < 0,002/\sqrt{f}$ (tubos capilares)

$$Z_A = \underbrace{\frac{8\eta\ell}{\pi a^2}}_{R_A} + j \frac{4}{3} \cdot \omega \underbrace{\rho(\ell + (\alpha_1 + \alpha_2)a)}_{M_A} / \pi a^2 \quad (\text{III.17})$$

Se $0,01/\sqrt{f} < a < 10/f$, (tubos intermediários)

$$Z_A = R_A + j\omega \cdot \rho(\ell + (\alpha_1 + \alpha_2)a) / \pi a^2 \quad (\text{III.18})$$

$$R_A = \frac{1}{\pi a^2} \cdot \rho \sqrt{2\omega\mu} \left(\frac{\ell}{a} + 2 \right) \quad (\text{III.19})$$

onde

η = coeficiente de viscosidade do ar

μ = coeficiente dinâmico de viscosidade do ar

ρ = densidade do ar

ω = frequência angular do movimento oscilatório

Note-se que no caso de tubos intermediários a resistividade do tubo varia com a raiz quadrada da frequência angular.

iy) Fontes de pressão sonora constante P_i

São representadas por fontes de tensão constante P_i .

v) Fontes de velocidade de volume constante U_i

São representadas por fontes de corrente constante U_i .

III.1.d- Representação dos Elementos de Transdução nos Circuitos Equivalentes tipo impedância

São sempre representados por quadrupolos na forma de transformadores ideais cuja relação de espiras é o fator de transdução.

.i). Transdução Mecano-Acústica [3]

As equações que regem a transdução mecano-acústica são as equações (III.6) e (III.7):

$$p = F/S$$

$$U = v.S$$

Assim, a Figura III.4 apresenta a representação de um transdutor mecano-acústico de área S :

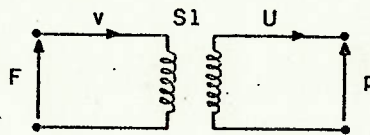


Figura III.4 - Transdução mecano-acústica

ii) Transdução Eletro-Mecânica Eletrostática /3/, /12/

As equações básicas que regem a transdução eletrostática são:

$$e = -\zeta \cdot x \quad (\text{III.20})$$

$$F = \zeta \cdot q \quad (\text{III.21})$$

onde

ζ = fator de transdução

x = deformação mecânica sofrida pelo transdutor

q = carga elétrica armazenada no transdutor

Existem duas formas básicas de representar um transdutor eletrostático, e que são representadas nas Figuras III.5 e III.6

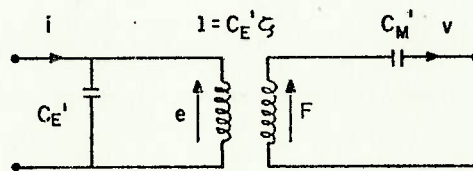


Figura III.5 - Circuito equivalente de um transdutor eletrostático operando como "fonte" sonora ou de vibração.

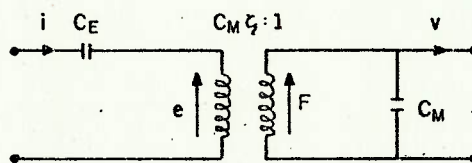


Figura III.6 - Circuito equivalente de um transdutor eletrostático operando como receptor sonoro ou de vibrações.

Nessas figuras, temos

C_E' - Capacitância com os terminais mecânicos do transdutor bloqueados ($v=0$)

C_M' - Compliância mecânica com os terminais elétricos do transdutor em curto-circuito ($e=0$)

C_E - Capacitância com os terminais mecânicos do transdutor em curto-circuito ($F=0$)

C_M - Compliância mecânica com os terminais elétricos em aberto ($i=0$)

Esses parâmetros guardam entre si as seguintes relações:

$$C_E' = \frac{C_E}{1 + C_M \cdot C_E \cdot \zeta^2} \quad (\text{III.22})$$

$$C_M' = C_M (1 + C_E \cdot C_M \cdot \zeta^2) \quad (\text{III.23})$$

iii) Transdução Eletromagnética: /3/

As equações básicas da transdução eletromagnética

são:

$$F = B \ell \cdot i \quad (\text{III.24})$$

$$e = B \ell \cdot v \quad (\text{III.25})$$

onde

B = densidade de fluxo magnético

ℓ = comprimento efetivo do condutor que corta perpendicularmente as linhas de campo do campo magnético

A forma natural de representar esse tipo de transdutor resulta na analogia tipo mobilidade, onde a velocidade mecânica é análoga à tensão elétrica e a força necessária é análoga à corrente elétrica, como na Figura III.7.

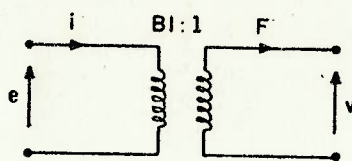


Figura III.7 - Representação do transdutor eletromagnético como um circuito equivalente tipo mobilidade.

No entanto, é possível representá-lo na analogia tipo impedância utilizando um artifício³¹ (fator β), desde que se introduzam as impedâncias elétricas e mecânicas presentes no circuito (impedância mecânica = F/v).

A Figura III.8 apresenta o circuito equivalente do transdutor eletromagnético ainda no caso de analogia tipo mobilidade, mas introduzindo a impedância elétrica Z_E e as admitâncias mecânicas (v/F) do próprio transdutor (z_m) e da carga mecânica que este movimenta (z_L).

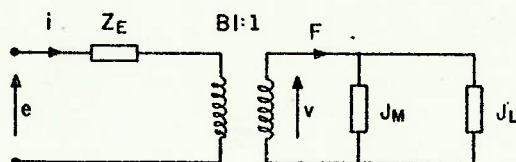


Figura III.8 - Circuito equivalente tipo mobilidade de de um transdutor eletromagnético com suas cargas mecânicas e elétricas acopladas.

A Figura III.9 mostra o circuito equivalente do transdutor eletromagnético na analogia tipo impedância.

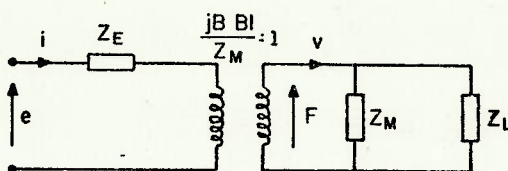


Figura III.9 - Circuito equivalente tipo impedância de um transdutor eletromagnético.

Os parâmetros nas Figuras III.7 e III.8 são:

- Z_E - impedância elétrica (e/i) com $F=0$
- Z_M - impedância mecânica (F/v) do transdutor com ($i=0$)
- Z_L - impedância mecânica (F/v) da carga que o transdutor deve mover
- z_M - admitância mecânica (v/F) do transdutor com ($i=0$) $z_m = 1/Z_M$
- z_L - admitância mecânica (v/F) da carga que o transdutor deve mover $z_L = 1/Z_L$.

III.2- Análise do comportamento dos circuitos equivalentes dos vários calibradores

Passamos a seguir ao levantamento dos circuitos equivalentes simplificados dos vários tipos de calibradores, e, através da análise desses circuitos equivalentes apresentaremos as eventuais restrições intrínsecas ou de projeto para cada um deles.

Denominamos os circuitos equivalentes apresentados a seguir de "simplificados" pelo fato de desprezarmos a parte resistiva dos circuitos, que na prática, apesar de existir, é de fato, bastante inexpressiva.

Além dessa simplificação, suporemos que a impedância acústica dos tubos de equalização presentes em todas as modelos é tão alta nas frequências de atuação dos calibradores, que podem ser consideradas infinitas, não constando portanto, no diagrama apresentado.

Um último fator de simplificação geral é a omissão da Compliância Acústica do microfone, em paralelo com a Compliância Acústica da cavidade C_1 em todos os calibradores. Esta Compliância Acústica representa a influência no nível sonoro do microfone em calibração, pois diferentes microfones apresentam compliâncias acústicas diferentes. No entanto, o valor máximo previsto em norma para o volume equivalente de um microfone condensador de uma polegada é de $0,2 \text{ cm}^3$ e portanto, se o volume de C_1 for superior a 20 cm^3 , a influência sobre o nível sonoro produzido pelo calibrador, de variações do microfone, pode ser no máximo igual a $0,1 \text{ dB}$. Assim sendo desprezaremos essa fonte de influências supondo que o volume de C_1 é superior a 20 cm^3 deixando, portanto, de representar a compliância acústica do microfone em paralelo com a compliância acústica da cavidade C_1 .

III.2.a) Pistonfone: [4], [5]

A partir da Figura II.1. podemos levantar o circuito equivalente simplificado do Pistonfone, e apresentá-lo na Figura III.10.



Figura III.10- Circuito equivalente simplificado do Pistonfone.

Assim

$$p = \frac{1}{j\omega C_1} \cdot U_i$$

Mas

$$C_1 = \frac{V_1}{\gamma P}$$

e portanto

$$p = \frac{1}{j\omega V_1} \cdot \gamma \cdot P \cdot U_i \quad (\text{III.26})$$

i) influência da temperatura:

A influência da temperatura sobre o volume V_1 (efeitos de dilatação térmica) pode ser controlada através da escolha correta dos materiais e do projeto da cavidade. O mesmo pode ser dito a respeito dos movimentos e dimensões do pistão, que determinam o valor de U_i ($U_i = S \, dx(t)/dt$). Além disso, em relação à temperatura a tendência natural do comportamento de U_i é a de cancelar a tendência natural do comportamento de V_1 , pois ambos crescem proporcionalmente à temperatura.

A variação de γ (relação entre o calor específico a pressão constante e o calor específico o volume constante) para o ar na faixa de temperaturas ambientes usuais (0 a 50°C) é desprezível.

ii) influência da pressão atmosférica:

Da equação (III.26) nota-se que o nível sonoro é função direta da pressão atmosférica, sendo esta a principal limitação prática desse tipo de calibrador. Assim sendo é preciso, a cada calibração, realizar a medição da pressão atmosférica e corrigir o valor nominal do nível sonoro produzido pelo pistofone para a pressão atmosférica atual.

III.2.b) Calibrador de ruído pseudo-aleatório:

Considerando o mecanismo de geração de ruído descrito no item II.4.ii (transferência da quantidade de movimento das esferas para a membrana por meio de choques "instantâneos"), podemos considerar a fonte de excitação como uma fonte de força F_j .

A representação da membrana no circuito equivalente não é simples neste caso, pois, devido às características da excitação, muitos modos de vibração da membrana são excitados, e a membrana não pode ser tratada de forma genérica como um elemento discreto neste caso.

No entanto, dadas às características lineares do sistema, podemos considerar cada modo de vibração em separado e posteriormente compor os vários resultados por superposição. Assim sendo, a Figura III.11 apresenta o circuito equivalente para um único modo de vibração da membrana, a massa M_k e compliância C_k sendo referentes ao k -ésimo modo de vibração da membrana, e fazendo referência ao esquema da Figura II.2.

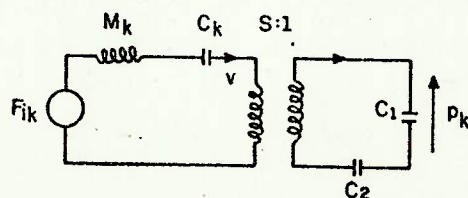


Figura III.11 - Circuito equivalente do calibrador pseudo-aleatório para o k -ésimo modo de vibração da membrana.

Podemos transportar todo o circuito para o lado acústico, para facilitar a análise.

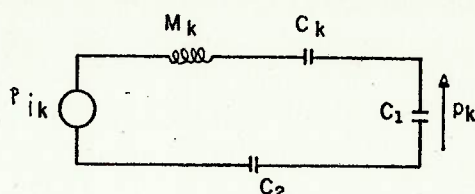


Figura III.12 - Circuito equivalente do calibrador pseudo-aleatório para o k -ésimo modo de vibração da membrana com todos os elementos transportados para o lado acústico do circuito.

No entanto, dadas as características da excitação cada modo só é excitado na frequência de ressonância, onde

$$Z_k = j\omega M_k + \frac{1}{j\omega C_k} = 0 \quad (\text{III.27})$$

E portanto o circuito equivalente pode ser ainda mais simplificado.

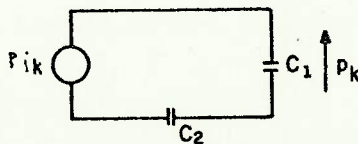


Figura III.13 - Circuito equivalente resultante para o k -ésimo modo de vibração da membrana, no caso do calibrador de ruído pseudo-aleatório.

Assim

$$p_k = \frac{C_2}{C_1 + C_2} p_{ik}$$

Mas

$$C_i = V_i / \gamma P$$

E portanto

$$p_k = \frac{V_2}{V_1 + V_2} p_{ik} \quad (\text{III.28})$$

A equação (III.28) é válida para todos os modos de vibração da membrana, e portanto as variações no nível sonoro deste tipo de calibrador dependem apenas: da variação na relação entre os volumes das cavidades C_1 e C_2 ; da variação da eficiência de transferência da quantidade de movimento das esferas ao atingir as membranas, e; da variação na área efetiva da membrana.

i) variações com a temperatura

A variação da relação $V_2 / (V_1 + V_2)$ com a temperatura é praticamente nula desde que o material das paredes de C_1 e C_2 seja o mesmo. As variações na eficiência da transferência da quantidade de movimento das esferas ao atingir a membrana (que é função da tensão a que está submetida a membrana) e na área efetiva da membrana podem ser controladas através da escolha adequada dos materiais e da forma de engastamento da membrana. Assim sendo, apesar de requererem algum cuidado no projeto mecânico as variações do nível sonoro em função da temperatura podem ser minimizadas.

ii) variações com a pressão atmosférica

A equação III.28 indica imunidade a variações na pressão atmosférica.

III.2.c) Calibrador multitonal:

Uma vez que esses calibradores cobrem uma ampla faixa de frequências (em geral de 125 a 4000 Hz) entra na análise também o fator frequência de oscilação, de forma que procuraremos delimitar as faixas de frequências onde o comportamento dos dispositivos estudados é adequado ao uso como calibradores acústicos.

Esse tipo de calibrador utiliza um sistema de transdução eletroacústica que pode ser: caso 1) composto por uma membrana tensionada atuado diretamente pelo transdutor embora sem vinculação mecânica com ele, e; caso 2) composto por um diafragma rígido, que funciona como transdutor mecânico acústico vinculado mecanicamente a um transdutor eletromecânico. Estudaremos separadamente os casos 1 e 2 devido as particularidades de cada um deles.

Caso 1): Transdutor composto por uma membrana tensionada atuado sem vínculo mecânico por um transdutor eletrostático ou eletromagnético de relutância variável.^[1]

Tanto no caso eletrostático como no caso eletromagnético a membrana é atuada à distância por uma força que a movimenta paralelamente ao seu eixo principal, em geral em seu modo fundamental. A Figura III.13 apresenta o circuito equivalente simplificado para esse tipo de sistema.

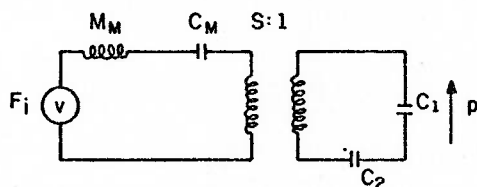


Figura III.14 - Circuito equivalente simplificado de um calibrador multitonal com membrana tensionada atuado à distância por um transdutor eletrostático ou eletromagnético de relutância variável.

é dada por. ^[14] A massa M_M , no caso do primeiro modo de vibração.

$$M_M = \frac{4}{3} \pi a^2 \sigma$$

onde

$$S = \pi a^2$$

a = raio da membrana

σ = densidade superficial da membrana

e a compliância C_M é dada por: ^[14]

$$C_M = \frac{1}{8\pi T_e}$$

onde

T_e = tensão a que está submetida a membrana

Os fatores 8π e $4/3$ aparecem devido ao fato de as partes da membrana não vibrarem todas com a mesma amplitude, como no caso de uma massa na ponta de uma mola.

Passando todo o circuito mecânico para o lado acústico (ver Figura III.15)

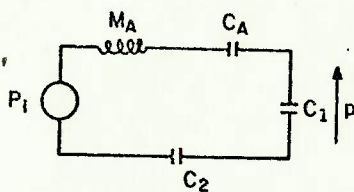


Figura III.15 - Circuito equivalente simplificado de um calibrador multitonal com membrana tensionada atuada a distância, com a parte mecânica transferida para o lado acústico do circuito.

Onde

$$M_A = M_M / S^2$$

$$C_A = C_M \cdot S^2$$

Assim temos

$$p = \frac{C}{C_1 (1 - \omega^2 M_A \cdot C)} \cdot p_i \quad (\text{III.29})$$

onde

$$C = (C' \cdot C_A) / (C' + C_A)$$

$$C' = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2) = V' / \gamma P$$

$$V' = V_1 \cdot V_2 / (V_1 + V_2)$$

ou

$$p = \gamma P \left(\frac{V'}{V_1} \right) \cdot \frac{1}{\gamma P + \frac{V'}{C_A} (1 - \omega^2 M_A C_A)} \cdot p_i \quad (\text{III.30})$$

i) comportamento em função da temperatura

As variações do transdutor e do circuito eletrônico em função da temperatura podem ser compensadas automaticamente no próprio circuito eletrônico, de forma que p_i pode ser considerado estável em temperatura. Assim sendo, na fórmula (III.30) resta apenas o termo $(V'/C_A) (1 - \omega^2 M_A \cdot C_A)$ variável com a temperatura. O elemento C_A é inversamente proporcional à tensão à qual é submetida a membrana. No entanto, uma escolha adequada dos materiais e da configuração do engastamento da membrana pode evitar variações na tensão em função das variações da temperatura. Identicamente a variação de V' com a temperatura pode ser minimizada de forma que a influência de variações da temperatura no nível sonoro produzido pelo calibrador se torna desprezível.

ii) comportamento em função da pressão atmosférica

A equação (III.30) deixa claro que, para que o valor do nível sonoro seja independente da Pressão Atmosférica é preciso que

$$\gamma_P \gg \left(\frac{V_i}{C_A} \right) \cdot |(1 - \omega^2 M_A C_A)|$$

Para que isso ocorra é necessário que

$$100 \omega_{01} < \omega < 0,1 \omega_{02}$$

onde

$$\omega_{01}^2 = \frac{C' - C_A}{C' (C_A \cdot M_A)}$$

$$\omega_{02}^2 = \frac{1}{C \cdot M_A}$$

$$C' = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$C = \frac{C_A \cdot C'}{C_A + C'}$$

Caso 2) Transdutor eletromecânico mecanicamente ligado a um diafragma rígido que atua como transdutor mecano-acústico. [1]

Tanto no caso em que se utiliza um transdutor piezoelétrico como naquele em que o transdutor é eletromagnético de bobina ou núcleo móvel o transdutor eletromecânico atua como uma fonte de força. Assim, o circuito equivalente simplificado fica (ver Figura III.16)

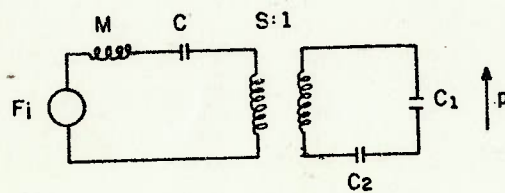


Figura III.16 - Circuito equivalente de um calibrador multitonal cujo transdutor eletromecânico atua sobre o diafragma rígido.

Onde

- M_M - massa mecânica móvel do conjunto transdutor
- C_M - compliância mecânica do conjunto transdutor
- S - área efetiva do diafragma

Passando a parte mecânica para o lado acústico, temos (ver Figura III.17)

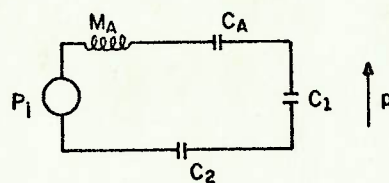


Figura III.17 - Circuito equivalente de um calibrador multitonal cujo transdutor atua sobre um diafragma rígido.

Comparando a Figura III.17 com a Figura III.15 vemos que elas são idênticas. Isso significa que a Equação III.29 se aplica também a este caso:

$$p = \frac{C}{C_1(1-\omega^2 M_A C)} \cdot P_i$$

onde

$$C = C' \cdot C_A / (C' + C_A)$$

$$C' = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2)$$

i) comportamento em função da temperatura

Como no caso anterior, a compensação automática de efeitos de deriva térmica do circuito do oscilador faz com que o problema da temperatura seja grandemente minimizado. Neste caso ainda a influência da temperatura na Compliância C_A é praticamente nula, de forma que não é necessário dar uma atenção especial aos efeitos da temperatura no projeto mecânico.

ii) comportamento em função da pressão atmosférica

Apesar de a equação III.29 se aplicar no presente caso, na verdade o comportamento em relação à pressão atmosférica difere drasticamente no caso piezoelétrico em relação ao caso eletromagnético de bobina móvel e por isso faremos distinção desses dois tipos de implementação;

- transdutor piezoelétrico: ao se utilizar o transdutor piezoelétrico, a Compliância C_A é a compliância do próprio transdutor, cujo valor é muito inferior aos valores práticos de C' (ligação série de C_1 e C_2). Assim, nas implementações que utilizam transdutores piezoelétricos,

$$C \cong C_A$$

e portanto

$$p = \frac{\gamma \cdot P \cdot C_A}{V_1 (1 - \omega^2 M_A C_A)} \cdot P_i \quad \text{(III.31)}$$

donde se conclui que o nível sonoro depende diretamente da pressão atmosférica P a não ser para frequências tão altas que determinem que p tenda a zero.

Em alguns casos a compliância C_A não é tão baixa em relação a C' . Nesses casos, o estudo realizado no Caso 1 é aplicável diretamente.

- transdutor eletromagnético de bobina móvel: neste caso a Compliância C_A é a da suspensão do diafragma, sendo, em geral, muito maior que C' . Nesse caso

$$C \cong C'$$

e a equação III.29 fica

$$p = \frac{C'}{C_1(1 - \omega^2 M_A \cdot C')} p_i$$

donde

$$p = \frac{\frac{v'}{V_1}}{1 - \omega^2 M_A \cdot C'} p_i \quad (\text{III.32})$$

E portanto, o nível sonoro independe de P apenas para valores de ω muito inferiores à frequência angular natural do conjunto.

Neste caso é possível enrijecer a suspensão do diafragma rígido de forma a cair em uma situação parecida com a do Caso 1, de forma a que a região de frequências imune às influências da pressão atmosférica seja mais ampla.

III.2d) Calibrador Ressonante (7)

d) Calibrador ressonante |7|

A partir da Figura III.4 é possível levantar o circuito equivalente simplificado do calibrador ressonante, lembrando que ainda neste caso o transdutor atua como uma fonte de força. Assim, o circuito equivalente apresentado na Figura III.16 corresponde ao calibrador acústico ressonante.

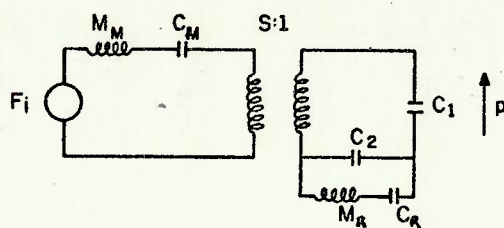


Figura III.18 - Circuito equivalente simplificado para o calibrador ressonante.

onde

- M_M - massa mecânica do transdutor + diafragma rí-gido
- C_M - compliância mecânica do transdutor + sus-pensão do diafragma rí-gido
- S - área efetiva do diafragma rí-gido
- M_R - massa acústica do orifício entre as cavida-des C_2 e C_R , e que forma o "pescoço" do res-soador de Helmholtz
- C_R - cavidade do ressoador de Helmholtz
- C_1 - cavidade frontal onde é acoplado o microfone
- C_2 - cavidade posterior ao diafragma

Passando a parte mecânica para o lado acústico do circuito equivalente, temos (ver Fig III.19)

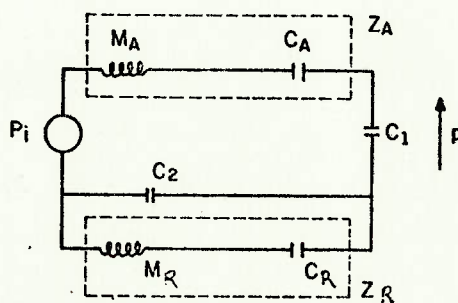


Figura III.19 - Circuito equivalente simplificado para o calibrador ressonante com a parte mecânica transferida para o lado acústico.

onde

$$M_A = M_M / S^2$$

$$C_A = C_M \cdot S^2$$

No entanto, o calibrador ressonante é construído de forma tal que, na frequência de oscilação do calibrador, $f_0 = (\omega_0 / 2\pi)$

$$Z_A = j\omega_0 M_A + \frac{1}{j\omega_0 C_A} = 0$$

$$Z_M = j\omega_0 M_M + \frac{1}{j\omega_0 C_M} = 0$$

pois tanto a ressonância da parte mecânica como a do ressoador de Helmholtz coincidem com essa frequência, e o circuito equivalente fica sendo (ver Figura III.20)



Figura III.20 - Circuito equivalente do calibrador ressonante na frequência de oscilação.

Vemos, então que, na frequência de oscilação do calibrador,

$$p = p_i \quad (\text{III.33})$$

e, neste caso, nem o valor de C_1 interessa, ou seja C_1 pode ser inferior a 20 cm^3 e ainda assim o volume equivalente do microfone acoplado não deve interferir no nível sonoro produzido pelo calibrador.

i) influência da temperatura e da pressão atmosférica

Neste caso temos também um oscilador eletrônico e assim, as eventuais derivas térmicas podem ser compensadas automaticamente pelo circuito eletrônico. A compliância mecânica do transdutor não deve sofrer variação significativa na faixa normal de temperaturas ambientes e portanto a frequência de ressonância da parte mecânica do calibrador (Z_A) deve ser a mesma independentemente do valor da temperatura. Resta, no entanto, analisar o comportamento da frequência de ressonância do ressoador de Helmholtz em função da temperatura e da pressão.

A frequência de ressonância do ressoador de Helmholtz é dada por:

$$\omega_0^{-2} = M_R \cdot C_R = \rho \frac{(\ell + (\alpha_1 + \alpha_2)a)}{\pi a^2} \cdot \frac{V_R}{\gamma P} \quad (\text{III.34})$$

onde

- ρ = densidade do ar
- ℓ = comprimento do orifício
- a = raio do orifício
- V_R = volume da cavidade C_R
- γ = relação entre C_p e C_v
- P = pressão atmosférica

mas

$$\rho = \rho_0 \cdot P \cdot T_0 / (P_0 \cdot T)$$

onde

ρ_0 = densidade do ar nas condições de referência

T_0 = temperatura absoluta nas condições de referência

P_0 = pressão atmosférica nas condições de referência

e portanto

$$\omega_0^{-2} = \frac{\rho_0 \cdot T_0}{P_0 \cdot T} \cdot \frac{\ell + (\alpha_1 + \alpha_2)a}{\pi a^2} \cdot \frac{V_R}{\gamma} \quad (\text{III.35})$$

e portanto a frequência de ressonância do ressoador de Helmholtz independe do valor da pressão atmosférica mas depende da relação entre a temperatura absoluta atual e a temperatura absoluta de referência.

III.3- Comparação entre os vários tipos de calibradores e escolha do tipo a ser implementado

Sob o ponto de vista de precisão de calibração, o melhor dos calibradores citados é, sem dúvida, o pistonfone, desde que se corrija as calibrações com o auxílio de um bom barômetro. Ele é o que maior precisão oferece pelo fato de o nível sonoro depender basicamente de fatores geométricos cujo controle é relativamente fácil. Mesmo o controle da rotação do motor é relativamente simples utilizando-se um motor de corrente contínua servo-controlado. No entanto, a faixa de frequências de atuação é limitada a 250 Hz nos modelos comerciais, devido à dificuldade de excitar senoidalmente e com precisão pistões mecânicos acima dessa frequência. Esse fator, aliado à necessidade do uso de um barômetro faz com que o pistonfone deixe de ser o calibrador de fácil utilização que se deseja no campo, pois é necessário incluir correções variáveis ao valor nominal do nível sonoro.

O calibrador de ruído pseudo-aleatório tem muitas vantagens já citadas e há uma desvantagem no fato de o nível sonoro não ser fixo, mas oscilar em torno de um valor médio, levando a precisão de calibração a cair para $\pm 0,5$ dB. No entanto a principal desvantagem desse tipo de calibrador está no fato de ele só poder ser utilizado completamente em repouso e perfeitamente nivelado para não afetar sua performance, e muitas vezes é necessário utilizar o calibrador sem um lugar adequado para apoiá-lo e nivelá-lo, e para não dizer das vezes em que eles são utilizados em movimento no interior de um veículo.

A realização de um calibrador multitonal preciso abrangendo as faixas de frequência de 125 a 4000 Hz é bastante crítica como podemos observar ao longo da discussão de seu comportamento em relação às variações na pressão atmosférica, além de raramente ser necessário utilizar uma outra frequência que não a de 1 kHz.

O calibrador ressonante por sua vez reúne a precisão razoável de $\pm 0,25$ dB à imunidade quanto às variações na pressão atmosférica e à facilidade de se operar em 1 kHz, frequência de referência das curvas de ponderação. A única desvantagem prática é o fato de a ressonância acústica variar com a temperatura. O efeito desse fato no nível sonoro pode ser minimizado através do dimensionamento adequado dos vários componentes do calibrador, como poderá ser observado no próximo capítulo. Assim sendo, optamos pela realização prática de um calibrador ressonante sintonizado em 1 kHz que atende a todos os pressupostos básicos.

IV. ANTEPROJETO

IV.1- Especificações do Calibrador

Tendo em vista o que foi colocado no parágrafo II.3, e tendo sido feita a opção pela implementação de um calibrador do tipo ressonante, decidimos estabelecer para o calibrador a ser projetado as mesmas especificações do Calibrador Bruel & Kjaer tipo 4230⁶, visto que elas atendem com folga os requisitos de precisão e praticidade exigidos num calibrador. No item "volume equivalente", apesar de a nosso ver exagerado, foi mantido o mesmo valor em função de ser teoricamente viável⁶ e intrínseco à forma de funcionamento do calibrador. No entanto essa exigência poderia ser, como vimos no parágrafo III.3, apenas "superior a 20 cm³" em qualquer circunstância.

Assim sendo, as especificações do calibrador ressonante a ser projetado são:

sinal acústico: senoidal de frequência 1000 Hz \pm 1,5%

nível sonoro: 94 dB re 2×10^{-5} N/m²

precisão de calibração: \pm 0,25 dB em 25°C

\pm 0,35 dB entre 10°C e 40°C

\pm 0,5 dB entre 0°C e 50°C

volume equivalente do acoplador:

> 200 cm³ em 25°C

> 100 cm³ entre 10°C e 40°C

> 50 cm³ entre 0°C e 50°C

influência da pressão atmosférica:

< \pm 0,05 dB/100 mbar; entre 500 e 1100 mbar

IV.2- O elemento piezoelétrico

No caso do calibrador ressonante a ser construído o elemento piezoelétrico deve ser do tipo "Bender" pois os elementos desse tipo costumam aliar ao elevado fator de transdução eletro-mecânica, uma compliância mecânica relativamente alta. Essas características são interessantes para que: em primeiro lugar, com um nível de sinal elétrico na faixa dos $\pm 3V$ se consiga um nível sonoro compatível com uma relação sinal-ruído adequada (94 dB SPL) e; em segundo lugar, seja possível sintonizar a frequência de ressonância de seu modo fundamental em 1000 Hz segundo as especificações.

A dificuldade de se conseguir elementos piezoelétricos especiais para um projeto de desenvolvimento nos fez optar pela utilização de um transdutor de fabricação nacional normalmente utilizado como "buzzer" em sistemas eletrônicos digitais e de telecomunicações. Esse elemento é formado por um disco cerâmico de PZT colado a um disco de latão.^[11] Escolhemos um modelo de diâmetro aproximado de 35 mm, cuja frequência de ressonância livre está em torno de 2900 Hz, mas que, numa montagem tipo "simplesmente apoiado" em uma circunferência pouco menor que o perímetro, ressoa em 1600 Hz, aproximadamente. Assim, com um acréscimo de massa da ordem de 2 g se pode trazer sua ressonância para 1000 Hz.

Uma outra vantagem desse tipo de elemento piezoelétrico seria também a possibilidade de prescindir de um cone para a transdução mecano-acústica, uma vez que o próprio disco metálico poderia cumprir esse papel, simplificando em muito a construção de um calibrador numa configuração como a do modelo produzido pela Bruel & Kjaer (tipo 4230) - ver Apêndice |9| e que tínhamos em mente utilizar.

Medindo as características do elemento piezoelétrico em questão (ver descrição dos métodos de medição no Apêndice 7) obtivemos para o circuito equivalente da Figura IV.1, os valores dos parâmetros constantes na Tabela IV.1.

Diâmetro		
	normal (35 mm)	reduzido (27 mm)
C_E	23 ± 1 nF	23 ± 1 nF
T_E	$(1,4 \pm 0,2) \times 10^2$ V/N	$(9,5 \pm 0,2) \times 10^2$ V/N
C_M	$(11,4 \pm 0,2) \times 10^{-6}$ m/N	$(5,6 \pm 0,2) \times 10^{-6}$ V/N
M_M	$(1,3 \pm 0,1) \times 10^{-3}$ kg	$(0,8 \pm 0,1) \times 10^{-3}$ kg
S_M	$(3,4 \pm 0,1) \times 10^{-4}$ m ²	-

Tabela IV.1. Parâmetros do circuito equivalente do elemento piezoelétrico (média de 3 medições de cada parâmetro).

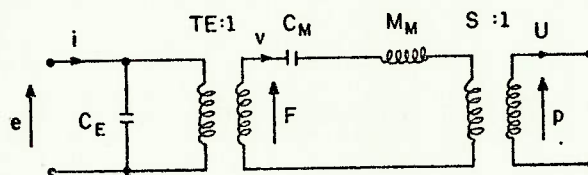


Figura IV.1 - Circuito equivalente do elemento piezoelétrico escolhido (operando como fonte sonora)

Apesar de o modelo nacional não oferecer uma folha de dados técnicos, o exame de catálogos de elementos similares estrangeiros (ver referência 11) indicavam uma variação na frequência de ressonância, e no valor de T_E em função da temperatura, podendo o valor de $T_E(\theta)$ ser equacionado como:

$$T_e(\theta) = T_E(25) (1 + \alpha_E \cdot \Delta\theta) \quad (IV.1)$$

onde

$T_E(\theta)$ = valor do fator de transdução eletromecânica na temperatura θ

L_E = taxa de variação de T_E em função de $\Delta\theta$

$\Delta\theta$ = intervalo de temperatura entre o valor atual e 25°C

e o valor de $f_o(\theta)$, a frequência de ressonância na temperatura t , é dada por:

$$f_o(\theta) = f_o(25) \cdot (1 + L_{fr} \cdot \Delta\theta) \quad (\text{IV.2})$$

onde

L_{fr} = taxa de variação da frequência de ressonância em função do intervalo $\Delta\theta$.

Medindo a variação de $T_E(\theta)$ e $f_o(\theta)$ em função da temperatura (ver métodos de ensaio no Apêndice 8) obtivemos os valores para a média de 3 ensaios de um mesmo elemento:

$$L_E = (23 \pm 1) \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$$

$$L_{fr} = -(4 \pm 1) \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$$

IV.3- Configuração do Calibrador

No Apêndice 5 aparece uma descrição publicada do calibrador Bruel & Kjaer tipo 4230, cuja configuração adaptada tornaria a construção do calibrador bastante descomplicada e por isso pretendíamos utilizá-la no projeto. Após gastar a maior parte do tempo disponível a este trabalho com essa configuração, decidimos abandoná-la como inadequada ao elemento piezoelétrico disponível, pelos motivos expostos na análise dessa configuração adaptada ao nosso caso, e constante do Apêndice 9.

A configuração adotada é a forma encontrada para conciliar a rigidez excessiva do elemento piezoelétrico utilizado com a necessidade imperativa de um elemento transdutor de impedância acústica baixa (da ordem de grandeza das impedâncias acústicas dos elementos acústicos do circuito). Apesar da Figura IV.2, que apresenta os esquema da configuração do calibrador a ser construído não deixar evidentes, as diferenças entre a configuração adotada e a do calibrador Bruel & Kjaer tipo 4230 aparecem na parte relativa ao circuito mecânico do Calibrador (ver Figura IV.3).

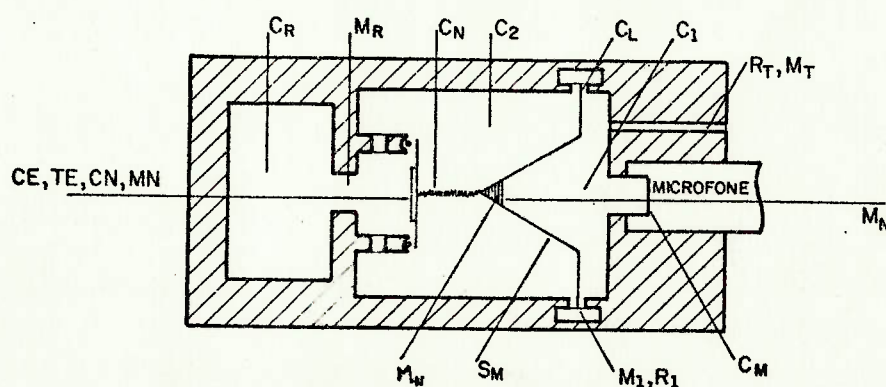


Figura IV.2 - Configuração do calibrador projetado.

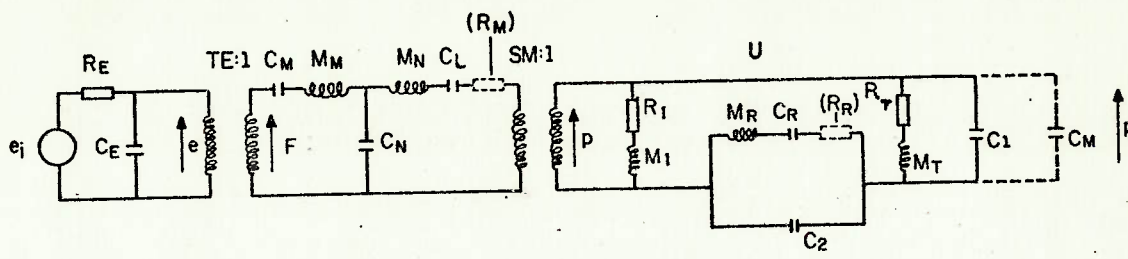


Figura IV.3 - Circuito equivalente da configuração do calibrador projetado.

Essa configuração, além de promover a adaptação das impedâncias, faz com que o comportamento mecânico e acústico independam das variações do elemento piezoelétrico com a temperatura, uma vez que a ressonância mecânica em 1000 Hz passa agora a ser implementada pelos elementos C_N , M_N e C_L e o elemento piezoelétrico é operado abaixo (bem abaixo), da ressonância de seu modo fundamental. Desta forma as variações de C_M (relativas às variações de $f_0(\theta)$ em função da temperatura) afetam apenas o nível sonoro (passível de compensação eletrônica) e não mais o "ponto de operação" do circuito.

Por outro lado os valores de C_N , M_N , C_L e S_M tornam-se críticos. No entanto é possível após algumas tentativas e erros chegar-se a implementar os valores projetados, que não sofrerão mudanças com a temperatura, pressão, etc.

IV.4- Cálculo da relação entre p e e_i

Passando para o lado acústico todos os elementos elétricos e mecânicos, o circuito equivalente do calibrador fica sendo (Figura IV.4).

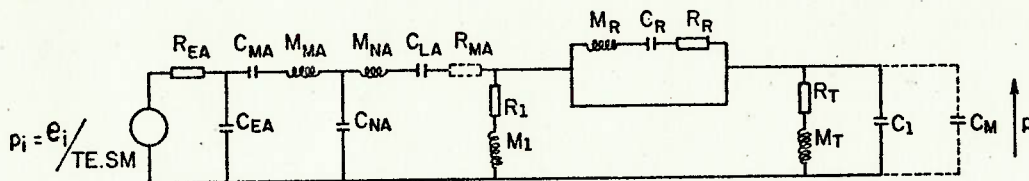


Figura IV.4-Circuito equivalente do calibrador com os elementos elétricos e mecânicos transferidos para o lado acústico do circuito

onde:

$$\begin{aligned}
 p &= e_i / (S_M \cdot T_E) \\
 R_{EA} &= R_E / (S_M \cdot T_E)^2 \\
 C_{EA} &= C_E \cdot (S_M \cdot T_E)^2 \\
 C_{MA} &= C_M \cdot S_M^2 \\
 C_{NA} &= C_N \cdot S_M^2 \\
 M_{NA} &= M_N / S_M^2 \\
 C_{LA} &= C_L \cdot S_M^2 \\
 R_{MA} &= R_M / S_M^2
 \end{aligned}
 \tag{IV.3}$$

A fim de tornar os cálculos mais claros, façamos:

$$\begin{aligned}
 Z_6 &= R_{EA} \\
 Z_5 &= 1/j\omega C_{EA} \\
 Z_4 &= j\omega M_{MA} + 1/j\omega C_{MA} \\
 Z_{4b} &= 1/j\omega C_{NA} \\
 Z_{4a} &= j\omega M_{NA} + 1/j\omega C_{LA} \\
 Z_3 &= j\omega M_1 + R_1 \\
 Z_2 &= (j\omega M_R + 1/j\omega C_R + R_R) // * (1/j\omega C_2) \\
 Z_1 &= j\omega M_T + R_T \\
 Z_0 &= 1/j\omega (C_1 + C_M)
 \end{aligned}
 \tag{IV.4}$$

* // - paralelo

E portanto, o circuito equivalente se torna o da Figura IV.5.

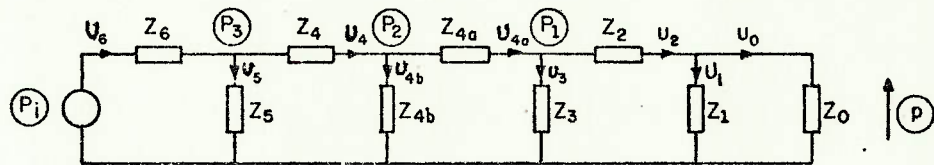


Figura IV.5-Representação do circuito equivalente por meio de impedâncias

Assim, temos, iniciando da direita para a esquerda o equacionamento, visando calcular p_i em função de p , supondo p conhecido

$$U_0 = (1/Z_0) p \tag{IV.5}$$

$$U_1 = (1/Z_1) p \tag{IV.6}$$

$$U_2 = U_1 + U_0 = (1/Z_0 + 1/Z_1) p$$

fazendo

$$Z_{10} = Z_0 \cdot Z_1 / (Z_0 + Z_1) \quad (\text{IV.7})$$

temos

$$U_2 = (1/Z_{10}) p \quad (\text{IV.8})$$

$$p_1 = p + Z_2 \cdot U_2 = (1 + Z_2/Z_{10}) p$$

fazendo

$$\bar{A} = (1 + Z_2/Z_{10}) \quad (\text{IV.9})$$

temos

$$p_1 = \bar{A} \cdot p \quad (\text{IV.10})$$

$$U_3 = p_1/Z_3 = (\bar{A}/Z_3) p \quad (\text{IV.11})$$

$$U_{4a} = U_3 + U_2 = (1/Z_{10} + \bar{A}/Z_3) p$$

fazendo

$$Z_{11} = Z_3 \cdot Z_{10} / (\bar{A} \cdot Z_{10} + Z_3) \quad (\text{IV.12})$$

temos

$$U_{4a} = (1/Z_{11}) p \quad (\text{IV.13})$$

$$p_2 = p_1 + Z_{4a} = (\bar{A} + Z_{4a}/Z_{11}) p$$

fazendo

$$\bar{B} = (\bar{A} + Z_{4a}/Z_{11}) \quad (\text{IV.14})$$

temos

$$p_2 = \bar{B} \cdot p \quad (\text{IV.15})$$

$$U_{4b} = p_2/Z_{4b} = (\bar{B}/Z_{4b}) p \quad (\text{IV.16})$$

$$U_4 = U_{4a} + U_{4b} = (1/Z_{11} + \bar{B}/Z_{4b}) p$$

fazendo

$$Z_{12} = Z_{11} \cdot Z_{4b} / (\bar{B} \cdot Z_{11} + Z_{4b}) \quad (\text{IV.17})$$

temos

$$U_4 = (1/Z_{12}) p \quad (\text{IV.18})$$

$$p_3 = p_2 + Z_4 \cdot U_4 = (\bar{B} + Z_4/Z_{12}) p$$

fazendo

$$\bar{C} = (\bar{B} + Z_4/Z_{12}) \quad (\text{IV.19})$$

temos

$$p_3 = \bar{C} \cdot p \quad (\text{IV.20})$$

$$U_5 = p_3/Z_5 = (\bar{C}/Z_5) p \quad (\text{IV.21})$$

$$U_6 = U_5 + U_4 = (\bar{C}/Z_5 + 1/Z_{12}) p$$

fazendo

$$Z_{13} = Z_{12} \cdot Z_5 / (\bar{C} \cdot Z_{12} + Z_5) \quad (\text{IV.22})$$

temos

$$U_6 = (1/Z_{13}) \cdot p \quad (\text{IV.23})$$

$$p_i = p_3 + Z_6 \cdot U_6 = (\bar{C} + Z_6/Z_{13})$$

fazendo

$$\bar{D} = (\bar{C} + Z_6/Z_{13}) \quad (\text{IV.24})$$

temos

$$p_i = \bar{D} \cdot p \quad (\text{IV.25})$$

$$p = (1/\bar{D}) p_i \quad (\text{IV.26})$$

mas

$$p_i = e_i / (T_E \cdot S_M)$$

e portanto

$$p = (1/(\bar{D} \cdot T_E \cdot S_M)) e_i \quad (\text{IV.27})$$

Resumindo:

$$p = (1/(\bar{D} \cdot T_E \cdot S_M)) p_i$$

$$\bar{D} = (\bar{C} + Z_6/Z_{13})$$

$$Z_{13} = Z_{12} \cdot Z_5 / (\bar{C} \cdot Z_{12} + Z_5)$$

$$\bar{C} = (\bar{B} + Z_4/Z_{12})$$

$$Z_{12} = Z_{11} \cdot Z_{4b} / (\bar{B} \cdot Z_{11} + Z_{4b})$$

$$\bar{B} = (\bar{A} + Z_{4a}/Z_{11})$$

$$Z_{11} = Z_3 \cdot Z_{10} / (\bar{A} \cdot Z_{10} + Z_3)$$

$$A = (1 + Z_2/Z_{10})$$

$$Z_{10} = Z_0 \cdot Z_1 / (Z_0 + Z_1)$$

onde $Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, Z_{4a}, Z_{4b}, Z_4, Z_5$ e Z_6 são definidos pelas equações IV.4.

IV.5- Introdução da influência das variações da temperatura e pressão atmosférica na relação entre p e e_i

Uma vez que o oscilador eletrônico que excitará o elemento piezoelétrico apresenta sempre uma impedância elétrica de saída muito inferior à impedância de C_E em 1000 Hz, as variações de C_E em função da temperatura podem ser desprezadas. Além disso, as variações de C_N , C_L , M_N e S_M serão desprezíveis em relação à temperatura.

Variam em função da temperatura a frequência de ressonância e o fator de transdução eletromecânica do elemento piezoelétrico, como citado no parágrafo IV.2 além dos elementos da parte acústica do circuito, que variam também em função da pressão atmosférica.

a) Dimensionamento da variação de C_M em função da temperatura

Uma vez que o modo de vibração do elemento piezoelétrico não se altera com a temperatura, podemos considerar que o elemento M_M permanece constante e atribuir as variações da frequência de ressonância do elemento piezoelétrico às variações da compliância C_M . Assim, uma vez que a frequência de ressonância é inversamente proporcional à raiz quadrada de C_M , teremos que

$$C_M(\theta) = C_M(25)/(1 + L_{fr} \cdot \Delta\theta)^2 \quad (\text{IV.28})$$

onde

$C_M(\theta)$ é o valor de C_M na temperatura θ

b) Dimensionamento da variação de T_E em função da temperatura

Segundo a equação (IV.1),

$$T_E(\theta) = T_E(25) (1 + L_E \cdot \Delta\theta) \quad (\text{IV.29})$$

c) Dimensionamento das influências da temperatura e pressão atmosférica nas compliâncias acústicas dos volumes de ar enclosurados

Como demonstrado no parágrafo III.1.c.i, o valor da compliância acústica de um volume V_i de ar enclausurado é dada por

$$C_i = V_i / \gamma \cdot P \quad (\text{IV.30})$$

O valor de V_i varia com a temperatura, em função da dilatação térmica de suas paredes.

Assim

$$V_i(\theta) = V_i(25) (1 + 3 \cdot D \cdot \Delta\theta) \quad (\text{IV.31})$$

onde

$V_i(\theta)$ = volume de ar enclausurado na temperatura t
 D = coeficiente de dilatação térmica linear do material de que são feitas as paredes da câmara
 $\Delta\theta$ = diferença entre a temperatura atual e 25°C

Na faixa de pressões e temperaturas de interesse o valor de γ é constante ($\gamma = 1,40$)

O valor de P é o da própria pressão atmosférica em N/m^2 .

d). Dimensionamento das variações das impedâncias dos tubos e orifícios em função da temperatura e pressão atmosférica

i) como foi demonstrado no parágrafo III.1.c.ii, o valor da massa acústica M_i de um tubo de comprimento l_i e raio a_i é

$$M_i = \rho(P, T) \cdot [l_i + (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot a_i] / (\pi \cdot a_i^2) \quad (\text{IV.32})$$

onde $\rho(P, T) = 1,29 (10,13 \times 10^4 / P) (T/273)^{3/2}$

ρ - densidade do ar em kg/m^3

P - pressão atmosférica em N/m^2

T - temperatura absoluta em $^\circ\text{K}$

α_1, α_2 - fatores de correção do comprimento acústico do tubo, função da geometria das extremidades do tubo

O valores de λ_i e a_i variam com a temperatura

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i(\theta) &= \lambda_i(25) (1+D.\Delta\theta) \\ a_i(\theta) &= a_i(25) (1+D.\Delta\theta) \end{aligned} \right\} \quad (IV.33)$$

onde

D = coeficiente de dilatação térmica linear do material das paredes do tubo

ii) No caso de tubos e orifícios estreitos, a impedância acústica Z_{Ai} é dada por

$$Z_{Ai} = R_{Ai} + j X_{Ai} \quad (IV.34)$$

onde

R_{Ai} - parte resistiva da impedância acústica

X_{Ai} - parte reativa da impedância acústica

j - número complexo puro

no parágrafo III.1.c.iii os resultados dos valores das impedâncias R_{Ai} e X_{Ai} são apresentados em função da relação entre o raio a_i e a frequência f e em ambos os casos, tanto R_{Ai} quanto X_{Ai} variam em função de λ_i (comprimento do tubo) e a_i (raio do tubo), que dilatam termicamente segundo a equação IV.33. No caso de $a_i < 0,002 / (f)^{1/2}$ o coeficiente de viscosidade do ar, η (Ns/m^2) é dado por ^{|3|}:

$$\eta = 1,86 \times 10^{-5} \cdot (T/293)^{0,7} \quad |3|$$

T = temperatura absoluta em $^{\circ}\text{K}$

e no caso de $0,01/(f)^{1/2} < a_i < 10/f$, o coeficiente de viscosidade do ar, μ (m^2/s) é dado por ^{|3|}:

$$\mu = 1,56 \times 10^{-5} \cdot (T/293)^{1,7} (10,13 \times 10^4 / P)$$

onde

T = temperatura absoluta em $^{\circ}\text{K}$

P = pressão atmosférica em N/m^2

IV.6- Descrição do programa de computador utilizado para dimensionar os elementos do calibrador.

A fim de facilitar o trabalho de otimização dos valores dos elementos acústicos do calibrador, levando em conta as influências da temperatura e pressão atmosférica e volume equivalente do microfone acoplado, foi desenvolvido um programa em linguagem BASIC para um microcomputador da linha SINCLAIR. Esse programa tem, como entradas, as características do elemento piezoelétrico a 25°C (C_E , T_E , C_M , M_M), o valor do resistor de saída do oscilador (R_E), a compliância C_N , as características do cone transdutor mecano-acústico (M_N , C_L , S_M), o valor a 25°C dos volumes das cavidades, o comprimento e diâmetro a 25°C dos tubos e orifícios, além do número deles em paralelo, a compliância (C_m) associada a 25°C e 1013 mbar ao volume equivalente do microfone acoplado, o coeficiente de dilatação linear dos materiais que compõem as paredes das cavidades e tubos, as taxas de variação relativa em função da temperatura, L_E e L_{fr} , para o fator de transdução eletromecânica e a frequência de ressonância do elemento piezoelétrico, e os valores dos fatores de qualidade para a ressonância mecânica (Q_C) e acústica (Q_R).

Esse programa calcula, em módulo e fase, a função de transferência entre a tensão elétrica e_i aplicada aos terminais do elemento piezoelétrico e a pressão sonora p resultante na cavidade de acoplamento, sendo o módulo da função de transferência dada por

$$T = 20 \log (p/e_i) \quad (\text{IV.35})$$

Para um dado conjunto de entradas, o programa pode calcular, em 1000 Hz, o valor:

- a) da função de transferência em função da temperatura (entre 0°C e 50°C, de 5 em 5°C), mantendo fixos os valores escolhidos para a pressão atmosférica e o volume equivalente do microfone acoplado.

- b) da função de transferência em função da pressão atmosférica (de 500 a 1500 mbar, de 100 em 100 mbar) mantendo fixos a temperatura escolhida e o volume equivalente do microfone acoplado.
- c) da função de transferência em função do volume equivalente do microfone acoplado (de 0 a 1,1 cm³ de 0,1 em 0,1 cm³) mantendo fixas as condições de temperatura e pressão atmosférica escolhidas.
- d) da função de transferência e os valores dos elementos do circuito e respectivas impedâncias numa dada condição de temperatura, pressão, frequência e volume equivalente do microfone acoplado a fim de facilitar a visualização da evolução da contribuição dos vários elementos, nas várias condições.

Em todos os modos de operação, o programa calcula os valores de cada elemento do circuito nas condições especificadas de pressão e temperatura, utilizando as equações do parágrafo IV.5, calculando, em seguida, o valor de cada elemento transferido para o lado acústico do circuito equivalente, segundo as equações (IV.3). A seguir, ele calcula o valor dos módulos e fases das impedâncias $Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_{4a}, Z_{4b}, Z_5$ e Z_6 conforme as equações IV.4, passando aos cálculos do módulo e fase de $Z_{10}, \bar{A}, Z_{11}, \bar{B}, Z_{12}, \bar{C}, Z_{13}$ e \bar{D} segundo as equações (IV.7), (IV.9), (IV.12), (IV.14), (IV.17), (IV.19), (IV.22) e (IV.24), respectivamente, sendo o módulo da função de transferência dado por:

$$\bar{T} = - 20 \log (MD \cdot T_E \cdot S_M) \quad (IV.36)$$

onde $MD =$ módulo de \bar{D}
 $T_E =$ fator de transdução eletromecânica
 $S_M =$ área efetiva do cone

A fase da função de transferência é dada por:

$$\bar{F} = - FD$$

onde $FD =$ fase de \bar{D}

O programa pode apresentar os resultados em forma de tabelas ou na forma gráfica, onde nas abcissas aparece o parâmetro variado (Pressão ou Temperatura) e nas ordenadas o valor de T.

O Apêndice 10 apresenta uma listagem do programa, onde se pode observar que o programa principal chama subrotinas: i) de entrada e modificação de dados; ii) de cálculo das novas dimensões de cada elemento acústico T_E , e C_M a medida que varia a pressão ou a temperatura; iii) de cálculo das impedâncias em paralelo; iv) de cálculo do módulo e fase dos parâmetros, \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} e \bar{D} . Além dessas subrotinas, o programa principal chama subrotinas para o cálculo da escala e traçagem do gráfico dos resultados.

IV.7- Fatores de incerteza dos valores calculados.

Os principais fatores de incerteza, nos parâmetros calculados, são os comprimentos acústicos dos tubos, em função de os valores de α_1 e α_2 (fatores de correção) variarem com a geometria das extremidades dos tubos. Existem fatores α_i calculados teoricamente para tubos terminados por um flange infinito, em frente a um espaço aberto ($\alpha = 0,85$) ou para tubos de comprimento infinito, com a extremidade longe de quaisquer obstáculos ($\alpha = 0,613$). A referência [9] traz, também, alguns valores para essas correções para orifícios em planos montados em seções retas de tubos, em função da relação entre o diâmetro dos orifícios e o diâmetro dos tubos, que mostram que a tendência dos valores das correções é decrescer (comprimento acústico diminuir) com a presença de obstáculos laterais. No entanto, a literatura clássica é omissa quanto aos valores das correções, quando existem obstáculos frontais às extremidades, como no caso do orifício do ressoador. Assim sendo, o programa supõe $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,85$, e supõe-se que haverá um ajuste no valor exato do volume do ressoador para que ele ressoe em 1000 Hz.

Outro fator de incerteza é o valor de S_M , a área efetiva do cone. O valor utilizado nos cálculos será o da área referente à seção de abertura máxima da parte cônica, que, em princípio, é onde termina o pistão, embora o valor de S_M tenda a ser superior a esse valor, influenciando favoravelmente no circuito.

O valor de M_N será ajustado em cada calibrador para que a ressonância mecânica ocorra em 1 kHz, de forma que os valores utilizados nos cálculos do projeto estabelecem a ordem de grandeza dos valores, embora uma variação em torno de 10% seja tolerável nos valores de C_N , M_N e C_L . Os cones serão escolhidos de forma a que o valor de M_N não ultrapasse 0,3 g para atingir a ressonância em 1000 Hz. Este é o pior caso e os resultados expostos no parágrafo seguinte dizem respeito a essa condição.

IV.8- Parâmetros otimizados do circuito equivalente e resultados esperados.

Após um estudo visando atenuar, ao máximo, a influência dos parâmetros temperatura, pressão atmosférica e volume equivalente, chegamos a definir os valores da Tabela IV.2 como uma solução adequada que atende plenamente às especificações de projeto, em conjunto com os parâmetros do elemento piezoelétrico, de diâmetro reduzido, constante da tabela IV.2.

(C ₁)	V ₁ = 2,83x10 ⁻⁶ m ³
(C ₂)	V ₂ = 9,14x10 ⁻⁶ m ³
(C _R)	V _R = 7,72x10 ⁻⁶ m ³
(M _R)	L _R = 3,5x10 ⁻³ m
	D _R = 5,0x10 ⁻³ m
(M ₁ , R ₁)	L ₁ = 1x10 ⁻³ m
	D ₁ = 1,10 ⁻³ m
	N ₁ = 1
	C _N = 1,94x10 ⁻³ m/N
	C _L = 8,82x10 ⁻⁵ m/N
	M _N = 3x10 ⁻⁴ kg
	S _M = 4,52x10 ⁻⁴ m ²

Tabela IV.2 - Valores dos elementos acústicos e mecânicos do projeto otimizado, a ser implementado. (valores nominais).

Utilizando para o ressoador de Helmholtz um fator de qualidade $Q_R = 40$, (previsto pela Referência|9|para a relação espessura/raio de 1,4) e para a ressonância mecânica um fator de qualidade $Q_C = 50$ e, nos cálculos das variações da pressão atmosférica e temperatura, utilizando um volume equivalente de $0,14 \text{ cm}^3$, típico para os microfones condensadores, temos nas tabelas IV.3 a IV. 5, os resultados calculados através do programa descrito, ainda sem compensação eletrônica para as variações do nível sonoro em função da temperatura.

Observação:

A interpretação do módulo (em dB) da Função de Transferência nas Tabelas abaixo é a seguinte: um valor de 0 dB para a função de transferência significa que 1V de sinal elétrico produz 1 N/m^2 de pressão sonora (94 dB SPL). Um valor de - 8 dB significa que um sinal elétrico de 1V produz um nível sonoro 8 dB abaixo de 1 N/m^2 , ou seja, 86 dB SPL, e assim por diante.

P (mbar)	t (°C)										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
500	-11,87	-11,29	-10,65	-9,94	-9,14	-8,25	-7,23	-6,06	-4,68	-3,03	-0,95
600	-11,86	-11,28	-10,64	-9,93	-9,13	-8,24	-7,22	-6,05	-4,67	-3,02	-0,94
700	-11,85	-11,27	-10,63	-9,92	-9,12	-8,24	-7,21	-6,04	-4,67	-3,01	-0,93
800	-11,84	-11,27	-10,62	-9,91	-9,12	-8,23	-7,21	-6,03	-4,66	-3,00	-0,93
900	-11,84	-11,26	-10,62	-9,91	-9,11	-8,22	-7,20	-6,03	-4,66	-3,00	-0,93
1000	-11,83	-11,26	-10,62	-9,90	-9,11	-8,22	-7,20	-6,03	-4,65	-3,00	-0,92
1100	-11,83	-11,25	-10,61	-9,90	-9,11	-8,21	-7,20	-6,03	-4,65	-3,00	-0,92
1200	-11,83	-11,25	-10,61	-9,90	-9,10	-8,21	-7,19	-6,02	-4,65	-2,99	-0,92

Tabela IV.3- Valores em dB do módulo da função de transferência entre p e e_1 calculados para o circuito equivalente do calibrador, com os valores da Tabela IV.2, em 1000 Hz para várias condições de pressão atmosférica e temperatura ($V_{eq}=0,14\text{cm}^3$).

$t(^{\circ}\text{C})$ / $V_{eq}(\text{cm}^3)$	0	10	25	40	50
0,0	-11,84	-10,62	-8,21	-4,63	-0,90
0,2	-11,82	-10,60	-8,21	-4,64	-0,91
0,4	-11,79	-10,59	-8,20	-4,66	-0,93
0,6	-11,77	-10,58	-8,20	-4,67	-0,94
0,8	-11,75	-10,56	-8,20	-4,68	-0,96
1,0	-11,72	-10,55	-8,20	-4,69	-0,97
1,2	-11,70	-10,54	-8,20	-4,70	-0,99
1,4	-11,67	-10,52	-8,20	-4,71	-1,00
1,6	-11,65	-10,51	-8,20	-4,72	-1,02
1,8	-11,63	-10,50	-8,20	-4,72	-1,03
2,0	-11,60	-10,49	-8,20	-4,73	-1,05

Tabela IV.4 - Valores em dB do m3dulo da fun33o de transfer33ncia entre p e e_i para o circuito equivalente do calibrador, com os valores da Tabela IV.2 em fun33o do Volume Equivalente do microfone acoplado e da temperatura em 940 mbar, sem compensa33o em temperatura.

Veq (cm ³)	t (°C)					
	0	10	25	40	50	
0,0	-11,87	-10,64	-8,23	-4,66	-0,92	
0,2	-11,85	-10,63	-8,23	-4,67	-0,93	
0,4	-11,84	-10,63	-8,23	-4,67	-0,94	
0,6	-11,83	-10,62	-8,23	-4,68	-0,95	
0,8	-11,82	-10,61	-8,23	-4,68	-0,96	
1,0	-11,80	-10,61	-8,23	-4,69	-0,96	
1,2	-11,79	-10,60	-8,23	-4,69	-0,97	
1,4	-11,78	-10,59	-8,23	-4,70	-0,98	
1,6	-11,77	-10,59	-8,23	-4,70	-0,99	
1,8	-11,76	-10,58	-8,23	-4,71	-1,00	
2,0	-11,74	-10,58	-8,23	-4,72	-1,01	

Tabela IV.5 - Valores em dB da função de transferência entre p e e_i para o circuito equivalente do calibrador, com os valores da Tabela IV.2 calculados em função do Volume equivalente do microfone acoplado e da temperatura, a 500 mbar, sem compensação de temperatura.

$t(^{\circ}\text{C})$ / $V_{eq}(\text{cm}^3)$	0	10	25	40	50
0,0	-11,84	-10,61	-8,20	-4,63	-0,89
0,2	-11,81	-10,60	-8,20	-4,64	-0,91
0,4	-11,78	-10,58	-8,20	-4,65	-0,93
0,6	-11,76	-10,57	-8,20	-4,66	-0,94
0,8	-11,73	-10,55	-8,20	-4,68	-0,96
1,0	-11,70	-10,54	-8,20	-4,69	-0,98
1,2	-11,67	-10,52	-8,20	-4,70	-1,00
1,4	-11,64	-10,51	-8,20	-4,71	-1,02
1,6	-11,61	-10,49	-8,20	-4,72	-1,03
1,8	-11,59	-10,48	-8,20	-4,73	-1,05
2,0	-11,56	-10,46	-8,20	-4,74	-1,07

Tabela IV.6 - Valores em dB para o módulo da função de transferência entre p e e_i para o circuito equivalente do calibrador com os valores da Tabela IV.2, em função do Volume Equivalente do microfone acoplado e da temperatura a 1100 mbar sem compensação em temperatura.

IV.9- Comentários relativos aos resultados previstos.

Pelos resultados calculados através do circuito equivalente, pode-se concluir o seguinte:

- A influência da pressão atmosférica, desde 0 até 50°C será da ordem de 0,01 dB/100 mbar (ver Tabela IV.3).

- O Volume Equivalente do acoplador assume os valores da Tabela IV.7, em função da temperatura e pressão atmosférica (ver Tabelas IV.4, IV.5 e IV.6).

$t(^{\circ}\text{C})$ P(mbar)	0	10	25	40	50
500	160	>200	>200	>200	180
940	120	140	>200	200	140
1100	80	140	>200	180	100

Tabela IV.7 - Valor em cm^3 do volume equivalente do acoplador (Cavidade C_1) calculados através dos resultados das Tabelas IV.4, IV.5 e IV.6.

Esses resultados permitem dizer que, se corretamente implementados, os valores dos parâmetros acústicos dos vários componentes do calibrador possibilitarão a implementação de um calibrador acústico ressonante, atendendo a todas as especificações do projeto. O oscilador deverá oferecer compensação em temperatura de forma a compensar as variações do nível sonoro, sendo que o sinal elétrico deverá variar desde 1,11 V (em 50°C) até 3,92 V (em 0°C) para manter um nível sonoro de 94 dB SPL na cavidade C_1 .

V. CONSTRUÇÃO DO CALIBRADOR

A Figura V.1 apresenta um corte esquemático do aparelho como um todo, onde ficam destacados a carcaça externa além de três partes funcionais básicas: 1) o circuito de alimentação elétrica; 2) o circuito do oscilador eletrônico e, 3) o circuito eletroacústico. Passamos, em seguida, à descrição dessas partes e suas respectivas funções.

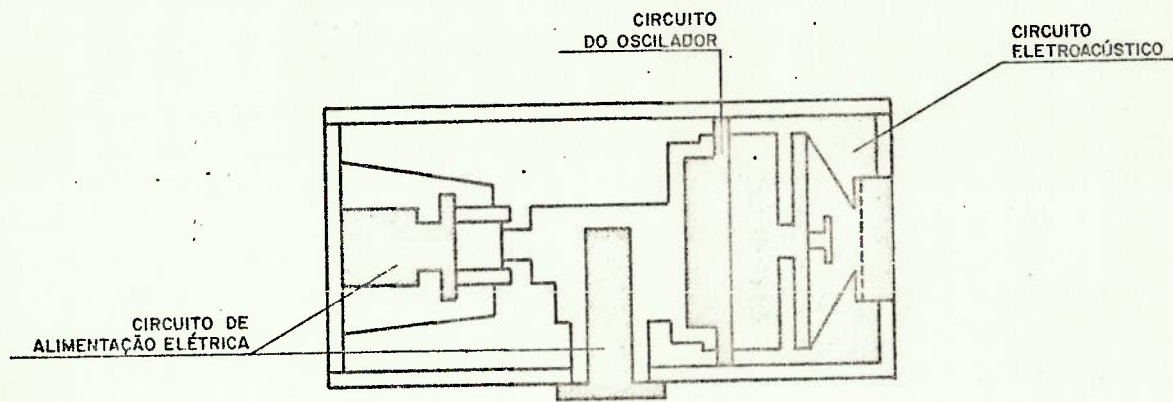


Figura V.1 - Corte esquemático do Calibrador

V.1- Carcaça Externa.

Tendo como finalidade abrigar as partes funcionais do calibrador, a carcaça deve oferecer-lhes proteção contra a influência de pequenos choques oriundos da utilização normal do aparelho, evitando que sua calibração seja alterada. A Figura V.2 mostra o desenho mecânico da carcaça, constituída por um segmento de tubo (1) de aço sem costura, com diâmetro externo de 41,9 mm e 140 mm de comprimento, no qual foram praticadas roscas internas para a acomodação da tampa do compartimento da bateria (2) e do anel de aperto, e fixação do circuito eletroacústico. Além das roscas, é praticado também um furo retangular (4) na parede do tubo, visando à acomodação da chave elétrica pela qual se aciona o calibrador.

No interior desse tubo de aço aparece, ainda na Figura IV.2, um enchimento em resina (5) poliéster que visa construir o compartimento da bateria (6) e o encosto interno (7) das partes mecânicas que compõem o circuito eletroacústico. Nesse enchimento aparecem dois furos (8) onde são instaladas as molas que garantem o contato elétrico entre os contatos de alimentação do calibrador e os terminais da bateria.

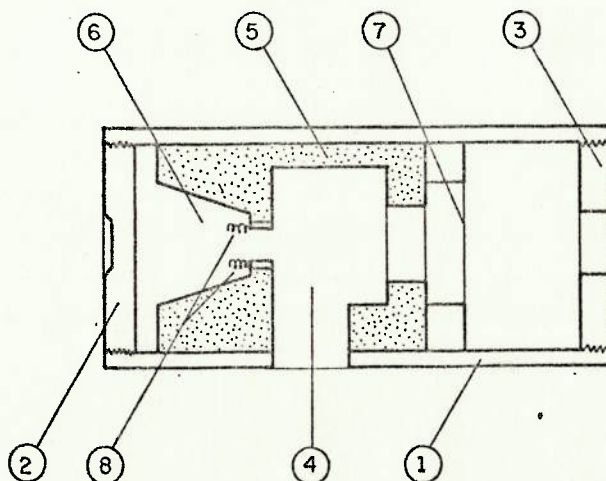


Figura V.2 - A carcaça externa do calibrador (desenho esquemático).

V.2- Circuito de alimentação elétrica.

O circuito de alimentação elétrica tem, como finalidade, prover o oscilador eletrônico da energia elétrica necessária ao perfeito funcionamento do calibrador. Para isso, ele contém um dispositivo para teste de bateria que indica, quando acionado, se a tensão da bateria é adequada à alimentação do calibrador.

Esse circuito é composto por uma bateria de 9V(9), modelo IEC 6F22, pelos contatos(10) da bateria, pelo dispositivo(11) de teste de bateria e circuito duplicador de fonte, construídos sobre a chave(12) tipo H-H e respectivos cabos elétricos de conexão, como mostra esquematicamente a Figura V.3.

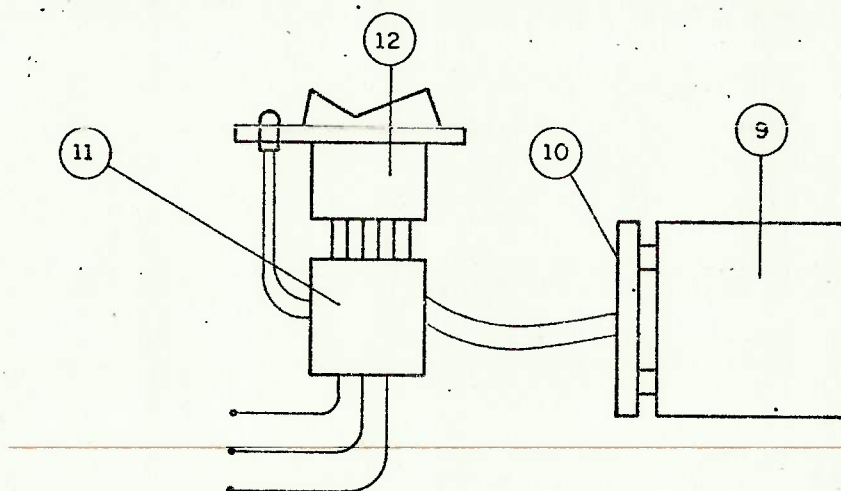


Figura V.3 - Visão esquemática do circuito de alimentação elétrica.

A Figura V.4 apresenta o esquema elétrico desse circuito:

A Figura V.4 apresenta o esquema elétrico desse circuito.

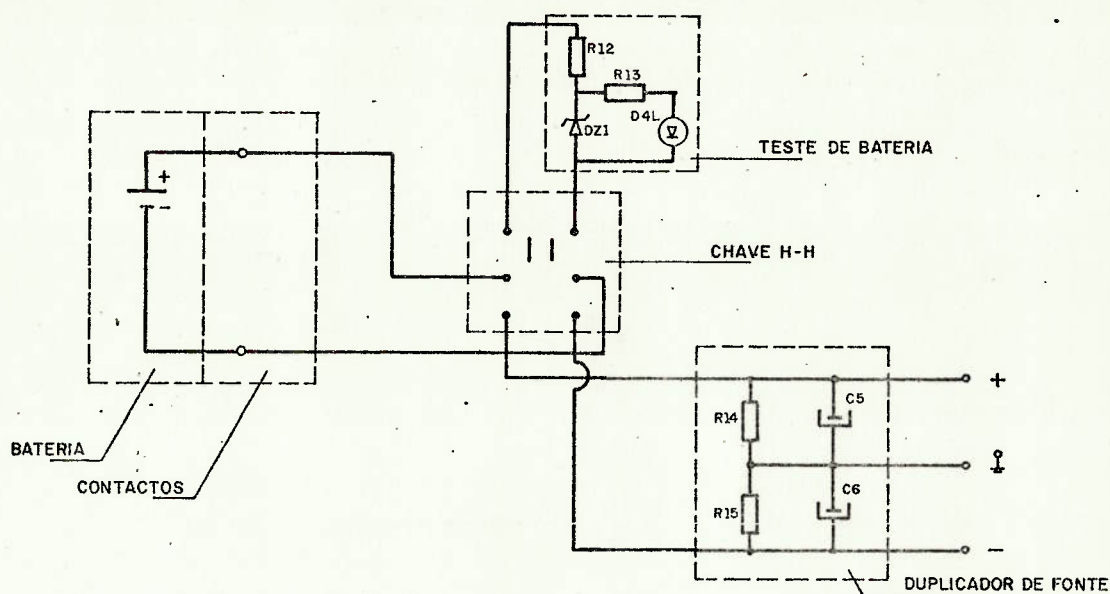


Figura V.4 - Esquema elétrico do circuito de alimentação elétrica do calibrador.

V.3- Circuito oscilador eletrônico.

O circuito oscilador eletrônico tem como função a excitação do elemento transdutor afim de produzir o sinal acústico desejado. Ele deve produzir um sinal elétrico de 1000 Hz, com frequência e nível estáveis e distorção harmônica inferior a 1%, contendo um dispositivo de ganho variável em função da temperatura, de forma a compensar as eventuais variações do nível sonoro oriundos, naturalmente, do circuito eletroacústico.

O oscilador foi montado em uma placa de circuito impresso, e seus detalhes construtivos específicos são descritos no Apêndice 11. A Figura V.5 apresenta um esquema eletrônico do circuito oscilador, contém: (13) um módulo oscilador a ponte de Wien que utiliza como realimentação não-linear um transistor FET operando como resistor variável por tensão cuja porta (gate) é excitada por uma amostra retificada do sinal de saída do módulo oscilador e; (14) um circuito amplificador de ganho variável em função da temperatura que utiliza o resistor NTC como elemento variável em função da temperatura.

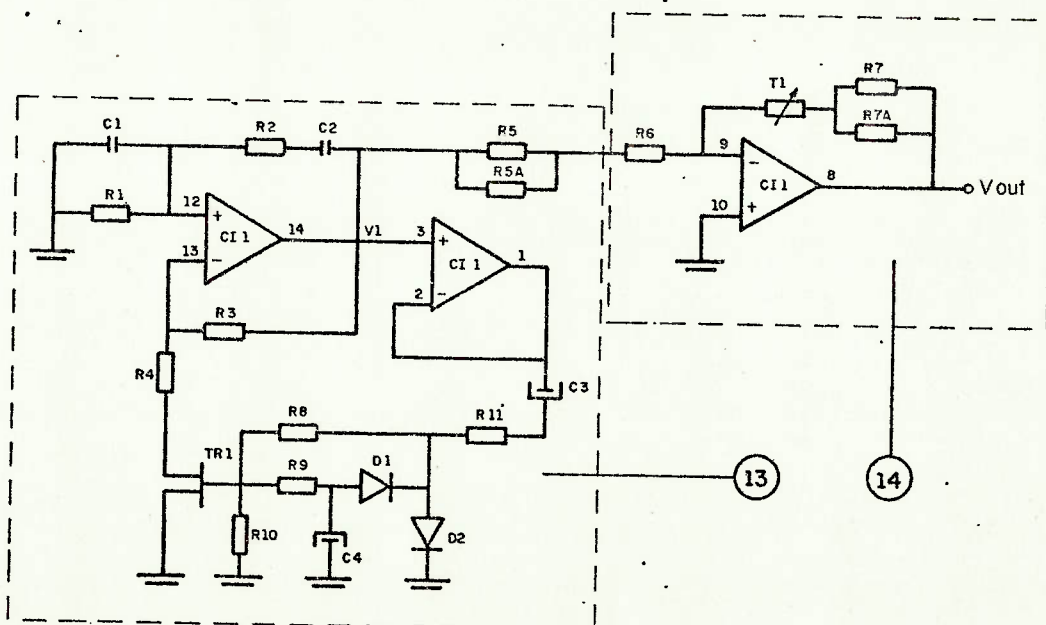


Figura V.5 - Esquema eletrônico do circuito oscilador

V.4 - Circuito eletroacústico.

V.4.a - Descrição do conjunto.

De forma a implementar os elementos acústicos descritos no capítulo anterior, construiu-se um dispositivo cujo desenho esquemático aparece na Figura V.6.

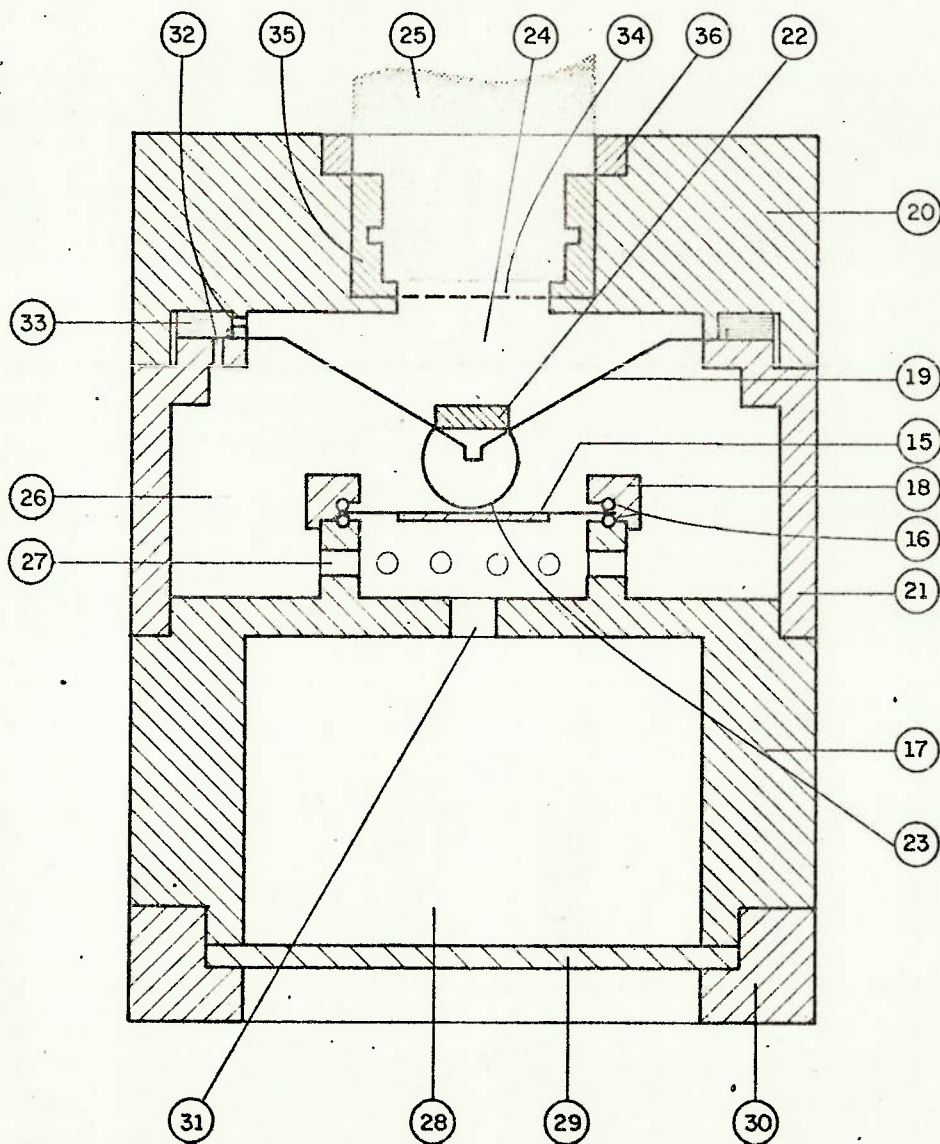


Figura V.6 - Corte esquemático do circuito eletroacústico.

Nessa figura, vê-se que o elemento piezoelétrico (15) (elementos C_E , T_E , M_C e CC) é preso entre dois anéis (16) de seção circular rígidos, a fim de determinar, univocamente, seu diâmetro nodal, ao mesmo tempo que permitem sua movimentação como um disco simplesmente apoiado em seu perímetro.

Um desses anéis é solidário ao bloco (17) e o outro solidário ao anel (18) parafusado ao bloco (17), de forma a fixar o perímetro do elemento piezoelétrico entre os dois anéis rígidos.

O cone transdutor mecano-acústico (19) tem o perímetro externo de sua face plana (compliance C_L) fixado entre o lábio construído com essa finalidade no bloco (20) e o encosto também construído para esse fim no anel (21). O vértice do cone (19) é preenchido com a massa adicional (22) (M_N), notando-se, entre o cone (19) e o elemento piezoelétrico (15), a mola (23) (C_N). A cavidade (24), (C_1), é limitada pelo diafragma do microfone acoplado (25) (e respectivo volume equivalente, C_m), pelas paredes internas do bloco (20), e pelo cone transdutor mecano-acústico (19). A cavidade (26), (C_V), é limitada pelo cone transdutor mecano acústico (19), pelas paredes internas do anel (21) e pela face superior do bloco (17), incluindo o volume entre o bloco (17) e o elemento piezoelétrico (15), com o qual se comunica, sem restrição, pelas aberturas (27) no bloco (17). A cavidade (28) do ressoador (C_R) é implementada entre a parte inferior do bloco (17), a placa de circuito impresso (29) fixado na posição pelo anel (30). O "pescoço" do ressoador (M_R) é implementado pelo orifício (31) no bloco (17).

A equalização da pressão entre a cavidade (24) e o restante do circuito acústico, (M_1 , R_1) é implementado pelos orifícios (32) no bloco (20) e no anel (21), atravessando o anel poroso (33). Completando o calibrador: a tela protetora (34) impede que elementos estranhos penetrem no interior do aparelho e; o anel de teflon (35) e seu anel de fixação (36) fazem com que os microfones tenham um posicionamento estável e vedado em relação à cavidade de acoplamento (24). O desenho mecânico das peças consta do Apêndice .

V.4.b- Ajustes do circuito eletroacústico.

Uma vez de posse das peças que compõem o circuito eletroacústico, sintoniza-se em 1000 Hz a ressonância do cone transdutor mecano-acústico, ajustando-se, iterativamente, o valor da massa adicional (22). A seguir, sintoniza-se, pela variação do volume da cavidade (28) do ressoador, a frequência do ressoador em 1000 Hz com o conjunto todo montado. Os métodos de medição da ressonância do cone transdutor e do ressoador de Helmholtz são descritos, respectivamente, nos Apêndices 13 e 14.

V.5- Montagem do Calibrador.

Uma vez ajustadas as frequências de ressonância do cone transdutor e do ressoador de Helmholtz, instala-se, em seu lugar, o oscilador eletrônico ainda não compensado e instala-se o circuito eletroacústico mais o oscilador eletrônico em um dispositivo envoltório, pressionando-o com o mesmo torque de aperto a ser aplicado na montagem do calibrador, em sua carcaça.

Instalando-se um termopar diretamente sobre a placa de circuito impresso, realiza-se um ensaio para determinar a variação efetiva do nível sonoro entre 25°C e 50°C. (Ver Apêndice 15). Em seguida, ajusta-se o ganho e a compensação em temperatura do circuito oscilador para que o nível sonoro seja de 94,0 dB SPL nessa faixa de temperaturas. Repetem-se o ensaio em temperatura e o ajuste até que a variação da calibração em temperatura seja de $\pm 0,10$ dB entre 25°C e 35°C e $\pm 0,25$ dB entre 25°C e 50°C.

Todo esse procedimento é realizado com o calibrador fora de sua carcaça, e utilizando uma fonte externa de energia.

Finalmente, conecta-se o circuito de alimentação elétrica e instala-se o circuito eletroacústico em sua carcaça externa.

VI. MONTAGEM E ENSAIOS PRELIMINARES

Em função de dificuldades encontradas no ajuste do circuito eletro-acústico em especial na montagem da mola de desacoplamento entre o cone e o elemento piezoelétrico, só foi possível alcançar um comportamento satisfatório desse circuito muito próximo da data final de entrega deste trabalho. Isso nos levou a decidir deixar de lado o trabalho demorado de compensar termicamente o circuito oscilador (ver método no Apêndice 15), realizando os ensaios sem essa compensação.

VI.1. Ensaio visando determinar a influência efetiva da variação do volume equivalente dos microfones acoplados sobre o nível sonoro produzido pelo calibrador.

Acrescentando-se um número crescente de anéis (de diâmetro externo 23,8mm, diâmetro interno de 18,6mm e espessura 0,4mm) ao lábio do anel de teflon (peça 35 da Fig. V.6) variamos o volume da cavidade C_1 , medindo o nível sonoro com um microfone de 1 polegada de volume equivalente a $0,14 \text{ cm}^3$. Os ensaios foram realizados a 943 mbar e 22°C, e os resultados encontram-se na Tabela VI.1

Número de anéis	$V_{\text{extra}} (\text{cm}^3)$	$V_{\text{eq}} (\text{cm}^3)$	L (dB-SPL) *
0	0	0,14	94,00
1	0,11	0,25	94,00
2	0,22	0,36	94,00
3	0,33	0,47	94,00
4	0,44	0,58	94,05
5	0,55	0,69	94,05
6	0,66	0,80	94,10
7	0,77	0,91	94,10
8	0,94	1,08	94,10

Tabela VI.1 - Resultado dos ensaios preliminares visando determinar a influência do volume equivalente do microfone sobre o nível sonoro produzido pelo calibrador, a 943 mbar e 23°C (resultados repetidos em três ensaios)

*Precisão das leituras 0,05 dB

VI.2 Ensaios preliminares visando a determinação da influência da pressão atmosférica no nível sonoro

Para a avaliação da influência da pressão atmosférica no nível sonoro, instalou-se no calibrador um microfone de 1/2 polegada com volume equivalente de $0,04\text{cm}^3$ montado em um adaptador (especialmente construído para adaptar esse tipo de microfone ao calibrador) e ligou-se esse microfone por um cabo a um medidor de nível sonoro de precisão, que foi instalado juntamente com um altímetro, sob a câmpânula de uma bomba de vácuo. Calibrando o altímetro de aviação para 760mmHg e lendo com um barômetro calibrado a pressão atmosférica local, estabeleceu-se a relação entre a pressão atmosférica e a altitude lida pelo altímetro e calculou-se as altitudes relativas a 500, 600, 700, 800 e 900 mbar. Aplicando-se o vácuo à câmara e controlando-se a leitura do altímetro, realizou-se o ensaio cujos resultados, repetidos em três corridas, constam da Tabela VI.2. A temperatura ambiente era de 23°C.

p(mbar)	L(dB)
500	95,1
600	95,0
700	94,7
800	94,1
900	94,0
943	94,0
1013	93,1

Tabela VI.2 - Resultados dos ensaios preliminares visando a levantar a influência da pressão atmosférica, no nível sonoro produzido pelo calibrador, em um microfone de volume equivalente de $0,04\text{cm}^3$.

VI.3 - Ensaio Preliminares visando determinar a influência da temperatura sobre o nível sonoro produzido pelo calibrador

Instalou-se dentro de uma caixa de isopor o calibrador (alimentado por uma fonte de alimentação elétrica externa) acoplado a um microfone de 1/2 polegada ($V_{eq}=0,04\text{cm}^3$) por meio de um adaptador (especialmente construído para esses microfones). Da caixa de isopor saíam o cabo do preamplificador, o termopar e os fios de alimentação do calibrador. Colocando primeiramente a caixa aberta dentro de uma estufa, aguardamos até que a temperatura chegasse a 50°C , quando fechamos a caixa de isopor. Retirando-a da estufa, realizamos as leituras do nível sonoro produzido pelo calibrador enquanto a temperatura decrescia naturalmente.

As leituras da temperatura interna da caixa foram feitas grau a grau, desde $44,7^{\circ}\text{C}$ até $28,4^{\circ}\text{C}$ (quando o tempo para que a temperatura decrescesse de 1° , ultrapassou de uma hora).

Em seguida colocou-se essa mesma montagem (caixa des-tampada) dentro de uma outra caixa de isopor, com gelo seco. Fechando-se a caixa externa aguardou-se que a temperatura externa chegasse a -20°C , quando tampamos a caixa interna retiramos o gelo seco, tampamos a caixa externa e aguardamos que a temperatura no interior da caixa subisse até 0°C para iniciarmos as leituras que, novamente foram realizadas grau a grau até $23,0^{\circ}\text{C}$. A Tabela VI.2 apresenta os resultados desse ensaio.

$\theta(^{\circ}\text{C})$	L(dB)	$\theta(^{\circ}\text{C})$	L(dB)	$\theta(^{\circ}\text{C})$	L(dB)	$\theta(^{\circ}\text{C})$	L(dB)
0,0	93,6	12,0	94,2	24,0	-	36,4	93,0
1,0	93,6	13,0	94,2	25,0	-	37,4	93,0
2,0	93,6	14,0	94,3	26,0	-	38,4	93,1
3,0	93,7	15,0	94,5	27,0	-	39,4	93,1
4,0	93,8	16,0	94,6	28,4	92,9	40,4	93,1
5,0	93,8	17,0	94,8	29,4	92,9	41,4	93,1
6,0	93,8	18,0	95,0	30,4	92,9	42,4	93,1
7,0	93,9	19,0	95,1	31,4	92,9	43,4	93,1
8,0	94,0	20,0	95,2	32,4	92,9	44,7	93,1
9,0	94,0	21,0	95,1	33,4	92,9	45,0	-
10,0	94,0	22,0	94,8	34,4	93,0	46,0	-
11,0	94,1	23,0	94,0	35,4	93,0	47,0	-

Tabela VI.3 - Resultados dos ensaios preliminares visando determinar a influência da temperatura no nível sonoro produzido pelo calibrador em um microfone de $V_{eq}=0,04\text{cm}^3$ a 943mbar .

VI.4 - Comentários sobre os resultados dos ensaios preliminares

Os resultados e a interpretação correta dos ensaios são parcialmente prejudicados pelo fato de não se ter compensado em temperatura o calibrador pela exiguidade do tempo disponível. No entanto, apesar disso, os resultados são muito animadores para um protótipo:

- Com relação ao volume equivalente da cavidade C_1 , através dos resultados da Tabela VI.1 pode-se dizer que o volume equivalente alcançado foi de no mínimo 80cm^3 , mesmo sabendo que não foi possível um ajuste perfeito da ressonância do ressoador de Helmholtz em 1000Hz , que é um trabalho iterativo e demorado.

- Com relação ao comportamento em função da pressão atmosférica os resultados são um tanto desconcertantes à primeira vista, mas, se interpretados à luz do ensaio relativo à temperatura, explica-se pelo menos parcialmente o ocorrido: o nível sonoro deveria cair e não subir à medida em que a pressão atmosférica cai. No entanto, o método utilizado de aplicação da variação da pressão atmosférica, deve fazer com que a temperatura também caia (infelizmente não pensamos em instalar um termômetro dentro da câmpanula para confirmar este fato), o que, perto de 23°C , em função do comportamento descrito na Tabela VI.3, implica numa elevação do nível sonoro produzido pelo calibrador. Isso pode significar, em função das variações observadas (+ 1,1dB entre 943 e 500 mbar e - 0,9dB entre 1013 e 943 mbar) que a temperatura pode ter variado para 21°C nas pressões baixas e até 28°C ao elevarmos o valor da pressão (neste último caso o ar que foi comprimido dentro da câmpanula, além do aquecimento normal da compressão é aquecido pela temperatura do compressor). Infelizmente essa interpretação não pôde ser confirmada na prática, mas não vemos outra teoricamente viável uma vez que o comportamento deveria ter sido o inverso no caso de avaliação do nível sonoro ter sido causado pela variação da pressão atmosférica. Se esta interpretação está correta, o que acreditamos ser verdade, o comportamento do calibrador em relação à pressão atmosférica está muito próximo das especificações do projeto.

- Com relação ao comportamento em temperatura (sem compensação) notamos que o nível sonoro passa por um máximo em 20°C, apesar de ser muito estável entre 28 e 45°C e subir gradativamente entre 0 e 20°C. Esse comportamento está longe de ser o previsto no modelo matemático, mas analisando a equalização da pressão estática entre a cavidade C₁ e o restante do circuito acústico (ver itens 32 e 33 na Fig. V.6), vemos que ela não é exatamente a prevista no modelo (orifício de 1mm de diâmetro e 1mm de comprimento). Ao longo do estudo do circuito equivalente, visando otimizar a configuração adaptada do calibrador B & K tipo 4230, notamos um comportamento muito parecido com o observado em certas configurações do furo de equalização em questão. Infelizmente o tempo não permite uma análise mais detida deste problema no momento. No entanto, se esta interpretação for correta, basta que em vez de apenas um furo na peça (21) (ver Fig. V.6) um número grande de furos seja feito, e que a única limitação nesta equalização seja o furo de 1mm de diâmetro por 1mm de comprimento na peça (20) (ver Fig. V.6), para que o comportamento do circuito eletro-acústico seja o previsto pelo modelo.

Como em todo os resultados dos ensaios preliminares foram muito promissores, indicando que com pequenas modificações (sujeitos a um estudo detalhado, naturalmente) o calibrador venha atender às especificações de projeto.

VII. CONCLUSÃO

Apesar das dificuldades encontradas no desenvolvimento do calibrador acústico portátil, função da inexistência de bibliografia específica a respeito, das limitações de componentes e métodos de implementação disponíveis e da própria inexperiência do candidato, os resultados dos ensaios preliminares permitem prever que com algumas modificações menores será possível ter um protótipo de calibrador acústico portátil satisfazendo todas as especificações de projeto com um elemento piezoelétrico fabricado no Brasil e facilmente disponível.

Assim sendo, concluímos o presente trabalho, satisfeitos de podermos contribuir para o desenvolvimento da instrumentação nacional que viabilizará a disseminação das técnicas metrológicamente confiáveis de medição dos ruídos acústicos, possibilitando o controle dos mesmos, segundo as reais necessidades de cada caso.

APÊNDICE 1a: Lei do Silêncio do Município de São Paulo
Lei 8/06 de 30/08/74 e
Decreto 11467 de 30/10/1974

LEI Nº 8.106, de 30 de Agosto de 1974

Dispõe sobre sons urbanos, fixa níveis e horários em que será permitida a sua emissão nas diferentes zonas de uso e atividades, e dá outras providências.

MIGUEL COLASUONINO, Prefeito do Município de São Paulo, usando das atribuições que lhe são conferidas por lei, faço saber que a Câmara Municipal, em sessão de 12 de agosto de 1974, decretou e eu promulgo a seguinte lei:

CAPITULO I - DISPOSIÇÕES PRELIMINARES

Art. 1º - É proibido perturbar o sossego e o bem estar / públicos e da vizinhança com sons de qualquer natureza que ultrapassem os níveis previstos para as diferentes zonas de uso e horário, na presente lei e seus regulamentos.

Parágrafo único - Respeitado o disposto no parágrafo 2º, do artigo 13, as relações entre condôminos reger-se-ão, quanto à matéria, pelo que dispuser a Convenção de condomínio.

Art. 2º - Para os efeitos desta lei, os níveis de som, de acordo com as características das zonas de uso, previstas na Lei nº / 7.805, de 1º de novembro de 1972, bem como os níveis máximos em que / serão admitidos, nas diferentes zonas, horários e atividades, ficam / representados por classes, a seguir designadas:

I - níveis de som de acordo com as características das zonas de uso:

- a) K1 - para a zona estritamente residencial - Z1;
- b) K2 - para as zonas de predominância residencial - Z2, Z8-CR1, Z8-CR2, Z8-CR4;
- c) K3 - para a zona de predominância residencial de densidade média e zonas especiais - Z3 e Z8;
- d) K4 - zonas mistas de densidade média Z4 e Z8-CR3;
- e) K5 - zona mista de densidade alta - Z5;
- f) K6 - para a zona de predominância industrial - Z6;
- g) K7 - para a zona estritamente industrial Z7;

II- K8 - para o máximo nível de som admitido em determinadas zonas, de acordo com o estabelecido nos Quadros I, II e IV, anexos a esta lei.

III- máximos níveis de som admitidos para determinadas atividades:

- a) K9 - para o máximo nível de som admitido para as fontes sonoras de equipamentos de construção civil;
- b) K10 - para o máximo nível de som admitido para as fontes automotoras.

Art. 3º - O Executivo fixará, dentro do prazo de 60 (sessenta) dias da publicação desta lei, os valores numéricos correspondentes às classes a que se refere o artigo anterior, de acordo com a recomendação da Comissão de zoneamento, que fica alterada na sua composição para integrar mais os representantes das seguintes entidades:

- a) VETADO
- b) VETADO
- c) VETADO

Parágrafo único - As subseqüentes alterações dos valores a que se refere este artigo serão feitas pelo mesmo processo nele indicado.

CAPITULO II - SONS PRODUZIDOS POR OBRAS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Art. 4º - As obras de construção civil estarão sujeitas aos níveis de som e horários constantes do Quadro I, anexo.

§ 1º - As atividades passíveis de confinamento estarão sujeitas aos níveis de som e horários constantes do Quadro II, anexo.

§ 2º - As atividades de confinamento impraticável, ou que, apesar de confinadas, ultrapassem o nível máximo para elas admitido, somente poderão funcionar no horário de 7,00 às 16,00 horas, se contínuas, e no das 7,00 às 19,00 horas, se descontínuas.

Art. 5º - Somente serão admitidas obras de construção civil, aos domingos e feriados, desde que satisfeitas as seguintes condições:

- a) obtenção de alvará de licença especial, com discriminação de horários e tipos de serviços que poderão ser executados;
- b) observância dos níveis de som e horários do Quadro IV, anexo.

Art. 6º - As obras públicas de equipamentos de infra-estrutura e serviços correlatos estão condicionados ao estabelecido no Quadro III anexo.

Art. 7º - Será permitida, independentemente da zona de uso e do horário, e sem limitação de nível de som, toda e qualquer obra, pública ou particular, de emergência, que, por sua natureza, objetive evitar colapso nos serviços de infra-estrutura da Cidade ou risco da integridade física da população.

CAPÍTULO III - SONS PRODUZIDOS POR FONTES MÓVEIS E AUTOMOTORAS

Art. 8º - Ressalvado o disposto nos artigos 9º, 10 e 11, e nas legislações federal e estadual específicas, o nível de som tolerado para as fontes móveis e automotoras será o da classe 10 (K10).

Art. 9º - Em todas as zonas de uso são proibidos quaisquer sons emitidos por fontes automotoras, como os de buzinas, sinais de alarme e outros equipamentos, nas proximidades de hospitais, pronto-socorros, sanatórios, clínicas e escolas, conforme sinalização.

Art. 10º - Fica proibido, no perímetro urbano, do Município, o uso de buzinas a ar comprimido ou similares, bem como, respeitada a legislação própria, qualquer outro tipo.

Art.11º - Fica proibido o trânsito de veículos, no Município de São Paulo, que não possuam dispositivo silencioso de escapamento conforme o fornecido pelos respectivos fabricantes.

CAPÍTULO IV - SONS PRODUZIDOS POR FONTES DIVERSAS

Art.12º - Para os efeitos desta lei, são consideradas fontes diversas de sons todas as não mencionadas nos Capítulos II e III.

Art.13º - Os estabelecimentos comerciais, industriais, institucionais, de prestação de serviços e nas residências terão que se adaptar aos níveis de son fixados no Quadro IV para as diferentes zonas de uso e horários, dentro dos prazos e nas condições previstos nesta lei.

§ 1º - Os estabelecimentos existentes anteriormente a esta lei e os novos terão a renovação e a concessão de seus alvarás condicionadas a vistoria prévia que comprove tratamento acústico compatível com os níveis das zonas de uso em que estiverem situados de acordo com o Quadro IV, anexo, salvo quanto aos primeiros, se em curso os prazos referidos neste artigo.

§ 2º - As disposições deste artigo e do parágrafo anterior aplicam-se aos edifícios em condomínio de uso misto.

Art.14º - Em qualquer zona de uso não serão admitidos sons provocados por criação, tratamento e comércio de animais, de modo que venham a incomodar a vizinhança.

Art.15º - Com exceção do disposto no artigo 16 e alíneas, é proibido: a detonação de explosivos, o uso de apitos, sireias, sinos alto-falantes e outros aparelhos sonoros e a realização de manifestações coletivas, que se façam ouvir fora de recintos fechados, de forma a incomodar a vizinhança e os transeuntes.

Art.16º - Não estarão sujeitos às proibições desta lei os sons produzidos pelas seguintes fontes:

- a) aparelhos sonoros usados durante a propaganda eleitoral, conforme o disposto na legislação própria;
- b) sireias ou aparelhos sonoros de viaturas quando em serviços de socorro ou de policiamento;
- c) detonações de explosivos empregados no arrebatamento de pedreiras e rochas ou nas demolições, desde que em horário e com carga previamente autorizados por órgão competente;
- d) manifestações em festividades religiosas, comemorações oficiais, reuniões desportivas, festejos carnavalescos e juninos, passeatas, desfiles, fanfarras, bandas de música, desde que se realizem em horário e local previamente autorizados pelo órgão competente / ou nas circunstâncias consagradas pela tradição;
- e) sinos de templos, desde que os sons tenham duração não superior a 60 segundos, e apenas para a assinalação das horas e dos ofícios religiosos; e carrilhões, desde que os sons tenham duração não superior a 15 minutos, a cada 4 horas e somente no período diurno, das 7,00 às 19,00 horas.

CAPÍTULO V - SANÇÕES

Art.17º - Verificada a infração a qualquer dispositivo desta lei, o órgão competente da Prefeitura, independentemente de outras sanções cabíveis, decorrentes da legislação federal ou estadual, aplicará, na forma deste Capítulo, as penalidades seguintes:

- a) advertência;
- b) multa;
- c) interdição da atividade, fechamento do estabelecimento, embargo da obra, apreensão da fonte;
- d) cassação do alvará de autorização ou licença.

Art.18º - A infração ao disposto no Capítulo II implicará na imediata interdição da atividade com concessão do prazo de 24 horas para que o infrator se adapte às condições ali impostas.

Parágrafo único - O não cumprimento do disposto neste artigo acarretará multa, no valor de até 10 salários mínimos, por dia, até o máximo de 10 dias, quando, então, será embargada a obra.

Art.19º - A infração ao disposto no Capítulo III implicará na imposição de multa, no valor de até 2 salários mínimos aos proprietários ou locatários.

§ 1º - Após a aplicação da multa, deverá o responsável apresentar-se, no prazo de 5 dias úteis, no órgão competente, com a fonte causadora do son devidamente regularizada.

§ 2º - O não cumprimento do disposto no parágrafo anterior importará na aplicação da multa em dobro, após o prazo de 5 dias, e multa em triplo, após o prazo de 10 dias, quando então, proceder-se-á à apreensão da fonte causadora da infração.

Art.20º - A infração ao disposto no Capítulo IV importará na aplicação de multa, de até 10 salários mínimos, no ato, e renovável a cada reincidência.

Parágrafo único - Após a aplicação de 5 multas, será cassada a licença de funcionamento do estabelecimento ou apreendida a fonte sonora.

Art.21º - Para os casos de que trata o Capítulo IV, e sempre que se justificar a medida, serão os responsáveis advertidos para procederem às adaptações necessárias nos seguintes prazos:

- a) de 3 meses a 1 ano para usos não industriais;
- b) de 3 meses a 3 anos para usos industriais.

Art.22º - Fica estabelecida multa, de até 20 salários mínimos, renovada cada 30 dias, para os casos previstos no artigo anterior, até a cessação da irregularidade e independentemente do prazo concedido.

Parágrafo único - A multa a que se refere este artigo começará a ser aplicada após 90 dias da publicação desta lei.

CAPÍTULO VI - DISPOSIÇÕES GERAIS

Art.23º - A Comissão a que se refere o artigo 3º desta lei determinará o equipamento e os processos de medição dos níveis de son.

Art.24º - Nos casos de duas ou mais zonas confinantes e de uso diferente, fica estabelecido que se aplicará, ao longo dos lo-

Art.24º - Nos casos de duas ou mais zonas confinantes e de uso diferente, fica estabelecido que aplicará, ao longo dos logradouros linítrofes, o disposto nesta lei, para a zona que for mais restritiva.

Art.25º - As fontes de som de determinada zona de uso não poderão transmitir, para outra zona de uso mais restritiva, níveis de som que ultrapassem os máximos fixados para esta última.

Art.26º - Esta lei entrará em vigor na data da sua publicação, revogadas as disposições em contrário, e, especialmente, a lei/nº 4.805, de 29 de setembro de 1955.

Prefeitura do Município de São Paulo, aos 30 de agosto de 1974, 421ª da fundação de São Paulo - O Prefeito, MIGUEL COLASUAINO

QUADRO I

HORÁRIOS ZONAS DE USO	DIURNO 7,00 às 16,00	DIURNO 16,00 às 19,00	NOTURNO 19,00 às 7,00
Estritamente residen- cial Z1	K9	K2	K8
Predominancia resi- dencial Z2,Z8-CR1,Z8-CR2,Z8- CR4	K9	K3	K8
Predominancia resi- dencial Densidade Média Z3	K9	K4	K8
Mista Densidade Média Z8-CR3,Z4	K9	K5	K2
Mista Densidade Alta Z5	K9	K6	K2
Predominancia Indus- trial Z6	K9	K7	K3
Estritamente Indus- trial Z7	K9	K9	K6
Especial Z8	K9	K4	K8

QUADRO II

HORARIOS ZONAS DE USO	DIURNO 7,00 às 16,00	DIURNO 16,00 às 19,00	NOTURNO 19,00 às 7,00
Estritamente resi- dencial Z1	K6	K2	K8
Predominância re- sidencial Z2, Z8-CR1, Z8-CR2, Z8-CR4	K6	K3	K8
Predominância re- sidencial Z3	K6	K4	K8
Mista Densidade Média Z8-CR3	K6	K5	K2
Mista Densidade Alta Z5	K6	K6	K2
Predominância Industrial Z6	K6	K6	K3
Estritamente In- dustrial Z7	K7	K7	K6
Especial Z8	K6	K6	K8

QUADRO III

HORARIO	CLASSE
Das 07,00 às 19,00	K9
Das 19,00 às 23,00	K5
Das 23,00 às 07,00	K2

QUADRO IV

HORÁRIOS ZONAS DE USO	DIURNO 7,00 às 19,00	DIURNO 19,00 às 7,00
Estritamente residen- cial Z1	K1	K8
Predominância residen- cial Z2, Z8-CR1, Z8-CR2, Z8-CR4	K2	K8
Predominância residen- cial Densidade Média Z3	K3	K8
Mista Densidade Média Z8-CR3	K4	K2
Mista Densidade Alta Z5	K5	K2
Predominância Indus- trial Z6	K6	K3
Estritamente Indus- trial Z7	K7	K6
Especial Z8	K3	K8

na/

LEI 8.106/74 (FIM)

DECRETO Nº 11.467, de 30 de outubro de 1974

Regulamenta a Lei 8.106 de 30 de Agosto de 1974, que dispõe sobre sons urbanos.

MIGUEL COLASUCCINO, Prefeito do Município de São Paulo, usando das atribuições que lhe são conferidas por lei,
DECRETA:

CAPÍTULO I - Dos objetivos, definições e disposições gerais de medição

SECÇÃO I - Dos Objetivos

Art. 1º - Este decreto, em conformidade com a Lei 8106/ de 30 de agosto de 1974, tem como objetivo estabelecer condições de sossego e bem estar público, no que tange à poluição sonora em cada zona de uso, compatíveis com as respectivas predominâncias de uso.

SECÇÃO II - Das Definições

Art. 2º - Para efeito do disposto neste Decreto, as expressões a seguir relacionadas passam a ter como definição:

I - Som - é toda e qualquer vibração acústica capaz de provocar sensações auditivas.

II - Nível de som ou nível de pressão acústica ponderada - é definido por 20 (vinte) vezes o logaritmo decimal da relação da pressão acústica eficaz, produzida por um som, e a pressão acústica de referência, sendo aquela pressão eficaz ponderada conforme as curvas (A), (B) e (C), de acordo com a Tabela I da EB-386/74 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

III - Fontes sonoras de atividade descontínua - são aquelas cujos níveis de som medidos no perímetro de contorno da fonte equidistante 7,50m (sete metros e cinquenta centímetros), da mesma com o aparelho medidor conectado à resposta rápida e à cota de 1,20 m (um metro e vinte centímetros) do solo, acusarem variações de níveis de som iguais ou maiores que 10 dB (A) (10 decibel) curva de ponderação A.

IV - Fontes sonoras de atividade contínua - são aquelas cujos níveis de som medidos nas condições do item anterior, acusarem variações inferiores a 10 dB (A) (dez decibel) curva de ponderação A.

SECÇÃO III - Das Disposições Gerais de Medição

Art. 3º - Para efeito deste Decreto, todas as medidas deverão ser efetuadas com aparelho Medidor de Nível de Som que atenda às recomendações da EB-386/74 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Art. 4º - Todos os níveis de som sempre serão referidos à curva de ponderação (A) dos aparelhos medidores de nível de som.

Art. 5º - Quando o nível de som medido for resultante da superposição de diversas fontes, deverá ser identificado o nível de som da fonte objeto da medição.

Art. 6º - As medições só poderão ser efetuadas com rigorosa observância das instruções próprias do aparelho medidor de som quanto à operacionalidade.

Art. 7º - O microfone do aparelho medidor de nível de som deverá sempre estar afastado de no mínimo de 1,20 m (um metro e vinte centímetros) de quaisquer obstáculos, bem como guarnecido com tela de vento.

Art. 8º - Os valores máximos dos níveis de som correspondentes às classes abaixo relacionadas e expressos em dB (A) - decibel - curva de ponderação (A), serão os seguintes:

- a) K1 = 55 dB(A)
- b) K2 = 59 dB(A)
- c) K3 = 63 dB(A)
- d) K4 = 67 dB(A)
- e) K5 = 71 dB(A)
- f) K6 = 75 dB(A)
- g) K7 = 79 dB(A)
- h) K8 = 50 dB(A)
- i) K9 = 90 dB(A)

j) K10 - valores fixados nas Resoluções do CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito) para as fontes automotoras.

Parágrafo único - A proposta de fixação de novos valores numéricos para os níveis de som será apreciada pela Comissão de Zoneamento, a qual consultará para esse fim o Instituto Brasileiro de Acústica, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), o Instituto de Engenharia ou outras entidades especializadas.

CAPÍTULO III - Sons Produzidos por Obras de Construção Civil.

Art. 9º - As atividades e os serviços de construção civil, não passíveis de confinamento, estarão sujeitos aos níveis máximos de som constantes do quadro I, anexo ao presente Decreto, em função da zona de uso em que se verificarem.

Parágrafo 1º - As atividades e os serviços considerados neste artigo, quando contínuos, somente poderão ser exercidos no horário das 7,00 às 16 horas.

Parágrafo 2º - As atividades e os serviços considerados neste artigo, quando descontínuos, poderão ser exercidos no horário das 7 às 19 horas.

Art. 10º - As atividades e os serviços de construção civil possíveis de confinamento, estarão sujeitos aos níveis máximos de som constantes do quadro II, anexo ao presente Decreto, em função da zona de uso em que se verificarem.

Parágrafo 1º - As atividades e os serviços considerados neste artigo quando apesar de confinados ultrapassarem os níveis máximos de som fixados no quadro II, somente poderão ser exercidos quando contínuos, no horário das 7 às 16 horas.

Parágrafo 2º - As atividades e os serviços considerados neste artigo, quando apesar de confinados ultrapassarem os níveis máximos de som fixados no quadro II, poderão ser exercidos quando descontínuos no horário das 7 às 19 horas.

pag. 3

Art. 11º - Para a determinação dos níveis de som emitidos pelas obras de construção civil, proceder-se-á da seguinte forma:

a) fiscalização - o medidor de nível de som, conectado à resposta lenta, deverá ter o microfone afastado à distância mínima de 1,50 m (um metro e cinquenta centímetros), do alinhamento do imóvel/que contém a fonte de som, à altura de 1,20 m (um metro e vinte centímetros) do solo, devendo ainda estar guarnecido com tela protetora/de vento.

b) para atendimento de reclamações - a determinação do nível de som deverá ser efetuada dentro do imóvel do reclamante que /indicará o local de maior incômodo. O medidor de nível de som deverá/ter o microfone afastado 1,50 m (um metro e cinquenta centímetros) /das faces das paredes e das aberturas do ambiente indicado e, à altura de 1,20 m (um metro e vinte centímetros) do piso.

Art. 12º - Os níveis de sons máximos para ambientes interiores serão de 5 dB(A) - 5 decibel na curva de ponderação (A) - inferiores aos constantes do quadro I, II, e III anexos ao presente Decreto, para cada zona de uso.

Art. 13º - Somente serão admitidos obras de construção /civil, aos domingos e feriados, desde que satisfeitas as seguintes /condições:

a) O interessado deverá solicitar alvará de licença especial, através de requerimento, especificando os serviços a executar e, em que horário;

b) As atividades e serviços de construção civil citados no parágrafo 1º do artigo 9º e no parágrafo 1º do artigo 10, não serão permitidos aos domingos e feriados;

c) As atividades e serviços de construção civil, aos /domingos e feriados, deverão obedecer aos níveis máximos de som constantes para o horário noturno do quadro IV, anexos ao presente Decreto, de acordo com a zona de uso.

Art. 14º - As obras públicas de equipamentos de infraestrutura e serviços correlatos, assim como as de sistema viário, estarão sujeitos aos níveis de som e horários constantes do quadro III a nexos ao presente Decreto, independente da zona de uso.

Parágrafo 1º - As medições de níveis de som para os casos previstos neste artigo, serão efetuadas com microfone do medidor de nível de som colocado na via pública a 1,20 m (um metro e vinte/centímetros) do alinhamento dos imóveis e 1,20 m (um metro e vinte/centímetros) de altura do piso, guarnecido por tela protetora de vento e com o aparelho conectado à resposta lenta.

Parágrafo 2º - Para atendimento de reclamações, aplica-se o disposto na letra (b) do artigo 11.

CAPÍTULO III - Sons Produzidos por Fontes Móveis/ e Automotoras

Art. 15º - A determinação dos níveis de som emitido pelas fontes móveis e automotoras, obedecerá às disposições fixadas pelas Resoluções do CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito)

Art.16º- A sinalização de silêncio nas proximidades de / hospitais, pronto-socorro, sanatórios, clínicas e escolas, será implantada a critério do Órgão competente da Prefeitura, levando em conta as / condições de propagação do som com o fim de proteger as referidas instituições.

Art.17º- O uso de dispositivo silencioso de escapamento / diferente do fornecido pelo fabricante do veículo, só será permitido / quando o mesmo mantiver ou atenuar os níveis de sons máximos fixados / no artigo 8º do presente Decreto.

CAPÍTULO IV - Sons produzidos por Fontes Diversas

Art.18º- Os estabelecimentos comerciais, industriais, / institucionais, de prestação de serviços, e as residências, terão que obedecer aos níveis de som fixados no quadro IV, anexo ao presente Decreto, nos horários e nas diferentes zonas de uso ali especificadas.

Parágrafo 1º - Aos estabelecimentos existentes anteriormente à publicação deste Decreto, somente será renovada a licença de / funcionamento, mediante vistoria prévia realizada pelo Órgão competente da Prefeitura, na qual fique comprovado estarem os mesmos equipados com dispositivos de proteção acústica que não permitam a propagação de sons com níveis superiores aos da zona de uso em que estiverem localizados, de acordo com o quadro IV, anexo ao presente Decreto.

Parágrafo 2º - As residências, de acordo com a zona de uso em que se situarem, estarão sujeitas aos níveis máximos de som do quadro IV, anexo ao presente Decreto.

Parágrafo 3º - Aos estabelecimentos novos, será concedida licença de funcionamento provisório, com validade por 90 (noventa) / dias, dentro dos quais, o Órgão competente da Prefeitura procederá à / devida vistoria, para emissão da licença definitiva.

Parágrafo 4º - Para os edifícios em condomínio, de uso / misto, aplicam-se as disposições dos parágrafos 1º e 3º deste artigo.

Art.19º- Para medição dos níveis de som emitidos pelas / fontes consideradas no artigo anterior o aparelho medidor de nível de som conectado à resposta lenta, deverá estar com o microfone afastado / de no mínimo 1,50 m (um metro e cinquenta centímetros) da divisa do imóvel que contém a fonte de som e à altura de 1,20 m (um metro e vinte centímetros) do solo, guardado com tela protetora de vento.

Parágrafo 1º- Para atendimento de reclamações, proceder-se-á de acordo com o disposto na letra (b) do artigo 11.

Parágrafo 2º- Os níveis de sons máximos para ambientes / internos serão 5 dB(A)-decibel na curva de ponderação (A) inferiores / aos constantes do quadro IV anexo ao presente Decreto, para cada zona / de uso.

CAPÍTULO V - Sanções

Art.20º- As infrações do disposto no Capítulo II do presente Decreto, quando provenientes de atividades contínuas, implicarão nas seguintes sanções:

I - Interdição imediata da atividade, concedendo-se 24 /
(vinte e quatro) horas para saneamento da irregularidade.

II- Exaurido o prazo concedido no item anterior, persistindo a irregularidade será aplicada multa de 10 (dez) salários mínimos a cada 24 (vinte e quatro) horas subsequentes até o limite de 10 /
(dez) dias.

III-24 (vinte e quatro) horas após a aplicação de 10ª /
(décima) multa, será embargada a obra sem prejuízo das demais sanções /
estabelecidas em legislação Federal e Estadual.

Parágrafo único - Para as infrações provenientes de atividades descontínuas a multa referida no item II deste artigo, será de 5 (cinco) salários mínimos aplicáveis da mesma forma e mantido o disposto no item III.

Art.21º - As infrações do disposto no Capítulo III do /
presente Decreto implicará nas seguintes sanções:

I - Aplicação de multa de 2(dois) salários mínimos ao /
proprietário ou locatário da fonte, colocando-lhe prazo de 5(cinco) /
dias úteis para apresentar-se ao órgão competente com a fonte causadora regularizada.

II- Aplicação de multa de 4 (quatro) salários mínimos /
após de corrido o prazo do item anterior.

III-Aplicação de multa de 6 (seis) salários mínimos após decorridos 10 (dez) dias úteis da aplicação da multa do item I.

IV - Apreensão da fonte causadora da infração, após a de /
corrência dos prazos constantes dos itens anteriores.

Art.22º - As infrações das disposições do Capítulo IV do /
presente Decreto, estarão sujeitas as seguintes sanções:

I - Aplicação imediata de multa de 10 (dez) salários mínimos, renovada a cada reincidência.

II- Cassação da licença de funcionamento ou apreensão da fonte sonora, após a aplicação de (cinco) multas nos termos do item /
anterior.

Parágrafo único - As disposições deste artigo não se aplicam aos estabelecimentos existentes anteriormente à publicação deste /
Decreto.

Art.23º - Aos estabelecimentos existentes anteriormente à publicação da Lei 8.106, de 30 de agosto de 1974, que infringirem as disposições do Capítulo IV deste Decreto, aplicar-se-ão as seguintes /
sanções:

a) Para usos não industriais:

I - Advertência e concessão de prazo de 1(un) ano para /
proceder às adaptações e aplicação de multa de 1 (un) salário mínimo.

II- Aplicação de multa mensal de 5 (cinco) salários mínimos a iniciar 30 (trinta) dias após a aplicação da advertência.

III-aplicação de multa mensal de 10 (dez) salários mínimos a iniciar 90 (noventa) dias após a aplicação da advertência.

b) Para usos industriais:

I- Advertência e concessão de prazo de 3 (três) anos para proceder às adaptações e aplicação de multa de 1 (um) salário mínimo.

II- Aplicação de multa mensal de 5 (cinco) salários mínimos a iniciar 90 (noventa) dias após aplicação da advertência.

III- Aplicação de multa mensal de 10 (dez) salários mínimos a iniciar 180 (cento e oitenta) dias após aplicação da advertência.

IV - Aplicação de multa mensal de 20 (vinte) salários mínimos a iniciar 1 (um) ano após a aplicação da advertência.

Parágrafo 1º - Na aplicação de multa de maior valor cessa a aplicação da de valor inferior, não podendo haver superposição.

Parágrafo 2º - A não regularização dos estabelecimentos nos prazos concedidos neste artigo implicará na cassação da licença de funcionamento das demais sanções previstas na legislação Federal e Estadual.

Art. 24º - Para exame de recursos às disposições deste Capítulo, ficam estabelecidas as seguintes instâncias:

1ª Instância - Supervisão de Uso e Ocupação do Solo das ARs.

2ª Instância - Supervisão Central de Uso e Ocupação do Solo.

3ª Instância - Comissão de Zoneamento da COGEP.

4ª Instância - Prefeito.

Art. 25º - Este decreto entrará em vigor na data de sua publicação, revogadas as disposições em contrário.

Prefeitura do Município de São Paulo, aos 30 de outubro/ de 1974, 421º da fundação de São Paulo - O Prefeito, MIGUEL COLASSUONNO

ANEXO DO DECRETO Nº 11.467 de 30 de outubro de 1974
 QUADRO I
 OBRAS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E NÃO CONFINÁVEIS

ZONAS DE USO	HORÁRIOS		NOTURNO
	DIURNO	DIURNO	
Estritamente Residencial Z1	DAS 7,00 ÀS 16,00 HS	DAS 16,00 ÀS 19,00 HS	DAS 19,00 ÀS 7,00 HS
Predominância Residencial Z2, Z8-CR1, Z8-CR2, Z8-CR4	90 DB(A)	63 DB(A)	50 DB(A)
Predominância Residencial Média Z3	90 DB(A)	67 DB(A)	50 DB(A)
Mista Densidade Média Z8-CR3, Z4	90 DB(A)	71 DB(A)	59 DB(A)
Mista Densidade Alta Z5	90 DB(A)	75 DB(A)	59 DB(A)
Predominância Industrial Z6	90 DB(A)	79 DB(A)	63 DB(A)
Estritamente Industrial Z7	90 DB(A)	90 DB(A)	75 DB(A)
Especial Z8	90 DB(A)	67 DB(A)	50 DB(A)

QUADRO II
CONSTRUÇÃO CIVIL - ATIVIDADES PASSÍVEIS DE CONFINAMENTO

ZONAS DE USO	HORÁRIOS	DIURNO		
		DAS 7,00 AS 16,00 HS	DAS 16,00 AS 19,00 HS	DAS 19,00 AS 7,00 HS
Estritamente Residencial Z1		75 dB(A)	59 dB(A)	50 dB(A)
Predominância Residencial Z2-Z8-CR1, Z8-CR2, Z8-CR4		75 dB(A)	63 dB(A)	50 dB(A)
Predominância Residencial Densidade Média Z3		75 dB(A)	67 dB(A)	50 dB(A)
Mista Densidade Alta Z4, Z8-CR5		75 dB(A)	71 dB(A)	59 dB(A)
Mista Densidade Alta Z5		75 dB(A)	75 dB(A)	59 dB(A)
Predominância Industrial Z6		75 dB(A)	75 dB(A)	63 dB(A)
Estritamente Industrial Z7		79 dB(A)	79 dB(A)	75 dB(A)
Especial Z8		75 dB(A)	75 dB(A)	50 dB(A)

QUADRO III
OPRAS PUBLICAS

HORÁRIOS	NÍVEIS
Das 7,00 às 19,00 Hs	90 dB(A)
Das 19,00 às 23,00 HS	71 dB(A)
Das 23,00 às 7,00 HS	59 dB(A)

QUADRO IV
FONTES DIVERSAS - CONSTRUÇÃO CIVIL
EM DOMÍNIOS E FERIADOS

HORÁRIOS ZONAS DE USO	DIURNO Das 7,00 Às 19,00 Hs	NOTURNO - as 19,00 Às 7,00 Hs
Estritamente Residencial Z1	55 dB(A)	50 dB(A)
Predominância Residencial Z2,Z8-CR1,Z8-CR2,Z8-CR4	59 dB(A)	50 dB(A)
Predominância Residencial Densidade Média Z3	63 dB(A)	50 dB(A)
Mista Densidade Média Z4,Z8-CR3	67 dB(A)	59 dB(A)
Mista Densidade Alta Z5	71 dB(A)	59 dB(A)
Predominância Industrial E6	75 dB(A)	63 dB(A)
Estritamente Industrial Z7	79 dB(A)	75 dB(A)
Especial Z8	63 dB(A)	50 dB(A)

nc/

DECRETO 11.467/74 (FIM)

APÊNDICE 1b: Portaria 92 de 19/06/1980 do
Ministério do Interior

POLUIÇÃO SONORA

— Dispõe sobre a emissão de sons e ruídos em decorrência de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas.

MINISTÉRIO DO INTERIOR

GABINETE DO MINISTRO

PORTARIA N. 92 — DE 19 DE JUNHO DE 1980

O Ministro de Estado do Interior, acolhendo proposta do Secretário do Meio Ambiente, no uso das atribuições conferidas pelo artigo 4º do Decreto n. 73.030 (1), de 30 de outubro de 1973;

Considerando que os problemas dos níveis excessivos de sons e ruídos estão incluídos entre os sujeitos ao Controle da Poluição do Meio Ambiente;

Considerando que a deterioração da qualidade de vida, causada pela poluição sonora, está sendo continuamente agravada nos grandes centros urbanos;

Considerando que os malefícios causados à saúde, por ruídos e sons, está acima do suportável pelo ouvido humano;

Considerando que a fixação dos critérios e padrões necessários ao controle dos níveis de som depende de inúmeros fatores, entre os quais, exigências e condicionamentos humanos, fontes geradoras características do agente provocador, locais e áreas de medição, distribuição, hora e frequência da ocorrência;

Considerando a grande extensão territorial brasileira, a heterogeneidade dos municípios brasileiros, possuidores de situações diferenciadas de usos e costumes;

Considerando que os critérios e padrões deverão ser abrangentes e de forma a permitir fácil aplicação em todo o território nacional, resolve:

I — A emissão de sons e ruídos, em decorrência de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda, obedecerá, no interesse da saúde, da segurança e do sossego público, aos padrões, critérios e diretrizes estabelecidos nesta Portaria.

II — Consideram-se prejudiciais à saúde, à segurança e ao sossego público, para os fins do item anterior, os sons e ruídos que:

a) atinjam, no ambiente exterior do recinto em que têm origem, nível de som de mais de 10 (dez) decibéis — dB (A), acima do ruído de fundo existente no local, sem tráfego;

b) independentemente do ruído de fundo, atinjam no ambiente exterior do recinto em que têm origem, mais de 70 (setenta) decibéis — dB (A), durante o dia, e 60 (sessenta) decibéis — dB (A), durante a noite;

c) alcancem, no interior do recinto em que são produzidos, níveis de som superiores aos considerados aceitáveis pela Norma NB-95, da Associação Brasileira de Normas Técnicas — ABNT, ou das que lhe sucederem.

III — Na execução dos projetos de construção ou de reformas de edificações, para atividades heterogêneas, o nível de som produzido por uma delas não poderá ultrapassar os níveis estabelecidos pela Norma NB-95, da ABNT, ou das que lhe sucederem.

IV — A emissão de ruídos e sons produzidos por veículos automotores, e os produzidos no interior dos ambientes de trabalho, obedecerão às normas expedidas, respectivamente, pelo Conselho Nacional de Trânsito — CONTRAN, e pelo órgão competente do Ministério do Trabalho.

V — As entidades e órgãos federais, estaduais e municipais competentes, no uso do respectivo Poder de Polícia, disporão, de acordo com o estabelecido nesta Portaria, sobre a emissão ou proibição de emissão de sons e ruídos produzidos por quaisquer meios ou de qualquer espécie, considerando sempre os locais, horários e a natureza das atividades emissoras, com vistas a compatibilizar o exercício da atividade com a preservação da saúde, da segurança e do sossego público.

VI — Todas as normas reguladoras de poluição sonora, emitidas a partir da presente data, deverão ser compatibilizadas com a presente Portaria e encaminhadas à SEMA.

VII — Para os efeitos desta Portaria, as medições deverão ser efetuadas com aparelho Medidor de Nível de Som que atenda às recomendações da EB 386/74, a ABNT, ou das que lhe sucederem.

VIII — Para a medição dos níveis de som considerados na presente Portaria, o aparelho medidor de nível de som, conectado à resposta lenta, deverá estar com o microfone afastado, no mínimo, de 1,50 m (um metro e cinquenta centímetros) da divisa do imóvel que contém a fonte de som e ruído, e à altura de 1,20 m (um metro e vinte centímetros) do solo.

IX — O microfone do aparelho medidor de nível de som deverá estar sempre afastado, no mínimo, de 1,20 m (um metro e vinte centímetros) de quaisquer obstáculos, bem como guarnecido com tela de vento.

X — Todos os níveis de som são referidos à curva de ponderação (A) dos aparelhos medidores, inclusive os mencionados na NB-95, da ABNT. — Mário David Andreazza, Ministro do Interior.

(D.O. de 25 de junho de 1980, pág. 12.683).

(1) Leg. Fed., 1973, pág. 1.318.

APÊNDICE 2: Resolução 448 de 14/10/1971 do
Ministério da Justiça - CONTRAN



CÓDIGO NACIONAL DE TRÂNSITO

- Dispõe sobre os níveis máximos permissíveis de sons e ruídos produzidos por veículos em todo o território nacional

MINISTÉRIO DA JUSTIÇA

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO

RESOLUÇÃO Nº 448 - DE 14 DE OUTUBRO DE 1971

O Conselho Nacional de Trânsito, usando das atribuições que lhe confere o artigo 5º, item XI do Código Nacional de Trânsito.

Considerando o crescente índice de infrações às determinações do Código Nacional de Trânsito, que proíbem o uso indevido de buzina (artigo 89, item XXV), de aparelhos de alarma ou que produzam sons ou ruídos que perturbem o sossego público (artigo 89, item XXVI) de descarga livre, bem como de silenciadores de explosão de motor insuficientes ou defeituosos (artigo 89, item XXVII);

Considerando que as autoridades executivas da fiscalização do trânsito carecem da fixação de um padrão objetivo de julgamento para os e feitos de aplicação das penalidades de que trata o artigo 89, itens XXV ; XXVI e XXVII do Código Nacional de Trânsito;

Considerando que a infringência voluntária e reiterada àquelas proibições legais, prejudicando diretamente a disciplina e segurança do trânsito, justifica imediata e enérgica repressão pela autoridade normativa e executiva da administração do trânsito;

Considerando ser inquestionável que os danos orgânicos e psicológicos resultantes do uso ilegal de buzinas, de silenciadores, de motores de explosão defeituosos ou insuficientes e de aparelhos ou processos destinados a aumentar o ruído expedito pelas tubulações dos canos de escapamento dos veículos automotores, são atentatórios à disciplina e à segurança de veículos e de pedestres ;

Considerando a existência da recomendação internacional da ISO (International Organization For Standardization) R 362, de cujos trabalhos o Brasil participou;

Considerando o que foi deliberado pelo Plenário do CONTRAN, / nas suas reuniões de 21 de janeiro de 1971 e 28 de setembro de 1971, conforme consta do Processo n. 422/67 e seus apensos, resolve:

Art. 1º São os seguintes os índices máximos permissíveis para os ruídos produzidos por veículos :

I - veículos de passageiros e de uso misto (exceto ônibus), motonetas, motocicletas e bicicletas com motor auxiliar ... 84 decibés - db (A);

II - veículos de carga, ônibus, máquinas de tração agrícola, máquinas industriais de trabalho e demais veículos :

a.) até 185 cv ... 89 decibés - db (A) ;

b) acima de 185 cv ... 92 decibés - db (A) .

Art. 2º Para os sons de buzinas e equipamentos similares produzidos por veículos nas vias urbanas, o índice máximo permissível será / de 104 decibés.

Art. 3º Não estão sujeitas aos limites a que se referem os / artigos anteriores os carros de corrida, e somente nos locais de treinos e competições devidamente estabelecidos e permitidos pelas autoridades de trânsito competente, e em horário previamente fixado.

Ar. 4º Para a medição dos ruídos produzidos por veículos não adotadas as Instruções que acompanham a presente Resolução, como seu Anexo Único.



Art. 5º Os resultados da medição deverão ser fixados pela média aritmética dos valores das medições individuais e deverão ser arredondados para unidade db (A) inteira.

§ 1º em virtude de imprecisões das leituras e das características dos aparelhos de medição, assim como, devido à influência / externa na execução das medições, deverá ser considerado permissível / um afastamento superior até 2 db (A).

§ 2º Os veículos para medição deverão ser apresentados sem carga, somente com o motorista.

Art. 6º O método de medição para buzinas e equipamentos / similares deverá ser concordante com o apresentado na Recomendação ISO R 362 - Acústica (A1, medição com o veículo parado), na posição 4. da figura 2, constante do anexo a que se refere o artigo 4º.

Art. 7º A partir da data da vigência da presente Resolução / ção, nenhum veículo poderá trafegar produzindo sons ou ruídos cujos índices máximos ultrapassem os valores na mesma especificados.

Art. 8º Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação, revogadas as disposições em contrário. - Celso Claro Horta / Murta, Relator - Sylvio Carlos Diniz Borges, Presidente.

(D.O. de 17 de novembro de 1.971, pag. 9.267).

/mmga.....
/mtco.....
18.11.77



C Ó D I G O N A C I O N A L
DE T R Â N S I T O

Dispõe sobre os níveis máximos permissíveis de sons e ruídos produzidos por veículos em todo o território nacional.

MINISTÉRIO DA JUSTIÇA
CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO

ANEXO À RESOLUÇÃO N.448 (*) - DE 14 DE OUTUBRO DE 1971
MEDIÇÃO DO RUÍDO PRODUZIDO POR VEÍCULOS

1 . Finalidade

A presente Recomendação ISO descreve os métodos de determinação do ruído produzido pelos veículos automotores, métodos estes destinados a atender às condições de simplicidade requeridas, conquanto compatíveis com a reprodutibilidade dos resultados e funcionamento efetivo do veículo.

2 . Prescrições Gerais

2.1 Condições do teste

A presente Recomendação ISO baseia-se, principalmente, em prova realizada com veículos em movimento, que é o teste de referência ISO. Admite-se, geralmente, ser primordial que as medições correspondam a condições normais de tráfego na cidade, estando, pois, incluído o ruído proveniente da transmissão, etc. As medições deveriam igualmente, levar em conta as condições do veículo, que produzem o mais alto nível de ruído compatível com uma direção normal que acarretam uma produção de ruído contínuo. Consequentemente, prescreve-se um teste a pleno gás, a partir de um regime determinado.

No entanto, tendo em vista que já existem outros procedimentos, fornecemos, em anexo, as especificações de dois métodos em uso:

- a) teste com veículo parado (ver Anexo A-1); e
- b) teste com veículos em movimento, com condições de funcionamento do veículo diferentes (no caso de certos veículos) daquelas do teste de referência ISO (ver Anexo A-2).

Quando se recorre a um ou outro desses testes, deve se estabelecer, em protótipos do referido modelo, a relação entre os resultados fornecidos pela prova de referência ISO.



2.2 Campo de prova

Os métodos de teste prescritos requerem um ambiente acústico que só poderá ser obtido em um extenso espaço descoberto. Tais requisitos podem, geralmente, ser preenchidos quando se trata de medições efetuadas:

Seja com vistas à aprovação do tipo de veículo.

Seja no decorrer da fabricação.

Seja nos postos oficiais de testes.

É desejável que o controle de veículos em estrada, tomados / ao acaso, seja efetuado em ambiente acústico análogo. Quando houver necessidade de realizar medições na estrada, num ambiente acústico que não atenda às condições indicadas na presente Recomendação ISO, será preciso levar em consideração o fato de que / os resultados obtidos poderão ser sensivelmente diferentes dos resultados obtidos quando respeitadas as condições prescritas.

2.3 Interpretação dos resultados

Os resultados obtidos pelos métodos específicos fornecem uma média objetiva do ruído emitido nas condições de teste prescritas. Entretanto, desde que a avaliação subjetiva do incômodo ou ruído provocado pelas diferentes categorias de veículos automotores não é simplesmente função das indicações de um sonômetro, admite-se que uma interpretação correta dos resultados das medições que constituem a presente Recomendação ISO, pode requerer a determinação de limites diferentes para a perturbação correspondente às diferentes categorias de veículos.

3. Aparelhagem de Medição

O sonômetro utilizado deve ser de alta qualidade.

Deve-se utilizar a rede de ponderação e a constante de tempo do aparelho que sejam mais conformes à curva A e à "pronta resposta", respectivamente, conforme as especificações da Recomendação n. 123 da Comissão Eletrotécnica Internacional relativa aos sonômetros. Uma descrição técnica pormenorizada do aparelho utilizado deverá ser fornecida.

Notas

1. O nível sonoro medido com um sonômetro, que tenha o microfone próximo à caixa do aparelho, é suscetível de sofrer a influência, tanto da orientação do aparelho em relação à fonte sonora, quanto da posição do observador que efetue a medição. Deve-se conseqüentemente, obedecer cuidadosamente às indicações fornecidas pelo fabricante quanto à orientação do sonômetro em relação à fonte sonora e ao observador.

2. No caso da utilização, para o microfone, de um dispositivo de proteção contra o vento, é preciso levar em conta o fato de que esse dispositivo é suscetível de influenciar a sensibilidade do sonômetro.

3. A fim de garantir a precisão das medições, recomenda-se, antes de cada série de medições, verificar a ampliação do sonômetro, com o auxílio de uma fonte sonora padrão, a ajustá-la, se necessário.

4. Recomenda-se proceder, periodicamente, à aferição do sonômetro e da fonte sonora padrão, num laboratório, que disponha da aparelhagem necessária para a aferição em campo aberto.

Qualquer excesso, que seria, evidentemente incompatível com o nível geral do som medido, deverá ser desprezado.



4 . Ambiente acústico

O local de provas deve ter condições que assegurem a divergência hemisférica de mais ou menos 1 dB , aproximadamente.

Nota - Um local de provas adequado, que poderia ser considerado ideal para as medições, seria aquele constituído por uma área impedida, com um raio de aproximadamente 50 m e cujos 20 metros da parte central, por exemplo, fossem de concreto, asfalto ou outro material duro equivalente.

Na prática, o afastamento das condições ditas "ideais", resulta de quatro causas principais:

- a) absorção do som pela superfície do terreno;
- b) reflexo devido a objetos, tais como edifícios e árvores, ou às pessoas;
- c) terreno que não é horizontal ou cujo declive não é regular em uma superfície suficientemente extensa;
- d) vento.

Não é possível determinar com exatidão o efeito produzido / por cada uma dessas influências. Considera-se importante, entretanto, que a superfície do terreno esteja isenta de neve fofa , mato alto, terra solta ou cinzas.

A fim de reduzir o efeito dos reflexos , é igualmente recomendado que , no local onde se encontra o veículo testado, a soma dos ângulos formados pelos edifícios circunvizinhos situados num raio de 50 m, não ultrapasse 90º , e que não haja nenhum obstáculo importante num raio de 25 m do veículo.

As concentrações sonoras e os terrenos situados entre muros paralelos devem ser evitados .

Na medida do possível , o nível dos ruídos ambientes (incluindo o ruído do vento, e, no caso dos testes com carro estacionado , o ruído do rolamento e dos pneus), deve indicar , no registro do aparelho pelo menos 10 dB abaixo daquele produzido pelo veículo experimentado. Caso contrário o nível dos ruídos existentes deverá ser expresso em função das unidades do aparelho.

Nota - É preciso estar atento para que os resultados / das medições não sejam falseados pelas rajadas de vento.

Também é preciso levar em conta o fato de que a presença de espectadores pode influir sensivelmente nos registros do aparelho, caso esses espectadores se encontrarem nas proximidades do veículo ou do microfone. Portanto, ninguém, a não ser o observador encarregado da leitura do aparelho deverá permanecer nas proximidades do veículo ou do microfone.

5 . Medições dos Veículos em Movimento

5.1 Campo de provas

O campo de provas deve ser sensivelmente horizontal e as condições de sua superfície não devem provocar um ruído excessivo dos pneus.

5.2 Posições de medição

A distância das posições de medição na linha de referência/CC (fig. 1) , sobre a pista, será igual a 7,5 m. O eixo do veículo deve seguir a linha CC o mais perto possível.

O microfone deve ser colocado a uma altura de 1,2 m acima / do solo.

5.3 Número de medições

Pelo menos duas medições serão efetuadas de cada lado do veículo , quando de sua passagem diante das posições de registro.



N o t a - Recomenda-se proceder a medições preliminares / com vista a eventuais ajustamentos . Estas medições preliminares não devem ser incorporadas ao resultado definitivo.

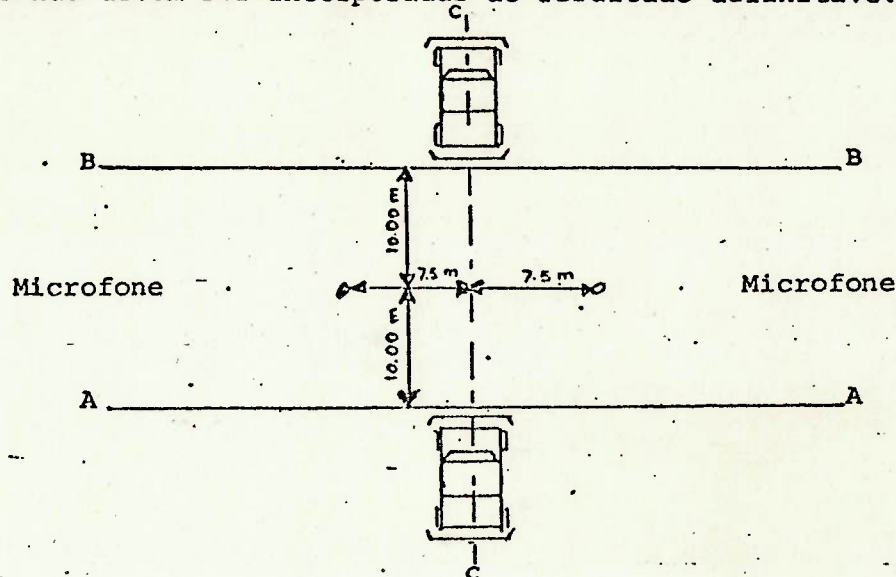


Fig. 1 - Posições de medição para as medições de círculos em movimento

5.4 Modo de operação.

5.4.1 Condições gerais

O veículo aproxima-se da linha AA nas condições apropriadas, abaixo fixadas:

Quando a parte dianteira do veículo chega, em relação ao microfone, à posição indicada por AA na fig. 1, acelera-se tão rapidamente quanto possível e mantém-se tal aceleração até / que a parte traseira do veículo atinja a posição BB da fig.1. Corta-se, então a aceleração, tão rapidamente quanto possível.

Os reboques, incluindo a parte rebocada dos semi-reboques, não devem ser tomados em consideração, no que se refere à travessia da linha BB.

NOTA - Se o veículo incluir equipamentos especiais (como betoneiras, compressores, bombas, etc.), utilizados quando o / veículo se acha em serviço normal, na via pública, esse equipamento deverá também funcionar durante o teste.

5.4.2 Condições especiais

5.4.2.1 Veículo sem caixa de mudança - O veículo deve a proximar-se da linha AA a uma velocidade uniforme correspondente:

- a uma velocidade de rotação do motor igual a três quartos daquela em que o motor desenvolve sua potência máxima,
- ou a três quartos da velocidade de rotação máxima do motor permitida pelo regulador,
- ou a 50 km/h, escolhendo-se a velocidade mais baixa.

5.4.2.2 Veículo com caixa de mudança de comando manual -/ Se o veículo for provido de uma caixa de mudança de 2,3 ou 4 marchas, empregar-se-á a segunda. Se a caixa tiver mais de 4 marchas, utilizar-se-á a terceira. Não se devem engrenar as /



marchas elevadas ("overdrive"). Se o veículo for provido de dupla desmultiplicação de diferencial, a relação escolhida será a correspondente à velocidade mais elevada do veículo.

O veículo deve aproximar-se da linha AA a uma velocidade/uniforme correspondente:

- seja a uma velocidade de rotação do motor igual a três / quartos daquela em que o motor desenvolve sua potência máxima;
- seja a três quartos da velocidade de rotação máxima do motor permitido pelo regulador;
- seja a 50km/h escolhendo-se a marcha mais lenta.

5.4.2.3 Veículo com caixa de mudança automática - O veículo deve aproximar-se da linha AA a uma velocidade uniforme de 50 km/h ou aos três quartos de sua velocidade máxima, escolhendo-se a mais baixa dessas marchas.

Quando se dispõe de outras marchas à frente, deve-se escolher a que produz a aceleração média mais elevada do veículo/entre as linhas AA e BB.

Não se deve utilizar a posição do seletor, que só é empregado para a freiagem, alinhamento ou outras manobras similares.

5.4.2.4. Tratores agrícolas, máquinas agrícolas automotoras e motocultores

- O veículo deve aproximar-se da linha AA em velocidade uniforme igual a três quartos da velocidade da máxima obtida na 7ª marcha mais elevada utilizada para o deslocamento na estrada.

5.5 Apresentação dos resultados

Todos os registros obtidos pelo sonômetro devem ser indicados no relatório.

Indicar-se-á também, eventualmente, o modo de avaliação/da potência do motor.

O estado de carregamento do veículo também deve ser indicado no relatório.

ANEXOS

A-1 Medições em veículos parados

A-1.1 As medições são realizadas ao longo de cada uma das quatro direções principais, à uma distância de 7,0 m da superfície mais próxima apresentada pelo veículo. As posições efetivamente utilizadas para as medições acham-se indicadas na /fig.2, Se houver necessidade de realizar medições em posições /suplementares, além das quatro posições de medição indicadas /na fig. 2, devem as mesmas ser feitas em posições escolhidas /nos círculos indicados, isto é, nos círculos de 7m de raio. O microfone deve ser colocado a uma altura de 1,2m, acima do solo.

PERIFERIA DA ZONA DE PROVA





PERIFERIA DA ZONA DE PROVA

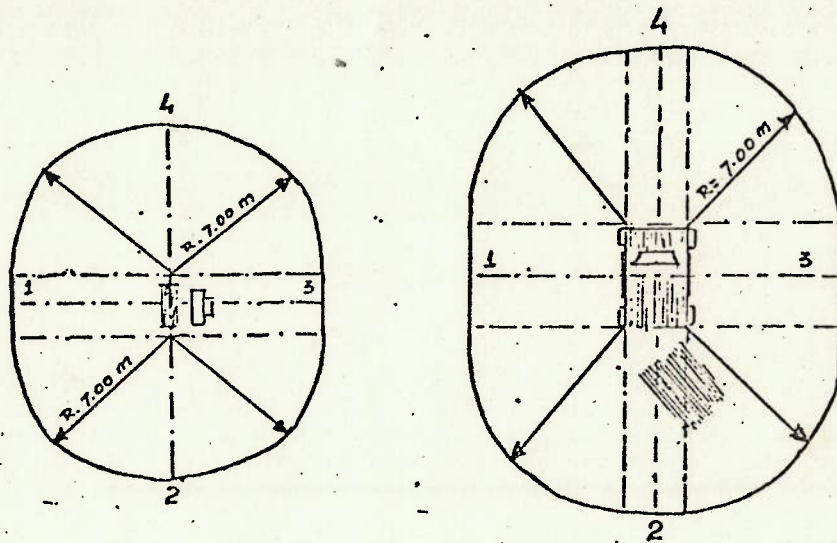


Fig. 2 - Posições de medição para medir veículos parados

A-1.2 Numero de medições

Serão efetuados pelo menos três medições em cada posição / indicada

A-1.3 Condições de funcionamento do veículo

O motor de um veículo sem regulador de marcha deve girar a três quartos do número de rotações por minuto ao qual, segundo o fabricante, ele desenvolve sua potência máxima. A velocidade do motor, expressa em rotação por minuto, é medida com o auxílio de um aparelho independente, por exemplo, com cilindros que giram livremente, e com um taquímetro. Um motor provido de um moderador de velocidade, deve girar em sua velocidade máxima.

O motor deve atingir sua temperatura normal antes de se proceder às medições.

A.1.4 Apresentação dos resultados

Todos os registros de níveis sonoros obtidos em cada posição de medição devem ser indicados no relatório.

A-2 Medições Efetuadas em Veículos em Movimento (Método modificado)

A-2.1 Campo de provas

O campo de provas deve ser sensivelmente horizontal e o estado de sua superfície não deve provocar um ruído excessivo dos pneus.

A-2.2 Posições de medição

A distância das posições de medição à linha de referência CC (fig.1), sobre a pista, será igual a 7,5m. O eixo do veículo deve seguir o mais perto possível a linha CC. O microfone deve ser colocado a uma altura de 1,2m acima do solo.

A-2.3 Número de medições

Pelo menos três medições serão efetuadas de cada lado do veículo, quando de sua passagem diante das posições de medição.



NOTA- Recomenda-se proceder a medições preliminares com / vistas a eventuais ajustamentos. Essas medições preliminares / não devem ser incorporadas ao resultado definitivo.

A-2.4 Modo de operar

A-2.4.1 - Condições gerais

O veículo aproxima-se da linha AA nas condições apropriadas, fixadas abaixo:

Quando a parte dianteira do veículo atinge, em relação ao microfone, a posição indicada por AA na fig. 1, acelera-se tão depressa quanto possível, mantendo-se essa aceleração até que a parte traseira do veículo atinja a posição BB da fig. 1; corta-se, então, a aceleração, tão rapidamente quanto possível.

Os reboques, incluindo a parte rebocada dos semi-reboques, não devem ser tomados em consideração no que se refere à transposição da linha BB.

NOTA - Se o veículo for especialmente fabricado com um e quipamento (como as betoneiras, os compressores, as bombas, e/ etc), que é utilizado quando o veículo está em serviço normal, na via pública, este equipamento deverá também funcionar durante o teste.

A-2.4.2 Condições particulares

Os veículos devem ser dirigidos de modo a respeitar uma / ou outra das condições seguintes:

A-2.4.2.1 Veículo com caixa de mudança de comando manual/ com ou sem embreagem automática - O veículo deve aproximar-se da linha AA (fig.1) a uma velocidade uniforme correspondente a três quartos da velocidade de rotação a qual o motor (segundo o fabricante) desenvolve sua potência máxima. A marcha/ deve ser escolhida de tal modo que a velocidade do veículo na estrada seja o mais próximo possível de 50 km/h para essa velocidade de rotação do motor. Entretanto se o veículo tiver mais de 3 velocidades de marcha à frente, não se utilizará a primeira.

A-2.4.2.2 Veículo com caixa de mudança automática - O veículo deve aproximar-se da linha AA a uma velocidade uniforme / de 50 km/h ou aos três quartos de sua velocidade máxima, escolhendo-se, entre essas duas velocidades, mais baixa. Quando / se dispõe de outras posições de marcha à frente, deve-se escolher a que produz o nível sonoro mais elevado do veículo. Não/ se deve utilizar a posição do seletor, que só o empregado para a freiagem, o alinhamento e outras manobras lentas similares.

A-2.5 Apresentação dos resultados

Todos os registros obtidos no sonômetro devem ser indicados no relatório. Indicar-se-á, também, eventualmente, o modo de avaliação da potência do motor. O estado de carregamento / do veículo deve ser igualmente indicado no relatório.

(D.O. de 10 de janeiro de 1972, pags. 173 e 174)

/mmga....
/mtco....
18.11.77

APÊNDICE 3: Decreto Presidencial 89431
08/03/84: Uso do Solo no entorno
de aeroportos.
(Diário Oficial de quinta-feira,
15/03/1984)

Atos do Poder Executivo

(*) Decreto n.º 89.431, de 02 de março de 1984.

Dispõe sobre o Plano Básico de Zoneamento de Ruído e Planos Específicos de Zoneamento de Ruído a que se refere o Código Brasileiro do Ar.

O Presidente da República, usando da atribuição que lhe confere o artigo 81, item III da Constituição, e tendo em vista o disposto no artigo 57, do Decreto-lei nº 32, de 13 de novembro de 1966, com a redação dada pela Lei nº 6.997, de 07 de junho de 1982, decreta:

CAPÍTULO I

DA FINALIDADE

Art 1º Este Decreto estabelece definições e normas para a execução do disposto no artigo 57 do Decreto-lei nº 32, de 18 de novembro de 1966, com a redação dada pela Lei nº 6.997, de 07 de junho de 1982, no que diz respeito ao Plano Básico de Zoneamento de Ruído e aos Planos Específicos de Zoneamento de Ruído.

CAPÍTULO II

DA CONCEITUAÇÃO

Art 2º Para efeito deste decreto, os termos e expressões abaixo têm as seguintes conceituações:

I - ÁREA I - Área do Plano de Zoneamento de Ruído, interior à curva de nível 1, onde o ruído aeronáutico é potencialmente nocivo aos circundantes, podendo ocasionar sérios problemas fisiológicos nas exposições prolongadas.

II - ÁREA II - Área do Plano de Zoneamento de Ruído compreendida entre as curvas de nível 1 e 2 onde são registrados níveis de incômodo moderado.

III - ÁREA III - Área do Plano de Zoneamento de Ruído, exterior à curva de nível 2, onde em condições normais não haverá restrições à construção de residências e outros edifícios públicos e privados, em função dos níveis de incômodo aos circundantes.

IV - ÁREA DE ENTORNO - Área sujeita à influência do aeroporto, que ultrapassa seus limites patrimoniais, podendo eventualmente se estender além da Área II, onde é necessário o estudo das condições do relacionamento do aeroporto com a área urbana.

V - COMPATIBILIZAÇÃO - Ação de ajustar e condicionar os Planos Municipais e os Planos Setoriais da Aviação Civil.

VI - CURVA DE NÍVEL DE RUÍDO 1 - Curva traçada a partir dos pontos nos quais o nível de incômodo sonoro, medidos por índice ponderado de ruído, é igual a um valor predeterminado. O valor desta curva é maior que o indicado para a curva de nível 2 e é especificado pelo Departamento de Aviação Civil em função da utilização prevista para o aeroporto, delimitando a Área I.

VII - CURVA DE NÍVEL DE RUÍDO 2 - Curva traçada a partir dos pontos nos quais o nível de incômodo sonoro, medidos por índice ponderado de ruído, é igual a um valor predeterminado. O valor desta curva é menor que o indicado para a curva de nível de ruído 1 e é especificado pelo Departamento de Aviação Civil em função da utilização prevista para o aeroporto, delimitando a Área II.

VIII - NÍVEL DE INCÔMODO SONORO - É a medida em IPR (Índice Ponderado de Ruído), cumulativa, em escala logarítmica, do incômodo causado pelo ruído gerado pela operação de aeronaves em um aeroporto.

IX - PISTA PARA AVIAÇÃO REGULAR DOMÉSTICA/INTERNACIONAL DE ALTA DENSIDADE - Pista cuja soma dos pousos e decolagens de aeronaves seja superior a 6.000 movimentos anuais.

X - PISTA PARA AVIAÇÃO REGULAR DOMÉSTICA/INTERNACIONAL DE BAIXA DENSIDADE - Pista cuja soma dos pousos e decolagens de aeronaves seja inferior a 6.000 movimentos anuais.

XI - PISTA PARA AVIAÇÃO REGULAR REGIONAL DE ALTA DENSIDADE - Pista cuja soma dos pousos e decolagens de aeronaves seja superior a 15.000 movimentos anuais.

XII - PISTA PARA AVIAÇÃO REGULAR REGIONAL DE BAIXA DENSIDADE - Pista cuja soma dos pousos e decolagens de aeronaves seja inferior a 15.000 movimentos anuais.

XIII - PLANO BÁSICO DE ZONEAMENTO DE RUÍDO - Documento de caráter normativo e genérico que estabelece as restrições a serem obedecidas no aproveitamento das propriedades situadas no interior das curvas de nível de ruído especificadas dos aeroportos.

XIV - PLANO ESPECÍFICO DE ZONEAMENTO DE RUÍDO - Documento de caráter particular que estabelece as restrições a serem obedecidas no aproveitamento das propriedades situadas no interior das curvas de nível de ruído específicas do aeroporto que, por força de ocupação preexistente, não seja enquadrável no Plano Básico.

XV - RESTRIÇÕES - Critério seletivo de uso do solo estabelecendo a natureza do aproveitamento das propriedades no que diz respeito à edificação, instalações, culturas agrícolas, unidades industriais e objetos de natureza permanente ou temporária, que possam embaraçar a instalação ou o desenvolvimento do sistema aeroportuário ou ameaçar a segurança das pessoas e bens.

XVI - RUÍDO DE AERONAVES - Efeito sonoro emitido pelas aeronaves em suas operações de circulação, aproximação e pouso, decolagem e subida, rolamento e teste de motores.

XVII - SISTEMA AEROPORTUÁRIO - Conjunto compreendendo os aeródromos, aeroportos, heliportos e helipontos, terminais de carga, edifícios, instalações, facilidades, auxílios, serviços e as áreas compreendidas dentro do zoneamento de ruído, bem como os diplomas legais pertinentes.

XVIII - USO DO SOLO - Identificação dos tipos de atividades urbanas ou rurais localizadas em zonas determinadas nas áreas de entorno dos aeroportos.

XIX - ZONEAMENTO DE RUÍDO - Indicação de atividades para a área situada entre os limites do aeroporto e as curvas de níveis de ruído, compatibilizadas com os níveis de ruído a que estão sujeitas.

CAPÍTULO XIX

DA APLICAÇÃO E DAS RESTRIÇÕES

Art 3º O Plano Básico de Zoneamento de Ruído, na forma descrita neste Decreto, será, em princípio, aplicado a todo aeroporto e heliporto brasileiro.

§ 1º O Plano Específico de Zoneamento de Ruído quando aplicado a um aeroporto, aprovado por ato do Ministro da Aeronáutica, substitui, automaticamente, o Plano Básico de Zoneamento de Ruído.

§ 2º As restrições a que se referem os artigos 9º e 10 deste Decreto poderão ser alteradas pelo Ministro da Aeronáutica, por proposta do Departamento de Aviação Civil, na aprovação de um Plano Específico, em função das necessidades locais.

§ 3º As administrações públicas deverão compatibilizar os diplomas legais e normativos referentes ao uso do solo nas áreas abrangidas pelos sistemas aeroportuários, às restrições especiais constantes do Plano Básico e Específico de Zoneamento de Ruído.

§ 4º O Plano Específico de Zoneamento de Ruído será transmitido às entidades federais, estaduais e municipais competentes, responsáveis que são pelo cumprimento das restrições a serem obedecidas, no tocante ao licenciamento de obras, instalações e implementação de qualquer natureza, a partir da publicação da Portaria Ministerial que o aprovar.

§ 5º Um Plano Específico de Zoneamento de Ruído somente poderá ser substituído por outro Plano Específico resultante de aprovação do Ministro da Aeronáutica, por proposta do Departamento de Aviação Civil.

§ 6º Os Planos de Zona de Ruído, anteriormente aprovados pelo Ministro da Aeronáutica, continuam em vigor, podendo ser alterados.

Art 4º Para efeito de aplicação dos Planos de Zoneamento de Ruído as pistas são classificadas de acordo com a conceituação do artigo 2º deste Decreto em função do movimento de pouso e decolagem, sendo 05 (cinco) classes, a saber:

I - HELIPORTOS - Nesta classe fica compreendida toda área previamente determinada para pousos, decolagens e movimentação de helicópteros, dotada de instalações e facilidades para embarque e desembarque de pessoas e cargas.

II - AVIAÇÃO GERAL - Nessa categoria, não deve existir nem estar prevista, em horizonte até 20 anos, qualquer espécie de aviação regular. As pistas de aeroportos privados estão enquadradas nessa categoria.

III - AVIAÇÃO REGIONAL REGULAR DE BAIXA DENSIDADE - Compreende as pistas para as quais exista ou esteja prevista em um horizonte até 20 anos, a operação de aviação regional regular de baixa densidade.

IV - AVIAÇÃO REGIONAL REGULAR DE ALTA DENSIDADE E/OU AVIAÇÃO DOMÉSTICA/INTERNACIONAL REGULAR DE BAIXA DENSIDADE - Compreende as pistas para as quais exista ou esteja prevista, em horizonte até 20 anos, a operação de aviação regional regular de alta densidade, ou a operação de aviação doméstica, e/ou internacional regular, de baixa densidade.

V - AVIAÇÃO DOMÉSTICA/INTERNACIONAL REGULAR DE ALTA DENSIDADE - Compreende as pistas para as quais exista ou esteja prevista, em um horizonte até 20 anos, a operação de aviação doméstica/internacional regular de alta densidade.

§ 19 Para os aeroportos que contenham pistas Classe V, de acordo com este Decreto, será obrigatoriamente aplicado Plano Específico de Zoneamento de Ruído.

§ 29 Para fins de classificação das pistas nas classes acima descritas, o Departamento de Aviação Civil indicará a projeção do movimento de pousos e decolagens no Plano de Desenvolvimento do Sistema de Aviação Civil que for efetivado.

Art 59 O Plano Básico de Zoneamento de Ruído é estabelecido de acordo com as classes especificadas no artigo anterior constando de 03 (três) áreas que se prolongam além dos limites dos aeródromos e/ou aeroportos, denominados de Área I, Área II e Área III, delimitadas pelas curvas de nível 1 e 2, onde são estabelecidas as normas de aproveitamento do uso do solo.

Art 69 A Área I é interior à curva de nível 1 e o uso do solo permitido é o constante do artigo 99, sendo que os não relacionados, já existentes, não poderão ser ampliados.

Parágrafo único. Os parâmetros para a curva de nível 1 para as pistas classe 1, 2, 3 e 4 são especificados no Quadro 1 e sua configuração consta das Figuras 1 e 3.

Art 79 A Área II fica compreendida entre as curvas de nível 1 e 2 e o uso do solo definido é o constante do artigo 10, sendo que os relacionados já existentes não poderão ser ampliados.

Parágrafo único. Os parâmetros para a curva de nível 2 para as pistas classe 1, 2, 3 e 4 são especificados no Quadro 2 e sua configuração consta das Figuras 2 e 4.

Art 89 A Área III é exterior à curva de nível 2. Esta área poderá sofrer restrições em Plano Específico de Zoneamento de Ruído, resultante de aprovação do Ministro da Aeronáutica, por proposta do Departamento de Aviação Civil, a fim de compatibilizar o uso do solo com os níveis de ruído específicos decorrentes da operação do aeroporto.

Art 99 São permitidos a implantação, o uso e o desenvolvimento na Área I de atividades:

- I - De produção e extração de recursos naturais:**
 - a - agricultura;
 - b - piscicultura;
 - c - silvicultura; e
 - d - mineração.
- II - De serviços públicos ou de utilidade pública;**
 - a - estação de tratamento de água e esgoto;
 - b - reservatório de água; e
 - c - cemitério.
- III - Comerciais:**
 - a - depósito e armazenagem;
 - b - estacionamento e garagem para veículos; e
 - c - feiras livres.
- IV - De recreação e lazer ao ar livre:**
 - a - praças, parques, áreas verdes; e
 - b - campos de esporte.
- V - De transporte:**
 - a - rodovias;
 - b - ferrovias;
 - c - terminais de cargas e passageiros; e
 - d - auxílios à navegação aérea.
- VI - Industrial.**

§ 19 A implantação, o uso e o desenvolvimento da atividade de que tratam os itens I - letras a, b e c - e II - letras a e b - são proibidos quando foco de atração de pássaros.

§ 29 É proibido o uso de depósito e armazenagem para material explosivo ou inflamável (item III, letra a).

§ 39 A implantação, o uso e o desenvolvimento de atividade de que tratam os itens II - letras a, b e c - III - letras a e b - e V - letra c, - só serão permitidos com tratamento acústico adequado nos locais de permanência de público e funcionários, consultado o Departamento de Aviação Civil.

§ 49 A implantação, o uso e o desenvolvimento de atividade de que tratam os itens V - letras a e b - e VI, só serão permitidos quando consultado o Departamento de Aviação Civil.

Art 10 Não são permitidos a implantação, o uso e o desenvolvimento na Área II de atividades:

- I - Residencial.**

- II - De saúde:
 - a - hospital e ambulatório;
 - b - consultório médico;
 - c - asilo; e
 - d - equipamentos equivalentes.
- III - Educacionais:
 - a - escola;
 - b - creche; e
 - c - equipamentos equivalentes.
- IV - De serviços públicos ou de utilidade pública:
 - a - hotel e motel;
 - b - edificações para atividades religiosas;
 - c - centros comunitários e profissionalizantes; e
 - d - equipamentos equivalentes.
- V - Cultural:
 - a - biblioteca;
 - b - auditório, cinema, teatro; e
 - c - equipamentos equivalentes.

Parágrafo único. As atividades acima referidas poderão ser eventualmente liberadas para implantação, uso e desenvolvimento pelos órgãos municipais competentes, quando atendidas as normas legais vigentes para tratamento acústico das edificações e mediante consulta ao Departamento de Aviação Civil.

Art 11 Para a aplicação do Plano Básico de Zoneamento de Ruído visando um aeroporto que possua duas ou mais pistas, utiliza-se o Plano para cada pista isoladamente, sendo que o Plano Básico de Zoneamento de Ruído, para o aeroporto, será dado pela composição das curvas referentes a cada pista (Figura 5).

CAPÍTULO IV

DAS DISPOSIÇÕES GERAIS

Art 12 O Departamento de Aviação Civil prestará a necessária assistência e orientação técnica às entidades públicas e privadas envolvidas para o cumprimento deste Decreto, bem como fiscalizará a correta observância dos Planos.

Art 13 O Ministro do Estado da Aeronáutica expedirá os atos que se fizerem necessários à execução deste Decreto.

Art 14 Os casos omissos serão resolvidos pelo Ministro da Aeronáutica.

Art 15 Este Decreto entra em vigor na data de sua publicação, revogadas as disposições em contrário, e em especial o Capítulo VIII do Decreto nº 83.399, de 03 de maio de 1979.

Brasília, 08 de março de 1984;
1639 da Independência e 969 da República.

JOÃO FIGUEIREDO
Délío Jardim de Mattos

(*) Republicado por ter saído com omissão dos anexos no D.O. de 09.03.84.

Anexo ao Decreto nº 89.431, de 08 de março de 1984

DIMENSÕES		COMPRIMENTO	LARGURA
PARÂMETROS BÁSICOS POR CLASSE DE AEROPORTO	Aviação Regional Regular de alta densidade e/ou Aviação Doméstica/Internacional Regular de baixa densidade	Comprimento da pista projetada mais 1.500m no seu prolongamento, em cada sentido	240m de cada lado a partir do eixo da pista
	Aviação Regional Regular de baixa densidade	Comprimento da pista projetada mais 500m no seu prolongamento, em cada sentido	180m de cada lado a partir do eixo da pista
	Aviação Geral	Comprimento da pista projetada mais 300m no seu prolongamento, em cada sentido	100m de cada lado a partir do eixo da pista
	Heliponto	Raio de 100m	

QUADRO 1 - PARÂMETROS PARA A CURVA DE NÍVEL 1

Anexo ao Decreto nº 89.431, de 08 de março de 1984

PLANO BÁSICO DE ZONEAMENTO DE RUÍDO

CURVA DE NÍVEL I

PISTA CLASSE HELIPORTO

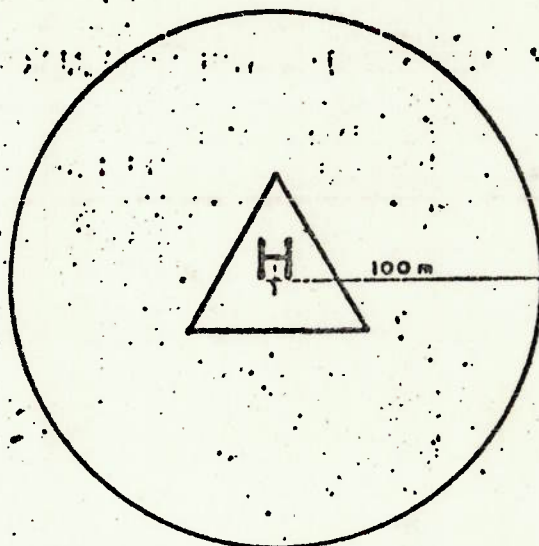


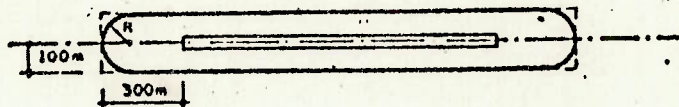
FIGURA I - CURVA DE NÍVEL I - CLASSE HELIPORTO

Anexo ao Decreto nº 89.431, de 08 de março de 1984

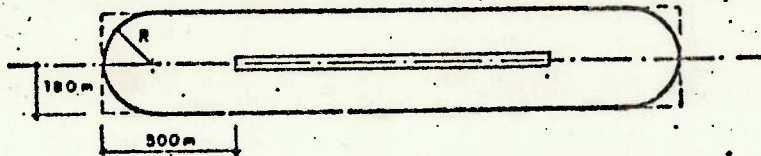
PLANO BÁSICO DE ZONEAMENTO DE RUIDO

CURVAS DE NÍVEL 1

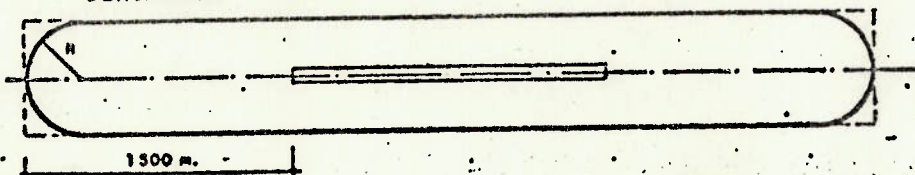
PISTA CLASSE AVIAÇÃO GERAL



PISTA CLASSE AVIAÇÃO REGIONAL REGULAR DE BAIXA DENSIDADE



PISTA CLASSE AVIAÇÃO REGIONAL REGULAR DE ALTA DENSIDADE
E/OU AVIAÇÃO DOMÉSTICA/INTERNACIONAL REGULAR DE BAIXA
DENSIDADE.



LEGENDA

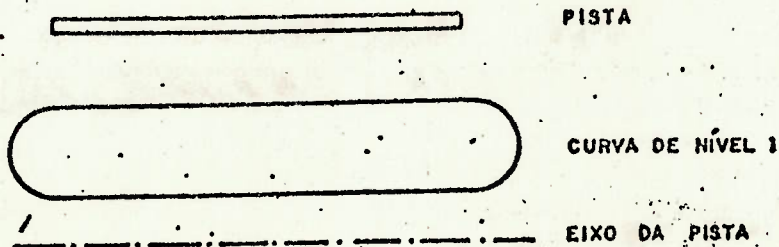


FIGURA 3. — CURVA DE NÍVEL 1

Anexo ao Decreto nº 89.431, de 08 de março de 1984

DIMENSÕES		COMPRIMENTO	LARGURA
PARÂMETROS BÁSICOS POR CLASSE DE AEROPORTO	Aviação Regional Regular de alta densidade e/ou Aviação Doméstica/ Internacional Regular de baixa densidade	Comprimento da pista projetada mais 2.500m no seu prolongamento, em cada sentido	600m de cada lado a partir do eixo da pista
	Aviação Regional Regular de baixa densidade	Comprimento da pista projetada mais 1.200m no seu prolongamento, em cada sentido	400m de cada lado a partir do eixo da pista
	Aviação Geral	Comprimento da pista projetada mais 500m no seu prolongamento, em cada sentido	200m de cada lado a partir do eixo da pista
	Heliponto	Raio de 300m	

QUADRO 2 - PARÂMETROS PARA A CURVA DE NÍVEL 2

Anexo ao Decreto nº 89.431, de 08 de março de 1984

PLANO BÁSICO DE ZONEAMENTO DE RUÍDO

CURVA DE NÍVEL 2

PISTA CLASSE HELIPORTO

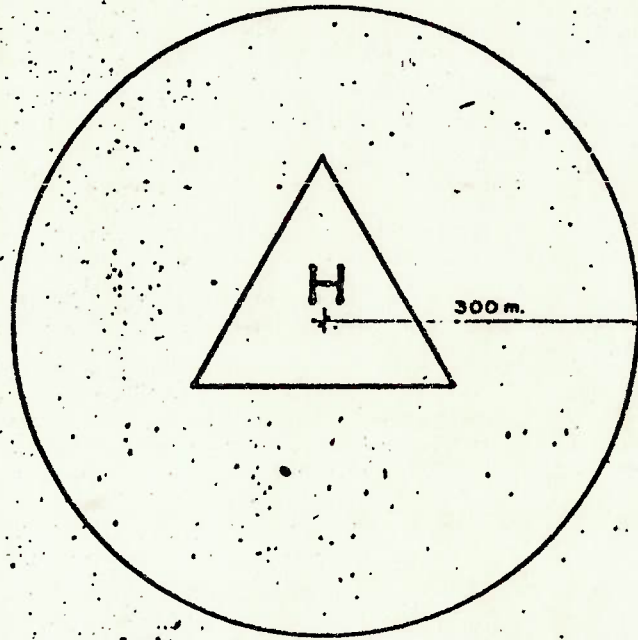


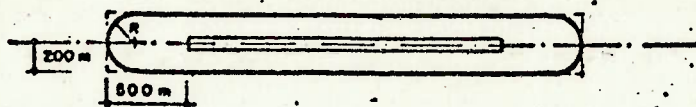
FIGURA 2 - CURVA DE NÍVEL 2 - CLASSE HELIPORTO

Anexo ao Decreto nº 89.431, de 08 de março de 1984

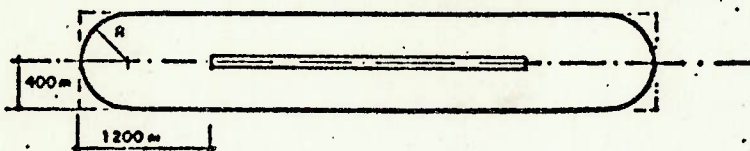
PLANO BÁSICO DE ZONEAMENTO DE RUÍDO

CURVAS DE NÍVEL 2

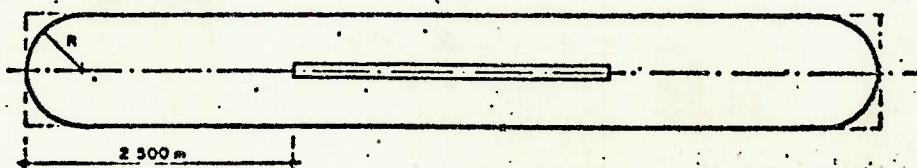
PISTA CLASSE AVIAÇÃO GERAL



PISTA CLASSE AVIAÇÃO REGIONAL REGULAR DE BAIXA DENSIDADE



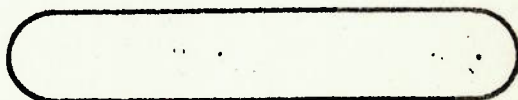
PISTA CLASSE AVIAÇÃO REGIONAL REGULAR DE ALTA DENSIDADE
E/OU AVIAÇÃO DOMÉSTICA/INTERNACIONAL REGULAR DE BAIXA
DENSIDADE.



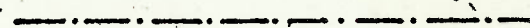
LEGENDA



PISTA



CURVA DE NÍVEL 2



EIXO DA PISTA

FIGURA 4. — CURVA DE NÍVEL 2

Anexo ao Decreto nº 89.431, de 08 de março de 1984

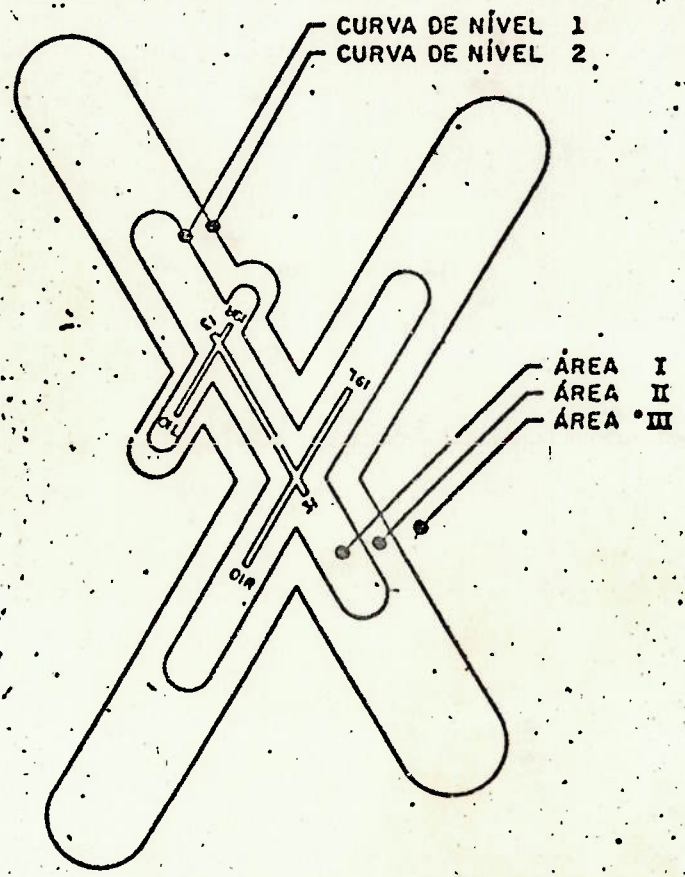


FIGURA 5 - PLANO BÁSICO DE ZONEAMENTO DE RUÍDO DO AEROPORTO -EXEMPLO

APÊNDICE 4: Norma Reguladora NR-15 da
Portaria 3214 de 08/06/74, do
Ministério do Trabalho

NORMA REGULAMENTADORA (NR-15)

PORTARIA Nº 3.214, DE 08.06.78, DO MINISTÉRIO DO TRABALHO
D.O.U. DE 06.07.78

NR 15 - ANEXO Nº 1

LIMITES DE TOLERÂNCIA PARA RUÍDO CONTÍNUO OU INTERMITENTE

NÍVEL DE RUÍDO dB(A)	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

1. Entende-se por Ruído Contínuo ou Intermitente, para os fins de aplicação dos Limites de Tolerância, o ruído que não seja ruído de impacto.
2. Os níveis de ruído contínuo ou intermitente devem ser medidos em decibels (dB) com instrumento de nível de pressão sonora operando no circuito de compensação "A" e circuito de resposta lenta (SLOW). As leituras devem ser feitas próximas ao ouvido do trabalhador.
3. Os tempos de exposição aos níveis de ruído não devem exceder os limites de tolerância fixados no Quadro deste anexo.
4. Para os valores encontrados de nível de ruído intermediário será considerado a máxima exposição diária permissível relativa ao nível imediatamente mais elevado.
5. Não é permitida exposição a níveis de ruído acima de 115 dB(A) para indivíduos que não estejam adequadamente protegidos.
6. Se durante a jornada de trabalho ocorrerem dois ou mais períodos de exposição a ruído de diferentes níveis, devem ser considerados os seus efeitos combinados, de forma que, se a soma das seguintes frações:

$$\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \frac{C_3}{T_3} + \dots + \frac{C_n}{T_n} ;$$

exceder a unidade, a exposição estará acima do limite de tolerância.

Na equação C_n indica o tempo total que o trabalhador fica exposto a um nível de ruído específico e T_n indica a máxima exposição diária permissível a este nível, segundo o Quadro deste anexo.

7. As atividades ou operações que exponham os trabalhadores a níveis de ruído, contínuo ou intermitente, superiores a 115 dB(A), sem proteção adequada, oferecerão risco grave e iminente.

NR 15 - ANEXO Nº 2LIMITES DE TOLERÂNCIA PARA RUÍDOS DE IMPACTO

1. Entende-se por ruído de impacto aquele que apresenta picos de energia acústica de duração inferior a 1 (um) segundo, a intervalos superiores a um segundo.
2. Os níveis de impacto deverão ser avaliados em decibels (dB), com medidor de nível de pressão sonora operando no circuito linear e circuito de resposta para impacto. As leituras devem ser feitas próximas ao ouvido do trabalhador. O limite de tolerância para ruído de impacto será de 130 dB (LINEAR). Nos intervalos entre os picos o ruído existente deverá ser avaliado como ruído contínuo.
3. Em caso de não se dispor de um medidor de nível de pressão sonora com circuito de resposta para impacto, será válida a leitura feita no circuito de resposta rápida (FAST) e circuito de compensação "C". Neste caso, o limite de tolerância será de 120 dB(C).
4. As atividades ou operações que exponham os trabalhadores, sem proteção adequada, a níveis de ruído de impacto superiores a 140 dB (LINEAR), medidos no circuito de resposta para impacto, ou superiores a 130 dB(C), medidos no circuito de resposta rápida (FAST), oferecerão risco grave e iminente.

APÊNDICE 5: Norma ABNT - Medidores de Nível de Som
Emitido por veículos Automotores - EB-386



SEÇÃO DE ESPECIFICAÇÕES

1. OBJETIVO

1.1 Esta Especificação tem por objetivo estabelecer padrões e características para os aparelhos de medição de nível de som a serem empregados nas determinações dos ruídos emitidos por veículos automotores, ou usos análogos.

1.2 A presente Especificação não tem por objetivo fixar as características para os aparelhos de medição de som com duração muito curta ou de sons intermitentes.

2. DEFINIÇÕES

2.1 Nível de som é definido pela expressão:

$$N_s = 20 \log \frac{P_e}{P_0}$$

onde:

P_e é o valor eficaz de pressão acústica medida, em Newton por metro quadrado (N/m^2).

$P_0 = 2 \cdot 10^{-5} N/m^2$, ou seja: $2 \cdot 10^{-4} \mu$ bar (pressão de referência).

2.2 O nível de som é expresso em decibel (dB), tendo como referência $\langle P_0 \rangle$.

2.3 Nível de som ponderado é o nível de som corrigido conforme as curvas de ponderação internacionalmente aceitas e denominadas $\langle A \rangle$, $\langle B \rangle$ e $\langle C \rangle$.

2.4 O nível de som ponderado é indicado em dB (A), dB (B) ou dB (C), conforme a curva aplicada.

2.5 As três diferentes curvas de ponderação ($\langle A \rangle$, $\langle B \rangle$ e $\langle C \rangle$) devem passar pelos pontos indicados na Tabela I anexa, na qual são estabelecidas as características de resposta do sistema para frequências de 10 Hz a 20 000 Hz.

2.6 Por valor eficaz $\langle P_e \rangle$ da pressão entende-se:

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

onde:

$\langle p \rangle$ é o valor da pressão a cada instante, sendo uma função do tempo (t) e T o período.

2.7 Campo acusticamente livre é um campo de som sem obstáculos refletivos.

2.8 Som puro é o som cuja pressão $\langle p \rangle$ em função do tempo é dada pela expressão

$$p = P \sin \omega t$$

onde:

$$\omega = 2 \pi f$$

f = frequência em Hertz

P = valor máximo da pressão

2.9 MNS representa Medidor de Nível de Som.

3. CARACTERÍSTICAS GERAIS

3.1 Um MNS geralmente é composto de um microfone, amplificador, determinado número de filtros, atenuador e instrumento indicador com certas características dinâmicas.

3.2 O MNS deve indicar o nível de som ponderado conforme a curva $\langle A \rangle$, em um campo acusticamente livre, podendo adicionalmente indicar também nas curvas $\langle B \rangle$ ou $\langle C \rangle$.

3.2.1 As tolerâncias admissíveis são relativamente amplas. Porém, na hipótese de um fabricante possuir meio de fornecimento com tolerâncias mais restritas, esse fato deverá ser citado pelo mesmo.

3.2.2 As tolerâncias referem-se ao conjunto formado pelo MNS, ou seja incluídas as tolerâncias relativas ao microfone, ao amplificador, aos filtros, ao atenuador se houver e, ao instrumento indicador. As tolerâncias são aplicadas ao funcionamento do MNS num campo aberto e numa direção que será indicada pelo fabricante.

3.3 O fabricante deve especificar os meios que assegurem a correta indicação do medidor num campo de som difuso.

3.4 O atenuador deve ser dotado de espaços de 10 dB, sendo que cada faixa deverá sobrepor-se à faixa anterior em pelo menos 5 dB.

3.5 Características do microfone.

3.5.1 O microfone deve ser do tipo omnidirecional.

3.5.2 A variação da sensibilidade do microfone deve estar dentro das tolerâncias da Tabela II anexa para sons incidindo em direções variando em ângulo de $\pm 90^\circ$ com a direção determinada e indicada pelo fabricante.

3.5.2.1 Duas séries de tolerâncias admissíveis para a sensibilidade do microfone para ângulos de incidência compreendidos entre $\pm 90^\circ$, são especificados conforme o método de medição, ou seja:

$\langle A \rangle$ Com o microfone montado sobre o corpo do medidor.

$\langle B \rangle$ Com o microfone afastado do corpo do aparelho, porém eletricamente ligado ao mesmo.

3.5.2.2 Os valores constantes na coluna $\langle B \rangle$ da Tabela II não relativos a medições executadas com o microfone isolado do MNS, sendo que qualquer observador deve estar localizado fora do campo de som. Somente um operador poderá, se necessário, permanecer no campo de som conforme o estabelecido no MB-528, item 4.2.2.2.

3.6 Características do instrumento indicador.

3.6.1 A apresentação dos valores deve ser por um instrumento que possibilite leitura de valores máximos, podendo

er instrumento de quadrante com ponteiro, instrumento registrador gráfico ou de indicação digital.

3.6.1.1 No caso de instrumento quadrante ou registrador gráfico, estes devem satisfazer às seguintes exigências:

3.6.1.2 A escala do instrumento indicador ou do gráfico do registro, deve apresentar divisões de 1 dB, ou menores, em um intervalo de 15 dB ou mais.

3.6.1.3 A tolerância da indicação para as cinco primeiras divisões deve estar dentro de ± 1 dB e para as seguintes dentro de $\pm 0,5$ dB, devendo ser possível a leitura com essa precisão.

3.6.1.4 O MNS deve cobrir a faixa de nível de som de 60 dB a 110 dB na curva de ponderação «A» e nas curvas de ponderação «B» e «C» quando apresentadas, podendo cobrir esta faixa em várias escalas selecionáveis, satisfazendo as condições do item seguinte.

3.6.1.5 Havendo mais de uma escala, cada escala deve sobrepor-se à próxima, pelo menos 5 dB.

3.6.2 O MNS deve ter a seguinte característica dinâmica, chamada «resposta rápida».

3.6.2.1 Na presença de um som puro de 1000 Hz e com uma duração de 0,2 s, a indicação máxima deve ser 1 dB menor que a indicação para um som da mesma intensidade e frequência, constante em relação ao tempo, admitindo-se tolerância tal que a indicação pode ser no máximo igual à do som constante e no mínimo 4 dB abaixo.

3.6.2.2 Se um som puro de frequência entre 31,5 Hz e 8000 Hz e nível constante é aplicado bruscamente, a indicação máxima deve exceder a indicação final em $0,6 \pm 0,5$ dB.

3.6.3 O MNS deve também ter a seguinte característica dinâmica chamada «resposta lenta».

3.6.3.1 Na presença de um som puro de 1000 Hz e com uma duração de 0,5 s, a indicação máxima deve ser 4 ± 2 dB menor do que a indicação para um som da mesma intensidade e frequência, constante em relação ao tempo.

3.6.3.2 Se um som puro de frequência entre 31,5 Hz e 8000 Hz e nível constante é bruscamente aplicado, a indicação máxima deve exceder a indicação final em $0,6 (+1 - 0,5)$ dB.

3.6.3.3 A indicação para qualquer som puro constante em relação ao tempo de frequência entre 31,5 Hz e 8000 Hz, não deve divergir da correspondente indicação em «resposta rápida» em mais de 0,1 dB.

3.6.4 No caso do indicador digital a característica de «resposta rápida» e «resposta lenta» deve ser a especificada em 3.6.2 e 3.6.3, porém o MNS deve ser provido de um meio de fixar o valor máximo, apresentando-o durante um período de tempo que possibilite a leitura de todos os dígitos.

3.6.4.1 A indicação digital deve ser em sistema decimal.

3.6.4.2 O indicador digital deve ter pelo menos três algarismos decimais indicando, o último, décimo de dB, podendo este apresentar apenas os algarismos 0 e 5.

3.7 Características do amplificador:

3.7.1 Para a calibragem elétrica, recomenda-se que uma resistência de valor conhecido seja instalada em série com o fio massa do microfone e que meios adequados sejam providos para a ligação do mesmo.

3.7.2 Se o MNS for alimentado a bateria, deverão ser providos meios adequados para verificar as voltagens da bateria sob regime de carga.

3.7.3 Caso o MNS possa ser também usado com um cabo entre o microfone e o amplificador, as correções correspondentes a esse método de utilização deverão ser citadas pelo fabricante.

3.7.4 Quando o microfone for substituído por uma impedância elétrica equivalente, a voltagem básica de ruído deverá ser pelo menos 5 dB mais baixa do que a voltagem correspondente ao nível de som mínimo que se possa medir quaisquer que sejam as curvas de ponderação utilizadas.

3.7.5 Quando o microfone for substituído por uma impedância elétrica equivalente e quando o medidor de nível de som for colocado num campo de som, a indicação do MNS será pelo menos 10 dB abaixo daquela que poderá ser obtida em operação normal. Essa condição deverá ser preenchida para toda a faixa da escala do instrumento indicador, qualquer que seja o nível de som para todas as frequências entre 31,5 Hz a 8000 Hz.

3.7.6 Os efeitos da vibração deverão ser reduzidos tanto quanto possível.

3.7.7 Deverá ser especificada pelo fabricante a faixa de temperatura sobre a qual a calibragem do aparelho completo, incluindo-se o microfone, pode ser executada sem que o efeito da temperatura produza alterações maiores que 1 dB, bem como deverá ser citado pelo fabricante as correções a serem aplicadas.

3.7.8 O MNS deverá ser construído de forma a operar dentro de uma faixa com 0 a 90% de umidade sem que o mesmo seja afetado em mais de 0,5 dB. O fabricante deverá especificar os tempos necessários para recalibragem do MNS em função da umidade ao que o mesmo esteja submetido. Esta operação de recalibragem poderá ser efetuada com o auxílio de um pistão-fone ou outra fonte padrão de som.

3.7.9 Sendo prevista a ligação de um aparelho externo com uma impedância especificada ao MNS, como por exemplo fones de ouvido, essa ligação não deverá afetar a indicação em mais que 1 dB. Em caso contrário, o instrumento indicador deverá ser desligado automaticamente.

4. INSPEÇÃO

4.1 O conjunto do MNS deve ser aferido em frequências cobrindo a faixa de 31,5 Hz à 8000 Hz num campo de som consistindo de ondas progressivas e sensivelmente planas, incidindo no microfone na direção especificada pelo fabricante.

4.2 Se for necessário usar o cabo de extensão mencionado anteriormente, tal fato deverá constar do relatório.

4.3 Recomenda-se determinar a sensibilidade do aparelho completo para um campo de som difuso. Essa sensibilidade é definida como sendo o valor eficaz de pressão acústica

medida em campo livre para todas as orientações. É suficiente para esse fim, medir a sensibilidade do microfone em ângulos de incidência de 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150° e 180° da direção especificada como ideal pelo fabricante, calculando-se a sensibilidade para um campo de som difuso pela seguinte fórmula:

$$S^2 = K_1 S_0^2 + K_2 S_{30}^2 + K_3 S_{60}^2 \dots \dots \dots + K_7 S_{180}^2$$

onde:

S = sensibilidade para um campo de som difuso dado, como por exemplo em:

$$\frac{\text{m V}}{\text{dyn/cm}^2}$$

$S_0, S_{30}, S_{60}, \dots, S_{180}$ = Sensibilidade nos respectivos ângulos

$$K_1 = K_7 = 0,018$$

$$K_2 = K_6 = 0,129$$

$$K_3 = K_5 = 0,224$$

$$K_4 = 0,258$$

A sensibilidade para um campo de som difuso será determinado pelo menos nas frequências 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz.

4.4 A conformidade com os requisitos relativos às características dinâmicas do instrumento indicador, serão verificadas numa leitura contínua do instrumento indicador, possuindo 4 dB a menos que a leitura da escala completa. Essa verificação será feita aplicando-se um sinal elétrico ao amplificador, preferivelmente em série com o microfone, para todas as curvas de ponderação.

4.5 A verificação do valor eficaz da pressão acústica medida, será efetuada com o uso de um gerador de dois tons ou um aparelho similar para provar duas frequências não harmônicas primeiramente de forma sucessiva e posteriormente de forma simultânea.

As medições serão feitas para combinações diferentes de frequências não harmônicas e posições diferentes da chave seletora de nível. Para este fim, um sinal elétrico de frequência F_1 , cuja grandeza do valor eficaz da pressão acústica é ajustada para produzir uma certa leitura X no indicador, será aplicada na entrada do microfone ao amplificador. O sinal F_1 será então substituído por um sinal F_2 preenchendo as condições previamente especificadas e a grandeza do valor eficaz da pressão acústica deverá ser ajustada para produzir a mesma leitura X no indicador. Os dois sinais de frequência F_1 e F_2 serão aplicadas simultaneamente e a leitura do instrumento indicador anotada.

$$Y = X + 3 \text{ dB}$$

Recomenda-se que essa relação permaneça dentro de $\pm 0,25 \text{ dB}$.

Esse ensaio será executado para uma grandeza de leitura X = 7 dB abaixo da escala de leitura máxima do instrumento indicador.

4.6 A escala de calibragem do Instrumento Indicador deverá ser verificada por um método elétrico nas frequências de 31,5 Hz, 1000 Hz e 8000 Hz.

4.7 A precisão das indicações no atenuador deverá ser verificada aplicando-se voltagens senoidais de amplitude variável e de frequências iguais a 31,5 Hz, 1000 Hz e 8000 Hz. Em qualquer caso, o erro será menor que 1 dB em relação à leitura de 8000 Hz.

5. CONDIÇÕES ESPECÍFICAS

5.1 Constitue condição indispensável que os aparelhos contenham as seguintes identificações.

5.1.1 Medidor de Nível de Som.

5.1.2 Nome do Fabricante.

5.1.3 Tipo.

5.1.4 Número de Série.

5.1.5 Indicação da Faixa de Níveis de Pressão de Som para a qual foi projetado.

5.2 Cada aparelho deverá ser acompanhado de um folheto descritivo contendo as seguintes informações:

5.2.1 Tipo de Microfone (Eletrostático, Bobina Nível, etc.).

5.2.2 Ângulo de incidência.

5.2.3 Curvas de sensibilidade.

5.2.4 Efeitos da vibração.

5.2.5 Efeitos e limites de campos magnéticos e eletrostáticos.

5.2.6 Características dinâmicas (Rápidas ou lentas).

5.2.7 Efeitos e limites da temperatura e umidade nas indicações no aparelho.

5.2.8 Correção na calibragem pelo uso de um cabo de extensão do microfone.

5.2.9 Impedância do microfone.

5.2.10 Sensibilidade do microfone como uma função de frequência para o ângulo de incidência especificada pelo fabricante.

5.2.11 As características direcionais do microfone nas frequências especificadas.

5.2.12 A sensibilidade para um campo de som difuso calculado pelo método constante da presente Especificação.

5.2.13 Salientar que a presença de um observador no campo de som próximo ao microfone pode afetar a precisão das medições, particularmente nas frequências mais altas.

5.2.14 Demais características julgadas como necessárias pelo fabricante.

6. ACEITAÇÃO

6.1 Os medidores de nível de som que preencham todas as exigências da presente Especificação, serão aceitos.

TABELA I — Sensibilidade do medidor de nível de som num campo livre em relação ao real nível de pressão do som, conforme o ângulo de incidência.

Frequência Hz	Curva «A» dB	Curva «B» dB	Curva «C» dB	Tolerâncias dB
10	-70,5	-38,5	-14,5	5 — ∞
12,5	-63,4	-23,4	-11,4	5 — ∞
16	-56,7	-28,7	- 8,6	5 — ∞
20	-50,4	-24,4	- 6,3	5 — ∞
25	-44,6	-20,5	- 4,5	5 — ∞
31,5	-39,2	-17,2	- 3,0	5 — 5
40	-34,5	-14,2	- 2,0	4,5 — 4,5
50	-30,2	-11,7	- 1,3	4 — 4
63	-26,1	- 9,4	- 0,8	4 — 4
80	-22,3	- 7,4	- 0,5	3,5 — 3,5
100	-19,1	- 5,7	- 0,3	3,5 — 3,5
125	-16,1	- 4,3	- 0,2	3 — 3
160	-13,2	- 3,0	- 0,1	3 — 3
200	-10,8	- 2,1	0	3 — 3
250	- 8,6	- 1,4	0	3 — 3
315	- 6,5	- 0,9	0	3 — 3
400	- 4,8	- 0,5	0	3 — 3
500	- 3,2	- 0,3	0	3 — 3
630	- 1,9	- 0,1	0	3 — 3
800	- 0,8	0	0	2,5 — 2,5
1000	0	0	0	2 — 2
1250	0,6	0	0	2,5 — 2,5
1600	1,0	- 0,1	- 0,1	3 — 3
2000	1,2	- 0,2	- 0,2	3 — 3
2500	1,2	- 0,3	- 0,3	4 — 3
3150	1,2	- 0,5	- 0,5	5 — 3,5
4000	1,0	- 0,8	- 0,8	5,5 — 4
5000	0,5	- 1,2	- 1,3	6 — 4,5
6300	- 0,1	- 2,0	- 2,0	6 — 5
8000	- 1,1	- 3,0	- 3,0	6 — 6
10000	- 2,4	- 4,2	- 4,3	6 — ∞
12500	- 4,2	- 6,0	- 6,0	6 — ∞
16000	- 6,5	- 8,3	- 8,4	6 — ∞
20000	- 9,2	-11,0	-11,1	6 — ∞

TABELA II — Tolerância admissíveis na sensibilidade do microfone em relação a um ângulo de incidência compreendido entre $\pm 90^\circ$.

Frequência Hz	Tolerâncias Admissíveis (dB)	
	«A»	«B»
31,5 — 500	± 1	± 1
1000	$\pm 1,5$	+ 1 — 2
2000	± 4	+ 1 — 6
4000	± 8	+ 1 — 8
8000	± 15	+ 1 — 15

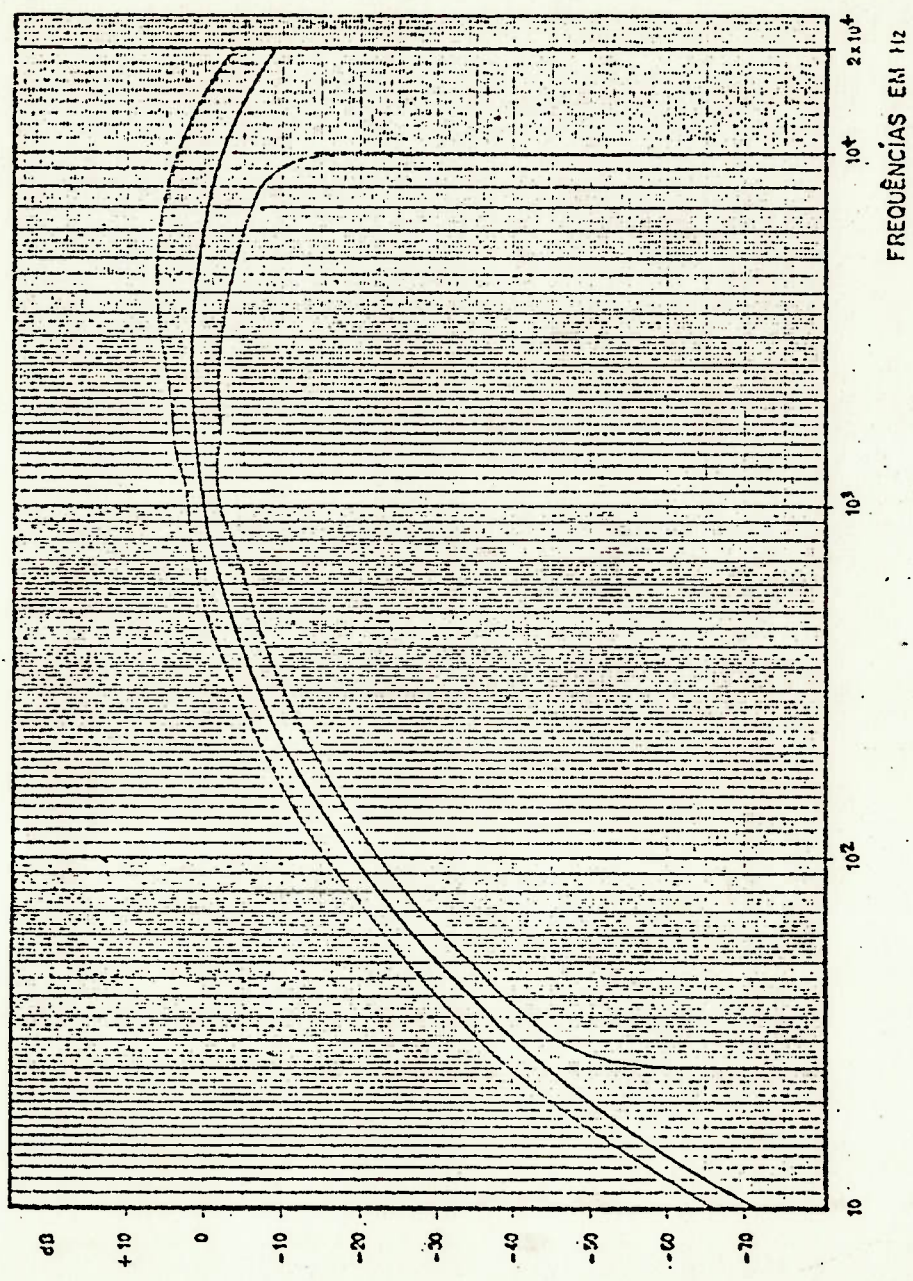


FIG. 1 — Curva de ponderação A.

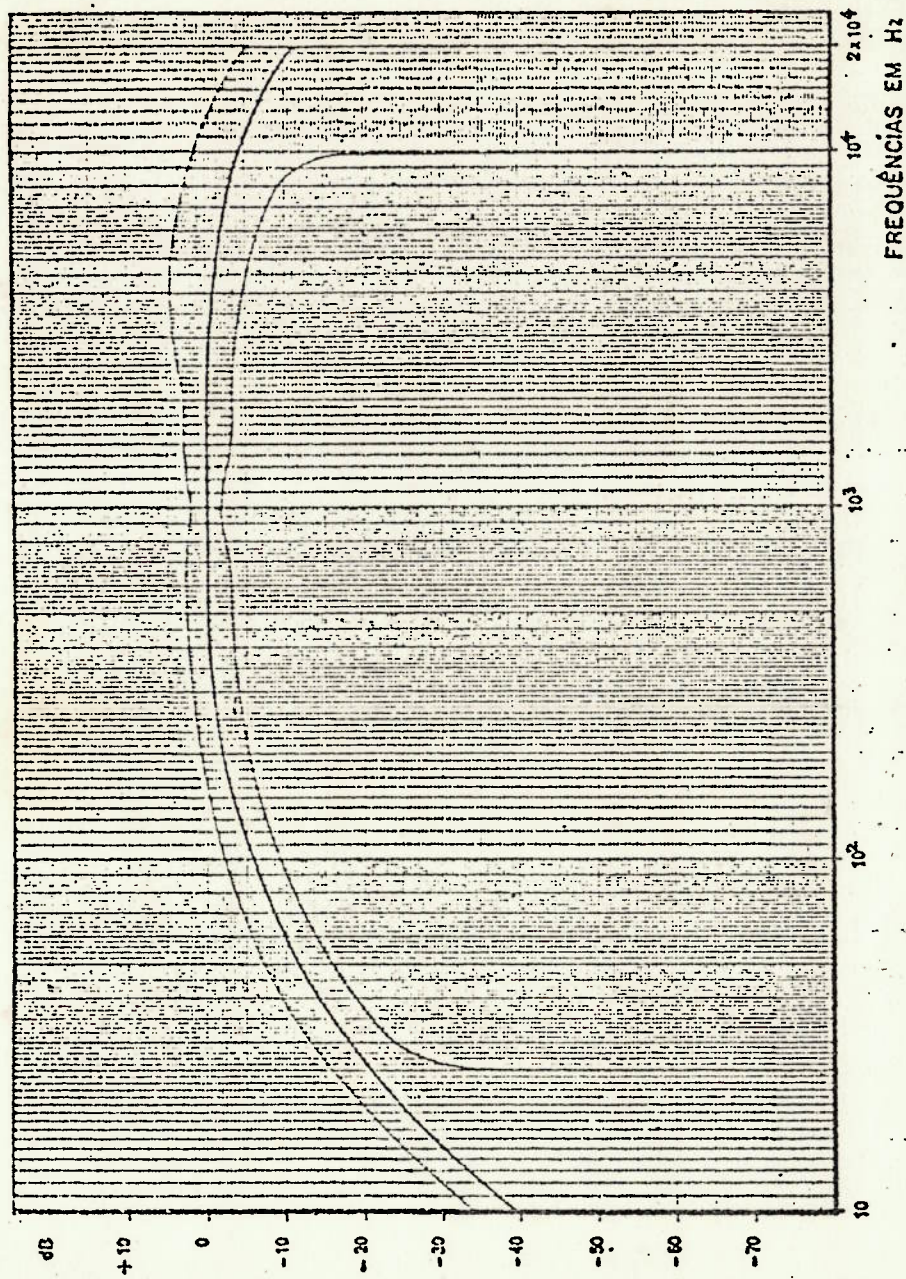


FIG. 2 — Curva de ponderação B.

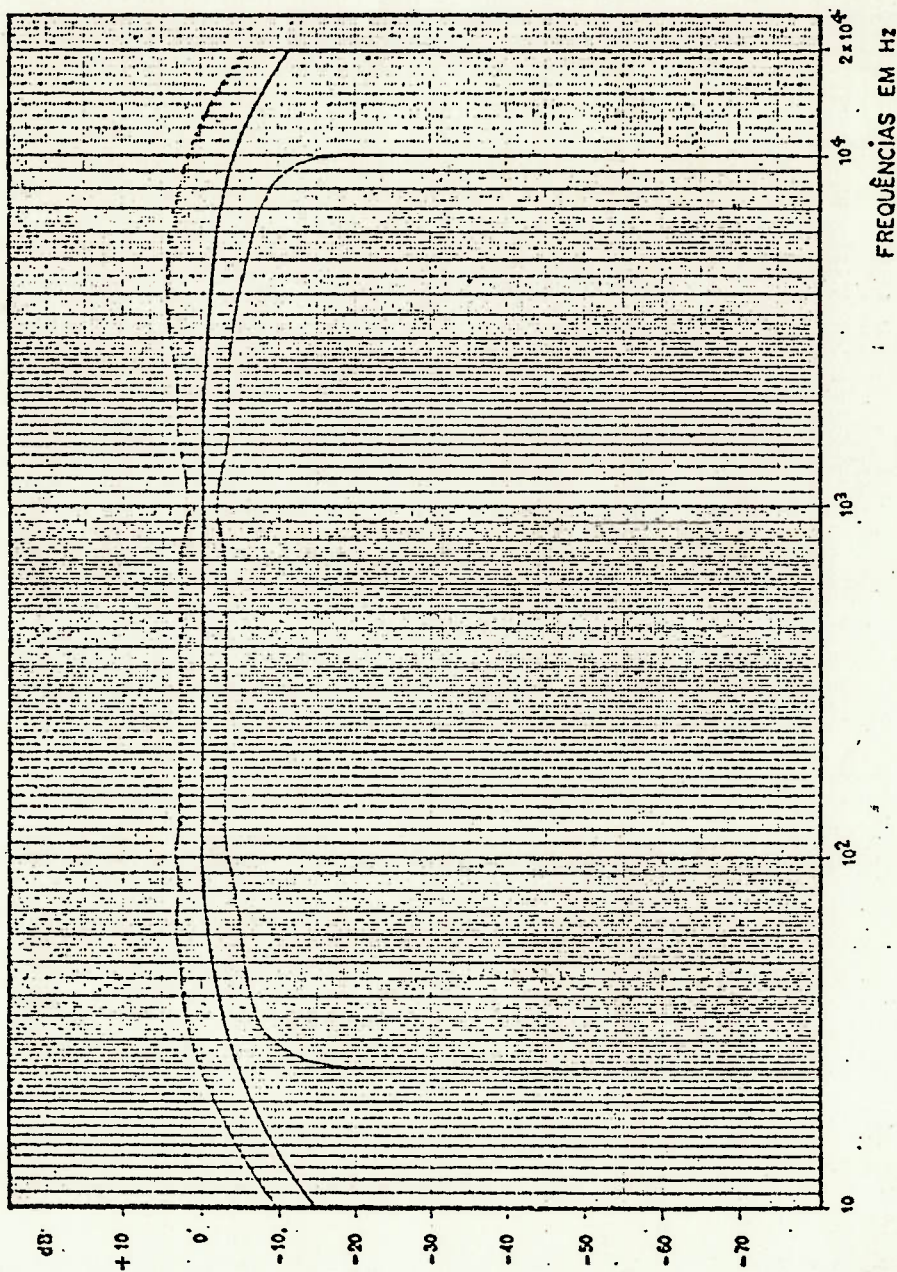


FIG. 3 --- Curva de Ponderação C.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

SEDE: RIO DE JANEIRO-GB — Av. Almirante Barroso, 54 - gr. 1.505. DELEGACIAS: BELO HORIZONTE-MG — Rua da Bahia, 1148 - Kr. 1003 e 1007/11. BRASÍLIA-DF — SQS 202 - F. 405. CAMPINA GRANDE-PB — Av. Arraial Veloso, 882. FORTALEZA-Co — Av. Universidade, 2782 - C.P. 1254. JOINVILLE-SC — Rua Albano Schmidt, 3365 (C.P. 457). PONTO ALEGRE-RS — Av. Osvaldo Aranha, 271. RECIFE-Pe — Rua da Saudade, 291 - Box Vista. SALVADOR-Ba — Av. Joana Angélica, 8 - 1.º a. - s/5. SÃO PAULO-SP — Rua Marquês de Itu, 88 - 3.º/4.º/5.º a.

APÊNDICE 6: Descrição Sumária do Calibrador B&K
tipo 4230 retirado do B&K Technical Review
1971 - nº 4

Brief Communications

The intention of this section in the B & K Technical Reviews is to cover more practical aspects of the use of Brüel & Kjær instruments. It is meant to be an "open forum" for communication between the readers of the Review and our development and application laboratories. We therefore invite you to contribute to this communication whenever you have solved a measurement problem that you think may be of general interest to users of B & K equipment. The only restriction to contributions is that they should be as short as possible and preferably no longer than 3 typewritten pages (A 4).

Acoustical Calibrator Type 4230. and its Equivalent Diagram *)

by

Erling Frederiksen

One of the newer instruments in the Brüel & Kjær program is an Acoustical Calibrator Type 4230 (Fig. 1) which produces a sound pressure of 1 N/m^2 ($94 \text{ dB ref. } 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$) at 1000 Hz . One remarkable property of the calibrator is that it is virtually insensitive even to large changes in atmospheric pressure.



Fig. 1. Sound Level Calibrator, Type 4230

Another advantage of this calibrator is that in spite of its small outer dimensions, it has a large equivalent coupler volume which renders the sound pressure independent of varying cavities and equivalent volumes of the microphones mounted on it. These desirable properties were obtainable on account of establishing equivalent electrical diagrams for mechanical, electrical and acoustical systems in the early design stage. The equivalent circuits made it possible to measure or calculate the influence of individual elements on the properties of the calibrator, which could be optimized for example with respect to temperature and atmospheric pressure.

A cross-sectional view of the calibrator is shown in Fig. 2. It consists of a Zener stabilized oscillator which delivers current via a potentiometer to a piezoelectric crystal. The crystal is soldered onto a metallic suspension system, which is designed so that its influence on the stiffness of the crystal is minimized. The force generated by the crystal is transformed by a conical nickel-membrane to a sound pressure in the coupler to which the microphone is subjected.

The conical part of the membrane forms a stiff piston while the plane edge of the membrane is elastic. To obtain low acoustic impedance from the point of view of the coupler volume, the moving mechanical parts of the system are adjusted to resonate at 1000 Hz which is the signal frequency of the calibrator. Since the mass and stiffness of the membrane and crystal would give a higher resonant frequency, the frequency can be lowered by adding a mass to the membrane.

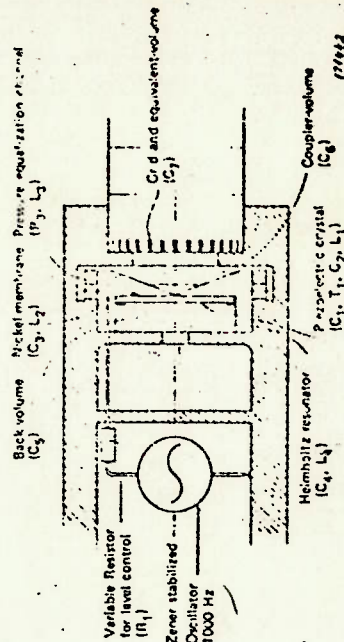


Fig. 2. Cross-sectional view of the calibrator

*) Paper presented at "Nordic Acoustic Meeting", Copenhagen, 24.-26. August, 1970.

It is desirable to eliminate the cavity stiffness behind the membrane since it changes in proportion to the atmospheric pressure and would therefore influence the resonant frequency of the system. This is achieved by coupling a Helmholtz resonator (with resonant frequency 1000 Hz) whereby a very low acoustic impedance is obtained at this frequency.

Finally, a pressure equalization canal between the coupler and the cavity behind the membrane is incorporated in the calibrator, to reduce the large pressure variations caused by "piston" effects, when microphones are coupled on and off, which could otherwise damage both the calibrator and the microphones.

An equivalent circuit for the above mentioned elements is shown in Fig.3.

The impedance analogy has been used, i.e. mechanical or acoustic mass is replaced by an inductance, compliance (1/stiffness) by capacity, and damping by electrical resistance. The dimensions of the single elements are determined partly by calculation and partly by transferring the given mechanical and electrical data of the crystal to acoustical units, taking into consideration the area of the membrane through which the real acoustical elements are coupled.

For actual build-up of the circuit in practice, the generating side of the circuit is modified whereby the transformer can be omitted, and the impedances of the electrical elements are reduced by a factor of 10^3 to obtain the order of component impedances met in actual practice.

The equivalent circuit diagram which is reduced to the one shown in Fig.4, is valid for an atmospheric pressure of 760 mm of Hg. Similar circuits have also been built for lower static pressures. For doing so, the reactance of the acoustic elements has been changed in proportion to the pressure reduction.

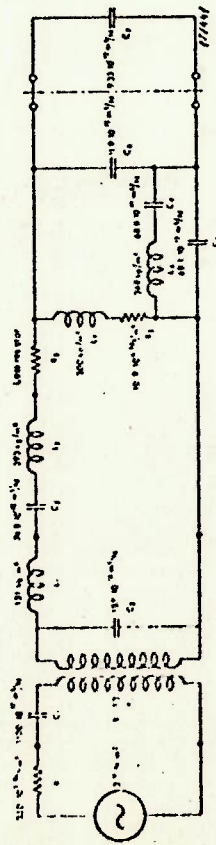


Fig. 3. Electrical equivalent circuit diagram (for 1013 mbar, 25°C)

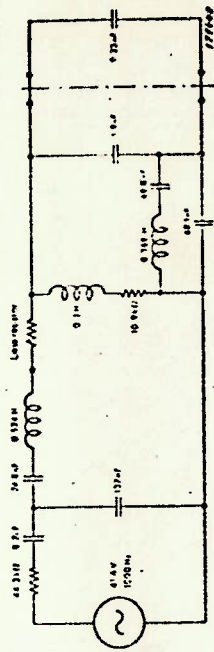


Fig. 4. Reduced equivalent circuit diagram

Fig.5 shows the equivalent volume as a function of frequency measured on a typical calibrator and on the electrical model. Apart from minor differences due to the spread in parameters, there is generally good agreement over most of the frequency range.

The slight difference in the slope of the curves at low frequencies is caused by ignoring in the electrical model leaks in the coupler thread.

Equivalence of the two systems cannot be expected over 5 kHz on account of the resonances occurring in individual mechanical and acoustic elements.

Fig.6 shows the sound pressure measured as a function of frequency for the calibrator and the electrical model. Here again the curves agree remarkably up to 5 kHz. The characteristics of the model show that the sound pressure level is not influenced by the atmospheric pressure at 1000 Hz. Corresponding measurements on the calibrator are shown in Fig.7, where both the axes are considerably enlarged to give a better resolution at 1000 Hz.

No attempt has been made to determine other loss resistances than those shown in the diagram. The series loss resistance, which is the internal resistance of the calibrator at 25°C can be determined, either directly by impedance measurements, or it can be determined by measurements as shown in Fig.7, where the static pressure is determined for a given fall in sound pressure. Knowing the static pressure and the loading volume, the internal resistance can be calculated. A part of it originates from the electrical series resistance, which can be determined to be equal to approx. $38 \times 10^3 \text{ Ns/m}^5$, while the remainder, roughly $60 \times 10^3 \text{ Ns/m}^5$ is distributed over the mechanical and acoustic elements. By further reducing the static pressure, it might be possible to eliminate the acoustic elements, as the volume behind the membrane would short circuit the series loss resistance of the Helmholtz resonator, whereby the loss of the mechanical system could be determined by measuring its Q value.

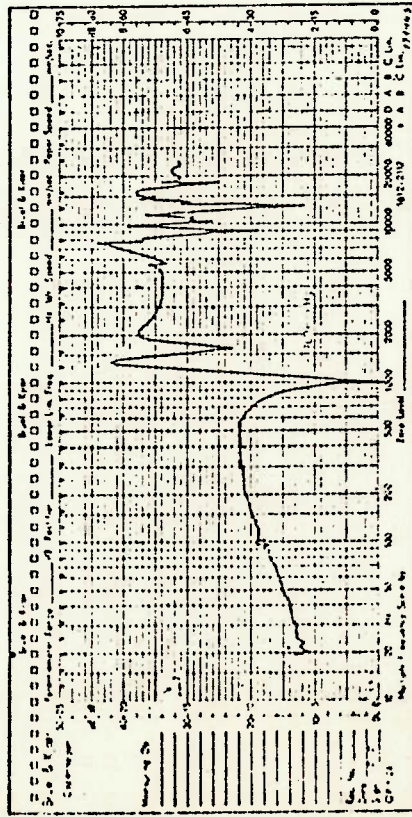
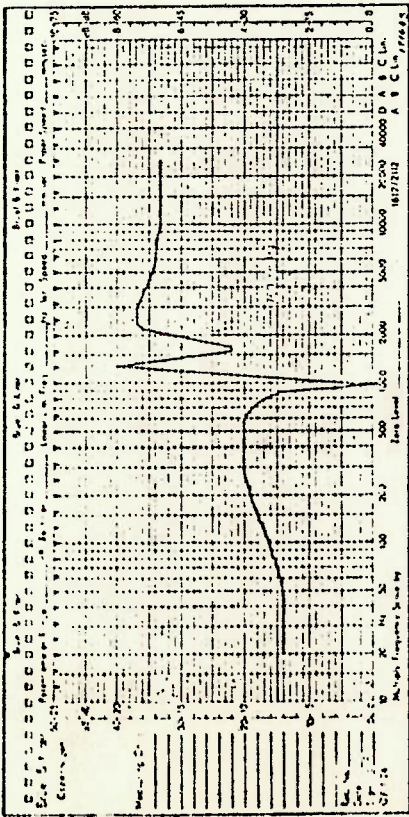


Fig. 5. The equivalent volume measured as a function of frequency.

a. For the equivalent circuit

b. For the calibrator

The use of the equivalent circuit has made it feasible to analyze the function of the calibrator by electrical measurements and by numerical evaluations. Under all circumstances, it is important that the functioning of the instrument is fully understood before it is set into production.

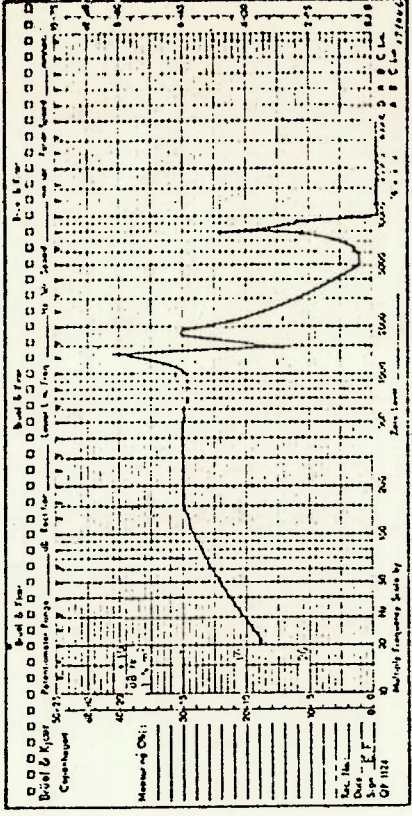
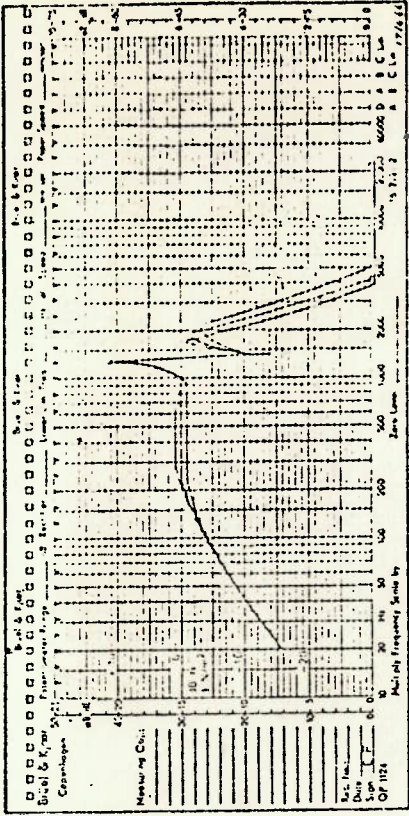


Fig. 6. The sound pressure level measured as a function of frequency.

a. For the equivalent circuit

b. For the calibrator

The equivalent circuit has also been used for investigating the effects of individual elements on the stability of the calibrator. As regards stability, it can be said in general, that fewer the components, the more stable should the instrument be. The above described calibrator contains a number of elements, however, either they have practically no influence on the signal level at 1000 Hz, or they are expected to be very stable. Nevertheless, the calibrator in this respect cannot be compared to piston-type calibrators.

Heterodyne Voltmeter Type 2007

The new Heterodyne Voltmeter is a completely self-contained, precision instrument designed to measure directly voltages in AM-FM, single sideband, and television frequency ranges. It will determine the voltage level, the frequency, and the modulation percentage of an input signal. The instrument can be powered from AC main, built-in batteries (recharger included), or external batteries.

The Heterodyne Voltmeter Type 2007 is developed from Type 2006. Type 2007 is equipped with electronic control of the variable oscillator, and the frequency range is 100 kHz to 305 MHz in eight overlapping ranges. The tuned frequency is indicated on a moving coil meter provided with interchangeable scales. Three scales are included, a general frequency scale, a scale for American TV channels, and one for European TV channels. Scales can be custom made to order.

The Heterodyne Voltmeter Type 2007 has been designed with an untuned input and a mixer circuit with an ultra flat frequency response. With the normal type of instrument having a tunable input, recalibration is necessary at each frequency due to the corresponding "Q" changes. However, the B & K Type 2007 establishes self-calibration from a built-in stabilized 27 MHz reference oscillator. After calibration, further adjustments are not necessary while sweeping the entire frequency range from 100 kHz to 305 MHz.

The input probe contains a high impedance FET stage providing minimum load of the circuit being measured. A 50Ω probe extension is included for measurements on high frequency transmission lines. The normal voltage measuring range covers 100 μV to 100 mV full scale deflection. The built-in attenuator provides seven accurate 10 dB steps in sensitivity. A 60 dB attenuator is provided which, when fitted to the input probe, extends the range to 100 V.

In the six higher frequency ranges covering 7 to 305 MHz a triple-detection receiver is used providing double conversion. This design gives more than 50 dB image-frequency and intermediate frequency rejection also in these ranges.

A crystal filter following the mixer stage provides a "narrow" measurement bandwidth of ± 1.25 kHz. By switching out this filter a "wide" bandwidth

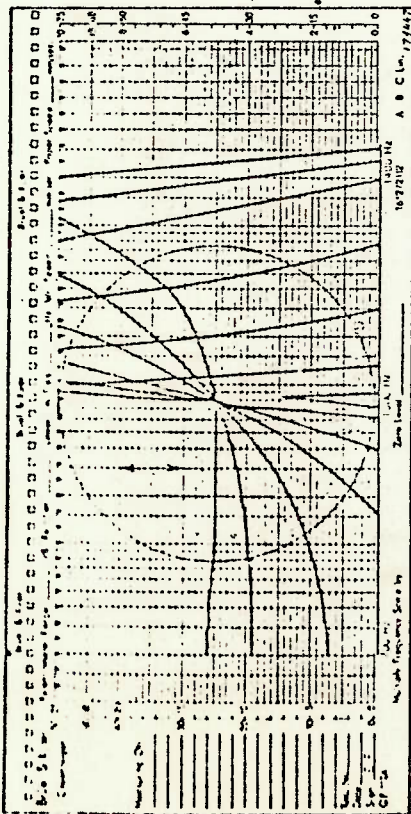


Fig. 7. Sound pressure level measured against frequency for the calibrator at 1000 Hz for various atmospheric pressures. (The circle refers to the one on Fig. 6b but to an enlarged scale)

The calibrator has not been developed with the aim for use in the laboratory, but rather for field measurements, rendering ease of use, and eliminating corrections for atmospheric pressure and equivalent volume.

APÊNDICE 7: Descrição dos Ensaiois realizados para a determinação dos parâmetros do elemento transdutor.

[3] Os parâmetros a serem medidos eram: C_E' , C_M' , M_M , T_E e S_M . Para cada um deles foi necessário um método diferente de medição, e que passamos a descrever:

a) Medição de C_E' :

A definição de C_E' é "capacitância elétrica com os terminais mecânicos bloqueados", ou seja, sem que o elemento possa movimentar-se. Para atingir essa condição prensamos o elemento piezoelétrico entre um plano e um peso aproximado de 10 kg, com face plana, e perfeitamente adaptado ao relevo do elemento piezoelétrico. Nessas condições medimos em 1000 Hz o valor da capacitância elétrica do disco piezoelétrico utilizando uma ponte RLC automática.

b) Medição de C_M' e M_M :

O valor de C_M' é definido como "compliância mecânica com os terminais elétricos em curto circuito ($e=0$)". Assim os terminais elétricos deveriam ser curto-circuitados para a medição de C_M' . Isso é simulado ao se excitar os terminais elétricos do transdutor com um oscilador, cuja impedância de saída é, em geral, de 50 Ohm.

Assim sendo medimos o valor de C_M' excitando o elemento piezoelétrico montado na forma de utilização, aplicando separadamente ao centro do mesmo duas massas M_1 e M_2 diferentes, conhecidas, da ordem de grandeza das massas adicionais a serem utilizadas e com condições de montagem sobre o elemento piezoelétrico idênticas à situação real.

Utilizando um microfone conectado ao amplificador de medidas, encontramos em cada caso, a frequência em que o nível sonoro era máximo. Assim de posse dos valores das frequências de ressonância f_1 (relativo à massa M_1) e f_2 (relativo à massa M_2), temos

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{C_M' (M_1 + M_M)} \right)^{1/2} \quad (7.1)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{C_M' (M_2 + M_M)} \right)^{1/2} \quad (7.2)$$

onde M_M é a massa associada ao primeiro modo de vibração do elemento piezoelétrico

Assim, temos

$$\left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 = \frac{M_2 + M_M}{M_1 + M_M} \quad (7.3)$$

Donde

$$M_M = \frac{(f_1/f_2)^2 M_1 - M_2}{1 - (f_1/f_2)^2} \quad (7.4)$$

E portanto

$$C_M' = 1/(M_1 + M_M) \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_1)^2 = 1/(M_2 + M_M) \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_2)^2 \quad (7.5)$$

c) Medição de T_E

Para a medição de T_E foi necessário utilizar um acelerômetro instalado sobre uma das massas M_1 ou M_2 do ensaio anterior, de forma a que o ponto de apoio e área de fixação do acelerômetro coincidissem com o ponto normal de apoio e área normal de fixação das massas adicionais sobre o elemento piezoelétrico. Uma vez montado o acelerômetro mediu-se, com o auxílio de um atenuador de precisão, a relação \bar{R} entre a tensão de excitação do elemento piezoelétrico e a tensão elétrica gerada pelo acelerômetro. Conhecida a sensibilidade do acelerômetro, a frequência e a massa M_t apoiada sobre o elemento piezoelétrico (soma da massa M_1 ou M_2 com a massa do acelerômetro, e M_M) é possível calcular o valor de T_E . A força F_M que atua sobre a massa M_T apoiada sobre o elemento piezoelétrico é dada por

$$F_M = M_t \cdot \bar{a} \quad (7.7)$$

onde \bar{a} = aceleração

mas

$$\bar{a} = e_{ace}/S_{ace} \quad (7.8)$$

onde

e_{ace} = tensão elétrica gerada pelo acelerômetro

S_{ace} = sensibilidade do acelerômetro.

e portanto

$$F_M = M_T \cdot e_{ace}/S_{ace} \quad (7.9)$$

Observando o circuito equivalente da montagem (ver Figura 7.1).

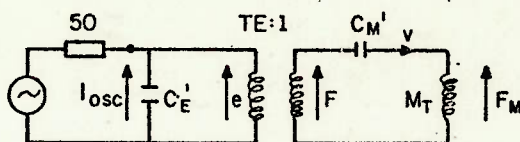


Figura 7.1 - Circuito equivalente da montagem realizada para o ensaio de determinação T_E

vemos que

$$F = F_M + (1/j\omega C_M').v \quad (7.10)$$

e sabemos que

$$v = \bar{a}/j\omega = e_{ace}/(j\omega \cdot S_{ace}) \quad (7.11)$$

$$v = \bar{a}/j\omega = e_{ace}/(j\omega S_{ace}) \quad (7.12)$$

onde ω = frequência angular da oscilação

Donde

$$F = F_M (1/(\omega^2 C_M')).e_{ace}/S_{ace} \quad (7.13)$$

E portanto

$$F = (M_t - 1/\omega^2 C_M') (e_{ace}/S_{ace}) \quad (7.14)$$

Como

$$T_E = e/F \quad (7.15)$$

e, do circuito da Figura 6.1

$$e = e_{osc} \quad (7.16)$$

Temos

$$T_E = (S_{ace} / (M_t - 1/\omega^2 C_M')) \cdot (e_{osc} / e_{ace}) \quad (7.17)$$

Mas

$$\bar{R} = e_{osc} / e_{ace} \quad (7.18)$$

Donde

$$T_E = \bar{R} \cdot S_{ace} / (M_t - 1/\omega^2 C_M') \quad (7.19)$$

d) Medição de S_M

A área efetiva S_M do elemento piezoelétrico é o fator de transdução mecano-acústica do transdutor que deve ser medida, uma vez que a velocidade mecânica varia de ponto para ponto do disco vibrante, e todas as medidas descritas até o momento levam em consideração apenas o ponto de aplicação da massa adicional. Para avaliar a relação entre a velocidade mecânica v nesse ponto e a velocidade de volume U efetivamente provocada pelo elemento piezoelétrico, mede-se sua área efetiva S_M , onde

$$U = v \cdot S_M \quad (7.20)$$

Assim sendo, utilizando a montagem do acelerômetro sobre a massa M_1 (ou M_2) para a instalação sobre o elemento piezoelétrico, realizamos a montagem da Figura 7.2.

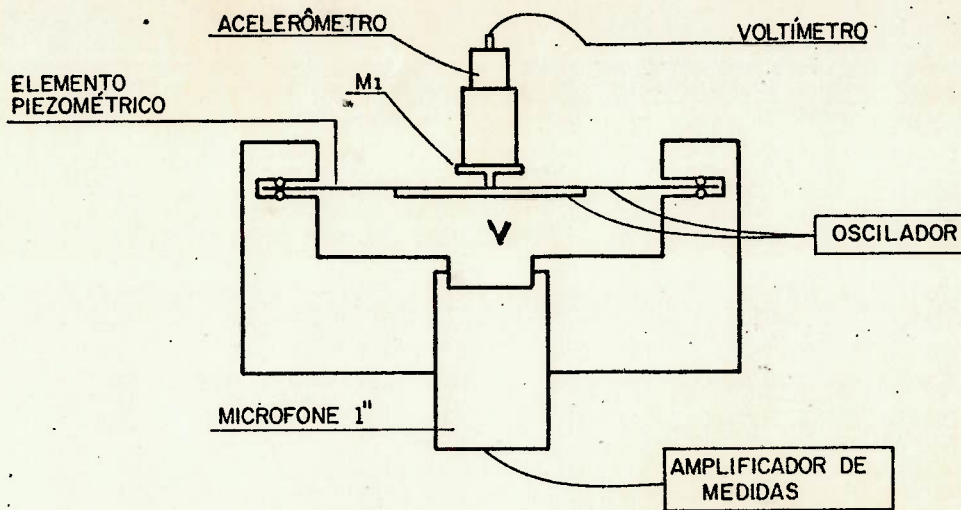


Figura 7.2 - Montagem realizada para a medição de S_M .

Utilizando o circuito equivalente da montagem, apresentado na Figura 6.3, é simples verificar como calcular S_M conhecendo o valor da aceleração \bar{a} , da massa M_t ($M_1 + M_{ace} + M_M$), da pressão atmosférica, da frequência, do volume V , do volume equivalente V_{eq} do microfone e do nível sonoro L .

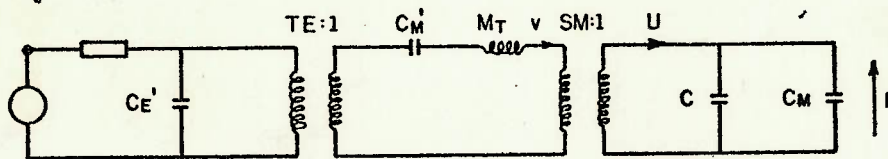


Figura 7.3 - Circuito equivalente da montagem utilizada para medir S_M .

Conhecendo a tensão elétrica e_{ace} gerada pelo acelerômetro, além de sua sensibilidade S_{ace} temos o valor da aceleração \bar{a} .

$$\bar{a} = e_{ace} / S_{ace} \quad (7.21)$$

Conhecendo a frequência angular de oscilação, ω , te-
mos

$$v = \bar{a}/j\omega \quad (7.22)$$

E portanto

$$v = (1/j\omega) \cdot (e_{ace}/\gamma S_{ace}) \quad (7.23)$$

Conhecendo o nível sonoro L em dB SPL, calculo o va-
lor de p , sabendo que

$$L(\text{dB}) = 20 \log(p/2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2) \quad (7.24)$$

E portanto

$$p = 2 \cdot 10^{(L/20)-5} \text{ N/m}^2 \quad (7.25)$$

Sabendo que

$$U = j\omega(C+C_M) \cdot p \quad (7.26)$$

$$C = V/\gamma P \quad (7.27)$$

$$C_M = V_{eq}/\gamma P_o \quad (7.28)$$

onde

P = pressão atmosférica em N/m^2

P_o = pressão atmosférica em que foi medido o volume
equivalente do microfone (em geral $10,13 \times 10^4 \text{ N/m}^2$)

$\gamma = c_p/c_v$ para o ar ($\gamma = 1,40$)

temos

$$U = \frac{j\omega}{\gamma} \left(\frac{V}{P} + \frac{V_{eq}}{P_o} \right) p \quad (7.29)$$

e portanto podemos calcular

$$S_M = \frac{U}{v} \quad (7.30)$$

a partir de (6.23) e (6.29).

ou seja

$$S_M = \frac{-\omega^2}{\gamma} \left(\frac{y}{P} + \frac{y_{eq}}{P_0} \right) \cdot p \cdot \frac{e_{ace}}{S_{ace}} \quad (7.31)$$

Observação: Este método só pode ser utilizado quando o elemento é suficientemente rígido para suportar a massa do acelerômetro utilizado sem chegar à região não linear. No caso do cone transdutor mecano-acústico do calibrador, essa medida não foi possível pois o peso do acelerômetro desloca completamente o ponto de operação da membrana para a região não linear. (O acelerômetro utilizado tem uma massa aproximada de 32 g).

APÊNDICE 8: Ensaio para a determinação da variação dos parâmetros T_E e da frequência de ressonância do elemento piezoelétrico em função da temperatura.

Para poder avaliar a variação de T_E em função da temperatura com o transdutor nas condições de operação (o objetivo de ensaio), sintonizamos, através da adição de massa, o elemento piezoelétrico em 1000 Hz. No entanto não era possível instalar sobre ele o acelerômetro, como no caso da medição do valor absoluto aproximado do parâmetro (ver Apêndice 7) pois isso afetaria drasticamente o valor da ressonância (passaria a estar em torno de 250 Hz). Assim, como nos interessava a variação, e não o valor absoluto, realizamos a montagem do elemento piezoelétrico como na Figura 8.1.

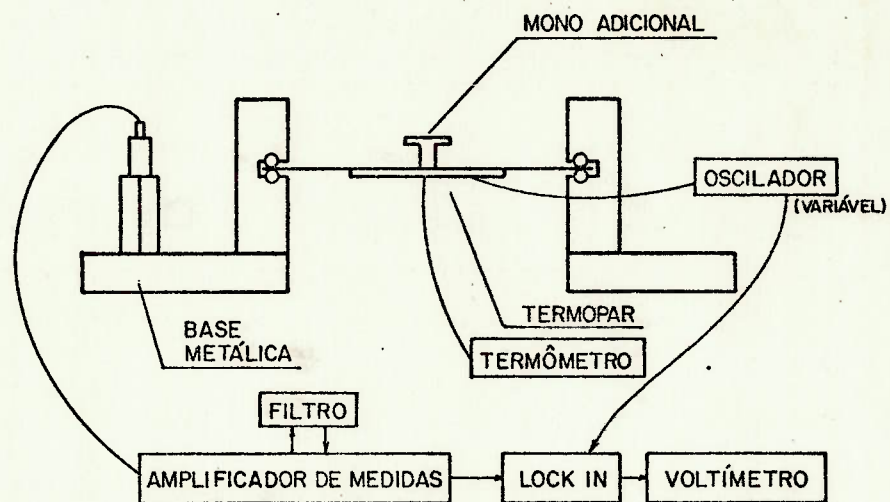


Figura 8.1 - Montagem utilizada para a medição da variação de T_E e da frequência de ressonância em função da temperatura.

O termopar foi fixado ao disco piezoelétrico com borracha de silicone. A fim de ser possível medir apenas o sinal que interessava, bastante atenuado e imerso em outras vibrações no ponto de captação, foi preciso amplificá-lo, filtrá-lo e submetê-lo ao analisador LOCK-IN, que recebia o sinal de referência diretamente o oscilador.

Após aquecer até 50°C o conjunto sobre um aquecedor elétrico, monitorando a temperatura para que nem momentaneamente ultrapasse 60°C , realizamos as medições enquanto a temperatura decrescia lentamente devido à grande capacidade térmica da base metálica utilizada.

Variando a frequência do oscilador, procurava-se a cada grau $^{\circ}\text{C}$ a frequência onde o valor lido do sinal de vibração era máximo, anotando esse valor. Dessa forma, determinou-se entre 50°C e 25°C a variação de T_E (pela variação dos níveis de vibração lidos sempre na ressonância) e da frequência de ressonância do elemento piezoelétrico.

APÊNDICE 9: Análise da configuração do calibrador Bruel & Kjaer tipo 4230 adaptada ao elemento piezoelétrico utilizado.

No caso de se empregar o elemento piezoelétrico escolhido numa configuração como a publicada na Referência (ver Apêndice 6), a construção do calibrador seria grandemente simplificada, inclusive em relação ao próprio desenho do Calibrador 4230, pois seria possível eliminar o cone transdutor mecano-acústico e a configuração reduzir-se-ia à da Figura 9.1.

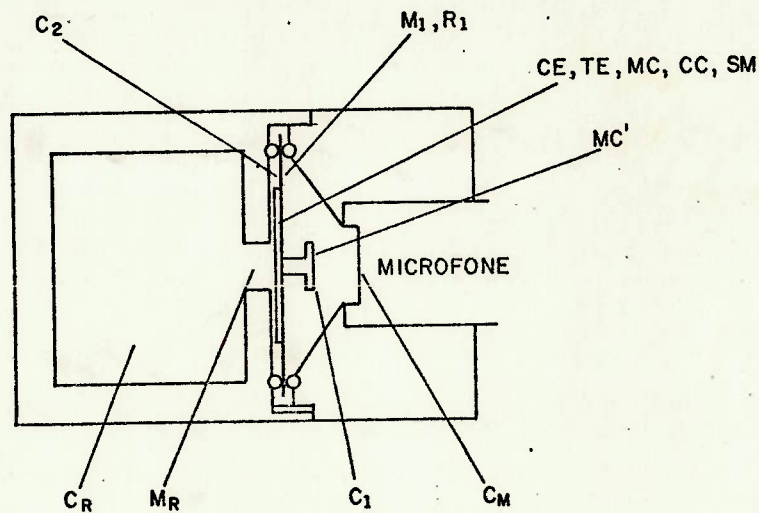


Figura 9.1 - Configuração do Calibrador 4230 adaptado ao elemento piezoelétrico utilizado.

O circuito equivalente dessa configuração é apresentado na Figura 9.2.

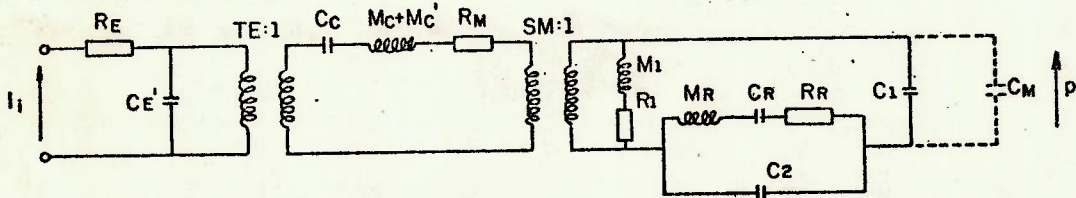


Figura 9.2 - Circuito equivalente da configuração da Figura 9.1.

Essa simplicidade era extremamente atraente o que nos levou a dispender com ela a maior parte do tempo disponível para a realização do trabalho, e em função disso gostaríamos de apre-

sentar as razões que nos levaram a abandoná-la.

Em primeiro lugar, comparando os valores das massas e compliâncias acústicas citados na Referência [7] referentes ao elemento piezoelétrico e os valores das massas e compliâncias acústicas calculados para o elemento utilizado (ver equações IV.3) nota-se que as referentes ao elemento transdutor disponível são cerca de 100 vezes superiores aos do transdutor citado na Referência [7].

Apesar de, na ressonância, a impedância mecânica do transdutor cair teoricamente a zero, para um mesmo valor do fator de qualidade Q_c da ressonância, a impedância resistiva restante, continua sendo 100 vezes superior, no caso do nosso transdutor, em relação ao transdutor citado. Esse foi um dos fatores limitantes, em especial para baixos valores da pressão atmosférica, em que a impedância acústica da cavidade C_1 cai muito, implicando numa grande variação do nível sonoro, pois, em função da parte resistiva da impedância do elemento transdutor, o circuito equivalente a 25°C se torna como o da Figura 9.3.

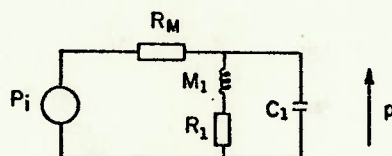


Figura 9.3 - Circuito equivalente, a 25°C , da configuração da Figura 9.1 em função do fator Q da ressonância do elemento piezoelétrico

No caso do elemento piezoelétrico utilizado, o fator Q_c medido para a ressonância sintonizada em 1000 Hz resultou em torno de 20, o que implica (massa total em torno de 2,2 g e a área efetiva em torno de $3,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$) em um valor de R_M de aproximadamente $6 \times 10^6 \text{ N s/m}^5$ enquanto o valor da impedância da

cavidade C_1 , a 25°C e 940 mbar , é de aproximadamente $7 \times 10^6 \text{Ns/m}^2$ e caindo linearmente à medida que a pressão decresce. Esse efeito, no entanto, poderia ser parcialmente contornado pelo dimensionamento do orifício no elemento transdutor (M_1, R_1) pois, fazendo que a impedância desse orifício fosse suficientemente grande, sua impedância seria inferior à de C_1 e dominaria a montagem em paralelo.

A solução do problema não seria completa devido ao fato de o valor de M_1 decrescer também, com o decréscimo da pressão atmosférica.

No entanto, o problema mais sério surge com as variações de C_M , em função da temperatura, pois isso faz com que o circuito saia completamente das condições de operação. E o fato de as impedâncias acústicas do transdutor serem tão elevadas em relação ao resto do circuito agrava ainda mais o problema pois de apesar de, nas temperaturas mais baixas predominar no transdutor a impedância acústica da compliância, nas temperaturas mais elevadas predomina a impedância da massa acústica, que, em algumas condições é também (além de R_M) igual à impedância acústica (sempre capacitiva) do restante do circuito, entrando em ressonância.

Esse problema pode, novamente, ser contornado parcialmente pelo correto dimensionamento do orifício no disco transdutor, mas tornando o valor desse elemento extremamente crítico, o que não é, de forma alguma, desejável.

Esses problemas são agravados ainda pelo fator " Q_R " da ressonância acústica do ressoador de Helmholtz, gerando, na ressonância, uma impedância resistiva, que, somada ao restante dos problemas, compromete também o comportamento do calibrador em relação ao volume equivalente do microfone acoplado.

Uma forma de aumentar o fator Q_R seria elevar o valor da massa acústica do "pescoço", aumentando a relação espessura/raio do orifício (ver Referência [9]), mas isso acaba por comprometer, ainda mais, o comportamento em temperatura, uma vez que o valor da massa acústica varia com a temperatura.

Após muito estudar o problema, descobrimos que uma forma de projetar essa configuração seria tentar compensar as

variações na impedância acústica do transdutor com a temperatura através da variação da impedância acústica do ressoador de Helmholtz, uma vez que elas caminham em direções opostas: à medida que a temperatura sobe acima de 25°C, a impedância do transdutor passa a ser dominada pela massa, enquanto o do ressoador de Helmholtz passa a ser dominado pela compliância, e inversamente à medida que decresce a temperatura. Isso faz com que, teoricamente, os ressoadores possam ressoar um com o outro, mantendo a condição de trabalho do calibrador ressonante.

Além de isso não funcionar para qualquer valor da pressão (a impedância acústica dos elementos do ressoador de Helmholtz varia com a pressão atmosférica, enquanto isso não ocorre no caso dos elementos mecânicos do transdutor) os valores necessários para os elementos acústicos do ressoador são impossíveis de serem implementados para o valor da área efetiva do transdutor piezoelétrico utilizado.

Em função dessas dificuldades que certamente comprometeriam o comportamento do calibrador, decidimos abandonar essa configuração depois de já termos implementado vários protótipos que não resistiram ao ensaio de variação do volume equivalente dos microfones. Esses protótipos com base na Referência [7], tinham sido projetados sem levar em conta os fatores " Q_C " e " Q_R " das ressonâncias do elemento transdutor e do ressoador de Helmholtz, e nesse caso, através do dimensionamento de M_1 e R_1 era possível projetar calibradores aceitáveis na configuração simples.

A solução encontrada para atender às especificações foi alterar a configuração para a exposta no corpo da Dissertação.

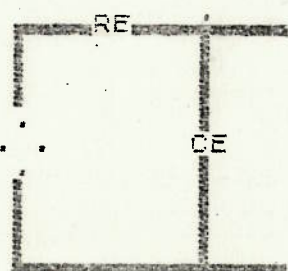
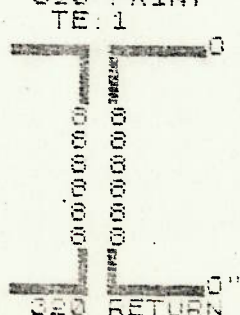
APÊNDICE 10: Listagem do programa de computador utilizado para a otimização dos elementos acústicos e mecânicos do calibrador

```

1 DIM Z#(32)
2 DIM R#(6)
3 DIM R#(12)
4 DIM R#(26)
5 DIM U(13)
6 DIM A(13)
7 DIM H(3)
8 DIM H(5)
9 DIM T(11)
10 DIM F(11)
11 DIM D(17)
12 LET LATAO=.000018
13 LET X=0
14 LET MENU=2510
15 LET UMR=0
20 LET B$="DECETE"
30 LET M$="CCMCSMCMNML"
40 LET R$="DILINIURDLRURD2L2N
5010UCH"
50 LET FLAG=100
60 LET TS=0.40
70 LET TSS=0.5
75 LET L=0
76 LET OCH=0
77 LET OCH1=0
85 LET B$=""

85 GOTO 400
110 LET U=0
120 PRINT AT 14,0;B$;TAB 0;B$;T
AB 0;B$
130 FOR I=0 TO IMAX
140 IF R#(2*I+1 TO 2*I+2) TH
EN GOTO 160
150 NEXT I
160 LET U=0
170 RETURN
180 LET U=1
190 PRINT AT 14,0;R$;";"
200 RETURN
210 CLS
2200 GOSUB DESENHO
2300 PRINT AT 14,0;
2400 FOR I=0 TO IMAX
2500 PRINT R$(2*I+1 TO 2*I+2);";"
";U(I+1);
2600 NEXT I
270 IF L=1 THEN RETURN
280 PRINT TAB 0;"DESEJA CORRIGIR
R ALGUMA VARIÁVEL?";TAB 13;"(S/N)";
290 INPUT R#
3000 CLS
3100 IF R#="S" THEN LET U=1
3200 IF R#<>"S" THEN LET U=0
3300 RETURN
3400 PRINT "
TE: 1
350 RETURN

```




```

9005 GOSUB 2000
9010 INPUT R#
9010 IF R#="" THEN GOTO 990
9020 GOSUB 100
9030 IF V=0 THEN GOTO 790
9040 INPUT A(I+1)
9050 LET V(I+1)=A(I+1)
9060 PRINT A(I+1)
9070 PRINT "ENTRE COM O NOME DE
OUTRA VARIÁVEL"
9080 GOTO 900
9090 GOSUB 9000
9100 GOSUB 9000
10000 IF V=1 THEN GOTO 790
1010 CLS
1011 PRINT "O VALOR DE ORI=";ORI
;" DESEJA ALTERAR?(S/N)"
1012 INPUT R#
1013 IF R#<>"S" THEN GOTO 1020
1014 PRINT "ENTRE COM O VALOR DE
SEGUNDO PARA [R#]"
1015 INPUT OR
1016 PRINT "OR=";OR
1017 LET ORI=1/OR
1018 FOR I=1 TO 20
1019 NEXT I
1020 CLS
1021 PRINT "O VALOR DE GCI=";GCI
;" DESEJA ALTERAR?(S/N)"
1022 INPUT R#
1023 IF R#<>"S" THEN GOTO 1030
1024 PRINT "ENTRE COM O VALOR DE
SEGUNDO PARA [R#]"
1025 INPUT GC
1026 PRINT "GC=";GC
1027 LET GCI=1/GC
1028 FOR I=1 TO 20
1029 NEXT I
1030 CLS
1031 LET U=R#*PI*1000
1032 PRINT "DESEJA VARIAR A PRE
S(0) OU A(TAB 9; "TEMPERATURA
(T)?"
1033 INPUT R#
1034 IF R#="T" THEN LET FLAG=0
1035 IF R#="T" THEN LET FLAG=1
1036 IF FLAG=1 THEN GOTO 1140
1037 IF FLAG=0 THEN PRINT "A TEM
PERATURA E" DE ";T0; "C. "; "DESE
JA"; TAB 9; " ALTERAR?(S/N)"
1038 INPUT R#
1039 IF R#="S" THEN PRINT TAB 3;
"ENTRE COM O VALOR DESEJADO"
1040 IF R#="S" THEN INPUT T0
1040 CLS
1041 IF R#="S" THEN GOTO 1070
1042 IF FLAG=0 THEN GOTO 1210
1043 IF FLAG=1 THEN PRINT "A PRE
S(0) E" DE ";P0; "MMER. DESEJA"; T
AB 9; " ALTERAR?(S/N)"
1044 INPUT R#
1045 IF R#="S" THEN PRINT " ENT
RE COM O VALOR DESEJADO"
1046 IF R#="S" THEN INPUT P0
1046 CLS
1047 IF R#="S" THEN GOTO 1140
1048 FAST
1049 FOR J=1 TO 11
1050 IF FLAG=1 OR FLAG=0 THEN LE
T P=(900+(J-1)*100)*1E2
1051 IF FLAG=1 THEN LET P=P0*1E2
1052 IF FLAG=1 THEN LET J=21
1053 FOR K=1 TO 11
1054 IF FLAG=1 OR FLAG=0 THEN LE
T T=(K-1)*5+273
1055 IF FLAG=0 THEN LET T=T0+273
1056 IF FLAG=0 THEN LET K=21
1057 LET R0=1.29*273*P/(T*10.13E
4)
1058 LET C=331.4*90R (T/273)
1059 LET MI=4.56E-5*(T/293)**1.7
*(10.13E4/P)
1060 GOSUB 5500

```

```

1300 LET M1=RO*4*(D(2)+.65*D(1))
/ (PI*D(1)**2)/D(3)
1310 LET R1=(3*(D(2)/D(1)+1)*RO*
SOR (2*U*M1)/(PI*D(1)**2))/D(3)
1320 LET CR=D(4)/(RO*C**2)
1330 LET MR=RO*4*(D(5)+.65*D(6))
/ (PI*D(5)**2)
1340 LET CR=D(7)/(RO*C**2)
1345 LET RR=U*MR*CR
1350 LET MT=RO*4*(D(9)+.65*D(8))
/ (PI*D(8)**2)/D(10)
1355 LET RT=(3*(D(9)/D(8)+1)*RO*
SOR (2*U*M1)/(PI*D(8)**2))/D(10)
1370 LET C1=D(11)/(RO*C**2)
1401 IF X<>2 THEN GOSUB 6000
1405 LET MR=ABS (MR+TE)**2
1410 LET CS=(R(13)+C1+R(12))
1420 LET LR=MT
1430 LET PR=RT
1440 LET LO=MR
1450 LET OO=OR
1460 LET PO=RR
1470 LET LO=MI
1480 LET PO=PI
1490 LET CM=CMC*ABS MR**2
1500 LET MM=(M(2))/ABS MR**2
1510 LET CM=M(4)*ABS MR**2
1520 LET MN=M(5)/ABS MR**2
1530 LET CL=M(6)*ABS MR**2
1540 LET RM=U*MN*OO
1550 LET CR=C(2)*KA
1560 LET PR=M(1)/KA
1571 IF RO=0 THEN GOTO 1535
1580 LET ZD1=U*LD-(1/(U*CD))
1590 LET MZD=SOR (ABS ZD1**2+RD*
**2)
1604 IF ZD1=0 THEN LET FZD=0
1605 IF ZD1=0 THEN GOTO 1627
1610 LET FZD=ATN (ZD1/RO)
1620 LET KA=MZD*COS FZD
1630 LET KB=MZD*SIN FZD-1/(U*CC)
1640 LET MNUM=MZD/(U*CC)
1650 LET FNUM=FZD-PI/2
1660 GOSUB 6000
1670 LET MZD=MZD
1680 LET FZD=FZD
1694 GOTO 1660
1705 IF (LD*CC)<>1/U**2 THEN GOT
O 1570
1710 LET MZD=0
1720 LET FZD=0
1730 GOTO 1660
1740 LET CF=CC/(1-CC*LD*U**2)
1750 LET MZ2=1/(U*ABS (CC+CF))
1760 LET FZ2=36N (CC+CF)*(-1)*PI
/2
1801 LET MZ1=SOR (RR**2+(U*LR)**
2)
1810 LET FZ1=ATN (U*LR/RR)
1820 LET MZ0=1/(U*CF)
1830 LET FZ0=-PI/2
1840 LET MZ3=SOR (RC**2+(U*LC)**
2)
1850 LET FZ3=ATN (U*LC/RC)
1861 LET ZM1=U*MN-(1/(U*CL))
1862 IF RM=0 THEN GOTO 1860
1863 LET MZ4A=SOR (ABS ZM1**2+RM
**2)
1864 IF ZM1=0 THEN LET FZ4A=0
1865 IF ZM1=0 THEN GOTO 1867
1866 LET FZ4A=ATN (ZM1/RM)
1867 GOTO 1730
1868 IF CL*MN<>1/U**2 THEN GOTO
1864
1869 LET MZ4A=0
1870 LET FZ4A=0
1871 GOTO 1860
1874 LET MZ4B=ABS ZM1
1875 LET FZ4B=36N ZM1*PI/2

```

```

1683 LET MZ4B=1/(U*CN)
1684 LET FZ4B=-PI/2
1685 LET ZM4=(U*MM-1)/(U*CM)
1686 LET MZ4=R99 ZM4
1687 IF ZM4=0 THEN LET FZ4=0
1688 IF ZM4=0 THEN GOTO 1708
1689 LET FZ4=SIGN ZM4*PI/2
1690 LET MZ5=1/(U*CR)
1691 LET FZ5=-PI/2
1692 LET MZ5=RE
1693 LET FZ5=0
1694 LET K1=MZ5*COS FZ5+MZ1*COS
FZ1
1695 LET K2=MZ5*SIN FZ5+MZ1*SIN
FZ1
1696 LET MNUM=MZ5*MZ1
1697 LET FNUM=(FZ5+FZ1)
1698 GOSUB 6000
1699 LET MZ10=MZP
1700 LET FZ10=FZP
1701 LET M=MZ2/MZ10
1702 LET F=FZ2-FZ10
1703 LET K1=(M*COS F+1)
1704 LET K2=M*SIN F
1705 GOSUB 7000
1706 LET MA=M00
1707 LET FA=FA0
1708 LET K1=MZ3*COS FZ3+MA*(COS
FA)*MZ10*(COS FZ10)-MA*(SIN FA)*
MZ10*(SIN FZ10)
1709 LET K2=MZ3*SIN FZ3+MA*(SIN
FA)*MZ10*(COS FZ10)+MA*(COS FA)*
MZ10*(SIN FZ10)
1710 LET MNUM=MZ3*MZ10
1711 LET FNUM=FZ3+FZ10
1712 GOSUB 6000
1713 LET MZ11=MZP
1714 LET FZ11=FZP
1715 LET M=MZ4/MZ11
1716 LET F=FZ4-FZ11
1717 LET K1=M*COS F+MA*COS FA
1718 LET K2=M*SIN F+MA*SIN FA
1719 GOSUB 7000
1720 LET MB=M00
1721 LET FB=FA0
1722 LET K1=MZ4B*(COS FZ4B)+MB*(
COS FB)*MZ11*(COS FZ11)-MB*(SIN
FB)*MZ11*(SIN FZ11)
1723 LET K2=MZ4B*(SIN FZ4B)+MB*(
SIN FB)*MZ11*(COS FZ11)+MB*(COS
FB)*MZ11*(SIN FZ11)
1724 LET MNUM=MZ11*MZ4B
1725 LET FNUM=FZ11+FZ4B
1726 GOSUB 6000
1727 LET MZ12=MZP
1728 LET FZ12=FZP
1729 LET M=MZ4/MZ12
1730 LET F=(FZ4-FZ12)
1731 LET K1=MB*COS FB+M*COS F
1732 LET K2=MB*SIN FB+M*SIN F
1733 GOSUB 7000
1734 LET MC=M00
1735 LET FC=FA0
1736 LET K1=MZ5*(COS FZ5)+MC*(CO
S FC)*MZ12*(COS FZ12)-MC*(SIN FC
)*MZ12*(SIN FZ12)
1737 LET K2=MZ5*(SIN FZ5)+MC*(SI
N FC)*MZ12*(COS FZ12)+MC*(COS FC
)*MZ12*(SIN FZ12)
1738 LET MNUM=MZ12*MZ5
1739 LET FNUM=FZ12+FZ5
1740 GOSUB 6000
1741 LET MZ13=MZP
1742 LET FZ13=FZP
1743 LET M=MZ6/MZ13
1744 LET F=(FZ6-FZ13)
1745 LET K1=MC*COS FC+M*COS F
1746 LET K2=MC*SIN FC+M*SIN F
1747 GOSUB 7000

```

```

2176 LET MD=MOD
2178 LET FD=FPB
2181 IF UNB=1 THEN RETURN
2183 IF FLAG=0 THEN LET I=J
2185 IF FLAG=1 THEN LET I=K
2188 LET T(I)=-20*(LN ABS (MD*ME
*TD)) / LN 10
2190 LET F(I)=-FD
2192 NEXT K
2194 NEXT J
2196 SLOW
2198 PRINT "DESEJA VER A TABELA
DOS RESULT-";TAB 10;"TADOS?(S/N)
"
2245 INPUT R#
2248 IF R#(">"S" THEN GOTO 2360
2250 CLS
2252 IF FLAG=0 THEN PRINT AT 0,0
:"P(MEAR)";TAB 9;"TF(");T0;"",P)-D
B";TAB 22;"FTF-RAD"
2254 IF FLAG=1 THEN PRINT AT 0,0
:"T(C)";TAB 7;"TF(T,")P0;"")-DB";
TAB 22;"FTF-RAD"
2256 IF FLAG=0 THEN LET N=11
2258 IF FLAG=1 THEN LET N=11
2260 FOR I=1 TO N
2261 LET P=(500+(I-1)*100)
2262 LET T=(I-1)*5
2264 IF FLAG=0 THEN PRINT AT I,2
;P;TAB 8;T(I);TAB 20;"
";AT I,20;F(I)
2266 IF FLAG=1 THEN PRINT AT I,2
;T;TAB 8;T(I);TAB 20;"
";AT I,20;F(I)
2268 NEXT I
2270 IF INKEY#="" THEN GOTO 2350
2272 CLS
2274 PRINT "GOSTARIA DE VER O
GRAFICO DOS";TAB 8;"RESULTADOS?
(S/N)
"
2276 INPUT R#
2278 CLS
2280 IF R#(">"S" THEN GOTO 2510
2282 FAST
2284 GOSUB 9200
2286 GOSUB 9300
2288 FOR I=1 TO N
2289 GOSUB 8000
2291 NEXT I
2293 IF INKEY#="" THEN GOTO 2490
2295 CLS
2297 PRINT AT 0,14;"MENU"
2299 LET A(13)=-.14E-6/1.4/10.13E
4
2301 PRINT AT 2,0;"TECLE A LETRA
REFERENTE AO QUE";TAB 7;" VOC
E DESEJA FAZER:"
2303 PRINT AT 5,0;
2305 PRINT "-REVER GRAFICO"
2307 PRINT "-REVER TABELA"
2309 PRINT "-ALTERAR PARAMETRO S
VARIADO (P-T)"
2311 PRINT "-ALTERAR PARAMETROS
ACUSTICOS"
2313 PRINT "-ALTERAR PARAMETROS
MECANICOS"
2315 PRINT "-ALTERAR PARAMETROS
ELETRICOS"
2317 PRINT "-LISTAR VALORES DOS
PARAMETROS"
2319 PRINT "-INTERROMPER O PROGR
AMA"
2321 PRINT "-REVER UMA CONDICAO"
2323 PRINT "-CARREGAR @"
2325 PRINT "VARIAR VOL.50."
2327 INPUT R#
2329 IF R#="G" THEN GOTO 2335
2331 IF R#="T" THEN GOTO 2337
2333 IF R#="A" THEN GOTO 1930
2335 IF R#="D" THEN GOTO 700
2337 IF R#="M" THEN GOTO 570
2339 IF R#="E" THEN GOTO 900
2341 IF R#="C" THEN GOTO 900

```

```

2870 IF A$="I" THEN STOP
2875 IF A$="U" THEN GOTO 4500
2876 IF A$="D" THEN GOTO 1010
2877 IF A$="O" THEN GOTO 6500
2880 GOTO 2500
4000 REM "VARIACAO DA FREQUENCIA"
"
4010 LET FLAG=100
4020 PRINT "P:";
4030 INPUT P
4040 PRINT P;"MBAR"
4050 LET P=P*1E2
4060 PRINT "T:";
4070 INPUT T
4080 PRINT T;"C"
4090 LET T=T+273
4100 FOR I=1 TO 21
4110 LET UMA=1
4120 LET W=2*PI*100*I
4130 GOSUB 1210
4140 LET UMA=0
4150 LET T(I)=-20*(LN ABS (MD*ME
*TE))/LN 10
4160 NEXT I
4165 CLS
4170 FOR I=1 TO 21
4180 PRINT I*100,T(I)
4190 NEXT I
4200 STOP
4501 CLS
4505 LET FLAG=2
4506 LET UMA=1
4510 PRINT "TEMPERATURA=";
4520 INPUT T
4530 PRINT T;" C"
4540 LET T=T+273
4550 PRINT "PRESSAO=";
4560 INPUT P
4570 PRINT P;" MBAR"
4580 LET P=P*1E2
4585 FAST
4590 GOSUB 1210
4595 LET UMA=0
4600 PRINT "CE=";CE,"Z=";1/(U*CE
)
4610 PRINT "LA=";LA,"Z=";U*LA
4620 PRINT "RA=";RA
4630 PRINT "LD=";LD,"Z=";U*LD
4640 PRINT "CD=";CD,"Z=";1/(U*CD
)
4645 PRINT "RD=";RD
4650 PRINT "CC=";CC,"Z=";1/(U*CC
)
4655 PRINT "LC=";LC,"Z=";U*LC
4670 PRINT "RC=";RC
4680 PRINT "CL=";CL,"Z=";1/(U*CL
)
4690 PRINT "MN=";MN,"Z=";U*MN
4691 PRINT "CN=";CN,"Z=";1/(U*CN
)
4692 PRINT "RM=";RM
4693 PRINT "MM=";MM,"Z=";U*MM
4694 PRINT "CM=";CM,"Z=";1/(U*CM
)
4700 PRINT "CA=";CA,"Z=";1/(U*CA
)
4710 PRINT "RE=";RE
4720 LET FT=-20*(LN ABS (MC*ME*TE
E)/LN 10)
4730 LET FF=-FC
4740 PRINT "FT(DB)=";FT
4750 PRINT "FF(RAD)=";FF
4755 SLOW
4760 PRINT "PRESSIONE UMA TECLA"
4770 IF INKEY#="" THEN GOTO 4770
4780 CLS
4790 GOTO 2510
5001 CLS
5010 PRINT "ENTRE COM O MATERIAL"
"
5020 INPUT D$
5025 LET D=0

```

```

5030 IF D$="INOX" THEN LET D=.00
5040 IF D$="BRONZE" THEN LET D=.
5050 IF D=0 THEN PRINT "MATERIAL
DESCONHECIDO"
5060 IF D=0 THEN STOP
5070 PRINT
5120 PRINT "ENTRE COM A VARIACAO
DA CONSTANTE PIEZOELETRICA COM
A TEMPERATURA"
5130 INPUT LE
5140 PRINT "LE=";LE
5145 PRINT "ENTRE COM A VARIACAO
RELATIVA DA FREQUENCIA DE RESSO
NANCIA DO CRISTAL COM A TEMPERAT
URA"
5146 INPUT LFR
5147 PRINT "LFR=";LFR
5150 RETURN
5525 LET DT=T-298
5530 LET D(1)=A(1)*(1+D*DT)
5540 LET D(2)=A(2)*(1+D*DT)
5550 LET D(3)=A(3)
5560 LET D(4)=A(4)*(1+3*D*DT)
5570 LET D(5)=A(5)*(1+D*DT)
5580 LET D(6)=A(6)*(1+D*DT)
5590 LET D(7)=A(7)*(1+3*D*DT)
5600 LET D(8)=A(8)*(1+D*DT)
5610 LET D(9)=A(9)*(1+D*DT)
5620 LET D(10)=A(10)
5630 LET D(11)=A(11)*(1+3*D*DT)
5640 LET D(12)=A(12)
5650 LET D(13)=A(13)
5660 LET ME=A(3)
5670 LET TE=E(3)*(1-LE*DT)
5675 LET CHEC=M(1)/(ABS(1+LFR*D
T)**2)
5680 RETURN
6010 LET MDEN=SOR (ABS K1**2+ABS
K2**2)
6020 IF K1<>0 THEN GOTO 6050
6030 LET FDEN=(SGN K2)*PI/2
6040 GOTO 6060
6050 LET FDEN=ATN (K2/K1)
6060 IF K1<0 THEN LET FDEN=FDEN+
PI
6070 LET MZP=MNUM/MDEN
6080 LET FZP=FNUM-FDEN
6090 RETURN
7010 LET MOD=SOR (ABS K1**2+ABS
K2**2)
7020 IF K1<>0 THEN GOTO 7050
7030 LET FAS=SGN K2*PI/2
7040 GOTO 7060
7050 LET FAS=ATN (K2/K1)
7060 IF K1<0 THEN LET FAS=FAS+PI
7070 RETURN
8005 IF FLAG=0 THEN PLOT 10+(I-1
)*(5),INT ((T(I)-A)*CTE)+24
8010 IF FLAG=1 THEN PLOT 10+(I-1
)*(5),INT ((T(I)-A)*CTE)+24
8020 RETURN
8500 PRINT "P=";
8501 INPUT P
8502 PRINT P;"MBAR"
8503 LET P=P*1E2
8504 PRINT "T=";
8505 INPUT T
8506 PRINT T;"C"
8507 LET T=T+273
8508 PRINT "OR=";1/ORI
8509 PRINT "OC=";1/OCI
8510 FOR I=0 TO 10
8511 LET FLAG=100
8512 LET FLAG=100
8513 LET A(13)=2*I*7.5E-13
8514 LET UMR=1
8515 GO SUB 1210
8520 LET UMR=0

```

```

9530 PRINT 2*I#.1,-20*LN (MC*ME*
TE)/LN 10
9540 NEXT I
9550 STOP
9560 FAST
9570 CLS
9580 FOR I=10 TO 60
9590 PLOT I,4
9600 IF INT (I/5)=I/5 THEN PLOT
I,3
9610 NEXT I
9620 FOR I=4 TO 43
9630 PLOT 10,I
9640 IF INT (I/4)=(I/4) THEN PLO
T 9,I
9650 NEXT I
9660 PRINT AT 0,6;"TF (DB) "
9670 PRINT AT 5,0;A
9680 IF FLAG=1 THEN PRINT AT 0,0
;A+20/CTE
9690 IF FLAG=0 THEN PRINT AT 0,0
;A+20/CTE
9700 IF FLAG=1 THEN PRINT AT 19,
0;A-20/CTE
9710 IF FLAG=0 THEN PRINT AT 19,
0;A-20/CTE
9720 IF FLAG=0 THEN PRINT AT 21,
4;"500";AT 21,16;"1000";AT 21,28
;"1500"
9730 IF FLAG=0 THEN PRINT AT 21,
0;"PRESSAO";TAB 21;"MBAR"
9740 IF FLAG=1 THEN PRINT AT 21,
5;"0";AT 21,17;"25";AT 21,28;"50"
9750 IF FLAG=1 THEN PRINT AT 21,
10;"TEMP";AT 21,23;"-C-"
9760 SLOW
9770 RETURN
9780 LET SUM=0
9790 LET DIF=0
9800 LET DIMAX=0
9810 FOR I=1 TO N
9820 LET SUM=SUM+T(I)
9830 NEXT I
9840 LET A=INT ABS (SUM/N)
9850 LET A=SGN SUM*A
9860 FOR I=1 TO N
9870 LET DIF=ABS (T(I)-A)
9880 IF DIF>DIMAX THEN LET DIMAX
=DIF
9890 NEXT I
9900 LET DIMAX=DIMAX*20/19
9910 IF 100>=DIMAX THEN LET MULT
=1000
9920 IF 10>=DIMAX THEN LET MULT=
100
9930 IF 1>=DIMAX THEN LET MULT=1
0
9940 IF .1>=DIMAX THEN LET MULT=
1
9950 FOR J=.025 TO .1 STEP .025
9960 IF J*MULT=DIMAX THEN GOTO 9
9970
9980 IF J*MULT<DIMAX THEN NEXT J
9990 LET DIMAX=J*MULT
9995 LET CTE=(20/(DIMAX))
9999 RETURN
9999 LET L=1
9999 LET Z#=E#+B$
9999 LET IMAX=(LEN E#/2)-1
9999 FOR I=1 TO IMAX+1
9999 LET U(I)=E(I)
9999 NEXT I
9999 LET DESENHO=310
9999 GOSUB 200
9999 PRINT AT 21,8;"APORTE UMA T
ECLA"
9999 IF INKEY#="" THEN GOTO 9540

```

```

9646 CLS
9650 LET DESENHO=330
9660 LET Z#=M#+B#
9670 LET IMAX=(LEN M#/2)-1
9671 FOR I=1 TO IMAX+1
9672 LET U(I)=M(I)
9673 NEXT I
9680 GOSUB 200
9690 PRINT AT 21,8;"APERTE UMA T
MCLA"
9600 IF INKEY#="" THEN GOTO 9600
9605 CLS
9610 LET DESENHO=370
9620 LET Z#=A#+B#
9630 LET IMAX=(LEN A#/2)-1
9631 FOR I=1 TO IMAX+1
9632 LET U(I)=A(I)
9633 NEXT I
9640 GOSUB 200
9650 PRINT AT 21,8;"APERTE UMA T
MCLA"
9660 IF INKEY#="" THEN GOTO 9660
9665 CLS
9670 LET L=0
9680 GOTO 2510

```


APÊNDICE 11 - Detalhes da Construção do Oscilador Eletrônico

A operação do circuito eletrônico foi descrita suscintamente no parágrafo V.3, e aqui apresentamos os detalhes construtivos do circuito.

Os valores dos componentes eletrônicos do diagrama da Figura V.5 constam da Tabela 11.1, e o "lay-out" da placa de circuito impresso utilizado para a montagem do circuito consta da Figura 11.1.

A alimentação do oscilador é feita através do circuito de alimentação elétrica (ver parágrafo V.2) e o consumo medido, com carga é de 0,85 mA em 9V.

C ₁₁	= LM 324	R ₇	= 84,5k Ω , 1%, 1/8W
T _{R1}	= J202	R _{7A}	=
D ₁ , D ₂	= 1N4148	R ₈	= 3 μ 3, 5%, 1/8W
D _{L1}	= Led	R ₉ , R ₁₀	=
D _{Z1}	= Diodo Zener, 3,3 V	R ₁₁	= 2k Ω , 5%, 1/8 W
R ₁	= 100k Ω , 1%, 1/8 W	R ₁₂	= 10k Ω , 5%, 1/8 W
R ₂	= 880k Ω , 1%, 1/8 W	R ₁₃	=
R _{ZA}	= 100k Ω , 1%, 1/8 W	R ₁₄	= 10k Ω , 5%
R ₃	= 100k Ω , 1%, 1/8 W	R ₁₅	= 10k Ω , 5%
R ₄	= 47k Ω , 1%, 1/8 W	C ₁	= 180pF, PNO (cerâmico)
R ₅	= 1 M Ω , 1%, 1/8 W	C ₂	= 180pF, NPO (cerâmico)
R _{5A}	=	C ₃ , C ₄ , C ₅ , C ₆	= 1 F/16 V (tântalo)
R ₆	= 0	Conexões com fonte através de pino Wire Wrap (4)	

Tabela 11.1 - Valores dos componentes eletrônicos do oscilador eletrônico do calibrador.

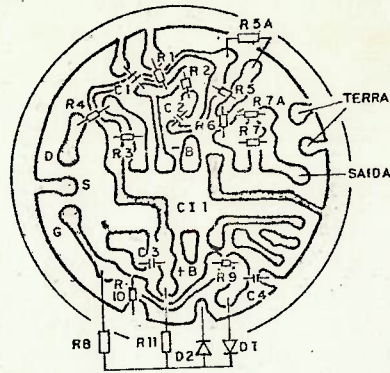


Figura 11.1 - Lay-out do circuito impresso
(visto por cima).

APÊNDICE 12: Desenho mecânico do calibrador

APÊNDICE 13 - Método para a medição da frequência de ressonância do conjunto cone-transdutor-mola de desacoplamento-massa adicional (C_M, M_N, C_L).

Em primeiro lugar montava-se o cone já com a mola de desacoplamento montada em um dispositivo especialmente construído (ver dispositivo na Figura 13.1) que permite realizar uma montagem idêntica à do calibrador, mas com passagem livre para o meio externo (sem cavidade fechada na parte posterior do cone). Sem que o elemento piezoelétrico e a haste de excitação fossem montados, media-se primeiramente a frequência de ressonância do cone através de pequenos toques na mola, captando os sons transitórios gerados pelo cone com um microfone de 1/2 polegada cujo sinal era analisado pelo Analisador de Espectros. Anotava-se essa frequência. Em seguida, montava-se o elemento piezoelétrico e a haste de excitação no dispositivo. Assim, através da montagem da Figura 13.1, variando-se a frequência e procurando aquela em que o nível sonoro que atingia o microfone (posicionado bem próximo ao cone) era máximo, media-se a frequência de ressonância do conjunto "mola de desacoplamento-cone transdutor mecano-acústico" na forma normal de montagem desse conjunto no calibrador, ainda sem sua massa adicional. Essas medições visavam determinar se havia uma alteração significativa ao se introduzir a rigidez da mola de desacoplamento no conjunto. A não alteração significativa da frequência de ressonância significava que a rigidez da mola era muito inferior à do cone, condição importantíssima para o funcionamento do calibrador.

Verificava-se se a frequência de ressonância da montagem cone-transdutor-mola de desacoplamento estava na faixa dos 1400 Hz. Acima desse valor era possível a colagem de uma massa de latão de diâmetro 3,2 mm e comprimento 2 mm (massa de aproximadamente 0,13 g) quando a nova ressonância ocorria algo acima de 1020 Hz. Adicionando-se massa de modelar ajustava-se a frequência de ressonância para 1000 ± 1 Hz.

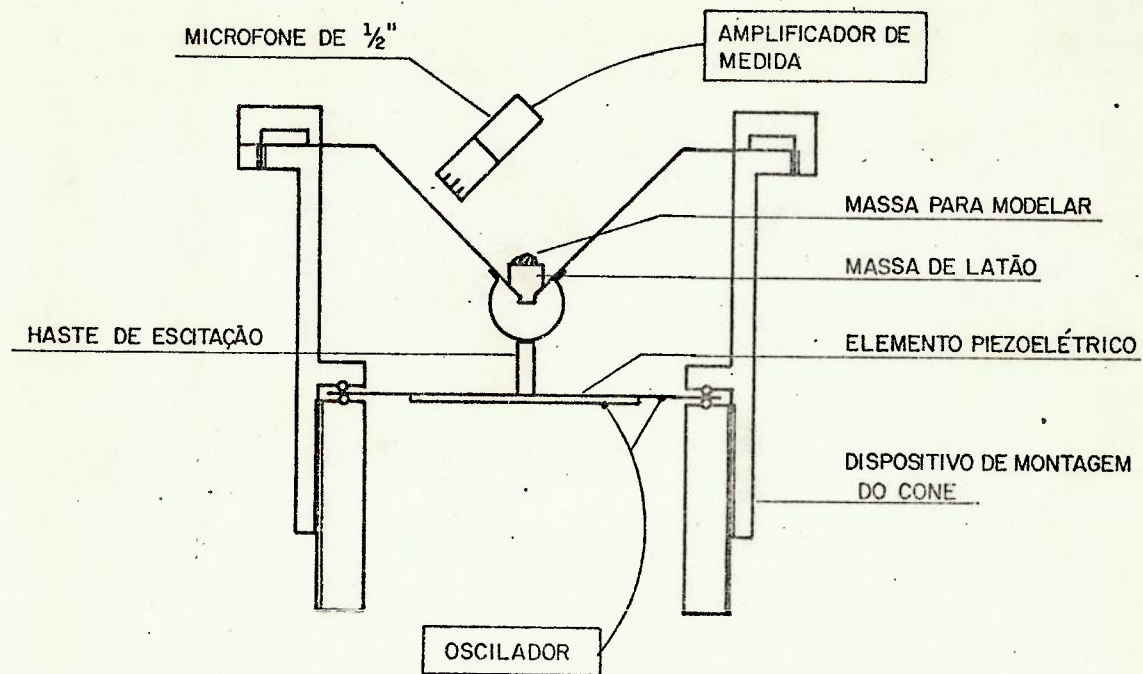


Figura 13.1 - Montagem para medição e ajuste da frequência de ressonância do cone

APÊNDICE 14 - Método utilizado no ajuste da Frequência de Ressonância do Ressorador de Helmholtz.

Para o ajuste da frequência de ressonância do ressoador de Helmholtz para 1000 Hz foi construído um dispositivo representado esquematicamente na Figura 14.1.

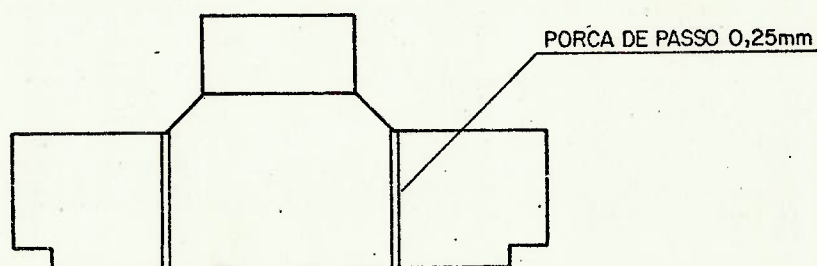


Fig. 14.1 - Dispositivo para variar o volume da cavidade C_R .

No cálculo do ressoador foi utilizado o valor 0,85 para α_1 e α_2 , os fatores de correção do comprimento acústico do tubo. No entanto, segundo a Referência [9], esperava-se que o comprimento acústico fosse menor que o previsto nesses cálculos. Assim, o volume da cavidade deveria ser maior que o calculado. Por via das dúvidas, e visando cobrir toda a faixa de volumes eventualmente necessária, o dispositivo da Figura 14.1 foi construído de forma a proporcionar uma variação de volume de até 15 cm^3 , desde um valor de $4,5 \text{ cm}^3$ menor até um valor $11,5 \text{ cm}^3$ maior que o valor nominal da cavidade.

O processo de ajuste do volume da cavidade (28) do ressoador, se faz monitorando a pressão sonora na cavidade (26), uma vez que, na ressonância do Ressorador de Helmholtz, a pressão sonora na cavidade (26) passa por um mínimo (teoricamente a pressão deveria cair a zero), pois na ressonância o ressoador provoca um "curto-circuito" na cavidade (26).

Para monitorar o nível sonoro na cavidade (26) utili-

zamos um "microfone de prova", que é composto por um microfone de 1/2 polegada ao qual é acoplado uma cavidade bem pequena comunicada por um tubo bastante fino com a cavidade (26) tendo-se realizado um orifício na parede da cavidade, ou seja, no anel (21).

A Figura 14.2 mostra esquematicamente a montagem realizada.

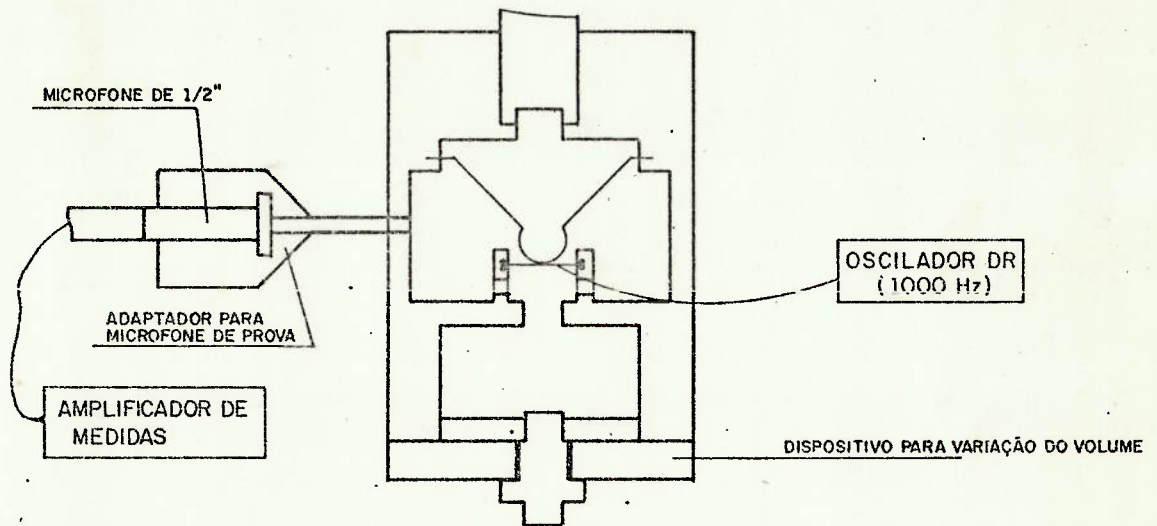


Figura 14.2 - Esquema da montagem utilizada para a sintonização do ressonador de Helmholtz

Assim, excitando o elemento piezoelétrico com um sinal elétrico de 1000 Hz variamos o volume da cavidade (28) até que o valor lido no amplificador de medidas referente ao nível sonoro na cavidade (26) passasse por um mínimo. Neste ponto mediu-se a variação de volume provocada pelo dispositivo, obten-

do-se o valor do volume da cavidade (28) na ressonância. Tendo em mãos esse volume, alterou-se o volume da cavidade, e repetiu-se a medição para confirmar a correção realizada.

APÊNDICE 15 - Método de variação e monitoração da temperatura na fase de ajustes da compensação eletrônica.

Na fase de ajustes do circuito de compensação eletrônica das variações do nível sonoro em função da temperatura, o circuito eletroacústico do calibrador é montado (com o oscilador eletrônico já instalado) em um dispositivo construído para ser a carcaça externa do calibrador sendo em tudo semelhante à carcaça externa, e que, posteriormente cortado para dar livre acesso à parte eletrônica do calibrador, embora mantendo o circuito eletroacústico fixado como na montagem final.

A seguir instala-se na placa de circuito impresso (parte de fibra de vidro) um termopar, fixado com borracha de silicone, de forma a permanecer imóvel. Instala-se um microfone de 1/2 polegada ($V_{eq}=0,04\text{cm}^3$) no calibrador utilizando um adaptador construído para esse fim) e instala-se o conjunto dentro de uma caixa de isopor, de forma que o termopar, os fios de alimentação do oscilador e o cabo do préamplificador do microfone passem para fora da caixa através dos orifícios laterais da mesma, possibilitando seu fechamento com a tampa original. Aquece-se dentro de uma estufa, a caixa (aberta) até 55°C , fecha-se a caixa ainda dentro da estufa e, retirando-se a caixa da estufa, deixa-se que a temperatura caia até a temperatura ambiente, monitorada pelo termômetro digital. O nível sonoro é lido através do amplificador de medidas. Nesses ensaios o nível sonoro é lido grau a grau.

APÊNDICE 16 - Listagem dos Equipamentos Utilizados.

A fim de simplificar a exposição dos métodos de ensaio nos demais Apêndices, decidimos apresentar no presente APÊNDICE a listagem dos equipamentos específicos utilizados que foram os mesmos (para cada tipo de equipamento) em todos os ensaios:

Oscilador Senoidal: Frequency Synthesizer, marca ROCKLAND, tipo 5100 (0 - 1 999 999,999 Hz em passos discretos de 0,001 Hz, 0 a 3 Vrms)

Gerador de Ruído Aleatório: Random Noise Generator, marca GR (General Radio) tipo 1382 (Ruídos Branco, Rosa e USASI)

Amplificador de Medidas: Measuring Amplifier, marca Bruel & Kjaer, tipo 2607

Analizador Lock-In: Lock-in analyser, marca PAR (Princeton Applied Research) modelo 5204 (opções de medida "IN PHASE/QUADRATURE" e "MAGNITUDE/PHASE")

Filtros de Faixa de Oitava: Octave Filter Set marca Bruel & Kjaer tipo 1613 (Faixas de 31,5 Hz a 31500 Hz)

Filtros de Faixa de Terço de Oitava: 1/3 Octave Filter Set marca Bruel & Kjaer, tipo 1616 (Faixas de 20 Hz a 4000 Hz)

Voltímetro Digital: Digital Voltmeter marca Fluke, modelo 8300A

Atenuador de Precisão: Attenuation Network, marca SHALLCO, (0 a 111,10 dB em passos de 0,01 dB - Impedância de 600 OHM)

Termômetro Digital: Digital Thermometer, marca Fluke, modelo 2190 A, com termopar Ferro/Constantã.

Ponte RLC Digital: Automatic RLC Bridge, marca GR (General Radio), modelo 1683

Analizador em Tempo Real: Real-Time, 1/3 Octave Analyser marca Bruel & Kjaer, modelo 3347/3348

Analisador de Espectros: Dual Channel FFT Analyser, marca NSC
(Nicolet Scientific Corporation), modelo
660A

Microfones de 1 polegada: Marca Bruel & Kjaer tipo 4160 e tipo
4145

Prēamplificador de Microfone de 1 Polegada: Marca Bruel & Kjaer
tipo 2632

Microfone de 1/2 polegada: Marca Bruel & Kjaer tipo 4166

Prēamplificador de microfone de 1/2 polegada: Marca Bruel
& Kjaer tipo 2619

Acelerômetro: Marca Bruel & Kjaer tipo 4320

Fonte de Alimentação para microfone: Marca Bruel & Kjaer, tipo
2804

Estufa

Medidor de Nível Sonoro: Marca Bruel & Kjaer tipo 2215, (com fil
tros de faixa de oitava)

Calibrador Acústico: Marca Bruel & Kjaer tipo 4230

Barômetro: Marca Bruel & Kjaer tipo UZ 0001.

Referências Bibliográficas

- | 1| Bauer, B.B.- Transformer Analogs of Diaphragm - JASA,23,6,1951
- | 2| Benson, Robert W.- The Calibration and Use of Probe-Tube Microphones - JASA 25,1,1953
- | 3| Beranek, Leo L. - Acoustics, Mc Graw-Hill, 1954
- | 4| Beranek, Leo L. - Acoustic Measurements - John Wiley & Sons, Inc. 1949
- | 5| Bruel, Per. V. - The Accuracy of Condenser Microphone Calibration Methods - Part 1 - Measuring Microphones (Selected Reprints from Technical Review) Bruel & Kjaer , 1972
- | 6| Bruel & Kjaer Instruments, Inc. - 1980 Master Catalog - Catálogo de Instrumentos 1980
- | 7| Frederiksen, Erling - Acoustical Calibrator Type 4230 and its Equivalent Diagram . B&K Technical Review, 1971, nº 4, pp 30-36
- | 8| Gen Rad - Acoustic Instruments - Catálogo de Produtos
- | 9| Ingard, K. Uno: On the theory and design of Acoustical Resonators - JASA, 25,6,(1963)
- | 10| Kinsler L.E. e Frey, A.R. - Fundamentals of Acoustics - John Wiley & Sons, 1962 (2nd ed)
- | 11| Kyocera - Piezoelectric Generator Element Technical Manual 1982
- | 12| Mason, W.P. - An Electromechanical Representation of a piezoelectric Cristal used as a transducer IRE Proc. 23. 1252-1263 (1965)
- | 13| Merhaut, J. - Theory of Electroacoustics, Mc Graw Hill,1981
- | 14| Morse, P.M. - Vibration and Sound, Mc Graw Hill, 1948
- | 15| Morse, P.M., Ingard, K. U. - Theoretical Acoustics, Mc Graw Hill, 1968
- | 16| Olson, H.F - Dynamical Analogies, Van Nostrand, 1943
- | 17| Olson, H.F.- Elements Acoustical Engineering, Van Nostrand, 1947
- | 18| Robotron Messelektronik - Catálogo de Produtos