

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

PMC 581 - Projeto Mecânico II

Trabalho de Graduação:

" Sistema de controle ativo de ruídos acústicos em dutos "

Aluno: Ricardo Ruiz Rodrigues

Número USP: 8228530

Curso: Engenharia Mecânica - Automação e Sistemas

Orientadores: Prof. Dr. José Sotelo Jr.

Prof. Sylvio Reynaldo Bistafa

Data: 14 / 12 / 1992

*Aos meus pais,
Egídio de Matos Rodrigues
Marta Ruiz Rodrigues,
que sempre me deram o melhor apoio
durante a realização do meu maior sonho*

AGRADECIMENTOS

- Professor Sylvio Reynaldo Bistafa, pelo apoio técnico em acústica e em controle ativo dado no início e no desenvolvimento do trabalho
- Professor Dr. José Sotelo Jr., pelo auxílio prestado no desenvolvimento do controle e na implementação e simulações do sistema
- Peter Barry, Laboratório de Acústica IPT, por ceder os microfones necessários para a realização da implementação prática
- Ricardo e Jaime, Lynx Tecnologia Eletrônica, pelo auxílio dado na utilização, programação e manutenção da placa A/D; D/A
- Flávio Guglioti, Brüel & Kjaer do Brasil, pelo apoio dado na escolha de uma alternativa mais razoável economicamente para o sistema de detecção do ruído
- Prof. Walter F. Alves, pela instrumentação cedida para a realização das implementações práticas
- Aluno de graduação Marco Alexandre Schwartz Peres, do curso de Engenharia Mecânica-Automação e Sistemas (POLI-USP), por todo o apoio dado no desenvolvimento do trabalho no primeiro semestre deste ano
- Pessoal do LAS - Laboratório de Automação e Sistemas, por terem emprestado as fontes de alimentação e os "ferros-de-solda"
- Pessoal da Marcenaria (Civil), em especial para o Milton e o "lagartixa", por terem construído o duto conforme o projetado

PREFÁCIO

O presente trabalho, realizado no período de março a dezembro de 1992 no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, tem como meta iniciar o desenvolvimento de um conhecimento sobre o fenômeno do Controle Ativo de Ruídos Acústicos através de estudos e análises experimentais de um sistema de controle ativo de ruídos em dutos.

O fenômeno do controle ativo de ruídos em dutos foi escolhido como ponto de partida para o desenvolvimento de um conhecimento mais amplo sobre os controles ativos devido à facilidade de implementação e análise do fenômeno. Além disso, a disponibilidade de material técnico (artigos, livros, etc...) sobre o assunto é maior, pois o problema da atenuação de ruídos em dutos é amplamente discutido nos simpósios e congressos de acústica e controle, e já foi tema de muitas teses de doutorado nas universidades americanas e européias.

Obviamente, neste trabalho não houve a possibilidade de se chegar a um aprofundamento no controle de ruídos acústicos em dutos ao nível das pesquisas internacionais, mas este não deixou de ser um considerável ponto de partida para o desenvolvimento de um conhecimento a nível nacional de uma área tão difundida, desenvolvida e discutida no ambiente científico do primeiro mundo.

As teorias, análises, resultados e conclusões deste trabalho fornecem sólidas bases para o desenvolvimento de um sistema de controle ativo de ruídos em dutos de melhor performance, e também para a extensão do estudo para a atenuação de ruídos acústicos no espaço.

O escopo do trabalho consistirá em, inicialmente, falar um pouco sobre o que é o controle ativo, onde pode ser aplicado e o que já se tem no mundo relacionado a esse fenômeno, como uma introdução geral ao assunto. Logo em seguida, serão detalhados os objetivos do presente trabalho, para posteriormente dar-se início ao desenvolvimento teórico do assunto e a extensão do mesmo para as implementações e análises práticas.

ÍNDICE

PARTE I - INTRODUÇÃO

<i>Seção/Item/Assunto</i>	<i>Página</i>
1. INTRODUÇÃO GERAL AO CONTROLE ATIVO DE RUÍDOS	
1.1 - Princípio	01
1.2 - Histórico	03
1.3 - Controle Ativo x Controle Passivo	03
1.4 - Classificação e Aplicações	04
2. O CONTROLE ATIVO DE RUÍDOS EM DUTOS	
2.1 - Princípio	07
2.2 - Aplicações	08
2.3 - Arranjo típico e sistemas existentes	09

PARTE II - O PROJETO

<i>Seção/Item/Assunto</i>	<i>Página</i>
1. INTRODUÇÃO - O TRABALHO PROPOSTO	
1.1 - Cronograma básico	11
1.2 - Planejamento futuro	11
1.3 - Por que controle ativo em dutos ?	12
1.4 - O trabalho	12
1.5 - Motivação	13
2. TEORIA GERAL DO CONTROLE ATIVO EM DUTOS	
2.1 - Introdução	14
2.2 - Características do ruído propagante	14
2.3 - A detecção do ruído	15
2.3.1 - Tipos de microfones	16
2.3.2 - Direcionalidade	19
2.3.3 - Resposta em frequência e sensibilidade	20

2.3.4 - Características e condicionamento do sinal	21
2.3.5 - Posicionamento do microfone	21
2.4 - A atuação sobre o ruído	21
2.4.1 - Características dos alto-falantes	22
2.4.2 - Geometria da seção e montagem dos alto-falantes	24
2.4.3 - O arranjo dos alto-falantes	25
2.4.4 - Direcionalidade e posicionamento	33
2.4.5 - Caixas acústicas	34
2.5 - O controle	34
2.5.1 - Controles em malha aberta	35
2.5.2 - Controles em malha fechada	59
3. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE ATIVO	
3.1 - Introdução	72
3.2 - Características do sistema	72
3.2.1 - Hardware	72
3.2.2 - Os softwares de controle	78
3.3 - Procedimento experimental	82
3.4 - Resultados e Comentários	82
3.4.1 - Desempenho dos microfones	82
3.4.2 - Desempenho dos alto-falantes	84
3.4.3 - A análise da sala	84
3.4.4 - Levantamento da onda no duto	85
3.4.5 - A aplicação do software 1	86
3.4.6 - A aplicação do software 2	87
3.5 - Comentários finais	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

ANEXOS

1. Listagens dos programas
2. Painel de fotografias
3. Dados do levantamento da onda no duto
4. Desenhos técnicos e esquemas

PARTE I - INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO GERAL AO CONTROLE ATIVO DE RUÍDOS

1.1 - Princípio

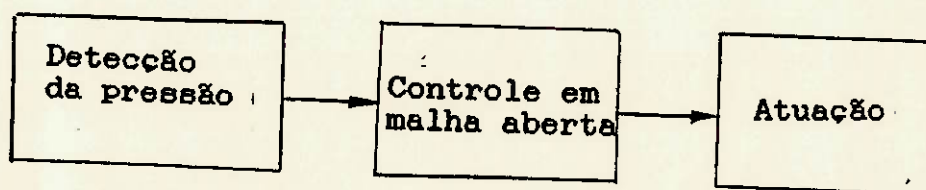
A propagação de uma onda sonora provinda de uma fonte qualquer no espaço pode ser descrita pela equação de sua pressão sonora p :

$$p = f(x,y,z,t)$$

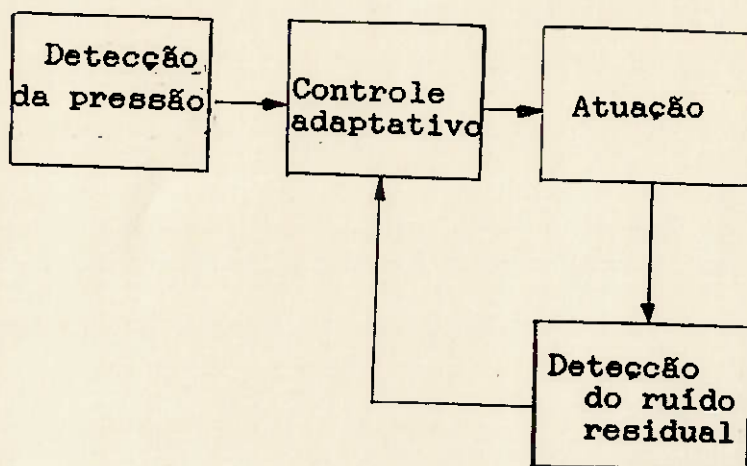
Como se pode ver, a pressão sonora pode variar com tempo e depende das coordenadas espaciais x,y,z do ponto. Para o estudo do controle ativo, está se considerando como meio apenas o ar (que pode ser tanto seco como úmido), cuja densidade pode variar com a temperatura. Outro fator que influi no comportamento da pressão sonora com o tempo é a velocidade do ar ambiente, representada pelo número de Mach $M=v/c$, onde c =velocidade do som no ar.

O controle ativo deve ser capaz de, através da melhor monitoração de p em um (ou mais) pontos do meio, produzir uma pressão sonora de atuação p_a em determinado(s) ponto(s) tal que nesse(s) ponto(s) tenha-se p o mais próximo de $-p_a$ a cada instante de tempo. Com isso, tem-se uma interferência sonora destrutiva que irá, naquele(s) ponto(s), minimizar a pressão sonora p original, atenuando-se o ruído.

Como primeiro nível de abstração, poder-se-ia representar o mecanismo de controle ativo pelo seguinte diagrama:



Para fechar a malha de controle, resultando em uma melhoria da performance do sistema com relação a variações da pressão detectada p , pode-se detectar o som resultante após a atenuação, realimentando o seu sinal para o controlador:



Os diagramas acima descrevem, em linhas gerais, os princípios de praticamente todas as arquiteturas propostas para controles ativos, nas mais diversas aplicações. Um conceito aparentemente simples se torna complexo quando começa-se a olhar mais detalhadamente para os mecanismos básicos do controle: detecção, controle e atuação. A partir daí, surgem diversas questões e problemas, com diversas alternativas para solução que são apresentadas e discutidas em "papers", artigos e congressos nos países do primeiro mundo:

- Onde se pode aplicar o controle ativo? Quais as suas vantagens e desvantagens?
- Qual a melhor forma de detectar o sinal (instrumentação, arranjo espacial, etc...)?
- Quais são os parâmetros intervenientes no processo de detecção?
- Qual a característica da onda propagante e do sinal elétrico coletado, que é enviado ao controle?
- Qual a melhor maneira de executar o controle e como projetá-lo para o mesmo possuir a velocidade, precisão e robustez desejadas?
- Como atuar sobre o som? Quais as características da onda produzida pelo atuador, e como a mesma se comportará no meio considerado?

Estas são perguntas que qualquer pessoa que se inicia ao estudo do assunto gostaria de saber a resposta para desenvolver um sistema eficiente. Neste trabalho, procurar-se-á mostrar tudo o que foi levantado e estudado sobre controle ativo para tentar dar

respostas a essas perguntas e a muitas outras relacionadas ao fenômeno, através da apresentação, análise e correlação entre desenvolvimentos teóricos e experiências práticas.

1.2 - Histórico

A teoria do controle ativo de ruídos começou a ser desenvolvida na década de 30, sendo que por volta de 1960, Huygens propôs a primeira teoria geral para controles ativos em dutos. Até o presente momento, os fracos recursos da eletrônica não permitiam a implementação de um controle eficiente.

Durante a década de 60, intensificaram-se os estudos sobre controle ativo de ruídos e suas aplicações para atenuação de ruídos em dutos, mas as primeiras implementações só vieram a ocorrer durante a década de 70.

A implementação de dutos experimentais com controle ativo ocorrida ao longo dos anos 70 (Jessel, Swinbanks, Nelson, Leventhall, entre outros) possibilitou um avanço grandioso nos conhecimentos sobre o assunto, e um refinamento cada vez maior das técnicas de controle (controle adaptativo), detecção e atuação.

Tal avanço possibilitou a implementação, ainda na década de 80, do primeiro controle ativo de ruídos "black-box" para dutos de ar em geral, disponível comercialmente (Digisonix-Nelson Industries), atendendo às mais diferentes aplicações, sendo comercialmente acessível e tecnicamente viável.

O fim da década de 80 e o início da década de 90 estão sendo marcados pelas discussões sobre os seguintes temas:

- Melhorias no controle ativo para dutos para atenuar uma maior faixa de frequências sonoras
- Desenvolvimento de técnicas de controle ativo no espaço

Quanto ao controle ativo no espaço (muito mais complexo, porém, com uma gama infinita de aplicações possíveis e úteis), já existem grandes experimentos feitos e implementados: a apresentação dos mesmos, bem como a descrição dos tipos de controles ativos existentes será descrita no item 1.4.

1.3 - Controle Ativo x Controle Passivo

O controle conhecido como passivo já é de conhecimento de todos e está presente em todo o lugar onde se deseja conforto acústico:

- Isolamentos acústicos para instalações prediais, tanto para isolar ruídos externos como para evitar o fenômeno do "eco", ou para melhorar acústica de salas.
- Isolamentos acústicos em automóveis, conhecidos por serem caros e pesados.

O controle passivo procura absorver a energia sonora propagante, convertendo parte da sua energia em calor, ou às vezes, refletindo parte da energia de volta à fonte. Esse sistema é conhecido por ser pouco eficiente para atenuar sinais sonoros de frequência baixa (na faixa de 0 a 1500 Hz), que pertencem à classe de ruídos prejudiciais à saúde.

Neste contexto é que o controle ativo entra em cena: o desempenho do controle ativo em baixas frequências é surpreendente, chegando, em alguns casos, a reduzir de 60 dB os picos do espectro de frequência de um ruído como na figura abaixo:

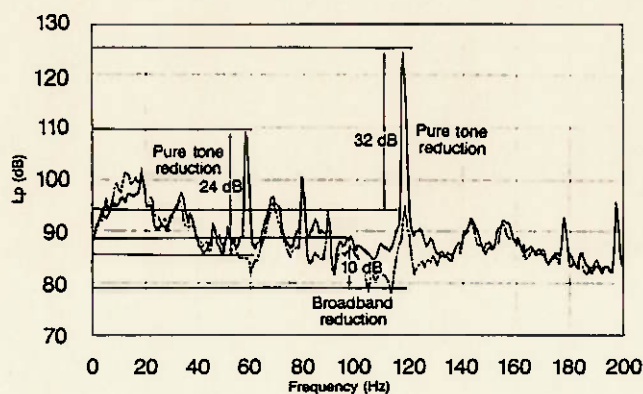


Figura 3 - Espectro de frequência de um ruído sonoro em um duto de ar atenuado por um controle ativo (Digisonix-Nelson Industries)

O sistemas de controle ativo disponíveis comercialmente hoje, atuam eficientemente em bandas de ruído não superiores a 400 Hz, e está se tentando ampliar esta margem de atuação para se aumentar a viabilidade do sistema.

De qualquer maneira, no presente momento, controles ativos e passivos se completam: o conforto acústico pode ser garantido por um sistema que combine os dois controles: o passivo, para médias e altas frequências, e o ativo, para baixas frequências.

1.4 - Classificação e Aplicações

..Quanto à área de atuação, os controles ativos podem ser divididos em:

- Controle em dutos (lineares)
- Controle espacial ----- pontual
 - planar
 - volume genérico
- Controle em câmara

..Quanto à forma de controle, os controles ativos podem ser divididos em : controle em malha aberta e controle em malha fechada (controle adaptativo, a ser visto na parte II). Não há, pelo menos até o presente momento, a necessidade de se classificar os controles ativos quanto à maneira/arranjo dos elementos de detecção e atuação, não só porque há inúmeras maneiras de arranjá-los, como também porque, salvo raríssimas exceções, utilizam-se microfones para detectar ruídos e alto-falantes para atuar sobre ele.

Na análise teórica a ser feita adiante, será mostrado que arranjos diferentes dos detectores/atuadores conduzem a uma melhor/pior atenuação do ruído, de modo que não se faz necessária tal apresentação neste item introdutório.

----- X -----

Para delinear uma série de aplicações do controle ativo, será utilizada a classificação quanto à área de atuação descrita acima.

Controles espaciais

Os controles ativos de ruído propagante no espaço procuram minimizar o ruído em uma região específica, proveniente de uma fonte qualquer : tal região pode ser um ponto (e uma pequena vizinhança ao redor dele), um plano ou um volume.

O sistema espacial de atenuação de ruídos em um ponto do espaço é o mais simples de ser projetado, executado e implementado, mas não existem aplicações significativas para o mesmo. Existem teorias sólidas e bem detalhadas, bem como implementações práticas de sucesso sobre atenuação de ruídos em pontos publicadas

nos últimos 3 anos, mas que servem apenas como "ponte" para o projeto de um sistema de atenuação de ruídos em planos ou volumes.

Quanto à atenuação em planos no espaço, estão sendo feitos recentes estudos e implementações com sucesso. A mais expressiva delas é um sistema de atenuação desenvolvido para aviões, para atenuar ruídos de baixa frequência em um plano que passa pela cabeça (na altura do ouvido) dos passageiros (obviamente, o plano tem uma cota z variando entre $z-e$ e $z+e$).

Logo se vê que a atenuação de ruídos em planos pode ser estendida para se atenuar ruído em um volume maior, e, a partir daí, as aplicações são ilimitadas:

- interior de veículos automotores (automóveis, ônibus, etc...)
- interior de cabines de banco (caixa eletrônico)
- interior de cabines telefônicas
- interior de trens
- residências, escritórios, hospitais, etc...

Apesar de suas aparentes vantagens, os controles ativos espaciais não se difundiram ainda comercialmente pelo seguinte fato: O projeto do controle ativo, principalmente no que toca ao arranjo espacial dos detectores e atuadores, é atualmente moroso, demorado, e para cada novo ambiente e ruído existente, o mesmo deve ser desenvolvido novamente, como se fosse o primeiro. Além disso, o arranjo ótimo dos detectores/atuadores no ambiente ainda é um ponto muito difícil de se obter. Apesar disso, sua eficiência é reconhecida, e tal fato motiva os pesquisadores a desenvolver técnicas de modelagem e análise que permitam analisar uma dada condição ruidosa e chegar ao controle ativo ótimo em um tempo hábil.

Controles em câmara

O controle ativo em câmara recebe esse nome por consistir na atenuação de ruídos em pequenos volumes confinados. Sua maior aplicação está nos fones-de-ouvido avançados de isolamento acústico, amplamente difundidos em aeroportos (operadores de pista). Uma outra aplicação desses fones-de-ouvido especiais ocorre em hospitais, nos aparelhos de ressonância magnética: na câmara onde o paciente fica deitado, são emitidos ruídos de baixa frequência que são prejudiciais à saúde e tornam a operação desconfortável para o paciente. Coloca-se, então, um fone-de-ouvido especial no paciente para se fazer a ressonância magnética.

As aplicações para fones-de-ouvido desse tipo são inúmeras, e alguns tipos já se encontram disponíveis comercialmente ("black-box"). São também muito utilizados por

pilotos de helicópteros e em fábricas, em substituição aos convencionais protetores auriculares, pouco eficientes para frequências sonoras abaixo de 1kHz.

Os fones-de-ouvido disponíveis no mercado possuem uma estrutura que combina atenuadores de ruído passivos e ativos. Uma descrição de sua eficiência está mostrada na próxima página, onde os levantamentos foram feitos em exames de ressonância magnética. Convém ressaltar que reduções no nível sonoro acima de 10 dB correspondem a um grande ganho em conforto sonoro para o paciente.

Estão sendo feitos estudos atualmente sobre a substituição do fone-de-ouvido por um colar, que garantiria a atenuação do ruído numa região ao redor das orelhas do paciente.

Controles lineares

Dos controles lineares, destaca-se o controle ativo de ruídos em dutos, objeto deste projeto e o controle mais indicado para se iniciar estudos sobre toda a teoria do controle ativo. Consiste basicamente em se detectar o ruído à montante em um duto de ar, e , através do condicionamento do sinal detectado, gerar um ruído em algum ponto do duto de modo a se cancelar o ruído à jusante.

Na próxima seção, serão delineados com mais detalhes os princípios, aplicações e descrição de sistemas já existentes de controle ativo em dutos.

———— XXXXX ————

2. O CONTROLE ATIVO DE RUÍDOS EM DUTOS

O objetivo desta seção é dar uma introdução, em um nível mais detalhado, ao controle ativo de ruídos em dutos. tema deste trabalho.

2.1 - Princípio

Conforme já delineado supra, o controle ativo de ruídos em dutos tem a função de atenuar um ruído propagante em um duto de seção e dimensões quaisquer, através da identificação do ruído à montante e produção de um ruído em um determinado ponto do duto tal que o mesmo represente uma pressão sonora igual e com fase inversa à pressão original do duto, causando uma interferência destrutiva ou apenas refletindo a

onda sonora em direção à fonte, de modo a se ter um ruído atenuado na faixa de baixas frequências à jusante, onde pode-se ter uma cabine, uma sala, etc... .

Convém ressaltar aqui que o comprimento do duto considerado deva ser superior a 3m, como ocorre em mais de 99% das instalações industriais e/ou prediais.

2.2 - Aplicações

É cientificamente comprovado que ruídos de baixa frequência, apesar de em muitos casos incomodarem menos que os de alta frequência, são prejudiciais à saúde e causam perda de concentração, desempenho e causam cansaço e estafa precoces em quem está trabalhando num ambiente sob esses ruídos.

Para piorar um pouco a situação, sabe-se que os ruídos de:

- sistemas de ar-condicionado central
- sistemas de insuflamento de ar em cabines de pintura, resfriamento e lixamento nas indústrias
- dutos de ventilação forçada
- câmaras frigoríficas

são predominantemente de baixa frequência, e não conseguem ser atenuados por elementos de atenuação passivos convencionais. Como esses sistemas são muito comuns em ambientes de escritórios, escolas e fábricas, vê-se que um grande número de pessoas está sujeito aos males do ruído em baixa frequência por dia.

Os controles ativos disponíveis comercialmente são capazes de atenuar esses ruídos a níveis superiores a 50 dB nos picos (Figura 3), e ainda, através de técnicas de controle adaptativo, se auto-ajustam para propiciar a melhor atenuação mesmo com variações na temperatura, velocidade e densidade do ar e dinâmica dos detectores/atuadores.

2.3 - Arranjo típico e Sistemas existentes

O arranjo típico e os elementos constituintes estão na figura abaixo (Figura 4):

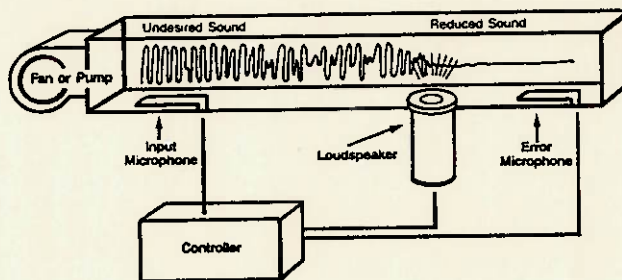
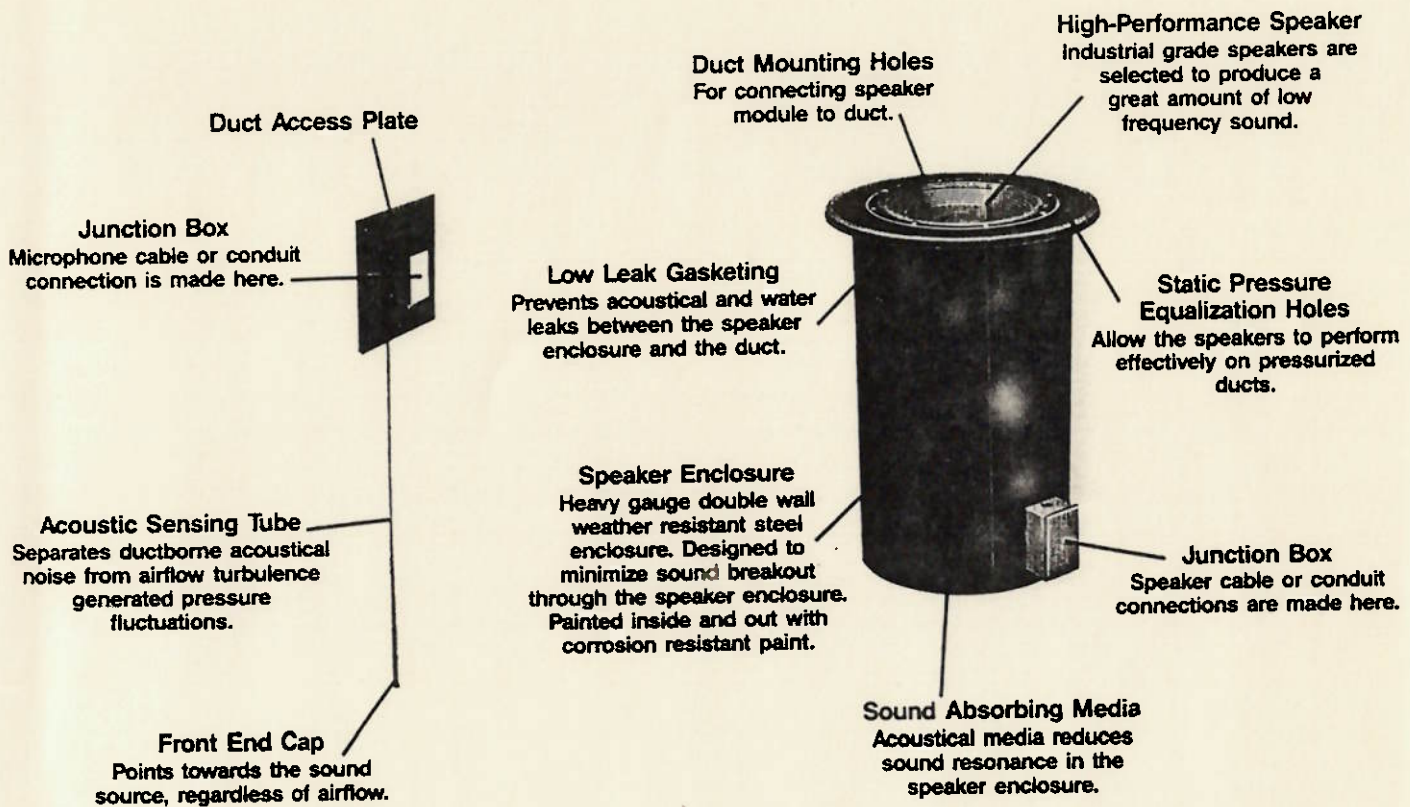


Figura - Arranjo típico e elementos constituintes

O arranjo típico mostrado anteriormente revela a simplicidade de instalação e o princípio da atenuação de ruídos em dutos. O sistema mostrado é disponível comercialmente, e seu nome é Digisonix-fabricado pela Nelson Industries Inc.. Abaixo, o desempenho do sistema para uma faixa maior de frequências com altos níveis sonoros (atenuação de ruídos de banda larga):

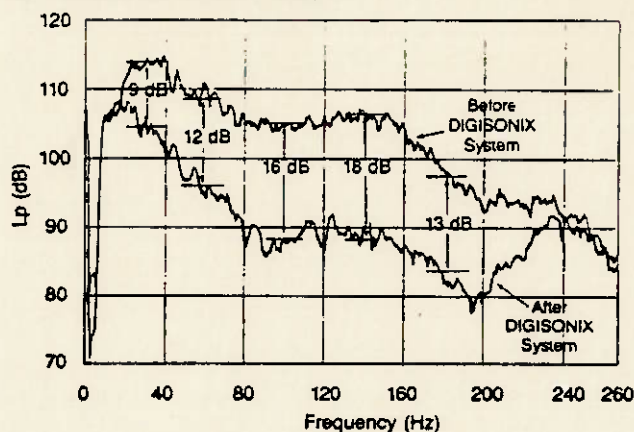


Figura 5 - Atenuação do Digisonix para ruídos de banda larga

Dentre as vantagens de se instalar um controle ativo comercialmente em um duto, que em geral é mais caro que atenuadores passivos, tem-se:

- Atenuação dos ruídos em baixa frequência, sejam eles de banda larga ou em picos (tons puros), permitindo que ventiladores possam ser colocados mais próximos às pessoas.
- Pelo fato do alto-falante estar flangeado na parede do duto, as perturbações e perdas de carga no escoamento são mínimas. Portanto, a eficiência de um duto com controle ativo é maior do que com absorvedores passivos.
- Adapta-se facilmente e automaticamente a mudanças no espectro do ruído propagante (desde que dentro da faixa de frequências de 20 a 500 Hz)
- Adapta-se facilmente a mudanças no meio ou das características dos detectores/atuadores.
- Compacto, à prova de tempo e de fácil instalação
- Não necessita de operador, nem supervisor

Após esta seção, está encerrada a parte introdutória do assunto, onde se procurou dar uma idéia geral (como um estudo de viabilidade) do funcionamento, princípios, aplicações e utilidades do controle ativo de ruídos (particularmente, em dutos) de modo a se mostrar a necessidade de se desenvolver no país estudos nessa área.

PARTE II - O PROJETO

1. INTRODUÇÃO - O TRABALHO PROPOSTO

1.1 - Cronograma básico

O que se propôs a realizar no referido período foi iniciar estudos sobre o controle ativo de ruídos acústicos, através das seguintes etapas:

a) Estudo básico de fenômenos acústicos:

- conceitos de acústica
- tipos, geração, propagação e equacionamento de ondas sonoras
- propagação de ondas sonoras em dutos

b) Estudos sobre os tipos, características e princípios de funcionamento de transdutores eletro-acústicos: microfones e alto-falantes

c) Coleta de bibliografia (papers, artigos, catálogos) para se iniciar o estudo teórico sobre controle ativo de ruídos em dutos e receber dados direcionais para uma possível implementação prática.

d) Implementação de um controle ativo de ruídos em dutos e análise dos resultados para implementar um possível avanço do sistema.

1.2 - Planejamento futuro

Este trabalho tem o objetivo de dar um grande passo inicial em direção ao desenvolvimento e implementação de um controle ativo de ruídos "black-box", com desempenho similar (ou superior) ao atualmente fabricado pela Nelson Industries Inc. .

Quando se atingir tal nível de domínio da técnica do controle ativo, poder-se-á então, partir em direção ao controle ativo espacial .

1.3 - Por que controle ativo em dutos ?

O estudo e a implementação do controle ativo de ruídos em dutos são recomendados para quem deseja se iniciar no assunto, pois:

- Dos controles ativos, é o que possui maior simplicidade teórica
- É mais fácil avaliar o desempenho e conhecer as características do ruído gerado/detectado pelos alto-falantes/microfones
- Requer, num primeiro nível de implementação, um menor investimento inicial para implementar uma versão preliminar do sistema
- Maior facilidade de medir e avaliar o fenômeno
- Maior disponibilidade de material e conhecimento a nível mundial sobre o assunto

1.4 - O trabalho

O trabalho versará sobre o que, até o presente momento, se conseguiu em termos de desenvolvimento de conhecimentos sobre controle ativo de ruídos acústicos em dutos. Na fundamentação teórica (próxima seção), procurar-se-á descrever o fenômeno da maneira mais genérica possível, não importando o quão específica seja a implementação.

A implementação em si (e seus resultados), terá a função de complementar o que foi exposto na teoria e fazer comentários, análises e sugestões para melhorias no sistema. A princípio, pretende-se implementar, para uma verificação e análise preliminar do fenômeno, um controle ativo para dutos rígidos de seção quadrada, com uma onda plana, estacionária e de frequência definida se propagando. O fluido no duto será o ar ambiente, e o mesmo terá velocidade nula.

Essa implementação aparentemente específica permitirá analisar e avaliar uma série de parâmetros e comportamentos inerentes ao processo de detecção, controle e atuação do controle ativo, e do fenômeno de propagação das ondas sonoras no duto (em confronto ou complementando a teoria), que são fundamentais para dar continuidade ao avanço contínuo do sistema.

1.5 - Motivação

O fenômeno do controle ativo é objeto dos mais recentes estudos de acústica e controle nos países do primeiro mundo, e, conforme delineado supra, suas aplicações são inúmeras. Os benefícios que tal sistema pode trazer à humanidade em termos de conforto acústico em um mundo desenvolvido, porém ruidoso, justificam mais do que nunca a necessidade de se desenvolver um "know-how" a nível nacional sobre o assunto.

Pelo que foi mostrado na parte introdutória deste trabalho, há muito o que se fazer para se alcançar o nível de conhecimento e desenvolvimento sobre o assunto nesses países, mas a tarefa de alcançá-los torna-se relativamente fácil dado o fato de que já se pode ter acesso a análises de experimentos já feitos.

Para o início de tal desenvolvimento, escolheu-se o controle ativo em dutos não só pela sua simplicidade teórica, interpretativa e construtiva, mas também pela grande gama de aplicações que o mesmo pode ter, já enunciadas anteriormente.

Para se estar no mesmo nível das pesquisas em controle ativo a nível internacional (hoje, mais relacionadas com o controle ativo espacial), precisa-se começar com um bom entendimento do fenômeno em dutos.

2. TEORIA GERAL DO CONTROLE ATIVO EM DUTOS

2.1 - Introdução

Para dutos, a análise teórica do fenômeno que servirá de base para a avaliação de todos os resultados práticos subseqüentes, pode ser dividida basicamente em três partes, fisicamente relacionadas:

- Detecção do ruído
- Atuação sobre o ruído
- Controle

A presente análise teórica irá seguir aproximadamente essa estrutura, sendo que na parte sobre o controle, a abordagem do assunto já será sobre o sistema integrado como um todo (microfone(s)+controlador+alto-falante).

2.2 - Características do ruído propagante

Na maioria das instalações com dutos de ar onde se propaga um ruído gerado por um ventilador ou bomba de vácuo, o espectro de frequência do mesmo possui as maiores amplitudes para a faixa de frequências de 20 a 400 Hz. Essa faixa de frequências é conhecida por ser:

- prejudicial à saúde
- muito pouco atenuada por absorvedores passivos
- facilmente propagável no duto (grande comprimento de onda) desde a sua geração até o bocal de saída. Uma vez gerado no início do duto, seja ele longo ou curto, a amplitude do ruído praticamente não sofre alterações em todo o trajeto.

As figuras 3 e 5 supra representam espectros de frequência característicos de instalações com dutos de ar, sendo que pode-se ter tanto espectros de banda larga (broadband noise spectrum) ou apenas um espectro com tons-puros (pure tone) bem definidos. Pode-se observar que o controle ativo comercialmente disponível atua de maneira mais eficiente para anular tons-puros do que ruídos com banda larga- a razão

disso será discutida posteriormente. Convém ainda colocar que o ruído mais simples que pode ocorrer na tubulação é o de frequência única, ou seja, uma onda senoidal (tom-puro), e é o primeiro tipo de ruído que deve ser considerado para efeitos de implementações experimentais.

De qualquer forma, se o controle ativo for capaz de (na faixa até 400 Hz) atenuar, a níveis acima de 10 dB os ruídos de banda larga e acima de 20 dB os tons-puros com níveis sonoros superiores a 30 dB (sendo ainda imune a variações no meio), ele estará muito próximo do que se existe disponível comercialmente.

A propagação do ruído de baixa frequência sem significativas perdas de suas características representa um ponto positivo para o desenvolvimento de um atenuador de ruído, pois, o som detectado pelo microfone em algum ponto do duto corresponde, praticamente, ao ruído emitido pelo ventilador (ou bomba). Logo, se conhecidas as características do ruído em algum ponto da tubulação que não seja o ponto em que se vai colocar o controle, é possível estendê-las ao ponto de controle e atuação sobre o ruído, e projetá-lo de acordo com as mesmas.

Quanto à direção de propagação, a onda sonora pode ser unidirecional ou estacionária. O caso unidirecional ocorre pouco na maioria das instalações, pois, pelo fato de as mesmas serem abertas ao ambiente na extremidade à jusante, a alta impedância acústica na saída provoca reflexão de parte significativa da onda à montante, formando uma onda estacionária.

Existem métodos de controle que assumem onda propagante unidirecional (como o de Swinbanks, a ser visto adiante), mas os mesmos não se tornam muito eficientes ao serem aplicados a condições reais.

2.3 - A detecção do ruído

Salvo raríssimas excessões, que não convém serem pesquisadas ou mencionadas aqui, a detecção é feita por microfones. Neste item, serão descritos os principais tipos de microfones e quais são as características desejadas para os mesmos, e que influiriam no desempenho do sistema.

2.3.1 - Tipos de microfones

Uma onda sonora num duto pode ser descrita pela sua equação de pressão $p(x,t)$ e de velocidade $v(x,t)$ (que também intrinsicamente define o sentido de propagação). Existem, analogamente, microfones para detectar velocidades ou pressões sonoras. Para o controle ativo em dutos, utilizam-se microfones que detectam pressões sonoras, pois, de acordo com o princípio do controle ativo, deseja-se produzir uma pressão $p_a(x_a,t)$ num determinado ponto x_a tal que $p_a(x_a,t) = -p(x_a,t)$, logo, precisa-se detectar $p(x,t)$.

Existem quatro tipos de microfones de pressão (pressure microphones):

- Carbono (Carbon Microphones)
- Condensador (Condenser Microphones)
- Piezoelétrico (Piezoelectric Microphones)
- Condutor móvel (Moving Conductor Microphones)

a) O microfone de carbono (figura abaixo) é caracterizado por ter alta sensibilidade sem se importar muito com suas características de resposta em frequência. Portanto, é usado muito em telefonia. Seu funcionamento caracteriza-se pela variação da resistência que o movimento do diafragma (de acordo com a pressão) provoca em contatos (grânulos) de carbono.

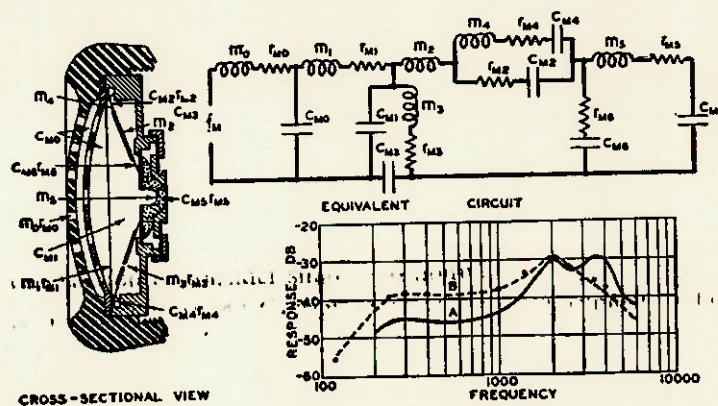


Figura 6 - Microfone de carbono - corte típico e resposta em frequência

b) O microfone tipo condensador opera pela variação de capacitância entre o diafragma e um anteparo fixo. Seu princípio de funcionamento é simples e sua resposta em frequência é mais suave que o microfone de carbono na faixa de 0 a 1000 Hz:

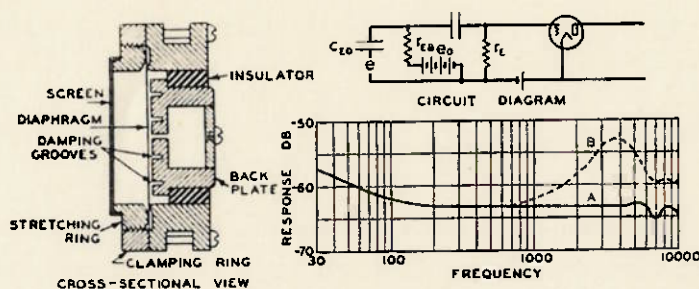


Figura 7 - Microfone tipo condensador

c) O microfone piezoelétrico funciona utilizando-se do efeito piezoelétrico de um cristal conhecido como "sal de Rochelle". Sob um determinado esforço, esse cristal tem a propriedade de induzir uma força eletro-motriz em seus terminais (veja abaixo). A partir daí, pode-se utilizar esta propriedade para se detectar a pressão sonora de um meio com precisão, a partir da tensão gerada no cristal.

Existem dois tipos de microfones que utilizam cristais piezoelétricos: os diretamente atuados e os atuados por diafragma. No primeiro, o cristal fica diretamente exposto à pressão sonora, e no segundo um diafragma se desloca com a pressão sonora e, conectado ao cristal, provoca sua deformação.

Os microfones piezoelétricos são conhecidos por terem uma amplitude de tensão gerada praticamente independente da frequência sonora, para uma grande faixa de frequências, além de uma alta sensibilidade.

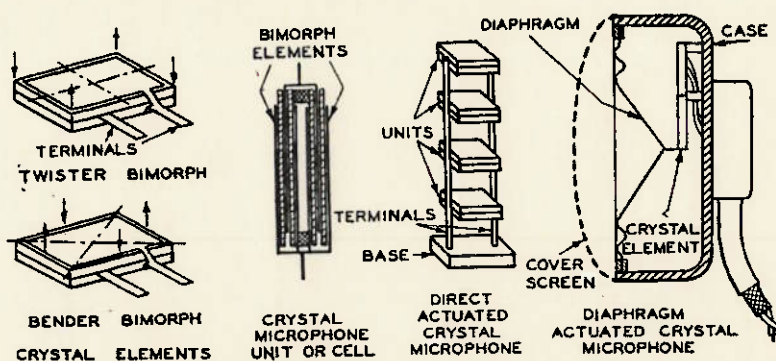


Figura 8 - Microfone piezoelétrico

d) Os microfones de condutor móvel (ou também chamados de "bobina móvel") são os mais difundidos no mercado devido ao seu baixo custo e sua aceitável resposta em frequência, que permanece plana para frequências superiores a 2 kHz. Existem dois tipos principais: o dinâmico e o indutor. Ambos possuem características dinâmicas semelhantes, e seus esquemas estão na figura a seguir.

O princípio de funcionamento desses microfones é detectar a pressão sonora do ambiente através da tensão gerada por uma bobina condutora, livre para se mover em um campo magnético. A bobina se move de acordo com a pressão sonora, e a tensão gerada é proporcional à pressão.

É importante que a amplitude da velocidade da bobina seja independente da frequência para uma grande faixa de frequências, para que a tensão gerada seja, de fato, somente função da pressão.

A diferença básica entre o microfone dinâmico e o indutor, é que no dinâmico o condutor móvel é uma bobina, e no indutor, o condutor móvel é um condutor reto.

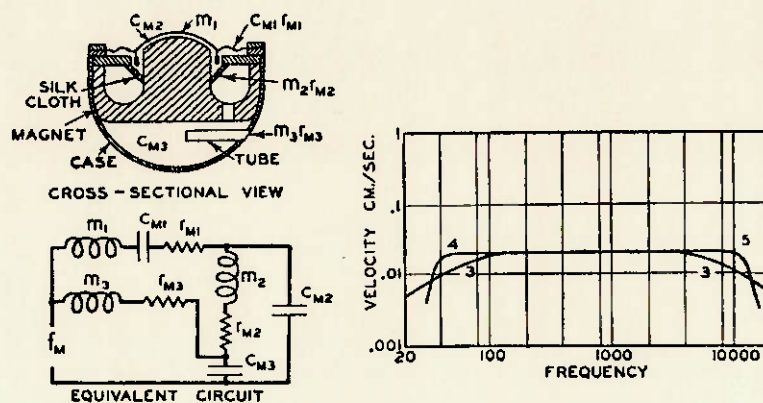


Figura 9 - Microfone dinâmico

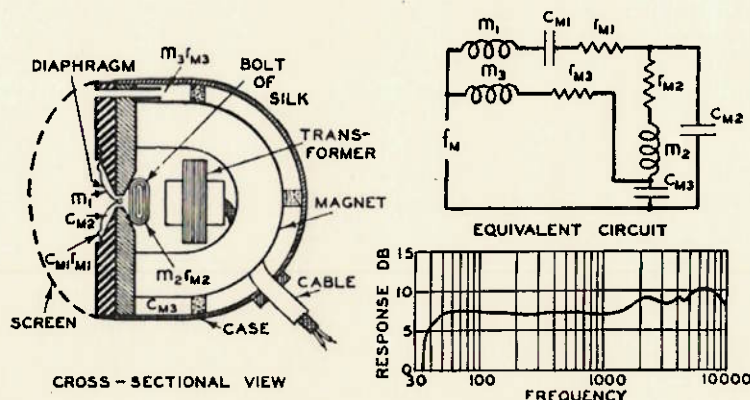


Figura 10 - Microfone tipo indutor

2.3.2 - Direcionalidade

A direcionalidade de um microfone é uma característica muito importante a ser considerada na escolha (ou projeto) do microfone a ser utilizado para se detectar a onda propagante. A direcionalidade de um microfone comercialmente disponível depende diretamente do fabricante, que através da definição do tipo e dimensões das partes (condutores, diafragmas, etc...) do microfone, resulta em uma determinada característica para o mesmo.

A representação da direcionalidade de um microfone é feita através de diagramas polares, onde o raio indica a porcentagem do som que é detectado e o ângulo representa o ângulo de incidência:

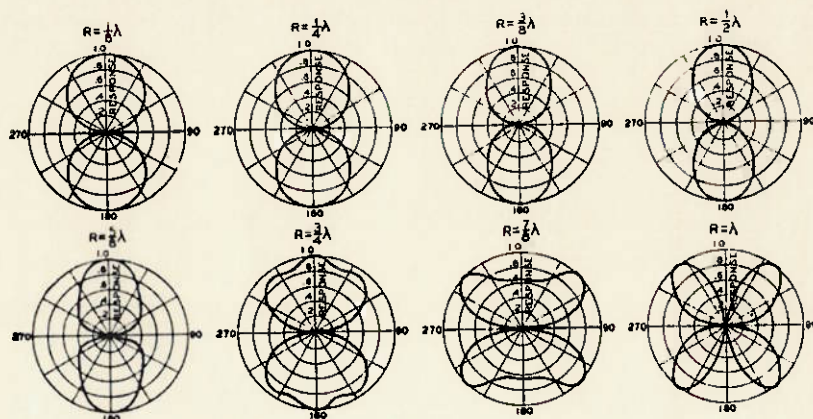


Figura 11 - Curvas típicas de direcionalidade de microfones de pressão

Como será visto mais adiante, cada teoria de controle ativo sugerirá uma certa direcionalidade ao microfone, e isso voltará a ser comentado. De qualquer maneira, salienta-se de antemão que a direcionalidade do microfone, além de sua resposta em frequência e sensibilidade, é influente no desempenho do sistema de controle, pois ela mede o quanto o microfone é capaz de detectar a onda incidente.

2.3.3 - Resposta em frequência e sensibilidade

O que se deseja de um microfone para ser utilizado em controle ativo de ruídos é que ele tenha uma resposta em frequência plana para frequências na faixa de aproximadamente 30 a 1000 Hz. O seu ponto de ressonância deve, portanto, ser superior a 1000 Hz e a amplitude nesse ponto deve ser, no máximo, 5 a 10 dB superior ao patamar de amplitude da faixa plana acima mencionada. Após a ressonância (que não deve ser preferencialmente muito superior a 1000 Hz), o microfone deverá atenuar o sinal com a melhor queda possível (comumente, é -40 db/década).

Um microfone ideal, em termos de resposta em frequência, para controle ativo deveria ter o seguinte diagrama:

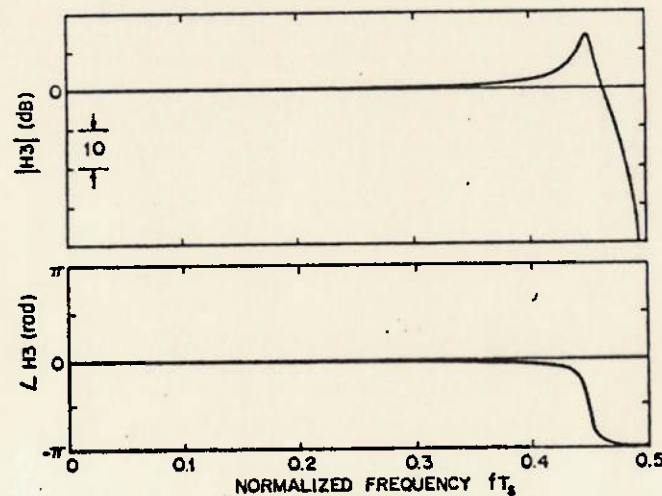


Figura 12 - Resposta em frequência do microfone ideal

Nota-se também que, na faixa de frequências de ganho plano, o atraso deve ser em torno de zero.

Quanto à sensibilidade, é desejável que o microfone seja o mais sensível possível a variações na frequência e/ou amplitude do ruído a ser detectado, de modo a se ter sempre um pequeno ruído resultante após a atenuação, e também para se evitar o efeito do batimento (beating): se o ruído no duto muda sensivelmente a sua frequência sem que mude o sinal elétrico do microfone em milivolts, a onda gerada pelos alto-falantes terá sua frequência um pouco diferente da frequência do ruído no duto, e sua superposição levará ao fenômeno do batimento, produzindo-se uma nova onda e não atenuando-se o ruído.

Para frequências superiores a 1000 Hz, pelo contrário, é desejado se ter uma baixa sensibilidade, e que a mesma caia o mais rápido possível com a frequência - com isso, garante-se a imunidade a ruídos do sistema.

2.3.4 - Características e condicionamento do sinal

O sinal gerado pelo microfone em si ao detectar o som é da ordem de micro e, no máximo, de alguns milivolts. Essa amplitude de sinal é baixa para ser utilizada como informação por circuitos de controle, que atuarão interpretando o sinal para reconstituir a onda. Logo, esse sinal deve passar por um amplificador, e se possível por um filtro passa-baixas, para que se filtrem os ruídos de alta frequência e se chegue a um nível de tensão da ordem de alguns décimos de volts.

É conveniente que o amplificador tenha ganho ajustável, e não se deve esquecer de compensar os atrasos induzidos pelo conjunto amplificador+filtro no sistema de controle.

2.3.5 - Posicionamento do microfone

Como será visto mais adiante, apenas a distância relativa entre o microfone detector e os alto-falantes atuadores é de considerável importância para o desempenho do sistema. De qualquer forma, não se recomenda colocar o microfone em regiões de alta turbulência (próximo à fonte sonora, ou após singularidades da tubulação, por exemplo), sendo que o mesmo deve sempre ser colocado à montante, ou seja, antes dos alto-falantes. A distância relativa entre os microfones e os alto-falantes será discutida posteriormente.

2.4 - A atuação sobre o ruído

Nesta seção, será descrito tudo o que se sabe sobre a atuação sobre o ruído com alto-falantes, peça-chave do sistema de controle ativo. Primeiramente, serão delineadas as características desejadas dos alto-falantes e, logo em seguida, será mostrado como o arranjo dos alto-falantes pode influir no desempenho do sistema, chegando-se, então, a um arranjo ótimo.

2.4.1 - Características dos alto-falantes

Numa primeira etapa do desenvolvimento de estudos sobre controle ativo, não convém entrar em grandes detalhes sobre a dinâmica e modelagem de alto-falantes - esses são fatores que devem começar a ser considerados após observações práticas sucessivas.

Funcionando de maneira inversa à do microfone, o alto falante consiste de uma (ou mais) bobina conectada a um diafragma, em geral, de formato cônico. A alimentação dessa bobina com corrente elétrica alternada provoca o deslocamento do diafragma, causando pressão ou sucção sonora na área do cone.

Como o controle ativo em dutos atua em baixas frequências, é desejável que o alto-falante (assim como o microfone) tenha uma resposta em frequência plana para frequências superiores a 1000 Hz, tendo picos de ressonância não superiores a 5dB após essa frequência. A grande maioria dos alto-falantes circulares (cone) disponíveis comercialmente atendem a esses requisitos como se pode ver na figura abaixo:

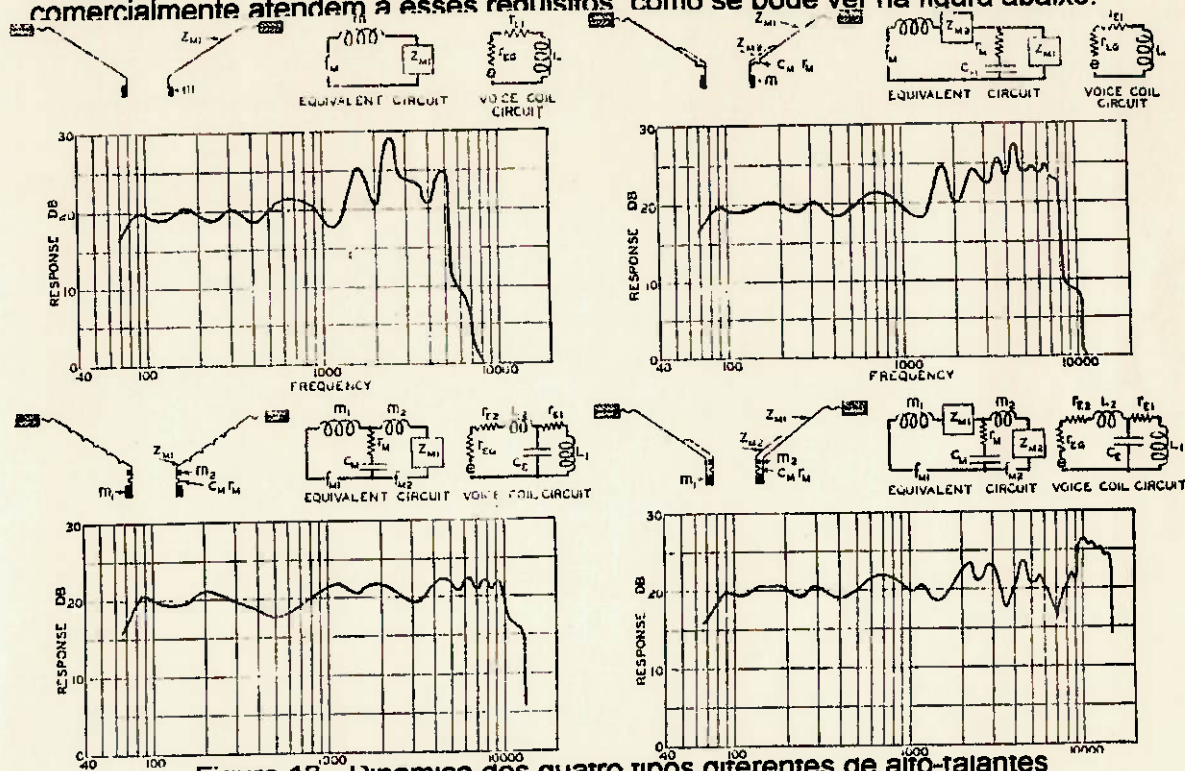


Figura 13 - Dinâmica dos quatro tipos diferentes de alto-falantes

Na figura acima, notam-se quatro tipos construtivos diferentes de alto-falantes:

Acima, à esquerda: alto-falante de cone simples e bobina única. Neste tipo de alto-falante, há o problema de ressonância acima de 1000 Hz, apesar da resposta ser relativamente plana até esta frequência. O diâmetro do cone é influente no desempenho do alto-falante:

Cones menores: alto desempenho para uma grande faixa de frequências (figura abaixo), devido ao fato das impedâncias acústicas e elétricas crescerem menos com a frequência. Porém, desenvolve menos potência sonora.

Cones maiores: o maior diâmetro do cone e da bobina aumentam consideravelmente a impedância global com o crescimento da frequência, tendo desempenho bom somente para frequências inferiores a 1000 Hz. Apesar disso, conseguem desenvolver grandes potências sonoras, podendo preencher com pressão sonora significativa, pontos distantes da fonte.

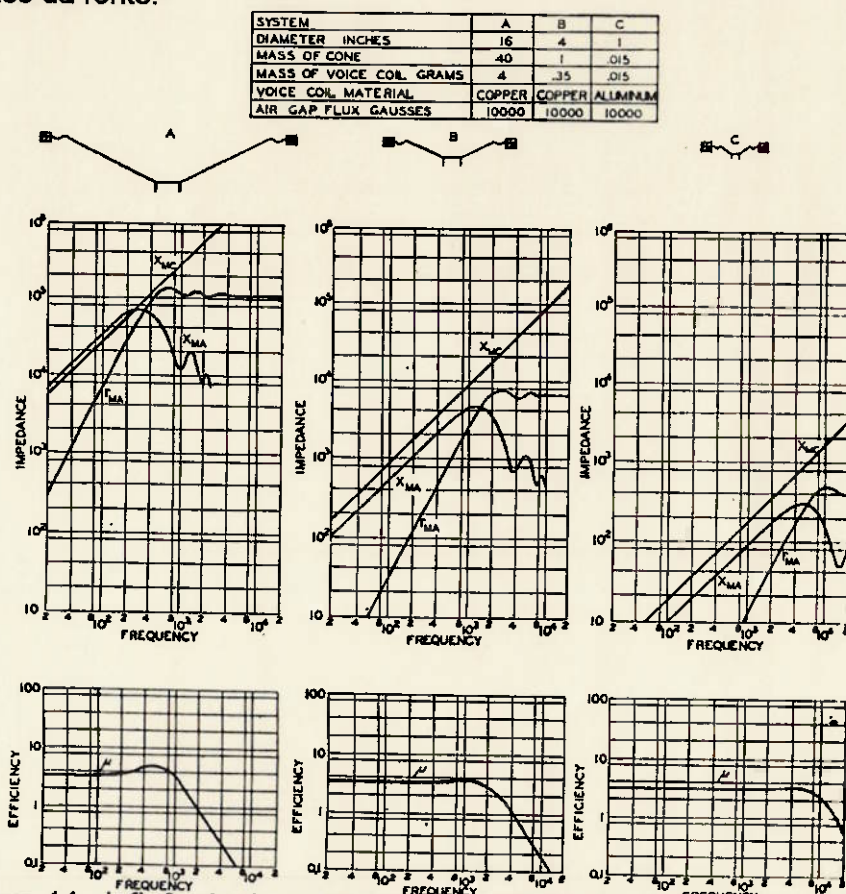


Figura 14 - Influência do diâmetro na eficiência de acordo com a frequência de operação

O alto-falante acima à direita, de duplo cone e de bobina única, possui um cone menor em seu interior, que entra em operação quando a frequência de excitação é tal que o desempenho do cone maior não se faz mais valer. Com isso, consegue-se uma eficiência de operação por uma grande faixa de frequências, além da alta capacidade de potência sonora para frequências até 1000 Hz.

Os alto-falantes da parte inferior são de dupla bobina, sendo que a bobina de massa menor serve para entrar em operação em altas frequências, quando a bobina maior entraria em ressonância, garantindo assim respostas relativamente planas para frequências de até 10 kHz. Pode-se notar também que o cone é corrugado também para garantir essa planicidade.

Em suma, o alto-falante ideal para um controle ativo seria aquele cujo diâmetro fosse próximo à dimensão característica da seção do duto, de modo a não se ter problemas relacionados à falta de potência sonora, principalmente em baixas frequências (que é onde o controle ativo atua). A sua curva de eficiência deve ser plana para frequências de, pelo menos, até 1kHz, o mesmo acontecendo com a sua curva de resposta em frequência. A princípio, o alto-falante de cone e bobina únicos atenderia os requisitos com baixo custo - se por acaso suas dimensões levarem a uma curva de resposta em frequência não-satisfatória, deve-se então partir para os outros tipos.

Entre o sistema de controle e o alto-falante, deve-se novamente ter um amplificador de potência de ganho regulável, e os atrasos no sistema devem ser compensados no sistema de controle. Obviamente, o conjunto de alto-falantes atuadores deve ter uma potência total maior que a potência sonora do ruído existente.

2.4.2 - Geometria da seção e montagem dos alto-falantes

As seções mais comuns dos dutos industriais são as circulares, retangulares e quadradas, a maioria não excedendo 1 metro de dimensão característica (diâmetro, lado,...). No material bibliográfico levantado, consideram-se apenas seções quadradas ou circulares, sendo que alguns autores (como o Leventhall), defendem que o desempenho dos alto-falantes atuadores em dutos retangulares onde o lado maior não possui dimensão muito diferente do lado menor, é similar ao dos dutos com seção quadrada.

Portanto, apresentando a teoria da influência do arranjo dos alto-falantes em dutos de seção circular de diâmetro "D", ou quadrada de lado "L", estar-se-á cobrindo a grande maioria dos dutos.

Os alto-falantes são montados no duto flangeados à parede externa do mesmo, tendo-se sempre que executar um (ou mais) orifícios no duto, de diâmetro igual ao do alto-falante, para instalá-lo. Procura-se sempre alinhar o cone do alto-falante com a parede do duto para o mesmo parecer uma extensão da parede. O problema maior de instalação está nos dutos circulares, tendo-se que construir flanges especiais ou substituir o trecho por um trecho de duto de seção quadrada.

2.4.3 - O arranjo dos alto-falantes

Já foi dito anteriormente que o ruído propagante no duto pode-se apresentar em dois tipos de espectros diferentes: o de tons-puros e o de banda larga, e que o modo da onda propagante no duto, predominantemente, corresponde ao primeiro modo, ou seja, a onda plana.

Tendo isso como base, qual deve ser o requisito para o conjunto de alto-falantes a ser arranjado na seção de atuação sobre o ruído no duto ?

A resposta é simples : o arranjo de alto-falantes na seção deve ser capaz de produzir uma onda sonora plana bidirecional, com intensidades iguais nas duas direções, e cuja pressão sonora "p" seja somente dependente da abscissa "x" na direção longitudinal do duto, e do tempo (ou seja, a pressão deve ser constante em todos os pontos de cada seção do duto). Além disso, deve ser capaz de produzir somente ondas planas propagantes para a maior faixa de frequências possível.

O cientista M. A. Swinbanks realizou em 1972 um estudo completo sobre a influência do arranjo dos alto-falantes na onda gerada pelos mesmos e, indiretamente, no desempenho do sistema. Esse estudo será brevemente resumido aqui, além da apresentação de alguns conceitos importantes de acústica em dutos.

2.4.3.1 - Propagação de ondas sonoras em dutos

Uma fonte sonora em um duto nada mais é que uma fonte de pressão sonora, pois sempre há a movimentação de moléculas de ar. Pelo fato de a pressão sonora estar confinada em um duto, fenômenos interessantes começam a ocorrer com o comportamento da pressão sonora em uma dada seção do duto, resultado direto dos fenômenos de absorção, propagação, interferência e reflexão das ondas.

Esses fenômenos fazem com que a pressão sonora em uma dada seção seja constituída por uma superposição de modos diferentes de variação da pressão.

As hipóteses para o desenvolvimento são de que o duto é circular e de parede rígida, portanto, a velocidade normal das partículas de ar nos pontos da parede é nula. Além disso, supõe-se a pressão sonora dependente das coordenadas do ponto do duto (que serão cilíndricas) e do tempo, e que o ar no duto não recebe ventilação/exaustão forçada.

A onda sonora no duto tem duas direções de propagação, uma radial (de número de onda k_r), uma axial (de número de onda k_z), e a resultante das duas tem número de onda k .

Modelando-se a propagação de uma onda sonora qualquer num duto circular através do equacionamento da pressão sonora em um dado ponto em coordenadas cilíndricas r, ϕ, z (obs.: z agora é na direção longitudinal do duto), chega-se à equação diferencial:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

Que, resolvida através de separação de variáveis e utilizando-se funções de Bessel de primeiro tipo J_m (as do segundo tipo, ou funções de Newmann, são infinitas na origem,

portanto, não podem ser aplicadas), resulta: $p = R(r) Z(z) \Phi(\phi) T(t)$

$$p = P_m J_m(k_r r) e^{j(\omega t - k_z z + m\phi)}$$

onde, m - constante (pode ser tanto inteira como real)

P_m - amplitude

$J_m(k_r)$ - Função de Bessel m de primeiro tipo

k_z - número de onda longitudinal

k_r - número de onda transversal

ω - frequência da onda

k - número de onda global : $k^2 = k_z^2 + k_r^2 = \omega^2/c^2$

É conveniente, a partir daí, transformar a equação de pressão em uma série infinita dos diferentes modos de propagação da onda em termos de pressão (representando, portanto, a superposição dos diferentes modos), para se ter conhecimento dos modos de propagação da onda sonora que são gerados na seção por uma fonte sonora no duto. Para isso, inicialmente, pode-se considerar " m " um número inteiro de 0 a ∞ , resultando:

$$p = \sum_{m=0}^{\infty} P_m J_m(k_r r) e^{j(\omega t - k_z z + m\phi)}$$

Além disso se for suposto um duto de parede rígida, pode-se aplicar a equação de velocidade transversal nula para $r=r_0$ (parede do duto), o que irá levar à seguinte equação:

$$\left. \frac{\partial}{\partial r} J_m(k_r r) \right|_{r=r_0} = 0$$

A representação das funções de Bessel estão no gráfico abaixo. Nele, nota-se que há infinitos valores de kr tais que é satisfeita a equação acima para cada m inteiro. Logo, pode-se discretizar também os valores de kr , introduzindo-se um inteiro " n " e

substituindo-se kr por k_{mn} na equação de pressão, sendo que k_{mn} representa os n valores de kr onde a derivada da função de Bessel J_m é nula, com $r=r_0$.

A equação de pressão então resulta:

$$p = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn} J_m(k_{mn} r) e^{j(\omega t - k_z z + m\phi)}$$

Essa equação representa a superposição de todos os modos de propagação (m,n) de ondas sonoras no duto em forma de pressão sonora.

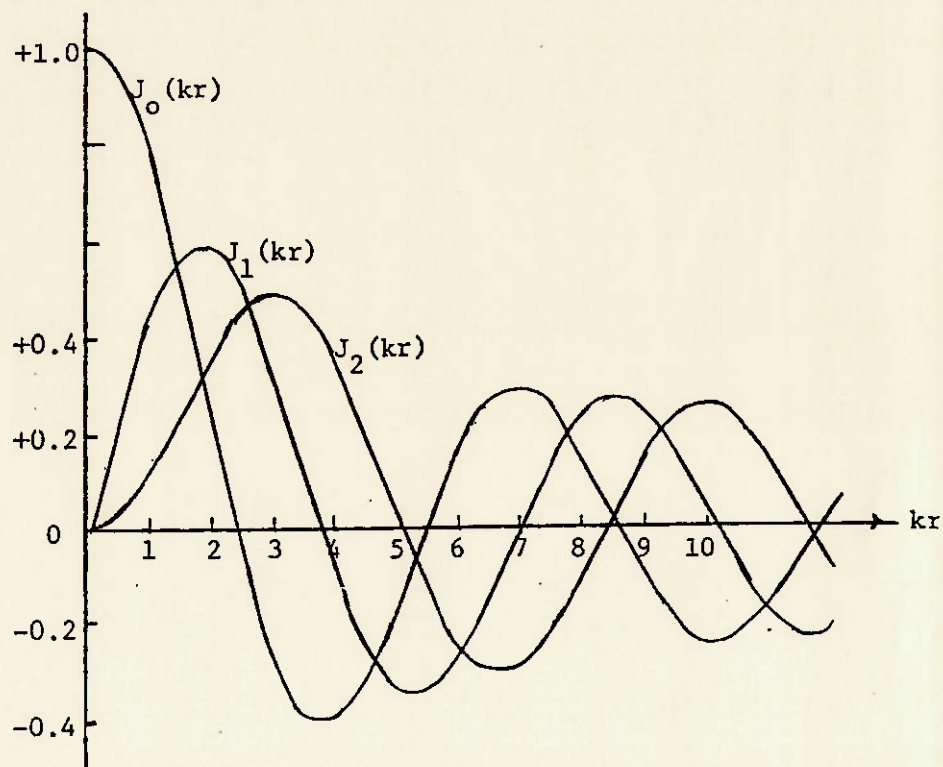


Figura 15 - Funções de Bessel de primeiro tipo

Agora, todos os pontos k_{mn} de uma dada função de Bessel J_m onde sua derivada for nula, são soluções para a equação de pressão acima, e cada combinação de m e n (inteiros) representa uma solução e um modo de propagação de onda sonora no duto. A primeira solução que se avista é para $k_{mn}=0$, com a derivada de J_0 sendo nula

(como $r_0 > 0$, tem-se $kmn=0$). Essa solução representa o modo $(m,n)=(0,0)$, e a pressão é dada por (note, pelo gráfico, que $J_0=1$ nesse ponto):

$$p = P_0 e^{j(\omega t - k_z z)}$$

Essa equação nada mais é que a própria onda plana, que, então é o primeiro modo propagante.

As funções de Bessel para $m > 1$ também têm derivada nula na origem ($kmn=0$), porém, a pressão é nula pois $J_m=0$ nesses pontos. Como a derivada de J_1 ($m=1$) não é nula na origem, conclui-se que a onda plana ($m=0$ e $n=0$) é a única forma de onda propagante onde $kmn=0$, e portanto, é a única onde a pressão independe do raio, pois, um valor positivo para kmn significa um valor positivo para kr , e portanto, há propagação de ondas na direção transversal. Pode-se ainda complementar mostrando que no gráfico, para $m=0$ e $n > 0$, kmn é positivo pelo simples fato de n ser maior que zero.

As curvas de pressão em função do raio para alguns modos estão mostradas abaixo:

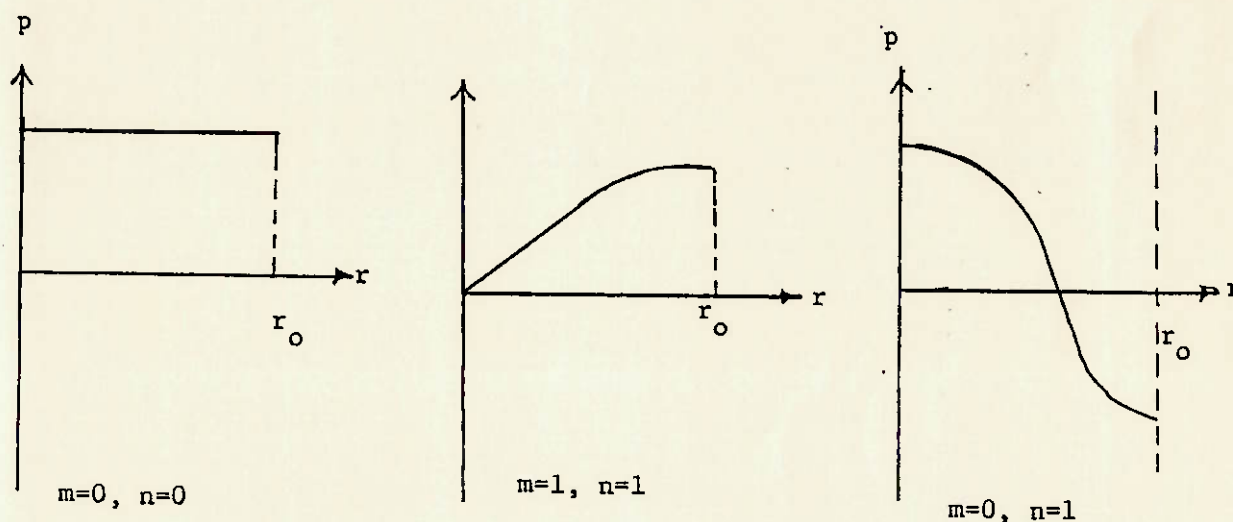


Figura 16 - Primeiros modos de vibrar de uma onda no duto

A frequência de "cut-off"

O número de onda k_z descreve a propagação de ondas de um dado modo (m,n) na direção axial (longitudinal) do duto, e é dado por:

$$k_z^2 = (\omega/c)^2 - k_{mn}^2$$

Se a frequência ω da onda no duto for tal que: $(\omega/c)^2 < k_{mn}^2$, k_z resultará negativo e isso significa que aquele modo (m,n) , se a frequência da onda for ω , decairá exponencialmente em intensidade na direção longitudinal a partir da fonte, existindo, para aquele modo apenas a propagação transversal (k_{mn}).

À frequência ω_c tal que $(\omega_c/c)^2 = k_{mn}^2$ para um dado modo (m,n) é chamada "frequência de cut-off" para esse modo, e representa um limite entre a propagação daquele modo sem decaimento e com decaimento exponencial na direção longitudinal do duto, a partir da fonte.

O modo $(0,0)$, que representa a onda plana, é o único em que a frequência de "cut-off" é nula, logo, em todos os dutos excitados sonoramente, há sempre a presença da onda plana propagante na direção longitudinal, mesmo por que sua propagação na direção transversal é teoricamente inexistente. Os próximos modos (m,n) deixam de ter somente a propagação transversal e passam a ter uma propagação longitudinal não amortecida a partir de frequências de "cut-off" (uma para cada modo, veja na figura a seguir) positivas, cujo valor depende do modo, da dimensão característica do duto e da velocidade do som no meio, afetada por características como densidade, por exemplo.

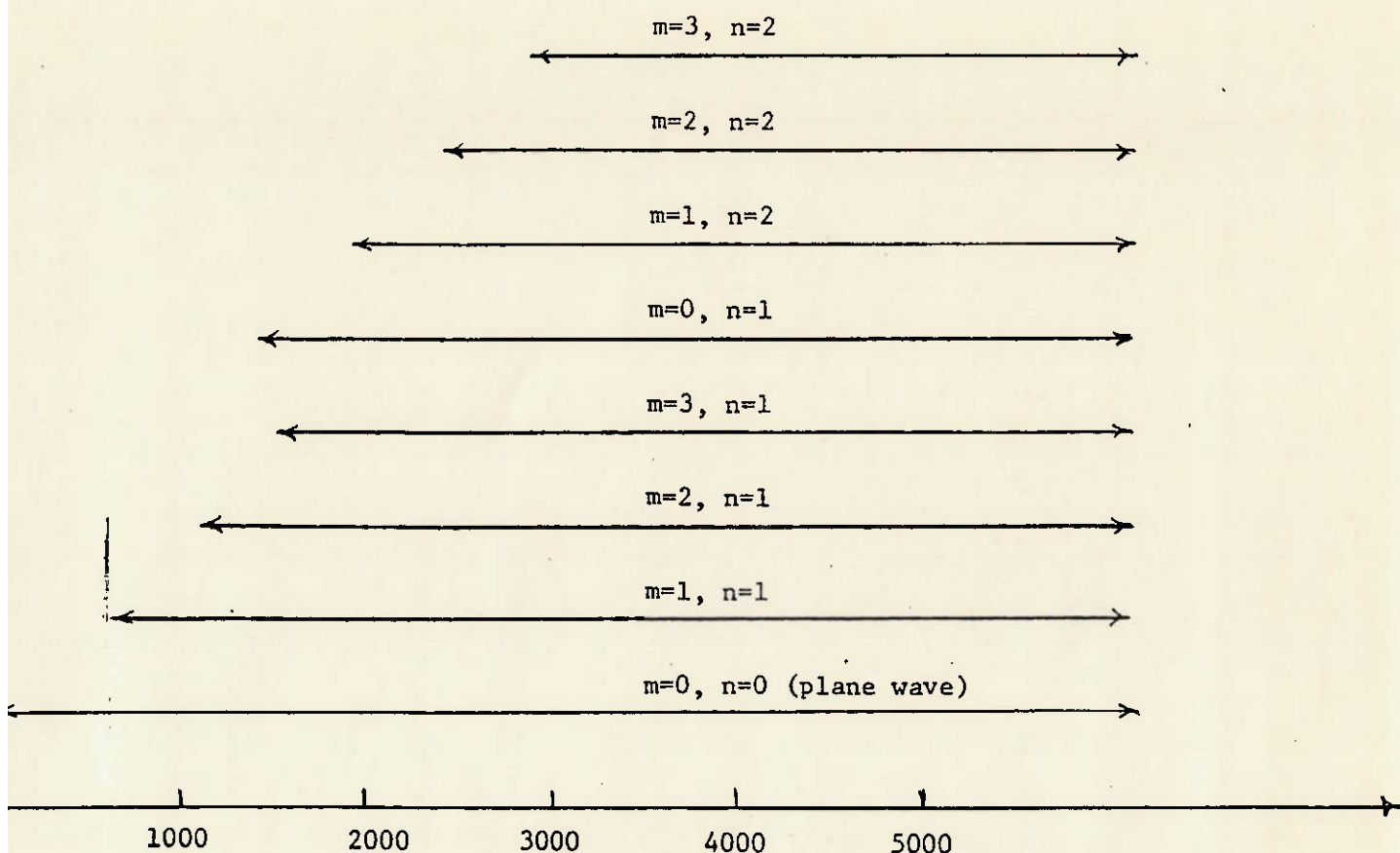


Figura 17 - Faixas de frequência onde o modo é propagante na direção longitudinal sem amortecimento

2.4.3.2. - Controle ativo x frequência de "cut-off"

Como se pôde ver, para uma única fonte sonora no duto, a mesma só pode gerar somente ondas planas nas seções do duto se a frequência desta fonte não superar a frequência de "cut-off" do modo (1,1) (figura acima). Mais ainda, pode-se concluir que o ruído de baixa frequência no duto é basicamente constituído por ondas planas, pois sua frequência é baixa. Logo, é conveniente, num primeiro momento, produzir com os alto-falantes atuadores, somente ondas planas para interferirem com as ondas planas do ruído no duto até a frequência de "cut-off" do modo (1,1), pois, a partir daí, estar-se-ia produzindo outros modos de pressão, adicionando-se mais ruídos no duto.

Pela figura 17, porém, observa-se que se tem ondas planas tanto para frequências abaixo como acima da frequência de "cut-off". Logo, o sistema de controle ativo seria tão mais eficiente se pudesse, além de atenuar as ondas planas (pela produção de ondas planas de amplitude inversa) de frequência até a primeira frequência de "cut -

-off", atenuar também as ondas planas para frequências maiores, resultando em maior silêncio à jusante.

Utilizando-se somente um alto-falante flangeado ao duto, só é possível atenuar os ruídos planos até a primeira frequência de "cut-off", pois ele representa uma única fonte sonora. A partir daí cabe então a pergunta: será que um arranjo de alto-falantes na seção poderia aumentar a frequência da onda de atenuação gerada, sem se produzir modos transversais propagantes além da onda plana ? Swinbanks provou isto ser possível, e chegou a um arranjo ótimo para dutos de seções circulares e quadradas - isso será mostrado a seguir.

O desafio posto para os controles ativos em dutos hoje é atenuar também os outros modos sonoros através da produção de modos similares, mas invertidos - isso representaria a extensão do controle ativo em dutos para atenuar ruídos de frequência maior, atenuando diversos modos em maiores faixas de frequência. A complexidade desse fenômeno deve ser deixada para estudos posteriores, levando em conta ainda que o ruído predominante na maioria das instalações é de baixa frequência, e portanto, um sistema de controle ativo que consiga produzir somente ondas planas em uma larga faixa de frequências já é de grande eficiência.

2.4.3.3 - A influência do arranjo

Serão apresentados aqui os resultados do trabalho de M.A. Swinbanks, publicado no "*Journal of Sound and Vibration*", 1972, sobre o posicionamento dos alto-falantes no duto. A maneira como se chegou a essas conclusões envolve cálculos complexos que não se achou necessário apresentar aqui.

Hipóteses: - duto de paredes rígidas
- fontes sonoras pontuais
- ar estacionário

Dutos de seção quadrada de lado "a" : Foi demonstrado inicialmente que, utilizando-se fontes sonoras distribuídas uniformemente ao redor da seção, não importando a quantidade, conseguiria-se aumentar a frequência de "cut-off" do primeiro modo transversal para o dobro da original. Em outras palavras, sendo a frequência de "cut-off" do duto de seção quadrada igual a $\pi c/a$, seria aumentada para $2\pi c/a$, e então os

as fontes (alto-falantes) poderiam operar até essa frequência sem provocar o surgimento de outros modos transversais propagando-se.

Em procurando determinar o número de alto-falantes que, dispondo-se uniformemente ao redor da seção, maximizem essa frequência, Swinbanks chegou algebricamente ao valor máximo de 2,8 vezes a frequência de "cut-off" original para o duto com um arranjo uniforme de 4 fontes sonoras, ou seja, uma fonte sonora no ponto médio de cada lado (veja figura abaixo).

Dutos de seção circular de raio "r" : Fazendo-se uma álgebra semelhante, Swinbanks concluiu que para 3 fontes sonoras distantes entre si de 120° , conseguir-se-ia operar as mesmas somente com ondas planas propagantes até uma frequência 2,1 vezes a primeira frequência de "cut-off" do duto circular, que vale $1,84c/r$.



Figura 18 - Arranjo ótimo das fontes e ilustração do primeiro modo transversal propagante

Conclui-se daí que, arranjando-se os alto-falantes conforme acima, conseguir-se-á maior desempenho do sistema, pois o mesmo amplia sua faixa atenuável de frequências de mais de duas vezes em relação ao sistema com fonte única.

2.4.4 - Direcionalidade e posicionamento

Pelo fato de o alto-falante estar flangeado à lateral do duto, é desejável que sua direcionalidade seja o mais aberta possível na faixa de 0 a 180° . De qualquer forma, a pressão sonora em seções não muito distantes da seção que contém os alto-falantes (questão de um pouco mais 0,5m na direção longitudinal) já adquire a forma normal dos modos apresentados supra.

Quanto ao posicionamento longitudinal relativo entre alto-falantes e microfones, convém lembrar que o "anel" de alto-falantes produz ondas de todos os modos mencionados supra, seja qual for a frequência, mas que todos os modos indesejáveis são atenuados em sua propagação longitudinal. Logo, deve-se procurar posicionar o microfone afastado o suficiente do alto-falante para o mesmo não captar esses modos, invalidando a detecção.

Não foi encontrado nenhum cálculo teórico para essa distância mínima que deve ser respeitada, mas experimentos conduzidos e catálogos de fabricantes de controles ativos recomendam uma distância mínima de 1 a 1,2 m.

2.4.5 - Caixas acústicas

As caixas acústicas têm a função de melhorar o desempenho dos alto-falantes em função da frequência de excitação. O projeto depende da geometria do alto-falante, de suas características dinâmicas e dos requisitos de desempenho desejado.

Nos sistemas disponíveis comercialmente, os alto-falantes vêm flangeados a apropriadas caixas acústicas, mas a nível experimental inicial, o seu projeto não se faz necessário - avanços futuros podem incluir o projeto de caixas acústicas para melhorar o desempenho do sistema.

----- X -----

2.5 - O Controle

O controle, sem dúvida, é o elemento que definirá o desempenho, a robustez e a flexibilidade do controle ativo. Existem diversas teorias, simulações e experimentos apresentados até o momento, todos conduzindo a resultados satisfatórios. A maioria dos artigos sobre controle ativo não se preocupa tanto com temas já de conhecimento geral como a acústica em dutos e dinâmica de transdutores eletro-acústicos, mas sim na melhor forma de executar o controle, elemento fundamental que interliga a detecção com a atuação.

Das formas apresentadas de controle, podemos dividi-lo em dois grandes grupos: os controles em malha-aberta (mais simples e melhores de serem implementados em experimentos iniciais, foram predominantes até meados da década de 80) e controles

adaptativos, em malha fechada (apareceram na segunda metade da década de 80, conferindo robustez, confiabilidade, compacticidade e flexibilidade aos controles ativos, proporcionando sua viabilidade comercial.

A um nível experimental inicial, pretende-se implementar controles em malha aberta, sendo que estes receberão a devida atenção desta seção, mas não vai se deixar de apresentar tudo o que já se sabe sobre controle adaptativo para a implementação de evoluções ao sistema experimental.

O sistema de controle deve ser responsável por garantir os requisitos (mencionados na parte introdutória) de atenuação em banda larga ou em tom-puro.

2.5.1 - Controles em malha aberta

Os controles em malha aberta operam detectando o som à montante do duto através de microfones, condicionando e interpretando o sinal. A partir daí, geram um sinal (com os devidos atrasos introduzidos) para alimentar os alto-falantes (com amplificadores) e atuar sobre a onda detectada.

As principais arquiteturas propostas são três:

- 1-O método de Swinbanks, 1972 (um dos primeiros sistemas exequíveis e eficientes)
- 2-O sistema monopolo de Chelsea, 1981 (uma versão menos complexa e de melhor eficiência)
- 3-O método de Munjal/Eriksson, 1987 (mais recente e mais sólido teoricamente, podendo ser aplicado a situações mais reais; foi considerado o precursor do controle adaptativo, utilizado nos sistemas disponíveis comercialmente)

O método clássico de Swinbanks será apenas apresentado e discutido pois seus princípios são relativamente interessantes, sendo que a atenção devida será dada aos sistemas de Chelsea e Munjal/Eriksson, pelos mesmos serem mais consistentes. O método de Munjal será também a base das implementações práticas.

2.5.1.1 - O método de Swinbanks

O pesquisador M.A. Swinbanks, da universidade de Cambridge, apresentou em 1972 um trabalho completo envolvendo o melhor arranjo de alto-falantes na seção do duto (já mencionado supra) e uma primeira sugestão plausível para um sistema de controle ativo em dutos.

A hipótese para o controle de Swinbanks é que a onda representando o ruído propagante seja unidirecional. O sistema funcionaria do seguinte modo: a onda propagante seria detectada por um microfone à montante e o sinal seria utilizado para comandar um grupo de alto-falantes mais à jusante, que atuariam atenuando a onda.

Considerando o arranjo ótimo para dutos de seção circular ou quadrada, o anel de alto-falantes em uma seção do duto deve operar em uma certa faixa de frequências sonoras de modo a garantir apenas a produção de uma onda plana bidirecional. Definindo-se um sistema de coordenadas no duto com o eixo x na direção longitudinal e sentido da jusante do duto, tem-se que a equação da onda plana bidirecional gerada $p(x,t)$ é:

$p/ x > 0$

$$(1) \quad p(x,t) = \frac{c_0}{2A} m \left(t - x/c_0 \right)$$

onde, c_0 - velocidade do som no ar

A - área de seção

m - vazão mássica de ar proporcionada pelo anel de alto-falantes

$p/ x < 0$

$$(2) \quad p(x,t) = \frac{c_0}{2A} m \left(t + x/c_0 \right)$$

O que Swinbanks propôs, foi criar uma onda sonora de atuação em oposição de fase à onda propagante e que se propagasse apenas na direção à jusante do duto, através da utilização de dois anéis idênticos de alto-falantes, dispostos em seções espaçadas de uma distância " b ". Dessa forma, o ruído gerado pelos alto-falantes não se propagaria em direção ao microfone detector, deixando o mesmo para detectar apenas a onda propagante original.

O primeiro anel, em $x=0$, possui uma vazão mássica $m_1(t)$, e o segundo anel, em $x=b$, possui uma vazão mássica $m_2(t)$ (veja esquema abaixo).

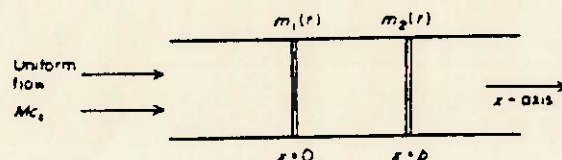


Figura 19 - Arranjo de dois anéis de alto-falantes para produzir uma onda plana unidirecional em $x>b$

Utilizando-se a equação de pressão (2) acima, tem-se para $x<0$, a seguinte superposição das ondas geradas pelos anéis:

$$p(x<0,t) = \frac{c_0}{2A} (m_1(t+x/c_0) + m_2(t+(x-b)/c_0)) \quad (3)$$

Impondo-se pressão nula nessa região (onda unidirecional à jusante apenas), obtém-se uma relação entre as vazões mássicas dos dois anéis de alto-falantes:

$$m_1(t) = - m_2(t - b/c_0) \quad (4)$$

Isso significa que, para se produzir uma onda unidirecional, o primeiro anel deve operar com a mesma onda do segundo anel ($x=b$), atrasada de b/c_0 .

Usando-se as equações (1) e (4), tem-se a equação da onda à jusante, que nada mais é que a superposição das ondas planas $p(x,t)$ geradas pelos dois anéis:

$$p(x>b,t) = \frac{c_0}{2A} \left(m^2 \left(t - (x-b)/c_0 \right) - m^2 \left(t - (x-b)/c_0 - t_0 \right) \right) \quad (5)$$

$$\text{com } t_0 = \frac{2b}{c_0}$$

Porém, nota-se que se está produzindo à jusante ondas planas superpostas defasadas entre si - dessa forma, a amplitude da onda gerada $p(x>b,t)$ varia com a frequência de alimentação dos alto-falantes (e portanto, a frequência da onda gerada). O gráfico abaixo ilustra essa afirmação, onde η representa o quociente entre a amplitude da onda unidirecional em relação à bidirecional $p(x,t)$ (um anel) da equação (1):

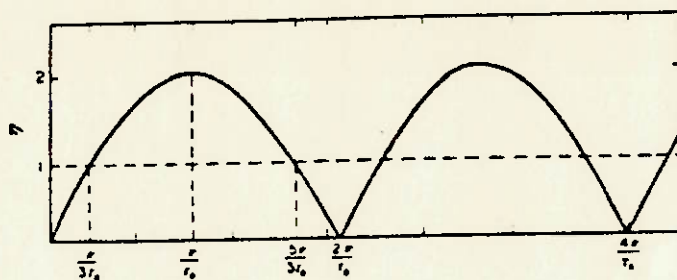


Figura 20 - Gráfico da razão η entre as amplitudes da onda bidirecional e unidirecional em função da frequência w

Nota-se que somente nos intervalos:

$$\frac{2n\pi}{t_0} + \frac{p}{3t_0} \leq \omega \leq \frac{2n\pi}{t_0} + \frac{5\pi}{3t_0}, \quad n=0,1,2,\dots$$

tem-se amplitudes maiores ou iguais à amplitude gerada por um único anel, além de existirem largas faixas onde há a perda de amplitude e até amplitude nula na onda à jusante. Isso significa que, para ruídos propagantes nessas faixas de frequência, a atenuação não é expressiva porque a amplitude da onda à jusante é inferior.

Swinbanks procurou aumentar essa faixa para ω e reduzir as faixas onde $\eta < 1$ através da colocação de um terceiro anel de alto-falantes de vazão mássica $m_3(t)$ e posicionado em $x=d$.

Com isso, a equação da onda à montante ficaria:

$$p(x < 0, t) = \frac{c_0}{2A} (m_1(t + x/c_0) + m_2(t + (x-b)/c_0) + m_3(t + (x-d)/c_0)) \quad (6)$$

Impondo-se pressão sonora nula à montante, chega-se a uma nova relação:

$$m_1(t) = -m_2(t - b/c_0) - m_3(t - d/c_0) \quad (7)$$

Usando-se (7) e (1), tem-se também a nova equação à jusante:

$$p(x > d, t) = \frac{c_0}{2A} (m_2(t - (x-b)/c_0) - m_2(t - (x-b)/c_0 - t_1) + m_3(t - (x-d)/c_0) - m_3(t - (x-d)/c_0 - t_2))$$

$$\text{com, } t_1 = \frac{2b}{c_0}; \quad t_2 = \frac{2d}{c_0} \quad (8)$$

Nota-se, comparando-se com a expressão (5), que a onda gerada representa a superposição de ondas geradas por dois pares de anéis: m_1 e $m_3 + m_2$ e m_3 .

Para achar uma relação entre m_2 e m_3 , Swinbanks fez a análise do caso no domínio da frequência, procurando achar uma relação tal que o número de pontos (frequências) tal que a onda gerada à jusante tivesse amplitude nula, fosse mínimo. Tal desenvolvimento é deveras complexo e não achou-se interessante apresentar aqui. O resultado obtido foi:

$$m_3 = m_2 (t - (d-b)/c_0) \quad (9)$$

Minimizados os pontos onde a amplitude da onda gerada se anula, a onda à jusante ganha a seguinte expressão final:

$$g(t - (x-d)/c_0) = \frac{c_0}{A} (m_2(t - (x-b)/c_0) - 0.5m_2(t-t_1-(x-b)/c_0) - 0.5m_2(t-t_2-(x-b)/c_0))$$

para $x > d$

(10)

Os valores para t_1 e t_2 vão influir agora na curva para :

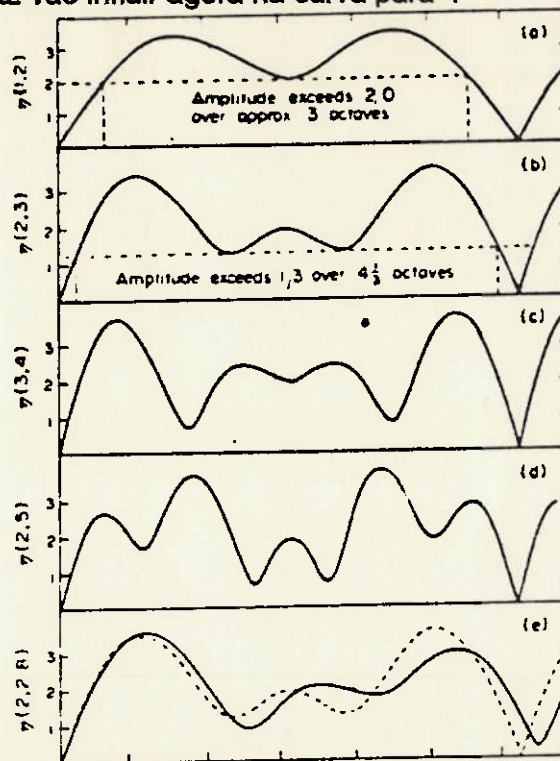


Figura 21- Curvas de relação de amplitude $\eta(t_1, t_2)$ para o arranjo com 3 anéis de alto-falantes em função da frequência

Verifica-se das curvas acima, que a segunda curva ($t_1=2$ e $t_2=3$) é a que apresenta maior eficiência de amplitude. A partir daí, pode-se obter uma relação entre b e d de modo a atingir tal objetivo.

Garantindo-se a produção de uma onda unidirecional de amplitude significativa por uma grande faixa de frequências, pode-se passar então ao controle propriamente dito. A função de transferência será obtida para o caso de três anéis de alto-falantes.

Supondo-se uma onda propagante de equação:

$p(x,t) = f_0(t - x/c_0)$, onde f_0 é uma função qualquer (senoidal, por exemplo)

Impondo-se somatória nula de pressões em $x>b$, tem-se, substituindo-se a equação anterior na equação (10):

$$\frac{c_0}{A} (m_2(t) - 0.5(m_2(t-t_1) + m_2(t-t_2))) = -f_0(t - (b/c_0)) \quad (11)$$

Tomando-se a transformada de Laplace dessa equação, chega-se a:

$$m_2(s) = - \frac{A}{c_0} \left(\frac{1}{1 - 0.5(e^{-st_1} + e^{-st_2})} \right)^2 \exp \left(- \frac{l+b}{c_0} s \right) D(s) \quad (12)$$

onde $D(s)$ é a transformada de Laplace do sinal detectado no microfone e $m_2(s)$ é a transformada do sinal enviado aos alto-falantes do segundo anel.

O termo multiplicando $D(s)$ representa a função de transferência do controlador - nota-se que a mesma é relativamente simples, pois representa quocientes de polinômios de atrasos-puros. O sinal negativo indica a inversão de fase.

Convém adicionar que $m_2(s)$ representa a vazão mássica do anel de alto-falantes, mas, no comando dos mesmos, o sinal elétrico que alimenta a bobina deve ser de

pressão sonora. Logo, $m_2(t)$ deve ser multiplicado pela impedância acústica do alto-falante Z e dividido pela densidade do ar antes de comandar o alto-falante.

O microfone, apesar de teoricamente não haver onda gerada à montante, deve ser o mais unidirecional possível, garantindo mais robustez ao sistema.

O sinal do microfone detectado deve ser atrasado o tempo suficiente para a onda propagante percorrer o caminho do microfone ao primeiro anel de alto-falantes. Levando-se em conta que $\eta > 1$ somente para uma faixa de frequências, é conveniente passar o sinal por um filtro passa-banda para essa faixa. A somatória dos atrasos envolvidos nessa operação deve ser igual ao tempo de propagação da onda no trecho considerado. O sinal pode, a partir daí, ser enviado ao controlador.

O controlador aplica então a função de transferência ao sinal, produzindo um sinal para o anel $m_2(t)$. De acordo com as equações (7) e (9), bastam simples atrasos nesse sinal para se obter os sinais de comando para os anéis $m_1(t)$ e $m_3(t)$, para se ter a onda unidirecional.

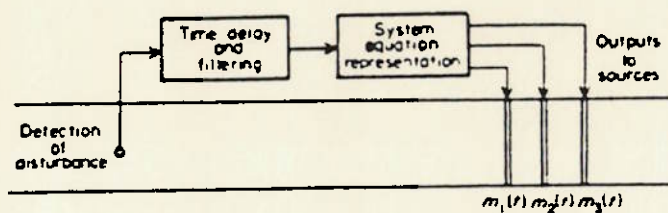


Figura 22- Arranjo esquemático do sistema

O sistema deve ser projetado sempre para uma frequência particular, chamada "frequência de centro", que vai definir mais precisamente quais são os atrasos envolvidos nos filtros, e também vai auxiliar na determinação de alguns parâmetros do sistema. O sistema, então, proporcionará atenuação máxima para ruídos propagantes em torno dessa frequência de projeto.

Implementações realizadas

O controle ativo proposto por Swinbanks foi implementado em 1976 por H.G. Leventhall e J.H.B. Poole, utilizando-se dois anéis de alto-falantes e um microfone tipo cardióide (direcionalidade em forma de cardióide). Para o controle e os filtros necessários, utilizou-se eletrônica analógica. O duto ensaiado era de madeira (espessura 25 mm), seção quadrada e com um comprimento total de 5,75 m. A figura abaixo ilustra melhor o aparato experimental:

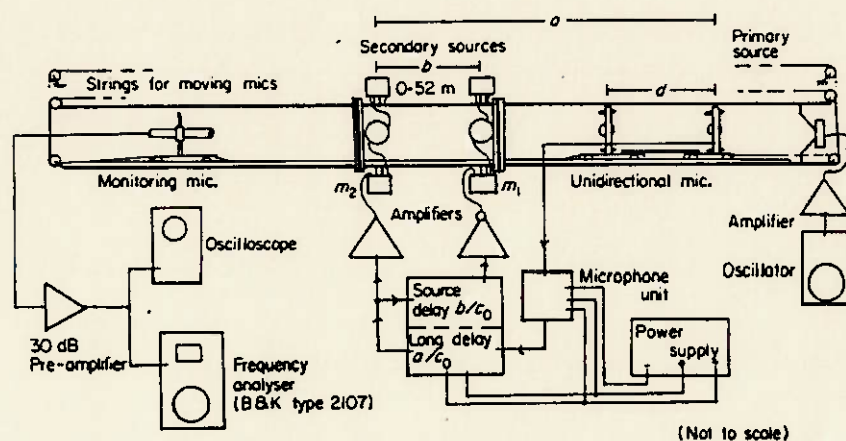


Figura 23- Aparato experimental do modelo de Swinbanks

Para simular um ruído sonoro no duto, utilizou-se um alto-falante colocado na extremidade direita do duto, alimentado por um oscilador.

Foram feitos experimentos com três frequências de centro: 162, 142 e 200 Hz, onde avaliou-se o desempenho do sistema para atenuar ruídos do tipo tom-puro e ruídos de banda larga de 10, 30 e 100 Hz.

As curvas de atenuação para as três frequências de centro obtidas foram:

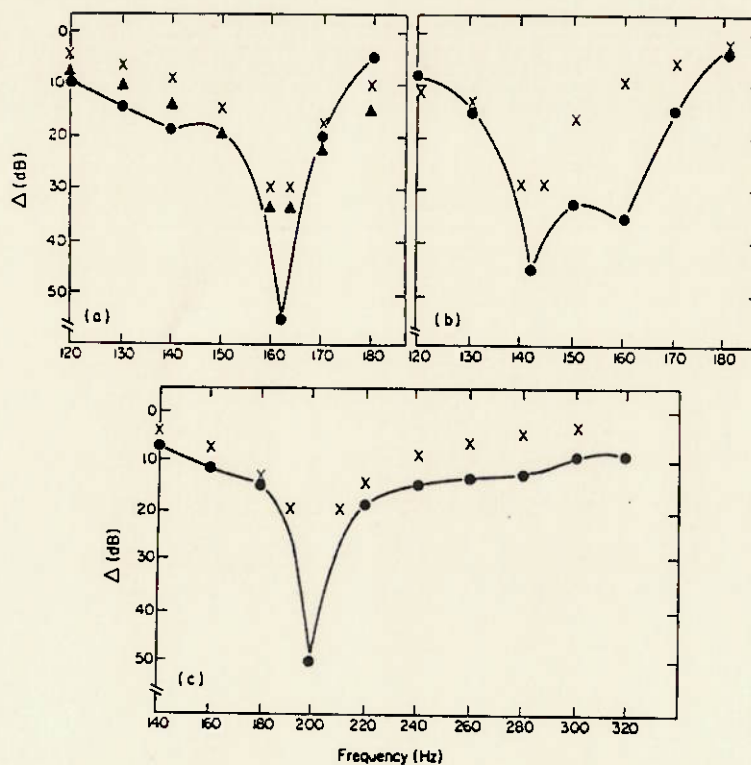


Figura 23- Atenuação do sistema
a) frequência de centro de 162 Hz
b,c) idem, 142 Hz e 200 Hz

Os dados de atenuação obtidos no microfone detector à jusante foram:

Frequência de centro (Hz)	Largura de banda do ruído propagante (Hz)			
	0	10	30	100
Atenuação em dB				
142	24	19	17	7
162	25	16	13	9
200	33	25	21	16

A queda de atenuação com o aumento da banda de frequências, tanto nos diagramas experimentalmente levantados quanto nos resultados medidos, é explicada pelo fato de os alto-falantes e a eletrônica associada não apresentarem comportamento

constante com a frequência: os atrasos do sistema começam a mudar com relação ao projetado quando as frequências se desviam da frequência de projeto, e o comportamento de pressão sonora dos alto-falantes se altera. Com isso, os anéis passam a produzir uma onda de pequena intensidade em direção à montante, e uma onda de características um pouco diferenciadas do normal à jusante, contribuindo para uma queda na performance do sistema.

Outro ponto a observar é o fato de o sistema, "em vazio", apresentar uma atenuação de em torno de 50 dB na frequência de projeto, sendo que quando posto em prática para atenuar um tom puro, sua atenuação caiu para em torno de 30 dB. Esse fato foi explicado por distorções no funcionamento dos alto-falantes, permitindo que uma pequena parte da onda se dirigisse à montante, e também pelo fato de o microfone detectar também um pouco de ruídos externos.

2.5.1.2 - O sistema monopolo de Chelsea

Em 1981, Eghtesadi e Leventhall apresentaram um sistema compacto e de eficiência superior ao sistema ora confeccionado por Swinbanks, e pôde ser considerado o precursor do sistema de Munjal/Eriksson, mais bem elaborado e eficiente, apresentado no fim da década de 80.

Por sistema monopolo, entende-se o sistema da figura abaixo, onde um microfone detecta a onda sonora à montante, e apenas um único alto-falante, comandado pelo sistema de controle, age sobre a mesma (obviamente, um sistema dipolo seria aquele com dois alto-falantes face-a-face).

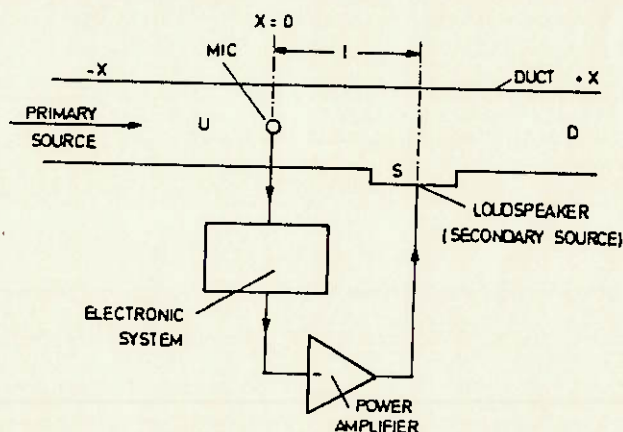


Figura 24 - Sistema monopolo convencional

Os pesquisadores Eghtesadi e Leventhall partiram dos problemas de um sistema monopolo convencional (que serão desenvolvidos a seguir) para desenvolver uma ação de controle que os resolvesse.

Vamos supor o arranjo da figura acima com uma onda sonora plana propagante de comprimento de onda λ_0 (tom puro) e com a distância "l" entre o microfone e o alto-falante sendo igual a $\lambda_0/4$. Dessa forma, a onda leva um tempo "t" igual a l/c para ir do microfone ao alto-falante, e esse é o atraso global que o sistema de controle deve dar ao alto-falante, mais a inversão de fase, para que o alto falante produza uma onda plana defasada de da onda incidente.

O problema é que a radiação do alto-falante não se direciona somente à jusante, direcionando-se também à montante e sendo captada pelo microfone. Essa onda age como um "feedback" acústico, levando o sistema a ter o seguinte diagrama de blocos:

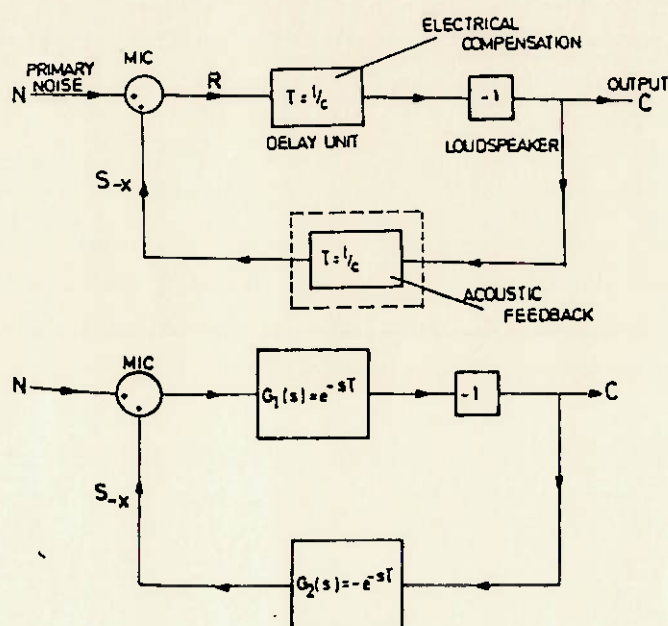


Figura 25 - Diagramas de bloco esquemáticos e com funções de transferências para o sistema monopolo convencional

Nota-se acima que o microfone age como um elemento somador da onda sonora propagante e da onda sonora gerada pelos alto-falantes que se propaga à montante. Além disso, a compensação de atraso do circuito de controle e o atraso do "feedback" acústico podem ser representados por simples atrasos puros.

A função de transferência que relaciona as ondas propagante e gerada pelo alto-falante é:

$$G(s) = \frac{-e^{-st}}{(1 - e^{-2st})}$$

No domínio da frequência:

$$|G(i\omega)| = 1/2 \operatorname{sen}(\omega t) \quad \angle G(i\omega) = \pi/2$$

Pode-se notar que a defasagem imposta à onda propagante que é detectada no microfone é sempre constante e igual a $\pi/2$. Dessa forma, uma total atenuação sonora no alto-falante (as ondas propagante e gerada defasadas de π) só ocorrerá se a onda propagante na região do alto-falante estiver defasada de $-\pi/2$ com relação à sua fase no microfone - acontece que isso só ocorre para $l = \lambda_0/4$. Portanto, se houver qualquer mudança em λ_0 , a distância "l" deverá ser alterada para o novo valor. O sistema convencional, então, só se aplicaria para casos em que a frequência da onda propagante fosse constante, não atenuando eficientemente para ondas de uma determinada banda de frequência. O diagrama desse sistema está esquematizado abaixo:

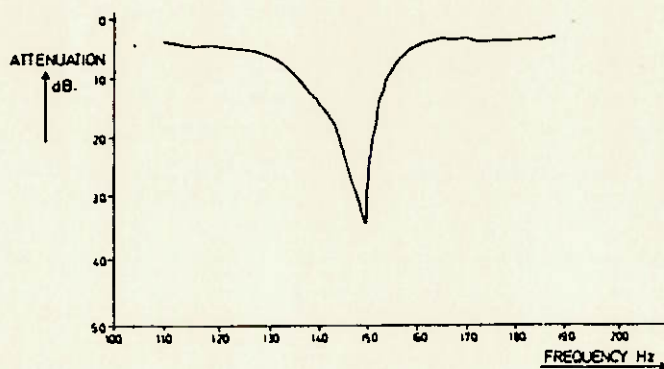


Figura 26 - Performance de um sistema monopolo convencional projetado para uma frequência de onda de 150 Hz

Para corrigir essa deficiência, procurou-se encontrar uma função de transferência global tal que a defasagem do sistema fosse diretamente e linearmente proporcional à

frequência da onda propagante. O sistema monopolo de Chelsea (veja diagrama abaixo), desenvolvido por Eghtesadi e Leventhall, proporciona essa característica através de uma alteração na função de transferência do circuito eletrônico.

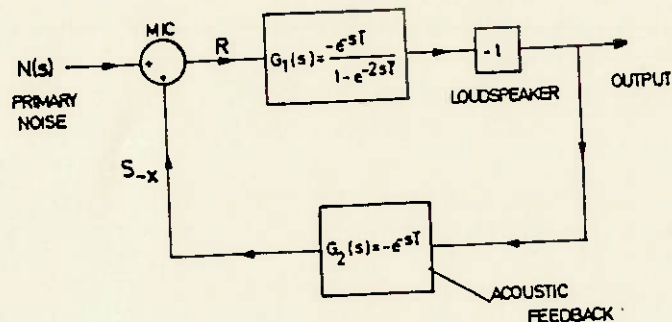


Figura 27 - Diagrama de blocos do sistema monopolo de Chelsea

A função de transferência global, a partir do diagrama de blocos acima é:

$$G(s) = e^{-st}$$

E, no domínio da frequência: $|G(i\omega)| = 1$; $\angle G(i\omega) = -\omega t$

Nota-se que o ganho de amplitude é nulo (imunidade em amplitude) para todas as frequências e que, sendo $\omega t = k\pi$, tem-se o atraso adequado para completo cancelamento da onda sonora propagante, seja qual for a sua frequência.

A partir daí, a atenuação passa a ser influenciada por outros fatores não considerados, como frequência de "cut-off", dinâmica de alto-falantes, etc... .

Foram feitas implementações desse sistema para frequências de 100 Hz (tom puro) e para ruídos randômicos de banda sonora de 30 Hz e 100 Hz, utilizando-se um duto de madeira de seção 25 x 35 cm e comprimento de 13 m. Para gerar o ruído, foi utilizado um alto-falante flangeado na extremidade à montante, alimentado por um gerador de sinais conectado a um amplificador. Como controle, utilizou-se um circuito eletrônico

especialmente projetado para o fim, e para atuação, utilizou-se um único alto-falante. A performance do sistema para as simulações feitas estão nos gráficos abaixo:

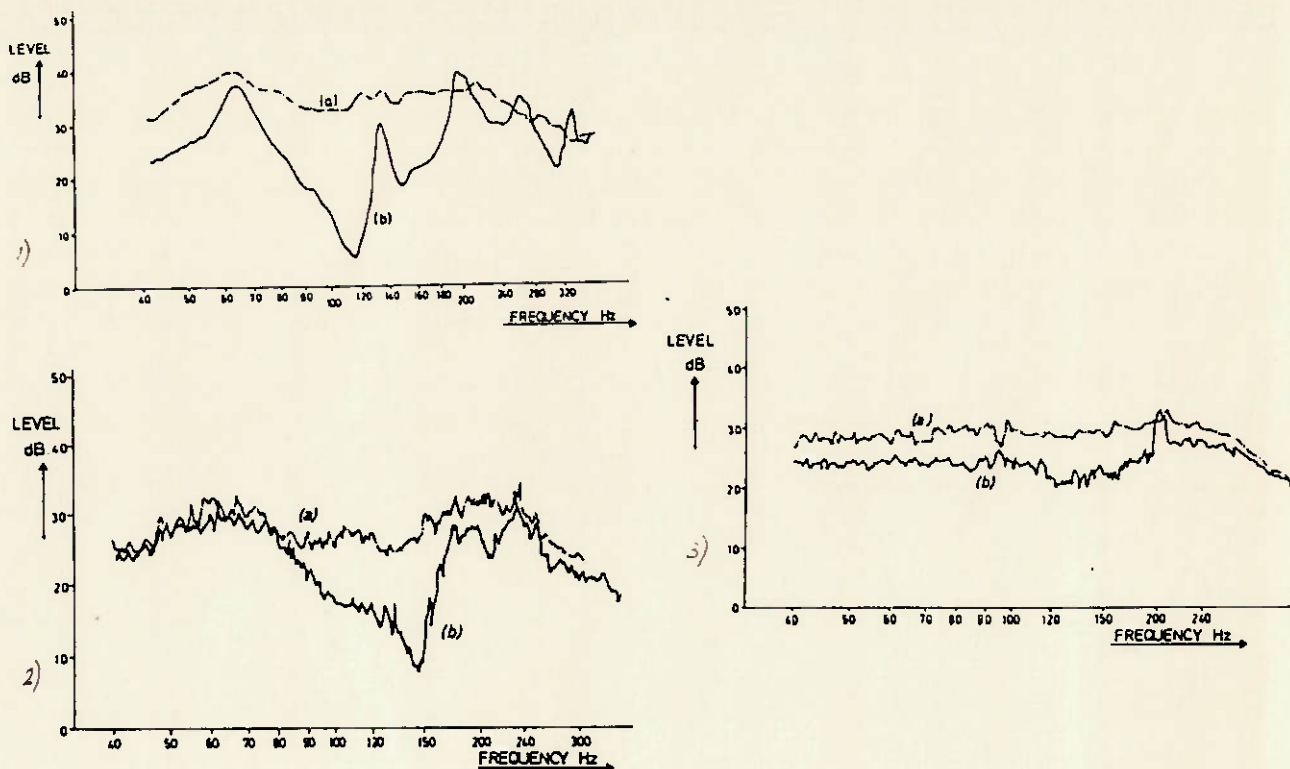


Figura 28 - Desempenho do sistema de Chelsea

1) tom puro de 100 Hz

2) ruído randômico de banda 30 Hz

3) idem, 100 Hz

Em todas as curvas, (a) representa o ruído sem o sistema estar ligado, e (b) com o sistema ligado

A queda de desempenho em atenuação com o aumento da banda de ruído pode ser explicada pelo fato de os alto-falantes, microfones e até a própria eletrônica não possuírem um comportamento plano com a frequência e tão poucas respostas a transientes do tipo degrau. Com o desenvolvimento de alto-falantes e microfones adequados para o fim e com o uso de componentes eletrônicos mais precisos e rápidos, conseguir-se-á melhorar significativamente a resposta do sistema.

O sistema de Chelsea foi notável pela sua compacticidade e eficiência, mas, mesmo utilizando-se alto-falantes e microfones adequados, não representa um sistema robusto a condições reais, pois não considera características inerentes à dinâmica dos alto-falantes e microfones, e tão pouco à geometria da seção.

O próximo sistema a ser apresentado representa uma abordagem mais realista e consistente dos parâmetros envolvidos no controle ativo, razão esta por ter sido considerado o precursor do sucesso do controle adaptativo para sistemas de controle ativo.

2.5.1.3 - O método de Munjal/Eriksson

O método de controle em malha aberta proposto por Munjal e Eriksson supõe a onda no duto plana e estacionária, ou seja, um duto onde a extremidade à jusante é aberta ao ambiente. O hardware do sistema (veja figura abaixo) consiste de um anel de alto-falantes atuadores de impedância Z_{sa} , que emanam no local uma pressão total p_{sa} . A fonte de ruídos no duto é modelada por um elemento de impedância Z_{sp} , emanando uma pressão p_{sp} . O duto é dividido em trechos de 0 a 7 conforme a figura, com as respectivas distâncias físicas " l ". A impedância na saída do duto é denotada por Z_0 , e um microfone detector detecta uma pressão p_i , enquanto um microfone de erro detecta

uma pressão p_e à jusante.

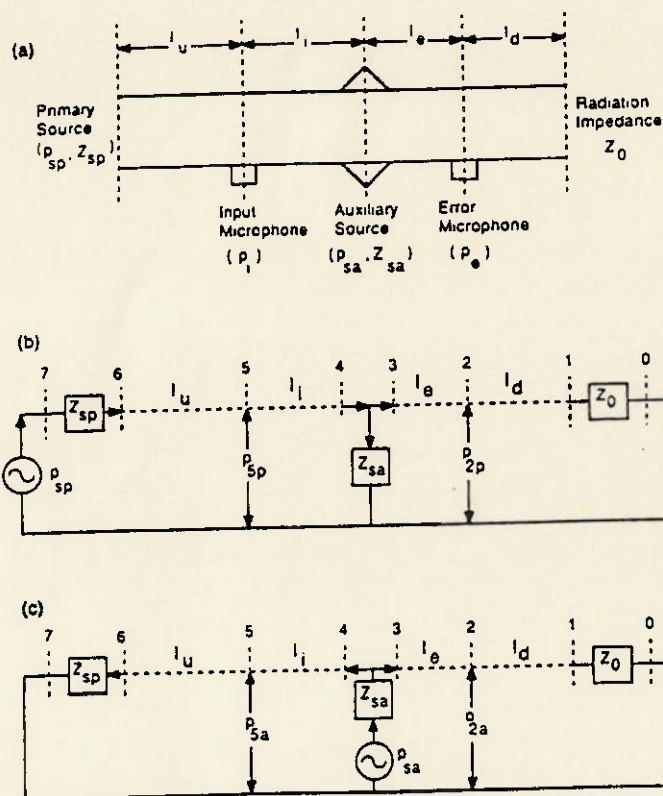


Figura 29 - Arranjo dos elementos e variáveis importantes

O objetivo é determinar a função de transferência ideal H_0 , que nada mais representa que o quociente entre p_{sa} e p_i , de modo que se tenha uma interferência destrutiva na região do anel de alto-falantes.

Para chegar a H_0 , Munjal abriu mão de analogias entre sistemas elétricos e acústicos e do princípio da superposição de efeitos. No circuito acústico, a pressão representa a tensão, a velocidade representa a corrente, e as impedâncias são as resistências.

Na figura acima pode-se notar que Munjal irá resolver o problema através da superposição de dois efeitos isolados: primeiro, a fonte sonora sendo detectada pelo microfone com os alto-falantes desligados; segundo, os alto-falantes ligados e a fonte sonora desligada. A superposição desses efeitos deverá levar a uma pressão sonora mínima na seção 3.

A aparente vantagem deste sistema, é que ele considera a onda produzida pelos alto-falantes como pressão adicional no microfone, sem precisar se preocupar em produzir uma onda unidirecional.

Resolvendo o circuito, deriva-se a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} p_{sp} \\ v_{sp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{sp} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{6p} \\ v_{6p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_u & jY_0 S_u \\ (j/Y_0)S_u & C_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{3p} \\ v_{3p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_l & jY_0 S_l \\ (j/Y_0)S_l & C_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{4p} \\ v_{4p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{sa} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{3p} \\ v_{3p} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} p_{3p} \\ v_{3p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_e & jY_0 S_e \\ (j/Y_0)S_e & C_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{2p} \\ v_{2p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_d & jY_0 S_d \\ (j/Y_0)S_d & C_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{1p} \\ v_{1p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ v_{0p} \end{bmatrix},$$

com:

$$C_u \equiv \cos k_0 l_u, \text{ etc.},$$

$$S_u \equiv \sin k_0 l_u, \text{ etc.},$$

$$Y_0 = c_0/S, \quad k_0 = \omega/c_0$$

Através da solução do circuito acústico, consegue-se obter uma expressão para a pressão detectada no microfone de erro p_e em função das dimensões do duto, da função de transferência H_0 , do número da onda propagante k_0 e das impedâncias:

$$\frac{p_e}{p_{spi}} = \frac{\zeta_e}{Z_{spi} VR} \left(\frac{1 + j(Y_0 \sin k_0 l_i / Z_{sa}) H}{1 - \zeta_e H / Z_{sa} VR} \right)$$

Impondo-se a condição ideal de $p_e=0$, obtém-se:

$$H_0 = j(Z_{sa}/Y_0 \sin k_0 l_i)$$

$$H_0 \equiv p_{sa}/p_i$$

que pode ser re-escrita como:

$$H_0 = -\frac{Z_{sa}}{Y_0} \left(\frac{e^{-jk_0 l_i}}{1 - e^{-2jk_0 l_i}} \right)$$

(mais detalhes sobre o complexo desenvolvimento algébrico podem ser encontrados no artigo referido - vide referências bibliográficas)

Comentários e observações

1) Nota-se que a função de transferência H_0 que relaciona as pressões detectadas no microfone (p_i) e emitidas pelos alto-falantes (p_{sa}) depende somente de:

- velocidade do som no duto c_0
- impedância do conjunto de alto-falantes em paralelo Z_{sa}
- área da seção do duto S
- distância entre microfone detector e os alto-falantes l_i
- número da onda incidente k_0

Isso, aliado à simplicidade da função de transferência (quociente de polinômios de atrasos puros) torna o sistema de controle ativo um sistema mais fácil de ser instalado em campo, pois não precisa-se conhecer as características da abertura do duto (Z_0), nem da fonte de ruídos (p_{sp} , Z_{sp}); além disso, há uma maior flexibilidade quanto às outras distâncias envolvidas, pois a função de transferência só depende da distância entre microfones e alto-falantes.

2) Valem as mesmas afirmações feitas por Swinbanks sobre o aumento da frequência de operação com um arranjo adequado dos alto-falantes.

3) O efeito de curto-circuito: A função de transferência obtida, se convenientemente ajustada ao sistema físico, age para promover que os alto-falantes atuadores, em uma condição ideal, atuem proporcionando um curto-circuito acústico no sistema, como na figura abaixo:

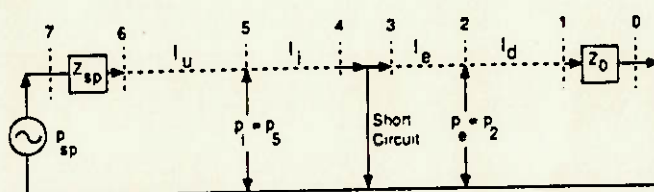


Figura 30 - O efeito de curto-circuito

Com isso, garante-se que a onda propagante (e portanto toda a energia sonora incidente) não se dirige à jusante, sendo completamente absorvida pelo conjunto de

alto-falantes, e refletida de volta à montante (fechando o circuito), influenciando inclusive no desempenho da fonte ruidosa p_{sp} .

O efeito de curto-circuito seria perfeito se a impedância Z_{sa} do conjunto de alto-falantes fosse nula. Porém, isso significaria que $H_o=0$, ou seja, que o alto-falante sozinho seria capaz de realizar esse efeito. Acontece que, com impedância nula, o alto-falante não tem amortecimento no movimento de seu diafragma, e as excitações da onda propagante o fariam oscilar a amplitudes elevadas, levando ao seu colapso.

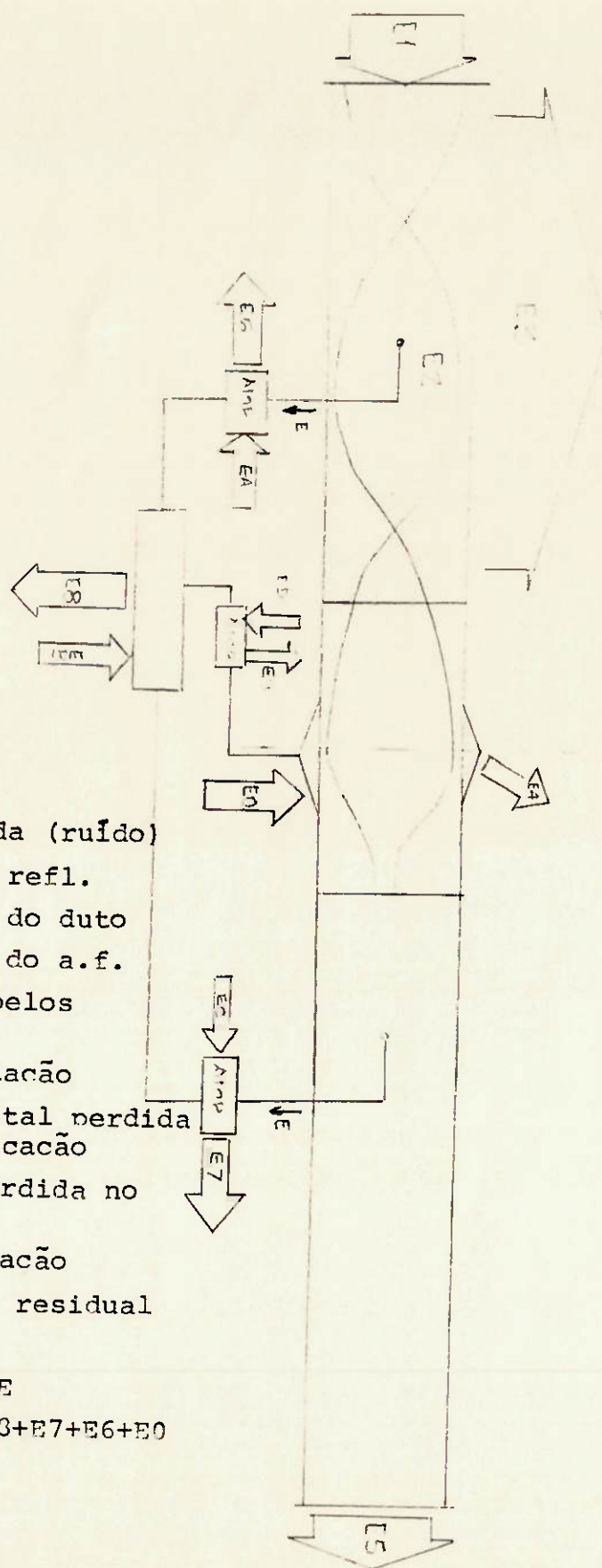
A impedância Z_{sa} do alto-falante deve existir para evitar esse problema, mas conclui-se que a mesma deve ser mínima de modo a proporcionar o melhor "curto-circuito" possível - essa passa a ser uma regra para o projeto de alto-falantes específicos para controle ativo.

Na condição real, a energia sonora radiante dissipa-se inicialmente em sua propagação no duto (através das paredes e da perda de carga). Ao encontrar o conjunto de alto-falantes, esses atuam refletindo-a de volta à fonte e dissipando parte dela através de uma pequena propagação à jusante e através das bobinas do alto-falante. Essa onda refletida de volta irá formar uma onda estacionária à montante, alterando as características da fonte ruidosa. A partir daí, o sistema entra em regime com a fonte sonora somente fornecendo energia ao sistema igual à energia que é dissipada através do duto, das bobinas, do circuito de controle e da onda residual à jusante.

Convém observar que a porção da onda incidente que é detectada no microfone, é devolvida através dos alto-falantes, menos as perdas elétricas no microfone e no circuito de controle. O esquema na página seguinte ilustra melhor o comportamento da energia no sistema de controle ativo.

Após essas conclusões, vê-se que o sistema de controle age apenas para proporcionar um movimento dos alto-falantes em oposição de fase à onda incidente, considerando o tempo de percurso da onda da detecção até a atuação, a dinâmica do alto-falante e as características da onda incidente. Propiciando esse movimento, estará se produzindo um efeito semelhante ao da onda incidente estar completamente agindo sobre o alto-falante com pressões e sucções sonoras - com isso, o alto-falante representa para a onda uma parede para a mesma refletir de volta.

4) Esse foi o primeiro sistema proposto que considera explicitamente a impedância do conjunto de alto-falantes Z_{sa} como influente no desempenho do sistema. Todos os



Onde,

E1 - Energia fornecida (ruído)

E2 - Energia da onda refl.

E3 - Perda na parede do duto

E4 - Perda na bobina do a.f.

E - energia drenada pelos microfones

EA, EB, EC, ED - alimentação

E6, E7, E9 - energia total perdida na amplificação

E3 - energia total perdida no controle

E0 - energia de atenuação

E5 - energia do ruído residual

$$E1 + E0 = E2 + E3 + E4 + E5 + 2E$$

$$EA + EB + EC + ED + 2E = E9 + E3 + E7 + E6 + E0$$

Figura - Considerações energéticas do sistema

principais artigos e sistemas apresentados assumiam que o alto-falante se comportava como uma parede rígida, ou seja, com impedância infinita. Com isso, no projeto da função de transferência, não se considerava o fato de que a impedância do alto-falante influa na dinâmica de atuação, e era essa a grande razão da discrepância entre teoria e prática em termos de desempenhos esperados. Exceção seja feita ao método de Swinbanks, onde a impedância do alto-falante estava implícita para se poder relacionar a vazão mássica dos alto-falantes com a sua pressão sonora.

5) Comparando-se os resultados para H_0 com os resultados para G_1 do sistema monopolo, vê-se que os mesmos possuem a mesma característica de controle, diferindo apenas pelo fato de o sistema de Munjal, por ser mais bem elaborado, considerar outros efeitos como a área da seção S e a impedância do alto-falante Z_{sa} .

2.5.1.4 - O efeito da presença de escoamento de ar no duto

A presença de escoamento de ar no duto provoca alterações no funcionamento do sistema, principalmente pelo fato de a propagação da onda sonora sofrer alterações. Esse efeito ainda não faz parte dos objetivos deste trabalho (ou desta etapa do estudo), mas achou-se interessante mencionar brevemente como se pode projetar o sistema para considerar esse fato, aproximando-o mais das condições reais.

No desenvolvimento teórico da propagação da onda e na obtenção da função de transferência, o escoamento de ar no duto é representado pelo número de Mach " M " dado por:

$$M = v/c, \quad M < 1, \quad \text{onde } v \text{ é a velocidade do escoamento (média)}$$

Tanto Swinbanks como Munjal consideraram a possibilidade de haver um escoamento com número de Mach " M " no duto, sendo que Swinbanks mostrou que a frequência de "cut-off" no duto também é alterada pelo escoamento, sendo multiplicada por $(1-M^2)^{1/2}$, portanto, reduzida pelo efeito.

Nos dois métodos, as equações de pressões acústicas passam a ser função do número de Mach, o que leva as funções de transferência a terem também termos multiplicados

ou somados a esse número.

Por exemplo, no método de Swinbanks, a função de transferência se altera para:

$$m_2(s) = - \frac{A}{c_0} (1 + M) \left(\frac{1}{1 - 0.5(e^{-st1} + e^{-st2})} \right)^2 \exp\left(- \frac{l + b}{c^0 (1+M)} s \right) D(s)$$

E no método de Munjal,

$$H_o = j \frac{Z s a e^{jk_c M l_i}}{Y \sin(k l_i)}, \text{ com } k_c = k_c(M)$$

Controlar um sistema com a presença de escoamento de fluido com a devida eficiência é difícil pois a impedância do alto-falante também se altera com a velocidade do ar - os controles adaptativos (a serem vistos a seguir) conseguem resolver esse problema. De qualquer forma, o controle de malha aberta ainda apresenta um desempenho razoável na presença de escoamento de fluido, como foi verificado por Poole e Leventhall em 1977, ao implementarem o sistema de Swinbanks com um escoamento de ar de 2,5 m/s. Nas frequências de centro, conseguiu-se até 15dB de atenuação:

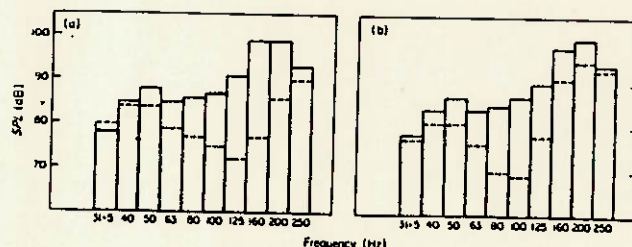


Figura 31 - Atenuação do sistema de Swinbanks sob presença de escoamento

a) frequência de centro de 170 Hz

b) frequência de centro de 100Hz

O escoamento foi proporcionado por um ventilador exaustor, instalado na saída do duto.

2.5.2 - Controles em malha fechada

2.5.2.1 - Introdução

Em todos os controles em malha aberta enunciados na seção 2.5.1, o sistema tinha que ser projetado para uma determinada "frequência de centro", que representava a frequência (baixa) do ruído propagante que mais precisava ser atenuada. A atenuação dos sistemas em malha aberta se fez expressiva para aniquilar tons-puros, o contrário acontecendo com ruídos de banda superior a 30 Hz, onde o poder de atenuação decrescia com o crescimento da banda.

Enquanto somente os controles de malha aberta eram constituintes do controle ativo, sua utilização somente se justificava em sistemas com ruídos propagantes do tipo tom-puro, encurtando demasiadamente o campo de aplicações do sistema. De qualquer forma, é muito importante que primeiro se passe pelo desenvolvimento de um controle em malha aberta, observando-se os fenômenos de geração, propagação e atuação sobre ondas, bem como os parâmetros interferentes no sistema, para depois implementar avanços no controle e nos atuadores em direção a corrigir tais deficiências.

Foi nessa linha que começaram a surgir os sistemas de controle em malha fechada, os quais, evoluíram rapidamente para sistemas adaptativos. Conforme enunciado na seção anterior, as principais causas da queda de desempenho do sistema em malha aberta se devem a:

- alteração na dinâmica dos alto-falantes e microfones com a frequência
- alteração no comportamento da onda de atuação
- alteração no desempenho dos alto-falantes conforme o ruído propagante
- alteração das características do sistema de controle
- não-monitoração do ruído residual à jusante, para que o mesmo aplicasse ações corretivas sobre a função de transferência

Nota-se, então, que não adianta simplesmente fechar a malha através da monitoração do ruído à jusante para se conseguir um ótimo controle - é preciso também estar levantando continuamente as características do sistema, e aplicando ações corretivas no controle. A teoria do controle adaptativo se encaixa perfeitamente a esses requisitos, e representou a "luz no fim do túnel" para o avanço das experiências de controle ativo, servindo como ponte para o surgimento do controle ativo disponível para o comércio.

O objetivo desta seção é já introduzir conceitos e desenvolvimentos da ciência do controle adaptativo e suas aplicações e desempenhos quando utilizado em sistemas de controle ativo de ruídos.

Apesar do objetivo deste trabalho cobrir apenas a implementação e análise de um controle ativo em malha aberta, achou-se conveniente já se introduzir aqui o que já se conhece sobre controles adaptativos pelas pesquisas feitas, de modo a acelerar o desenvolvimento do próprio estudo e dar também uma visão mais ampla do assunto de controles ativos.

2.5.2.2 - Teoria do controle adaptativo

O controle adaptativo é hoje muito utilizado em controles ativos de vibração e de ruídos acústicos, sendo que a maioria dos artigos encontrados versavam sobre o controle ativo de vibrações mecânicas. De qualquer forma, a analogia entre essas duas aplicações é fácil, e a teoria do controle adaptativo desenvolvida para uma pode ser diretamente estendida à outra.

O esquema básico de um controle adaptativo está mostrado abaixo:

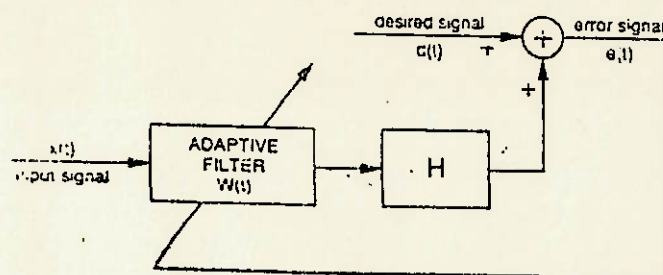


Figura 32- Diagrama básico de um controle adaptativo

Nessa figura, tem-se

$x(t)$: sinal detectado pelo sistema (por exemplo, pelo microfone), e que entra para o controlador

$d(t)$: sinal que se quer cancelar

$e(t)$: sinal residual (erro), detectado por um sensor

$W(t)$: função de transferência (ganho), instantânea, representando a ação de controle adaptativo propriamente dita

$H(t)$: função de transferência instantânea, representando o sistema envolvendo desde o conversor D/A do controle até o sinal $e(t)$ detectado pelo sensor de erro

O sistema de controle adaptativo deve, a cada instante, obter $W(t)$ a partir de uma monitoração "on-line" dos parâmetros do sistema (obtenção de $H(t)$), em conjunto com uma monitoração do erro residual $e(t)$, também "on line". Obviamente, para que o controle seja feito por circuitos digitais, a avaliação de $x(t)$ e $e(t)$ se faz em instantes de tempo discretos. A amostragem também deve ser discreta porque os valores de $W(t)$ são calculados iterativamente.

Seja $y(t)$ a saída do controlador adaptativo. Ela pode ser escrita como a convolução da entrada pela função de transferência para "I" instantes de tempo:

$$y(t) = \sum_{i=0}^{I-1} w_i(t)x(t-i) \quad (1)$$

Com isso, pode-se expressar o erro $e(t)$ por:

$$e(t) = d(t) + \sum_{j=0}^{J-1} h_j(t)y(t-j) \quad (2)$$

Precisa-se desenvolver agora uma forma de se obter os valores de $h_j(t)$ para os "j" instantes de tempo sucessivos. Para isso, existem diversos algoritmos iterativos desenvolvidos, e utilizados por diferentes pesquisadores. O que vai ser mostrado aqui, é o algoritmo "filtered-x", desenvolvido por B. Widrow e S.D. Stearns.

Usando-se as equações (1) e (2), pode-se reescrever:

$$e(t) = d(t) + \sum_{j=0}^{J-1} h_j(t) \sum_{i=0}^{I-1} w_i(t-j)x(t-j-i) \quad (3)$$

Agora, pode-se dividir o problema em duas partes:

- a) identificação do sistema - determinação de $h_j(t)$
- b) controle do sistema - determinação de $w_i(t)$

a) Identificação do sistema

A hipótese que se faz é que é possível se correlacionar o sinal de entrada $x(t)$ com a quantidade $d(t)$ que se quer anular. Representando $c_k(t)$ a função de transferência do

processo de detecção de $d(t)$, tem-se:

$$d(t) = \sum_{k=0}^{K-1} c_k(t) x(t-k) \quad (4)$$

Por simplicidade, utilizar-se-á a notação vetorial:

$$\Theta^T(t) = [h_0(t) \ h_1(t) \ \dots \ h_{J-1}(t) \ c_0(t) \ c_1(t) \ \dots \ c_{K-1}(t)]$$

$$\Phi^T(t) = [y(t) \ y(t-1) \ \dots \ y(t-J-1) \ x(t) \ \dots \ x(t-K+1)]$$

Com isso, pode-se reescrever o sinal de erro como:

$$e(t) = \Theta^T(t) \Phi(t)$$

Os valores correntes de $y(t)$ e $x(t)$ podem ser medidos facilmente no sistema, sendo que somente os valores do vetor $\Theta(t)$ não são conhecidos e precisam ser determinados. Essa determinação é iterativa e o critério de parada é uma minimização do erro $e(t)$ para aquela faixa de tempo amostrada (J,K) . A equação vetorial iterativa do método "filtered-x" é dada por:

$$e(t+1) = \Theta_e(t) + \frac{a \Phi(t)}{b + \Phi^T(t) \Phi(t)} X [e(t) - \Theta_e(t) \Phi(t)] \quad (5)$$

a - passo da iteração (recomenda-se $0 < a < 2$)

b - quantidade positiva de pequeno valor, para se evitar divisão por zero

b) controle do sistema

Após conhecidos os $h_j(t)$, determina-se pelo critério de LMS (Least Mean Square), os coeficientes de controle $w_i(t)$. A hipótese inicial que é feita é que os coeficientes $w_i(t)$ são invariantes no tempo em comparação com os $h_j(t)$, podendo-se rearranjar a equação (3) como:

$$e(t) = d(t) + \sum_i w_i \sum_j h_j(t) x(t-j-i) \quad (6)$$

Define-se $r(t)$ como:

$$r(t-i) = \sum_j h_j(t) x(t-i-j)$$

o qual representa a saída $y(t)$, se fosse invertido o controle, ou seja, $H(t)$ colocado antes de $W(t)$. Utilizando-se novamente a notação vetorial, pode-se escrever:

$$W^T(t) = [w_0 \ w_1 \ w_2 \ \dots \ w_{l-1}]$$

$$r^T(t) = [r(t) \ r(t-1) \ \dots \ r(t-l+1)]$$

Com isso, a equação de $e(t)$ fica:

$$e(t) = d(t) + W^T(t)r(t) \quad (7)$$

A equação iterativa para os termos desconhecidos de $W(t)$ é feita procurando-se minimizar o erro quadrático médio, e é dada por:

$$W(t+1) = W(t) - \mu e(t)r(t) \quad (8)$$

onde μ é uma quantidade positiva, em geral, inferior a 1.

Através da solução iterativa das equações (5) e (8), o controle adaptativo, a partir das medições feitas no sistema, procede à:

-- **Identificação do sistema:** Para o conjunto de J instantes de tempo em que se deseja avaliar a função de transferência H , e para K amostragens do sinal de entrada $x(t)$, ambas relacionadas no vetor $\Theta(t)$, o sistema resolve a equação iterativa para esse vetor, procurando minimizar $e(t)$. O vetor assim obtido, após um dado critério de parada, representa os valores da função de transferência H para os J instantes de tempo considerados, obtendo assim a identificação do sistema nesse intervalo.

-- **Determinação da ação de controle:** Iterativamente também, o sistema deve utilizar os valores do vetor $\Theta(t)$ para obter a ação de controle do sistema $W(t)$.

Nota-se então, que o algoritmo e o hardware de controle devem ser rápidos o suficiente para coletar os dados do sistema nos intervalos de tempo considerados (l, J, K) e resolver as equações iterativas, fornecendo as respostas para $H(t)$ para depois serem utilizadas para determinar $W(t)$, sem que ocorram nesse tempo, mudanças significativas no sistema, ou seja, mudanças nas variáveis do sistema com intensidade mensurável e frequência maior que a do ciclo de operação do controlador.

Os algoritmos acima apresentados representam uma alternativa, dentre muitas outras, de se conceber um sistema de controle adaptativo para, em tempo real, obter a função de controle $W(t)$, a partir de uma monitoração do sinal residual $e(t)$ e da obtenção das

características do sistema $H(t)$. Esse algoritmo foi implementado por S.C. Sommerfeldt e J. Tichy em meados de 1989 para um isolador de vibração, e os resultados serão apresentados a seguir. A analogia desse sistema para um sistema de controle ativo de ruídos é imediata, pois o fluxo de sinais em ambos o sistema e o objetivo (anular $e(t)$) são os mesmos.

O arranjo implementado está esquematizado na figura abaixo:

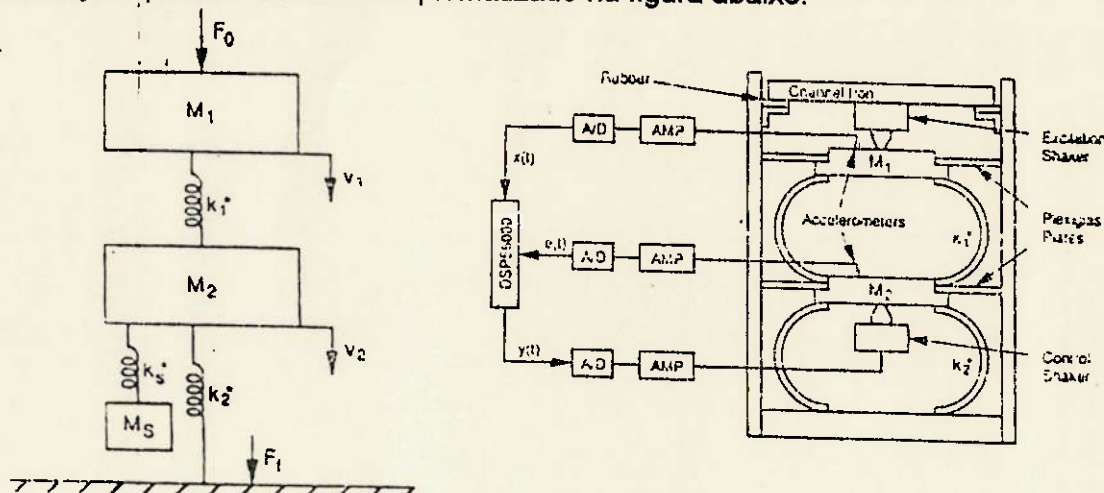


Figura 33 - Arranjo esquemático do sistema

Na figura acima, tem-se um "shaker" na parte superior que está simulando uma excitação externa qualquer - o sinal de comando desse "shaker", representa $d(t)$ no sistema.

O sinal de entrada para o sistema $x(t)$ é a monitoração do nível de vibração da massa m_1 , feito por um acelerômetro.

Deseja-se vibração nula da massa m_2 para que se tenha transmissão mínima de vibração para a base. Para isso, conecta-se outro acelerômetro à massa m_2 , para que o sinal $e(t)$ possa ser enviado ao sistema.

O sinal de saída $y(t)$ do sistema de controle é amplificado para comandar um "shaker" de controle, cuja função é anular a vibração de m_2 (note a semelhança com o controle ativo de ruídos). A função de transferência H engloba, no caso, o conversor D/A, o amplificador, o shaker e o acelerômetro conectado a m_2 .

Como elementos flexíveis, utilizaram-se semi-anéis devido à linearidade de sua rigidez. No controle, utilizou-se um Motorola DSP56000ADS signal processing board, com um cartão de I/O Ariel ADC56000.

Após o advento do controle adaptativo e das experiências de controle ativo de ruídos, está se utilizando muito o controle ativo para isoladores de vibração mecânica também, pois a alternativa do isolador dinâmico de vibração não se torna eficiente em baixas

frequências. Dessa forma, hoje procura-se combinar as duas formas de isolamento para se atingir a excelência em isolamento de vibrações.

O sistema entrou em funcionamento com todos os coeficientes desconhecidos iuais a zero, e notou-se que o tempo de convergência foi em torno de 700 ms para uma excitação de 50 Hz ao sistema. Foram feitas experiências também para excitações de maior frequência, e em todas, a atenuação do sistema ficou na faixa de 30 a 40dB:

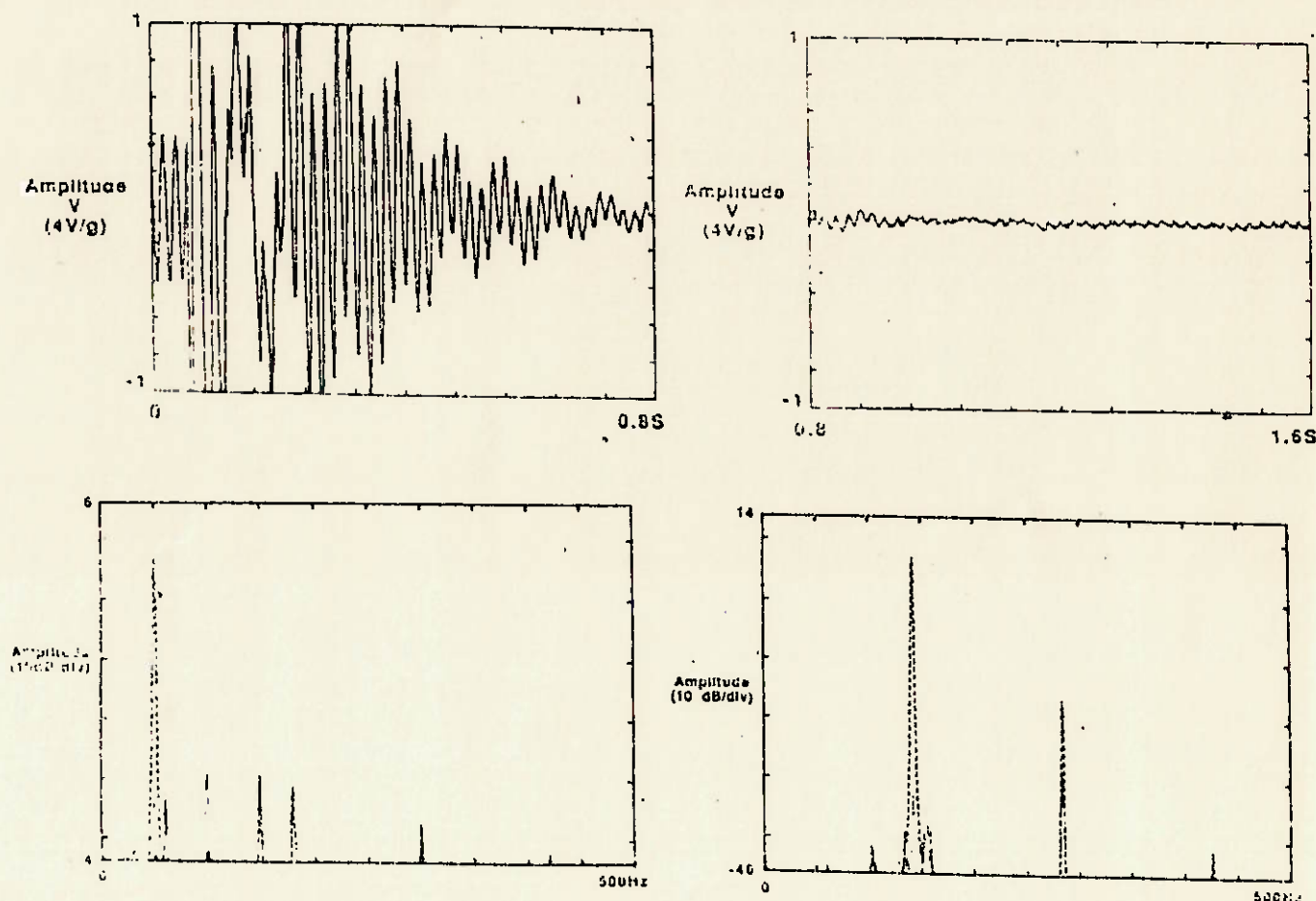


Figura 34 - Resposta transiente do sistema para frequência de 50 Hz e espectro de frequência da vibração de m_2 antes e depois da atenuação, para frequências de 50 Hz (a) e 142.5 Hz (b)

O sistema também foi ensaiado para vibrações de banda larga, de 0 a 200 Hz, e os

resultados obtidos foram:

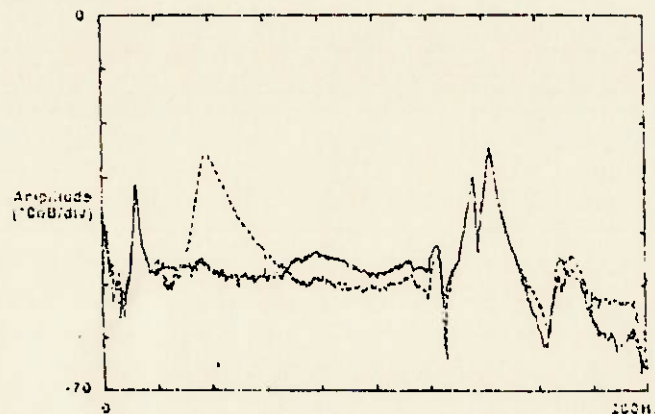


Figura 35 - Espectro de frequência do sistema para vibração de banda larga

Nota-se que para frequências superiores a 120 Hz, o sistema passa a não atenuar a vibração convenientemente porque o tempo de transmissão da vibração até o acelerômetro da massa m_2 passa a ser inferior ao tempo de transmissão do sinal $y(t)$ a esse acelerômetro, ocorrendo um problema de correlação entre os sinais. Não houve também atenuações expressivas em baixas frequências porque o "shaker" não foi capaz de possuir uma dinâmica estável nesse domínio.

O sistema foi testado também quanto à variação nos parâmetros. Num momento, dobrou-se o valor da massa m_2 e observou-se os efeitos (figura abaixo). O sistema, quase que imediatamente, ajustou-se à nova condição, anulando o erro $e(t)$.

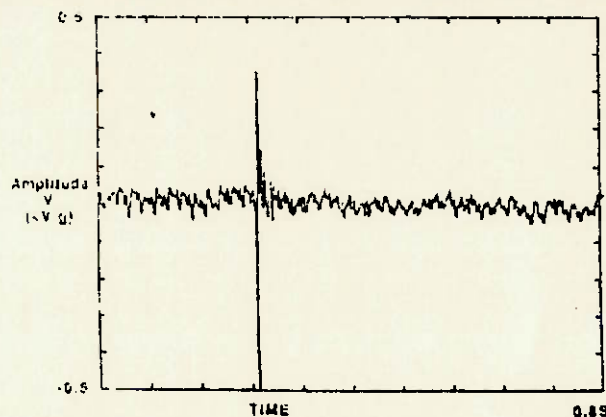


Figura 36 - Sinal de erro com o tempo dobrando-se a massa m_2 em um instante

2.5.2.3 - Controle adaptativo aplicado ao controle ativo de ruídos Análise do desempenho de um sistema existente

No item anterior foi apresentado um pouco sobre a teoria geral do controle adaptativo com o intuito de introduzir, a um primeiro nível, seus principais conceitos e uma forma de modelá-lo (dentre muitas outras existentes), dada a necessidade de se desenvolver um conhecimento na área para se obter contínuos avanços posteriores no estudo do controle ativo de ruídos. O que será apresentado neste item são as características básicas e a análise experimental de um sistema de controle ativo de ruídos em dutos, disponível comercialmente, e que emprega o controle adaptativo para excelência em desempenho.

O sistema a ser apresentado foi concebido por L.J. Eriksson e outros por volta de 1987, e representa o que há de mais avançado em controles ativos de ruídos até o momento, representando também um nível ao qual pretende-se chegar a médio prazo aqui no Brasil.

O controle adaptativo concebido por Eriksson utiliza o algoritmo recursivo LMS (Least Mean Square) similar ao apresentado anteriormente para se obter os coeficientes do elemento de controle adaptativo. Porém, de maneira um pouco diferente ao mostrado anteriormente, a identificação do sistema é feita através da produção de um sinal randômico (utilizando-se um gerador independente) que é lançado aos alto-falantes superposto ao sinal de comando que provém do controle.

Esse sinal randômico (em frequência) de pequena intensidade não interfere significativamente no ruído residual em termos de percepção sonora, mas o ruído detectado pelo microfone de erro através desse processo permite que o mesmo sirva de base para o acerto do controle adaptativo (o que é feito em qualquer sistema adaptativo comum), e também sirva para se obter as características dinâmicas do sistema compreendendo desde o conversor D/A até o microfone de erro (e seu pré-amplificador). Esse reconhecimento é feito por um outro controlador adaptativo especial, o qual, atualiza as características inerentes ao sistema referido contidas no controlador principal (veja figura abaixo).

Com essa técnica, a avaliação das características do sistema com o tempo é feita de uma forma mais precisa, refletindo mais realisticamente o desempenho do sistema

para auxiliar melhor na obtenção de coeficientes de controle ótimos para o controlador principal.

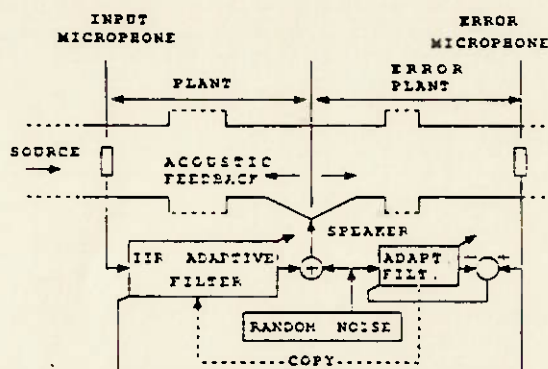


Figura 37 - Diagrama do sistema adaptativo de Eriksson

O sistema foi analisado para diversas condições de operação variáveis e os resultados serão mostrados a seguir. Como fonte geradora de ruídos, utilizou-se um alto-falante, comandado por um gerador de sinais.

a) Variação no posicionamento do microfone detector

Alimentando-se o alto-falante com um sinal tipo tom-puro, deslocou-se o microfone detector por 90 cm a uma velocidade de 2,5 cm/s, simulando não só uma alteração física da distância entre o microfone e os alto-falantes atuadores como também alterações na velocidade do ar e na própria temperatura do mesmo. Os resultados mostrados abaixo representam a evolução do espectro de frequência do sinal detectado no microfone de erro com o sistema ligado e desligado. Mostra-se também o espectro de frequência médio nesse período de tempo para o sistema ligado e desligado. Nota-se uma invariância das características de atenuação do sistema com o

posicionamento e velocidade do microfone detector: os níveis de atenuação permaneceram constantes e relativamente significativos.

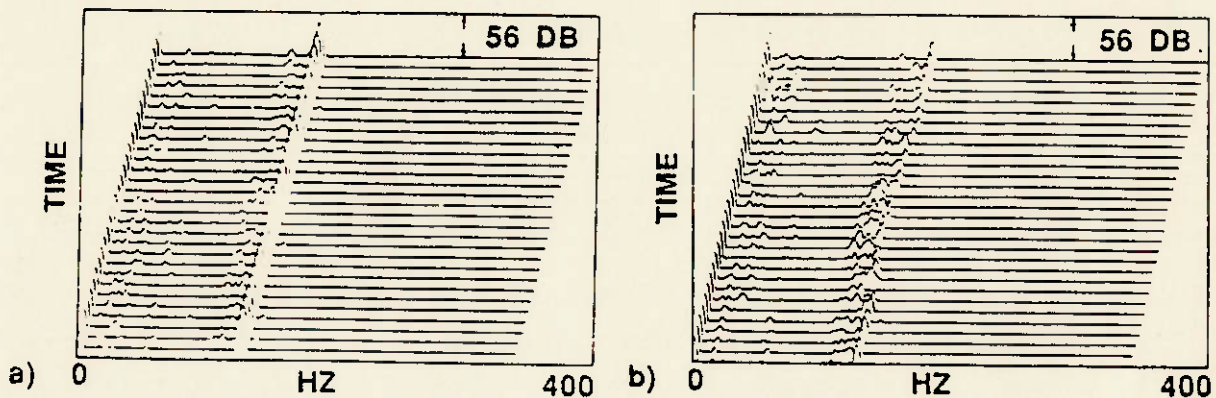


Figura 38 - Desempenho do sistema quanto a mudanças no posicionamento do microfone detector, em termos de espectros de frequência

b) Variação no posicionamento do microfone de erro

Fazendo-se o mesmo procedimento descrito anteriormente para o microfone de erro, chegou-se a resultados semelhantes, como mostram as figuras abaixo:

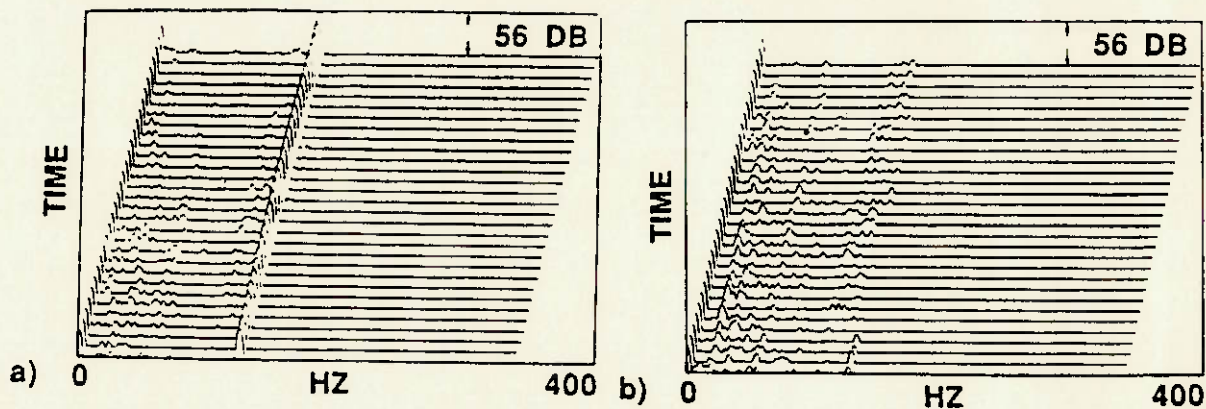
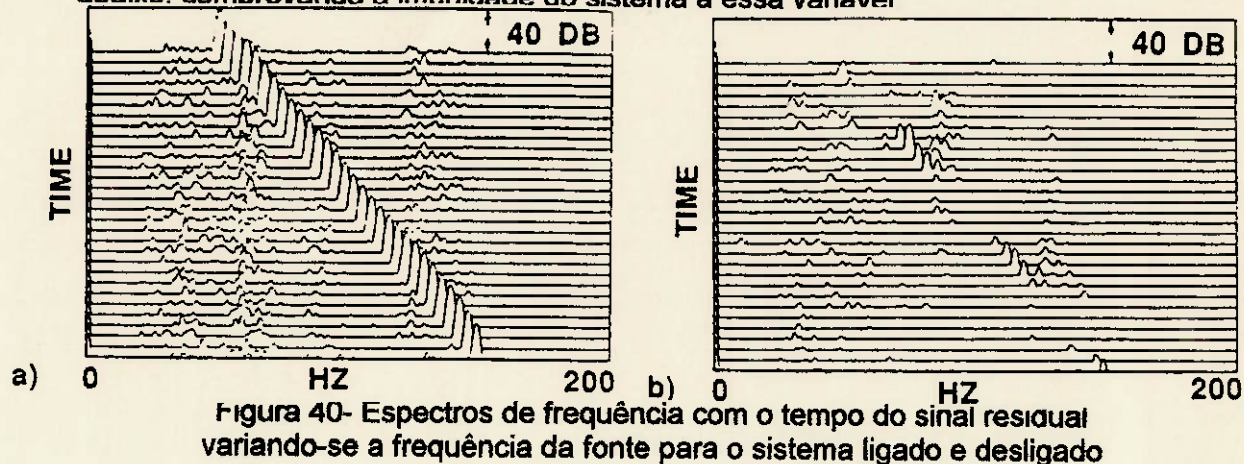


Figura 39 - Desempenho do sistema quanto a mudanças no posicionamento do microfone de erro

c) *Variações de frequência e tipo de fonte sonora*

Para o teste da imunidade do sistema a variações na frequência da fonte sonora, variou-se a frequência de comando do alto-falante gerador de ruídos de 150 Hz a 50 Hz gradativamente e observou-se os resultados em termos de espectro de frequência do sinal detectado no microfone de erro. Os espectros com o tempo estão mostrados abaixo, comprovando a imunidade do sistema a essa variável.



Mudou-se também a fonte sonora propriamente dita, utilizando-se um ventilador industrial ao invés de um alto-falante. Variou-se a velocidade do ventilador diminuindo-a e, em seguida, aumentando a mesma. Os resultados obtidos estão relacionados abaixo, notando que o ruído dos ventiladores é, em geral, de banda larga, e que o poder de atenuação do sistema cai da ordem de 40 dB para 25 dB, apesar de continuar ainda muito expressivo, e independente da frequência sonora e da vazão de ar.

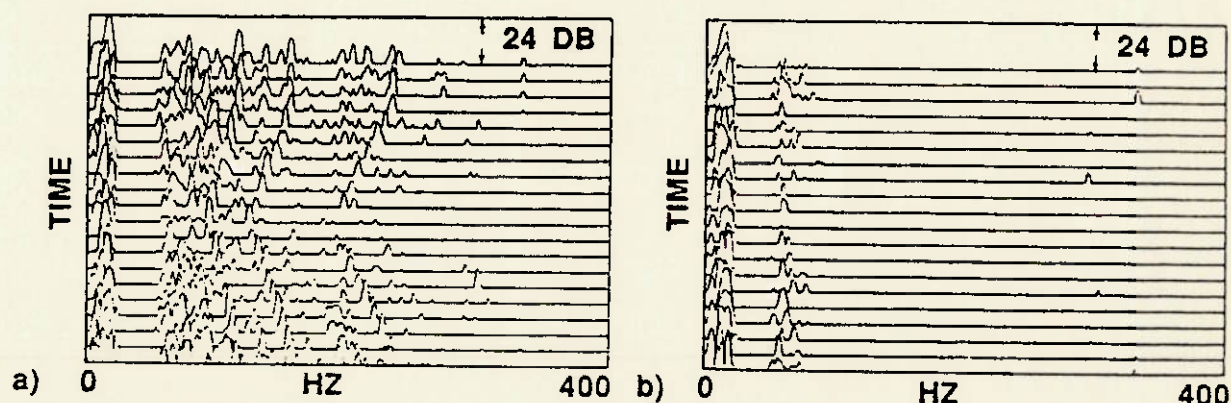


Figura 41 - Desempenho do sistema com um ventilador como fonte sonora tendo sua velocidade variando com o tempo

2.5.2.4 - Comentários

Nota-se, através do que foi brevemente exposto no item anterior, que o controle ativo de ruídos em dutos já se encontra em um nível avançado de desempenho, flexibilidade e robustez. Os sistemas de controle ativo de ruídos comercialmente disponíveis possuem esse tipo de princípio de funcionamento, sendo que essa arquitetura foi responsável por tornar os sistemas ativos de controle de ruídos viáveis comercialmente no fim da década de 80.

Atualmente, refinamentos sobre o sistema continuam sendo feitos para melhorar a performance do sistema, principalmente quanto aos seguintes aspectos:

- facilidade de instalação
- compacticidade
- preço e manufaturabilidade
- melhoria da atenuação de ruídos na faixa inferior a 30 Hz e superior a 400 Hz com o desenvolvimento de alto-falantes específicos e com melhores respostas em frequência

—— X ——

Pretende-se chegar a um nível de "know-how" similar aqui no Brasil para que se possa, a partir daí, abrir campo para pesquisas mais abrangentes sobre o controle ativo, não só em dutos, mas também em espaços tridimensionais.

Este trabalho tem o objetivo de dar o primeiro passo nessa direção através:

- 1) da identificação dos princípios do controle ativo e dos tipos de controle
- 2) da obtenção de dados sobre o que se fez sobre controle ativo e sobre qual o estágio atual do assunto no mundo
- 3) do estudo dos fenômenos acústicos em dutos
- 4) do estudo do controle ativo em malha-aberta para dutos
- 5) da aquisição de noções básicas sobre controle adaptativo
- 6) da implementação de um controle em malha-aberta em dutos e a observação de seus efeitos e fatores intervenientes como complemento experimental necessário para seguir em frente com o estudo. Esse será o enfoque da próxima parte.

3. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE ATIVO

3.1 - Introdução

Todo o estudo teórico apresentado anteriormente em detalhes foi realizado durante boa parte do projeto para que se tivesse uma base sólida para se iniciar, a partir daí, os trabalhos de implementação e aperfeiçoamento teórico e prático.

Os conceitos absorvidos em todo o material pesquisado permitem, a partir de agora, implementar um controle ativo experimental em um duto, com as seguintes características:

-- duto: longo e com extremidade aberta ao ambiente

hipótese: paredes do duto com rigidez infinita e o duto com primeiro modo de vibrar superior a 500 Hz

-- ruído propagante: tom-puro (frequência definida) na faixa de 100 a 300 Hz

-- onda no duto: plana, estacionária e senoidal

-- meio: ar ambiente à temperatura ambiente e com velocidade nula

hipótese: meio não-dispersivo

-- geração do ruído: alto-falante

-- detecção: microfones e pré-amplificadores

-- atuação: alto-falantes

-- controle: digital por microcomputador PC com placa A/D;D/A

As características do sistema e do ruído propagante permitirão que uma expressiva análise do fenômeno e dos fatores intervenientes no desempenho do sistema possa ser feita num primeiro momento, a qual servirá de base para futuros avanços.

3.2 - Características do sistema

3.2.1 - Hardware

3.2.1.1 - O duto experimental e o ruído propagante

O duto experimental deve ter os seguintes requisitos:

1-- ser longo o suficiente para englobar um certo número de períodos da onda estacionária que vai representar o ruído propagante. Como a onda é de baixa frequência (100 a 300 Hz), o comprimento total do duto deve ser de alguns metros

2-- ter paredes rígidas, ou seja, que não vibrem com o som no interior do duto, de modo a não gerar o fenômeno de reverberação, que comprometeria todo o desempenho do sistema. As paredes do duto devem simplesmente refletir passivamente e absorver parte do ruído.

3-- a geometria da seção do duto deve ser tal que proporcione o estabelecimento de uma onda plana no duto.

4-- pelo fato de o duto ter a sua extremidade à jusante aberta à impedância acústica do ambiente, a onda que vai se formar no duto já é estacionária, com frequência igual à frequência de operação.

5-- as fixações do duto devem permitir que a frequência de seu primeiro modo de vibrar seja consideravelmente superior às frequências envolvidas no sistema.

6-- o duto deve ser de fácil construção e deve permitir uma certa flexibilidade quanto à montagem de diferentes arranjos para os alto-falantes atuadores.

Para atender às condições 2,5 e 6, decidiu-se por construir o duto em madeira de espessura 20 mm pelo fato de a mesma ter uma rigidez considerável, aliada à facilidade de construção. Quanto ao comprimento, pode-se ter uma base através do cálculo da faixa de comprimentos de onda assumida pelo ruído propagante:

$$f=100 \text{ Hz} \rightarrow \lambda = v/f = 340/100 = 3,4 \text{ m}$$

$$f=300 \text{ Hz} \rightarrow \lambda = v/f = 340/300 = 1,1 \text{ m}$$

logo, o mínimo comprimento que o duto deve ter é de 4 m, por segurança.

Quanto à condição 3, uma onda propagante no duto é plana quando o seu comprimento de onda é consideravelmente maior que a dimensão característica da seção do duto: $\lambda \gg D$. Pelo fato de o duto ser de madeira, optou-se por adotar a seção de geometria quadrada de lado "l", logo, a onda propagante deve ter um comprimento de onda consideravelmente maior que o lado da seção quadrada. Como o comprimento de onda oscila na faixa de 1 a 4 m, deve-se ter, pelo menos, um quadrado de lado 25 cm para se garantir a onda plana no duto. O lado desse quadrado não deve também ser muito pequeno porque, como pretende-se flangear um alto-falante à montante do duto, se a seção for reduzida, o diâmetro do alto-falante será limitado - e já é de conhecimento que alto-falantes de pequeno diâmetro não possuem um desempenho muito satisfatório (plano) em baixas frequências.

Pesando-se esses fatores, adotou-se para a geometria da seção, um quadrado de lado $l=25 \text{ cm}$. Dessa forma, pode-se utilizar um alto-falante de 10 polegadas (que

possui desempenho mais que satisfatório em baixas frequências) para gerar o ruído e garantir-se uma onda plana no duto. Além disso, essa dimensão facilita a montagem e manipulação de elementos no interior do duto (como os microfones).

Para o comprimento do duto, pesando-se aspectos construtivos e práticos, e tendo em vista as faixas para os comprimentos de onda, decidiu-se por adotar um comprimento total de 5 m.

O projeto do duto está mostrado no desenho T-2, anexo 04 . O duto foi dividido em três módulos:

-- módulo montante: comprimento: 2m

contém o alto-falante gerador de ruídos e o microfone detector
as tábuas são pregadas e não há orifícios

-- módulo central: comprimento: 1m

foram desenvolvidos dois módulos centrais com madeiras parafusadas entre si, sendo um com orifícios de 6 polegadas (para os alto-falantes atuadores) em todas as suas laterais e o outro, sem. A proposta inicial (veja a seguir) é utilizar 4 alto-falantes atuadores, porém, deve-se ter uma certa flexibilidade no sistema de modo a permitir outros arranjos possíveis. Para isso, construiu-se um módulo sem orifícios, e, em ambos, as paredes são parafusadas, de modo a permitir uma fácil intercambiabilidade das laterais do módulo no duto. Outra razão para essa construção, é que todos os levantamentos de onda plana no duto a serem feitos são melhores se feitos sem a presença dos alto-falantes atuadores no meio do duto.

-- módulo jusante: comprimento: 2m, idêntico ao módulo montante

tem a função de alojar a onda estacionária (simulando duto longo) e acomodar o microfone de medição do ruído residual.

O módulo central comunica os módulos montante e jusante (veja desenho) através de flanges especiais, cuja função é dar boa montagem ao sistema e isolar o interior do duto do ambiente externo.

O duto foi construído, e o mesmo pode ser visto nas fotografias 2,3 e 8, anexo2. A fixação do duto foi feita de modo a elevar sua frequência de ressonância, apoiando-se inteiramente os módulos montante e jusante sobre mesas. O material do duto é de cedrinho aparelhado.

Para a geração do ruído, flangeou-se um alto-falante de 10 (dez) polegadas, 100 watts e de 8 ohms de impedância "ARLEN WOOFER 1010L" na entrada do duto, montado sobre uma placa quadrada de madeira compensada, sendo esta parafusada firmemente à boca do duto com 8 (oito) parafusos, evitando assim sua vibração (veja fotografia 5 , anexo 2).

O sistema de geração consiste de um gerador de funções com amplitude e frequência ajustáveis "WAVETECK model 22" , com terminal de saída em "T", permitindo assim a ligação do sinal ao alto-falante e sua monitoração simultânea com um osciloscópio.

Antes de ser lançado ao amplificador, o sinal do gerador de funções é amplificado por um amplificador de 55 W (rms) à bateria: "STK super mini 110", com volume e tonalidade reguláveis. O sinal do gerador é ligado à entrada de microfone do amplificador através de um adaptador também construído. O amplificador é alimentado por uma fonte simétrica estabilizada "DAWER FSCC-1503D", em 12 a 15 VDC.

O sistema completo está esquematizado no desenho T-1, anexo 4, e as fotografias 8 e 12 do anexo 2 ilustram a instalação "as-built".

3.2.1.2 - As instalações de detecção, controle e atuação

Detecção

Na construção do sistema de detecção, procurou-se selecionar os melhores produtos em termos de microfones e amplificadores, e que atendessem às exigências já mencionadas na seção 2. O ideal seria utilizar microfones de medição (em particular, os fabricados pela B&K) piezoelétricos, com os respectivos pré-amplificadores de carga, garantindo-se assim resposta em frequência e sensibilidade desejadas.

Porém, tal equipamento tem um custo superior a US\$ 2000,00, o que inviabiliza sua aquisição para a implementação de um controle em malha aberta. Deve-se ressaltar, porém, que na implementação de um controle adaptativo, a aquisição de tais microfones se faz necessária.

Devido à falta de verbas, o que se conseguiu de microfones foram três microfones dinâmicos de áudio "AKAI", emprestados do IPT, e cujo sinal pode ser então amplificado por amplificadores de áudio comuns (os mais baratos). Os problemas que podem aparecer nas realizações práticas quando se utiliza este tipo de microfone, é quanto à sensibilidade e qualidade do sinal em baixas frequências.

Dois microfones são utilizados na experiência: um para medir o ruído à montante, e outro à jusante do atenuador. De modo a terem sua altura e direcionalidade ajustáveis, os microfones foram montados em um pedestal especial, constituído de conexões rosqueadas de PVC (veja fotografias 1 e 5, anexo 2). A base desse pedestal foi montada sobre um suporte de madeira, que irá deslizar no interior do duto.

O fato de o duto ser longo torna difícil manipular e posicionar os microfones em seu interior. Para solucionar esse problema, foram criados e construídos dois sistemas de barbantes que permitem o deslocamento do microfone na direção longitudinal do duto, em ambos os sentidos (veja desenho T-4, anexo 4 e fotografia 5) através de um comando manual na extremidade à jusante. Através da colocação de marcações nos barbantes e medições de posicionamento, é possível determinar a posição da ponta do microfone dentro do duto, com relação aos alto-falantes.

Os fios dos microfones atravessam o duto em sua parte superior, sendo conectados aos seus respectivos amplificadores. O sinal do microfone, bem como seu "plug", é do tipo monoaural, e pode ser conectado a qualquer amplificador de áudio. Para o microfone de detecção do ruído, utilizou-se o mesmo amplificador do sistema de geração: "STK super mini 110", que é alimentado por uma fonte estabilizada "DAWER FFCC-1205", de 12 a 15 V. Por problemas de verba, não foi possível comprar mais um amplificador para o microfone de erro, tendo-se que utilizar um amplificador particular (aparelho de som residencial portátil c/ função "karaokê") "GRADIENTE CS-5" - esse aparelho permitirá a gravação do som atenuado em fita cassete.

As saídas desses amplificadores são, então, conectadas à entrada do microcomputador (veja desenho T-3, anexo 4 e fotografias 7,8 e 12), onde também há um adaptador com terminais "banana", para a transmissão do sinal ao micro, e coaxial para monitoração dos sinais no osciloscópio.

Atuação

Para gerar o ruído de atuação tipo onda plana em uma grande faixa de frequências, colocou-se quatro alto-falantes de 6 (seis) polegadas no módulo central, de potência de pico 50W e impedância de 8 (oito) ohms "ARLEN 6AFP/B". Os alto-falantes foram diretamente flangeados com parafusos às paredes do duto.

O sinal do computador é amplificado por um amplificador "STK super mini 110", alimentado por uma fonte simétrica estabilizada de 12 a 15 VDC "DAWER FSCC-1503D", de maneira semelhante ao sistema de geração de ruídos. Há um adaptador que permite conectar o sinal do micro ao amplificador e também monitorar o sinal pelo osciloscópio (veja desenho T-3, anexo 4 e fotografias 7,8 e 12, anexo 2).

Controle

O controle, como visto na seção 2, deve ser em tempo real, e portanto, o problema de velocidade é crítico. Logo, utilizar-se-á um computador "CompuAdd mod. Add 486", padrão PC/AT 486 DX, com clock de 33 Mhz e equipado com uma placa A/D;D/A "Lynx CAD 1236".

A placa de interface utilizada consiste de um conversor A/D de 12 bits de 16 canais, com entradas programáveis de -100 a 100 mV até -10 a 10 V, podendo ser bipolares ou unipolares, simples ou diferenciais. A placa possui três timers internos programáveis, caso seja necessária a realização de operações temporizadas, e possui também o recurso de interrupção, que pode ocorrer tanto após a leitura de todos os canais, como ao final da contagem de um timer.

O conversor A/D permite leitura dos canais em dois modos: simples e "burst" . No primeiro caso, um único canal programado é lido, e no segundo é feita uma varredura automática de "n" canais ($n \leq 16$). Há uma pilha (FIFO) interna na placa para armazenar os dados lidos nos canais.

A placa possui total interface com linguagens de alto-nível (PASCAL, C , BASIC), podendo ser programada e utilizada com programas executados nessa linguagem. O tempo de conversão mínimo é de 17 μ s e o máximo é de 28 μ s.

Está incorporada à placa uma expansão que corresponde a um conversor D/A de 2 canais de 12 bits. As saídas podem ser programadas através de "jumpers" para serem em binário ou complemento de 2; unipolar ou bipolar; e faixas de tensão de -5 a 5 V ou -10 a 10 V.

Acessórios

Como acessórios do sistema, está se utilizando um osciloscópio digital "GOULD DSO 400" de dois canais coaxiais, para a análise dos sinais, e também um filtro modular passa-baixa/ passa-banda, com frequência de quina regulável "ROBOTRON 01014", alimentado ppor fonte "ROBOTRON 04024".

O terceiro microfone cedido pelo IPT é utilizado para testes dos alto-falantes e amplificadores, sem que se precise retirar os microfones de medição do interior do duto.

3.2.2 - O software de controle

Foram implementados dois softwares diferentes para se observar o fenômeno da interferência sonora no módulo central: o primeiro, consiste na simples inversão e manipulação do sinal coletado de modo a se produzir no módulo central uma onda de fase invertida e mesma amplitude à onda presente no local; o segundo, consiste na aplicação da função de transferência obtida por Munjal e Eriksson, e apresentada no desenvolvimento teórico.

Os softwares foram implementados na linguagem PASCAL, utilizando-se o Turbo Pascal versão 5.5 no micro-computador mencionado anteriormente. Uma grande parte dos programas é dedicada à programação adequada da placa A/D e D/A para a coleta de dados do sistema e envio de dados ao mesmo.

Em ambos os softwares, o sinal provindo do sistema (e conectado a um dos canais da placa, em geral, os canais 0 ou 1) é amostrado com uma dada frequência de amostragem definida pelo usuário no início do programa: essa é a única entrada de ambos os programas. Para uma dada frequência de amostragem, programa-se um timer interno da placa (timer0) para fazer contagens nessa frequência, que provoca uma interrupção sempre ao final da contagem. Dessa forma, como o timer reinicia a contagem automaticamente, as interrupções ocorrem sempre com uma frequência igual à frequência de amostragem desejada. A partir daí, a rotina de tratamento de interrupção possui, como primeiro comando, a leitura do(s) canal(is) considerado, amostrando a entrada na frequência pedida.

A diferença entre os dois programas está no tratamento que o procedimento de tratamento de interrupção dá a esse sinal amostrado. Nos demais pontos, os softwares são idênticos.

O funcionamento dos programas é dado como segue:

- 1- Tela de apresentação e leitura da frequência de amostragem
- 2- Apresentação dos dados do sistema (constantes definidas no programa)
- 3- Programação da placa: canais, modo de conversão, timer, interrupção

De acordo com comandos pré-definidos de escrita e leitura em posições de

memória, é possível:

- a) programar as entradas analógicas (canais) da placa para serem unipolares/bipolares, diferenciais/absolutas, bem como especificar a faixa de tensão na entrada (ganhos)
- b) definir se a conversão A/D será feita em modo "burst", ou seja, varrendo-se todos os canais desejados a cada leitura e armazenando os dados em uma pilha, ou modo simples (um canal só, a escolher)
- c) programar o timer (qual o timer (a placa tem 3) e o quanto ele vai contar)
- d) programar a interrupção (se vai ocorrer após o fim da contagem do timer, ou após o término de um "burst")

Para maiores detalhes, pode-se consultar as listagens dos programas em anexo, ou o manual de referência técnica da Lynx CAD 1236.

No caso do programa, a placa está programada para:

Canais: 0,1 e 2 , absolutos, bipolares e na faixa de -10 a 10 V

Conversão: em "burst", varrendo a cada leitura os canais 0, 1 e 2

Interrupção: ao final da contagem do timer 0

4- Habilitação de interrupções (ativa as interrupções)

5- Entra em um procedimento chamado "FacaAlgo", que consiste de um loop vazio que funciona até que o usuário pressione uma tecla. Nesse loop, as interrupções ocorrem na frequência desejada, a cada término da contagem do timer, desviando a execução temporariamente para a rotina de tratamento de interrupção "Trataint", e retornando ao referido procedimento após o tratamento (amostragem e aplicação do controle).

6- Desabilitação das interrupções

7- Encerramento

Entrando-se em detalhes no tratamento da interrupção de cada software, tem-se:

Software 1: Simples inversão do sinal (Programa Aqdata1.PAS)

A rotina de tratamento de interrupção lê o sinal na entrada e aplica devidos atrasos (através da função "Delay" do Pascal) e inverte o sinal, de modo a se ter um sinal de mesma amplitude e invertido nos alto-falantes atuadores, em relação ao som existente no local.

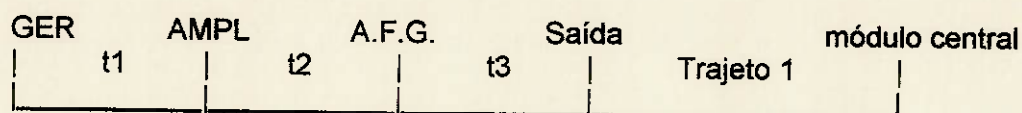
Para se saber qual o atraso que se deve dar, o seguinte estudo de tempos foi feito:

Tentar-se-á produzir o efeito de interferência destrutiva sonora utilizando-se o sinal do gerador de funções, alimentando tanto o alto-falante gerador, como a entrada

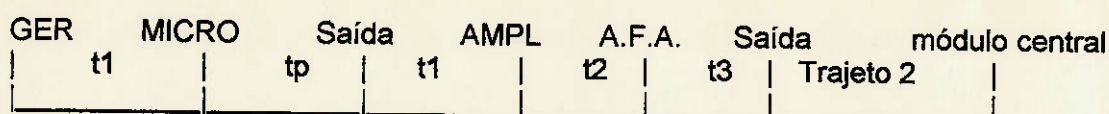
do computador (simulando o sinal coletado pelo microfone). Não está se usando o microfone neste caso, pois tem-se um problema de instabilidade: o sinal do microfone alimenta o alto-falante, que alimenta o microfone, somado ao sinal já existente no duto, e assim por diante, elevando indefinidamente o sinal do microfone, e estourando consequentemente o limite de tensão da placa. Portanto, ao se utilizar o gerador de funções simulando o microfone, está se obtendo a condição ideal de que o ruído dos alto-falantes atuadores não é realimentado ao microfone.

Com essa instação, tem-se os seguintes diagramas de tempos para os dois caminhos do sinal do gerador de funções:

Caminho do sinal do gerador de funções para gerar o ruído, no tempo:



Caminho do sinal do gerador de funções, passando pelo controle, até atingir o módulo central, no tempo:



Onde, tp - tempo do programa (que se quer saber)
 Trajeto i - Tempo de percurso do som no trajeto i
 GER - Gerador de funções
 AMPL - Amplificador
 A.F.A - Alto-falantes atuadores
 A.F.G. - Alto-falante gerador

Com isso, o tempo para o sinal chegar ao mesmo ponto pelos dois caminhos é:

Caminho1) $t1+t2+t3+Trajeto1$

Caminho2) $t1+tp+t1+t1+t2+t3+Trajeto 2$

Então,

$$\Delta t = (Trajeto2 - Trajeto1) + 2t1 + tp$$

Deve-se achar tp para a diferença de tempos entre os trajetos Δt ser nula. Logo, tem-se:

Trajeto 2 = 0 (aprox., pois alto-falantes atuadores relativamente próximos da zona de interferência)

$$Trajeto 1 = \frac{2,5 \text{ m}}{340 \text{ m/s}} = 7,35 \text{ ms}$$

O termo $2t_1$ é da ordem de décimos de ms, e pode ser ajustado na prática, através da análise dos sinais no osciloscópio.

Portanto, tem-se que o programa deve atrasar o sinal de aproximadamente: $t_p = 7,35\text{ms}$, e inverter o sinal. Dependendo do período escolhido para onda, esse tempo será reduzido, pois engloba períodos inteiros.

O hardware implementado permite que se monitore o sinal com o osciloscópio em cada ponto dos diagramas acima. Logo, é possível ajustar na prática o melhor atraso para o programa em centésimos de ms.

Software 2: Aplicação da função de transferência (Programa Scarad1.PAS)

A função de transferência apresentada está na forma contínua, e deve ser discretizada através de técnicas de controle discreto (transformada z), transformando-a em equação de diferenças.

A função de transferência apresentada foi: $H(s=j\omega) = \frac{Z S}{c} \left(\frac{e^{-j\omega l/c}}{1 - e^{-2j\omega l/c}} \right) = \frac{Y(s)}{X(s)}$

Fazendo-se $K_1 = S/c$; $K_2 = l/c$; $K_0 = Z$ e discretizando-se a equação acima através da analogia $z = e^{sT}$ (T -período de amostragem), tem-se:

$$H(z) = \frac{-K_0 K_1 z^{-K_2/T}}{1 - z^{-2K_2/T}} = \frac{Y(z)}{X(z)} \Leftrightarrow Y(z) (1 - z^{-2K_2/T}) = (-K_0 K_1 z^{-K_2/T}) X(z)$$

Anti-transformando-se a equação acima, chega-se a:

(k - iteração (kT) ; $y[k]$ - saída ; $x[k]$ - entrada)

$$y[k] = y[k - 2K_2/T] - K_0 K_1 x[k - K_2/T]$$

que representa a equação de diferenças a ser implementada na rotina de tratamento de interrupção. Nota-se que os atrasos são funções do período de amostragem T , e que tão maiores serão quanto maiores forem as frequências de amostragem. É certo que o ideal é ter uma frequência de amostragem mais alta possível para se recuperar bem o sinal entrado, mas isto está limitado à capacidade do computador em termos de velocidade e memória, pois para uma alta frequência de amostragem, alto também será o número de valores que terá que se armazenar. A compatibilização desses dois pontos antagônicos deve ser feita na prática.

A listagem comentada do programa está no anexo 1. No anexo 1, encontra-se também a listagem do procedimento de tratamento de interrupção do software 1, pois o resto do programa é idêntico ao software 2.

3.3 - Procedimento experimental

O procedimento experimental consistiu nas seguintes etapas:

- 1-- Montagem da instalação e teste individual de cada equipamento
- 2-- Produção e detecção da onda no duto, com o intuito de:
 - a) analisar o sinal detectado pelos microfones detetor e de erro
 - b) avaliar o desempenho dos microfones
 - c) avaliar as condições da sala onde está se realizando a experiência
 - d) avaliar o funcionamento dos alto-falantes
 - e) fazer o levantamento da onda sonora presente no duto quando o alto-falante gerador está ligado
 - f) idem, alto-falantes atuadores
- 3-- Aplicação do software 1 e análise
- 4-- Ajustes sobre o software 1
- 5-- Aplicação do software 2 e análise
- 6-- Ajustes sobre o software 2

3.4 - Resultados e Comentários

3.4.1 - Desempenho dos microfones

Os microfones dinâmicos utilizados apresentam uma direcionalidade adequada no que se refere às exigências do controle ativo. Variando-se a direção do microfone dentro do duto, o sinal pouco se alterou.

Quanto à sua resposta em frequência, o microfone teve um desempenho regular: o sinal detectado pelo mesmo somente não apresenta distorções para frequências superiores a 170 Hz, tendo ainda distorções toleráveis na faixa de 100 a 170 Hz. Acima de 170 Hz, a onda plana senoidal é perfeitamente detectada pelo microfone,

como pode-se ver na figura abaixo:

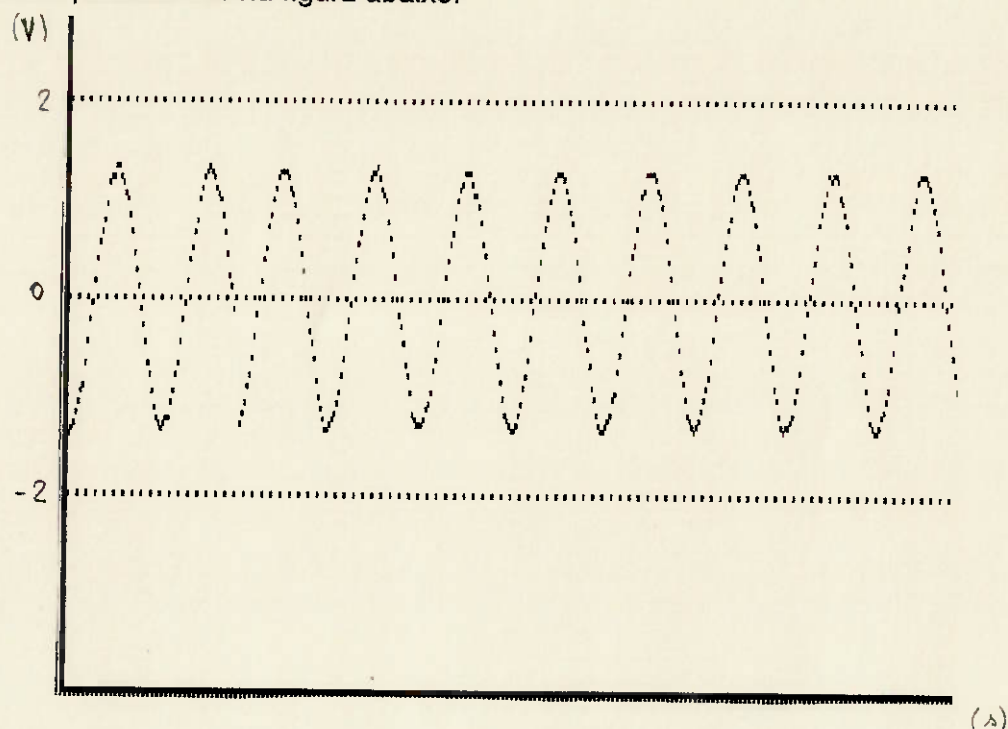


Figura 42 - Onda detectada pelo microfone e aqisitada pelo computador

O espectro de frequência dessa onda foi também levantado:

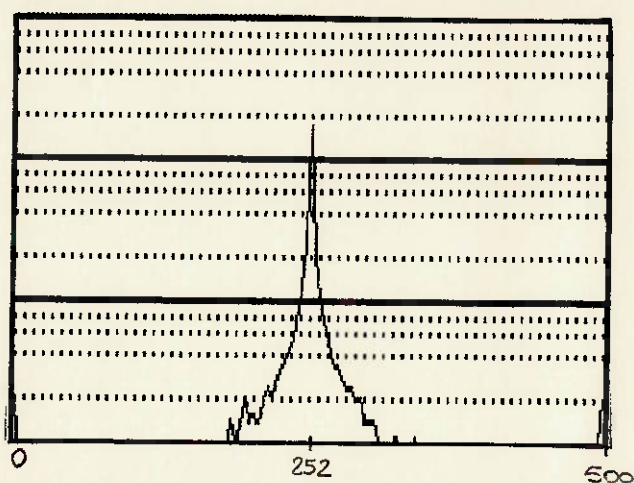


Figura 43 - Espectro de frequências da onda detectada pelo microfone

Disso, conclui-se que, para a implementação de um sistema mais robusto, esses microfones não atendem pois a sua distorção em baixas frequências é notável.

O maior problema dos microfones utilizados está na baixa sensibilidade em baixas frequências (inferiores a 350 Hz). Não se consegue detectar no microfone (através da monitoração de seu sinal no osciloscópio) sensíveis alterações no nível de ruído dentro do duto, tornando difícil a análise e a documentação de uma eventual atenuação. Além disso, a reprodução da amplitude real da onda pelo microfone

detetor (essencial ao controle) não se faz possível, reduzindo em muito a eficiência do sistema.

Os amplificadores utilizados apresentaram um bom desempenho para o fim ao qual se prestaram.

A solução para esses problemas seria adotar microfones piezoelétricos, com pré-amplificadores adequados (que são os microfones realmente utilizados em controles ativos, devido ao seu bom desempenho em baixas frequências).

Tanto o microfone detetor como o de erro apresentaram as mesmas características.

3.4.2 - Desempenho dos alto-falantes

Os alto-falantes e seus amplificadores conseguiram ter um bom desempenho (sem distorções notáveis) para frequências superiores a 120 Hz. Novamente, deve-se ter alto-falantes especiais, se deseja-se aumentar a robustez do sistema. De qualquer forma, na faixa acima mencionada, seu comportamento é satisfatório, apesar da precoce saturação ao aumentar-se o volume.

A instável resposta em frequência tanto dos alto-falantes como dos microfones não permitiu o levantamento do diagrama de Bode para ambos: as amplitudes do som gerado pelo alto-falante e do sinal detectado pelo microfone variam demasiadamente com a frequência, e esse efeito somado torna impossível a separação de amplitudes. Pode-se apenas concluir que o diagrama de Bode de ambos não é plano na faixa de 100 a 1000 Hz, e um hardware desse tipo só serve para sistemas de atenuação de tons-puros.

O que deu para se medir foi o atraso total do sistema de geração-deteção, descontando-se o tempo de percurso da onda sonora. Esse atraso esteve em torno de 2,5 ms para a faixa de frequências de 120 Hz a 300 Hz.

3.4.3 - A análise da sala

A sala foi um dos elementos que, acredita-se, mais influiu negativamente no desempenho do sistema de controle ativo. A construção da sala faz com que seu poder de reverberação sonora seja extremamente elevado, mesmo com as portas e janelas abertas. Com isso, todo o ruído dos alto-falantes que é irradiado para fora, somado ao ruído que passa pelas paredes do duto e que sai pela jusante, forma uma nítida onda estacionária na sala, que acaba preenchendo o interior do duto com ruído sonoro indesejável e que torna impraticável o controle ativo permanente à jusante. No fundo, o ruído gerado tanto pelo alto-falante gerador

como pelos atuadores que é irradiado para fora, retorna ao interior do duto, aumentando a "poluição sonora", e tornando difícil o controle

Convém ressaltar que, em condições experimentais de controle ativo, a sala utilizada é anecóica, e em aplicações reais, o ambiente onde o controle ativo se situa é totalmente dispersivo (em geral, ele fica ao ar livre).

A solução para esse problema seria montar uma sala anecóica para realizar o experimento, o realizá-lo em um ambiente altamente dispersivo. Porém, testes experimentais exigem muitos equipamentos e instalações elétricas que não podem ficar expostos ao ambiente aberto.

Para minimizar esse efeito, construíram-se caixas acústicas (veja fotografias 10 e 11, anexo 2) para tentar "abafar" o ruído dos alto-falantes lançado à sala. Como o ruído é de baixa frequência e as caixas não foram projetadas para tal frequência, o que se conseguiu de abafamento foi pouco, e tais caixas influíram negativamente no desempenho sonoro dos alto-falantes (maiores distorções em baixas frequências)

3.4.4 - Levantamento na onda no duto

Movimentando-se os microfones detector e de erro dentro do duto, foi possível levantar a característica da onda gerada no duto em termos de sinal elétrico do microfone. O sistema de posicionamento dos microfones não é muito preciso, bem como sua sensibilidade, portanto, os dados apresentados são aproximados.

Os resultados estão em tabelas no anexo 3. Os ensaios foram feitos com o duto tendo 6m de comprimento (adicionou-se o módulo central auxiliar ao duto) e colocado em diagonal na sala (veja desenho T1, anexo 4), com o intuito de diminuir o efeito de reverberação.

Esses ensaios permitiram escolher a melhor frequência de trabalho: $f=252$ Hz, pois é a frequência na faixa de 120 a 300 Hz que apresenta o anti-nó de maior amplitude no módulo central (zona de interferência).

O levantamento foi feito para essa frequência tanto para os alto-falantes atuadores em operação como para o gerador, e também para a extremidade do duto fechada ou aberta. Os resultados estão apresentados em tabelas e gráficos do anexo 3.

Dos resultados, pode-se observar que:

-- A extremidade fechada ou não, provoca alterações apenas no módulo jusante, deslocando os nós de aproximadamente 15 cm (alteração das condições de contorno)

- Em termos de atenuação de ruídos, não há nenhuma vantagem relevante em se tampar a extremidade
- O efeito de reverberação da sala nos primeiros 2/3 do duto se faz presente, aumentando-se os anti-nós e instabilizando a onda na região central
- Ocorre uma queda no nível sonoro no módulo central quando os alto-falantes atuadores estão desligados e o gerador ligado. Uma razão provável para esse fenômeno pode ser a absorção passiva do cone dos alto-falantes atuadores, drenando parte da energia sonora para o ambiente. Conclui-se, então, que um movimento adequado dos alto-falantes pode diminuir ainda mais esse nível sonoro, aumentando a atenuação. Essa absorção passiva representa uma atenuação de 13dB.
- Observando-se as formas de onda na zona de interferência no gráfico 1 (anexo3), nota-se que podem haver problemas de eficiência do controle ativo, pois para essa frequência existe um anti-nó a 2,20m do alto-falante gerador quando os atuadores estão ligados, não existindo um correspondente no caso de somente o alto-falante gerador estar ligado. Esse ruído residual pode comprometer o desempenho do sistema em regime.

3.4.5 - A aplicação do software 1

Ao aplicar-se o software 1 para atenuar o ruído, observou-se um outro grande problema do sistema: a velocidade do computador. Não se consegue amostrar com frequências superiores a 1500 Hz se utiliza-se um atraso de apenas 1 ms na rotina de tratamento de interrupção. Sendo que somente frequências de amostragem superiores a 5000 Hz conseguem recuperar satisfatoriamente o sinal para a frequência de trabalho de 252 Hz, e ainda sendo inviável reduzir esta frequência, conclui-se que não se pode, com as instalações atuais, conseguir uma interferência perfeita.

Felizmente, o tempo de atraso de programa, para $f=252$ Hz, é aproximadamente igual a dois períodos de onda sonora no duto. Logo, se nenhum atraso for feito, pode-se conseguir ainda uma boa atenuação.

Aplicando-se o software, obtiveram-se atenuações de até 15 dB, que somadas à atenuação passiva de 13 dB, resulta até 28 dB de atenuação. O problema é que tal atenuação é transitória, durando cerca de 2 a 3 segundos, e confirmando o que já foi posto anteriormente que o efeito de reverberação da sala, somado à incompatibilidade de anti-nós na zona de interferência, produz um ruído indesejável que preenche rapidamente o módulo jusante. A baixa sensibilidade do microfone

não permite avaliar o quanto de ruído preenche efetivamente o módulo jusante. Em termos, pode-se dizer que a interferência e a atenuação foram observadas.

3.4.6 - Aplicação do software 2

Os problemas de velocidade do micro-computador não permitiram o teste do software 2, pois o processo de armazenagem de valores de iterações anteriores para serem utilizados na equação de diferenças demanda um certo tempo computacional que, somado com o problema de quanto maior a frequência de amostragem, mais valores terem que ser armazenados, faz com que tenha que se utilizar frequências de amostragem da ordem de 2000 Hz, que não amostram convenientemente o sinal de entrada, invalidando o controle.

A solução para esse problema não aparece a curto prazo. Pode-se tentar implementá-lo em assembler para se aumentar a velocidade, mas a solução mesmo é utilizar um I/O Board, cuja velocidade é deveras superior.

3.5 - Comentários finais

Pode-se dizer que já se deu um grande passo em direção ao domínio da ciência do controle ativo. Em tão pouco tempo, o volume de informações teóricas e práticas assimilados sobre o assunto permitem a continuação do estudo em busca de resultados melhores e maior aprendizado sobre o fenômeno.

A partir de agora, deve-se procurar caminhar em direção da solução dos problemas (essencialmente de hardware) através das possíveis causas acima enumeradas. O mais importante de toda essa implementação prática foi mostrar que ainda existe muito o que se estudar, implementar e analisar sobre o assunto, pois sua complexidade é notável e o número de fatores intervenientes é muito maior do que se esperava.

Resolvendo-se esses problemas para a solução do sistema em malha aberta para tom puro, pretende-se seguir, então, em direção ao controle adaptativo. Pretende-se levar isso ao programa de mestrado no assunto, como continuação deste importante trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros e Artigos

- 1)M.L. Munjal, L.J. Eriksson, "An analytical , one dimensional, standing-wave model of a linear active noise control system in a duct"- JASA, 84(3) , 1988 , p. 1086-1093
- 2)R.H. Nichols, "Active silencer for low frequency noise" - JASA, 66(4), 1979, p. 1215
- 3)J.C. Burgess, "Active adaptive sound control in a duct: a computer simulation"- JASA, 70(3), 1981, p. 715-725
- 4)L.J. Eriksson, M.C. Allie, C.D. Bremingan, "Active noise control on systems with time-varying sources and parameters"- Sound and Vibration - July 1989
- 5)Bollini, C.G. - "Mecanica,Ondas,Acustica,Termodinamica", 1975 ,p. 353-369
- 6)Fischer, F.A. - "Fundamentals of Electroacoustics", 1955
- 7)Olson, H.F. - "Elements of acoustical engineering", 1940
- 8)M.J.M. Jessel, G.A. Mangiante, "Active sound absorbers in an air duct", JSV, 23(3), 1972, p. 383-390
- 9)M.C.J. Trinder, P.A. Nelson, "Active noise control in finite length ducts"- JSV, 89(1), 1983, p. 95-105
- 10)M.O.Tokhi, R.R. Leitch, "Design of active noise control sytems operating in three-dimensional, non-dispersive propagation medium" - Noise Control Engineering Journal, Feb 1991, v. 36, #1, p. 41-53
- 11)K. Eghtesadi, H.G. Leventhall, "Active attenuation of noise-the monopole system"- JASA, 71(3), 1982, p. 608-611
- 12)M.A. Swinbanks, "The active control of sound propagation in long ducts"- JSV, 27(3), 1972, p. 411-436
- 13)A.M. Goldman, W.E. Gossman, P.C. Friedlander, "Reduction of sound levels with antinnoise in MR imaging"- Radiology, 1989, 173, p. 549-550
- 14)Acoustic noise measurements- Brüel & Kjaer
- 15)J.H.B. Poole, H.G. Leventhall, "An experimental study of Swinbanks' method of active attenuation of sound in ducts", JSV, 49, 1976, p. 257-266
- 16)S.J. Elliott, I.M. Stothers, P.A. Nelson, "A multiple error LMS algorithm and its application to the active control of sound and vibration", IEEE Transactions on Acoustics, Speech & Signal Processing, Vol. ASSP-35, #10, Oct. 1987, p. 1423-1434

17)B. Widrow, J.M. McCool, "Adaptive noise cancelling: principles and applications", Proceedings of the IEEE, Vol. 63, #12, Dec. 1975, p. 1692-1716

18)L.J. Eriksson, M.C. Allie, R.A. Greiner, "The selection and application of an IIR adaptive filter for use in active sound attenuation", IEEE Transactions on Acoustics, Speech & Signal processing, Vol. ASSP-35, #4, Apr. 1987, p. 433-436

19)J.H.B. Poole, H.G. Leventhall, "Active attenuation of noise in ducts" (complementar à ref. 15), JSV, 57(2), 1978, p. 308-309

20)O.H. McDaniel, A.V. Karvelis, "Higher Order Acoustic Modes in Piping Systems", Technical note of The College of Engineering of The Pennsylvania State University, Oct. 1974

21)S.D. Sommerfeldt, J. Tichy, "Adaptive control of a two-stage vibration isolation mount", JASA, 88(2), Aug. 1990, p. 938-944

22)M. Berengier, A.Roure, "Broadband active sound absorption in a duct carrying uniformly flowing fluid", JSV, 68(3), 1980, p. 437-449

Obs.: JASA - Journal of Acoustical Society of America
JSV - Journal of Sound and Vibration

Catálogos e Manuais

c1)DIGISONIX- Digital Sound Cancellation Systems for Active Noise Control
Nelson Industries Inc.

c2)ACTIVOX- The PC Sound Solution

c3)ANVT- General Catalogue

c4)Placa A/D;D/A CAD1236 para computadores PC XT/AT - Referência Técnica
Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda.

c5)Amplificador STK super mini 110 - Manual de Instalação
STK Indústria e Comércio Ltda.

c6)NCT-Noise Cancellation Technologies, Inc. - General Catalogue

Notas de aula

a1)PMC 503 - Laboratório de Automação
Prof. Newton Maruyama / 1º sem. 1992

a2)PMC 450 - Introdução à teoria do controle I
Prof. Dr. José Sotelo Jr. / 1º sem. 1991

a3)PMC455 - Introdução à teoria do controle II
Prof. Dr. José Sotelo Jr. / 2º sem. 1991

ANEXOS

1. Listagens dos Softwares 1 e 2
2. Paineis de fotografias
3. Levantamento da onda plana
4. Desenhos técnicos e esquemas

ANEXO 1 - Listagens dos programas

1a - Software 2 - Listagem comentada completa (Scarad1.PAS)

1b - Software 1 - Rotina de tratamento de interrupção comentada
do programa Aqdata1.PAS

Program Scarad1;

```
{ ===== }
{ = SOFTWARE DE CONTROLE DO SISTEMA DE CONTROLE ATIVO DE RUÍDOS = }
{ = ACUSTICOS EM DUTOS - Versao 1.0 = }
{ = }
{ = Este programa esta' escrito na linguagem Turbo Pascal 5.0 e = }
{ = utiliza uma placa A/D;D/A na sua CONFIGURACAO PADRAO = }
{ = }
{ = A CPU e' interrompida ao final da contagem de um timer interno = }
{ = e programavel da placa. O tratamento da interrupcao corresponde = }
{ = 'a aplicacao da funcao de transferencia do controle ativo sobre = }
{ = o dado coletado pela placa do sistema. = }
{ = }
{ = Software desenvolvido por Ricardo Ruiz Rodrigues - EPUSP = }
{ = Trabalho de graduacao = }
{ = Sao Paulo - SP - Brasil - Data: 18/11/92 = }
{ ===== }
```

Uses Dos,
Crt;

```
{ ===== }
{ = Declaracao de Constantes = }
{ ===== }
```

Const

EndBase = \$380; { Endereco base da placa CAD12/36 }
IntUsada = 2; { Interrupcao utilizada }

Const

(* Dados de funcionamento da placa *)

SecLimite = 0; { End. secundario da CAD12/36 - Reg. de Limite }
SecPonteiro = 1; { End. secundario da CAD12/36 - Ponteiro Memoria }
SecComAD = 2; { End. secundario da CAD12/36 - Comando Conv. A/D }
SecRM = 3; { End. secundario da CAD12/36 - Reg. de Modo }
SecMemoria = 4; { End. secundario da CAD12/36 - Escrita Memoria }
SecAutoCal = 6; { End. secundario da CAD12/36 - Auto Calibracao }
IntAck = \$20; { Registrador de reconhecimento de interrupcao }
IntMask = \$21; { Registrador da mascara de interrupcoes }

(* Dados do sistema *)

c = 340; { velocidade do som m/s }
Lma = 1.4; { distancia entre mic e alto-falantes (m) }
Ld = 6; { comprimento do duto (m) }
Co = 1.349; { comprimento de onda do ruido propagante (m) }
As = 625; { area da secao do duto (cm2) }
Na = 4; { numero de alto-falantes atuadores }
a1 = 10; { limites dos vetores de armazenagem }
a2 = 20;
K0 = 1500; { impedancia do conjunto de alto-falantes }

```
{ ===== }
{ = Declaracao de Variaveis = }
{ ===== }
```

Var CadCtr0 : word; { Reg. Contador 0 da CAD12/36 }

```

CadCtrl1 : word;      { Reg. Contador 1 da CAD12/36 }
CadCtrl2 : word;      { Reg. Contador 2 da CAD12/36 }
CadModo   : word;      { Reg. de Modo do Timer }
CadStatus: word;      { Reg. Estado da CAD12/36 }
ByteA     : word;      { Reg. Byte A do conversor A/D }
ByteB     : word;      { Reg. Byte B do conversor A/D }
CadEnd    : word;      { Registrador de Endereco }
CadDado    : word;      { Reg. dado de escr. memoria }
CadESD0    : word;      { Reg. E/S digital 0 }
CadESD1    : word;      { Reg. E/S digital 1 }
CadEXP0a   : word;      { Reg. byte A do conversor D/A }
CadEXP0b   : word;      { Reg. byte B do conversor D/A }

```

```

Coll, Lin1: integer;
saida: integer;
famost, freq: integer; {freqs. de amostragem real e da placa}
fonda: real; {frequencia do ruido propagante}
K3,K1      : real;
Ch         : char;
E          : array [1..a1+1] of integer; {vetor de entradas}
S          : array [1..a2+1] of integer; {vetor de saidas}
entr       : array [0..2] of integer;

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina  IniciaEnderecoHardware          = }
{ ===== }

```

Procedure IniciaEnderecoHardware;

```

{Este procedimento define os enderecos-base da placa D/A, que serao }
{utilizados pelo programa para o mesmo se comunicar com as interfaces }
{de E/S e com os proprios dispositivos internos da placa, como o timer }
{ }
{Utilizado por: Programa principal }

```

begin {begin procedure}

```

CadCtrl0 := EndBase;
CadCtrl1 := EndBase + 1;
CadCtrl2 := EndBase + 2;
CadModo  := EndBase + 3;
CadStatus:= EndBase + 3;
ByteA    := EndBase + 4;
ByteB    := EndBase + 5;
CadEnd   := EndBase + 4;
CadDado  := EndBase + 5;
CadESD0  := EndBase + 6;
CadESD1  := EndBase + 7;
CadEXP0a := EndBase + 8;
CadEXP0b := Endbase + 9;

```

end; {end procedure}

```

{ ===== }
{ =          Rotina  EscreveRegSecundario          = }
{ ===== }

```

Procedure EscreveRegSecundario (EndReg, Dado: byte);

```

{Este procedimento representa o processo de escrita de algum Dado em }
{algum registrador secundario EndReg. A placa faz a escrita em regis- }
{tradores secundarios utilizando os enderecos-base 4 e 5. O numero do }
{registrador secundario no qual se quer escrever um dado e' armazenado}
{no endereco base+4 (CadEnd) e, ao armazenar-se o Dado correspondente }
{no endereco base+5, o mesmo e' transferido para o registrador secun- }
{dario armazenado em base+4 }
{ }
{Utilizado por: EscreveMemCanaIs ; AutoCalibracao ; Programa Principal}
{ HabilitaGateComInt ; InibeGateComInt ; }
{ ProgramaMemoriaCanaIs }

```

```

begin
  Port [CadEnd] := EndReg;
  Port [CadDado] := Dado;
end;

```

```

{ ===== }
{ = Rotina EscreveMemCanaIs = }
{ ===== }

```

Procedure EscreveMemCanaIs (Posicao, Dado: byte);

```

{Este procedimento utiliza a escrita em registradores secundarios para}
{escrever um dado na memoria de canais, programando o referido canal. }
{Para isso, escreve primeiro o ponteiro do canal correspondente no }
{endereco secundario 1 e o dado (programacao) no end. secundario 4 }
{ }
{Utiliza: EscreveRegSecundario (2x) }
{Utilizada por: ProgramaMemoriaCanaIs }

```

```

begin
  EscreveRegSecundario (SecPonteiro, Posicao);{Endereco da Memoria de Canais}
  EscreveRegSecundario (SecMemoria, Dado); {Canal e Ganho correspondente }
end;

```

```

{ ===== }
{ = Rotina AutoCalibracao = }
{ ===== }

```

Procedure AutoCalibracao;

```

{Este procedimento faz a auto-calibracao da placa, necessaria antes }
{de utiliza-la para coletar dados. Para isso, escreve no reg. secundario}
{6 o valor 00h e espera 400 ms }
{ }
{Utiliza: EscreveRegSecundario }
{Utilizado por: Programa Principal }

```

```

begin
  EscreveRegSecundario (SecAutoCal, 0);
  Delay (400);
end;

```

```

{ ===== }

```



```
{ = Rotina LimpaFIFO = }
{ ===== }
```

Procedure LimpaFIFO;

Var i, Dado: integer;

```
{Este procedimento limpa a plilha interna da placa que armazena os dados }
{lidos para se comecar o processo de amostragem. Para isso, le-se as 16 }
{posicoes da FIFO }
{ }
{Utilizado por: Programa principal }
```

```
begin
  for i := 1 to 16 do
    begin
      Dado := Port [ByteB];
      Dado := Port [ByteA];
    end;
  end;
```

```
{ ===== }
{ = Rotina ProgramaTimer = }
{ ===== }
```

Procedure ProgramaTimer (Contador, Modo: byte; Valor: word);

Var EndCtr: word;

```
{Este procedimento programa o Timer da placa, representado pela variavel }
{"Contador", na operacao de carregar primeiro o byte menos significativo }
{e depois o mais significativo, com modo representado pela variavel "Modo"}
{e com cntagem binaria de 16 bits. A partir desses valores, e' formada a }
{palavre de comando, que e' armazenada no endereco-base 3. Depois de pro- }
{gramado o Timer, o Valor a ser contado e' armazenado no endereco-base }
{correspondente ao Timer selecionado }
{ }
{Utilizado por: Programa Principal ; Trataint }
```

begin

```
EndCtr := EndBase + Contador;
Port [CadModo] := Contador * 64 + 48 + Modo * 2;
Port [EndCtr] := Lo (Valor);
Port [EndCtr] := Hi (Valor);
end;
```

```
{ ===== }
{ = Rotina InibeINT = }
{ ===== }
```

Procedure InibeINT;

Var Mask : byte;

```
{Esta rotina procede 'a inibicao da interrupcao da placa para leitura }
{de um dado. Para isso, a mascara de interrupcao deve ser lida e deve }
{ser feita uma operacao logica entre a mascara e uma palavra especial }
{identica 'a mascara, armazenando-a novamente no endereco da mascara }
{ }
{Utilizado por: Programa Principal }
```



```

        { usa timer 0 }
        { interrupcao ao final do timer0 }
        { modo burst ligado }
        { modo DMA desligado }
end;

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina ProgramaMemoriaCanaais          = }
{ ===== }

```

Procedure ProgramaMemoriaCanaais;

```

Const
  G1   = 7*16;           { constantes para programar o ganho }
  G2   = 6*16;
  G5   = 5*16;
  G100 = 3*16;

```

```

  Bipolar = $80;          { faixa bipolar }
  Unipolar = $00;         { faixa unipolar }

```

```

Var
  i: integer;

```

```

{Este procedimento programa os canais 0 a 2 de entrada da placa que }
{vao ser utilizados para a experiencia, de acordo com a palavra de }
{controle especificada no manual }
{ }
{Utiliza: EscreveRegSecundario ; EscreveMemCanaais }
{Utilizado por: Programa Principal }

```

```

begin
  EscreveRegSecundario (SecLimite, $3); { Carrega 3 no Reg. Limite }
  for i:=0 to 2
  do EscreveMemCanaais (i, Bipolar + G1+ i);{memoria i com canal i, bipolar}
end;                                     {ganho 1}

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina TrataInt          = }
{ ===== }

```

Procedure TrataInt; interrupt;

```

var
  i,j: integer;

```

```

{Este procedimento especial faz o tratamento da interrupcao, a qual ocorre }
{periodicamente atraves de um periodo programado, e representa a leitura de}
{um dado analogico no canal 2. A esse dado lido, e' passada a funcao de }
{transferencia do CONTROLE ATIVO na forma de equacao de diferencas }

```

begin {begin tratamento da interrupcao}

```

  InLine($fb);
  j:= Port [CadStatus]; { limpa FF de pedido de interrupcao }
                        { Para isso, basta ler o estado da placa }
  for i:=0 to 2
  do Entr[i]:=(Port [ByteB] shl 8+ Port [ByteA]);
  Saida:= trunc(S[1] - (K3*E[1]));
  Port[CadEXP0a]:=Lo(Saida);

```



```

Writeln ('R U I D O S      A C U S T I C O S');
Writeln;
Gotoxy(26,14);
Writeln ('      E M      D U T O S');
Writeln; Writeln; Writeln; Writeln;
Writeln ('Software de controle utilizando-se a placa A/D modelo LYNX CAD 12/36');
Writeln ('com modulo D/A de 2x12 bits');
Writeln;
Writeln ('Autor: Ricardo Ruiz Rodrigues - Aluno de graduacao - EPUSP');
Ch:=Readkey;

Clrscr;
Writeln ('***** CONTROLE ATIVO DE RUIDOS ACUSTICOS EM DUTOS ***** ');
Writeln; Writeln;
Write('Entre com a frequencia de amostragem (Hz): ');
readln(famost);
freq:=(2000000)div(famost); {conversao para a frequencia interna da placa}
Writeln;
Writeln('Dados do sistema: ');
Writeln('***** '); Writeln;
Writeln('Comprimento do duto: ',Ld,' m      Numero de alto-falantes:',Na);
Writeln;
Writeln('Area da secao: ',As,' cm2      Velocidade do som: ',c,' m/s');
Writeln;
Writeln('Ruido propagante: Comprimento de onda: ',Co,' m');
Writeln('                      Frequencia: ',fonda:2:2, ' Hz');
Writeln;
Writeln('Distancia entre microfone e alto-falantes l= ',Lma,' m');

GotoXY(2,22);
Write ('Digite uma tecla qualquer para iniciar o processo');
repeat
until KeyPressed;
Ch := ReadKey;
end;

( ===== )
( =          Programa Principal          = )
( ===== )

var
  I,J: integer;

begin {begin principal}

  fonda:=c/Co; {calcula a frequencia do ruido propagante}
  TelaApresentacao;
  IniciaEnderecoHardware; {Determina os enderecos de I/O da placa }
  EscreveRegSecundario (SecRM, 0);{Zera Registrador de Modo da CAD12/36 }
  InibeINT; {Inibe a interrupcao usada pela placa }
  ProgramaTimer (0,2,freq); {Programa Timer0 no modo0 e a 2e6/freq Hz}
  AutoCalibracao; {Comando de Auto-Calibracao do Conversor }
  ProgramaMemoriaCanais; {Programa a memoria de canais }
  EscreveRegSecundario (SecLimite, 2);{Carrega numero de canais -1 no Reg. Lim.}
  EscreveRegSecundario (SecPonteiro, 0);{Zera Ponteiro da memoria de canais}
  LimpaFIFO; {Limpa a memoria FIFO da CAD12/36 }
  SetIntVec(IntUsada+8,@TrataInt); {Inicia vetor de interrupcao }

```

{observe: o vetor usado e' IntUsada + 8 }

HabilitaInt;

I:= Port[CadStatus]; {limpa FF de pedido de interrupcao }

HabilitaGateComINT; {a partir deste ponto, as interrupcoes sao ativadas }

FacaAlgo; {faz algo junto com as interrupcoes }

InibeInt; {inibe a interrupcao }

clrscr;

Writeln('Processo encerrado');

Readln(Ch);

end. {fim do programa}

C:\TP5>

```
{ ===== }
{ =          Rotina  TrataInt - aqdata1.pas      = }
{ ===== }
```

```
Procedure TrataInt; interrupt;
```

```
var
```

```
  I: integer;
```

```
{Este procedimento especial faz o tratamento da interrupcao, a qual ocorre }
{periodicamente atraves de um periodo programado, e representa a leitura de}
{um dado anal. nos canais 0 a 2. A esse dado lido,e' passada a inversao de }
{sinal adequada do CONTROLE ATIVO }
}
```

```
begin {begin tratamento da interrupcao}
```

```
  InLine($fb);
```

```
  I:= Port [CadStatus];    { limpa FF de pedido de interrupcao      }
                           { Para isso, basta ler o estado da placa }
```

```
  for i:=0 to 2
```

```
  do auxLeit[i]:=-1*(Port [ByteB] shl 8+ Port [ByteA]); {leitura e inversao}
```

```
  Port[CadEXP0a]:=Lo(auxLeit[2]);    {joga na saida}
```

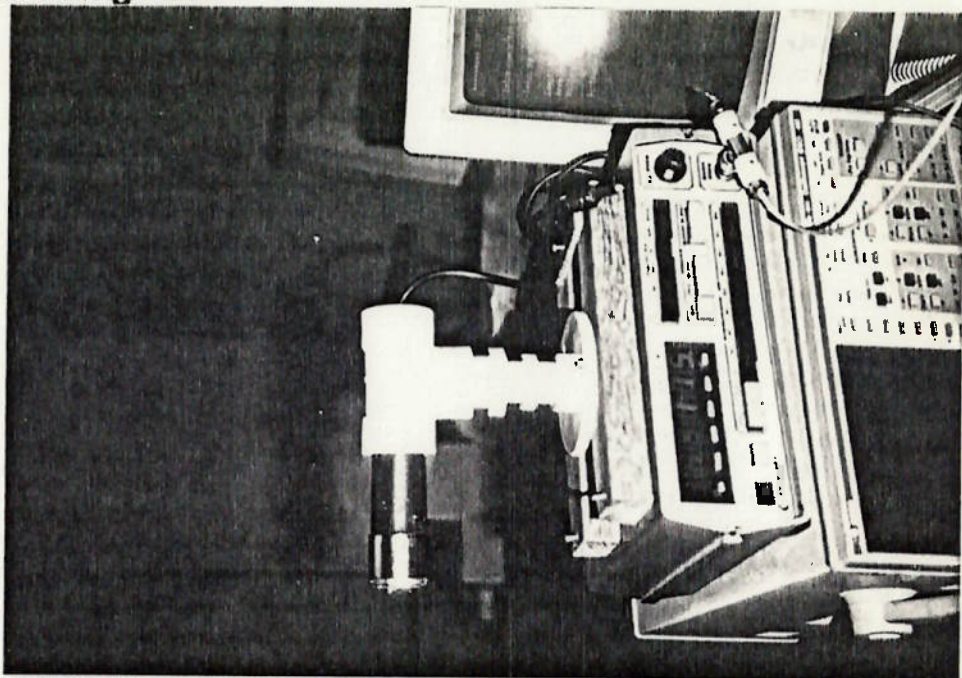
```
  Port[CadEXP0b]:=Hi(auxLeit[2]);
```

```
  Port [IntAck]  := $60 + IntUsada; {limpando o Registrador de interrupcoes}
```

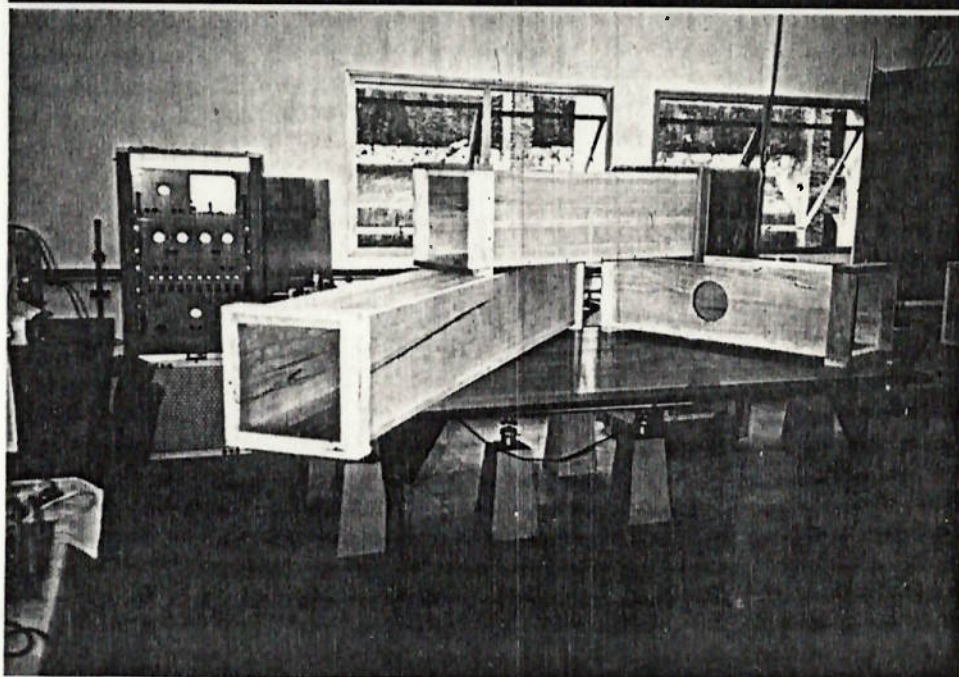
```
end; {end tratamento da interrupcao}
```


ANEXO 2 - Painel de fotografias

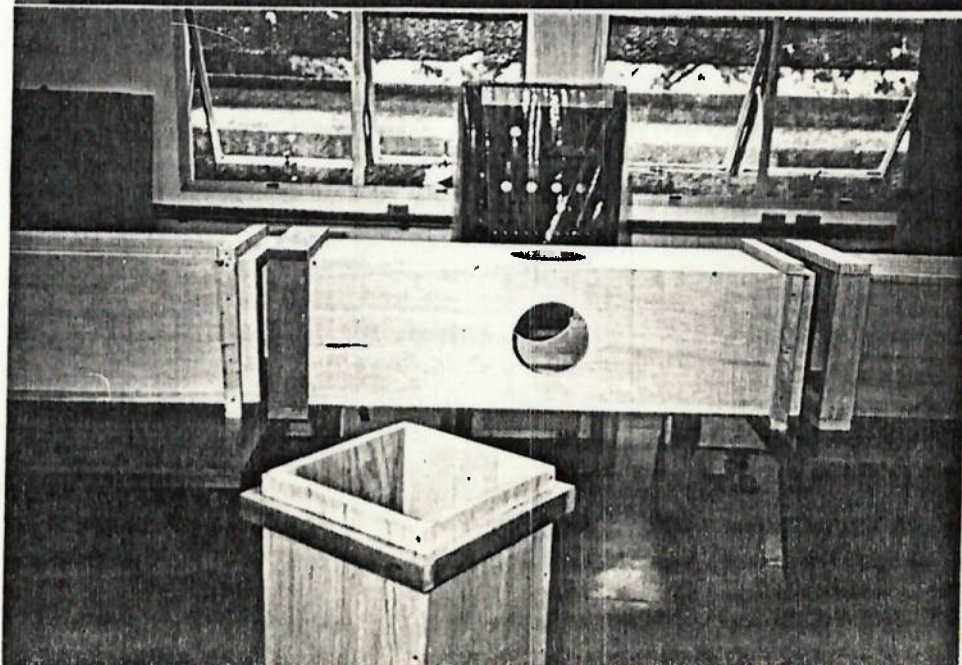
01 - Microfone dinâmico
e suporte



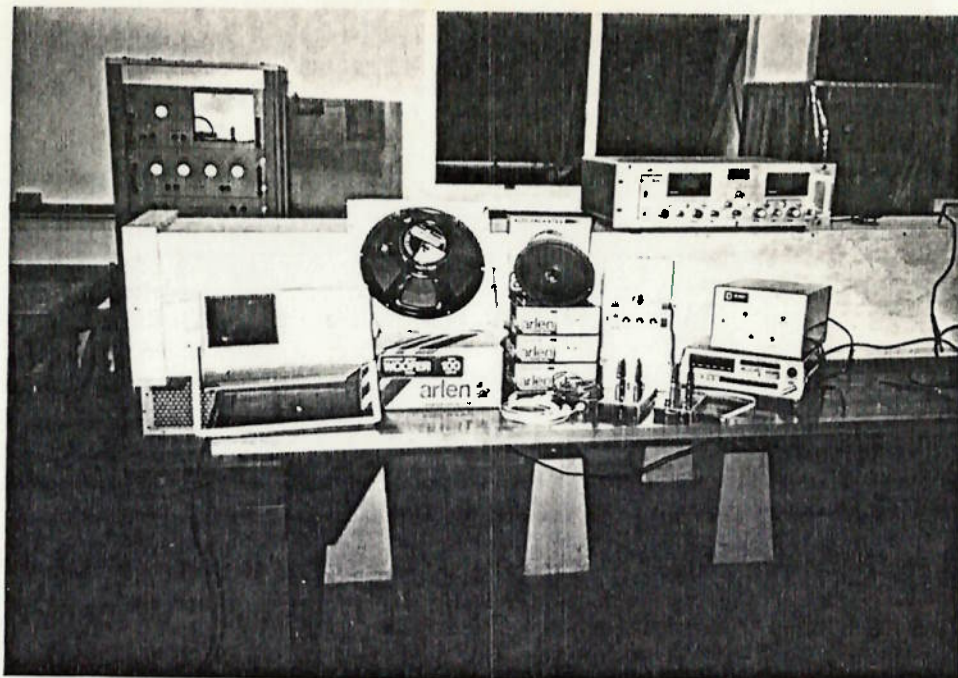
02 - Módulos de 1 e 2m
do duto experimental



03 - Detalhe do encaixe
entre os módulos



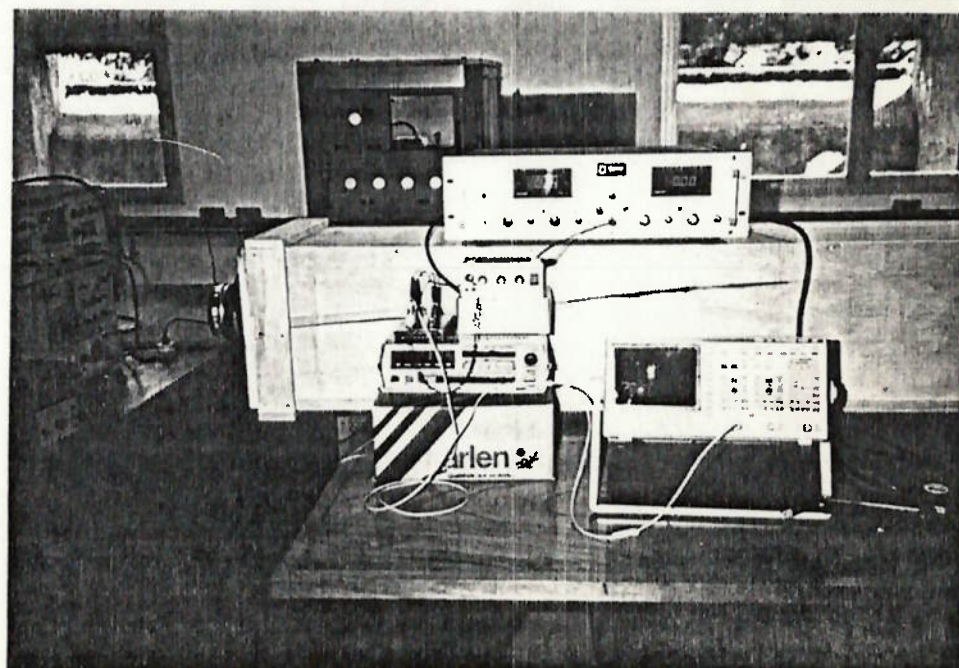
04 - Aparelhagem utilizada



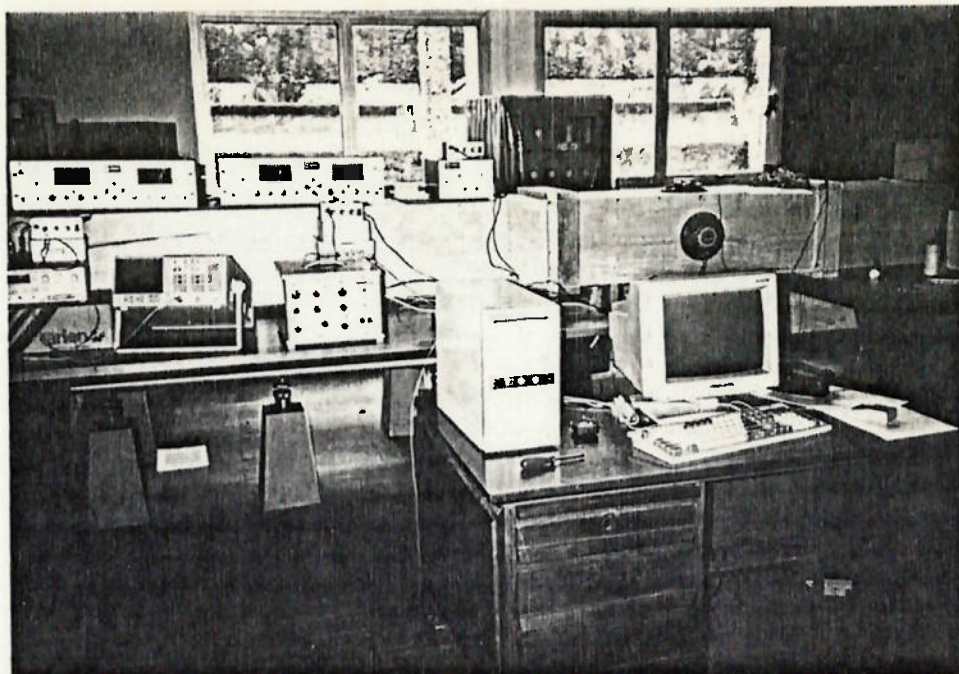
05 - Montante: alto-falante e sistema de posicionamento do microfone



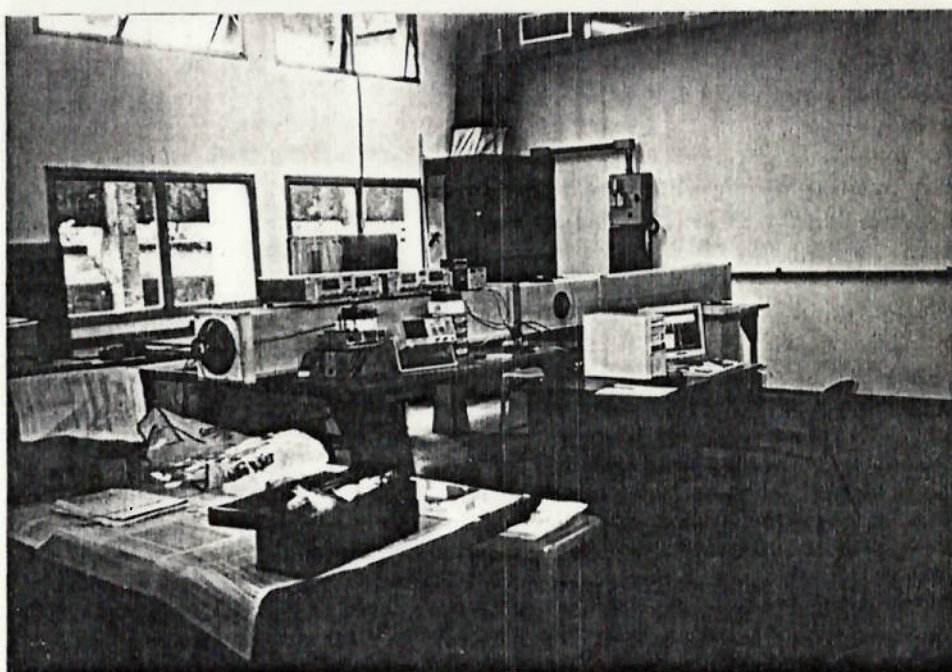
06 - Sistema de geração de ruído



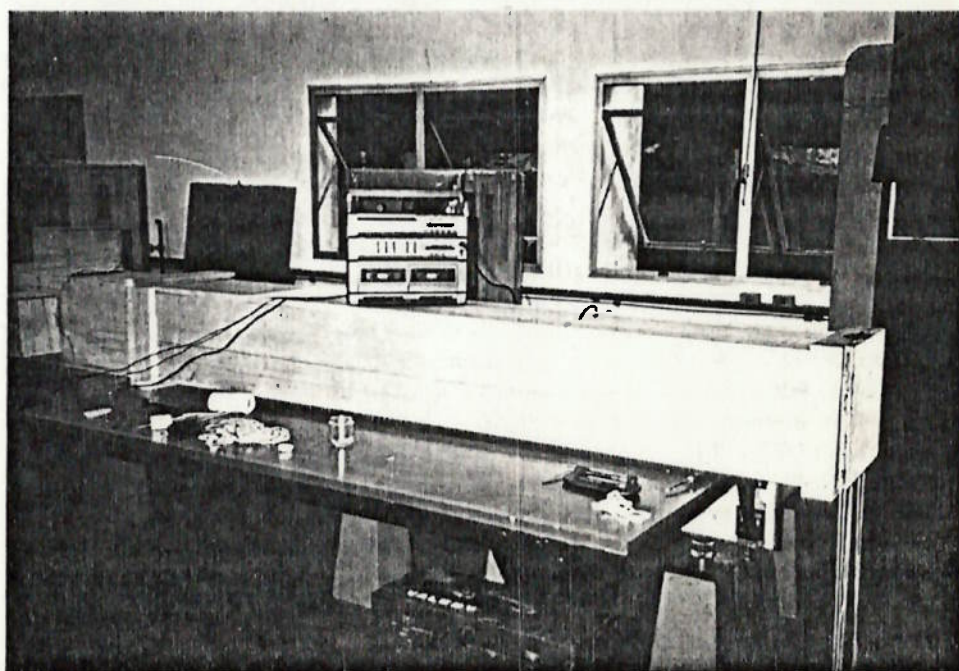
07 - Sistemas de
detecção, atuação
e controle



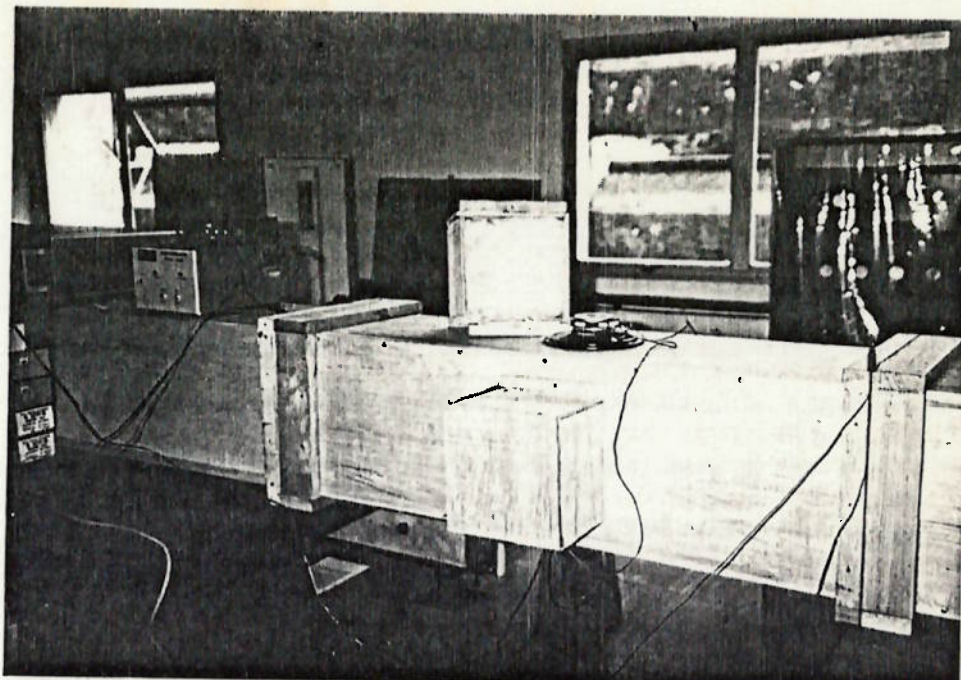
08 - Vista geral



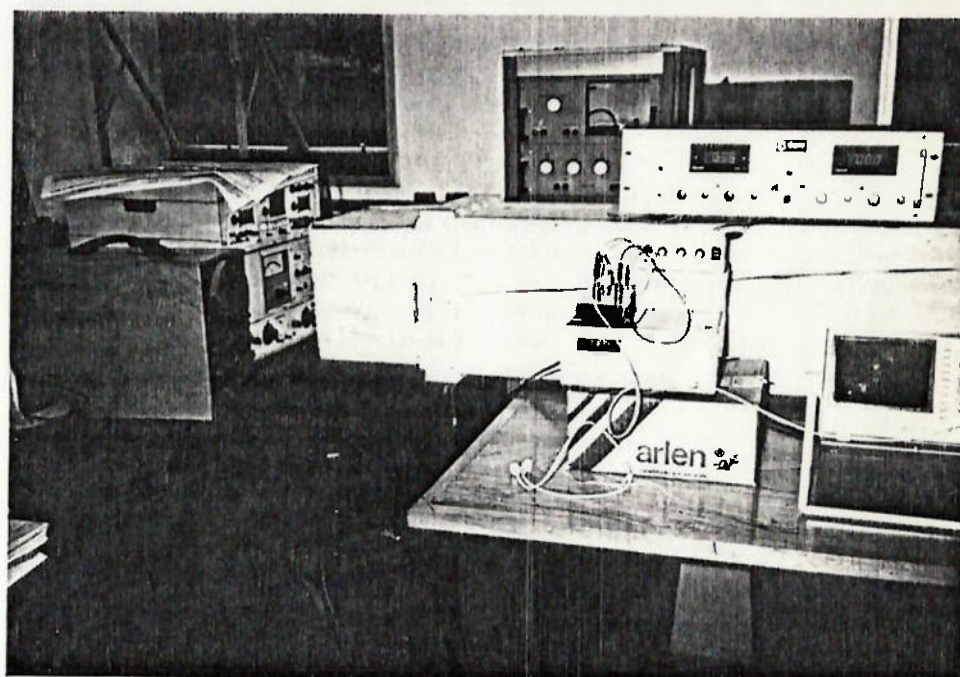
09 - Módulo jusante
e amplificador



10 - Caixas acústicas
no módulo central



11 - Sist. de geração
com caixas acústicas



12 - Vista geral



ANEXO 3 - Levantamento da onda plana no duto

Tabelas 1a), 1b) e 1c)

Gráficos 1 e 2

Tabela de dados - Levantamento da onda no duto

1) Alto-falante gerador em funcionamento e atuadores desligados

a) $f = 175 \text{ Hz}$

b) $f = 145 \text{ Hz}$ (a) e b) com o mic detetor)

Dist. (cm)	Amplitude do sinal (V pp)	Dist. (cm)	Amplitude do sinal (V pp)	Dist. (cm)	Amplitude do sinal (V pp)	Dist. (cm)	Amplitude do sinal (V pp)	Dist. (cm)	Amplitude do sinal (V pp)
25	3,6	150	1,1	25	---	150	1,7	270	1,5
40	---	160	1,7	40	2,4	160	1,7	280	1,4
50	4,0	170	1,6	50	2,3	170	1,6	290	1,0
60	4,4	180	1,7	60	1,9	180	1,7	300	0,5
70	4,2	190	1,6	70	2,0	190	2,0	310	0,48
80	4,4	200	1,6	80	1,8	200	2,1	320	0,52
90	3,8	210	1,5	90	1,8	210	2,2	330	0,76
100	2,4	220	1,1	100	1,7	220	2,4		
110	2,0	230	0,8	110	1,9	230	2,3		
120	1,8	240	0,6	120	1,6	240	2,2		
130	0,9	250	0,8	130	1,6	250	2,0		
140	1,1	260	1,1	140	1,6	260	1,9		

c) $f = 252 \text{ Hz}$

mic detetor			mic erro		
saída tampada		saída destampada	saída tampada		saída destampada
Dist. (cm)	Amplitude do sinal (V pp)	Amplitude do sinal (V pp)	Dist. (cm)	Amplitude do sinal (V pp)	Amplitude do sinal (V pp)
17	13,6	13,6	400	8,0	9,4
50	6,4	6,6	410	7,8	9,4
60	10,0	9,2	420	7,0	8,0
70	12,0	12,0	430	4,0	4,0
80	12,0	12,8	440	8,0	2,0
90	7,2	11,5	450	10,0	2,8
100	6,6	8,4	460	10,4	6,0
110	7,6	6,0	470	9,6	8,8
120	9,0	6,0	480	6,8	8,0
130	9,5	7,6	490	4,0	6,0
140	8,8	9,2	500	6,0	4,8
150	8,0	8,8	510	10,4	2,8
160	6,8	8,0	520	10,7	2,6
170	6,2	6,0	530	10,0	4,2
180	6,0	6,0			
190	5,6	6,0			
200	5,1	6,0			
210	4,8	5,3			
220	4,8	5,1			
230	4,9	4,4			
240	4,8	4,0			
250	4,0	4,0			
260	3,2	3,8			
270	2,4	3,6			
280	2,5	3,2			
290	2,4	2,6			
300	3,0	2,5			
310	2,9	2,4			
320	3,0	2,8			

2) Alto-falantes atuadores ligados e gerador desligado

$f = 252 \text{ Hz}$

mic detetor			mic erro		
Dist. (cm)	saída destampada	saída tampada	Dist. (cm)	saída destampada	saída tampada
	Amplitude do sinal (Vpp)	Amplitude do sinal (Vpp)		Amplitude do sinal (Vpp)	Amplitude do sinal (Vpp)
17	6,2	6,4	400	9,5	8,0
50	2,9	2,9	410	8,0	6,7
60	3,8	4,0	420	5,0	2,5
70	5,4	5,5	430	3,0	5,0
80	6,0	6,0	440	4,8	9,0
90	6,0	6,0	450	6,8	10,4
100	5,0	5,0	460	9,0	10,0
110	3,8	3,8	470	8,0	7,6
120	3,5	3,5	480	6,0	3,5
130	4,6	4,6	490	4,5	3,7
140	6,8	6,8	500	3,3	10,0
150	7,0	7,0	510	4,4	9,4
160	6,6	6,6	520	6,4	10,0
170	5,8	5,6	530	6,0	8,0
180	4,2	4,2	540	5,6	4,4
190	4,5	4,5			
200	5,2	5,2			
210	6,2	6,2			
220	7,0	7,0			
230	5,8	5,8			
240	4,8	4,8			
250	3,0	3,4			
260	4,0	4,0			
270	4,6	4,6			
280	4,0	4,0			
290	3,4	3,4			
300	2,6	2,6			
310	2,3	2,3			
320	3,0	3,0			

GRÁFICO 1 - CURVAS AMPLITUDE (A) X DISTÂNCIA (X) DA MONTANTE
PARA O MICROFONE DETETOR (FAIXA 0 a 320 cm)

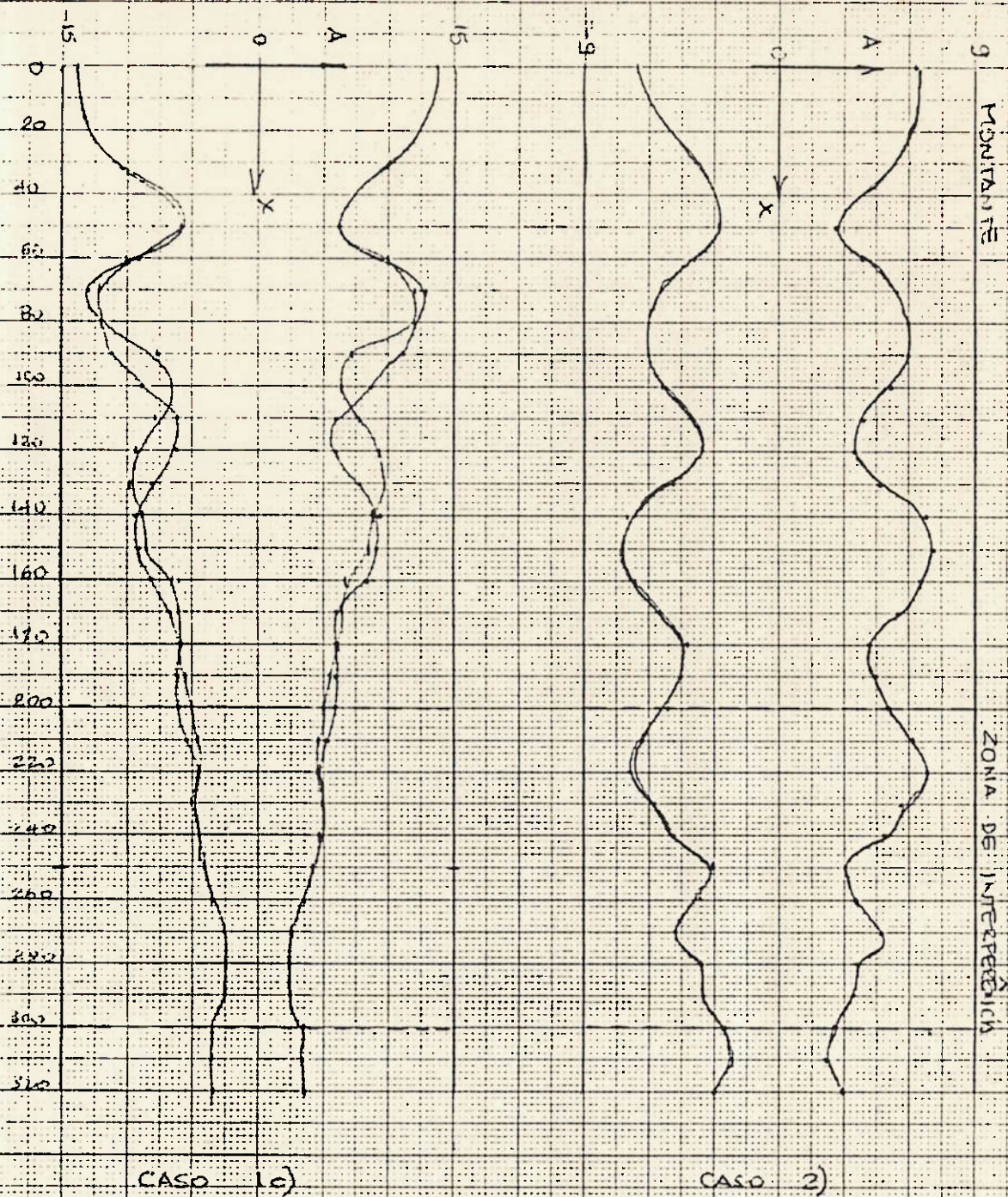
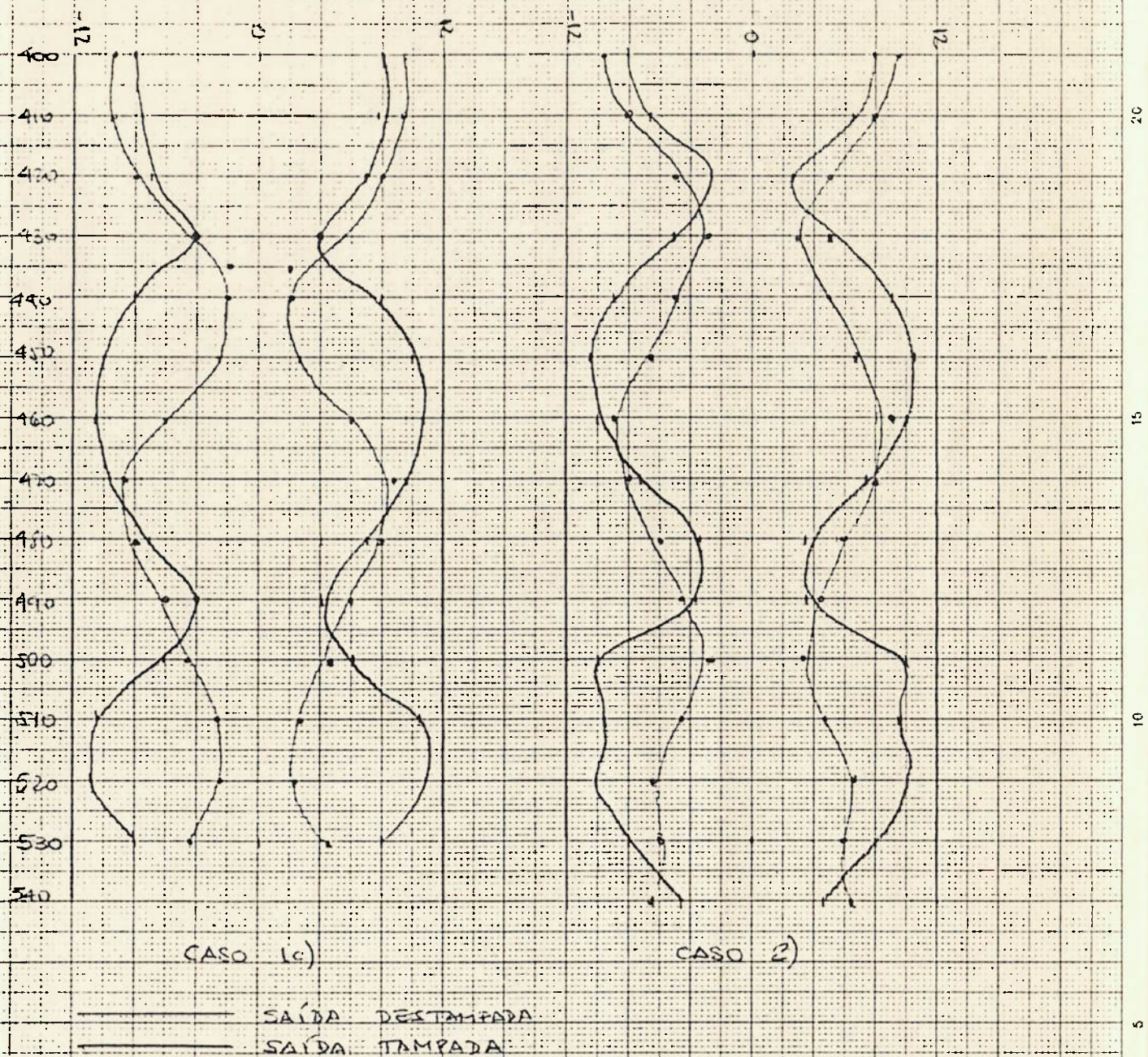


GRÁFICO 2 - CURVAS AMPLITUDE (A) X DISTÂNCIA (X) DA MONTANTE PARA O MICROFONE DE FERRO (FAIXA: 400 a 530 cm)



ANEXO 4 - Desenhos técnicos e esquemas

T1 - Esquema da instalação

T2 - Projeto: Duto Experimental

T3 - Projeto elétrico

T4 - Esquema do sistema remoto de movimentação dos microfones

DUTO EM CEMENTO ARMADO

COMPR. TOTAL: 5 - 6 m

ALTO-FALANTE 10" (85L)
100W ARLEN 1010-L

ALTA FREQÜÊNCIA: 600 Hz (25V2C)

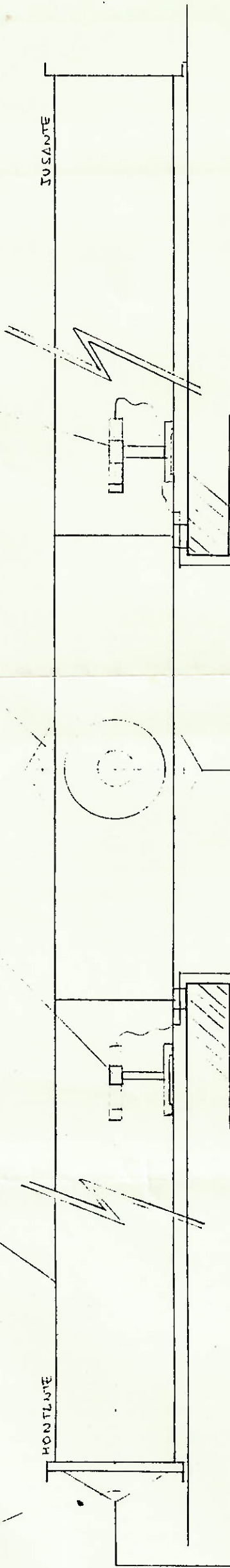
MICROFONE DINÂMICO
AKAI DM13 - 50V12

ALTO-FALANTE: 6" (85L)
80W ARLEN 600/12

MICROFONE DINÂMICO
AKAI DM13 - 50V12

MONTANTE

JUSANTE



AMPLIFICADOR DE ÁUDIO
STX SUPER MINI 110

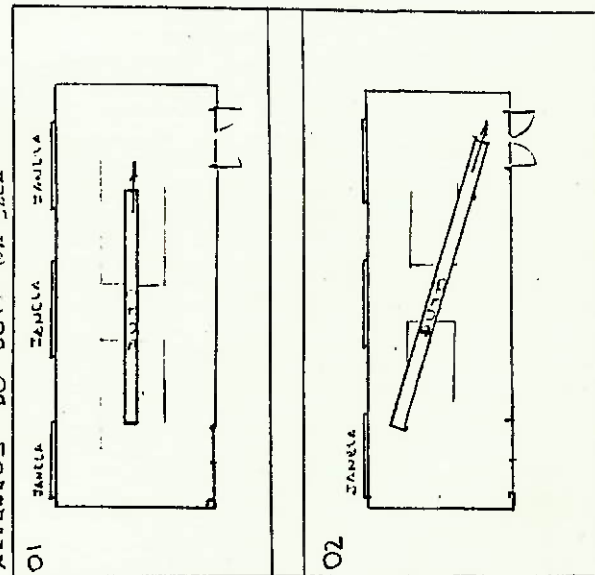
GERADOR DE TENSÕES
WAVE TE K
MOD. 22

TITRO VASIO-VAIA
ROBOTRON 01014

AMPLIFICADOR DE ÁUDIO
STX SUPER MINI 110

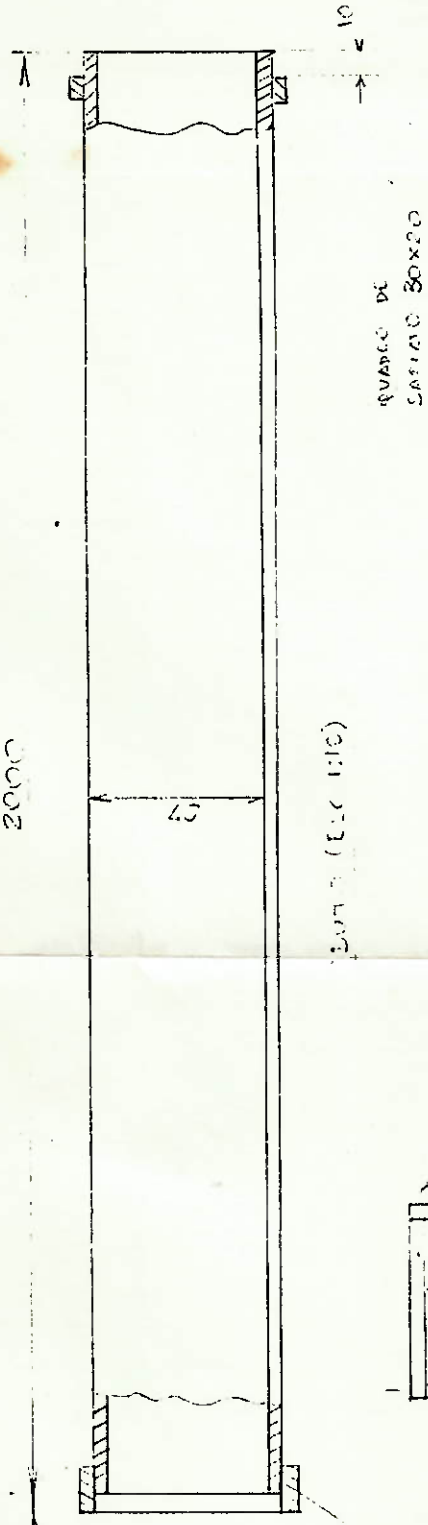
AMPLIFICADOR -
ESQUALIZADOR
PORTÁTILO GRADIENTE
CE - 5

OSCILOSCÓPIO
GOULD 750400



DATA	01/12/92	PMO 581 - PROJETO MECÂNICO II.
DET. DOB.	ELCADO 002	SISTEMA DE CONTROLE ATIVO DE RUÍDOS
PRJ. Nº	0000	ESQUEMA DA INSTALAÇÃO
		T-1

PEÇA 1 / 3

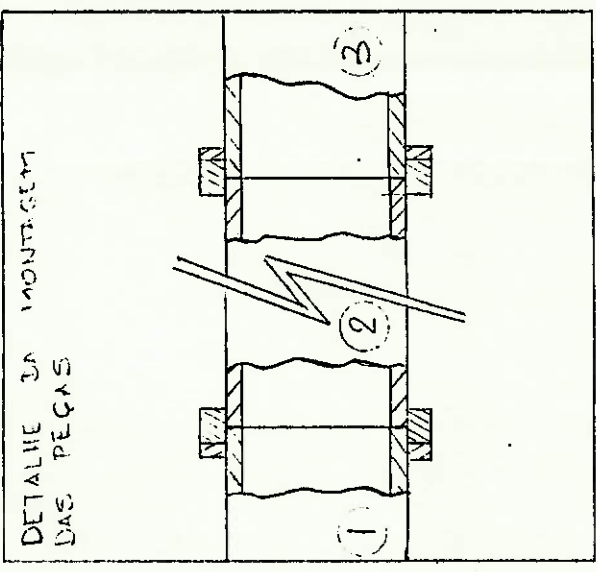


QUADRO DE CAIXÃO 30x20

DUTO (ESC. 1:10)

FIXAÇÃO COM PARAFUSOS

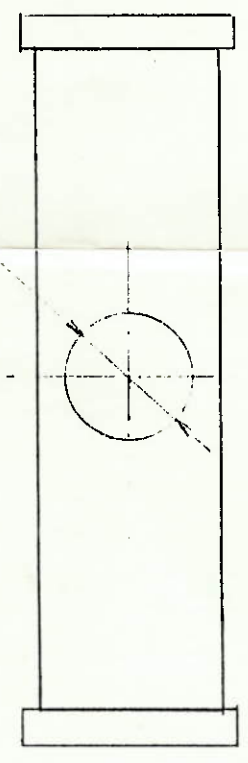
SEÇÃO DO DUTO (ESC. 1:10)



DETALHE DA MONTAGEM DAS PEÇAS

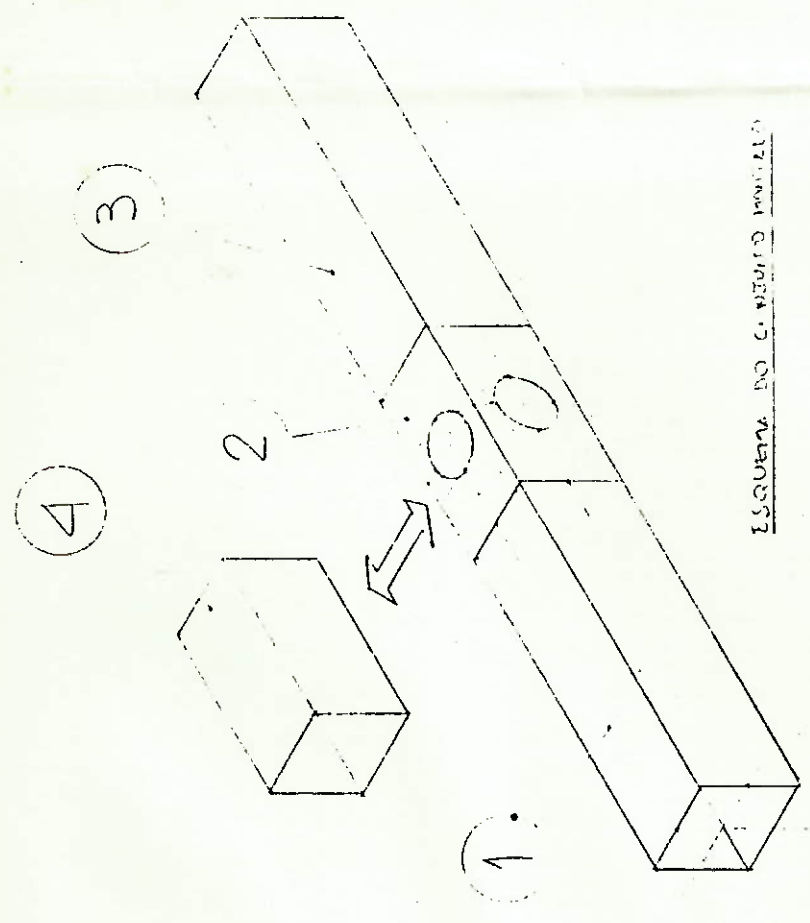
PEÇA 2
ESC. 1:10

EXECUTAR EM 6" TODAS AS LATERAIS



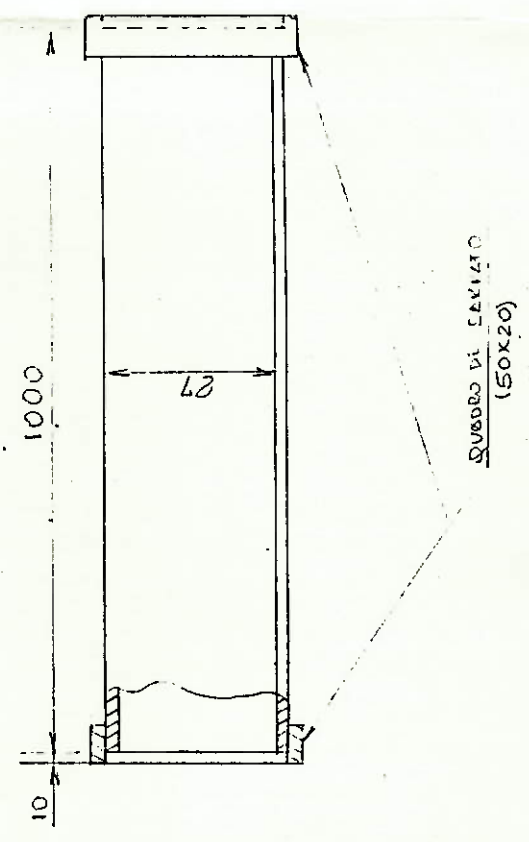
CONSTRUÇÃO SIMILAR À PEÇA 4

FIXAÇÃO COM PARAFUSOS



ESQUEMA DO CONJUNTO MONTADO

PEÇA 4
ESC. 1:10



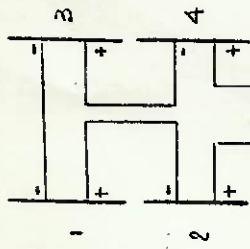
QUADRO DE CAIXÃO 50x20

OBS.: MONTAGEM DA SEÇÃO SIMILAR À PEÇA 1

FIXAÇÃO COM PARAFUSOS

DATA	15/10/91	PMC 581 - PROJETO MECÂNICO II
DES. POR:	RICARDO WIZ	SISTEMA DE CONTROLE ATIVO DE RUÍDOS
ESCALA	1:10	TÍTULO
		DUTO EXPERIMENTAL
		BLZ. Nº
		T-2

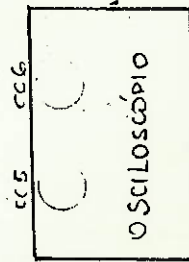
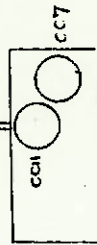
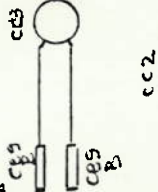
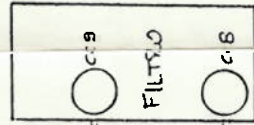
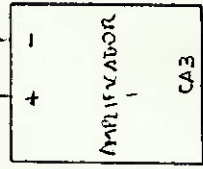
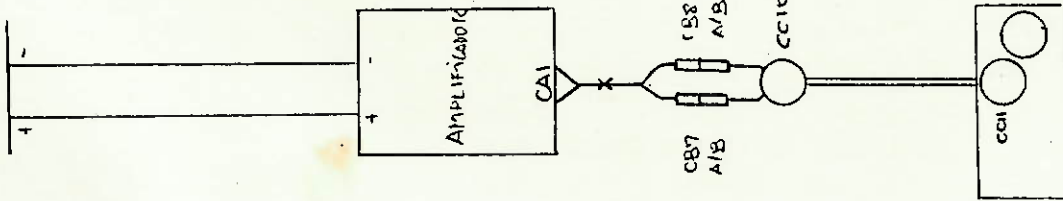
ALTO-FALANTES ATIVADORES



ALTO-FALANTE
CONTROLE

MIC 1
DETECTOR

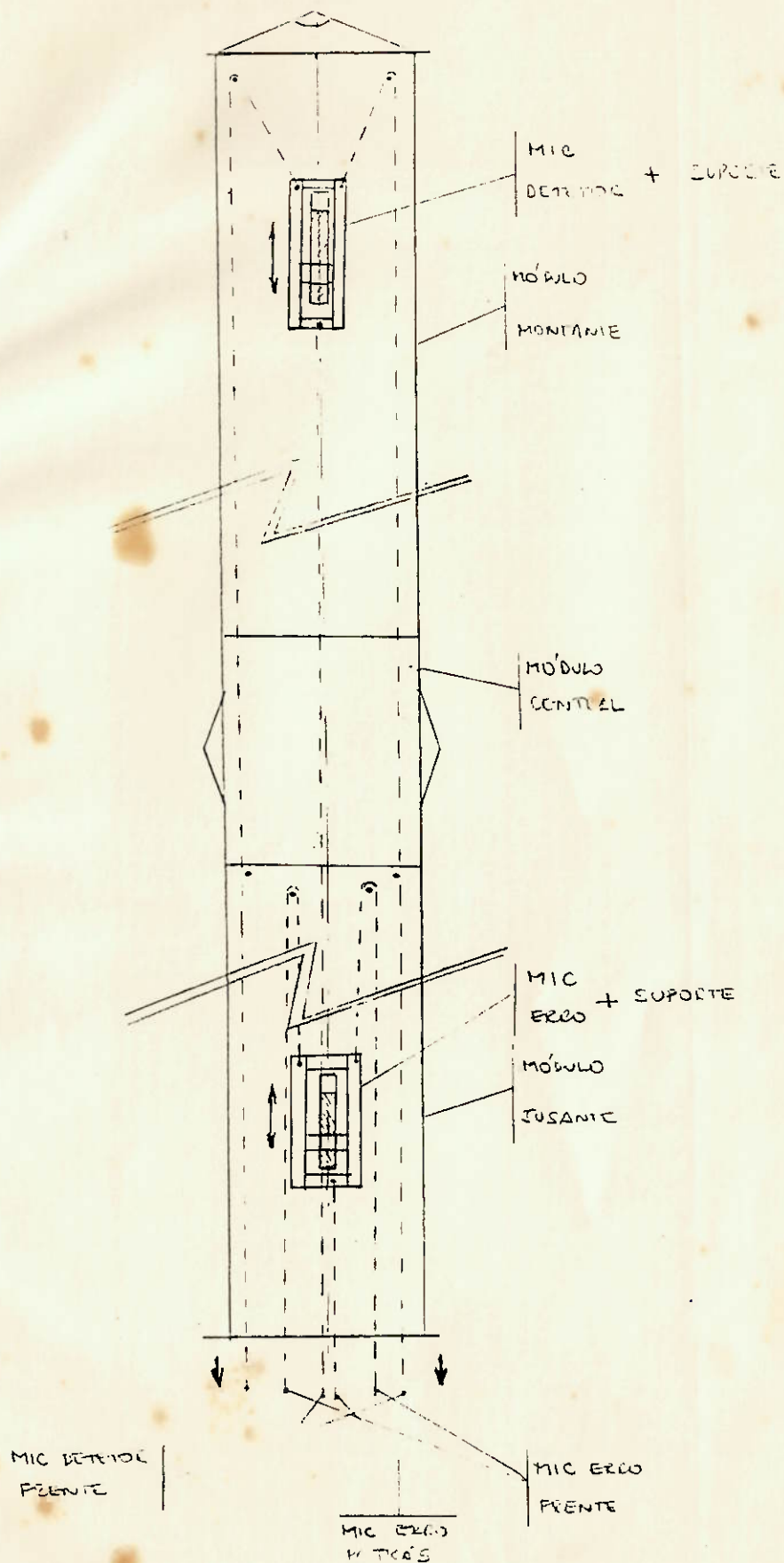
MIC 2
DETECTOR



LEGENDA:

- CONEXÃO COAXIAL (CC)
- CONEXÃO BANANA (CB)
- Y CONEXÃO DE ÁUDIO MONOAURAL (CA)
- CN X CANAL X
- EXP Y SAÍDA DE EXPANSÃO Y

DATA:	15/11/92	PMO 581 - PROJETO MECÂNICO II
DES. POR:	RICARDO BUIZ	SISTEMA DE CONTROLE ATIVO DE RUÍDOS
DES. Nº		TÍTULO
		ESQUEMA ELÉTRICO
		T-3



DATA	20/11/92	
DES. POR.	RICARDO RUIZ	
TÍTULO	PMG 581 - PROJETO MECÂNICO II	
ESQUEMA DO SISTEMA REMOTO DE MOVIMENTAÇÃO DOS MACISTONES	SISTEMA DE CONTROLE ATIVO DE TUBOS	
DESENHO	T-4	