

**JAMES CUNHA WERNER**

**Controle ativo de ruído em dutos usando algoritmo genético.**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do  
título de Doutor em Engenharia.

São Paulo  
1999

**JAMES CUNHA WERNER**

**Controle ativo de ruído em dutos usando algoritmo genético.**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do  
título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração:  
Engenharia de controle

Orientador:  
José Sotelo Júnior.

São Paulo  
1999

Dedico esta tese à minha esposa e filhas e a meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Sotelo Júnior, pela orientação desta tese e incentivo, e por tudo que aprendi ao longo destes quatro anos de atividade.

Ao Prof. Dr. Raul G. Lima pela ajuda e ótimas discussões do trabalho.

Ao Prof. Dr. Roberto Max Hermann pelo constante incentivo.

Ao Prof. Dr. Eitaro Yamane pelo apoio.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos de doutorado (Processo 142327/95-6).

À FAPESP pela verba concedida para compra dos equipamentos e montagem do laboratório (Processo 97/02321-4).

À minha esposa e filhas, pelo desprendimento e constante incentivo.

Aos técnicos José Guilherme Campetela e Antonio Fernando Maiorquin pelo auxílio na construção da plataforma experimental.

A todos professores, técnicos e colegas que de uma forma direta ou indireta ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

# SUMÁRIO

Resumo	
“Abstract”	
<b>Capítulo 1 Objetivos</b>	<b>1</b>
1.1 Estrutura da tese.	3
<b>Capítulo 2 Introdução.</b>	<b>4</b>
2.1 Fundamentos de acústica e de controle ativo de ruídos.	5
2.2 O cenário e o histórico dos algoritmos evolucionários.	8
2.3 Evolução do controle ativo de ruído em dutos sonoros.	14
2.4 Comparação das metodologias.	23
<b>Capítulo 3 Modelo matemático do sistema acústico.</b>	<b>26</b>
3.1 Equação de Helmholtz.	26
3.2 Modelagem matemática do duto retangular.	27
3.3 Modelo Matemático do duto cilíndrico.	28
3.4 Ondas transversais.	29
3.5 Ondas estacionárias.	30
3.6 Interferência entre ondas progressivas.	31
3.7 Batimento.	32
3.8 Impedância acústica.	33
3.9 Solução do sistema do duto usando análise modal.	34
3.10 Balanço de energia do sistema de atuação.	35
3.11 Função de transferência para um duto acústico de comprimento finito.	36
<b>Capítulo 4 Algoritmo genético.</b>	<b>38</b>
4.1 Modelamento matemático (Rudolf 1994).	40

4.2	Condição de convergência do algoritmo genético.	42
4.2.1	Estudo de caso da condição de convergência.	44
4.3	Função de desempenho.	45
4.4	Estudo da codificação das variáveis no cromossomo.	47
4.5	Estratégia de inserção.	47
4.6	Estratégia de mutação.	48
4.7	Análise da população.	48
4.8	Convergência do GA na região de convergência de uma boa solução.	49
4.9	Estudo dos parâmetros.	49
4.9.1	Tamanho da população.	49
4.9.2	Tamanho do cromossomo.	50
4.9.3	Probabilidade de mutação.	51
4.9.4	Probabilidade de <i>crossover</i> .	51
4.10	A obtenção da solução ótima pelo GA.	51
4.11	Estudo da performance do GA.	52
4.12	Programação genética.	52
4.12.1	A representação da solução em árvore.	52
4.12.2	A população inicial.	54
4.12.3	O <i>crossover</i> .	54
4.12.4	A mutação.	55
4.12.5	A função de desempenho.	56
4.12.6	O tamanho dos programas gerados.	56
	<b>Capítulo 5 Montagem experimental e aplicação do controle adaptativo.</b>	<b>57</b>
5.1	Sistema acústico.	58

5.2 Sistema de aquisição.	59
5.3 Sistema de processamento paralelo.	60
5.4 Sistema de redução dos dados e interface homem máquina.	61
5.5 Obtenção da função de transferência experimental.	63
5.5.1 Excitação por impulso.	63
5.5.2 Excitação por ruído aleatório.	64
5.5.3 Varredura em frequência.	64
5.6 Resultados experimentais para o sistema acústico.	65
5.6.1 Função de transferencia do alto-falante principal e secundário.	65
5.6.2 Duto simples aberto.	66
5.6.3 Duto simples fechado.	68
5.6.4 Duto com Te e alto-falante secundário.	70
5.6.5 Duto com junção e alto-falante secundário.	71
5.6.6 Duto retangular.	72
5.6.7 Duto fechado nos dois extremos com Te e alto-falante secundário.	72
5.7 Resultados experimentais do algoritmo adaptativo no duto cilíndrico de 6" com junção.	74
5.7.1 Identificação da planta.	75
5.7.2 Controle de ruído.	76
<b>Capítulo 6 Resultados do Algoritmo genético.</b>	79
6.1 Plataformas de software/hardware utilizadas.	79
6.1.1 Versão de teste no simulador.	79
6.1.2 Versão para DSP TMS320C32 Mono processador.	81
6.1.3 Versão para DSP TMS320C44 Multi-processadores.	82
6.2 Utilização do GA.	83

6.2.1 Resultados do simulador.	84
6.2.2 O SGA – <i>Simple Genetic Algorithms</i> .	86
6.2.3 O SAGA - <i>Successive Approach Genetic Algorithms</i> .	91
6.2.4 Abordagem de atraso/ganho.	97
<b>Capítulo 7 Estudo da realimentação acústica e seu tratamento.</b>	103
7.1 A instabilidade causada no duto cilíndrico de 6” com junção.	103
7.2 GA em malha fechada no duto cilíndrico de 6” com junção.	104
7.3 Subtraindo a realimentação acústica no duto cilíndrico de 6” com junção.	105
7.3.1 Função de transferência teórica.	106
7.3.2 Função de transferência utilizando um FIR.	107
7.3.3 Função de transferência utilizando análise modal.	107
7.3.4 Resultados experimentais no duto cilíndrico utilizando o FIR para eliminar a realimentação acústica.	109
7.4 Utilizando o duto retangular.	110
7.5 Eliminando a realimentação acústica no duto retangular.	112
<b>Capítulo 8 Obtenção de modelos de controle pela Programação Genética.</b>	113
8.1 Montagem experimental.	113
8.2 O simulador utilizado com o GP.	115
8.3 O software de GP.	116
8.4 Resultados da GP em malha aberta para obtenção do sinal de cancelamento.	116
8.5 Resultados da GP em malha aberta com modelo de atraso e ganho conhecido o ruído.	117
8.6 Resultados da GP em malha aberta utilizando a leitura do microfone antecipativo confinado e no meio do duto.	118
8.7 Análise dos resultados.	120



<b>Capítulo 9 Análise dos resultados e conclusão.</b>	122
Futuros trabalhos.	124
<b>Bibliografia.</b>	126

## **Resumo.**

Esta tese estuda o problema de controlar o ruído acústico em dutos mediante o fornecimento de energia acústica, através da associação do algoritmo genético e da programação genética (constituindo o CONTROLE GENÉTICO).

Foram adotadas três estratégias de controle. Uma, com o algoritmo genético simples (SGA): cada indivíduo de uma geração representa uma frequência, fase e amplitude específicas, usadas no cancelamento do ruído, sendo a função de desempenho obtida pela média da energia do sinal. Segunda, a de refinamento sucessivo (SAGA) foi utilizada em dois níveis: um nível codificando a frequência e depois um nível refinando-a junto com a fase e a amplitude. Finalmente, a terceira abordagem utiliza em tempo real um modelo de atraso e ganho codificado no cromossomo.

Um simulador foi desenvolvido com um modelo simplificado para testar o software e para analisar o comportamento dos parâmetros do algoritmo genético. O software foi migrado para trabalhar em arquitetura paralela de DSPs TMS320C44, gerenciando a comunicação entre os processadores e a memória compartilhada com alto desempenho. Uma versão com um processador TMS320C32 foi desenvolvida para controlar o sistema do duto em tempo real, reduzindo o ruído em todas as faixas de frequência.

O tratamento da realimentação acústica foi feito através de: confinamento do microfone, confecção de caixas acústicas especiais e mediante a remoção através de um modelo baseado na técnica adaptativa.

A programação genética aplicada ao sistema, convergiu para o modelo de atraso e ganho, utilizado pelo GA e previsto pela teoria.

## **Abstract**

This thesis addresses the problem of actively control acoustic noise in ducts through the application of genetic algorithm and genetic programming (called GENETIC CONTROL).

Three different strategies were adopted. In the Simple Genetic Algorithm (SGA) each individual of a generation represents a specific frequency, phase and amplitude used in cancellation of noise and the fitness function is the average energy of the signal. The Successive Approach Genetic Algorithm (SAGA) is a modification of SGA, where a first level procedure searches for candidate frequencies and a second level improves them between fixed limits, with phase and amplitude. To run in real time, a gain/delay model was coded into the chromossome.

A simulation model was developed to test the software and to analyse the behavior of the genetic algorithm parameters.

The software was designed to work in a parallel DSP TMS320C44 architecture managing processors communication and shared memory with high performance. A monoprocessor version was developped to control the duct system under realtime with noise reduction.

The acoustic feedback was removed through the microphone confinement, special sound boxes and through adaptive model approach.

Genetic programming applied to the sistem converges to the genetic algorithms gain/delay model as foreseen by the theory and experiment.

## Capítulo 1

### Objetivos.

As técnicas de controle concebidas para sistemas complexos, entre eles os controles duais e adaptativos, lidam simultaneamente com identificação e controle da planta em tempo real, sem conduzir, contudo, a otimização do conjunto de modo autônomo.

O algoritmo genético (GA), por outro lado, tem sido largamente aplicado em análise, otimização *off-line* e tomadas de decisões nos quais as limitações de tempo de resposta rápidas e tratamento de interrupções em tempo real não são relevantes.

Esta tese propõe uma técnica de controle, aplicada ao cancelamento de ruído acústico, em que identificação, controle e otimização podem ser realizados de forma autônoma utilizando a programação genética (GP) para obtenção do modelo de controle e o algoritmo genético (GA) para adaptação dos parâmetros, implementado em Processadores Digitais de Sinais (DSP), conforme esquema da figura 1.1.

Nesta estrutura o modelo de controle é obtido com a programação genética, bloco 1 da fig. 1.1, utilizando dados da planta e uma função de desempenho que expressa o objetivo a ser atingido, otimizando a planta de modo autônomo. O algoritmo genético, bloco 2, adapta em tempo real os parâmetros do modelo a mudanças da planta.

A programação genética pode fornecer dois tipos de modelos: os que dependem explicitamente do tempo e exigem procedimentos de sincronização para sua utilização, e os que são escritos como equação de diferenças e não trazem o tempo explicitamente. Ambos são abordados neste trabalho.

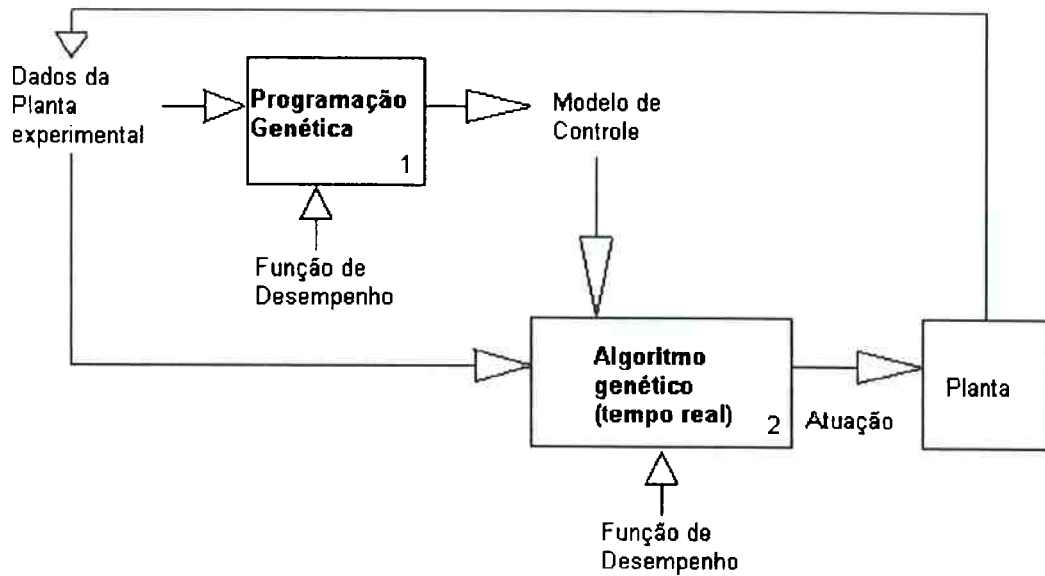


Fig 1.1 Estrutura proposta para identificação, controle e otimização autônoma.

O estudo utilizou a aplicação de controle de ruído acústico por ter uma dinâmica suficientemente complexa para a ação de controle e ter importância prática para explorar os conceitos envolvidos. Foram estudados os efeitos da geometria da planta na realimentação acústica para seleção das mais propícias ao estudo.

Assim, o desempenho do método proposto é avaliado através da comparação com os resultados obtidos com as técnicas adaptativas, caminho seguido pela comunidade científica. Esta abordagem como aqui é mostrado, tem suas limitações devido às características da resposta do sistema em diferentes frequências, largura de banda e variações da frequência do ruído no tempo, o que conduz frequentemente à instabilidade do sistema de controle.

Os resultados da aplicação no duto acústico aqui alcançados são significativos por serem de utilização direta em sistemas de ar condicionado, escapamento de veículos, sistemas de exaustão industrial, entre outros. Em relação a um sistema real complexo, como uma cabine de avião ou veículo, o duto é uma simplificação que tem as vantagens da unidimensionalidade.

Finalmente, a abordagem aqui proposta visa explorar a potencialidade de processamento paralelo e a inteligência artificial inerentes aos algoritmos genéticos, conduzindo ao conhecimento da estrutura do processo e do desempenho do controle, através da função de desempenho.

### **1.1 Estrutura da tese.**

O capítulo 2 introduz a complexidade do cancelamento ativo acústico, apresentando conceitos, o cenário dos algoritmos evolucionários e as diferentes abordagens para soluções do cancelamento acústico, segundo modelos utilizados: geométricos, adaptativos e evolucionários.

O modelo matemático do sistema acústico é apresentado no capítulo 3, seguido da análise dos algoritmos genéticos (capítulo 4): conceito e formulação matemática do GA e do GP.

A montagem experimental e a plataforma utilizada para aplicação do cancelamento acústico estão descritas no capítulo 5.

No capítulo 6 utilizamos o algoritmo genético em tempo real em uma abordagem que adota uma codificação direta da forma de onda (SGA e SAGA), seguida pela codificação de parâmetros de um modelo de operador, no caso atraso e ganho. O tratamento da realimentação acústica é feita no capítulo 7.

A programação genética é utilizada para obtenção de dois tipos de modelos de controle aplicada a ruídos monocromáticos: dependente explicitamente do tempo e na forma de operador (capítulo 8).

A tese é concluída (capítulo 9) apresentando as contribuições e os futuros desenvolvimentos.

## Capítulo 2

### **Introdução.**

Vivemos em uma época em que há uma grande preocupação com tudo que esteja relacionado com a qualidade de vida que levamos. Entre os vários fatores há um aspecto importante que precisa ser considerado: o do conforto sonoro.

O ser humano, quando exposto a um ruído contínuo, não necessariamente de alta intensidade ou frequência, fica sujeito a um nível de estresse que, entre outros efeitos nocivos à saúde, aumenta a taxa de acidentes e reduz a produtividade (Santos 1998).

A poluição sonora nos ambientes industriais é tratada com protetores auditivos que são colocados dentro dos ouvidos ou em seu exterior, para impedir a propagação das ondas até os tímpanos. Isto não impede outros danos causados por ruídos de baixa frequência no indivíduo.

Nos escritórios, os ruídos dos equipamentos de ar condicionado, bombas de água, ventiladores, etc, geralmente são tratados com isolamento passivo nos dutos de ar condicionado e na sala de máquinas, com redução das componentes de alta frequência.

Este trabalho explora técnicas complexas de controle que conduzem ao cancelamento de ruído com a geração de sinais sonoros que somados ao ruído, reduzam a sensação auditiva em baixas frequências, onde as técnicas passivas não apresentam bons resultados.

## ***2.1 Fundamentos de acústica e de controle ativo de ruídos.***

A acústica é a parte da Física em que se investigam as vibrações e os fenômenos ondulatórios em meios elásticos, nos quais as frequências envolvidas estão na faixa de 20Hz a 20.000Hz. Uma introdução teórica é apresentada em Kinsler (1982).

Define-se por onda todo o fenômeno periódico em que ocorre o transporte de energia, mediante a perturbação do meio elástico. Elas se originam a partir do movimento mecânico ou da colisão de objetos, e ao atingir o ouvido humano, são interpretadas como sons. Sua propagação exige um meio material onde cada partícula efetua um movimento periódico em torno da posição de equilíbrio, sem deslocamento global do meio: pode ser visto como a propagação de regiões de compressão e descompressão de ar sem transporte de matéria.

Uma onda é caracterizada por velocidade de propagação, frequência, amplitude e fase.

A velocidade de transporte de energia depende das características do meio. Em um sólido, a velocidade será muito maior do que em um gás devido à proximidade das moléculas. Características físicas como temperatura, umidade e pressão influem na velocidade.

A análise do espectro de frequências classifica um som em monocromático (uma única frequência), ou policromático (várias). As ondas que existem naturalmente são constituídas por um número finito de frequências e constituem um trem de ondas. Pode haver um ruído de banda larga sobreposto ao trem de ondas policromático.

A amplitude caracteriza o máximo afastamento da partícula do meio em relação à posição de equilíbrio e está relacionada com a energia que pode transportar. Ocorre dissipação quando a amplitude decresce na propagação devido à absorção (parte da energia é utilizada para elevar a agitação térmica das moléculas e é assim absorvida) ou



por distribuição de energia (em uma onda esférica a amplitude decresce com o quadrado da distância em relação à fonte emissora).

A fase depende das condições geométricas do sistema (das distâncias percorridas) ou do momento de início da geração do sinal. A frente de onda é o lugar geométrico dos pontos do meio que tem num determinado instante a mesma fase, por exemplo: esférica, plana, cilíndrica, etc.

A relação entre a direção de propagação e a do movimento das partículas definem o tipo de onda: longitudinal (coincidente), transversal (perpendicular) ou mistas (ambas simultaneamente).

A superposição de todas as ondas se propagando em uma região definem o campo acústico. A equação que o define é a equação de onda, uma equação diferencial parcial, em muitos casos linear, que possui a propriedade da superposição de soluções: a soma de soluções particulares é uma solução. Utiliza-se este princípio para tratar cada fonte independentemente e sobrepor os resultados obtidos.

As soluções superpostas podem interagir, provocando interferência, batimento ou em certos casos realizarem interferência construtiva ou destrutiva. Nestes casos não ocorre dissipação ou distribuição de energia, mas será mostrado que há absorção pela fonte da energia acústica.

O trabalho desenvolvido estuda estratégias de controle para gerar um sinal sonoro, que superposto ao ruído leve à condição de interferência destrutiva.

Há dois tipos de controle utilizados na redução de ruídos: ativo ou passivo.

O controle passivo utiliza barreiras mecânicas, reduzindo a intensidade da onda sonora e o ativo utiliza a energia acústica para redução. Os materiais absorvem eficientemente a energia acústica, transformando-a em térmica a partir de 600 Hz.

Para teste dos algoritmos utilizados no controle ativo, foram construídos dutos de seção retangular e cilíndrica. Os dutos tem condições experimentais favoráveis, pois são de fácil construção, possuem condições de contorno adequadas, tem a solução do modelo matemático por separação de variáveis, e teoricamente apenas ondas planas se propagam até um valor limite de frequência.

As fontes de ruído e sinal utilizadas foram alto-falantes, que consistem em uma bobina conectada a um diafragma de formato cônico, imersa em um campo magnético permanente. A alimentação da bobina com corrente elétrica alternada provoca o deslocamento do diafragma, causando pressão ou sucção na área do cone. Os microfones são utilizados como sensores, medindo o campo acústico em suas proximidades.

A atuação do sistema de controle pode provocar no campo acústico zonas de silêncio, cancelamento de bandas e frequências ou diminuição do ruído em algumas regiões com aumento em outras (efeito colchão de água). Outro efeito é a realimentação acústica, que ocorre devido à impossibilidade dos microfones distinguirem o sinal utilizado na ação de controle do ruído. A leitura do microfone carregando parte do sinal de atuação, fará com que o controlador tente cancelar o sinal por ele mesmo criado, levando o sistema à instabilidade. Isto ocorrerá sempre que a atuação e o sinal lido forem da mesma natureza.

Estratégias de controle clássicas lineares sofrem sérias limitações nesta aplicação, como apontada na literatura (Widrow 1985 e Astrom 1989). A dinâmica da planta conduz esses controles a instabilidade devido às variações do ruído e das condições acústicas, às flutuações do campo de pressões, realimentação acústica e principalmente aos atrasos na propagação sonora e reflexões nos extremos do duto. Estratégias complexas de controle adaptativa tem sido empregadas (Kuo 1996).

Na aplicação em dutos três esquemas tem sido usados: a montagem com sensor antecipativo junto a fonte de ruído; a montagem com um microfone a montante do alto-falante de atuação e no ponto de cancelamento sonoro a jusante dos alto-falantes de atuação (fig. 2.1).

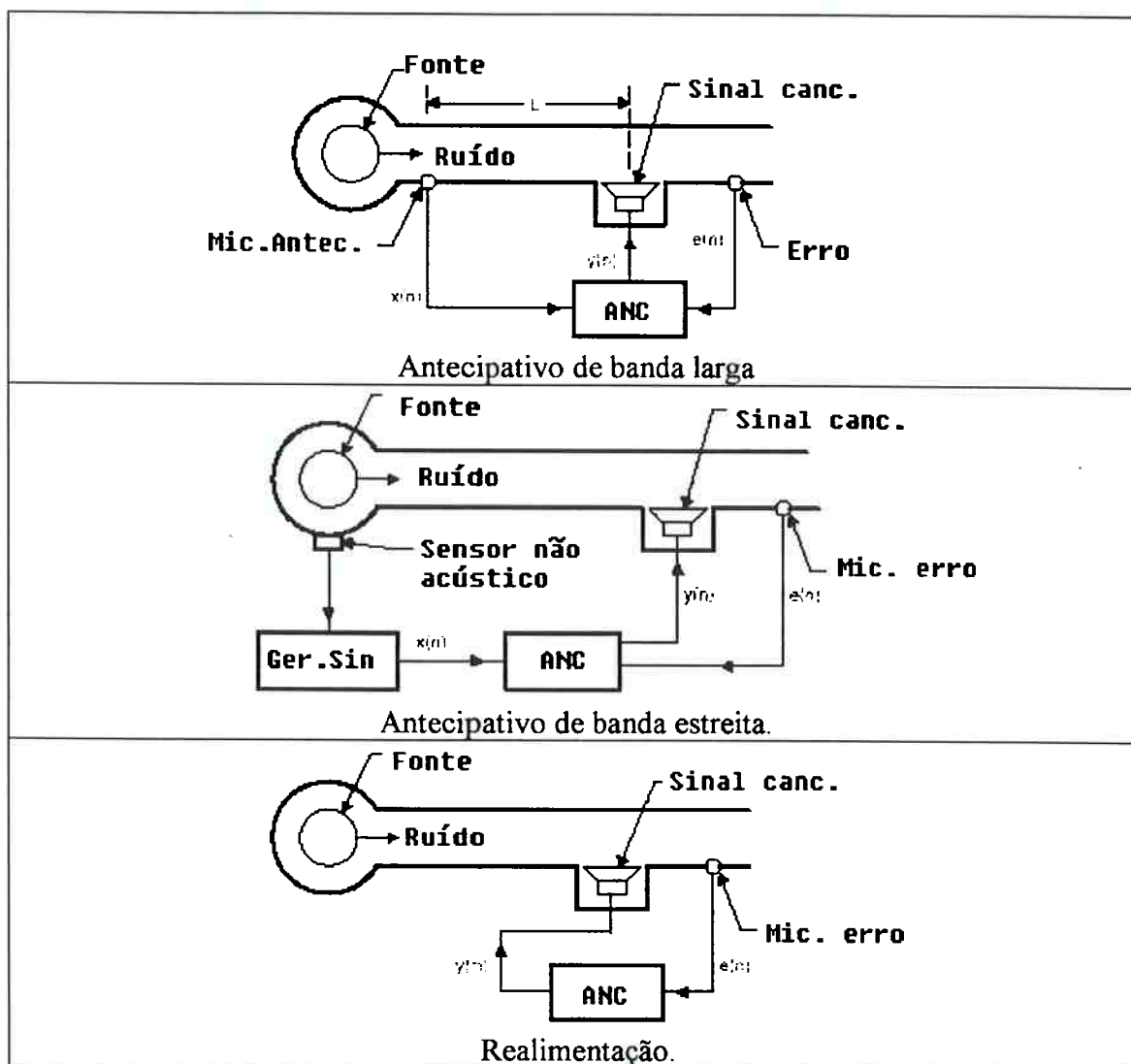


Fig. 2.1 Esquemas de montagem do controle.

## 2.2 O cenário e o histórico dos algoritmos evolucionários.

A evolução e o aprimoramento da vida ocorrem na natureza no momento da reprodução, onde cada um dos indivíduos contribui com parte de sua carga genética.

As partes combinadas salientam outras características que podem formar indivíduos melhor adaptados à condição ambiental, com melhor condição de sobrevivência.

As características dos indivíduos são determinadas por agentes localizados nos cromossomos dos núcleos celulares chamados genes. Eles determinam as características individuais. O descobridor dos mecanismos de transmissão da herança foi Mendel, em 1850, através do estudo do cruzamento de ervilhas (Basile 1976).

Os cromossomos são as estruturas que representam os agentes físicos portadores dos fatores genéticos. Em uma mesma espécie o número é constante (46 no homem, 8 na *Drosophila Melanogaster*, 22 no feijão, 20 no milho). Hartl (1998) classifica os pedaços de cromossomos como *introns* quando não tem função aparente (apenas estruturais) e como *exons* quando codificam informações úteis. No ser humano 90% dos cromossomos são introns (apenas estruturais).

Define-se genótipo como sendo a constituição gênica do indivíduo. Chama-se fenótipo os caracteres exibidos pelos indivíduos, reflexo do genótipo.

No trabalho de estudo das características das ervilhas, Mendel separou ervilhas bem distintas e diferenciáveis, que gerassem descendentes férteis e que fosse fácil proteger de uma polinização estranha.

Após várias análises escolheu os seguintes caracteres para diferenciação: cor da semente (amarela/verde), forma da semente (lisa/rugosa), cor da vagem (verde/amarela), forma da vagem (lisa/ondulada), altura do pé de ervilha (alta/baixa), posição das flores (ramos/terminal), cor da flor (colorida/branca).

Mendel selecionou linhagens puras (aquelas cujas características se mantinham ao longo das gerações), e realizou o cruzamento entre elas. Nas gerações seguintes

verificou que há características dominantes (onde a presença de um gene já obriga o aparecimento) e recessivas (onde apenas dois genes recessivos permitem a aparição).

Os genes dos pais, combinados em vários filhos, mostravam diferentes características que nos pais estavam ocultas por serem recessivas.

Outras combinações que resultem em indivíduos recessivos podem causar um fenótipo com malformações congênitas. Estas malformações são desvios em relação à forma, tamanho, posição, número e coloração de uma ou mais partes capazes de serem averiguadas macroscopicamente. O número de casos na raça humana chega a 7% da população.

Estes indivíduos em relação a um índice de desempenho apresentam uma resposta débil e em um meio hostil poderão ser eliminados, encerrando sua linhagem.

Em 1859, Darwin propõe o processo de evolução natural, onde novas espécies são produzidas pela seleção natural. Todos os indivíduos tem potencialidade de aumentar em progressão geométrica, porém em cada geração o número de indivíduos de uma espécie permanece constante devido à competição pelo alimento, água, luz, temperatura e outros fatores ambientais (Basile 1976).

Há variações em todas as espécies e os indivíduos que apresentam variações favoráveis conseguem sobreviver e reproduzir-se, transmitindo estas características para os descendentes.

Darwin não conseguiu explicar as variações hereditárias que são provocadas por mutações.

Durante o processo reprodutivo o cromossomo pode sofrer pequenas alterações, causando o aparecimento de características diferentes no indivíduo. Este fenômeno é a mutação.

Todos os seres vivos apresentam uma grande quantidade de mutações que os diferenciam uns dos outros, bem como uma espécie das demais, como cor dos olhos (azuis, castanhos, verdes), tipo de cabelo (liso, crespo, encarapinhado), cor da pele (branca, negra), capacidade ou incapacidade de enrolar a língua, etc.

Estas alterações podem ocorrer em genes do cromossomo (mutação gênica) ou em pedaços do cromossomo (*crossover* ou *crossing-over*).

Na mutação gênica, durante o processo de duplicação do DNA, as duas hélices em espiral separam-se gradativamente à medida que novas espirais se arranjam a partir do molde. Qualquer alteração que surgir nesse processo de duplicação vai produzir uma cópia diferente do DNA (Basile 1976).

O DNA vai posteriormente enviar para o citoplasma uma mensagem em código (RNA), para produção de certas proteínas. Se o DNA foi alterado, o código também o será, e conseqüentemente a proteína produzida pelo citoplasma será diferente, causando alterações fenotípicas no indivíduo.

As mutações cromossômicas estão relacionadas com a troca de pedaços do cromossomo, inversão, duplicação, deficiência ou translocação (quando dois cromossomos sofrem fratura e seus pedaços são trocados).

As causas de sua ocorrência não são conhecidas, porém é sabido que radiações ionizantes aumentam linearmente a freqüência de mutações. Produtos químicos como gás mostarda, fenol, metil-colantreno, etc, também causam mutação.

Na atmosfera primitiva de nosso planeta, a presença de radiações ionizantes vindas do sol, devem ter contribuído para o desenvolvimento de formas de vida adaptadas às constantes alterações do meio ambiente em formação, com indivíduos mutantes que disputaram sua sobrevivência com outros mutantes.

Os melhores adaptados tiveram mais facilidade em passar sua carga genética adiante.

O algoritmo genético (GA), proposto por Holland (1975), imita os processos biológicos e foi inicialmente utilizado no estudo de sistemas adaptativos complexos. Goldberg (1989), utiliza-o com a codificação das variáveis do modelo a ser otimizado no cromossomo de uma população de indivíduos, cada um representando uma solução diferente. A evolução da população ocorre por operadores genéticos de seleção, cruzamento(ou *crossover*), mutação e reinscrição.

O algoritmo genético pode ser utilizado para ajuste de parâmetros de um modelo de controle conhecido, como em Li (1998), onde é utilizado para ajuste *on-line* de três alternativas de controladores para uma suspensão magnética. O GA, neste caso, tem a vantagem de não precisar de um modelo preciso da planta, mas a função de desempenho deve ser muito bem estudada para ter sensibilidade à variação dos parâmetros e poder dirigir o resultado à melhor solução.

Yao (1994), utiliza o GA para identificação de parâmetros para filtros digitais lineares e não lineares e para redes neurais, mostrando bons resultados na otimização de funções não lineares, onde métodos usando gradiente falham pela influência de mínimos locais. Salienta que o GA possui a desvantagem de ser mais complexo que a abordagem por gradiente, pois necessita estimar muitos conjuntos de parâmetros diferentes em cada geração, limitando sua aplicação à identificação, estimação e otimização *off-line*.

Schroder (1998), utiliza o GA para ajuste dos parâmetros de um controlador PID, utilizado para controle do rotor levitado em um mancal magnético de uma bomba selada. O algoritmo genético é utilizado para obtenção do conjunto de controladores ótimos.

Kristinsson (1992), aplica o GA para identificação de sistemas descritos usando ARMAX, obtendo os pólos e zeros da função de transferência e posteriormente sintetizando um controlador adaptativo por alocação de pólos, para obtenção da resposta desejada. A solução encontrada foi robusta, convergiu para os valores corretos e mostrou a importância da sensibilidade da função de desempenho na velocidade de convergência.

O desenvolvimento de sistemas de classificação, utilizando algoritmos evolucionários, procura entender ou extrair regras e características de um objeto ou sistema através da interação entre o ambiente, receptores, atuadores e o sistema propriamente dito.

Mahfoud (1996), utilizou esta abordagem para otimização de *portfolio* de ações cotadas em Bolsa de Valores. Codificou as variáveis preço e ganho no cromossomo para obter regras do tipo:

**SE (preço < valor) e (ganho > 1.0) ENTÃO compre a ação analisada.**

Os operadores foram codificados como *bits*, seguidos dos valores numéricos e a função de desempenho avalia o retorno da carteira de ações.

Uma serie temporal, com a evolução das ações componentes de um *portfolio*, foi utilizada para treino do algoritmo, o qual efetuou a previsão do comportamento futuro (*forecasting*) das cotações, gerando informações para influenciar as decisões a serem tomadas pelo operador da mesa da corretora.

A programação genética (GP) proposta por Koza (1992,1994) é uma extensão do modelo genético de aprendizado para o espaço de programas. Os objetos que definem a solução do problema não tem comprimento fixo, e são programas cuja execução é a solução. Utiliza uma representação em árvores da solução, com nós definidos entre as



funções primitivas escolhidas, extremos contendo variáveis e constantes (terminais) e os operadores genéticos normais.

Wineberg (1996), introduziu o conceito de *introns* e *exons* no GA para não utilizar a GP. Uma estrutura de árvore com as dimensões máximas possíveis é criada para cada indivíduo, possibilitando codificar a árvore de interesse na estrutura. Os pedaços sem função ele associou o conceito de *introns*.

Esta abordagem dificulta a codificação dos operadores de mutação, além de utilizar área de memória com *introns* que poderia ser utilizada para aumento da população.

Atualmente, o GA é utilizado em todas as áreas do conhecimento para otimização de sistemas em Biologia, Física, Engenharia, Medicina, etc. As aplicações em controle ativo de ruído e vibrações serão mostradas a seguir.

### ***2.3 Evolução do controle ativo de ruído em dutos sonoros.***

A primeira patente requerida para controle ativo cabe a Lueg (1936), não tendo tido aplicação na época devido às dificuldades tecnológicas (50 anos antes do aparecimento do DSP).

Swinbanks(1973) e Poole(1976), propuseram um método de atenuação de ondas propagando em um duto, onde o ruído é detectado por um microfone (a montante) e o sinal de atuação é utilizado em dois conjuntos de alto-falantes presos às paredes (a jusante). A atuação também será cancelada a montante pelos alto-falantes, impedindo a propagação na direção do microfone detector, eliminando a realimentação acústica.

O resultado utilizando dois conjuntos de alto-falantes mostrou uma interferência entre os sinais que compromete o resultado. A utilização de 3 conjuntos de alto-falantes dá um resultado melhor.

Como o atraso do sinal e a distância entre os alto-falantes é fixa, ocorre uma janela de cancelamento em frequência.

Eghetesadi(1982), propôs utilizar um microfone para detectar o ruído e gerar o sinal de cancelamento no alto-falante com atraso dado por  $\tau = L/c$  invertendo a fase ( $c$  é a velocidade do som e  $L$  a distância entre o detector e os alto-falantes atuadores). O microfone funciona como um somador entre o ruído e o sinal usado para cancelamento, ocasionando o chamado efeito de realimentação acústica, fator que gera instabilidade do sistema de controle.

Como a distância utilizada para cálculo do atraso é constante, pode ocorrer o cancelamento em uma frequência específica. O sistema é pouco robusto a variações na dinâmica da planta e sensível a transitórios com queda apreciável do desempenho.

As características inerentes à dinâmica dos alto-falantes, microfone e geometria da secção não foram consideradas nesse estudo.

Xuesong (1995), utiliza uma variante do esquema anterior com um único microfone usado para medida do sinal e do erro com o que procurou evitar a realimentação acústica.

Foi utilizado um algoritmo antecipativo (Oppenheim(1992)), associado a um filtro IIR (*Infinite Impulse Response*) para cálculo do valor futuro do ruído, com um algoritmo de mínimos quadrados. Supondo um atraso puro, conseguiu uma redução de 35 dB

A abordagem adaptativa utiliza filtros FIR (*Finite Impulse Response*) e IIR e foi desenvolvida por Morgan (1980). A teoria e implementação podem ser encontradas em Nelson (1992), Chassaing (1992), Kuo (1996a), Widrow (1985), Kuo (1996b), Haykin (1991), Cowan (1985).

Esta técnica foi aperfeiçoada por Eriksson (1989), baseado no algoritmo RLMS (*Recursive Least Mean Square*) de Frenuch (1976) e é utilizada pela *Digisonix Inc*, nos projetos de sistemas de controle ativo aplicado em automóveis (Digisonix 1997) e aviões (Texas 1996).

O filtro FIR (também chamado de MA – Moving Average) utiliza uma convolução discreta entre os coeficientes e as entradas anteriores que pode ser escrita como:

$$g(n) = \sum_{i=0}^l h(i)f(n-i) \quad (2.1)$$

com  $h(i) = a_n$  para  $0 \leq n \leq i-1$  e  $h(i) = 0$  para  $n \geq i$ ;  $g$  sinal de saída do filtro e  $f$  sinal de entrada do filtro.

Tem como vantagens a implementação digital em tempo real, sempre estável, com coeficientes finitos e são previsíveis as alterações na frequência, causadas por pequenas mudanças em qualquer coeficiente. Como a função de transferência tem apenas zeros, necessita de muitos termos para boa aproximação da dinâmica do sistema.

No método IIR as saídas anteriores e as entradas são levadas em conta no cálculo da função de transferência:

$$g(n) = \sum_{i=0}^l a_i f(n-i) + \sum_{k=0}^m b_k g(n-k) \quad (2.2)$$

onde  $l$  e  $m$  são as ordens do filtro.

As características do IIR nesta aplicação são estabilidade desde que os pólos estejam dentro da esfera de raio unitário e grandes mudanças na frequência podem ser obtidas com pequenas mudanças nos coeficientes  $b$ . É necessário um menor número de coeficientes que no FIR, mas necessita de muitos termos quando há realimentação acústica, banda larga ou sons policromáticos (Nelson 1994).

A obtenção dos coeficientes é feita num esquema de controle adaptativo que utiliza um conjunto de coeficientes variantes no tempo para modelar o sistema de interesse. Na aplicação de controle ativo de ruído, o objetivo é gerar saídas pelo alto-falante, criando uma condição nula de transmissão de ruído no duto. São utilizados conjuntos de coeficientes obtidos *off-line* para modelar a função de transferência, entre o alto-falante e o microfone de erro e entre o alto-falante e o microfone antecipativo. Um terceiro conjunto de parâmetros é atualizado em tempo real para correção da transmissão e evitar a realimentação positiva do sistema.

Técnicas gerais de identificação de sistemas utilizadas aqui para modelar as funções de transferência referidas anteriormente podem ser vistas em Ljung (1987), Garcia (1986) e Kay (1988).

Na identificação *on-line*, um sinal formado por um ruído branco de baixa intensidade é enviado junto com o sinal de controle. O ruído acústico não afeta a identificação pois não tem correlação com o sinal (Eriksson 1989b). O desenvolvimento teórico em detalhes destes procedimentos pode ser encontrado em Astrom (1989) e Kuo (1996).

O algoritmo LMS consiste em um algoritmo de busca da correção dos coeficientes do filtro que minimizem o erro  $\zeta$  entre o valor medido  $e[n]$  e o calculado  $D[n]$  utilizando a convolução da excitação  $Y$  com a função de transferência  $C[n]$  (Fig. 2.2):

$$\begin{aligned} D[n] &= \sum_{i=0}^1 C_i[n] * Y[n-i] \\ \zeta[n] &= e[n] - D[n] \\ C_{i+1}[n] &= C_i[n] + 2 \mu \zeta[n] Y[n-i] \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde  $\mu$  regula a velocidade e estabilidade da adaptação e está relacionado com a potência do sinal e pode tornar o sistema de controle instável ou muito lento. Variação na potência do sinal afeta a rapidez de convergência.

O algoritmo LMS corrige cada coeficiente ponderando o erro com a excitação. Se o resultado  $D[n]$  do modelo adaptativo  $C_i[n]$  coincidir com a dinâmica da planta,  $\zeta$  será nula, e os coeficientes  $C$  serão invariantes no tempo. Há um tempo de adaptação do algoritmo, durante o qual o sistema de cancelamento pode tornar o sistema acústico mais ruidoso e sistemas variantes no tempo podem apresentar problemas de convergência do algoritmo.

O algoritmo adaptativo a cada ciclo de cálculo corrige os coeficientes do filtro, sintetizando uma melhor identificação da planta.

O esquema adaptativo FXLMS (Filtered-X Least Mean Square) inclui o efeito do caminho entre o alto-falante de atuação e o microfone de erro (caminho secundário) conforme mostrado na figura 2.3, onde  $P[z]$  é a propagação entre a fonte de ruído e o microfone de erro,  $D[z]$  é a propagação entre os alto-falantes de atuação e o microfone antecipativo,  $C[z]$  é a função de transferência entre os alto-falantes de atuação e o microfone de erro (Kuo 1996).

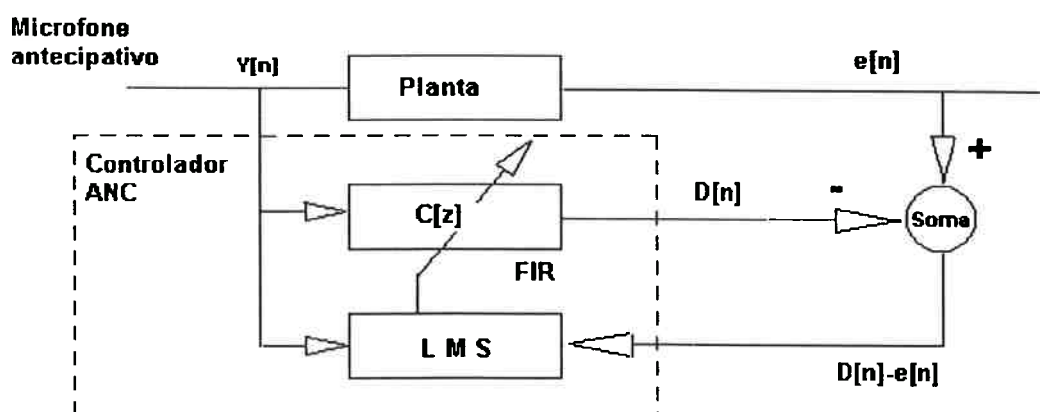


Fig. 2.2 Algoritmo LMS para filtros adaptativos.

Para garantir a convergência do algoritmo, a entrada para a correção do erro é filtrada por um estimador do caminho secundário  $C[z]$ .

Na figura 2.4 o efeito da realimentação acústica é incluída, onde  $F[z]$  representa a realimentação positiva do sistema,  $u[n]$  a leitura do microfone antecipativo e  $X[n]$  a leitura descontando a realimentação através da convolução  $D[n]*Y[n]$ , uma estimativa do sinal de atuação propagado até o microfone antecipativo.

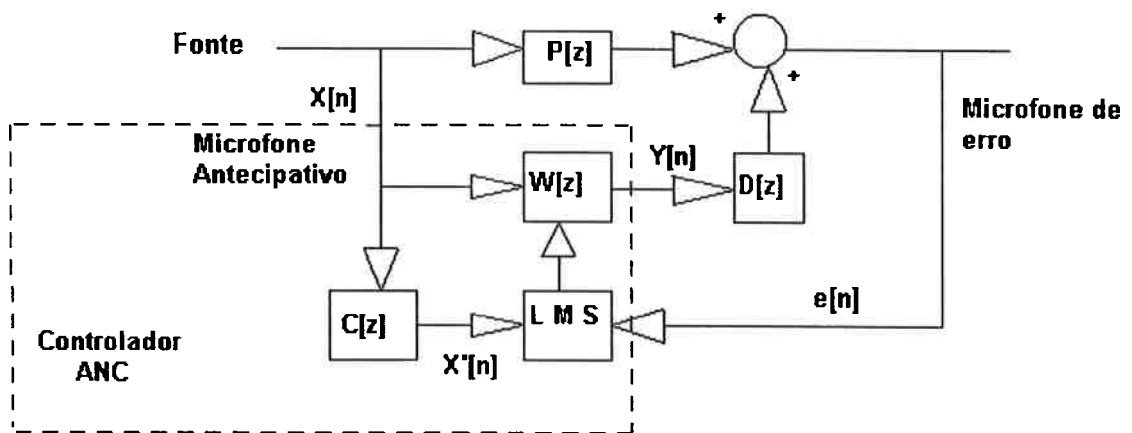


Fig. 2.3 Algoritmo FXLMS

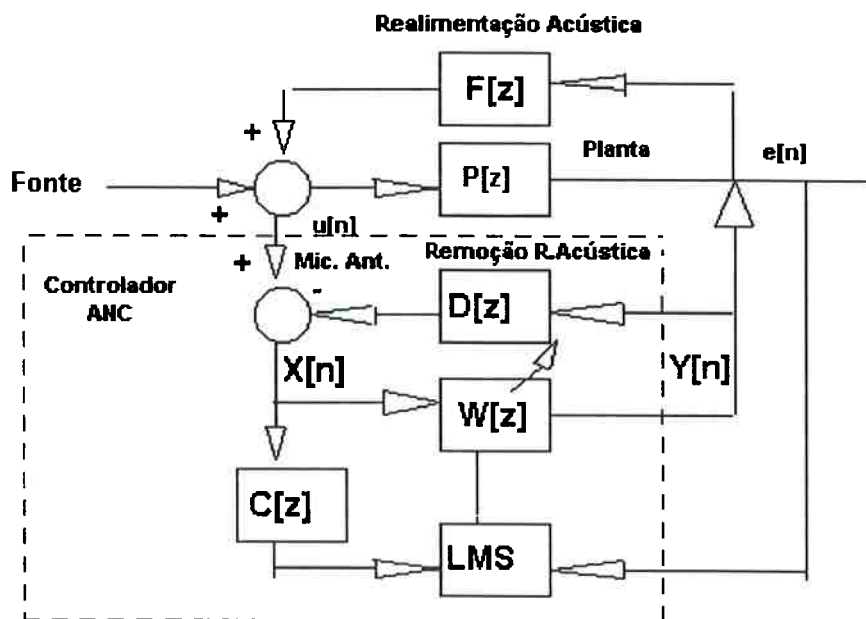


Fig 2.4 FXLMS com remoção da realimentação acústica: FBFXLMS.



amostragem de 2000 Hz. O tempo de convergência, ordem do filtro e frequência de amostragem, dependem do tamanho do duto e das características dos alto-falantes.

O algoritmo de controle pode ser resumido (Fig. 2.4):

- Leitura dos microfones  $u[n]$  e  $e[n]$ .
- Eliminação da realimentação acústica pelo filtro  $D[z]$

$$X[n] = u[n] - \sum_j D_j Y[n-j] \quad (2.6)$$

- Cálculo do sinal de atuação:

$$Y[n] = \sum_i W_i[n] X[n-i] \quad (2.7)$$

- Cálculo de  $X'[n]$  sinal  $X[n]$  propagado na posição do microfone de erro:

$$X'[n] = \sum_i C_i[n] X[n-i] \quad (2.8)$$

- Cálculo dos coeficientes  $W$  responsáveis pela remoção do resíduo da realimentação positiva:

$$W_i[n+1] = W_i[n] + \mu e[n] X'[n-i] \quad (2.9)$$

Bai (1998), apresentou a generalização das técnicas adaptativas para o caso MIMO, isto é, quando há mais de um sistema de aquisição e atuação. O efeito da realimentação acústica torna-se mais complexo pois cada microfone antecipativo é alimentado por todos os atuadores obrigando a utilizar o sinal de saída para os alto-falantes como sinal antecipativo. Outra diferença é a obtenção de regiões de silêncio e aumento de ruído em outras, chamado pelo autor de efeito de “colchão de água”.

Tang (1996) associou um algoritmo LMS com o GA para calcular os parâmetros de um FIR modificado, explicitando um termo com o atraso  $d$  e o ganho  $g$  :

$$H(z^{-1}) = gz^{-d} \sum_{i=0}^1 b_i z^{-ni} \quad (2.10)$$



Com isto é possível reduzir significativamente a ordem do filtro FIR usado tradicionalmente e obter um resultado superior ao RLS convencional para aplicações em tempo real.

O método IIR foi associado ao GA por Wangler (1995), para realizar uma busca aleatória dirigida dos parâmetros de filtros biquadráticos (fig. 2.6) em cascata com a seguinte função de transferência:

$$H(z) = \frac{(z - \alpha)(z - \alpha^*)}{(z - \beta)(z - \beta^*)} \quad (2.11)$$

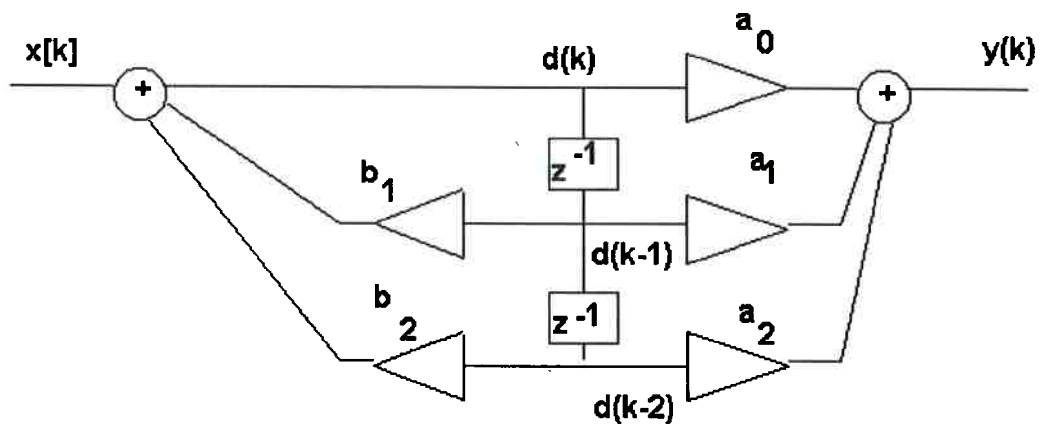


Fig. 2.6 Diagrama do filtro biquadrático.

O filtro biquadrático possui apenas 2 elementos em atraso, e pode ser atualizado através das equações:

$$\begin{aligned} d(k) &= x(k) + b_1 d(k-1) + b_2 d(k-2) \\ y(k) &= a_0 d(k) + a_1 d(k-1) + a_2 d(k-2) \end{aligned} \quad (2.12)$$

A equação para os pólos (realimentação) pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} H_1(z) &= \frac{1}{1 - b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}} \\ b_1 &= 2r_\beta \cos \theta_\beta \\ b_2 &= -r_\beta^2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

onde  $r_\beta$  e  $\theta_\beta$  são as coordenadas polares dos pólos.

A Equação dos zeros (antecipação) tem a forma:

$$\begin{aligned} H_2(z) &= a_0 - a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} \\ a_0 &= 1 \\ a_1 &= -2r_\alpha \cos \theta_\alpha \\ a_2 &= r_\alpha^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

onde  $r_\alpha$  e  $\theta_\alpha$  são as coordenadas polares dos zeros. A configuração de fase mínima do filtro biquadrático é obtida restringindo os zeros ao círculo unitário,  $|r_\alpha| \leq 1$ .

Para cálculo dos coeficientes através do algoritmo genético, é utilizada a seguinte normalização dos cromossomos:

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{(\text{valor} - \text{MIN})\pi}{\text{MAX} - \text{MIN}} \\ r_\beta &= \frac{(\text{valor} - \text{MIN})r_{\max}}{\text{MAX} - \text{MIN}} \\ r_\alpha &= \frac{\text{valor} - \text{MIN}}{\text{MAX} - \text{MIN}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

avaliado para cada indivíduo a fim de obter-se o desempenho dos filtros que serão utilizados no GA. MIN e MAX são os valores extremos da faixa de busca dos respectivos parâmetros.

Nesse estudo, cada indivíduo é considerado como um conjunto de parâmetros do filtro ( $\theta$ ,  $r_\alpha$  e  $r_\beta$ ), e a função de desempenho indica sua performance quando usado para cálculo da saída. O conjunto de parâmetros ótimos obtidos tem seu valor inalterado para qualquer ruído.

#### **2.4 Comparação das metodologias.**

O tratamento do cancelamento ativo acústico tem passado por diferentes etapas conceituais: geométrica, adaptativa e evolucionária.

A geométrica impõe um particular posicionamento de microfones e alto-falantes para cada ruído de tom puro. Não trata o problema de banda larga ou a variação de

freqüência no tempo. Tem o objetivo de atrasar o sinal lido no microfone antecipativo para cancelar o ruído.

As técnicas adaptativas tratam sinais e plantas que variam no tempo. O modelo da planta é obtido através da identificação dos coeficientes dos filtros, e reflete os atrasos e ganhos da planta nos seus vários caminhos. Nesta abordagem, o objetivo é obter utilizando uma estrutura matemática fixa, um conjunto de coeficientes que gere uma saída nos alto-falantes, que faça a transmissão do ruído pelo duto ser nula. Uma dificuldade que está presente é a realimentação acústica. A partir da identificação dos caminhos da planta, é possível isolar os sinais lidos nos microfones, separar ruído de sinal, compensando de modo que reste apenas o ruído. O pequeno resíduo devido às alterações da planta ou incertezas do modelo é usado para correção dos coeficientes, eliminando assim a instabilidade do sistema e restabelecendo a transmissão nula.

Os algoritmos genéticos foram usados para busca ótima de parâmetros de filtros com estrutura fixa associada a um termo de atraso para redução da ordem, ou a busca de coeficientes que estejam dentro do círculo unitário no plano  $z$ , para garantir estabilidade ao IIR. O GA funciona nestes casos como um algoritmo de busca de solução de mínimos quadrados, entre o calculado valores calculados e medidos para variantes dos modelos de transmissão nula.

A vantagem do GA, nestes casos, é limitar a ação do sistema de controle a uma região de estabilidade. Dentro desta região e utilizando um modelo de controle pré-estabelecido, o melhor conjunto de parâmetros é obtido.

O algoritmo genético historicamente, foi concebido para obter um aprendizado do processo em tempo de execução, adaptando-se às variações do mesmo. Cada desempenho obtido contém informações da física do processo que não estão sendo utilizadas quando um modelo paramétrico é utilizado (modelo de caixa preta).

Nesta tese propõe-se a obtenção de modelos de controle para redução do ruído pela combinação GP e GA, adquirindo conhecimento dos processos físicos da planta e explorando a inteligência artificial do algoritmo. O GA é executado em tempo real para adaptação dos parâmetros do modelo obtido pela GP, conforme fig. 1.1.

## Capítulo 3

### Modelo matemático do sistema acústico.

#### 3.1 Equação de Helmholtz.

O cálculo do campo acústico (pressão em função das coordenadas espaciais e temporal) em um local pode ser feito através da equação de Helmholtz, deduzida em Butkov (1978) e resultando em:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p \quad (3.1)$$

Esta equação descreve a propagação de uma onda na ausência de fontes e sorvedouros.

Na fig. 3.1 está apresentada a evolução temporal da solução numérica para a equação de onda, sem fontes ou sorvedouros, sujeita às condições iniciais.

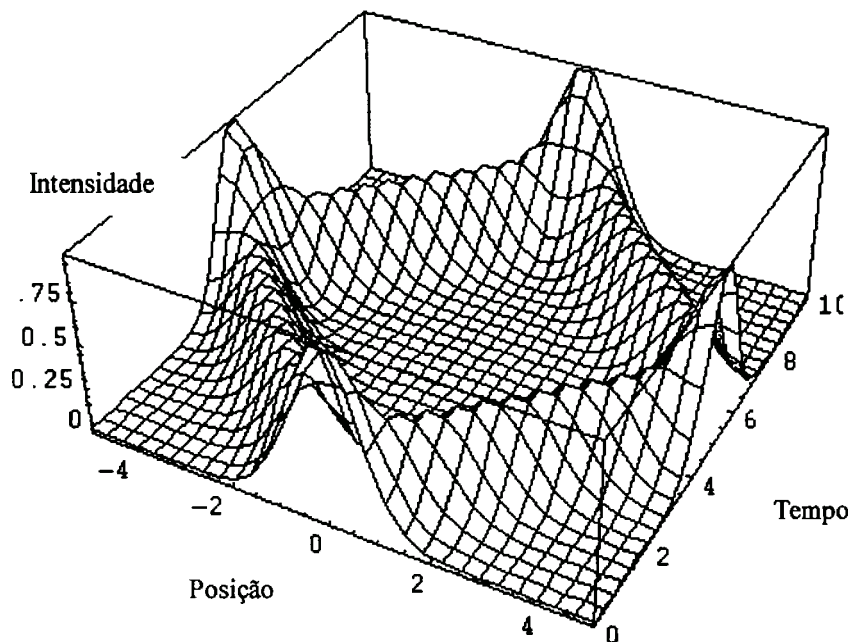


Fig. 3.1 Solução da equação de Helmholtz para condições iniciais dadas em unidades arbitrárias.

### 3.2 Modelamento matemático do duto retangular.

Seja  $z$  a coordenada ao longo do duto infinito e  $x$  e  $y$  as coordenadas no plano da secção. A pressão acústica  $p$  mede a mudança na pressão atmosférica em um ponto em função do tempo. Seja  $\rho_0$  a densidade de massa ambiente e  $c_0$  a velocidade do som,  $t$  para o tempo,  $\omega$  para a frequência em radianos e  $k$  o número de onda ( $k=\omega/c_0=2\pi/\lambda$ ).

Uma fonte acústica harmônica de frequência  $\omega$  e de amplitude  $Q_0$  pode ser colocada em um ponto  $x'$ ,  $y'$  e  $z'$ .

A pressão acústica deve satisfazer apropriadamente as condições de contorno quando  $z \rightarrow \pm\infty$  e nas paredes do duto. A velocidade da partícula  $v_i$  pode ser obtida da pressão acústica aplicando a conservação de momento linear e para um duto com paredes rígidas a componente normal da velocidade deve ser nula.

No caso do duto com uma fonte de ruídos no extremo, pode-se escrever a equação de ondas, conservação de momento linear, velocidade e as condições de contorno da seguinte forma (Doak 1973):

$$\begin{aligned} \nabla^2 p - \frac{\partial^2 p}{c^2 \partial t^2} &= -\rho_0 \frac{\partial(Q_0 e^{i\omega t})}{\partial t} \delta(x-x') \delta(y-y') \delta(z-z') \\ \rho_0 \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial v_i} &= 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

onde  $\delta(x-x') \delta(y-y') \delta(z-z')$  representa um ponto na superfície do alto-falante.

Uma solução particular da homogênea ( $Q_0=0$ ) pode ser obtida pelo método de separação de variáveis:

$$\begin{aligned} p(x, y, z, t) &= X(x)Y(y)Z(z)T(t) = \psi_{mm}(x, y)Z(z)T(t) = \\ &= \psi_{mm}(x, y)[a_{mm} \exp(i\omega t - i\omega z/c) + b_{mm} \exp(i\omega t + i\omega z/c)] \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde

$$\frac{\partial \psi_{mn}(x, y)}{\partial v_i} = 0 \quad (3.4)$$

com  $v$  normal a parede rígida do duto.

O termo  $\exp\{i\omega t \pm i\omega z/c\}$  representa ondas planas se deslocando nos dois sentidos do duto. As ondas transversais aparecem em  $\psi_{mn}(x, y)$ .

Conhecida a equação de propagação de ondas, pode-se mostrar que o campo acústico lido em um instante em um determinado local tem relação com a leitura a montante em um instante anterior:

$$\left. \begin{array}{l} z' = z + L \\ t' = t + \frac{L}{c} \end{array} \right\} \Rightarrow p(z', t') = p\left(z + L, t + \frac{L}{c}\right) = \exp\left(i\omega t + i\omega \frac{L}{c} - i\omega \frac{z}{c} - i\omega \frac{L}{c}\right) = p(z, t) \quad (3.5)$$

e analogamente para o outro sentido:

$$\left. \begin{array}{l} z' = z - L \\ t' = t + \frac{L}{c} \end{array} \right\} \Rightarrow p(z', t') = p\left(z - L, t + \frac{L}{c}\right) = \exp\left(i\omega t + i\omega \frac{L}{c} + i\omega \frac{z}{c} - i\omega \frac{L}{c}\right) = p(z, t) \quad (3.6)$$

de onde se conclui que um sinal se propagando não sofre alteração e em qualquer ponto posterior pode ser previsto a partir de uma leitura em um local anterior (não dispersividade).

### 3.3 Modelo Matemático do duto cilíndrico.

Em coordenadas cilíndricas na ausência de fontes de ruído, a equação de ondas e as condições de contorno são escritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial p}{r \partial r} + \frac{\partial^2 p}{r^2 \partial \phi^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 p}{c^2 \partial t^2} \quad (3.7)$$

$$p(r, \varphi, z, t) = R(r)Z(z)\Phi(\varphi)T(t) = \sum_m p_m J_m(k_r r) \exp[j(\omega t - k_z z + m\varphi)] \quad (3.8)$$

Condição de contorno:  $\frac{\partial J_m(k_r r)}{\partial r} = 0$

onde  $p_m$  é a amplitude,  $J_m$  é a função de Bessel  $m$  de primeiro tipo,  $k_z$  é o número de onda longitudinal,  $k_r$  é o número de onda transversal e  $k$  é o número de onda global definido como  $k = k_z^2 + k_r^2 = \omega/c$ .

Há infinitos valores que satisfazem a condição de contorno, pois a função de Bessel de ordem  $m$  possui infinitos pontos onde sua derivada é nula. Introduzindo  $n$  para identificar cada um destes pontos, pode-se discretizar os valores de  $k_r$  para cada possibilidade e denominar de  $k_{mn}$ , isto é, na funções de Bessel de ordem zero, o primeiro ponto de derivada nula seria  $k_{m0} = k_{00}$  e assim por diante. Pode-se escrever a equação 3.8 da seguinte forma:

$$p(r, \varphi, z, t) = \sum_m \sum_n p_{mn} J_m(k_{mn} r) \exp[j(\omega t - k_z z + m\varphi)] \quad (3.9)$$

Para determinar a condição de propagação de ondas planas, deve-se buscar o caso onde o campo acústico é uma função de  $z$  e  $t$  apenas. Isto ocorre quando  $m=n=0$ ,

$$\frac{\partial J_{00}}{\partial r} = 0 \Rightarrow J_{00} = 1 \Rightarrow p(z, t) = p_0 \exp[j(\omega t - k_z z)].$$

Esta solução é a onda plana se propagando pelo duto. Este é o único caso em que a pressão não depende do raio. A função de Bessel de ordem  $m > 0$  não afeta este resultado pois  $J_m$  é nula na origem.

### **3.4 Ondas transversais.**

As ondas transversais começam a aparecer acima da frequência de corte, dada por Germes (1983) :



$$F_c = \frac{c}{2L} \quad (3.10)$$

em Hertz para o duto retangular, e

$$F_c = \frac{1.84c}{\pi L} \quad (3.11)$$

em Hertz para dutos cilíndricos. Nestas expressões  $c$  é a velocidade de propagação do som em m/s e  $L$  é a dimensão transversal característica em metros. Acima destes valores, dentro do duto, deixa de haver apenas ondas planas, começando a haver ondas transversais. Por exemplo para o duto retangular com  $L=0.25$  m e  $c=340$  m/s tem-se  $F_c = 680$  Hz.

### **3.5 Ondas estacionárias.**

O resultado da interação entre as ondas que se propagam na mesma direção, porém em sentidos opostos, são ondas estacionárias cujas frentes de ondas passam por pontos em equilíbrio. As condições de contorno estabelecem que quando a extremidade está aberta há um ventre e quando fechada um nó. A partir daí é possível construir as funções de forma dos infinitos modos de vibração, acrescentando mais um nó entre dois nós existentes.

Na extremidade onde está instalado o alto-falante de ruído, convencionou-se colocar um nó.

Para o caso da outra extremidade estar fechada, as frequências de ressonância em Hz correspondentes são dadas pela expressão:

$$f_n = n \frac{c}{2L} \quad (3.12)$$

e para o caso de duto aberto:

$$f_n = (2n + 1) \frac{c}{4L} \quad (3.13)$$

onde  $n$  é o modo e vale 0,1, 2, ....

Utilizando um microfone posicionado ao longo do duto retangular, foi possível medir a amplitude da onda estacionária (figuras 3.2 e 3.3)

Uma varredura em frequência de 100 a 500 Hz foi realizada medindo a função de transferência em vários pontos ao longo do duto retangular. Os espectros foram divididos, canal por canal, pelo primeiro espectro obtido, para ressaltar o efeito das ondas estacionárias e seu formato.

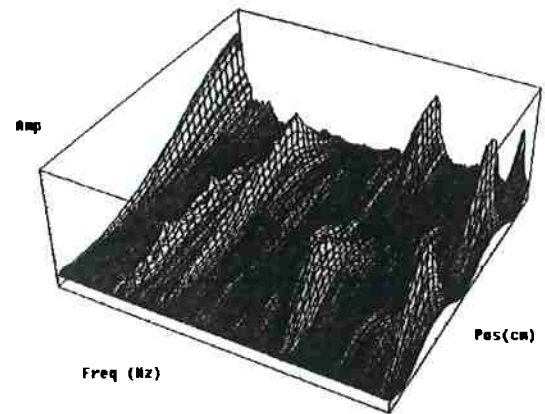
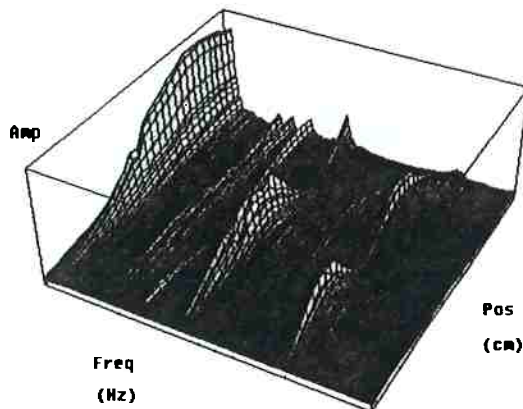


Fig. 3.2 Ondas estacionárias para duto retangular aberto

Fig. 3.3 Ondas estacionárias para duto retangular fechado

Os gráficos apresentam o efeito de modulação do sinal pelas ondas estacionárias de cada modo ao longo do duto.

### 3.6 Interferência entre ondas progressivas.

Para ondas com fontes distantes entre si, as frentes de onda de um tom puro se deslocam pelo meio, segundo:

$$Y = A \sin(kx + \omega t) \quad (3.14)$$

onde  $Y$  é a pressão sonora,  $k$  é o número de onda  $\omega/c$  ou  $2\pi/\lambda$  na posição  $x$  e no instante  $t$ .

Dependendo da distância entre as fontes e o ponto de interferência, ondas de mesma frequência incidirão com diferentes valores de fase, podendo entre outras situações ocorrer:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= A \sin(\omega t + kx) \\ y_2 &= A \sin(\omega t + kx + \phi) \end{aligned} \right\} \rightarrow y = y_1 + y_2 = \quad (3.15)$$

$$A \sin(\omega t + kx) + A \sin(\omega t + kx) \cos(\phi) + A \cos(\omega t + kx) \sin(\phi)$$

-interferência construtiva, quando a defasagem for zero ou múltiplo de  $2\pi$  e as amplitudes são somadas.

$$\phi = n 2\pi \Rightarrow y = 2A \sin(\omega t + kx) \quad (3.16)$$

-interferência destrutiva, quando a defasagem é múltipla ímpar de  $\pi$ , e as amplitudes são subtraídas.

$$\phi = (2n + 1)\pi \Rightarrow y = 0 \quad (3.17)$$

### 3.7 Batimento.

O resultado da interferência entre dois sinais de tom puro com frequências próximas  $\omega_1$  e  $\omega_2$  é um sinal com uma frequência igual à média das duas frequências que se combinam, com uma amplitude que varia no tempo.

$$\begin{aligned} x_1 &= a \cos(\omega_1 t) \\ x_2 &= a \cos(\omega_2 t) \\ x &= x_1 + x_2 = 2 a \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right) \quad (3.18) \\ \text{Envolvente} &= \pm 2 a \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \end{aligned}$$

O resultado no espectro de frequências é visto como um alargamento da banda do sinal. Com isto, a determinação da frequência fica comprometida utilizando técnicas de FFT.

### 3.8 Impedância acústica.

É uma analogia com sistemas mecânicos e elétricos para obter uma relação complexa entre variáveis do fenômeno físico. O movimento do fluido é equivalente à corrente elétrica ( $i$ ). O equivalente da pressão ( $p$ ) é a voltagem ( $U$ ). A resistência ( $R$ ) do circuito é equivalente à impedância acústica do sistema ( $Z$ ).

Define-se impedância acústica complexa  $Z$  de um fluido agindo na superfície  $S$  como o quociente da pressão acústica na superfície dividido pela velocidade volumétrica:

$$R = \frac{U}{i} \Rightarrow Z = \frac{p}{q} \quad (3.19)$$

Ela é importante na discussão da radiação acústica de superfícies vibrantes e a transmissão desta radiação através dos elementos acústicos, pois expressa a relação entre a velocidade volumétrica e a pressão.

Em outras palavras, pode-se dizer que a impedância acústica fornece uma medida da parcela do movimento da superfície que gerará pressão sobre o volume fluido (transferência de energia) e a parcela que será meramente energia cinética conservativa.

Beranek (1954), modelou a velocidade de deslocamento  $u_c$  de um alto-falante sujeito a uma excitação harmônica como sendo:

$$u_c = a \left[ \sin(\omega t + \theta) + \frac{\sin(\theta)}{\sin(\psi_0)} \text{Exp}(b) \sin(\omega_0 t + \psi_0) \right] \quad (3.20)$$

onde  $a$  e  $b$  são parâmetros dependentes da frequência de excitação e das características mecânicas e acústicas do alto-falante utilizado. Esta função possui um termo transiente

(o segundo) que é amortecido pela função exponencial e outro estacionário que são difíceis de serem medidos *off-line* para posterior utilização.

### 3.9 Solução do sistema do duto usando análise modal.

A análise modal procura expandir a solução espacial pela sobreposição dos modos de vibração do sistema.

Assim, para o duto, os diferentes modos associados às ondas estacionárias sobrepostas (eq. 3.10 e 3.11) constituem a função de transferência entre a aplicação da excitação (alto-falante) e a medição (microfone).

Pode-se descrever o sistema como forçado por uma excitação harmônica, governado pela equação:

$$[K + iC - \omega^2 M]\{x\}e^{i\omega t} = \{f\}e^{i\omega t} \quad (3.21)$$

Isolando a solução:

$$[\phi]^T [K + iC - \omega^2 M] [\phi] = [\phi]^T (\alpha(\omega)) [\phi] \quad (3.22)$$

onde  $\phi$  é o fator de forma do modo e  $\alpha$  a mobilidade.

A mobilidade pode ser escrita como:

$$\alpha(\omega) = \frac{\text{força}}{\text{velocidade}} = \sum_{r=1}^N \frac{r A_{jk}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i \eta_r \omega_r^2} \quad (3.23)$$

Em nosso caso, a região de interesse é uma faixa do espectro. Pode-se refinar esta equação extraindo-se resíduos, devido às frequências maiores ( $m_1$ ) e menores ( $m_2$ ):

$$\alpha(\omega) = \sum_{r=m_1}^{m_2} \frac{r A_{jk}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i \eta_r \omega_r^2} + \frac{1}{K_{jk}^2} - \frac{1}{\omega^2 M_{jk}^r} \quad (3.24)$$

onde K e M são os resíduos de massa e de rigidez.

No domínio do tempo, pode-se escrever:

$$\alpha = |\alpha| \frac{\{f\}}{k} e^{i\omega t} (\cos(\angle\alpha(\omega)) - i \sin(\angle\alpha(\omega))) \quad (3.25)$$

onde o primeiro termo representa um ganho, o segundo um amortecimento e o terceiro o fator de forma.

### **3.10 Balanço de energia do sistema de atuação.**

No controle ativo é injetada uma onda no duto a qual está associada energia sonora. O ruído por sua vez injeta no sistema certa quantidade de energia que será somada à energia do sinal.

No caso dos sinais se cancelarem, Shepherd (1996), analisa o balanço energético do controle ativo e o destino da energia utilizando a montagem de Swinbanks (1973). A potência elétrica média em um ciclo dissipada pelo alto-falante de atuação pode ser decomposto nas seguintes parcelas:

$$\begin{aligned} W_e &= \text{perdas elétricas} + (\text{perdas mecânicas} + \text{perdas acústicas}) = \\ &= \frac{V^2}{2} \left[ \left\{ \frac{|Z|^2 R}{(BL)^2} \right\} + \text{Re}(Z) \right] \end{aligned} \quad (3.26)$$

onde  $V$  é a amplitude da velocidade do cone,  $Z$  é a impedância mecânica total,  $R$  é a resistência elétrica,  $B$  é a densidade de fluxo magnético e  $L$  é o comprimento da espira da bobina do alto-falante.

O primeiro termo representa as perdas elétricas e o segundo termo as perdas mecânicas que incluem a energia acústica irradiada do alto-falante ou absorvida por ele.

A energia sonora que flui nas ondas dentro do duto, ao passar pelo alto-falante secundário é absorvida, diminuindo a amplitude do ruído e reduzindo o consumo elétrico do alto-falante.

### 3.11 Função de transferência para um duto acústico de comprimento finito.

A função de transferência de um duto finito pode ser obtida através da superposição dos diversos caminhos mostrados na tabela 3.1, obtidas pela transformada de Laplace de 3.5 e 3.6, associadas às condições de contorno impostas pelas extremidades do duto. Convencionou-se chamar de P a leitura do microfone, R a amplitude do ruído gerado pelo alto-falante principal e Y do sinal gerado pelo alto-falante secundário, L é o comprimento do duto e c a velocidade do som no ar.

Tabela 3.1 Modelagem por superposição de caminhos.

Caminho seguido	Contribuição no campo acústico
Ciclo completo no duto	$\theta_0 \theta_1 e^{\frac{2Ls}{c}} P(z,s)$
AFP microfone	$e^{\frac{Lz}{c}} R(z,s)$
AFP reflexão microfone	$-\theta_1 e^{\frac{L(2-z)s}{c}} R(z,s)$
AFS microfone	$-e^{\frac{L(a-z)s}{c}} Y(z,s)$
AFS reflexão direita microfone	$-\theta_1 e^{\frac{L(2-z-a)s}{c}} Y(z,s)$
AFS reflexão esquerda microfone	$\theta_0 e^{\frac{L(a+z)s}{c}} Y(z,s)$
AFS reflexão direita esquerda microfone	$\theta_0 \theta_1 e^{\frac{L(2+z-a)s}{c}} Y(z,s)$
Pressão no microfone	$P(z_a, s)$

Hu (1995,1996) particularizou a função de transferência a partir da solução da equação de Helmholtz para um duto finito com as condições de contorno modeladas

através de impedâncias, aplicando funções de Green (Yang (1992)), onde  $a$  é a posição da fonte e  $z$  do microfone:

$$H(z, a, s) = \frac{1}{2} \frac{\left[ \exp\left[\frac{Lsa}{c}\right] + \Theta_0(s) \exp\left(-\frac{Lsa}{c}\right) \right] * \left[ \exp\left[\frac{Ls(1-z)}{c}\right] + \Theta_1(s) \exp\left(-\frac{Ls(1-z)}{c}\right) \right]}{\left[ \exp\left[\frac{Ls}{c}\right] + \Theta_0(s)\Theta_1(s) \exp\left(-\frac{Ls}{c}\right) \right]} \quad (3.27)$$

onde

$$\begin{aligned} \Theta_0(s) &= \frac{(1 - Z_0(s))}{(1 + Z_0(s))} \\ \Theta_1(s) &= \frac{(1 - Z_1(s))}{(1 + Z_1(s))} \end{aligned} \quad (3.28)$$

e as impedâncias normalizadas  $Z_0$  (extremo do duto com a fonte de ruído) e  $Z_1$  são funções complexas que para extremos reflexivos valem 0 e totalmente absorcivos valem 1.

A expressão (3.27) é limitada a frequências sonoras inferiores à frequência de corte (3.10) e (3.11) e considera apenas o duto na ausência dos alto-falantes.



## Capítulo 4

### Algoritmo genético.

A utilização do algoritmo genético segue as seguintes etapas:

- estudo das variáveis que influem no processo.
- determinação da sensibilidade de cada uma das variáveis, a fim de determinar o tamanho ideal do segmento cromossômico.
- determinação do tamanho do cromossomo (soma do tamanho de todos os segmentos cromossômicos).
- Estudo do sistema para determinação de um índice de desempenho e da sistemática de cálculo que tenha sensibilidade para obtenção do resultado com rapidez.
- criação de uma população distinta que represente o espaço amostral e seja o mais disperso possível. Para tanto, é utilizado um gerador de números aleatórios variando entre 0.0 e 1.0, que gera cada gene do cromossomo com valor 0 (número menor ou igual que 0.5) ou 1 (número maior que 0.5).
- para cada indivíduo da população é calculado o valor do índice de desempenho (ou obtido através de medidas ou numa pesquisa em uma tabela pré determinada). Este índice mede o desempenho do indivíduo em relação às condições propostas.
- seleção dos indivíduos com melhor índice de desempenho para cruzamento, que é feito através do *crossover* de seus cromossomos, seguida de um cálculo estatístico para geração de mutação gênica.
- cálculo do índice de desempenho de cada indivíduo da nova geração. A dispersão da população pode ser utilizada para término do cálculo.

- verificação dos melhores indivíduos da população, decodificação dos cromossomos e geração dos sinais de atuação. Ao decodificar o cromossomo, as variáveis que atuam no processo são determinadas.

No esquema a seguir estão exemplificadas as etapas do algoritmo genético que são implementadas no programa de computador (Man 1996):

### Inicialização da população

- Seleção dos parentes.

Primeira geração	Valor de desempenho $z=f(x,y)$
1100110110101000	3.481746
0101010110110101	3.668023
⇒ 1000010100110110	6.261380
⇒ 1101011111001100	12.864222

- *Crossover*

11010	11111001100	----- \	11010	10100110110
10000	10100110110	----- /	10000	11111001100

- Mutação

1101010100110110		1000011111001100
↓      ↓		$z = 6.092$
1111010100100110		
$z = 8.044$		

- Reinserção

Segunda geração	Valor de desempenho $z=f(x,y)$
⇒ 1111010100100110	8.044
⇒ 1000011111001100	6.092
1000010100110110	6.261380
1101011111001100	12.864222

Pode-se observar que a população inicial apresenta valores de desempenho que somados perfazem 26, e que na nova geração chegam a 33. Este aumento no valor do desempenho mostra que o GA está obtendo soluções que melhoram o desempenho do sistema a cada geração.

#### 4.1 Modelamento matemático (Rudolf 1994).

O algoritmo genético baseia-se na criação aleatória de cromossomos de comprimento  $L$ , com genes podendo ter valores 0 ou 1, baseado em um gerador de números aleatórios com saídas  $[0,1]$ .

No caso de um cromossomo de tamanho 3, teremos os seguintes valores:

Cromossomo	Estado.
000	0
001	1
010	2
011	3
100	4
101	5
110	6
111	7

A cada um dos valores assumidos pelo cromossomo, pode-se definir um estado.

Considerando uma coleção de variáveis randômicas  $X_0, X_1, X_2, \dots$ , onde  $X_n$  é um estado do sistema em um instante  $n$  e que exista um conjunto de números  $p_{ij}$ ;  $i, j=1, 2, \dots, n$  que definem a probabilidade de transição dos estados  $i$  para  $j$ , pode-se dizer que a evolução de  $X_n$  constitui uma cadeia de Markov com probabilidade de transição  $p_{ij}$ .

Ela define uma trajetória de probabilidades formada pelos estados que o sistema assume a cada transição, dentro do espaço de estados total.

As probabilidades de transição podem ser organizadas em uma matriz:

$$P = [p_{ij}] \quad (4.1)$$

onde  $p_{ij}$  está contido no intervalo  $[0,1]$  e para qualquer  $i$  tem-se:

$$\sum_j p_{ij} = 1 \quad (4.2)$$

representando que todos os novos estados possíveis estão mapeados na matriz de transição. Matrizes com estas propriedades são chamadas estocásticas.

Para uma distribuição inicial  $p_0$ , a distribuição da cadeia após  $t$  passos é determinada por:

$$p_t = p_0 P^t \quad (4.3)$$

onde  $P^t = P P \dots P$ .

A cadeia é determinada se for conhecido  $p_0$  e  $P$ .

Define-se a seguinte classificação para a matriz  $P$ :

- não negativa, se  $p_{ij} \geq 0$ ;
- positiva, se  $p_{ij} > 0$ ;
- primitiva se existe  $k$  natural tal que  $p_k$  é positiva;
- redutível se for possível particionar a matriz  $P$  na forma:

$$\begin{bmatrix} C & 0 \\ R & T \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

onde  $C$  e  $T$  são matrizes quadradas.

- estocástica se  $\sum_j p_{ij} = 1$

As mudanças probabilísticas dos genes da população, causadas pelos operadores genéticos, são discutidas em Rudolph (1994) como uma matriz de transição  $P$ , que pode ser decomposta em um produto de matrizes

$$P = CMS \quad (4.5)$$

onde  $C$ ,  $M$  e  $S$  descrevem as transições causadas pelo *crossover*, mutação e seleção.

Partindo de uma população inicial  $p_0$ , as populações decorrentes das gerações seguintes podem ser escritas como:

$$\begin{aligned}
p_1 &= p_0 \text{ CMS} \\
p_2 &= p_1 \text{ CMS} \\
p_3 &= p_2 \text{ CMS} \\
&\dots\dots\dots \\
p_\infty &= p_0 \lim_{k \rightarrow \infty} P^k = p_0 P^\infty
\end{aligned}
\tag{4.6}$$

A probabilidade do indivíduo  $b_i$  ser selecionado é definida como:

$$S\{b_i\} = \frac{f(b_i)}{\sum_j f(b_j)} > 0 \tag{4.7}$$

onde  $f$  é a função de desempenho.

A mutação opera independentemente em cada bit do indivíduo através da probabilidade de mutação  $p_m$  contida em  $[0,1]$ , levando o indivíduo  $b$  para  $b'$ .

$$M\{b_i \rightarrow b_i'\} = p_m^k (1 - p_m)^{L-k} > 0 \tag{4.8}$$

onde  $k$  é o número de bits alterados (ou a distância de Hamming entre  $b$  e  $b'$ ) e  $L$  é o comprimento do cromossomo.

A probabilidade de ocorrência do *crossover* é definida *a priori* e permanece constante ( $C = p_c$ ) no procedimento.

Pode-se concluir que  $C$ ,  $M$  e  $S$  são matrizes estocásticas, onde  $M$  e  $CMS$  são positivas.

#### 4.2 Condição de convergência e estabilidade do algoritmo genético.

A análise da convergência do GA é feita considerando a distribuição da população formada por  $n$  indivíduos com cromossomo de comprimento  $L$  dado.

Um indivíduo da população pode ser selecionado através do operador  $\pi_{ki}$  que separa a  $k$ -ésima seqüência de  $L$  bits do estado  $i$ .

Seja  $Z_t$  uma seqüência de variáveis randômicas representando o melhor desempenho da população no passo  $t$ :

$$Z_t = \max \{f(\pi_{k_i}^t)\} \quad k = 1, \dots, n \quad (4.9)$$

O algoritmo genético converge para o ótimo global e fica estável se:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P\{Z_t = f^*\} = 1 \quad (4.10)$$

onde  $f^*$  é o máximo global. Se  $i$  for qualquer estado com  $\max\{f(\pi_{k_i})\} < f^*$  e  $p_i^t$  a probabilidade que o GA esteja neste estado no passo  $t$ , pode-se escrever que:

$$P\{Z_t \neq f^*\} \geq p_i^t \Rightarrow P\{Z_t = f^*\} \leq 1 - p_i^t \quad (4.11)$$

pois se a probabilidade de não estar no estado ótimo é  $p_i^t$ , a probabilidade de estar no estado ótimo será  $1 - p_i^t$ , e no limite de convergência do algoritmo:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P\{Z_t = f^*\} \leq 1 - p_i^\infty < 1 \quad (4.12)$$

contrariando a eq. 4.10.

Rudolph (1994) argumentou que este caso não representa um caso prático do GA pois em aplicações do mundo real a melhor solução encontrada é sempre mantida. De fato, após um número finito de transições a solução global será visitada e copiada, consequência de um teorema que estabelece que o tempo de transição esperado entre um estado inicial  $i$  e outro  $j$  é finito, independente dos estados  $i$  e  $j$ .

Para contornar este problema, seria necessário preservar o melhor indivíduo de cada geração para garantir a convergência e estabilidade.

Se para uma população  $x$  há um inteiro positivo  $s$  tal que a probabilidade:

$$C(x, y_1) C(y_1, y_2) \dots C(y_{s-1}, x) > 0 \quad (4.13)$$

onde  $C(x, y)$  representa a transição provocada pelo *crossover*, e existe uma população  $x$  tal que a probabilidade  $C(x, x) > 0$ , então a cadeia de Markov é irredutível e não periódica, que segundo a teoria geral das cadeias de Markov finitas, tem uma distribuição estável e única, que limita os estados (extremo).

Isto quer dizer que qualquer operador de *crossover* onde a população possa retornar a si mesma após um número finito de transições será estável.

#### 4.2.1 Estudo de caso da condição de convergência.

O *crossover* utilizado baseia-se em uma troca a partir de uma posição aleatória entre os cromossomos dos pais e a condição de retorno ao valor inicial pode ocorrer pois dois *crossovers* consecutivos entre os mesmos pais na mesma posição atendem a condição 4.13.

Na etapa de reinserção, o software foi alterado para apenas inserir os indivíduos que tenham um desempenho melhor que os pais e chamaremos a isto de critério elitista.

Na figura 4.1 é feita a comparação da aplicação da reinserção elitista comparada com a reinserção sem critérios (SGA).

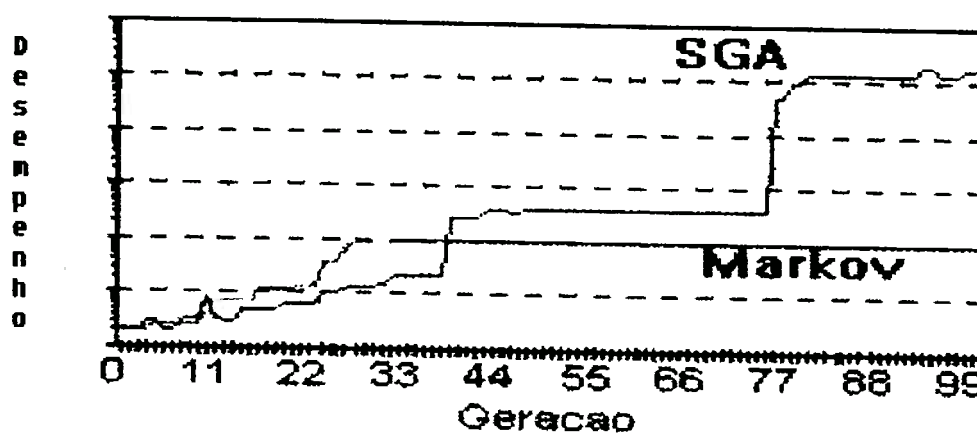


Fig. 4.1: Melhor valor de desempenho (unidade arbitrária) dos resultados do SGA com as condições impostas para convergência da cadeia de Markov em função da geração.

Observa-se que a condição de reinserção elitista faz com que o algoritmo genético convirja para um máximo local mais rapidamente e faz com que não sejam pesquisadas outras trajetórias onde o passo inicial tenha um desempenho pior que o máximo local. No caso de sistemas onde o máximo global esteja concentrado em um

ponto, a probabilidade de um novo indivíduo cair próximo ao máximo global e em uma região onde o desempenho seja maior que o desempenho do máximo local será remota.

Como o operador-seleção utiliza uma ponderação sobre os valores da função de desempenho de cada indivíduo, fica difícil haver a perda do indivíduo ótimo por *crossover* ou mutação na primeira ocorrência. Se isto ocorrer, após um certo número finito de gerações, o máximo global será reencontrado.

### 4.3 Função de desempenho.

A função de desempenho (*fitness* ou simplesmente desempenho) representa o objetivo que se quer medir: no caso de uma população biológica, o desempenho do indivíduo às condições ambientais; para um sistema acústico o inverso da energia acústica resultante entre o ruído e o sinal de cancelamento, é um candidato natural à função de desempenho.

O teorema de Parseval relaciona a energia de um sinal nos domínios de tempo e frequência através da seguinte expressão:

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} x^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |X(\omega)|^2 d\omega \quad (4.14)$$

Assim, pode-se calcular a energia do sinal resultante como a soma das amplitudes ao quadrado ou a área do espectro em frequência ao quadrado obtido pela Transformada de Fourier do sinal.

No caso da interação entre um ruído e um sinal formado por um tom puro, pode-se calcular a energia acústica como:



$$\begin{aligned}
 R[t] &= a_1 \sin\left(\frac{2\pi f_1(t - \Delta p)}{f_{amoet}}\right) \\
 S[t] &= a_2 \sin\left(\frac{2\pi f_2(t - \Delta s)}{f_{amoet}}\right) \\
 F[t] &= \int_0^{\tau} (R[t] + S[t])^2 dt
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

onde  $\Delta p$  e  $\Delta s$  são os atrasos de percurso entre as fontes que geram R e S e  $\tau$  o tempo de integração para cálculo da energia.

A integração pode ser visualizada na figura 4.2, que apresenta o comportamento para a interação de um ruído de 200 Hz com um sinal de mesma amplitude e variando a frequência de 100 a 500 Hz e a fase de 0 a  $2\pi$ .

Pode-se verificar na fig. 4.2 que na frequência de 200 Hz ocorre o pico positivo da função de desempenho e portanto a interferência construtiva (fase nula ou múltiplo de  $2\pi$ ) e na defasada de  $\pi$  a destrutiva. Próxima do pico há uma região de oscilação mostrando a existência de máximos e mínimos locais.

Outra condição de mínimo ocorre quando a energia do sinal for zero ( $a_2 = 0$ ), caso onde permanece apenas a energia do ruído.

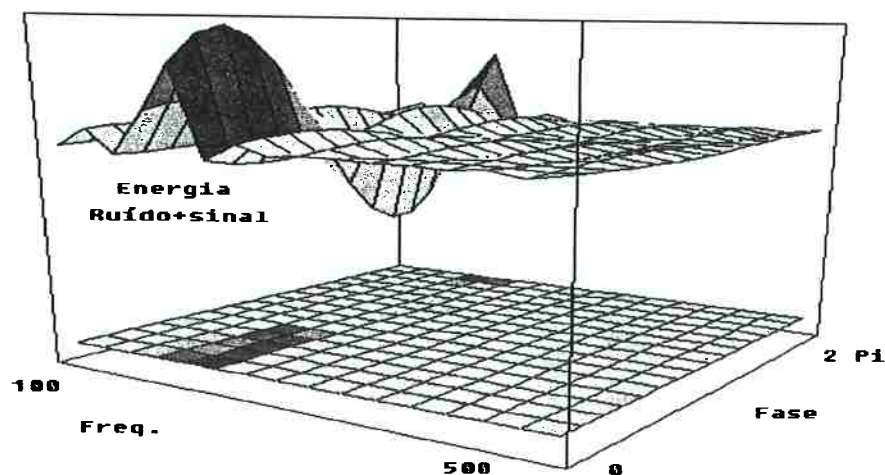


Fig. 4.2 Energia da interação entre dois tons puros, com mesma amplitude variando a frequência do sinal de 100 a 500Hz e a fase de 0 a  $2\pi$ .

#### **4.4 Estudo da codificação das variáveis no cromossomo.**

Em cada problema onde se aplica o algoritmo genético, é fundamental escolher as variáveis que dêem sensibilidade à função de desempenho. No controle ativo de ruídos pode-se fazer as seguintes codificações dos indivíduos:

- do sinal de cancelamento, através da frequência, fase e amplitude. Neste caso, as três variáveis comporão o cromossomo, e o problema estará em o GA identificar os valores que cancelem melhor o ruído. O desempenho é a inversa da energia do sinal sobreposto ao ruído.
- dos parâmetros de um modelo de controle do sistema. Esta abordagem necessita de um modelo que tenha uma estrutura invariante no tempo. Os parâmetros são encontrados pelo GA para maximizar a função de desempenho.
- dos modos ou funções que sejam solução do problema. Neste caso, os parâmetros modais são codificados no cromossomo. Como um sistema pode ter vários modos na região de interesse, o usuário pode optar por identificar o número de modos através da contagem dos picos representativos da FFT, ou então implementar um algoritmo de programação genética. O cromossomo teria um comprimento variável, dependendo do número de estados.

Dependendo do enfoque, cada solução terá prós e contras.

#### **4.5 Estratégia de inserção.**

Após calcular os novos indivíduos, pode-se optar por sobrepor apenas filhos com desempenho melhor que o dos pais. Esta característica elitista pode ser útil em sistemas com muitas variáveis codificadas, ou onde a sensibilidade do desempenho não seja significativa para variações das variáveis.

Sem a condição elitista, os indivíduos com um pequeno aumento da função de desempenho podem ser eliminados da geração por serem pouco representativos na soma de todos os desempenhos da população, critério usado na seleção. Isto leva o GA a ficar oscilando entre soluções distantes.

Neste trabalho chamaremos de “com elitismo”, o resultado obtido com inserção de filhos com melhor desempenho que os pais e quando não, “sem elitismo”.

#### **4.6 Estratégia de mutação.**

A probabilidade de mutação estabelece a ocorrência ou não de mutação. No caso de um cromossomo com muitos genes, poderá ocorrer mais de uma mutação em um mesmo indivíduo.

Como uma mutação representa um novo ponto de partida para a busca do extremo com alteração das variáveis codificadas, permitir a ocorrência de mais de uma em um indivíduo pode aproximar o GA de uma busca aleatória.

Por outro lado, a utilização em conjunto com um critério elitista poderá agilizar a busca em sistemas com função de desempenho pouco sensível.

#### **4.7 Análise da população.**

Em um ambiente multiprocessado, a divisão da população em grupos independentes por processador com troca dos melhores indivíduos não parece ser uma solução adequada, pois a solução ótima está espalhada em muitos indivíduos e não apenas no melhor.

Um indivíduo com uma seqüência pertencente à solução ótima pode ter um desempenho baixo, mas após um *crossover* o indivíduo originado poderá ser a resposta procurada.

O processamento de cada indivíduo pode ser executado por um processador em paralelo, mas a seleção deve levar em conta todos os indivíduos da população.

#### **4.8 Convergência do GA na região de convergência de uma boa solução.**

Para codificar uma variável no cromossomo é necessário conhecer seus limites máximo e mínimo, que definem uma janela de busca.

Uma forma de garantir que o GA fique em torno da solução desejada e não teste indivíduos que codifiquem condições iniciais muito díspares é variar os limites em tempo de execução para uma janela de 10% em torno do melhor valor, permitindo melhorar a resolução da solução encontrada. Isto traz o inconveniente de deslocar o máximo já encontrado de local. Serão indicados por “com convergência” os casos onde os limites foram alterados.

#### **4.9 Estudo dos parâmetros.**

Neste item serão discutidos os efeitos dos parâmetros utilizados no GA.

##### **4.9.1 Tamanho da população.**

Pesquisar o extremo de um funcional com uma topologia complexa (cheia de máximos e mínimos locais) é uma tarefa difícil pois dependendo do ponto de partida, um máximo/mínimo local pode segurar a busca em sua redondeza.

No caso do algoritmo genético, como cada indivíduo representa uma condição inicial diferente, a probabilidade de algum indivíduo tender para o extremo do funcional é maior.

Mesmo que vários indivíduos fiquem capturados em máximos/mínimos locais, isto não deverá ocorrer para todos, devido ao mecanismo de mutação.

O tamanho da população deve ser definido pelo melhor custo benefício, levando em conta que se o valor for tão grande que na primeira geração já é encontrado o extremo, torna o GA desnecessário. Se for pequeno serão necessárias muitas gerações e mutações para que algum indivíduo caia próximo do extremo.

Goldberg (1993), desenvolveu um modelo para quantificar o limite inferior da população.

#### 4.9.2 Tamanho do cromossomo.

Cada variável tem uma precisão que depende da relação sinal ruído, das características da instrumentação e do sistema de aquisição de dados. Com base nisto deve-se definir um número de genes que permita a codificação dos valores da variável sem perda de informação. O tamanho do cromossomo seria a soma do número de genes de cada variável codificada.

A precisão de uma variável pode ser calculada como:

$$P = \left( \frac{\text{MAX}_i - \text{MIN}_i}{2^{L_i}} \right) \quad (4.16)$$

O tamanho do cromossomo define o número de estados possíveis para o sistema:

$$N = 2^t \quad (4.17)$$

onde  $t$  é a soma do número de genes de cada variável e  $L_i$  é o número de bits usado na codificação. Para codificar 3 variáveis de 16 genes cada haveria  $2.81 \cdot 10^{14}$  estados, e para 50 variáveis de 16 genes haveria  $10^{240}$  estados!

Ma (1996) utilizou o GA para obtenção dos coeficientes de um FIR de ordem 7 necessitando de uma população de 400 indivíduos e 40.000 gerações para obter o erro quadrático de 47 dB.

A discretização na codificação de variáveis reais em formato inteiro introduz um efeito de quantização que deve ser analisado levando em conta a erro de medida experimental.

#### **4.9.3 Probabilidade de mutação.**

Quanto maior seu valor, maior será o desacoplamento entre os pais e filhos e mais próximo estará de uma tentativa e erro aleatória.

#### **4.9.4 Probabilidade de *crossover*.**

Estabelece a mobilidade da troca de informações (representada por pedaços de cromossomo) entre os indivíduos selecionados.

### **4.10 A obtenção da solução ótima pelo GA.**

A solução ótima de um problema é um conjunto de valores que maximiza/minimiza uma função de desempenho.

Utilizamos como base numérica a base 10, formando os números com os caracteres de 0 a 9. Pode-se transformar a base para binária (2), onde apenas os caracteres 0 e 1 são utilizados. Esta é a representação utilizada pelos computadores.

Ao escrever os valores ótimos na base binária, obtém-se uma seqüência que pode ser caracterizada como um cromossomo do indivíduo que representa a solução ótima.

Quando o GA inicializa a população, pedaços da resposta ótima estarão distribuídos entre os indivíduos. Cabe ao algoritmo obter o seqüenciamento e a posição corretas pela ação do operador de *crossover*.

No caso de um cromossomo muito grande, partes da solução podem não estar presentes, sendo utilizado o operador de mutação para sua obtenção.

Desta forma pode-se compreender porque o GA é definido como um algoritmo de busca aleatória dirigida.

#### **4.11 Estudo da performance do GA.**

Um estudo da determinação da performance do GA pode ser encontrado em Rooji(1996), ainda em fase inicial e atualmente impraticável operacionalmente devido à necessidade de modelar a função de desempenho com coeficientes para cada estado associado a cada bit (Transformada de Walsh-Schema).

#### **4.12 Programação genética.**

A programação genética (Koza 1992, 1994, Poli 1996, Fernandez 1999) consiste em uma generalização do algoritmo genético para problemas cuja solução requer estrutura variável. Pode ser aplicada para obter um modelo matemático, um modelo de controle ou um programa para solução de um problema. A programação genética modela o sistema através de funções, parâmetros e variáveis permitindo uma análise da complexidade e dos processos físicos envolvidos, utilizando inteligência artificial (AI) sintetizada pelos operadores genéticos.

Apresentaremos a seguir os pontos em que difere do GA.

##### **4.12.1 A representação da solução em árvore.**

Uma equação matemática é escrita seguindo uma série de regras sintáticas e semânticas. Para compreender os conceitos que representa, faz-se uma interpretação de seus símbolos, seguindo uma ordem definida pelos parênteses e colchetes utilizados.

Para tornar possível a compreensão pelo computador, é necessário codificar as fórmulas utilizando uma representação onde a interpretação e cálculo seja feita de forma seqüencial e recursiva, utilizando o conceito de nós e terminais.

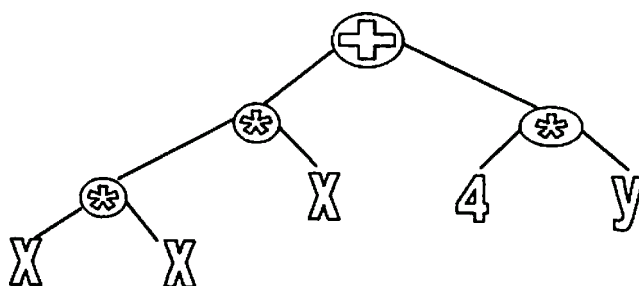
Chama-se nó a toda função ou operador matemático que depende de algum argumento. A escolha das funções adequadas para formar a solução do problema está relacionada com sua suficiência e depende do conhecimento do problema e da intuição do programador. Se o conjunto de funções não for suficiente, então o GP poderá apenas encontrar soluções que melhor se aproximam da exata pretendida.

Podem ser incluídos operadores aritméticos( +, -, \*, /), matemáticos (*sin*, *cos*, *exp*, etc), booleanos (*and*, *or*, *not*, etc) condicionais (IF-THEN-ELSE), loop (FOR, REPEAT, etc) e qualquer outro que possua uma definição passível de ser codificada.

O número de argumentos de um nó se chama *n-arity*.

Terminal é um extremo da árvore de 0-arity, e representa valores constantes, variáveis ou números aleatórios. O espaço de pesquisa do GP é o conjunto de todas as composições recursivas das funções e terminais definidos.

A fórmula  $x^3 + 4*y$  pode ser escrita utilizando o conceito de nós e terminais como a seguinte árvore:



ou como a seguinte estrutura:

$(+ (* (* x x ) x ) (* 4 y ) )$

que pode ser avaliada usando rotinas recursivas. Esta estrutura contém parênteses separando cada operação matemática (identificada pelo primeiro símbolo) e seus parâmetros (elementos restantes).



Neste caso, a avaliação da expressão é feita iniciando por  $(* x x)$ , que resulta em  $x*x=x^2$ , seguida de  $(* x^2 x)$  que resulta em  $x^3$ . Na Segunda parte da árvore é avaliada  $(* 4 y)$  resultando em  $4y$ , que é somado a  $x^3$  para fornecer o resultado final.

#### 4.12.2 A população inicial.

Para cada indivíduo da população uma árvore aleatória é criada com as funções e terminais definidas, através de uma rotina que verifica a sintaxe e a *n-arity* de cada nó. O tamanho da árvore é medido através da profundidade e do número de nós utilizados, e não possui tamanho fixo como no GA.

#### 4.12.3 O *crossover*.

O *crossover* consiste em selecionar um ponto aleatório na árvore dos pais e trocar suas sub-árvores. O *crossover* entre dois pais diferentes pode ser visto na fig. 4.3 e entre dois pais iguais na fig. 4.4. Uma importante melhoria do GP sobre o GA é a possibilidade de criação de novas soluções a partir da mesma solução.

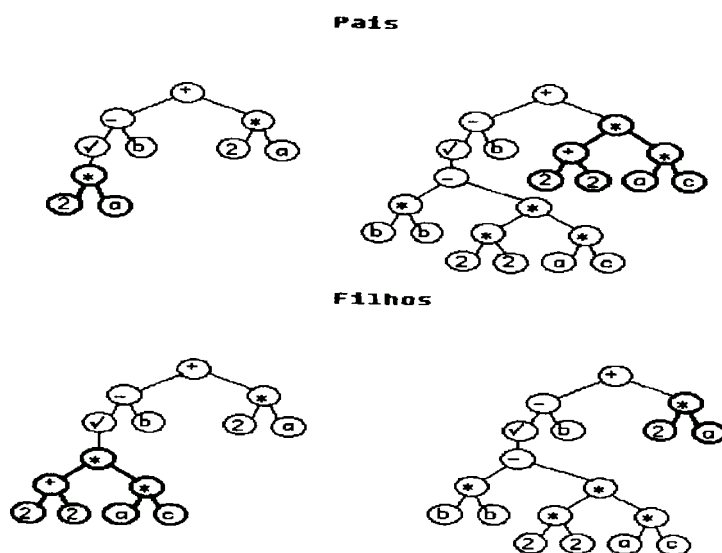
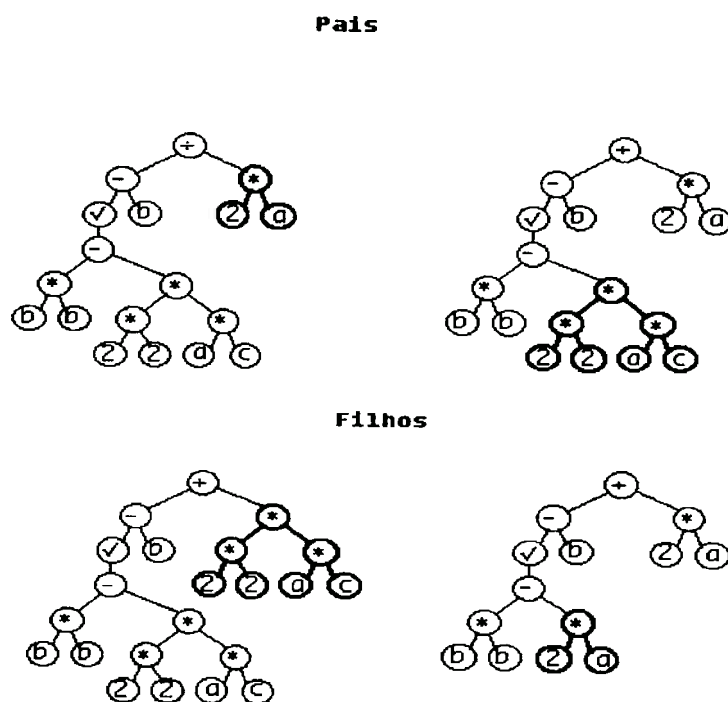


Fig. 4.3 *Crossover* entre pais diferentes.

Fig. 4.4 *Crossover* entre pais iguais.

#### 4.12.4 Mutação.

A mutação no GP pode ocorrer com um nó sendo substituído por outro nó, um terminal sendo substituído por outro terminal ou uma sub-árvore sendo substituída por outra sub-árvore. A fig. 4.5 apresenta um exemplo.

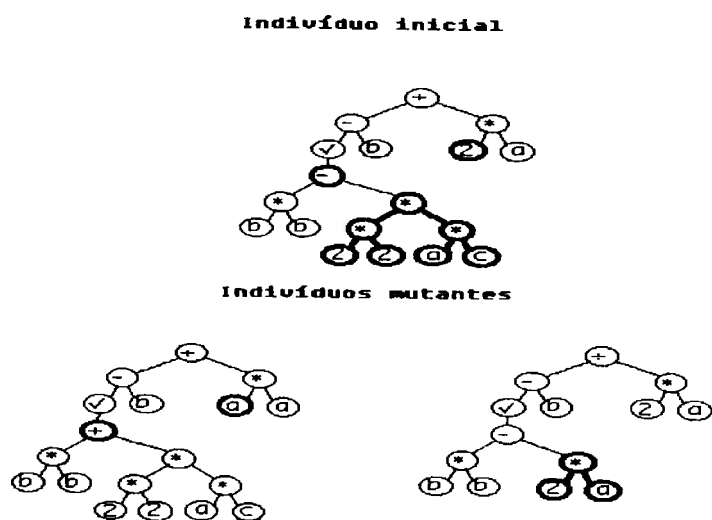


Fig. 4.5 Mutação no GP.

#### 4.12.5 A função de desempenho.

A definição da função de desempenho (*fitness* ou simplesmente desempenho) incorpora o objetivo a ser atingido pelo GP.

No tratamento de uma série de dados experimentais, o problema da regressão simbólica consiste em obter função e os coeficientes que melhor ajustem os dados. O termo simbólico enfatiza o fato de não estarem sendo pesquisados os parâmetros ótimos, mas as funções ótimas. Neste caso, a função de desempenho é o erro quadrático entre os valores medidos e o calculado pela função representada pelo indivíduo.

A utilização do GP para obtenção do modelo de controle que cancela o ruído utiliza a soma das leituras do microfone de erro ao quadrado, durante um intervalo de tempo. Quanto melhor o modelo de controle menor será a energia lida pelo microfone.

#### 4.12.6 O tamanho dos programas gerados.

Os programas gerados pela GP podem conter trechos que não contribuem para a solução do problema, por possuírem valores muito pequenos ou terem um produto por zero.

Soule (1996) estudou o crescimento dos programas e técnicas de redução, eliminando os termos não funcionais ou penalizando o desempenho. O resultado obtido mostra que o crescimento continua, mesmo com a remoção das partes de código não funcional, mostrando que é uma característica intrínseca do processo genético. No ser humano 80% a 90% do DNA não codificam proteínas funcionais, ainda que possuam função estrutural.

## Capítulo 5

### Montagem experimental e aplicação do controle adaptativo.

Neste capítulo estão descritos a montagem experimental (vide figura 5.1) e seus componentes, com experimentos para caracterização da resposta, e a implementação do controle adaptativo FBFXLMS para comparação com o algoritmo genético.

A partir da caracterização, serão escolhidas duas configurações para o estudo do controle, uma que reduza e outra que reforce a realimentação acústica, permitindo isolar seu efeito nos algoritmos em estudo.

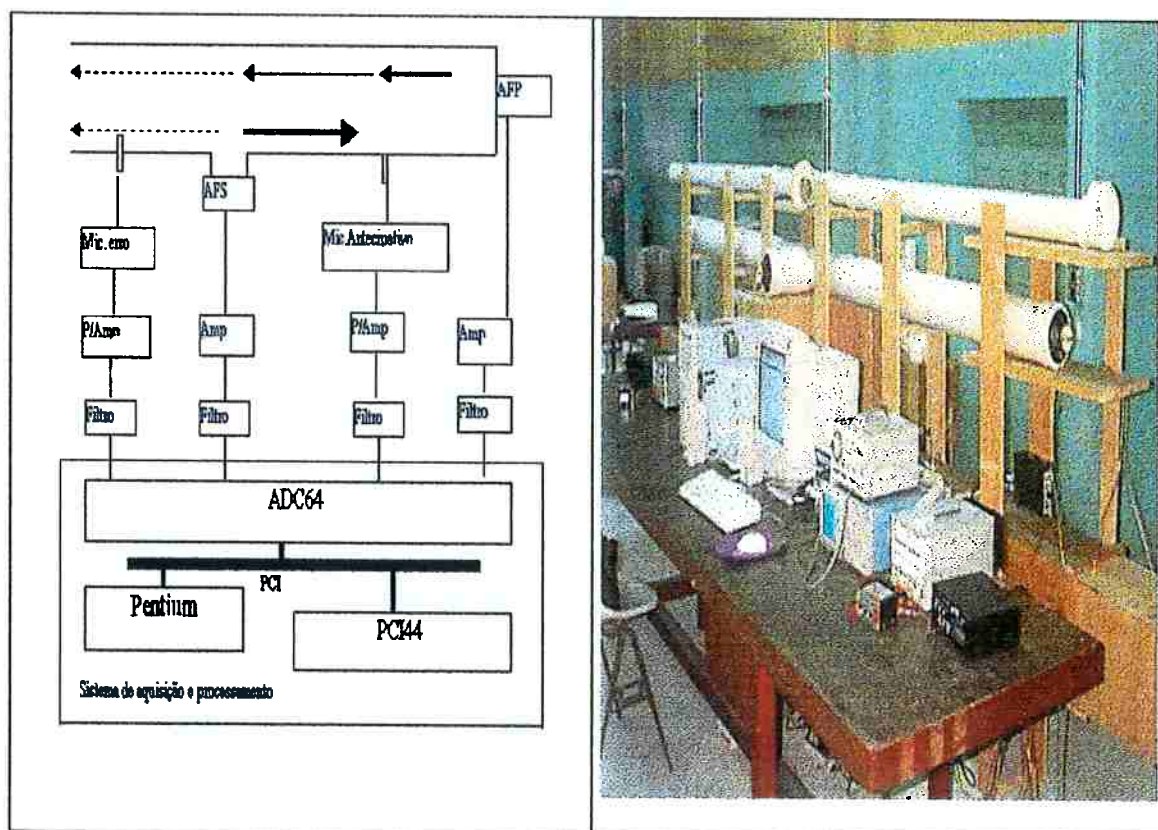


Fig. 5.1 Montagem experimental

### **5.1 Sistema acústico.**

A montagem experimental utilizada consiste em um duto retangular de 6 metros de comprimento e dois dutos cilíndricos de 6" e 4", onde no extremo foram instalados alto-falantes de 12" (Novik 100W PAPP) e 5" (Novik FM) respectivamente (denominados AFP), para geração dos ruídos a serem cancelados. Um exaustor poderá ser utilizado para geração de um ruído de banda larga nos dutos cilíndricos.

A 3.5 metros de distância do AFP foram instalados 4 alto-falantes de 6 polegadas nas 4 paredes do duto retangular e 1 alto-falante de 5 polegadas nos dutos cilíndricos (denominados AFS).

Os dutos cilíndricos foram montados sobre uma estante de madeira, sem caixa de som para os alto-falantes ou vedação para os microfones. O duto retangular foi construído em madeira de 2 cm de espessura com apoios de 15 cm de 1 em 1 metro. Os alto-falantes tem uma resposta suave em toda a faixa de trabalho.

Foram instalados 4 alto-falantes, um em cada parede do duto, com uma caixa de som de madeira compensada revestida com Sonex. Na diagonal foram colocadas folhas de celulose para absorção das altas frequências, difusão do campo acústico e redução das ondas estacionárias.

Para medida do ruído podem ser utilizados até 4 microfones B&K de 1.1 cm de diâmetro, modelos 4134 com sensibilidade de 12.5 mV/Pa, pré-amplificadores 2669 e fonte 5935 com controle de ganho de 0 a 50 dB, colocados em suportes móveis para se deslocarem pelo duto ou pela sala, operando pela variação de capacitância entre o diafragma e um anteparo fixo. A resposta do microfone utilizado é constante no intervalo de 4 a 10 kHz de frequência.

O gerador de funções Leader LFG-1300S é utilizado para geração dos ruídos periódicos, junto com um osciloscópio Tektronix 2212.

Um experimento de acústica está inserido dentro de um ambiente e reflete o trânsito da rua, o ruído das pessoas no prédio, as reflexões múltiplas nos móveis da sala, e a variação da temperatura da sala.

## **5.2 Sistema de aquisição.**

O sistema de aquisição consiste em uma placa ADC64 com um DSP TMS320C32 com *clock* de 50 Mhz, 30 MIPS/60 MFLOPS, interface *PCI bus* de 64 MB/s 32 *bits*, 32 K palavras de memória SRAM 0 *wait state*, 2048 FIFO bidirecional, interface JTAG, 4 entradas analógicas (ADC) de 16 bits e 100KHz, ganho programável, filtro *anti-aliasing* de 50 KHz, multiplexação em 8:1 totalizando 32 entradas, 2 saídas analógicas (DAC) de 16 bits e 200 Khz e 8 temporizadores independentes.

Os manuais técnicos estão listados na bibliografia desta tese em (Innovative Integration) e (Texas Inst).

A placa tem um filtro *anti-aliasing* de frequência de corte de 50 KHz. Foram construídos para as entradas e saídas filtros de *Chebichev* de segunda ordem com frequência de corte variável por um potenciômetro de 200Hz a 2KHz.

Esta placa dá ao sistema as seguintes vantagens:

- faz o tratamento do sinal e passa para os DSPs TMS320C44 os dados prontos. Os C44 podem se concentrar apenas no cálculo dos algoritmos.
- a administração das entradas e saídas é feita pela placa, independentemente dos C44, em uma configuração cliente-servidor.
- O C32 tem álgebra de ponto flutuante, 60 ns de tempo de ciclo e I/O de 32 bits.
- comunicação através do barramento PCI para troca de dados com a memória do computador.

- Execução de mais de uma instrução *assembler* ao mesmo tempo, graças à estrutura de *pipeline*.

### **5.3 Sistema de processamento paralelo.**

O sistema de processamento paralelo consiste de uma placa PCI44 com 3 processadores TMS320C44 de 50 Mhz (40 MIPS/80MFLOPS) com 128 K palavras de memória local e 128 K palavras de memória global, interface JTAG.

Este processador de sinais digitais representa o estado d'arte e é utilizado no processamento de sinais, de informações ou uso científico que requeira alto desempenho.

Sua configuração permite uma fácil utilização em testes de software e desenvolvimento do produto final devido, entre outros aspectos, a:

- mapa de memória separado para a área de código e de dados.
- utilização de memórias compartilhadas entre todos os processadores, permitindo o compartilhamento dos dados globais, essenciais para armazenar o índice de desempenho no algoritmo genético.
- utilização de memória de dados, dedicada a cada processador para conter, por exemplo, os dados de um indivíduo executados em paralelo pelos processadores, ganhando tempo de resposta para atuação e conseqüente anulação.
- barramentos distribuídos para melhora do desempenho computacional.
- DMA para aquisição dos dados e armazenamento em memória, sem interrupção dos processadores. Com isto, o DSP fica livre apenas para os cálculos.
- 4 canais de comunicação entre os processadores, tornando as trocas de dados imediatas.



- os periféricos de entrada e saída são mapeados em memória, facilitando a leitura e a utilização de DMA.
- utilização de ponto flutuante.
- emulador em ambiente DOS/Windows, que permite os testes de cada rotina separadamente, com recursos de *breakpoints*, verificação do estado dos processadores e da memória.
- placa de desenvolvimento contendo 3 processadores, cada um com 128 K de RAM.
- utilização de compilador C ANSI, padrão nas estações científicas, ou *assembler* para cálculos de alta requisição.
- comunicação através do barramento PCI com a memória do computador.
- Execução de mais de uma instrução *assembler* ao mesmo tempo, graças à estrutura de *pipeline*.

#### **5.4 Sistema de redução dos dados e interface homem-máquina.**

O sistema de redução de dados é um micro IBM-PC Pentium 166 MHz, 32 MB RAM, 3.2 GB *Winchester*, para funcionar como hospedeiro das placas de aquisição (ADC64) e de processamento(PCI44).

Como o sistema de DSPs é comercializado para o desenvolvimento de programas dedicados, não existe sistema operacional básico, como o Windows 95 para micros IBM-PC ou Unix. Há uma biblioteca de funções básicas para acesso a vídeo, teclado, arquivos e carga e descarga do programa executável em linguagem de máquina. O microcomputador funciona como um terminal para o sistema.

Para desenvolver o programa que sintetiza o algoritmo de controle foram utilizados os seguintes programas no micro IBM-PC:



- Compilador C e *Assembler* da Texas Instruments: responsável em traduzir o programa em linguagem C para código de máquina executável pelos DSPs.
- Code Composer: ferramenta de depuração para verificação da execução do programa, passo a passo ou até *breakpoints*, permitindo a visualização das variáveis através de janelas com o valor ou o seu gráfico.
- Terminal: programa que apresenta as saídas padrão do DSP na tela do micro.

O software de controle foi estruturado em bibliotecas contendo as variáveis utilizadas e o código fonte para facilitar o teste e o desenvolvimento:

-srchdw.c: contém as rotinas de inicialização das placas, eliminação de nível DC, atualização de áreas, etc. Todas as rotinas que atualizem o hardware.

-srcid.c: contém as rotinas de identificação, geração de sinais, armazenamento dos sinais lidos, etc.

-srcfft.c: rotina de cálculo da transformada de Fourier. Não foi utilizada a da biblioteca de rotinas da placa, pois esta utilizava um mapeamento absoluto da memória da placa com desperdício de memória e não utilizava o recurso de multiprocessamento.

-srcga.c e srcpga.c: primitivas e rotina geral do algoritmo genético mono e multiprocessamento.

-srcgp.c srcpgp.c: contém as rotinas de programação genética adaptadas do programa da Universidade de Michigan lil-gp 1.01 (Zongker 1996).

Cada versão ou tentativa de modelagem carrega as bibliotecas necessárias e chama as rotinas, reduzindo o tamanho do programa e facilitando sua análise.

### 5.5 Obtenção da função de transferência experimental.

A função de transferência modela o caminho entre uma fonte de excitação (entrada do processo e saída do sistema de controle) e o sensor (saída do processo e entrada do sistema de controle). Outra interpretação possível é saber a potência transferida da fonte para o sensor.

Com uma boa função de transferência, é possível estimar a leitura do sensor para uma dada excitação sem medida. As técnicas de tratamento de sinal podem ser encontradas em Proakis (1992).

#### 5.5.1 Excitação por impulso.

O impulso no tempo é uma realização de um delta de Dirac, cuja Transformada de Fourier corresponde a uma constante para todas as frequências. Isto significa que aplicando um impulso ao sistema, teoricamente todas as frequências serão excitadas e a sua identificação será possível.

A seqüência de tratamento do sinal segue as seguintes etapas:

-Aquisição de um *buffer* de dados suficientemente grande para conter toda a resposta do sistema.

-Calcular a Transformada de Fourier dos *buffers* de dados (entrada no alto-falante e saída do microfone).

-Calcular a função de transferência, usando:

$$\begin{aligned}
 H(\omega) &= 10 * \text{Log}_{10} \left( \frac{\text{saída}(\omega)}{\text{entrada}(\omega)} \right) \\
 \phi(\omega) &= \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(H(\omega))}{\text{Re}(H(\omega))} \right) \\
 |H(\omega)| &= \left[ \text{Re}^2(H(\omega)) + \text{Im}^2(H(\omega)) \right]^{1/2}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

### 5.5.2 Excitação por ruído aleatório.

Um ruído aleatório excita praticamente todas as frequências do espectro, com diferentes amplitudes. No caso de amplitudes iguais, denomina-se ruído branco.

O tratamento a ser aplicado nos dados é o seguinte:

-Aquisição dos *buffers* de dados (entradas e saídas).

-Aplicar a janela de Hanning nos *buffers*, para eliminar os valores do início e fim dos *buffers* e evitar discontinuidades para a Transformada de Fourier.

-Calcular a Transformada de Fourier dos *buffers*.

-Calcular a função de transferência:

$$\begin{aligned}
 H(\omega) &= 10 * \text{Log}_{10} \left( \frac{\text{saída}(\omega)}{\text{entrada}(\omega)} \right) \\
 \phi(\omega) &= \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(H(\omega))}{\text{Re}(H(\omega))} \right) \\
 |H(\omega)| &= \left[ \text{Re}^2(H(\omega)) + \text{Im}^2(H(\omega)) \right]^{1/2}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

O refinamento do resultado foi feito através da técnica de construção do periodograma.

### 5.5.3 Varredura em frequência.

Para cada frequência de interesse “f” com amplitude “a” e frequência de amostragem “ $f_{\text{amost}}$ ”, através da fórmula:

$$S[n] = a \sin \left( \frac{2\pi f n}{f_{\text{amost}}} \right) \tag{5.3}$$

gerar as saídas e realizar as aquisições de dados por um período determinado em função do tempo de acomodação do sistema, adquirindo uma quantidade de dados satisfatória para cálculo da energia.

A energia é calculada como :

$$E = \sum_n (e[n]^2) \quad (5.4)$$

A fase é calculada determinando a partir do meio do *buffer* a primeira posição de máximo do sinal de saída e a partir deste ponto o próximo máximo do *buffer* de entrada.

A fase é calculada como:

$$\phi(\omega) = \frac{2\pi (\text{Diferença de posições}) f}{f_{\text{amostr}}} \quad (5.5)$$

onde o critério de localização dos picos é que o valor lido no pico seja maior que os valores imediatamente antes e depois.

O módulo da função de transferência é dado por:

$$H(\omega) = 10 * \text{Log}_{10} \left( \frac{\text{saida}(\omega)}{\text{entrada}(\omega)} \right) \quad (5.6)$$

onde a divisão entre saída e entrada deve ser feita canal por canal de cada *buffer*.

## **5.6 Resultados experimentais para o sistema acústico.**

As técnicas de identificação descritas acima foram aplicadas a diversas configurações dos dutos para análise do comportamento dinâmico, comparação dos resultados e das técnicas entre si e com modelos teóricos.

### **5.6.1 Função de transferência do alto-falante de ruído (principal) e atuação (secundário).**

Os alto-falantes foram colocados em pé, a 20 centímetros do microfone e uma varredura em frequência foi realizada a cada 1 Hz. A fig. 5.2 apresenta a resposta em frequência da função de transferência.

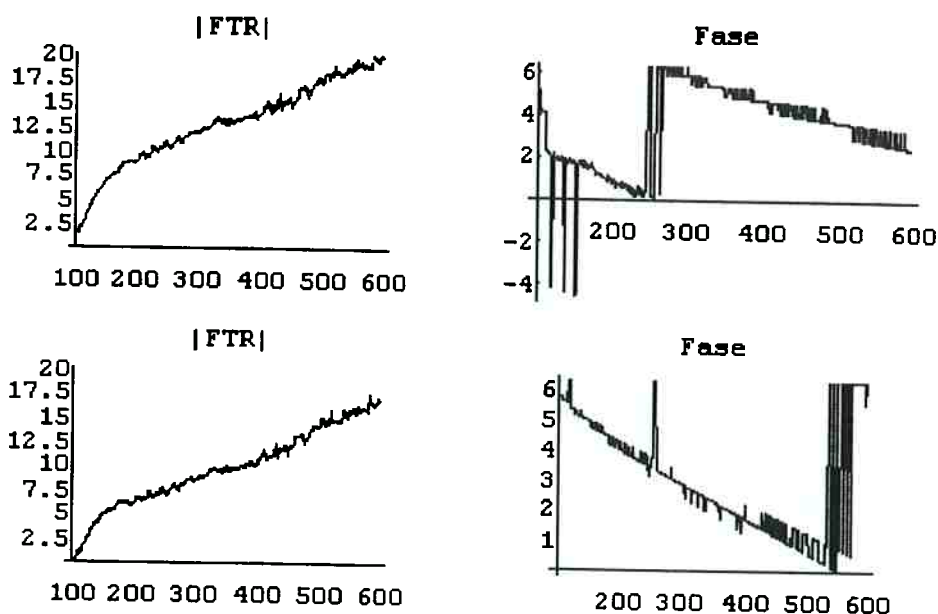


Fig 5.2 Módulo e defasagem da função de transferência dos alto-falantes principal (acima) e secundário (abaixo) em função da frequência (Hz).

Pode-se observar que para frequências abaixo de 150 Hz, o alto-falante se comporta como um filtro passa alta. As discontinuidades apresentadas são decorrentes da quantização do sinal, de incertezas na definição em valores próximos de zero ou  $2\pi$ , e de falha do algoritmo de busca do pico para valores de amplitude muito pequenas.

A partir dos gráficos da função de transferência, pode-se definir a faixa de trabalho entre 100 Hz e 600 Hz.

Não são observadas ressonâncias na faixa de frequência medida.

Para estudar a aderência do modelo teórico descrito nas equações (3.12) e (3.13), foi utilizado um duto simples aberto e fechado.

### 5.6.2 Duto simples aberto.

O duto simples consiste de um tubo de PVC de 6 polegadas com 403 cm de comprimento, com apenas um alto-falante no extremo. São utilizados dois microfones: o antecipativo e o de erro em suas posições características. A fig. 5.3 apresenta o módulo e defasagem da função de transferência obtida por varredura em frequência,

resposta a impulso gerado pelo alto-falante, ruído aleatório com periodograma e a montagem onde o alto-falante foi substituído por uma tampa e uma pancada foi dada com um martelo de borracha.

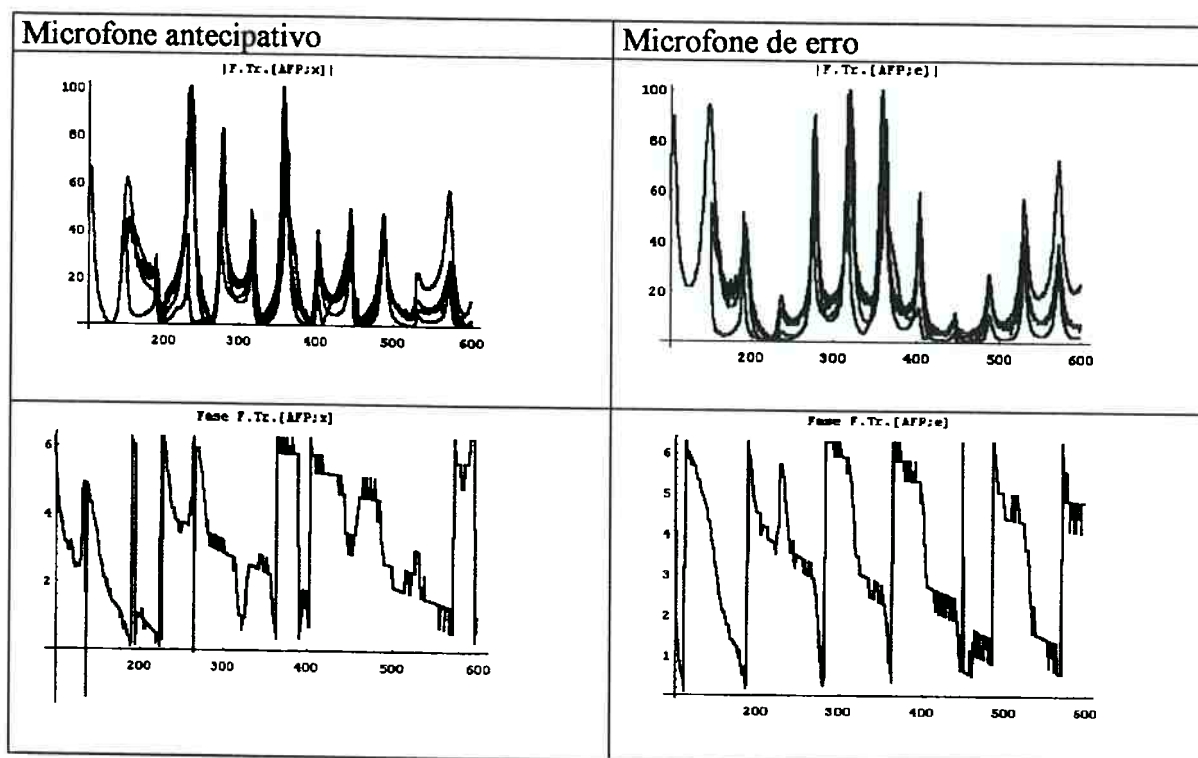


Fig. 5.3 Módulo (unidades arbitrárias) e defasagem (radianos) da função de transferência para o duto simples aberto medido pelos microfones antecipativo (esquerda) e de erro (direita) em função da frequência (Hz).

Os módulos foram normalizados para que o valor máximo da região de interesse representasse 100, e o mínimo 0. A leitura da amplitude de um pico informa a porcentagem de energia que ele carrega em relação ao dominante. Pode-se observar a convergência dos diferentes métodos utilizados, a menos de uma constante de ganho.

As discontinuidades apresentadas nos gráficos de fase são decorrentes da quantização do sinal, de incertezas na definição em valores próximos de zero ou  $2\pi$ , e de falha do algoritmo de busca do pico para valores de amplitude muito pequenas.

Na tabela 5.1, apresentamos a comparação entre as frequências de ressonância teórica e experimental. Pode-se observar a concordância entre o teórico obtido pela equação 3.13 e o experimental medido por varredura com 1 Hz de passo.

As frequências de ressonância medidas para o microfone antecipativo e para o de erro são coincidentes, mudando apenas as amplitudes. A técnica utilizando ruído aleatório apresentou maior flutuação, pois o sinal não excita igualmente todas as frequências.

Tab. 5.1 Comparação das frequências de ressonância.

Modo	Teórico (3.13)	Experimental
0	21	
1	63	
2	105	103
3	147	151
4	189	187
5	232	235
6	274	278
7	316	318
8	358	362
9	400	404
10	442	446
11	485	488
12	527	533
13	569	573

### 5.6.3 Duto simples fechado.

Nesta configuração, foi colocada uma tampa no extremo do duto. As funções de transferência são mostradas na Fig. 5.4 e as frequências na tabela 5.2.

As discontinuidades apresentadas nos gráficos de fase são decorrentes da quantização do sinal, de incertezas na definição em valores próximos de zero ou  $2\pi$ , e de falha do algoritmo de busca do pico para valores de amplitude muito pequenas.

Na tabela 5.2 as frequências de ressonância teórica obtidas com a equação 3.12 e a experimental medida por varredura, mostrando a aderência do modelo.

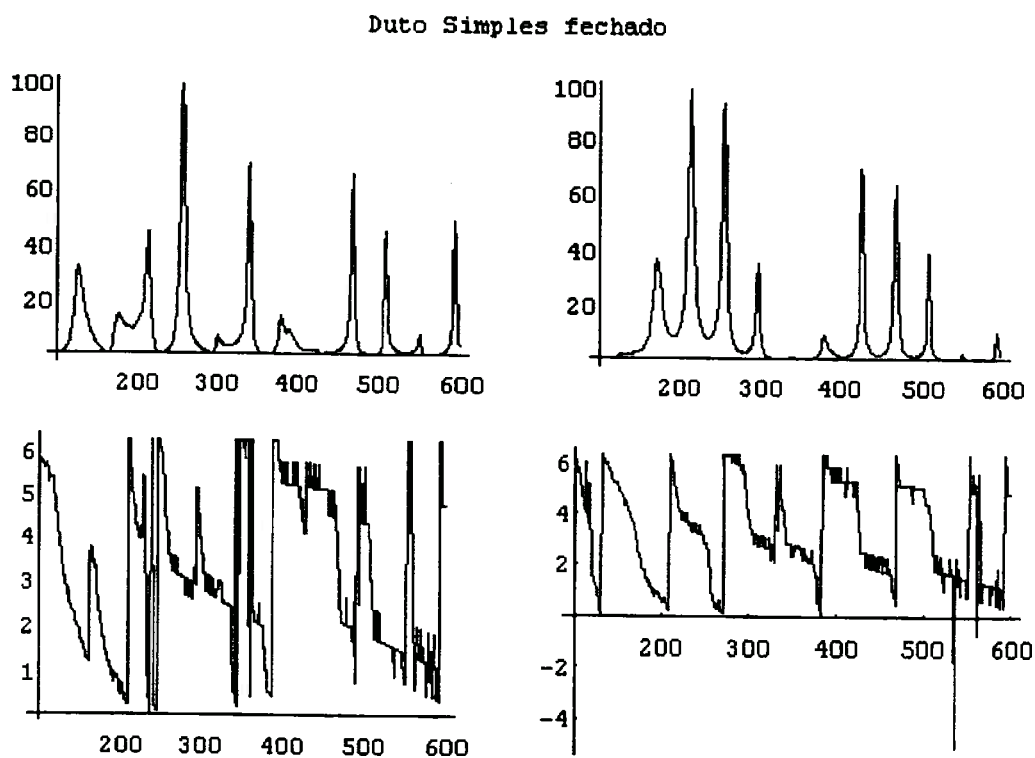


Fig. 5.4 Módulo (unidade arbitrária) e fase (radiano) da função de transferência para o duto simples fechado medido com o microfone antecipativo (esquerda) e de erro (direita) em função da frequência (Hz).

Tab. 5.2 Comparação das frequências de ressonância.

Modo	Teórico ( Eq. 3.12)	Experimental
1	42	
2	84	
3	126	126
4	168	176
5	210	213
6	253	256
7	295	299
8	337	339
9	379	379
10	421	424
11	464	467
12	506	509
13	548	550
14	590	592

Para avaliar o efeito da colocação do alto-falante secundário no duto, foram utilizadas duas montagens: com Te e com Junção.



### 5.6.4 Duto com Te e alto-falante secundário.

Nesta configuração, a 2 metros de distancia do extremo contendo o alto-falante principal, foi colocado um Te de 90 graus com o alto-falante secundário em seu extremo. A continuação do duto é feita por outro tubo de 2 metros.

A função de transferência é mostrada na fig. 5.5 e a comparação com a teoria é feita na tabela 5.3. Pode-se verificar a concordância entre o teórico e o experimental.

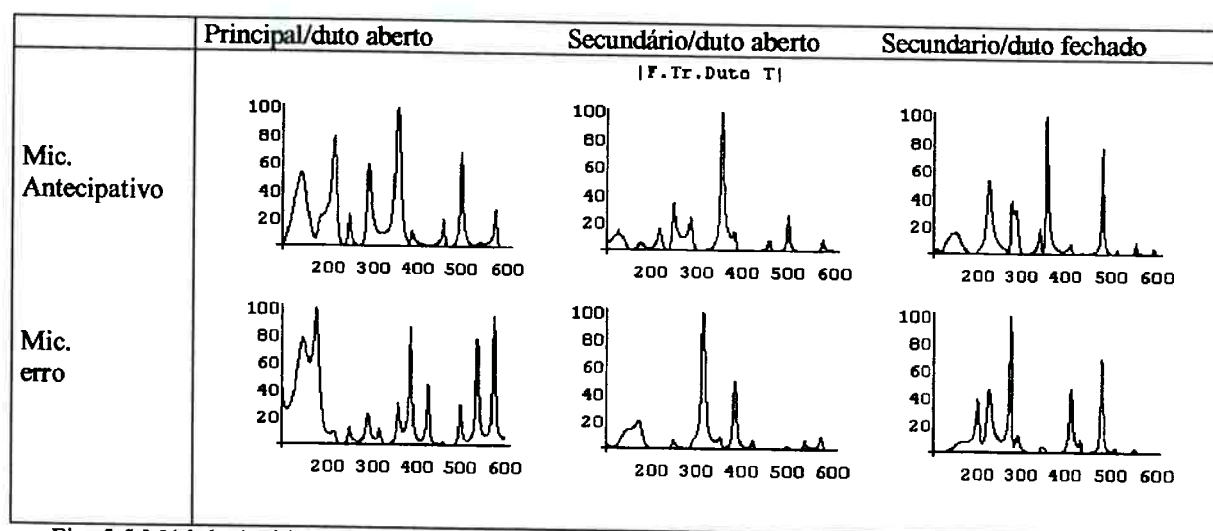


Fig. 5.5 Módulo (unidade arbitrária) e fase (radianos) da função de transferência do duto com Te em função da frequência (Hz).

Tab. 5.3 Comparação das frequências de ressonância.

Modo	Aberto		Fechado	
	Teo.	Exp.	Teo.	Exp.
3	136	143	116	114
4	175	173	155	151
5	213	215	194	199
6	252	248	233	227
7	291	289	272	278
8	330		311	
9	369	355	350	345
10	408	424	389	
11	447	458	427	434
12	486	498	466	482
13	525	539	505	513
14	564	574	544	556

### 5.6.5 Duto com junção e alto-falante secundário.

Nesta configuração, a 2 metros de distancia do extremo contendo o alto-falante principal, foi colocada uma junção de 60 graus com o alto-falante secundário no extremo. A continuação do duto é feita por outro tubo de 2 metros.

A função de transferência é mostrada na fig. 5.6 e a comparação com a teoria (eqs. 3.12 e 3.13) é feita na tabela 5.3.

A utilização de junção ou Te não altera a posição das ressonâncias nem as amplitudes na região de freqüências consideradas.

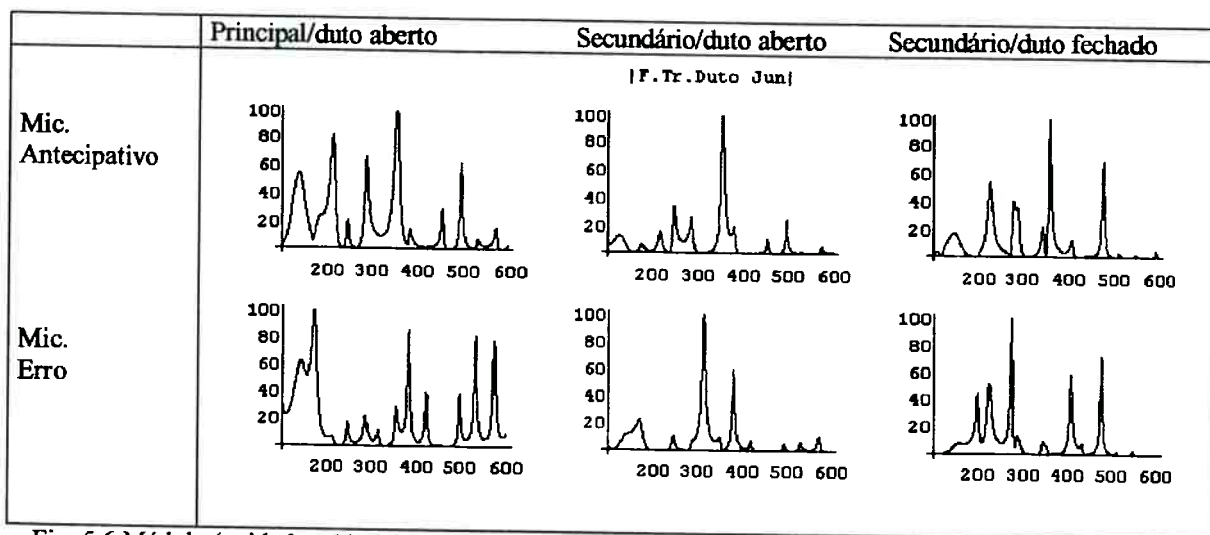


Fig. 5.6 Módulo (unidade arbitrária) e fase (radiano) da função de transferência do duto com junção em função da freqüência (Hz).

Tab. 5.4 Comparação das freqüências de ressonância.

Modo	Aberto		Fechado	
	Teo.	Exp.	Teo.	Exp.
3	136	140	116.7	111
4	175	173	155	147
5	213	213	194	198
6	252	247	233	225
7	291	288	272	278
8	330	315	311	307
9	369	356	350	343
10	408		389	388
11	447	456	427	428
12	486	497	466	477
13	525	534	505	513
14	564	573	544	550

### 5.6.6 Duto retangular.

Este duto foi montado para reduzir a realimentação acústica.

O duto retangular foi construído em madeira de 2 cm de espessura e montado sobre uma estante de madeira com apoios a cada 1 metro, que serve de apoio para todos os dutos. Para os alto-falantes foram construídas caixas de som com revestimento interno com placas de Sonex. Na caixa de som dos alto-falantes secundários, foi colocado 1 alto-falante em cada parede do duto e diagonalmente placas de celulose para isolamento.

Na fig. 5.7, pode-se verificar a função de transferência obtida com varredura em frequência, mostrando a redução dos componentes de alta frequência e o domínio de poucos modos em baixas frequências.

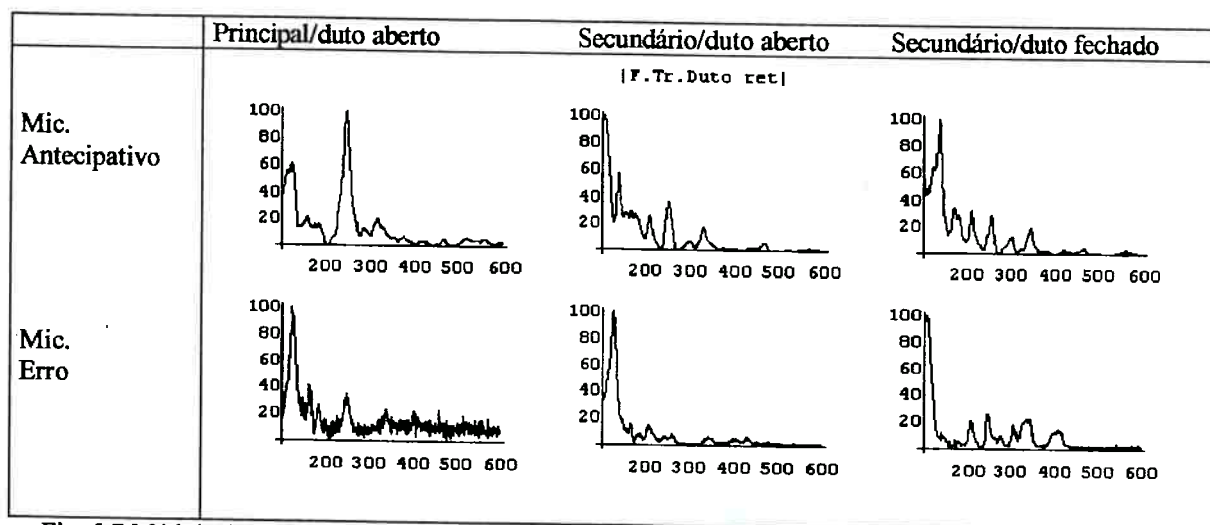


Fig. 5.7 Módulo (unidade arbitrária) e fase (radiano) da função de transferência do duto retangular em função da frequência (Hz).

### 5.6.7 Duto fechado nos dois extremos com Te e alto-falante secundário.

Esta montagem foi construída para comparar resultados do modelo teórico (eq. 3.27) para a função de transferência, o modelo dos modos de vibração (eq. 3.12) e o experimental obtido por varredura em frequência (fig. 5.8 e tab. 5.5).

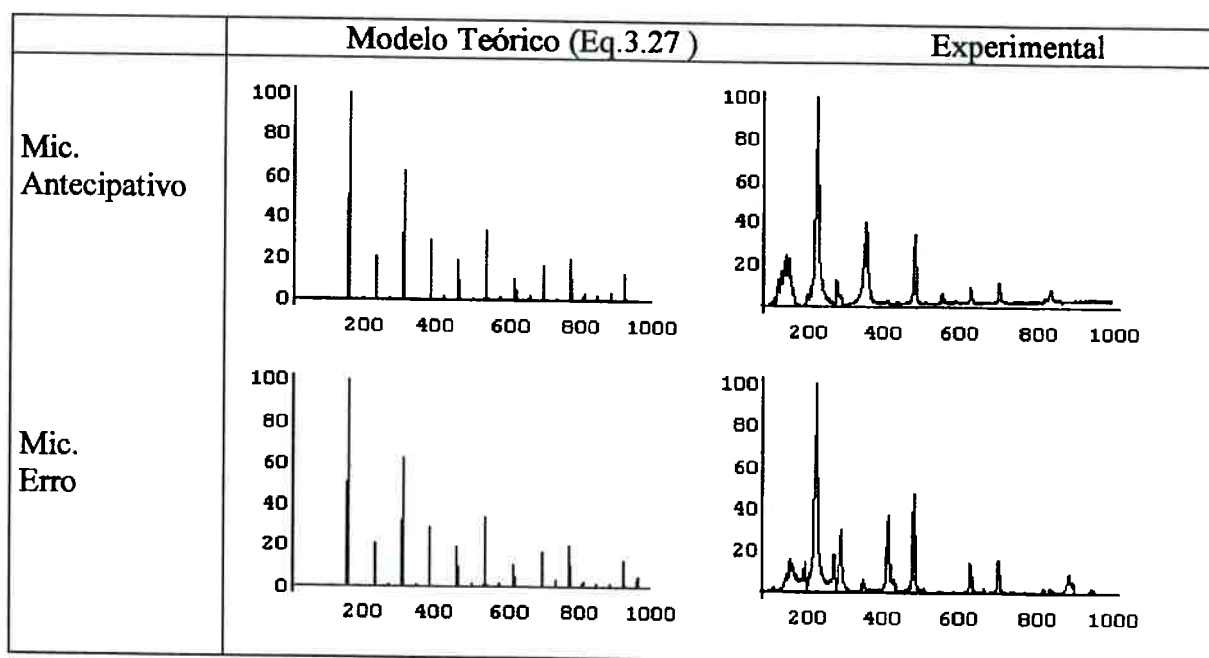


Fig. 5.8 Módulo da função de transferência (unidade arbitrária) para o alto-falante secundário em um Te com duto fechado nos dois extremos, medida pelos microfones antecipativo e de erro em função da frequência (HZ).

Tab. 5.5 Comparação das frequências de ressonância.

Modo	Teorico (eq.3.12)	Mod.Hu (eq.3.27)	Experimental
1	38		
2	77		
3	115		
4	154	154	151
5	192	192	
6	231	231	224
7	269	270	274
8	308	308	
9	346	347	352
10	385	385	
11	423	423	414
12	462	462	480
13	500	500	
14	539	539	556

Na tabela 5.5 comparativo entre os modelos da equação 3.12, 3.27 e varredura em frequência, mostrando a aderência dos resultados obtidos com os modelos teóricos e experimentais.

A relação de amplitudes não mostra boa aderência, pois a tampa utilizada provavelmente não possui as impedâncias ideais utilizada no cálculo, nem foi levado em conta a dinâmica dos alto-falantes.

A partir dos resultados apresentados, pode-se selecionar os dutos de 6 polegadas com junção e o retangular para estudo do efeito da realimentação acústica.

### **5.7 Resultados experimentais do algoritmo adaptativo no duto cilíndrico de 6 polegadas com junção.**

Para avaliar o desempenho do algoritmo genético, implementou-se o algoritmo adaptativo FBFXLMS (Fig. 2.3) na placa ADC64.

O algoritmo adaptativo utiliza basicamente duas rotinas em *assembler*, *fir* e *lms*, para sua execução em tempo real.

A rotina *fir* realiza uma convolução discreta, utilizando as instruções MPYF3 em paralelo com ADDF3 (explorando a estrutura de *pipeline* do processador), realizando a multiplicação de cada termo do FIR e a soma em um ciclo de máquina (30 vezes mais rápido que um programa equivalente em C). A atualização dos ponteiros dos *buffers* circulares dos vetores de coeficientes e de dados são atualizados no término da instrução.

Na rotina *lms* o algoritmo de ajuste dos coeficientes é feita utilizando um algoritmo LMS, onde a mesma instrução é utilizada, porém sem usar o recurso da soma em paralelo, uma vez que o cálculo se repete para cada coeficiente. O parâmetro crítico deste algoritmo é a velocidade de convergência  $\mu$ , que está relacionada com a potência do ruído, mantido constante durante todas as varreduras em frequência.

O gerador de eventos que cria as interrupções para execução de um ciclo é um temporizador com programação de frequência variável. A cada interrupção, o ponteiro

de execução do DSP desvia para o endereço da tabela de interrupções, associada ao endereço de entrada da rotina de tratamento do temporizador.

O algoritmo é dividido em duas fases: identificação da planta e controle de ruído.

### 5.7.1 Identificação da planta.

A identificação da planta consiste em achar os coeficientes  $C[n]$  e  $D[n]$  que realizam as funções de transferência entre o alto-falante e o microfone de erro e o de antecipação, respectivamente. Nesta implementação foi usada a técnica off-line, onde durante a identificação não há ruído.

A excitação utilizada é um ruído aleatório de amplitude definida pelo usuário, que executa, a cada interrupção, as seguintes tarefas:

- Geração do ruído aleatório e armazenamento na lista circular  $Y[n]$ .
- Convolução discreta entre  $C[n]$  e  $Y[n]$  utilizando a rotina *fir*.
- Convolução entre  $D[n]$  e  $Y[n]$  utilizando a rotina *fir*.
- Adaptação de  $C[n]$  e  $D[n]$  utilizando a rotina *lms*.

A função do algoritmo LMS é corrigir os coeficientes  $C[n]$  e  $D[n]$  pela diferença entre o valor calculado e o medido pelo microfone, ponderada pela saída. Após 10 segundos, os coeficientes estão ajustados.

A qualidade do ajuste está associada à quantidade de coeficientes (ordem do filtro), e depende da frequência de amostragem, das condições de contorno, da temperatura da sala, etc.

Para avaliar a precisão dos coeficientes obtidos, foram comparados os desvios percentuais entre os valores obtidos pelo filtro e medidos para cada tom puro entre 100Hz e 600Hz com passo de 1 Hz (fig. 5.9).

Pode-se observar que os coeficientes tem regiões de melhor desempenho e outras de pior, sendo que isto afetará o desempenho do sistema de controle.

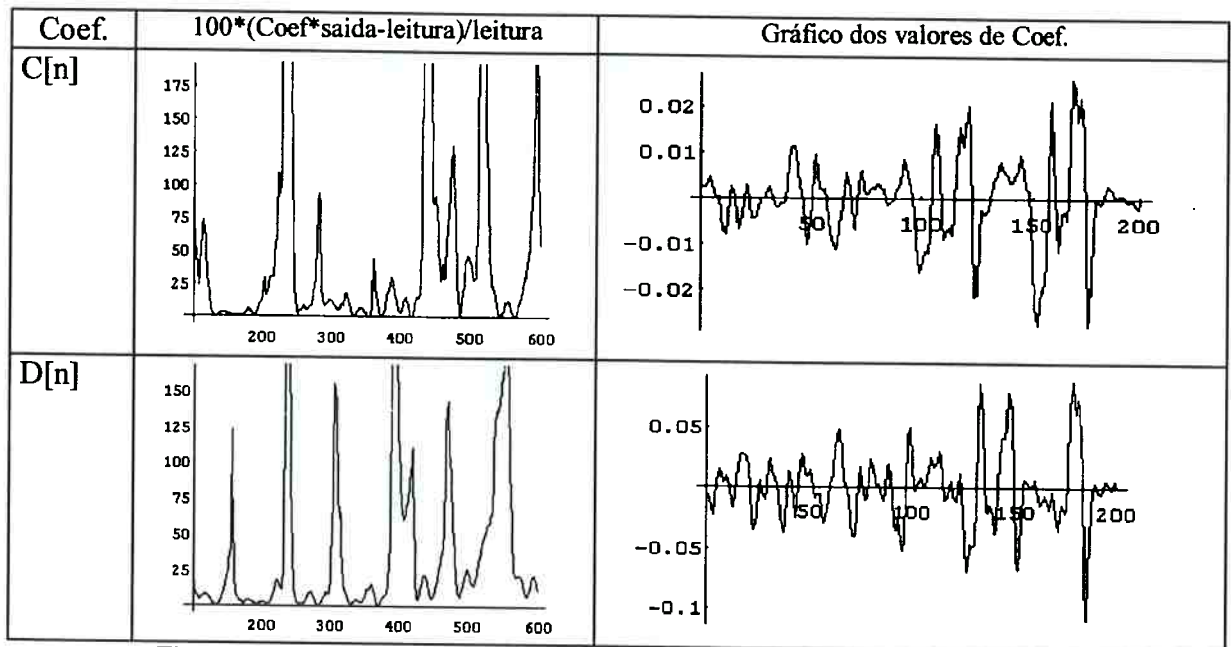


Fig. 5.9: Desvio percentual do ajuste em função da frequência (Hz) e coeficientes obtidos (unidades arbitrárias).

### 5.7.2 Controle de ruído.

A tarefa de controle acústico carrega os coeficientes gerados na identificação e executa a cada interrupção as seguintes tarefas:

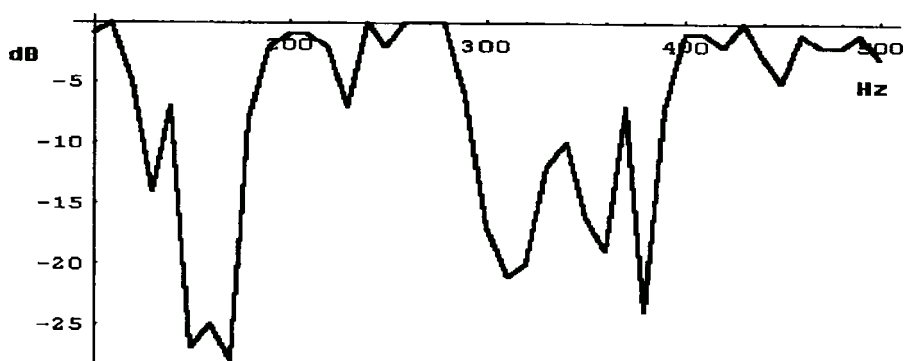
- Retira do valor lido pelo microfone antecipativo o valor do feedback acústico, resultado da convolução de  $D[n]$  pela saída  $Y[n]$ . Este valor representa o ruído puro.
- Calcula a nova saída a partir da convolução de  $W[n]$  pelo valor do ruído puro.
- Convolução entre o ruído puro e  $C[n]$ , que denominaremos erro propagado.
- Ajuste dos coeficientes  $W[n]$  com o valor lido no microfone de erro, ponderado pelo erro propagado.

A obtenção dos coeficientes  $W[n]$  visa fazer com que o duto tenha transmissão zero, impedindo que o resíduo realmente o sistema, criando uma microfonia e instabilizando o sistema.

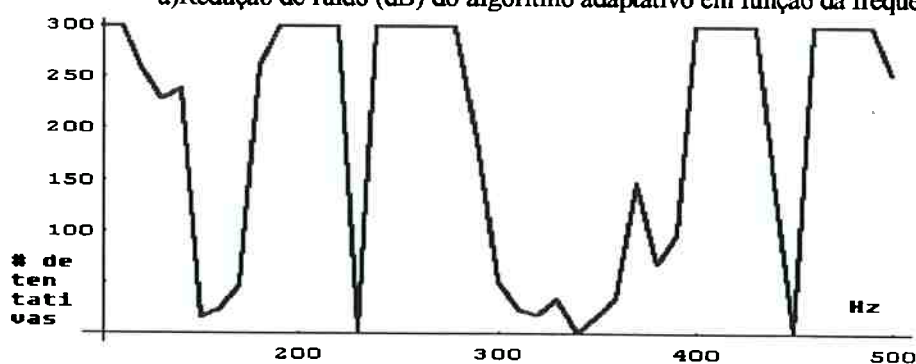


A eficiência do cancelamento está relacionada com a qualidade do ajuste da planta, e com a velocidade de variação da frequência do ruído.

Para teste do desempenho do algoritmo foram feitas 300 amostragens de 300 pontos para cálculo da energia, com frequência de amostragem de 2000 Hz.



a) Redução de ruído (dB) do algoritmo adaptativo em função da frequência (Hz).



b) Número de interrupções (x300) para atingir redução de 3 dB para o algoritmo adaptativo em função da frequência (Hz)

Fig. 5.10: Desempenho do algoritmo adaptativo para ruídos monocromáticos.

A fig. 5.10 a) apresenta a redução de ruído obtida pelo controle adaptativo em função da frequência para um tom puro e a fig. 5.10 b) mostra o tempo gasto para atingir uma redução de 3 dB com o limite máximo de 300 tentativas, isto é, ordenada 300 indica que o algoritmo não conseguiu alcançar a redução no tempo disponível. O limite corresponde ao tempo que o GA leva para convergir (45 segundos).

O parâmetro  $\mu$  foi adotado como  $1.0 \cdot 10^{-13}$ , constante para todas as frequências. Como este parâmetro está associado com a potência do ruído, a utilização de um valor



constante pode dificultar a convergência do algoritmo, ocasionando várias regiões onde não pode ser aplicado.

Para o caso da frequência variar no tempo, pode-se verificar que o algoritmo adaptativo tem dificuldade em convergir. Na fig. 5.11 apresentamos a geração e redução de um ruído cuja frequência varia 200 Hz por segundo, simulando a aceleração de um veículo.

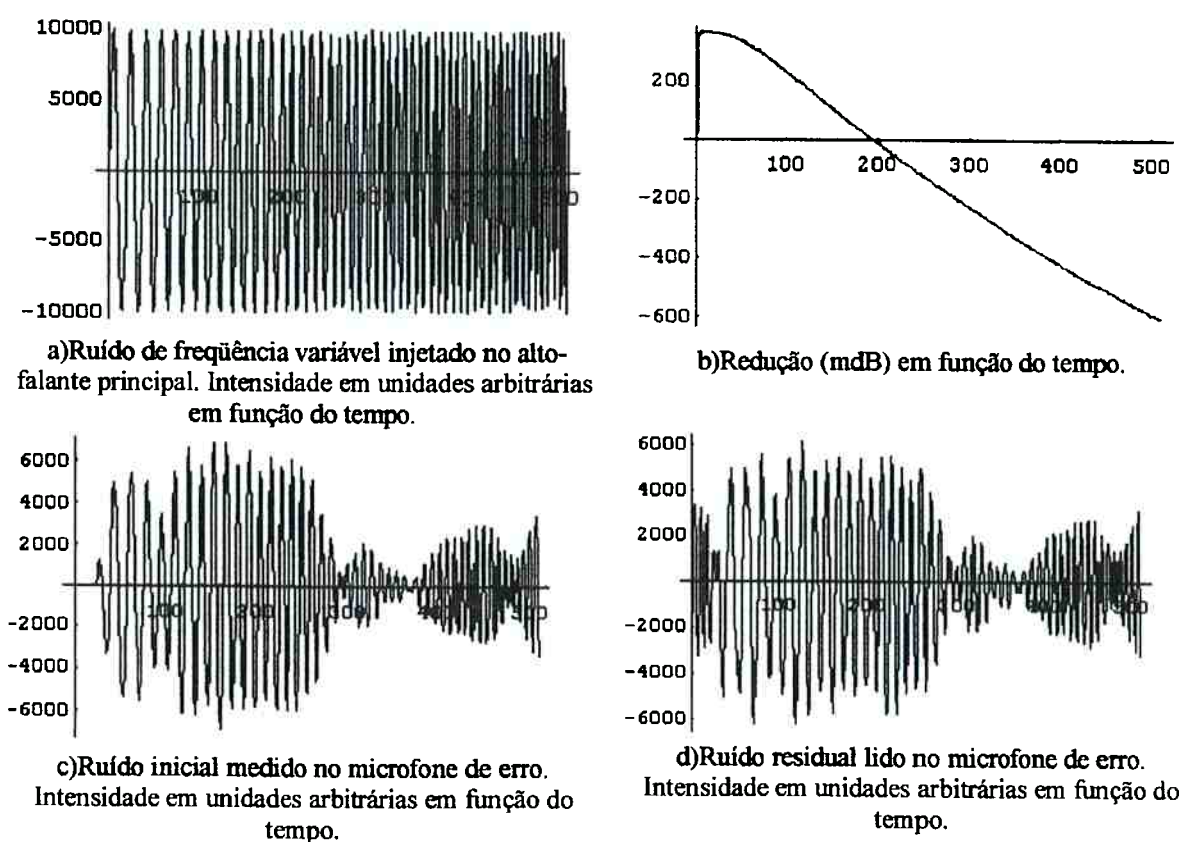


Fig. 5.11 Comportamento no domínio do tempo do desempenho do algoritmo adaptativo com frequência variando no tempo.

A fig. 5.11 a) apresenta o ruído a ser enviado para o alto-falante pelo DAC, sendo posteriormente lido pelo microfone de erro (5.11 c). A atuação do sistema de controle provoca inicialmente um aumento do ruído no duto, que com a adaptação dos coeficientes de  $W$  vai diminuindo (Fig. 5.11 b). Pode-se observar que o algoritmo adaptativo reduziu 0.6 dB (fig. 5.11 d), mostrando que ruídos variantes no tempo são uma limitação para o algoritmo adaptativo.

## Capítulo 6

### Resultados do Algoritmo genético.

Neste capítulo serão tratados o desenvolvimento, as plataformas utilizadas e os resultados experimentais das aplicações do algoritmo genético para o duto acústico. O problema de realimentação acústica será tratado no próximo capítulo.

#### **6.1 Plataformas de software/hardware utilizadas.**

O algoritmo genético foi implementado em um simulador executado no sistema operacional Linux, codificado em linguagem C para teste de software, no DSP TMS320C32 em versão mono processador e nos DSPs TMS320C44, em versão multi processador, descritos a seguir.

##### 6.1.1 Versão de teste no simulador.

O desenvolvimento de um software de controle com tempo de resposta de micro segundos, requer um ambiente de teste onde várias características da planta real são desprezadas, para facilitar o controle da execução exaustiva e em separado do módulo.

O simulador desempenha a função de gerar as saídas que o sistema simulado geraria se sujeito a um conjunto de excitações dada. Ele possui uma interface com o programa de controle que recebe as saídas geradas para o alto-falante principal (geração de ruído) e secundário(atuação), e as armazena em *buffers*. Quando o programa de controle faz uma leitura dos microfones, o simulador busca nos *buffers*, em uma posição que depende das distancias entre a fonte e os microfones, os valores que somados seriam retornados para o programa, simulando a leitura dos microfones. Não foi considerada a dinâmica dos alto-falantes.

Cada indivíduo representa um tom puro, com um cromossomo codificando os atributos (frequência, amplitude e fase), com um número de bits (ou genes) definidos pelo usuário. Os limites dos atributos podem ser definidos com uma faixa inicial grande, sendo reduzidos conforme a convergência do algoritmo. Em todo o trabalho foram utilizados de 100 a 600Hz para a frequência (região de atuação do controle ativo), 0 a  $2\pi$  radianos para a fase e 0 a 20000 para a amplitude (em unidades arbitrárias). O GA gera os sinais codificados nos cromossomos dos indivíduos e o simulador realiza a superposição do ruído com o sinal, independente de uma antecipação (em malha aberta), e o resultado do controle é utilizado para cálculo da energia acústica utilizada na função de desempenho.

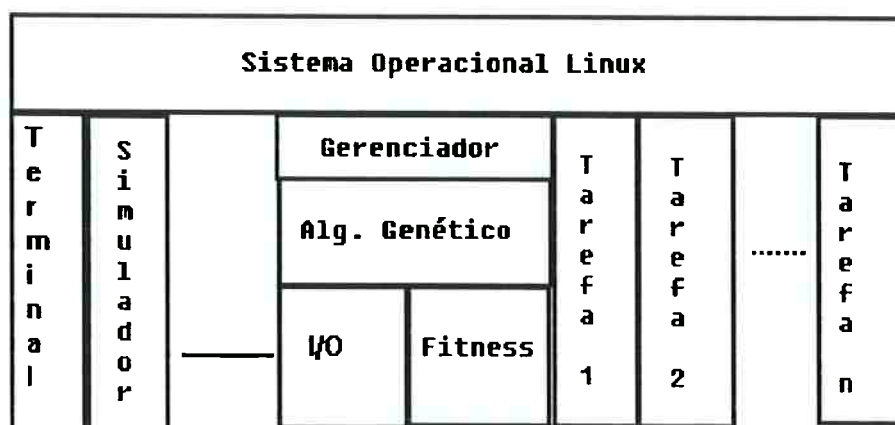


Fig. 6.1: Módulos do simulador para teste dos algoritmos.

As funções de cada bloco são as seguintes:

**-Terminal:** serve de interface entre o sistema e o usuário, permitindo a visualização dos resultados e a entrada de comandos.

**-Simulador:** contém as informações da geometria e do ruído, que geram o sinal a ser lido pelo sistema de controle através das rotinas de I/O.

**-I/O:** realiza as funções de entrada e saída através do simulador ou dos endereços de hardware do ADC/DAC.

-**Fitness**: calcula a função objetivo para o *buffer* de dados.

-**Alg. Genético**: contém o algoritmo genético.

-**Gerenciador**: toma as decisões em função do resultado obtido, tais como: recommear o GA, recalcular, abandonar a atuação caso esteja saindo de controle, etc.

-**Tarefas**: tarefas auxiliares tais como redução de dados, gravar *trace*, etc.

### 6.1.2 Versão para DSP TMS320C32 Mono processador.

A migração do software desenvolvido em GNU C do Linux para o compilador da Texas foi simples, uma vez que o algoritmo genético foi encapsulado em um comando de chamada que passava todos os parâmetros de controle da execução e variáveis globais que continham as definições gerais.

### 6.1.3 Versão para DSP TMS320C44 Multi-processadores.

A teoria das arquiteturas de processamento pode ser encontrada em Hwang (1986) e a análise e desenho de algoritmos paralelos em Akl (1989).

O aumento de velocidade obtido por computadores paralelos com  $n$  processadores idênticos, trabalhando concorrentemente em um mesmo problema é no máximo  $n$  vezes mais rápido do que em um processador (limite superior). Na prática, o aumento de velocidade é muito menor devido a conflitos de acesso a memória ou comunicação e algoritmos ineficientes para explorar a concorrência.

A conjectura de Minsky estabelece o pior desempenho de processamento paralelo como  $\log_2 n$ . Assim, com 2 processadores há o desempenho de 1 processador sozinho, com 3 processadores há o desempenho de 1.6, com 4 processadores o desempenho de 2, com 8 o desempenho de 3. É por esta razão que os sistemas de multiprocessamento comerciais se limitam a ter 4 processadores.

O sistema de simulação com o software genético foi migrado para permitir a análise da plataforma multi-processada. Esta migração envolve várias considerações de ordem computacional.

O gerador de números aleatórios gera para todos os processadores a mesma seqüência, pois todos usam a mesma semente. No caso do GA haveria 1/3 da população com 3 repetições de cada indivíduo. A inicialização da semente como função do número do processador resolve este problema.

Na inicialização há necessidade de sincronismo até que todos os processadores estejam inicializados. Isto é feito criando semáforos entre os processadores, que ficam em um estado de espera até que todos estejam em condição operacional.

O acesso à memória global deve ser gerenciada através de semáforos para evitar a colisão entre vários processadores. Quando um processador atualiza a área de memória comum seta um semáforo que coloca qualquer outro processador em espera até que a atualização seja concluída.

A transferência entre a memória local e a global é otimizada se cada processador se encarregar do processamento de indivíduos em seqüência, isto é, o processador 0 de 0 a POP/NCPU-1; o proc. 1 de POP/NCPU a 2 POP/NCPU - 1, e assim por diante, onde POP é o número de indivíduos da população e NCPU é o número de CPUs ativas. A transferência de blocos é duas vezes mais rápida.

O algoritmo genético pode mapear a memória colocando a população antiga (geração anterior) em memória global, e a população nova em memória local. Ao término do processamento da geração, o processador atualiza a memória global, tornando os dados disponíveis a todos os processadores.

Esta divisão desacopla os processadores, fazendo com que o *overhead* seja praticamente inexistente.

O desempenho do sistema paralelo, sem amostragem ou cálculo do desempenho, em comparação com o sistema mono processador, está apresentado na tabela 6.1. Pode-se verificar que a utilização dos processadores é bastante eficiente.

Tabela 6.1 Desempenho do sistema paralelo em linguagem C, e comparação percentual com versão monoprocessador e com 1 processador na versão paralela.

Aplicação	Monoproc.	1 proc. Paralelo	2 proc. Paralelo	3 proc. Paralelo
180 indivíduos	317 ms	347 ms	168 ms	109 ms
% (Monoproc.)	100 %	109 %	52 %	34 %
% (1 Proc. Paralelo)	91 %	100 %	48%	31 %

Os tempos de processamento foram obtidos através de um relógio interno, lido antes e depois do processamento de uma geração com o número de processadores indicados. Na fig. 6.2 gráfico apresentando o limite superior de desempenho, o limite inferior e os valores obtidos.

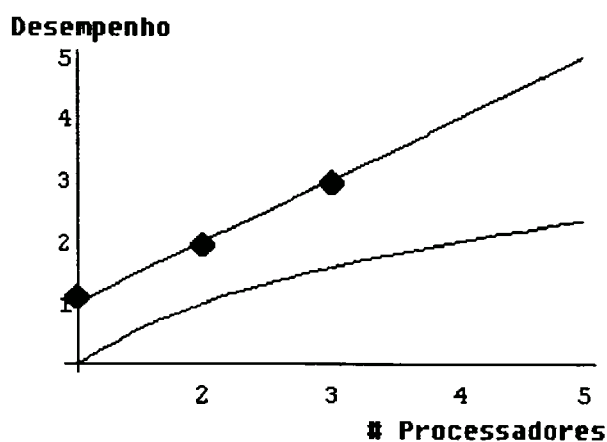


Fig. 6.2 Limites de desempenho de uma arquitetura multi processada e os resultados experimentais obtidos (losangos).

## 6.2 Utilização do GA.

Neste item serão apresentados os resultados obtidos na utilização do GA no simulador, na planta experimental codificando o sinal de controle através de uma função explícita do tempo e posteriormente a utilização de um operador de controle.

### 6.2.1 Resultados do GA usando o simulador.

O desenvolvimento do software começou pela utilização do simulador descrito no item 6.1.1 para uma análise da influência dos parâmetros e variáveis codificadas, e pelo efeito resultante em ruídos reais.

Um resultado do simulador para tom puro está apresentado na figura 6.3. As variáveis foram codificadas em 16 bits com a frequência variando de 100 a 500 Hz, a fase entre 0 e  $2\pi$  e a amplitude entre 0 e 10000. Foram calculadas 100 gerações com uma população de 500 indivíduos. A probabilidade de *crossover* foi de 0.5 e de mutação 0.05.

O ruído utilizado tinha frequência de 200 Hz e amplitude 1000 (unidades arbitrárias). O sinal encontrado para cancelamento tem frequência 199.99 Hz, amplitude 1001.39 (unidades arbitrárias), com fase 0.64 rad. Isto mostra boa convergência do GA para o sinal de cancelamento (redução de 40 dB).

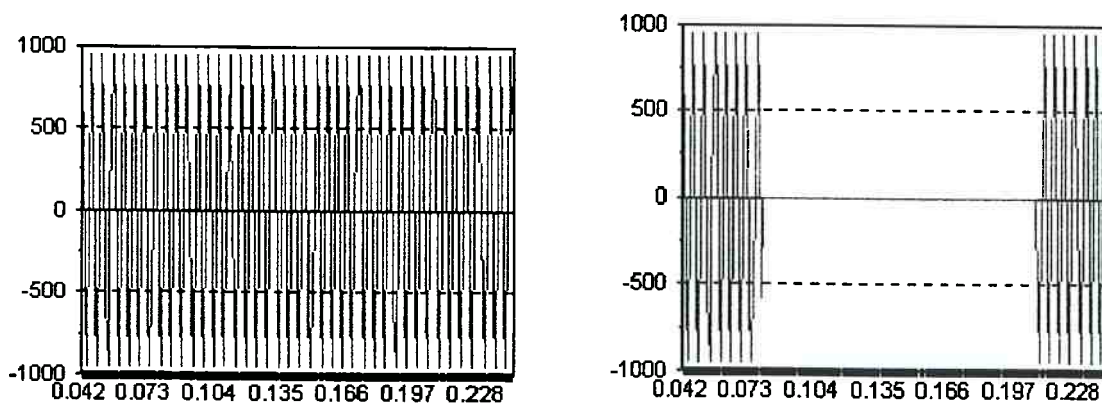


Fig 6.3. Resultado do simulador para cancelamento de ruído para tom puro em função da seqüência de interrupções do controle (em segundos).

O simulador permitiu o estudo dos efeitos da probabilidade de *crossover*, mutação, tamanho do cromossomo, tamanho da população, conforme descrição do capítulo 4.



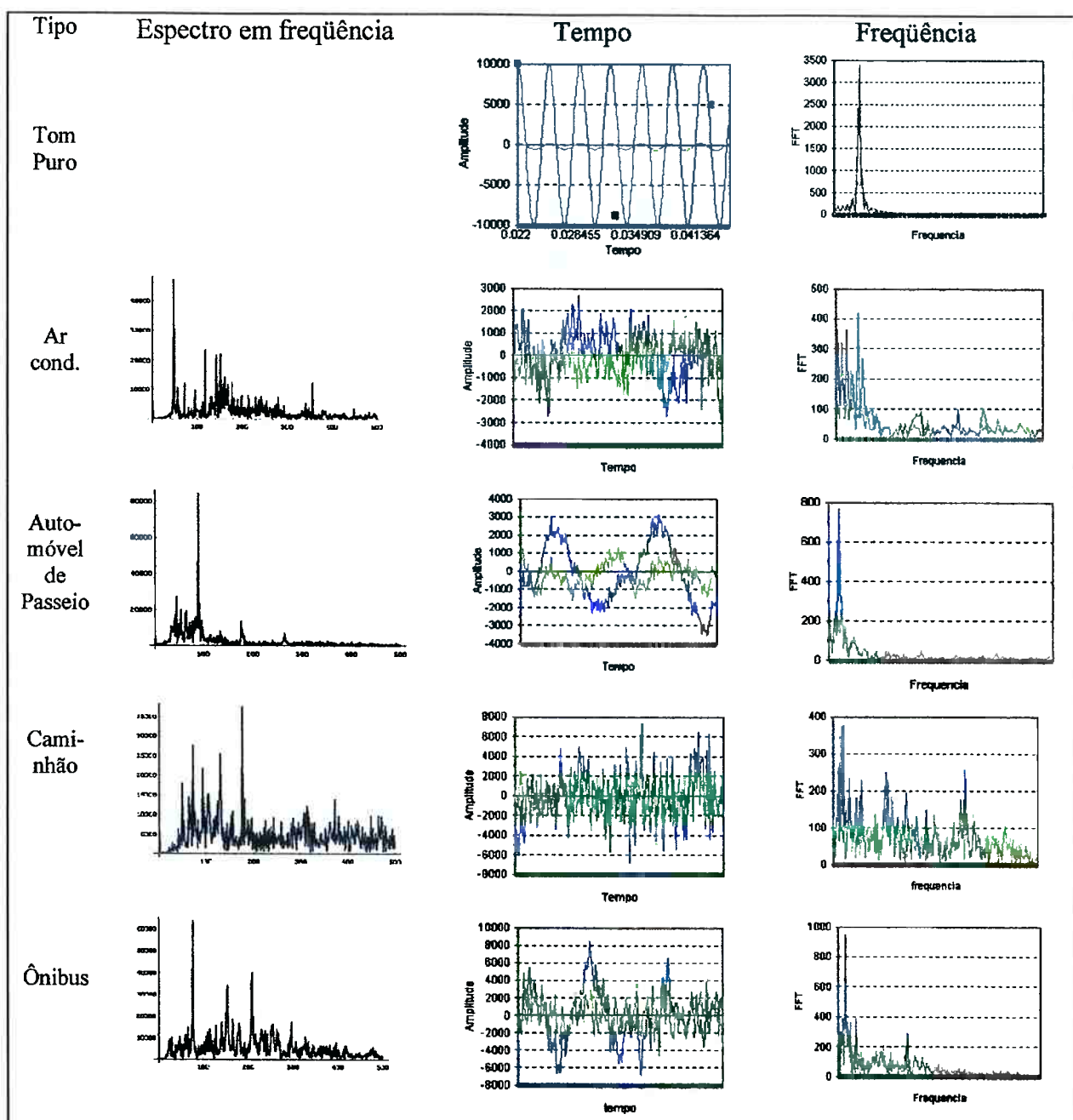


Fig. 6.4 Resultados da simulação para ruídos típicos, onde em azul é apresentado o ruído e em verde o sinal de atuação sobreposto ao ruído, mostrando a redução da energia acústica. O espectro em frequência mostra o detalhe das componentes dos ruídos utilizados.

Usando o simulador, foram feitos testes do desempenho do sistema de cancelamento para diferentes ruídos reais típicos, em condições estacionárias gravados com um gravador comum portátil, que depois foram digitalizados pela entrada AUX da placa SoundBlaster do micro. Os resultados estão apresentados na figura 6.4.



O espectro em frequência foi obtido com uma taxa de 10 KHz com amostragem em um *buffer* de 10000 elementos, resultando em uma precisão de 1 Hz/canal.

Deste espectro foi selecionado um *buffer* de 512 elementos para utilização pelo simulador como ruído, e o GA procurou o sinal para realizar o cancelamento, com uma população de 300 indivíduos. Cada atributo codificado em 8 bits e a frequência variava de 10Hz a 500Hz, a amplitude de 100 a 5000 (unidades arbitrárias), e a fase de 0 a 2 Pi radianos. O resultado obtido foram reduções de 27 dB para o tom puro, 6 dB para o ar condicionado, 9 dB para o veículo de passeio a velocidade constante de 60 Km/h, 4 dB para o caminhão parado com o motor ligado e 5 dB para o ônibus em movimento em velocidade constante.

### 6.2.2 O SGA – Simple Genetic Algorithms no duto de PVC de 6”.

A primeira implementação experimental desenvolvida no duto de PVC de 6 polegadas com junção foi usando o algoritmo genético em um nível (SGA-Simple Genetic Algorithms), com a frequência, fase e amplitude codificadas no cromossomo. O ruído foi um tom puro de frequência conhecida e armazenado em um *buffer* seqüencialmente enviado para o alto-falante. O GA determina o sinal que deve ser utilizado para cancelar o ruído.

A função de desempenho é amostrada da seguinte forma:

- cria os elementos do *buffer* de sinal, a partir dos valores da frequência, fase e amplitude do indivíduo pela fórmula:

$$\text{buffer}[i] = \text{amp\_ind} * \sin\left(\frac{2\pi \text{freq\_ind } i}{\text{freq\_amost}} + \text{fase\_ind}\right) \quad (6.1)$$

onde *amp\_ind*, *freq\_ind* e *fase\_ind* são as variáveis codificadas e *Freq\_amost* é a frequência de amostragem.

- aguardar 100 ms sem enviar saídas para os alto-falantes, para que o sistema acústico não tenha qualquer resíduo de outras medidas.
- enviar a cada interrupção um elemento do *buffer* de ruído para o alto-falante principal e um elemento do *buffer* de sinal para o alto-falante secundário, e ler o microfone de erro.
- calcular o desempenho como sendo o inverso da soma dos quadrados das amplitudes, da segunda metade do *buffer* para dar tempo para o sistema estabilizar.

O resultado obtido para um tom puro de 180 Hz está ilustrado nas figs. 6.5 e 6.7 para as condições de inserção com e sem elitismo, duto aberto e fechado.

A redução que o ruído original sofreu no duto aberto foi de 20 dB sem elitismo e 23 dB com elitismo e para o duto fechado 15 dB e 18 dB respectivamente. No duto aberto a redução de ruído foi maior pois a extremidade aberta diminui o número de reflexões possíveis, reduzindo a energia do campo acústico.

A visualização da evolução de cada variável codificada no cromossomo pode ser feita com o cálculo da distribuição dos indivíduos dentro da faixa de valores possíveis de atributos para cada geração. Uma concentração do número de indivíduos em torno de um valor do atributo mostrará neste local um pico e indicará a convergência.

As figs. 6.6 e 6.8 mostram a evolução do GA para cada atributo, com ou sem condição de elitismo na reinserção dos novos indivíduos na população, para duto aberto e fechado.

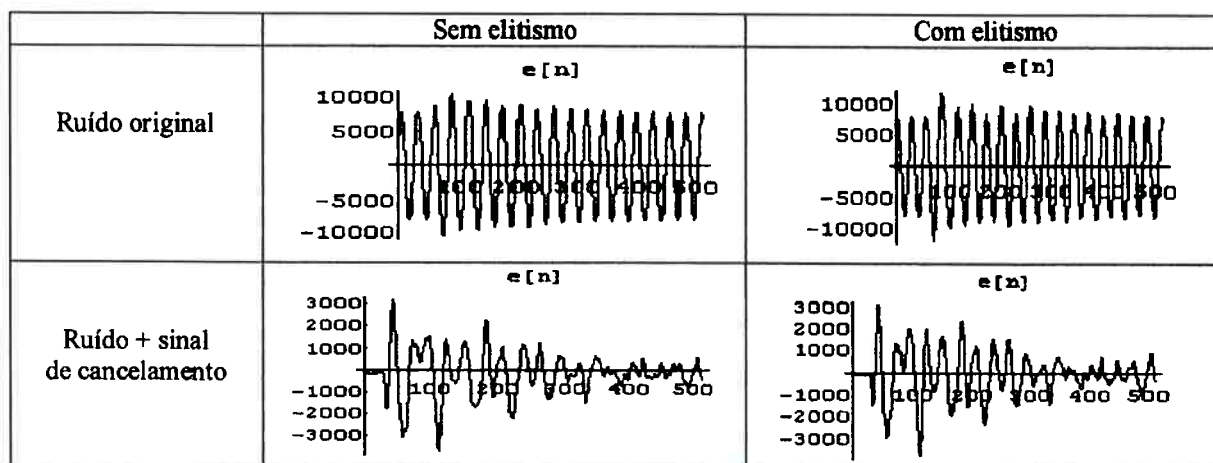


Fig. 6.5 Resultado do cancelamento de ruído no microfone de erro ( $e[n]$ ) com o duto aberto mostrando a evolução da amplitude (unidades arbitrárias).

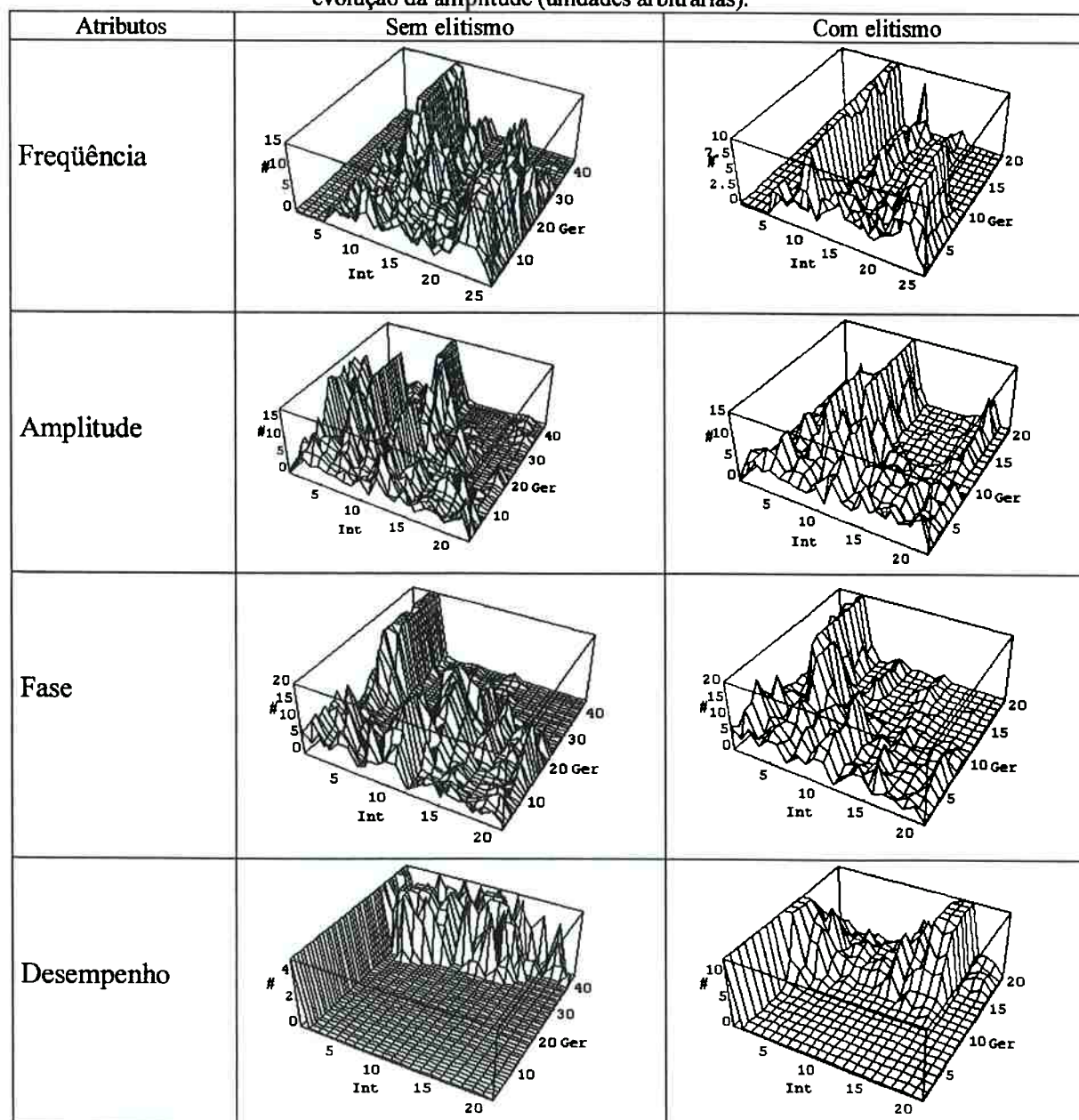


Fig. 6.6 Evolução do SGA no duto aberto, onde Int é o intervalo de valores do atributo, Ger é a geração e # o número de indivíduos.

Nas primeiras gerações, os indivíduos estão espalhados ao longo de toda a faixa de valores de atributos, e gradualmente vão se concentrando em torno dos valores que maximizam o desempenho. Pode-se observar também que há picos secundários com espaçamento constante, mas ainda há indivíduos espalhados ao longo de toda a região.

No gráfico de desempenho, pode-se ver a evolução do cancelamento pela rapidez com que os indivíduos vão a direita nos gráficos (maiores desempenhos). Esta é uma curva característica do algoritmo genético.

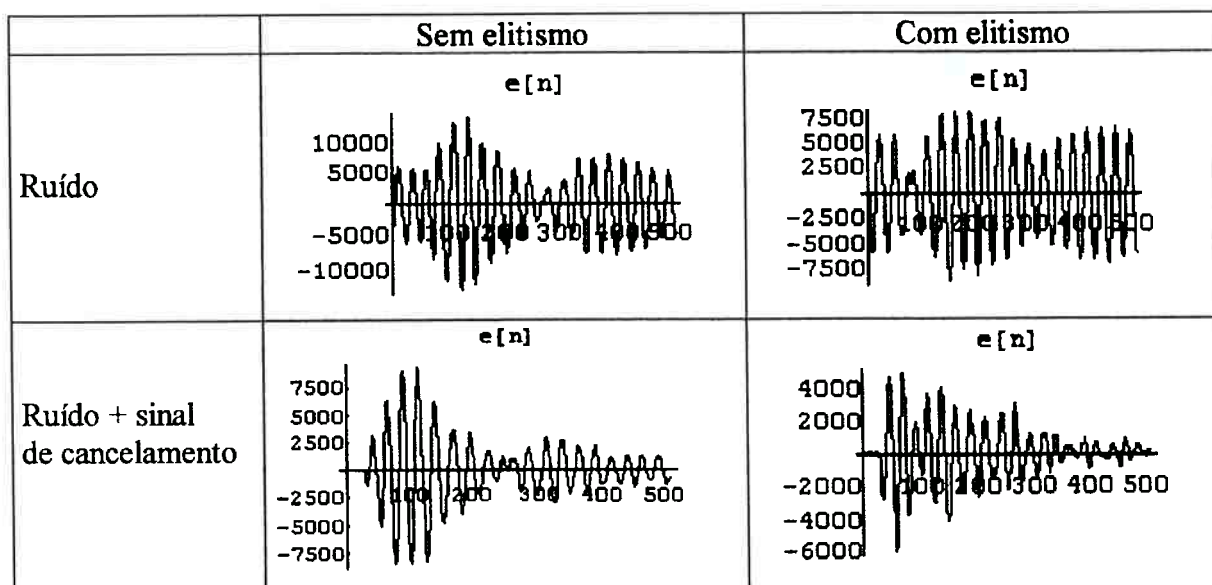


Fig. 6.7 Resultado do cancelamento de ruído no microfone de erro ( $e[n]$ ) com o duto fechado mostrando a evolução da amplitude (unidades arbitrárias).

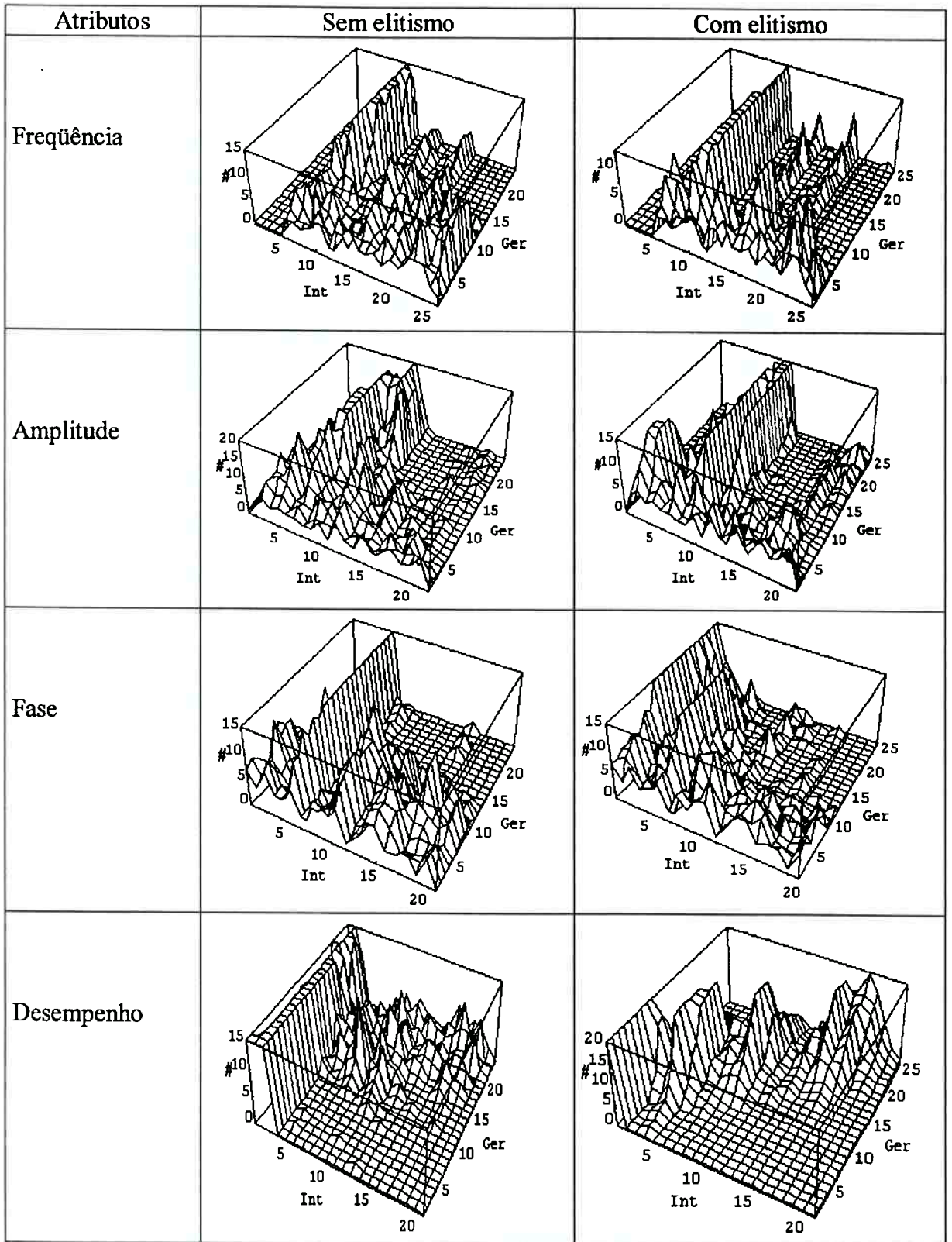


Fig. 6.8 Evolução do SGA no duto fechado, onde Int é o intervalo de valores do atributo, Ger é a geração e # o número de indivíduos.

O SGA amostra cada indivíduo separadamente, o que toma um tempo de convergência alto e ruidoso. A abordagem do SGA pode ser refinada com a introdução de níveis de pesquisa para reduzir o tamanho do espaço de soluções e aumentar a velocidade de convergência do algoritmo.

### 6.2.3 O SAGA - Successive Approach Genetic Algorithms no duto de 6 polegadas.

Esta implementação experimental visa aumentar a velocidade de convergência do SGA, priorizando inicialmente a busca de um dos atributos (nível 0), seguindo o segundo nível para refinamento. Esta abordagem leva a uma redução do espaço de soluções.

O nível 0 obtém um valor aproximado da frequência, com o desempenho obtido através da área da Transformada de Fourier do ruído. O nível 1 faz o refinamento, codificando a frequência (com limites definidos em torno da solução do nível 0), a fase e a amplitude e calculando o desempenho como a inversa da energia das leituras do microfone de erro amostrado na planta.

Nas figs. 6.9 e 6.12 pode-se verificar o efeito do algoritmo no sinal antes e depois da atuação com redução de 12 dB e 13 dB, com e sem elitismo para o duto aberto, e 15 dB e 17 dB, respectivamente, para duto fechado. A evolução do GA no nível 1 (só frequência codificada) está apresentada nas figs. 6.10 e 6.13 e o segundo nível nas figs. 6.11 e 6.14 (para duto aberto e fechado).

Como o cálculo do desempenho no nível 0 não necessita de amostragens no duto, a velocidade de convergência foi extremamente rápida. O nível 1, por ter intervalo de valores de frequência mais reduzido, também converge mais rapidamente, mas não dispensa as amostragens de cada indivíduo.



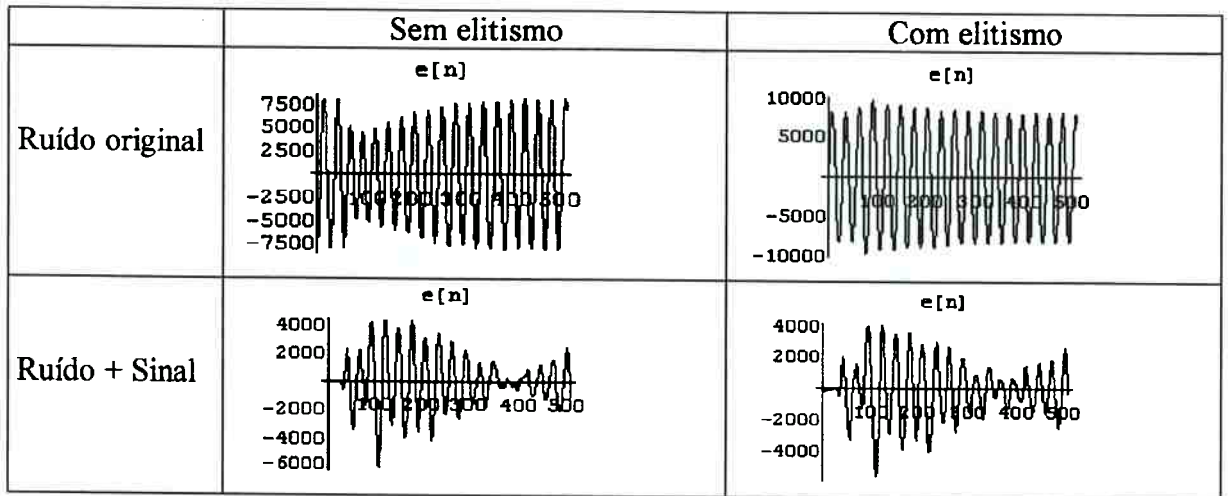


Fig. 6.9 Resultado do cancelamento de ruído no microfone de erro com o duto aberto mostrando a evolução da amplitude (unidades arbitrárias) em função da seqüência de interrupções.

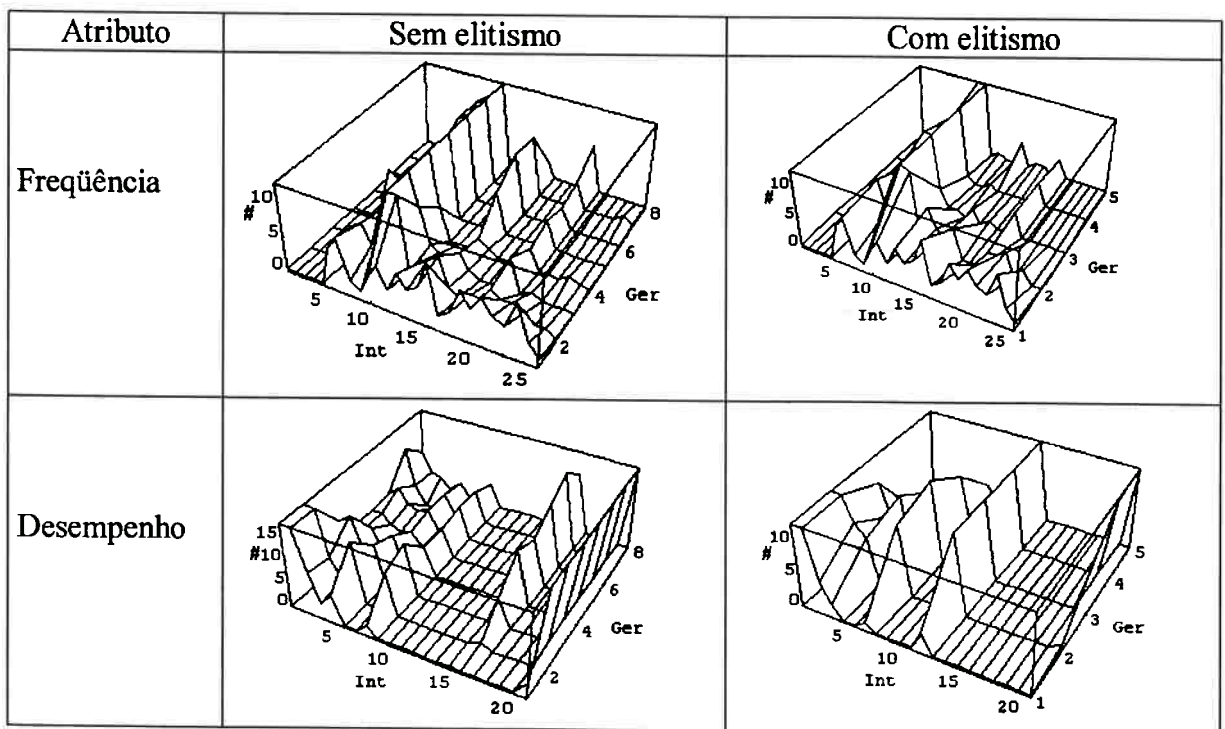


Fig. 6.10 Evolução do nível 0 do SAGA para o duto aberto, onde Int é o intervalo de valores do atributo, Ger é a geração e # o número de indivíduos.

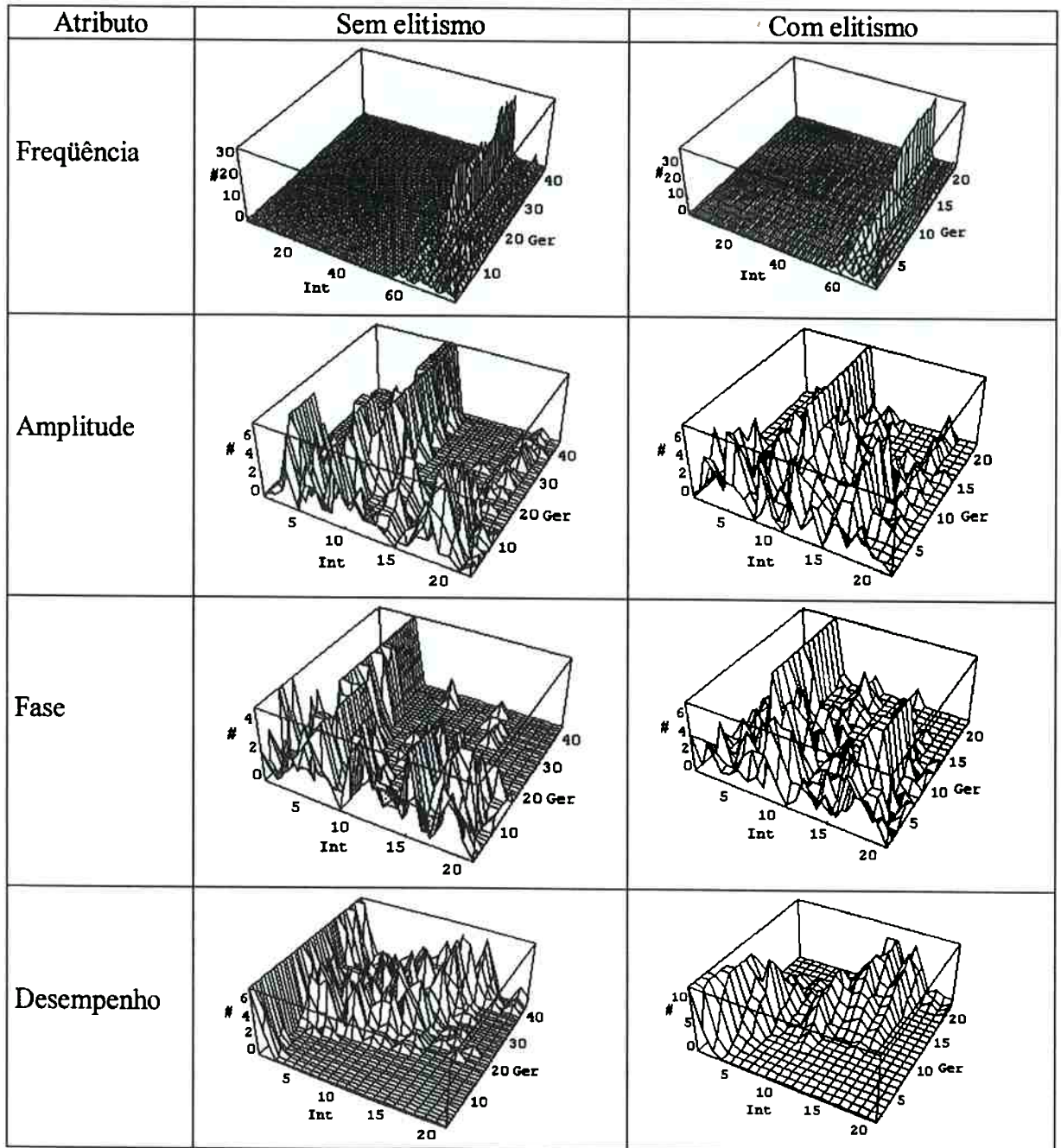


Fig. 6.11 Evolução do nível 1 do SAGA para o duto aberto, onde Int é o intervalo de valores do atributo, Ger é a geração e # o número de indivíduos.



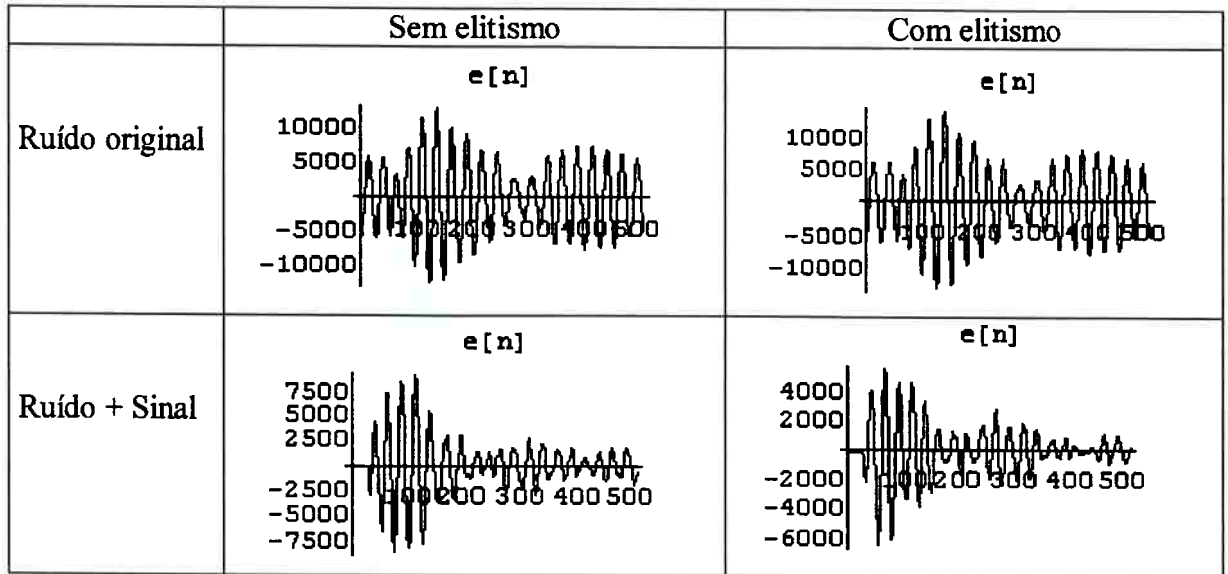


Fig. 6.12 Resultado do cancelamento de ruído no microfone de erro com o duto fechado mostrando a evolução da amplitude (unidades arbitrárias) em função da seqüência de interrupções.

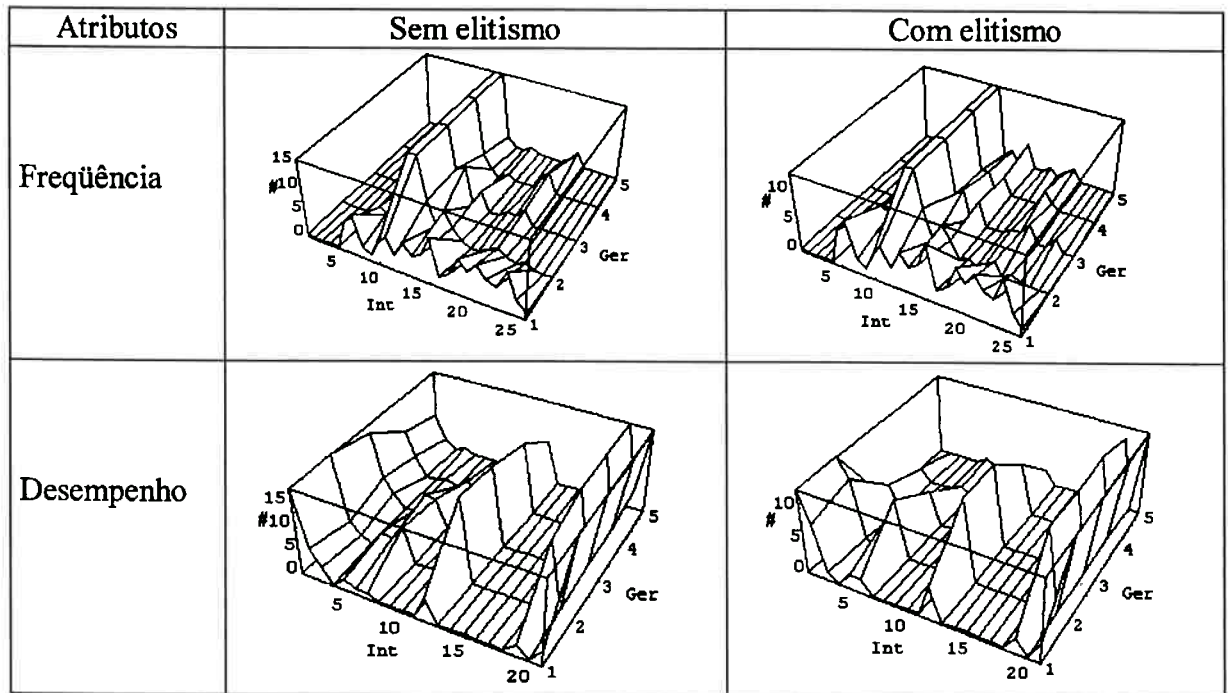


Fig. 6.13 Evolução do nível 0 do SAGA para o duto fechado, onde Int é o intervalo de valores do atributo, Ger é a geração e # o número de indivíduos.

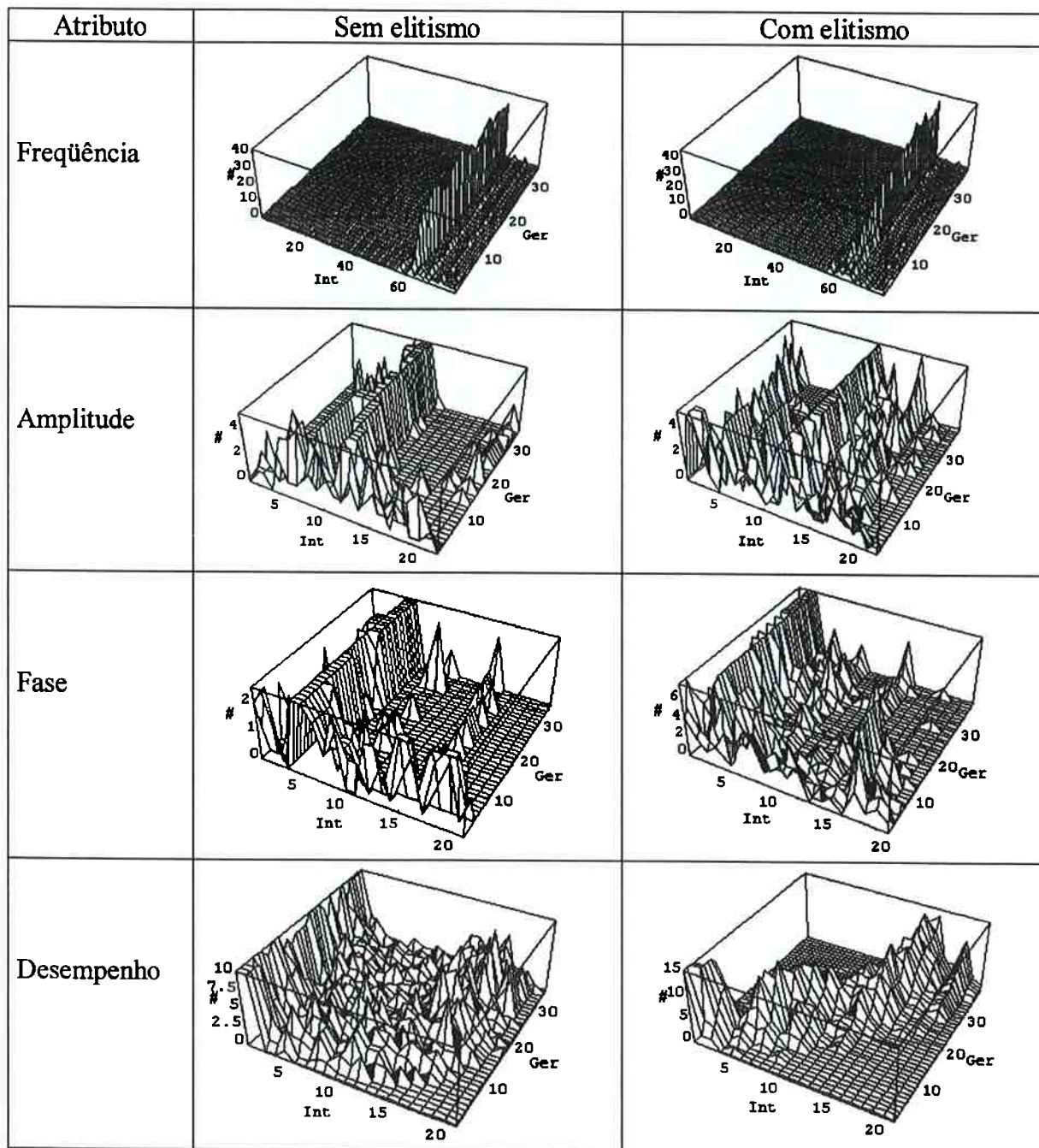


Fig. 6.14 Evolução do nível 1 do SAGA para o duto fechado, onde Int é o intervalo de valores do atributo, Ger é a geração e # o número de indivíduos.

O sistema de controle baseado na codificação do sinal de cancelamento traz alguns problemas que dificultam sua utilização em tempo real.

Considerando um sinal periódico, a utilização de um modelo de controle dependente explicitamente do tempo implica na definição de um instante inicial.

Como o sinal em questão é periódico, é possível através da convolução entre as leituras do microfone e um *buffer* de dados, estabelecer um sincronismo para atuação. É necessário que o sistema de cancelamento deixe de atuar durante um período para permitir a aquisição do ruído sem interferência externa.

Este procedimento causa variações abruptas no campo acústico, inadequado para utilização na melhoria do conforto.

No caso de um sinal variante no tempo, o estabelecimento do sincronismo é complexo, e dependerá do efeito da taxa de variação do ruído na convolução com o *buffer* usado como referência.

Outro aspecto importante é a característica do GA de não identificar a planta a *priori*, utilizando a amostragem dos indivíduos para cálculo do desempenho. Para ser viável em tempo real, cada amostragem deve ser feita em dezenas de milissegundos, para passar despercebido pelo usuário, e os casos amostrados não devem ser muito diferentes entre si para evitar variações abruptas no campo acústico após a convergência para alguma solução.

A implementação de uma solução que funcione em tempo real necessita de um modelo com uma estrutura invariante no tempo, que possa ser ajustada pelo GA com o critério de convergência descrito em 4.8 para contornar o problema das variações abruptas no campo acústico.

As abordagens anteriores utilizavam os atributos frequência, fase e amplitude do um sinal. Para ser uma estrutura invariante no tempo, é necessário escrever o modelo de controle como uma equação de diferenças, contendo invariantes associados a cada um dos atributos.

A amplitude está relacionada a um ganho dependente das características dos amplificadores ligados às saídas dos DACs e dos microfones.

O invariante relacionado a frequência, conforme as equações (3.5) e (3.6), pode ser o histórico das leituras do microfone antecipativo, de uma medida não acústica ou do próprio buffer de ruído utilizado. A fase está relacionada com seu atraso.

#### 6.2.4 Abordagem de atraso/ganho.

Esta abordagem parte de um modelo de cancelamento do sinal em que o GA busca otimizar os parâmetros do modelo, no caso atraso e ganho.

O estudo de viabilidade partiu da excitação do sistema com tons puros, e o GA pesquisa valores de atraso e ganho que reduzem o erro entre os valores lido e estimado com atraso e ganho da excitação, dado por:

$$\hat{E}[n] = G_e R[n - \tau] \quad (6.1)$$

onde  $G_e$  e  $\tau$  representam os parâmetros ganho e atraso = intervalo/frequência de amostragem codificadas no cromossomo e  $R$  é o ruído enviado para o alto-falante principal. Neste item estaremos considerando o ruído conhecido, e sua obtenção pelo microfone antecipativo será tratada no capítulo 7.

O algoritmo de controle gera as saídas baseadas em um valor fixo de atraso e ganho durante um intervalo de tempo, armazenando o valor lido pelo microfone de erro.

O desempenho é calculado a partir da energia das leituras do microfone de erro e um novo indivíduo é amostrado.

Para verificar a acurácia do modelo utilizado, foram geradas saídas em várias frequências com aquisição do sinal do microfone de erro. O GA pesquisou valores de atraso e ganho para estimar o valor lido no microfone de erro através da eq. 6.1. O desempenho foi calculado a partir dos mínimos quadrados entre o valor lido no microfone e o calculado. Foi utilizada apenas a segunda metade do *buffer* para descartar efeitos transitórios.

Na figura 6.15 estão os resultados do ajuste para 120 Hz, 150Hz, 300Hz e 500 Hz. O gráfico “x” representa o valor lido no microfone antecipativo, “y” é a saída do alto-falante, “e” a leitura do microfone de erro, “ê” é a previsão do valor usando o modelo de atraso e ganho. Para os valores lidos e estimados do microfone de erro são apresentadas as sobreposições e a diferença.

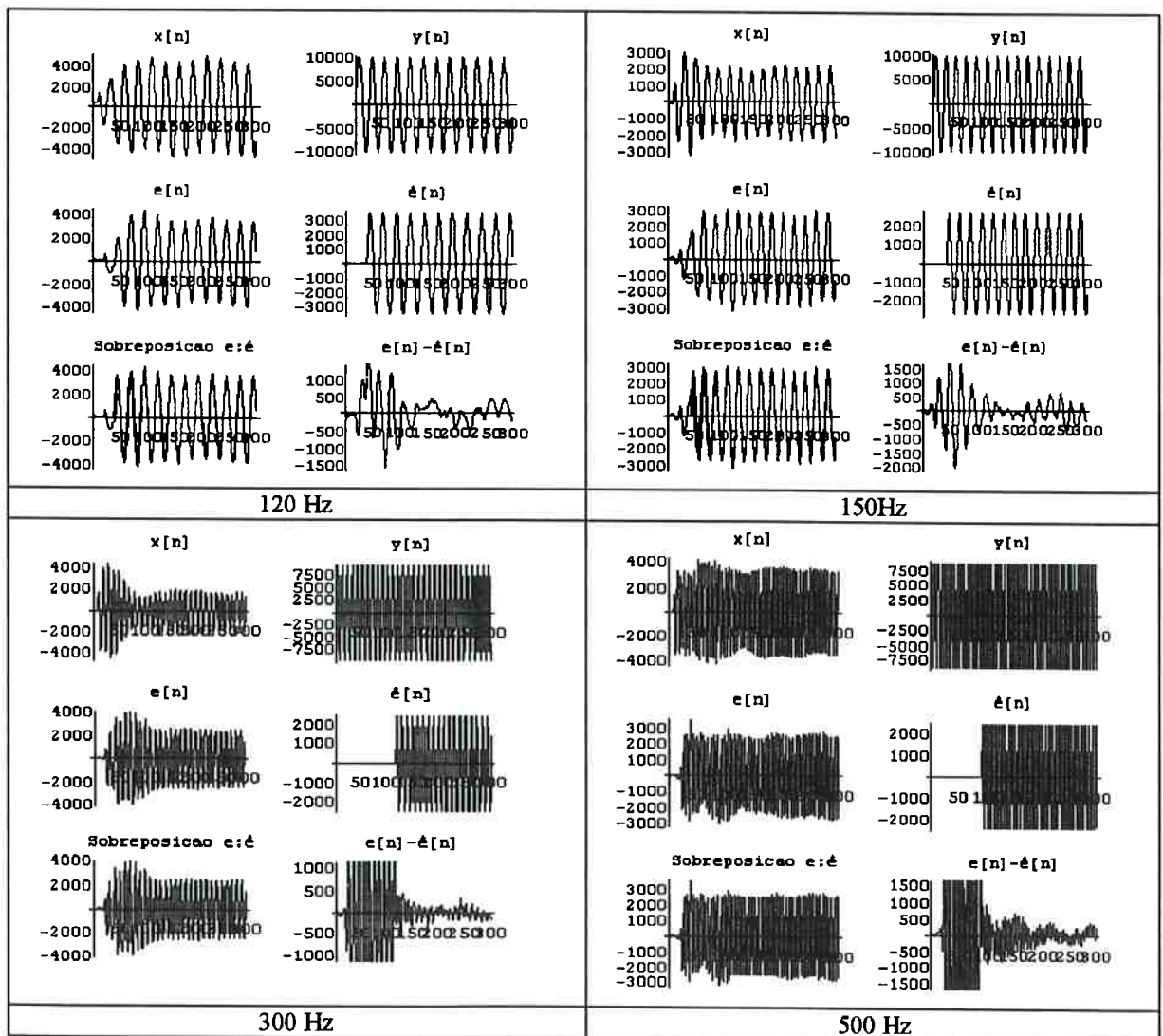


Fig. 6.15: Ajuste do modelo de atraso e ganho para o microfone de erro mostrando a evolução da amplitude (unidades arbitrárias) em função da seqüência de interrupções.

As fig. 6.16 e 6.17 apresentam o resultado do cancelamento de 21 dB para duto aberto e 26 dB para duto fechado de um tom puro de 180 Hz e a evolução do GA com uma população de 20 indivíduos. Pode-se verificar a rápida convergência do GA, e a



convergência dos indivíduos para valores únicos de atraso e ganho.

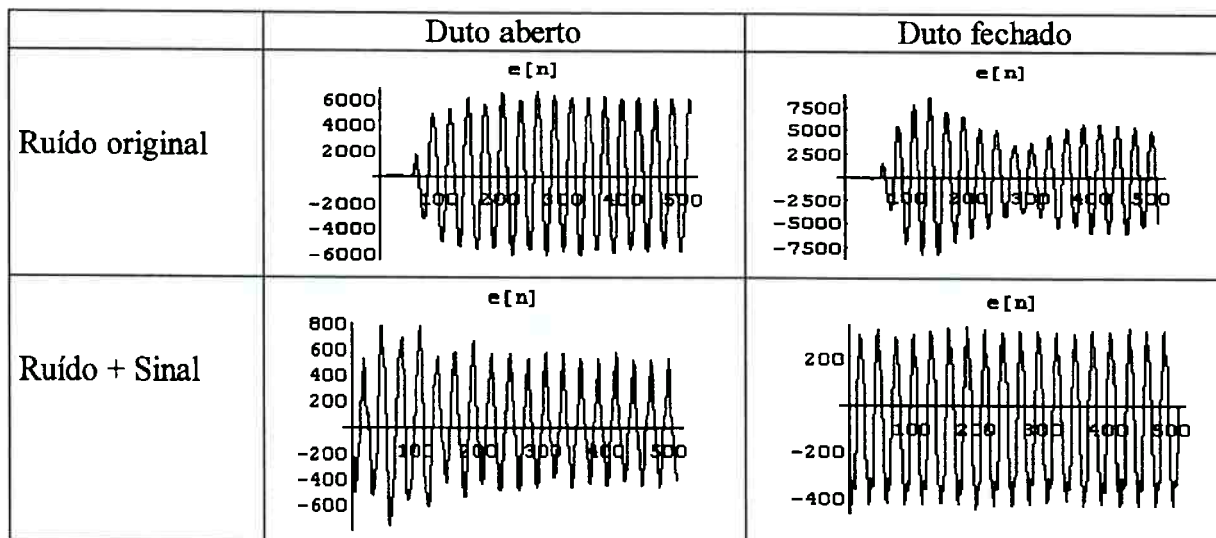


Fig. 6.15 Resultado do cancelamento de ruído no microfone de erro mostrando a evolução da amplitude (unidades arbitrárias) em função da seqüência de interrupções.

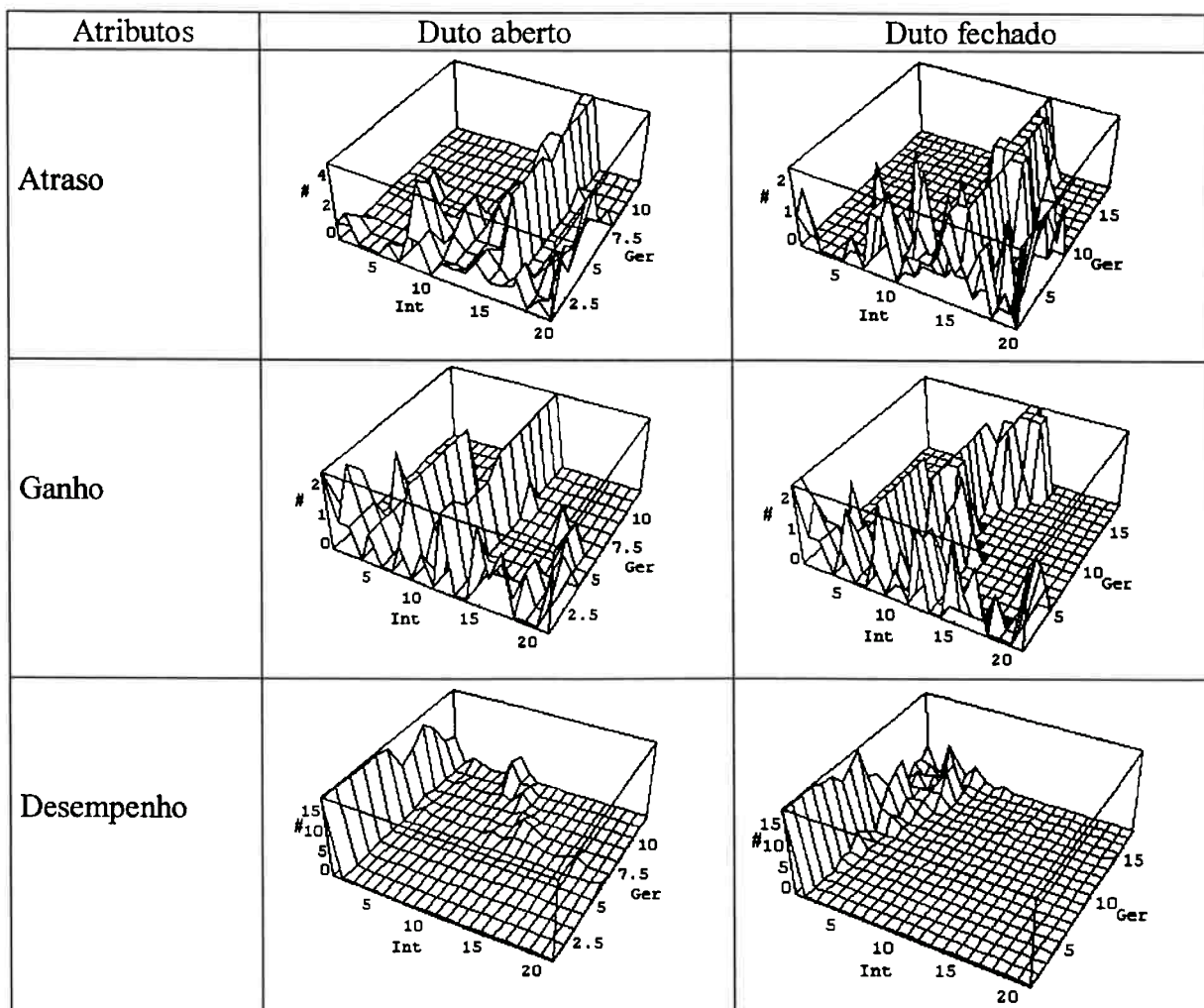


Fig. 6.17 Evolução do GA usando modelo de atraso/ganho para o duto aberto e fechado, onde Int é o intervalo de valores do atributo, Ger é a geração e # o número de indivíduos.

O gráfico do desempenho em função das variáveis de atraso e ganho ao longo de todo o processamento pode ser visto na fig. 6.18, mostrando a concentração dos indivíduos em torno dos valores de convergência. O duto fechado apresentou um alargamento dos picos pois o maior número de reflexões aumenta sua energia acústica tornando o sistema mais sensível ao sinal de atuação.

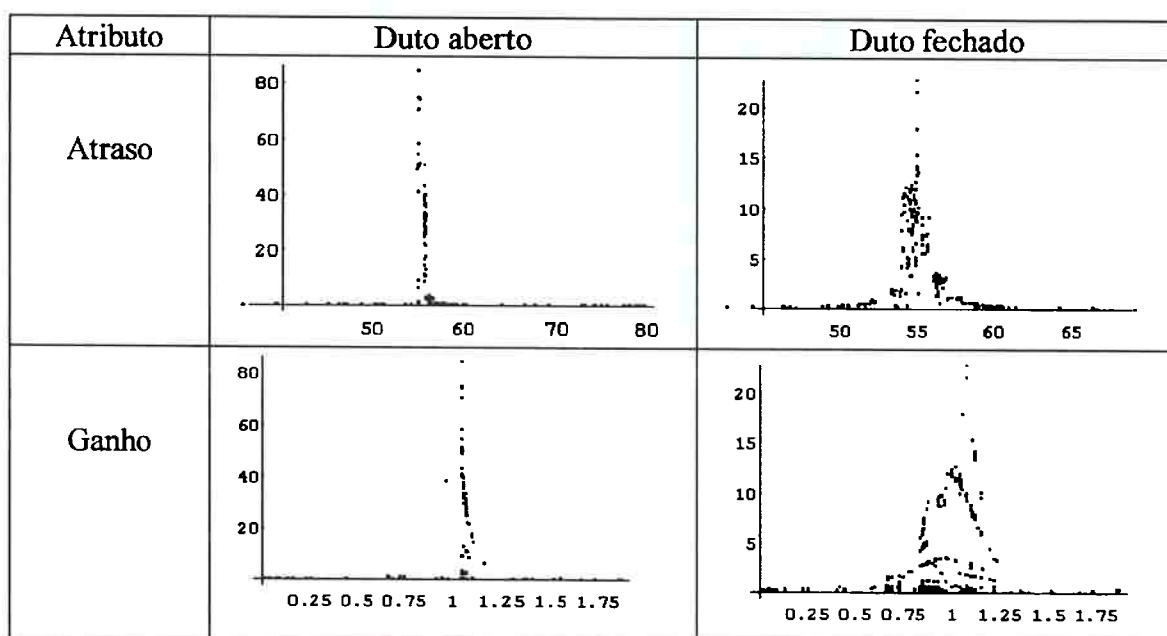


Fig. 6.18: Função de desempenho para todos os indivíduos calculados.

O desempenho do algoritmo genético cancelando tom puro na faixa de frequências de interesse está apresentado na fig. 6.19. Este gráfico foi obtido varrendo cada frequência de 1 em 1 Hz entre 100 Hz e 500 Hz e mostra a redução em dB.

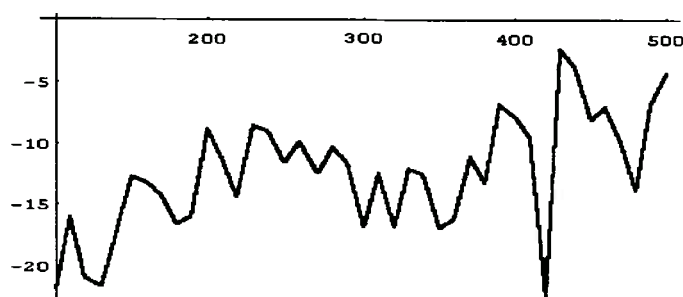


Fig. 6.19: Redução (em dB) pelo algoritmo genético em função da frequência (Hz).

Observa-se que a redução ocorre em todas as frequências.

Para tratar o cancelamento de 3 frequências (100 Hz, 150 Hz e 300Hz), foram

feitas medidas com o duto aberto e fechado, e usado ou não o critério de convergência. O resultado está apresentado na fig. 6.20 e mostra uma redução de 10 dB sem condição de convergência (item 4.8) e de 7 dB com condição de convergência para duto aberto e 12 dB e 5 dB para duto fechado, respectivamente.

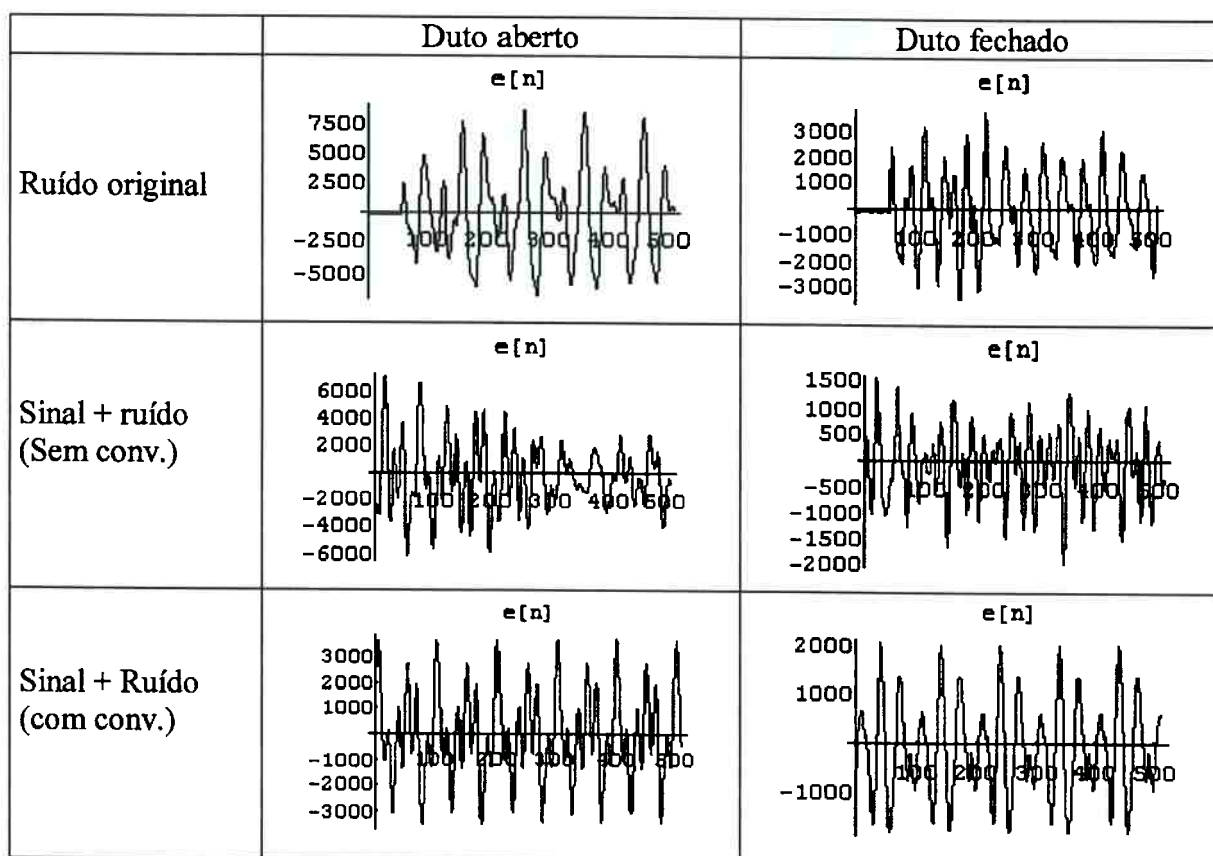


Fig. 6.20 Resultado do cancelamento de ruído no microfone de erro mostrando a evolução da amplitude (unidades arbitrárias) em função da seqüência de interrupções.

Para um sinal de frequência variável (170Hz a 190Hz em 0.25 s), o algoritmo genético usando o modelo de atraso e ganho apresentou o resultado da fig. 6.21, mostrando bom desempenho com redução de 6 dB para duto aberto e 10 dB para duto fechado.



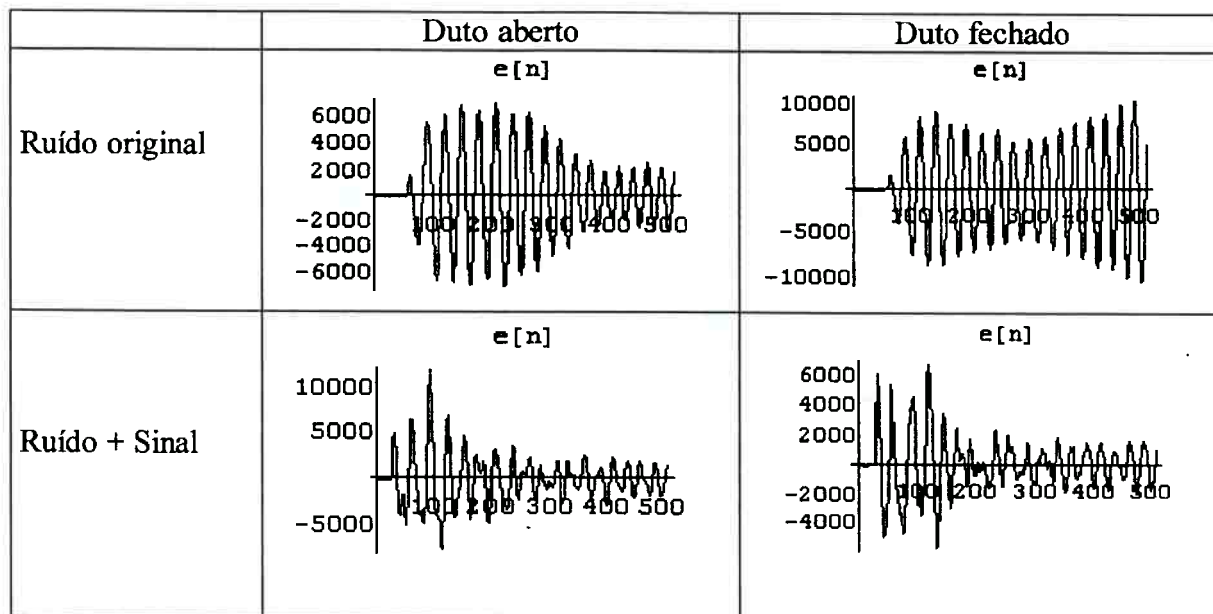


Fig. 6.21 Resultado do cancelamento de ruído no microfone de erro mostrando a evolução da amplitude (unidades arbitrárias) em função da seqüência de interrupções.

O desempenho do algoritmo para um ruído com freqüências que variam de 100 Hz a 150 Hz em 0.25 s está na figura 6.22.

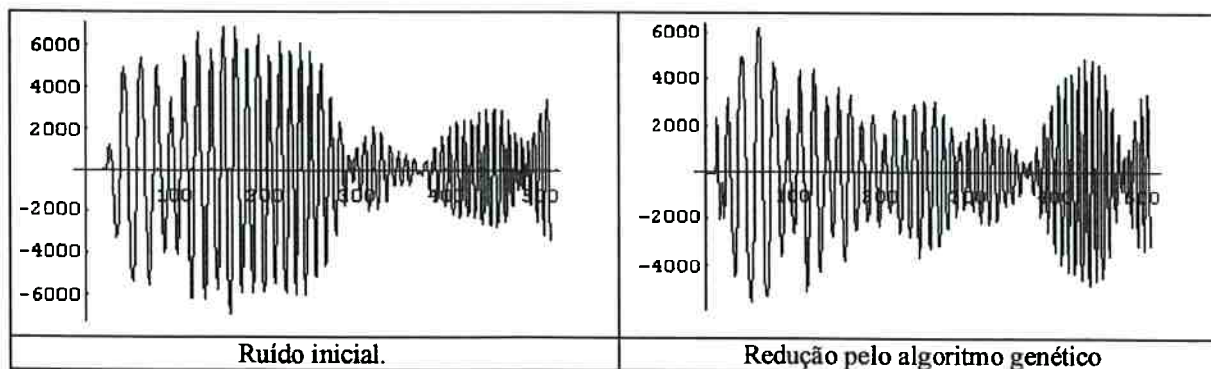


Fig. 6.22: Redução do ruído com o algoritmo genético mostrando a evolução da amplitude (unidades arbitrárias) em função da seqüência de interrupções.

Houve redução com o algoritmo genético de 1.54 dB.

Nas diferentes tentativas, o sinal antecipativo foi obtido do *buffer* de saída do AFP, conforme descrito por Bai (1998). Na abordagem de atraso/ganho a obtenção do ruído pelo microfone antecipativo é comprometida pelo efeito de realimentação acústica, que será tratado no próximo capítulo.

## Capítulo 7

### **Estudo da realimentação acústica e seu tratamento.**

No capítulo 6, o modelo de atraso/ganho utilizou o conhecimento do *buffer* de ruído, e não sua leitura efetiva através do microfone antecipativo, para evitar o efeito da realimentação acústica.

Neste capítulo trataremos deste problema por duas diferentes abordagens: utilizando materiais acústicos e configurações do duto que diminuam esse efeito, ou por uma função de transferência, que permita subtrair da leitura do microfone o sinal gerado pelo alto-falante de controle.

#### **7.1 A instabilidade causada no duto cilíndrico de 6" com junção.**

A leitura do microfone antecipativo, colocado entre o alto-falante principal e o secundário, contém o ruído somado ao sinal de atuação fazendo com que o sistema de controle atue para cancelar sua própria atuação.

Considerando o atraso envolvido no percurso entre o alto-falante secundário e o microfone, haverá uma realimentação positiva que fará o módulo do sinal de atuação crescer indefinidamente. Este efeito é comumente chamado de *microfonia* (fig.7.1).

O tamanho da palavra do DAC de 16 *bits* limita o valor da atuação, pois se for maior que 32768 (limite positivo) ou menor que -32768 (limite negativo), o valor será formado pelos 15 *bits* de dados, sem levar em conta os outros *bits* da palavra do DSP (de 32 *bits*). Por exemplo, 78560 em representação binária é 10011001011100000. Tomando-se os 15 *bits* à direita: 011001011100000 que representa +13027. A saída 78560 será convertida pelo DAC como 13027.

Outro caso mais crítico é 111328, cuja representação binária é 11011001011100000 e tem o bit 16 setado, indicando número negativo igual a -13027. A saída 111328 será convertida pelo DAC como -13027.

Este efeito de limitação do número de bits causa ainda uma incongruência no sistema, pois a leitura do microfone (truncada) estará associada a valores não truncados. A consequência disto é que os parâmetros do programa utilizado não terão relação com as medidas efetuadas.

Para contornar este problema, as variáveis do GA serão re-inicializadas a cada nova amostragem para obtenção da função de desempenho. As condições que levarem à instabilidade terão uma energia acústica muito grande, pois há uma oscilação muito rápida entre amplitudes positivas e negativas, com desempenho muito pequenos. Estes indivíduos não sobreviverão.

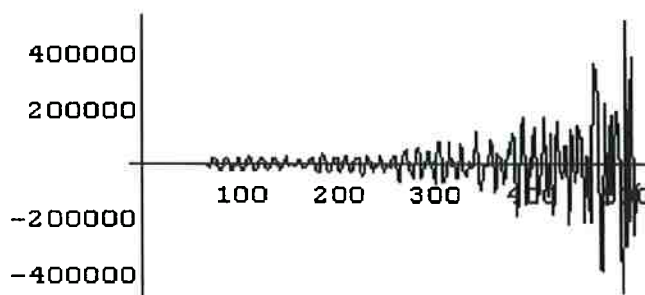


Fig. 7.1: Instabilidade na amplitude (unidades arbitrárias) do sinal de atuação decorrente da realimentação acústica em função da seqüência de interrupções.

## **7.2 GA em malha fechada no duto cilíndrico de 6" com junção.**

Na fig. 5.6 pode-se observar que entre 100Hz e 600Hz há 12 modos de vibração. A influência de cada um desses modos está relacionada com o material (associado aos parâmetros E e G) e espessura utilizados na construção do duto, com a fixação no suporte, se há enrijecedores nas paredes, etc.

A forma de colocação dos alto-falantes no duto e a utilização de caixas de som também afetam a transferência de energia para o sistema e a excitação dos modos.

A realimentação acústica será o resultado de todas as excitações geradas no sistema a partir da atuação, que não pode ser separada do ruído que se deseja cancelar.

Nestas condições o GA não conseguiu convergir (fig. 7.2), instabilizando o sistema. Foi utilizado o critério de convergência do GA (item 4.8), concentrando os indivíduos após a quinta geração em torno de 10% do valor do melhor indivíduo.

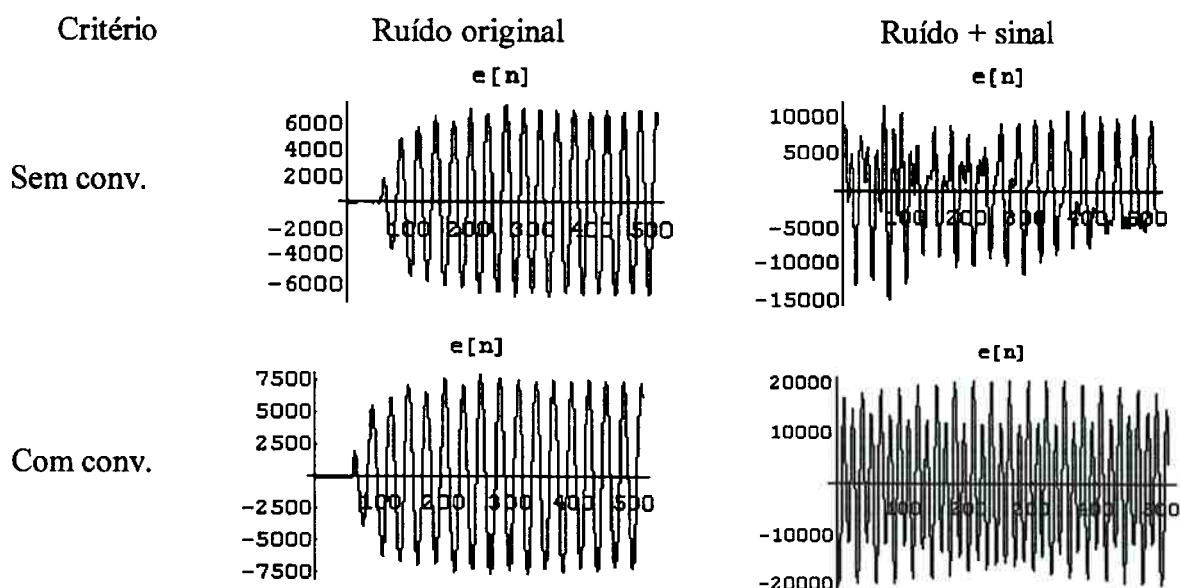


Fig. 7.2 Instabilidade do sistema utilizando o duto cilíndrico, sem caixa de som e sem confinamento do microfone.

### **7.3 Subtraindo a realimentação acústica no duto cilíndrico de 6" com junção.**

Conhecendo a função de transferência entre o alto-falante secundário e o microfone antecipativo, é possível subtrair o sinal de atuação minimizando o efeito da realimentação acústica.

Pode-se utilizar três diferentes realizações da função de transferência: a teórica, pela utilização de um filtro FIR ou mediante a composição dos modos do sistema.

### 7.3.1 Função de transferência teórica.

O modelo teórico da função de transferência descrito na fórmula 3.27, generalização da tabela 3.1, é função das impedâncias acústicas das extremidades  $Z_0(s)$  e  $Z_1(s)$ . Estas funções não são triviais e tem um comportamento dependente da frequência, levando a desvios na amplitude das componentes do sinal (fig. 7.3).

Outro problema do modelo é a ausência da dinâmica do alto-falante. A resposta ao impulso do modelo comparado com medidas experimentais está apresentado na fig. 7.4.

No resultado do modelo, o impulso aparece sem o movimento oscilatório introduzido pelo alto-falante.

Para introduzir a dinâmica do alto-falante, utiliza-se filtros FIR.

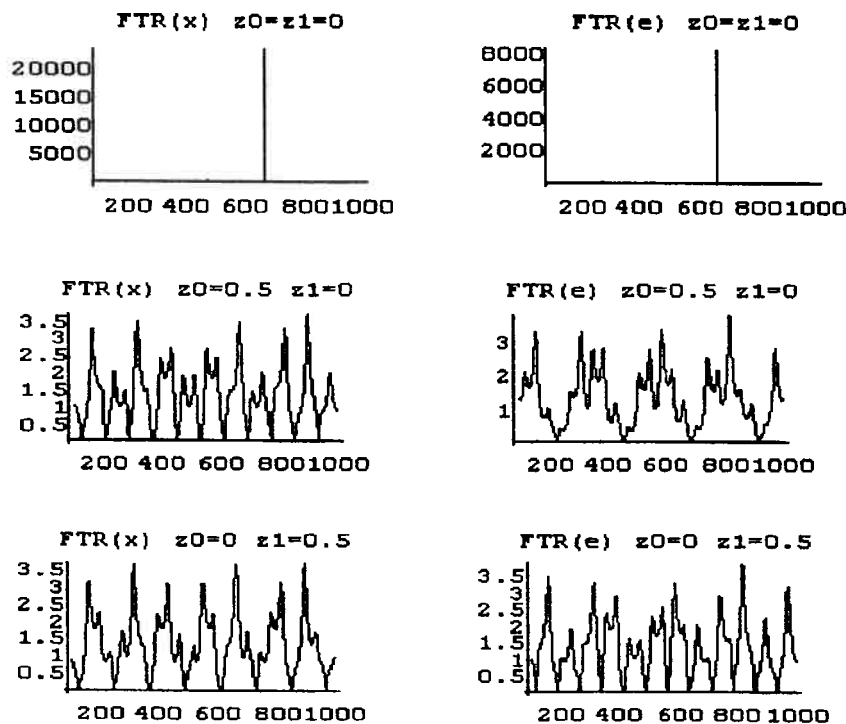


Fig. 7.3 Influência da impedância das extremidades sobre a função de transferência entre o alto-falante secundário e microfones antecipativo (x) e de erro (e) calculadas pela equação (3.27) em função da frequência (Hz).

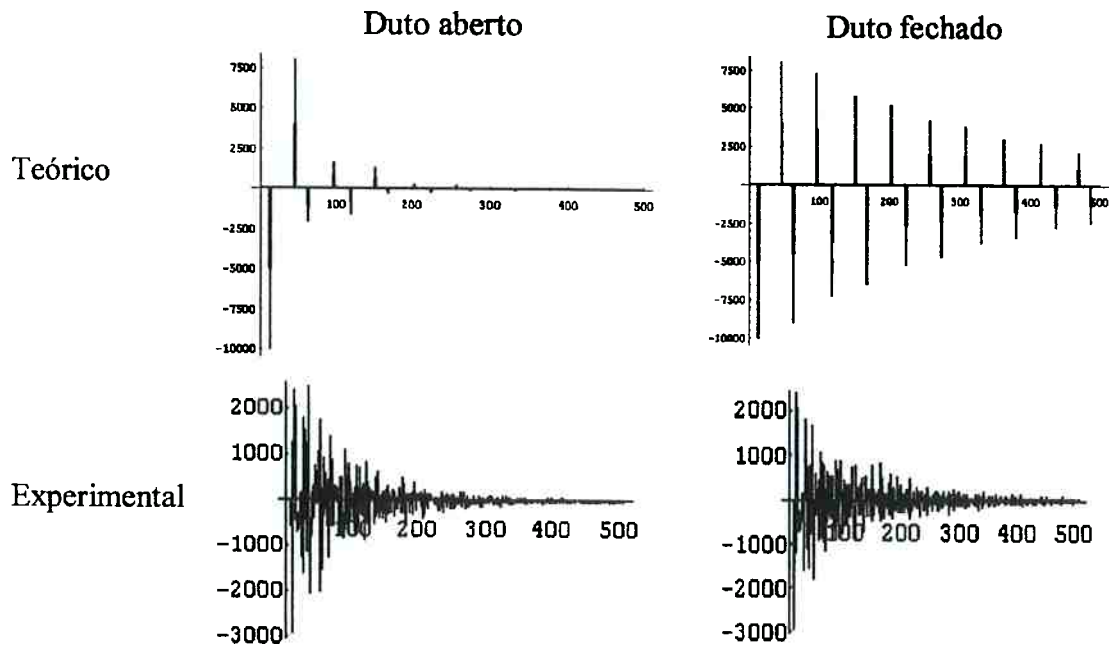


Fig. 7.4 Comparação da resposta impulsiva no domínio do tempo obtida pela função de transferência com  $Z_0=0.8$  e  $Z_1=0.2$  (duto aberto) e  $Z_0=0.8$  e  $Z_1=0.9$  (duto fechado) com o valor experimental.

### 7.3.2 Função de transferência utilizando um FIR.

Ma (1996) utilizou o GA para obtenção dos coeficientes da função de transferência de sétima ordem. Foram necessárias 200.000 gerações com 400 indivíduos. Para uma função de 100ª ordem não obteve convergência em 4 horas de processamento com 2000 indivíduos e 4000 gerações.

Para contornar este problema, foi utilizado o procedimento do algoritmo adaptativo descrito no item 2.3, eqs. 2.4 e 2.5.

### 7.3.3 Função de transferência utilizando análise modal.

Para utilizar o modelo de análise modal, é necessário obter os parâmetros  $rA_{jk}$ ,  $\omega_r$ ,  $\eta_r$ ,  $K_{jk}$  e  $M^r_{jk}$  para a região de frequências de interesse.

A contribuição das frequências que estão fora deste intervalo não afetam significativamente o sinal. Foi tomado o sinal original, calculada a FFT e feita a

filtragem com um passa faixa entre 100Hz a 600Hz. A transformada inversa reproduziu o sinal (fig. 7.6).

As frequências  $\omega_r$  podem ser obtidas a partir da interseção do gráfico com o eixo das abcissas da parte real da FFT da resposta impulsiva (Tab.5.4). Os outros parâmetros modais podem ser obtidos pelo GA, mostrado na fig. 7.5 onde estão presentes os valores obtidos pelo modelo, os dados originais e a sobreposição no domínio de frequência.

Tomando a transformada de Fourier inversa do resultado do modelo, obtém-se os coeficientes do filtro FIR, que sintetizam a função de transferência entre o alto-falante secundário e o microfone antecipativo (Fig. 7.6). Optou-se pela função de transferência obtida pelo algoritmo adaptativo, pela facilidade de obtenção em qualquer configuração.

As respostas impulsivas foram divididas pelo máximo valor da amostragem para efeito de comparação.

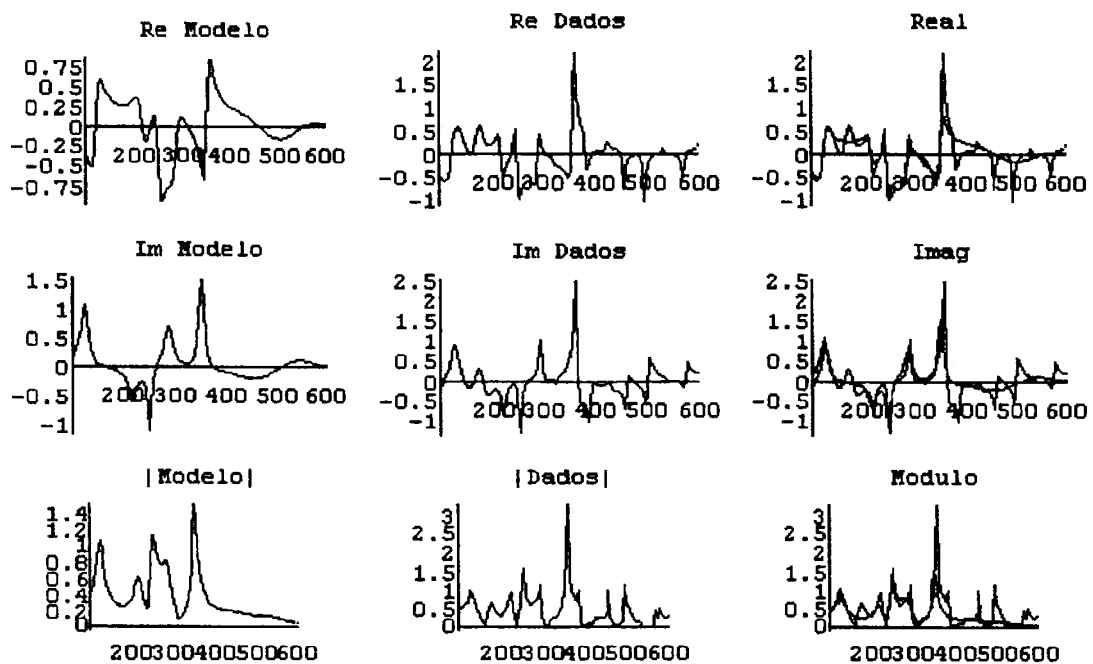


Fig. 7.5 Construção da função de transferência pelos parâmetros modais utilizando o GA como algoritmo de ajuste em função da frequência (Hz).

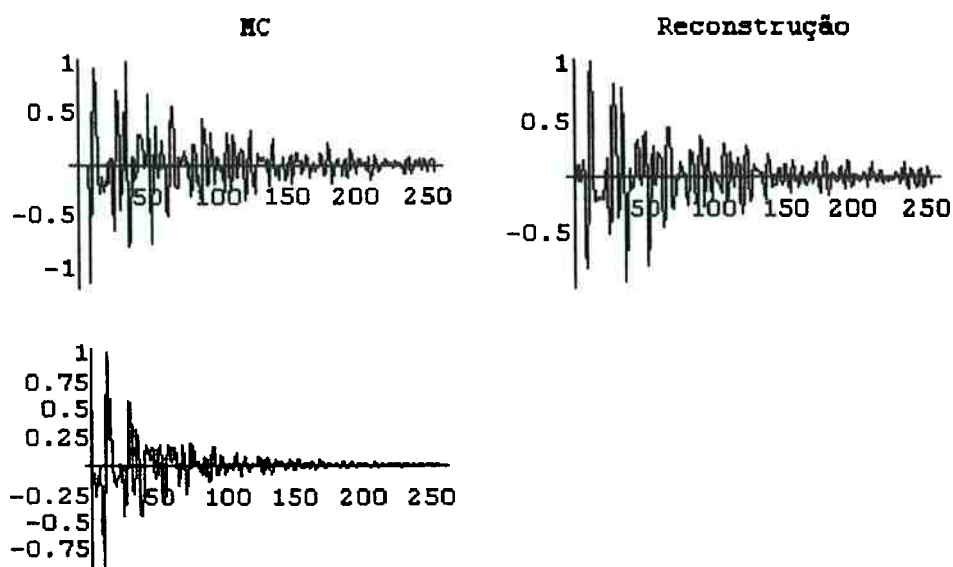


Fig. 7.6 Resposta impulsiva experimental (MC) no domínio do tempo, reconstruída a partir do janelamento entre 100Hz e 600 Hz e obtida pelo ajuste do GA.

### 7.3.4 Resultados experimentais no duto cilíndrico de 6" com junção utilizando o FIR para eliminar a realimentação acústica.

O algoritmo de atraso e ganho do GA realiza as etapas descritas em 6.2.4, com o sinal do microfone antecipativo subtraído de  $D[n]*Y[n-i]$  para eliminar a realimentação acústica.

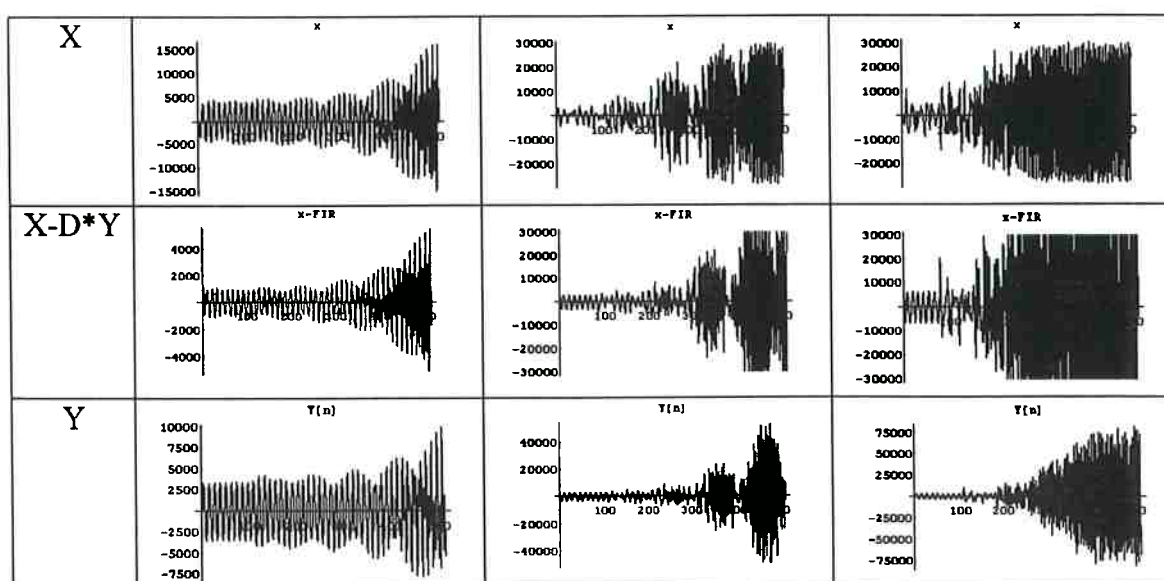


Fig. 7.7 Efeito da subtração do sinal na leitura do microfone antecipativo no domínio do tempo para vários tipos de resultados.



Na fig. 7.7 pode-se ver o efeito da realimentação, devido ao resíduo existente entre o valor calculado e o medido, para três perfis diferentes de indivíduos obtidos na população.

O GA não possui mecanismos para eliminar o resíduo a cada ciclo de interrupção, e este valor vai se acumulando e amplificando. O limite de estabilidade é função da amplitude do sinal e do tamanho do duto (distância percorrida).

Pode-se verificar que o sistema se mantém estável durante um intervalo de tempo onde pode ser feita a amostragem e o cálculo do desempenho.

As alterações executadas nas caixas dos alto-falantes do duto retangular foram feitas para aumentar o tempo, até ocorrer a instabilidade.

#### **7.4 Utilizando o duto retangular.**

O duto utilizado é de madeira rígida (2 cm de espessura), presa na estrutura de apoio dos dutos e com uma caixa de som confinando os alto-falantes com revestimento de Sonex.

Esta construção apresenta os modos de vibração atenuados em relação aos dos dutos cilíndricos, como pode ser vista nas funções de transferência da fig. 5.7.

A montagem convencional utiliza o microfone instalado no duto entre o alto-falante principal e o secundário. Outra possibilidade é colocar o microfone dentro da caixa de som do alto-falante principal, que denominaremos de “microfone confinado”.

A fig. 7.8 apresenta os ruídos iniciais e finais e a evolução do GA para as duas configurações, com um ruído de tom puro de 130 Hz. A amplitude do ruído não influencia o resultado obtido.

O tratamento das caixas de som e a colocação do microfone antecipativo confinado, reduziu a intensidade do sinal e aumentou o tempo que o sistema leva para

instabilizar, permitindo que o GA amostra cada indivíduo para encontrar valores de atraso e ganho que cancelem o ruído e mantenha o sistema estável.

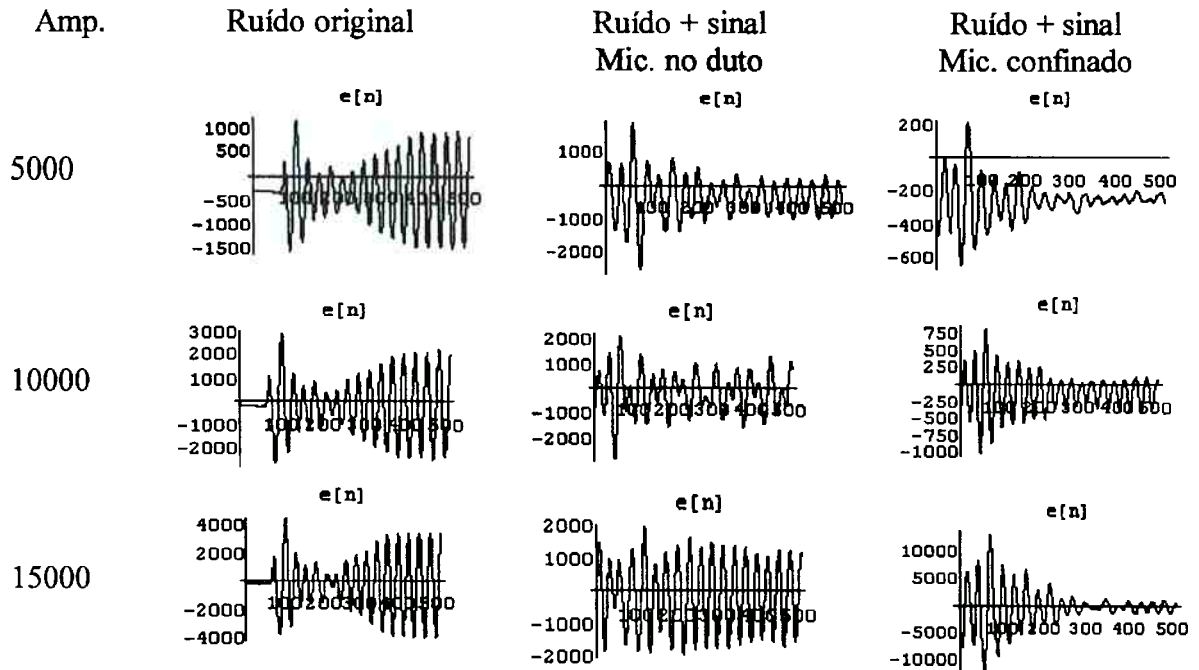


Fig. 7.8 Desempenho do sistema de controle no domínio do tempo baseado no posicionamento do microfone.

Fica evidente que o microfone confinado trás vantagens para o sistema de cancelamento, por não ter a leitura do microfone contaminada com o sinal. O nível DC encontrado em alguns gráficos são visíveis devido a pequena amplitude do sinal, e provavelmente são gerados pelo amplificador operacional utilizado nos amplificadores e nos filtros *anti-aliasing*.

Os resíduos do cancelamento para ruídos de 130 Hz mais complexos, podem ser vistos na fig. 7.9, onde foi utilizado o microfone confinado.

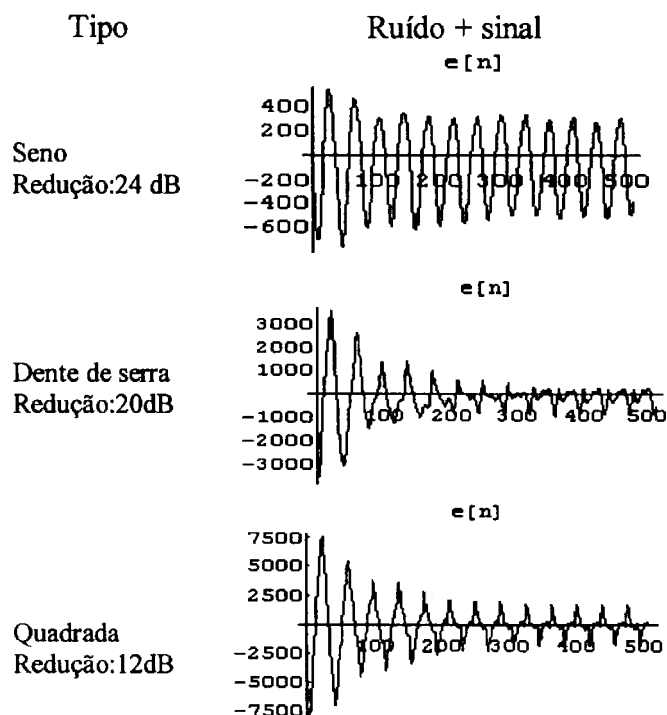


Fig. 7.9 Resultados obtidos no domínio do tempo com diferentes ruídos produzidos pelo gerador de funções.

### 7.5 Eliminando a realimentação acústica no duto retangular.

O programa descrito no item 7.3.4, foi utilizado no duto retangular para verificação da convergência. A fig 7.10 apresenta o resultado do cancelamento acústico, mostrando que houve uma redução sonora. O sistema de controle apresentou-se oscilante, não chegando, porém a se instabilizar.

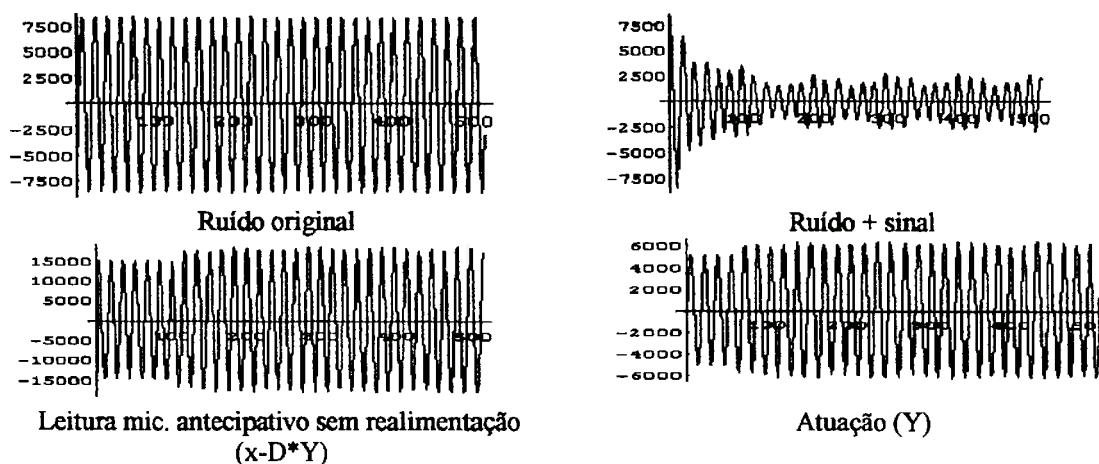


Fig. 7.10 Resultado da eliminação da realimentação acústica no duto retangular no domínio do tempo.

## Capítulo 8

### **Obtenção de modelos de controle pela Programação Genética.**

Nos capítulos 6 e 7 foi desenvolvido o algoritmo genético em tempo real com uma estrutura fixa de controle baseada na obtenção do sinal de cancelamento (SGA/SAGA) ou dos parâmetros do operador atraso/ganho das leituras do microfone antecipativo.

Neste capítulo, utiliza-se a programação genética para obter estruturas de controle sem imposição de modelos definidos *a priori*, utilizando um conjunto de funções e terminais pré definidos para sua construção. São estudadas a influência das funções e terminais disponíveis na simplicidade do modelo de controle e a integração junto com o sistema em tempo real utilizando-se um ruído monocromático de 115 Hz no duto retangular aberto.

#### **8.1 Montagem experimental.**

A planta utilizada (fig. 8.1) para obtenção do modelo de controle pelo GP foi o duto retangular aberto por reduzir os efeitos da realimentação acústica, excitado com uma frequência de 115 Hz que coincide com o modo aparentemente dominante medido com o microfone de erro (fig. 5.7: duto aberto com excitação pelo alto-falante secundário).

Foi executado primeiramente o programa de identificação usado no controle adaptativo para obtenção dos coeficientes dos caminhos  $C[n]$  (alto-falante secundário até microfone de erro) e  $D[n]$  (alto-falante secundário até microfone antecipativo) utilizando o alto-falante secundário como fonte conforme descrito na seção 2.3,

equações 2.4 a 2.9, e de modo análogo utilizando o alto-falante principal como fonte, e chamando respectivamente de  $Q[n]$  (alto-falante principal até microfone de erro) e  $S[n]$  (alto-falante principal até microfone antecipativo). A excitação utilizada foi um ruído aleatório cuja amplitude varia entre  $-10000$  e  $10000$  (unidades arbitrárias).

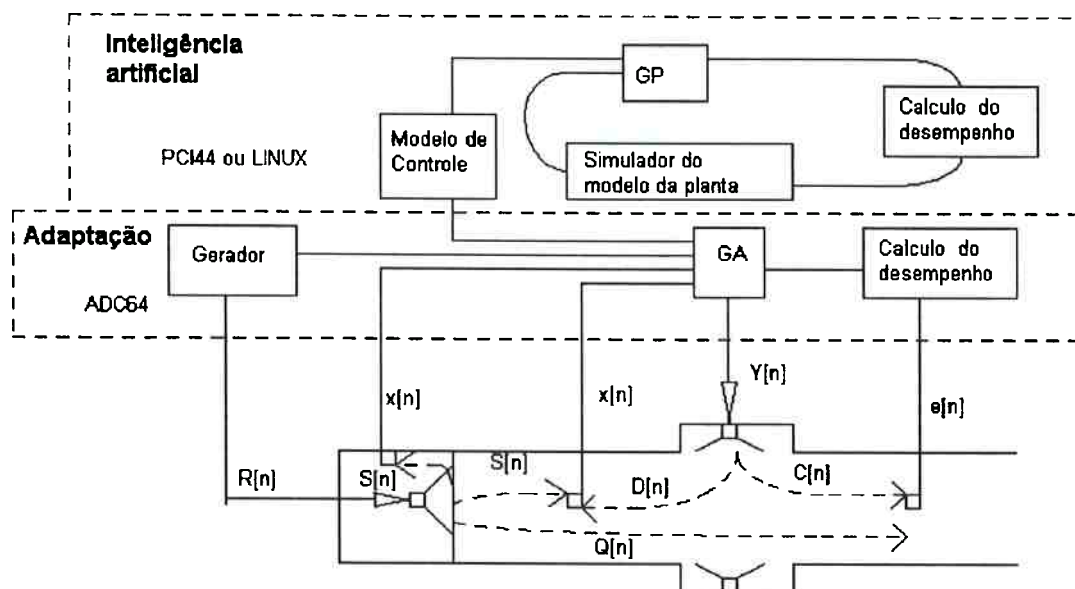


Fig. 8.1 Estrutura utilizada na obtenção do modelo de controle.

Um *buffer* contendo os dados do ruído de 115 Hz foi salvo em um arquivo para posterior utilização no simulador.

Para avaliar o desempenho do GP foram repetidas as medidas do GA em tempo real em malha aberta (SAGA- Item 6.2.3), atraso/ganho conhecido o ruído (Item 6.2.4), GA sem retirar a realimentação acústica (Item 7.4) e retirando (Item 7.5) utilizando o microfone antecipativo confinado e no meio do duto.

A identificação, o controle e a aquisição utilizam a placa ADC64.

## 8.2 O simulador utilizado com o GP.

A programação genética gera aleatoriamente uma população de indivíduos onde cada um representa um diferente modelo de controle cujo desempenho precisa ser avaliado a cada nova geração.

O processo de medir durante um intervalo de tempo o desempenho torna o GP inviável, pois cada nova geração contém dezenas de indivíduos e para cada um seria necessário otimizar os parâmetros do modelo utilizando o GA para um correto cálculo de desempenho.

A alternativa utilizada foi aperfeiçoar o simulador do item 6.1.1 agregando a dinâmica da planta e dos alto-falantes através dos filtros  $C[n]$ ,  $D[n]$ ,  $Q[n]$  e  $S[n]$ , conforme mostrado na fig. 8.1 para os casos de malha aberta (SAGA e atraso/ganho com ruído conhecido) e fechada (atraso/ganho com microfone antecipativo confinado e no meio do duto).

O simulador fornece no caso de malha aberta a leitura do microfone de erro a partir do *buffer* de ruído e do sinal de atuação através da fórmula:

$$e[n] = Q[n] * R[n] + C[n] * y[n] \quad (8.1)$$

No caso de malha fechada simula os valores lidos pelos microfones antecipativos e de erro:

$$\begin{aligned} x[n] &= S[n] * R[n] + D[n] * y[n] \\ e[n] &= Q[n] * R[n] + C[n] * y[n] \end{aligned} \quad (8.2)$$

A função de desempenho de cada indivíduo pode ser estimada utilizando-se a atuação  $y[n]$  dada pelo modelo de controle codificado.

### 8.3 O software de GP.

Os programas utilizados para cálculo do GP foram o lil-GP 1.01 da Universidade de Michigan (Zongker 1996) no computador Pentium com sistema operacional Linux e uma versão adaptada rodando na placa PCI44.

Na versão Linux, pode-se construir populações de 6000 indivíduos e no DSP de no máximo 75 indivíduos. Pode-se triplicar este número no DSP se o mapa de memória for alterado e as árvores passarem a ser codificadas na memória comum ao invés da *heap* na memória local.

Como esta placa possui 3 processadores, pode-se rodar em paralelo configurações diferentes de controle (atraso e ganho em malha aberta no primeiro, malha fecha utilizando apenas  $x[n]$  como terminal no segundo e utilizando  $x[n]$ ,  $y[n]$  e  $e[n]$  como terminais no terceiro). A melhor configuração e o melhor modelo encontrado pode ser utilizado posteriormente na placa ADC64 para controle em tempo real.

A função de desempenho utilizada para cada indivíduo da população é a soma dos módulos da leitura do microfone de erro durante o intervalo de simulação.

Os operadores genéticos utilizados são a seleção baseada no valor do desempenho, o *crossover* e a mutação com pesos 0.6, 0.2 e 0.2 respectivamente.

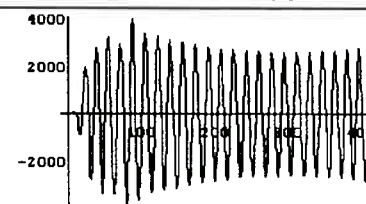
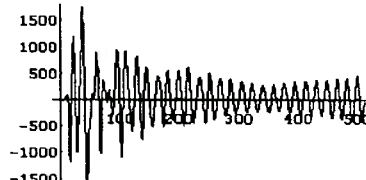
### 8.4 Resultados da programação genética em malha aberta para obtenção do sinal de cancelamento.

Nesta abordagem o GP deve obter o controle utilizado no SGA/SAGA, isto é, uma função de controle do tipo:

$$\begin{aligned}
 y[n] &= A \sin\left(\frac{2\pi f t}{f_{\text{amostr}}} + \phi\right) \\
 y[n] &= A \cos\left(\frac{2\pi f t}{f_{\text{amostr}}} + \phi\right)
 \end{aligned}
 \tag{8.3}$$

O resultado obtido está apresentado na tabela 8.1, e foram utilizados os operadores multiplicação (\*), soma (+), subtração (-) e seno(sin), coseno(cos) e exp(exp), com os terminais aleatório e valor do tempo. A população tinha de 50 indivíduos e o resultado foi encontrado após 27137 gerações e se manteve até 100000 gerações.

Tabela 8.1 Resultados comparativos do GP e do GA.

Metodo	Modelo de controle	Sinal + Ruído
GP	$y(t)=3311*\cos(716.9 t + 791.9 + \textit{exp}(t)+t-t) = 3311*\sin(2 \pi 114.06 t + 1.36)$	
SAGA (Item 6.2.3)	$y(t)=4570 \sin(2 \pi 115.14 t + 2.44)$	

O modelo encontrado pelo GP tem a mesma estrutura que o utilizado pelo SAGA, e pode-se observar que uma parte de sua estrutura (assinalada em *itálico*) não é funcional pois  $t-t=0$  e  $\textit{exp}(512/2000)=1.29 \ll 791.9$ , e corresponde a parte *intron* do cromossomo.

A frequência encontrada é de  $716.9/(2 \pi) = 114.09$  Hz, e a amplitude e fase apresentam uma diferença que reflete a imprecisão do modelo utilizado.

### **8.5 Resultados da programação genética em malha aberta com modelo de atraso e ganho conhecido o ruído.**

Este é o caso descrito no item 6.2.4, com a utilização dos operadores multiplicação(\*), soma(+), subtração(-) e dos terminais formados pelas 30 últimas



saídas do alto-falante principal (denominadas  $R[n]$ , onde  $n$  é o atraso em relação a última leitura  $R[0]$ ) e valor aleatório.

O melhor resultado obtido está apresentado na tabela 8.2, após 59 gerações com 5000 indivíduos. Pode-se observar que o modelo de atraso/ganho obtido pelo GP com a planta simulada é muito próximo ao obtido na planta real com o GA.

Tab. 8.2 Resultados comparativos do GP e do GA.

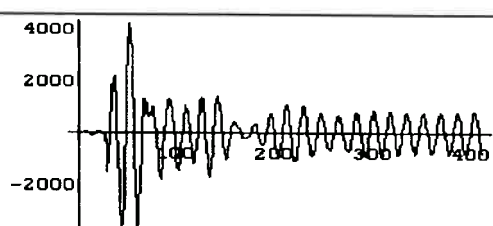
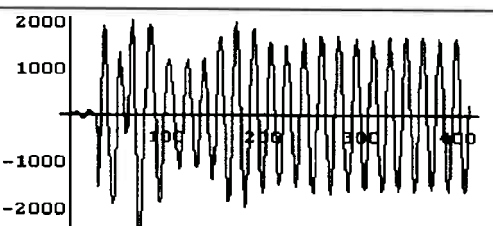
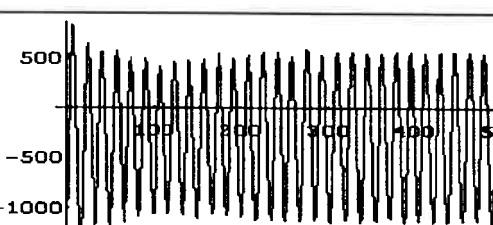
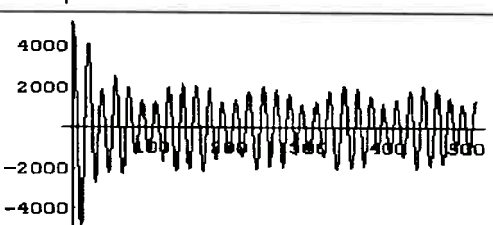
Método	Evolução dos Modelos de controle	Sinal + Ruído
GP	$y[n]=R[n-16]-R[n]$ $y[n]=R[n-16]-R[n]+0.53$ $y[n]=0.75+R[n-16]-R[n]$ $y[n]=0.51*(0.85+R[n-12])$ $y[n]=0.51*R[n-12]$ $y[n]=0.51*(0.85+R[n-12])-0.91$ $y[n]=0.51*(0.51*(R[n-12]+0.85+R[n-12]))$ $y[n]=0.51*(0.51*(R[n-12]+R[n-12]))$ $y[n]=0.54*R[n-12]$ $y[n]=0.54*R[n-12]-0.91$ $y[n]=0.54*R[n-12]-0.91-0.91$  $y[n]=0.54 R[n-12]$	
GA (Item 6.2.4)	$y[n]=0.47 R[n-13]$	

### **8.6 Resultados da programação genética utilizando a leitura do microfone antecipativo confinado e no meio do duto.**

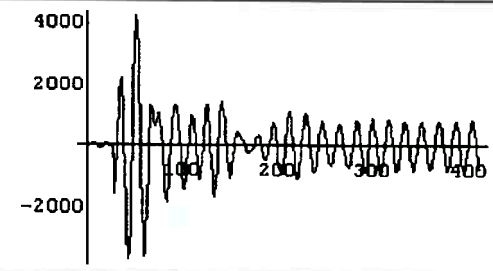
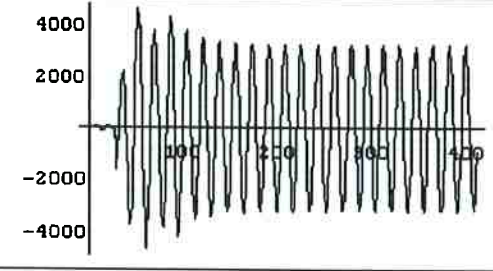
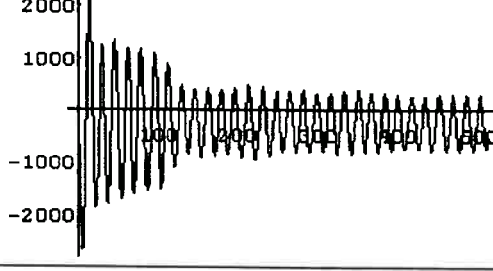
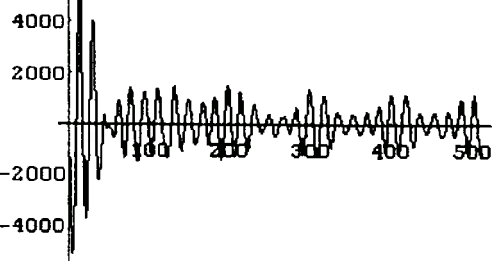
Esta configuração está descrita nos itens 7.4 e 7.5. Foram utilizados os operadores soma(+), multiplicação(\*) e subtração(-) e dois conjuntos de terminais: estendido, formado pelas últimas 30 leituras dos microfones de erro( $e[n]$ ) e antecipação( $x[n]$ ) e das 30 últimas atuações ( $y[n]$ ), e reduzido (30 últimas leituras do microfone antecipativo  $x[n]$ ).

Os resultados estão nas tabelas 8.3 com o microfone antecipativo confinado e 8.4 para o microfone no meio do duto , e mostram que a base reduzida convergiu para a estrutura da solução obtida pelo GA e a base estendida convergiu para uma solução que instabiliza o sistema de controle.

Tab. 8.3 Resultados do GP e do GA com microfone confinado.

Método	Condição	Evolução dos Modelos de controle	Sinal + Ruído
GP	Base estendida	$y[n]=e[n-7]$ $y[n]=y[n-10]+x[n-17]$  $y[n]=y[n-17]+e[n-4]$	
	Base reduzida	$y[n]=x[n]$ $y[n]=x[n-15]+x[n-5]$ $y[n]=0.40*x[n]$ $0.40*x[n-1]$  $y[n]=0.40 x[n-18]$	
GA	Sem retirar a realimentação acústica	$y[n]=0.48 x[n-21]$	
	Retirando a realimentação acústica	$y[n]=0.50 x[n-18]$	

Tab. 8.4 Resultados do GP e do GA com microfone no meio do duto.

Método	Condição	Evolução dos Modelos de controle	Sinal + Ruído
GP	Base estendida	$y[n]=e[n-7]$ $y[n]=(x[n-4]+x[n-14])-(e[n-17]-y[n-6])$ $y[n]=y[n-17]+e[n-4]$  $y[n]=y[n-17]+e[n-4]+0.06$	
	Base reduzida	$y[n]=0.25$  $y[n]=0.20 x[n-20]$	
GA	Sem retirar a realimentação acústica	$y[n]=0.36 x[n-21]$	
	Retirando a realimentação acústica	$y[n]=0.36 x[n-20]$	

### 8.7 Análise dos resultados.

A programação genética gerou uma estrutura do modelo de controle a partir de uma base definida pelo usuário, utilizando um simulador da planta para cálculo do desempenho.

Esta estrutura foi comparada com os resultados do GA obtidos sem restrição para os valores codificados no cromossomo, isto é, o atraso, definido entre 0 e 100 e o ganho entre 0 e 2.0, convergindo para o extremo global do desempenho.

A aderência entre os resultados do GP e do GA foi boa, mostrando que o GP pode estruturar um controle que converge para a melhor estrutura possível com a base de funções e terminais disponíveis.

Outro problema também tratado pelo GP é o da condição inicial de busca da solução do problema. As faixas de valores utilizadas nos capítulos 6 e 7 para as variáveis codificadas no cromossomo foram arbitrárias, e definem um espaço de soluções muito grande. Com os valores obtidos pelo GP, pode-se definir uma faixa menor de busca, reduzindo o espaço de soluções e aumentando a velocidade de convergência do algoritmo.

Uma questão em aberto é os critérios de definição e a influência da base utilizada na obtenção da solução. No caso do GA que tem as variáveis codificadas discretizadas em  $n$  bits, pode-se definir o tamanho do espaço de soluções e sua métrica. No caso da GP, a base é formada por funções que podem assumir qualquer valor real, construindo um espaço de soluções de dimensão infinita.

Há indícios que em certos casos o número de gerações e/ou o tamanho da população devem ser aumentados para cobrir melhor o espaço de soluções. Os operadores genéticos aplicados em estruturas em árvores são mais poderosos que os utilizados pelo GA em um cromossomo de comprimento fixo, pois entre outros motivos, o *crossover* entre pais iguais gera filhos diferentes e a mutação agrega novas árvores aleatórias a estrutura do indivíduo, contribuindo para a convergência do GP.

## Capítulo 9

### **Conclusões e futuros trabalhos.**

A modelagem matemática forneceu subsídios a compreensão da planta acústica e escolha dos modelos de controle utilizados ao longo do trabalho, baseado nas propriedades de superposição das soluções e não dispersividade (eq. 3.5 e 3.6).

A física envolvida pode ser sintetizada como ondas planas se propagando ao longo do duto moduladas por ondas estacionárias em uma planta com alta densidade de modos. A particularidade de se utilizar som para cancelar som, introduziu a realimentação acústica no problema de controle.

A identificação da montagem experimental permitiu definir a faixa de trabalho em frequência de 100 a 600 Hz, em função dos resultados obtidos na varredura em frequência dos alto-falantes utilizados.

A função de transferência obtida pelas técnicas de excitação por impulso, ruído aleatório, impacto e varredura em frequência, mostraram aderência entre si e confirmaram as frequências de ressonância dos modos do sistema, e permitiram a seleção das configurações mais representativas para o estudo do efeito da realimentação acústica (duto cilíndrico de 6 polegadas com junção e duto retangular).

O GA foi formulado para ser aplicado em tempo real, permitindo a otimização de estruturas de controle baseadas em operadores e em funções do tempo, convergindo para o extremo da solução e tratando a instabilidade decorrente da realimentação acústica. Foi capaz de encontrar o máximo global da função de desempenho, que possui muitos máximos locais próximos e a condição correspondente à ausência de atuação (só o ruído). Apresentou sensibilidade às variáveis codificadas e versatilidade de opções, podendo-se variar as estratégias de inserção, mutação, limitação da região de busca em função da convergência e introduzir ou não o elitismo na reinserção.

O SAGA apresenta uma convergência mais rápida que o SGA por restringir o espaço de solução no refinamento em torno do valor obtido no primeiro nível. Esta estratégia tem potencial para aplicação em sistemas com muitos graus de liberdade.

A abordagem natural de atraso/ganho administrou bem a instabilidade do sistema, obtendo uma boa redução do ruído.

A realimentação acústica foi tratada com a subtração da estimação da atuação no microfone antecipativo através da função de transferência obtida com o modelo teórico (cuja limitação era não conter a dinâmica do alto-falante), um filtro FIR (opção adotada) e análise modal (o GA determinou os parâmetros modais corretamente, mas sua realização em tempo real torna esta opção menos interessante que o filtro FIR).

Em comparação com a abordagem adaptativa (FBFXLMS) o GA teve um desempenho mais estável, atuando em todas as faixas e não apenas em janelas de frequências. O tratamento da realimentação acústica utilizando modelos do caminho alto-falante/microfone antecipativo para o duto cilíndrico sem tratamento, não apresentou bom resultado pois o GA não possui em sua estrutura um mecanismo para tratar o resíduo da realimentação acústica. No algoritmo adaptativo, a utilização da malha LMS nos coeficientes  $W$  para correção da transmissão do sistema é uma vantagem crucial.

As alterações construtivas realizadas no duto retangular amorteceram vários modos do sistema permitindo a execução do GA, tanto na presença como na ausência de realimentação acústica.

No desenvolvimento em multiprocessamento, a escolha da arquitetura usando a memória local para acolher os novos indivíduos e a memória compartilhada para os pais foi muito satisfatória, diminuindo o tempo perdido na colisão entre os processadores e explorando toda sua capacidade.

A contribuição principal desta tese foi o desenvolvimento e a integração de diferentes abordagens utilizando algoritmo genético (GA e GP) no controle em tempo real de forma autônoma e auto estruturada explorando a inteligência artificial e o processamento paralelo em controle ativo de ruídos em dutos. Denominamos esta metodologia de CONTROLE GENÉTICO.

A GP conseguiu aprender com o processo, incorporando as características de um controle que evolue com as gerações através do cálculo do desempenho de cada indivíduo da população em um simulador com a dinâmica do sistema, obtendo modelos de controle coerentes com a teoria e com os modelos utilizados na prática.

### ***Futuros trabalhos.***

Nesta tese a metodologia do Controle Genético foi apresentada e aplicada a uma classe de sistemas contendo atraso e realimentação com um desempenho satisfatório.

A próxima etapa do trabalho consiste em aplicar o Controle Genético para outras classes de sistemas: com eventos discretos, contínuos ou concentrados (regidos por equações diferenciais ordinárias) com um número qualquer de variáveis de estado, sistemas em batelada ou sistemas com atraso de transporte.

As seguintes questões estão em aberto neste contexto:

- Critérios para construir as bases de funções e terminais que serão utilizadas pelo GP.
- Definição da métrica entre as soluções representadas nos indivíduos.
- Velocidade e estabilidade da convergência do GP.
- Questões sobre a robustez da solução encontrada.
- É possível o GP construir controladores realizados através de associações de PIDs, redes neurais, etc ?

A resposta a estas questões e a experiência adquirida nas aplicações permitirão o desenvolvimento de controladores para implantação em processos industriais e otimização de sistemas gestores e financeiros.

Outra frente importante é a utilização de redes neurais associadas ao GP no controle acústico. Seria uma generalização do algoritmo adaptativo, onde cada LMS associado a um vetor de coeficientes é um neurônio da rede neural. A rede multi camadas permitirá tratar a realimentação acústica com uma solução mais complexa e contornar a restrição da estrutura do GA. A comparação com os resultados obtidos pelo GC poderá levar a uma proposta híbrida, combinando as duas abordagens.



## Bibliografia.

- AKL,S. "*The design and analysis of parallel algorithms.*" Englewood Cliffee, N.J.: Prentice Hall, 1989.
- ASTROM,K.J.; WITTENMARK,B. "*Adaptive control.*" Reading,Mass.: Addison Wesley, 1989.
- BAI,M.R.; LIN,Z. "*Active noise cancellation for a three-dimensional enclosure by multiple-channel adaptive control and  $H \infty$  control.*" Transactions of the ASME, v.120 p.958, 1998.
- BERANEK,L.L. "*Acoustic.*" New York: McGraw-Hill, 1954.
- BASILE,R.; MAGALHÃES, L. E. "*Citologia e genética.*" São Paulo: Editora Cultrix, 1976.
- BUTKOV ,E. "*Física Matemática.*" Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1978.
- CHASSAING,R. "*Digital signal processing with C and TMS320C30.*" New York: John Willey & Sons,Inc, 1992.
- COWAN,C.F.N.; GRANT,P.M. "*Adaptive filters.*" Englewood Cliffee, N.J.: Prentice Hall, 1985.
- DIGISONIX,INC "*Active cab interiors: an off road vehicle application.*" <http://www.mailbag.com/users/dgsnx-mr/RESULTS2.HTM>, 1997.
- DOAK, P.E. "*Excitation, Transmission and radiation of sound from source distributions in hard-walled ducts of finite length (I): The effects of duct cross-section geometry and source distribution space-time pattern.*" Journal of Sound and Vibration, v.31, p.1, 1973.
- DOAK, P.E. "*Excitation, Transmission and radiation of sound from source distributions in hard-walled ducts of finite length (I): The effects of duct length.*" Journal of Sound and Vibration, v.31, p. 137, 1973.
- EGHTESADI, K.; LEVENTHALL, H.G. "*An active attenuation of noise-The monopole system.*" Journal of the Acoustical Society of America, v.71, p.608, 1982.
- ERIKSSON,L.J.; ALLIE,M.C.; BREMIGAN,C.D.; GILBERT,J.A. "*Active noise control on systems with time-varying sources and parameters.*" Sound and Vibration, Bay Village, Ohio, p.16, jul., 1989.
- ERIKSSON,L.J.; ALLIE,M.C. "*Use of random noise for on-line transducer modeling in an adaptive active attenuation system.*" Journal of the Acoustical Society of America, v.85, p.797, 1989.

- EWINGS,D.J. "Modal testing: theory and practice." Tauton, Somerset. England: Research Studies ; New York, John Wiley & Sons, 1984.
- FEINTUCH,P.L. "An adaptive Recursive LMS filter." Proc. IEEE, p.1622, nov.,1976.
- FERNANDEZ,J.; LENAERTZ,T. "Genetic programming tutorial notebook." <http://www.geneticprogramming.com/Tutorial/tutorial.html>.
- Fogel,D. "An introduction to simulated Evolutionary Optimization." IEEE Transactions on Neural Networks, v.5, p.3, 1994.
- GARCIA,C. "Identificação de sistemas e estimação de parâmetros." São paulo, EPUSP, s.d. (notas de aula)
- GERMES,S.N.Y. "Curso intensivo sobre acústica aplicada." Santa Catarina: UFSC/B&K do Brasil, 1983.
- GOLDBERG,D.E.; DEB,K.; CLARK,J.H. "Accounting for noise in the sizing of populations" Foundations of genetic algorithms-2 San Mateo,Ca: Morgan Kaufmann, 1993.
- GOLDBERG,D.E. "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning." Reading,Mass.: Addison-Wheesley, 1989.
- HARTL,D.L.; FREIFELDER,D.; SNYDER,L.A. "Basic genetics" Boston,Ma: Joens and Bartlett,1988
- HAYKIN, S. "Adaptative filters theory." New York: MacMillan, 1984
- HOLLAND,J.H. "Adaptation in natural and artificial systems: na introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence." Cambridge: Cambridge press 1992.
- HU,J. "Active sound attenuation in finite-length ducts using close-form transfer function models. " Journal Dynamic Systems, Measurements and Control, v.117, p.143, 1995.
- HU,J. "Feedforward and feedback control strategy for active noise cancellation in ducts." Journal Dynamic . Systems, Measurements and Control, v.118, p.373, 1996.
- HWANG, K.;BRIGGS,F.A. "Computer architecture and parallel processing." New York: McGraw Hill, 1986.
- INNOVATIVE INTEGRATION "Development package installation guide." 1997.
- INNOVATIVE INTEGRATION "ADC64 hardware manual." 1994.
- INNOVATIVE INTEGRATION "ADC64 developer's package software manual." 1996.
- INNOVATIVE INTEGRATION "PCI44 hardware manual." 1996.

- INNOVATIVE INTEGRATION "*PCI44 developer's package software manual.*" 1996.
- KAY,S.M. "*Modern spectral estimation: theory and application.*" Englewood Cliffee, N.J.: Prentice-hall, 1988.
- KINSLER,L.; FEYL,A.; COPERS,A.B.; SANDERS,J.V. "*Fundamentals of acoustic.*" New York: John Wiley, 1982.
- KOZA,J.R. "*Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection.*" Cambridge,Mass.: MIT Press, 1992.
- KOZA,J.R. "*Genetic programming II:Automatic discovery of reusable programs.*" Cambridge,Mass.: MIT Press, 1994.
- KRISTINSSON, K.; DUMONT,G. "*System identification and control using genetic algorithms.*" IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, v.22, p.1033, 1992.
- KUO,S.M.; MORGAN,D.R. "*Active noise control systems: algorithms and DSP implementations.*" New York: John Willey & Sons, 1996.
- KUO,S.M.; PANAH,I "*Design of active noise control systems with the TMS320 family.*" Texas Instruments, código SPRA042, 1996.
- LI, L. "*On-line tuning of AMB controllers using genetic algorithms.*" In: International Symposium on Magnetic Bearings, p. 372, Lancaster, 1998. Proceedings. Lancaster, Technomic Publishing, 1998.
- LJUNG,L. "*System identification theory for the user.*" Englewood Cliffee, N.J.: Prentice Hall, 1987.
- MA,Q.; COWAN,C.F.N. "*Genetic Algorithms applied to the adaptation of IIR filters.*" Signal Processing, v.48, p.155, 1996.
- MCKAY,B.; WILLIS,M.; BARTON,G. "*Steady-state modelling of chemical process systems using genetic programming.*" Comp. Chem. Eng. v.21, p.981, 1997.
- MAHFOUD,S.; MANI,G. "*Financial forecasting using genetic algorithms.*" Applied Artificial Intelligence, v.10, p.543, 1996.
- MAN,K.F.; TANG,K.S.; KWONG,S. "*Genetic Algorithms: concepts and applications.*" IEEE Trans. on Industrial Electronics, v.43, p.519, 1996.
- MORGAN,D.R. "*Analysis of multiple correlation cancellation loop with a filter in the auxiliary path.*" IEEE Trans. on Acoustic, Speech and Signal Processing, v.28, p.454, 1980.
- NELSON, P.A.; ELLIOTT, S.L. "*Active Control of Sound.*" London: Academic Press, 1994.

- NEWLAND,D.E. “*Introduction to Random vibration, spectral and wavelet analysis.*” Harlow,Essex :Longman ; New York: Wiley, 1993.
- OPPENHEIM, A.; WEINSTEIN,E.; ZANGI,K. “*Single sensor active noise cancellation based on the EM algorithm.*” Proc. IEEE ICASSP v.1, p.270, 1992.
- POLI,R. “*Introduction of evolutionary computation.*” School of computer science - The University of Birmingham [http://www.cs.bham.ac.uk/~rmp/slide\\_book/slide\\_book.html](http://www.cs.bham.ac.uk/~rmp/slide_book/slide_book.html).
- PROAKIS,J.G.; MANOLAKIS, D.G. “*Digital signal processing: principles, algorithms and application.*” New York: MacMillan, 1992.
- POOLE,J.H.B.; LEVENTHAL, H.G. “*An experimental study of Swinbanks method of active attenuation of sound in ducts.*” Journal of Sound and Vibration, v.49, p.257, 1976.
- ROOIJ,A.J.F. “*Neural network training using genetic algorithms.*” Singapoure: World Scientific, 1996.
- RUDOLPH,G. “*Convergence Analysis of Canonical genetic algorithms.*” IEEE Transactions on Neural Networks, v.5, p.96, 1994.
- SANTOS,R. “*Ruído em escritório derruba produção.*” Folha de São Paulo. São Paulo, 1998. Caderno de empregos, n.1, p.4, 1998.
- SCHROEDER,P.; GREEN,B.; FLEMMING,P.J. “*On-line genetic auto-tuning of magnetic bearing controllers.*” In: International Symposium on Magnetic Bearings, p.321, Lancaster, 1998. Proceedings. Lancaster, Technomic Publishing, 1998.
- SHEPERD,I.C; CABELLI,A.;LAFONTAINE,R.F. “*Characteristics of soundpeakers operating in an active noise attenuator.*” Journal of Sound and Vibration, v.110, p.471, 1986.
- SOULE,T.; FOSTER,J “*Code growth in genetic programming*” Proc. First genetic programming conference, vol 1 p.215 Editor: J.Koza, 1996
- SWINBANKS, M.A. “*The active control of sound propagation in long ducts.*” Journal of Sound and Vibration, v.27, p.411, 1973.
- TANG,K.S.; MAN,K.F.; KWONG,S.; CHAN,C.Y. “*Application of the genetic algorithm to real-time active noise control.*” Real-time systems, v.11, p.289, 1996.
- TEXAS INSTR. “*Active noise control silences aircraft cabins*” <http://www.ti.com/sc/docs/integrat/96dec/dsp/3.htm>, 1996.
- TEXAS INSTR. “*TMS320C4x Users guide.*” SPRU063A, 1993.
- TEXAS INSTR. “*TMS320C3x Users guide.*” SPRU031E, 1997.

- TEXAS INSTR. "TMS320C3x/C4x Optimizing C compiler." SPRU034G, 1997.
- TEXAS INSTR. "TMS320C4x Parallel runtime support library." SPRU084a, 1994.
- TEXAS INSTR. "TMS320C3x/C4x Assembly language tools." SPRU035C, 1997.
- WANGLER,C.; HANSEN, C. "Genetic algorithm adaptation of IIR filters by direct adjustment of poles and zeroes for active control of sound and vibration." In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ACTIVE CONTROL OF SOUND AND VIBRATION, Newport Beach, California, 1995. Active 95. Poughkeepsie : Noise Control Foundation, 1995. p.1025
- WIDROW, B.; STEARNS, S.D. "Adaptive signal processing." Englewood Cliffee, N.J.: Prentice-Hall, 1985.
- WILLIS,M.; HIDDEN,H. "Systems modelling using genetic programming." Comp. & chem. Eng., v.S21, p.S1161, 1997.
- WINEBERG,M.; FRANZ,O. "The benefit of computing with introns" Proc. first genetic programming conference Editor: J.Koza vol. 1 p.410, 1996.
- YANG,B.; TAN,C.A. "Transfer function of one dimensional distributed parameter systems." Journal of Applied Mechanics, v.59, p.1009, 1992.
- ZONGKER,D.; PUNCH,B. "lil\_GP 1.01 User's manual." Universidade de Michigan: <http://isl.ece.msu.edu/GA/software/lil-gp>, 1996.