

Controle Acústico ativo de ruídos em dutos.

Active Acoustic Noise Control in Ducts.

Orientador: Prof. Dr. José Sotélo Júnior

James Cunha Werner *

Eduardo R. de Castro **

Depto. Enga. Mecânica
Esc. Politécnica USP
Av. Prof. Mello Moraes 2231
São Paulo - SP CEP 05508-900

Abstract

This paper studies different approaches to actively control acoustic noise through the development of adaptive control and genetic algorithms applied to rectangular ducts. The noise reduction obtained in simulations is about 43 dB down. The algorithms were also implemented in a experimental setup and some satisfactory results are being obtained so far.

Keywords: Active noise control, Genetic Algorithms, Adaptive algorithms.

Resumo

Este trabalho estuda diferentes abordagens para o controle ativo acústico de ruídos através do desenvolvimento de controle adaptativo e algoritmo genético aplicado a dutos retangulares. A redução de ruído obtido em simulações é de cerca de 43 dB. Os algoritmos estão sendo implementados em uma montagem experimental e alguns resultados satisfatórios estão sendo obtidos.

Palavras-chave: Controle Ativo, Algoritmo Genético, Algoritmo Adaptativo.

1 Introdução e motivação para o trabalho.

Nos dias de hoje, a preocupação com a qualidade de vida leva as pessoas a se mobilizarem e agirem no controle das ações que possam afetar o meio ambiente, se preocupando com a camada de ozônio, efeito estufa, e a preservação do nosso planeta para as próximas gerações.

Há um outro aspecto importante que precisa ser lembrado quando se fala em qualidade de vida: o 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.

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. Quando há necessidade de comunicação entre as pessoas do posto de trabalho, o

costume é retirar o protetor, aproximar-se e gritar para sobrepor o ruído ambiente. Neste caso, o dano as funções auditivas poderá ser ainda maior.

* Estudante de Doutorado com bolsa do CNPq.

** Estudante de Mestrado.

A legislação trabalhista exige um cuidado especial das empresas no trato da poluição sonora, e no controle audiométrico das pessoas que estão expostas. Há casos de ações trabalhistas contra empresas e invalidez de funcionários consequência da poluição sonora.

Nas cidades, ao longo do engarrafamento do trânsito, as pessoas ficam expostas ao barulho dos motores desregulados, buzinas desnecessárias, sirenes e até do rádio em alto volume para sobrepor o ruído externo. A irritação dos motoristas é causa de acidentes.

Nos escritórios, ruídos dos equipamentos de ar condicionado, bombas de água, ventiladores em menor escala podem irritar as pessoas e reduzir sua produtividade.

A fim de minimizar estes problemas, serão estudados meios para gerar ondas sonoras, em frequência, amplitude e fase adequadas, para ser somada ao ruído e reduzir a sensação audível nas pessoas. O princípio físico que permite este resultado é o de superposição das ondas. Dois ou mais sinais se propagando pelo mesmo espaço interagem somando suas amplitudes (ou no caso a pressão do ar no local) ^{[19][22][23]}.

O ruído sonoro resulta da propagação de regiões de compressão seguidas por regiões de descompressão a uma velocidade de 330 m/s no ar. O sinal gerado para atenuar o ruído estará com as regiões de pressurização coincidindo com as regiões de despressurização do ruído e vice-versa, reduzindo as amplitudes e a sensação auditiva.

É sabido que estratégias de controle clássicas lineares sofrem de sérias limitações nesta aplicação, com características não estacionárias e banda larga em frequência, pois:

- há realimentação acústica da ação de controle (feedback acústico).
- sistemas de atraso com controle proporcional tem infinitos pólos no lado positivo do plano s , tornando o sistema facilmente instável.
- alterações das características do meio (temperatura e pressão) e da geometria por onde se propaga o som, acarreta em não-linearidades.

Pode-se classificar os tipos de controle em passivo, quando são utilizados protetores ou barreiras para absorção do sinal, ou ativo, onde é fornecida energia para o sistema. No nosso caso, como esta sendo adicionada energia ao ambiente através da geração de um contra-sinal, diz-se que está sendo feito um controle ativo ^[3].

O estado d'arte no cálculo das características do sinal são os algoritmos adaptativo, genético ou híbrido, objetos a serem desenvolvidos neste trabalho.

1.1 Objetivos.

Desenvolver sistemas de cancelamento de ruídos com características não estacionárias e de banda larga utilizando o controle ativo e estratégias de controle avançado (tais como algoritmo genético e/ou adaptativo) para aumento do conforto acústico.

Este projeto terá os seguintes resultados:

- desenvolver e aplicar algoritmos de controle adaptativo, genético e híbrido, para o sistema acústico, obtendo-se o domínio das técnicas de controle moderno e otimização.
- adquirir “know-how” em processamento paralelo, compiladores e técnicas de desenvolvimento de software com várias formas de paralelismo.
- adquirir domínio sobre o hardware e software de Processadores paralelos de sinal digital (pDSP) de alto desempenho.

-montar plataforma de testes aplicada ao cancelamento de ruídos sonoros em duto retangular ou cilíndrico, com implementação do controle. Esta plataforma será de grande valia para os estudantes dos cursos de graduação e pós-graduação para desenvolvimento de projetos de controle, otimização e acústica.

-desenvolver modelos matemáticos para os dutos retangular e cilíndrico, que levem em conta não linearidades e características geométricas.

2 Conceitos de acústica.

A acústica é a parte da física em que se investigam as vibrações e os fenômenos ondulatórios em meios elásticos e em que as frequências envolvidas estão na faixa de 20Hz a 20.000Hz ^[17].

Define-se por onda todo o fenômeno periódico em que ocorre o transporte de energia mediante a perturbação do meio elástico.

As ondas acústicas se originam a partir do movimento mecânico ou da colisão de objetos, e ao atingir o ouvido humano, são interpretadas como sons. Define-se como ruído um sinal indesejável.

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.

O que caracteriza uma onda é a velocidade de transporte de energia, a frequência, a amplitude e a fase.

A velocidade de transporte de energia depende das características do meio. Em um sólido, a velocidade será muito maior que em um gás devido a proximidade das moléculas do meio.

Um som pode ser monocromático (uma única frequência) ou policromático (varias). As ondas que existem naturalmente são constituídas por um número finito de frequências e constituem um trem de ondas.

A amplitude é o máximo afastamento da partícula do meio em relação a posição de equilíbrio e determina a energia que pode transportar. A energia é proporcional ao quadrado da amplitude.

A fase depende das condições geométricas do sistema (das distancias 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. 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 (perpendiculares) ou mistas (ambas simultaneamente).

A equação que rege o fenômeno acústico é a equação de onda, uma equação diferencial parcial, em muitos casos linear.

As equações diferenciais lineares possuem uma propriedade que é a da superposição de soluções: a soma de soluções particulares é uma solução. Devido a isto, a superposição de um ruído com um sinal gerado pode ter varias consequências.

Se as frequências diferirem significativamente, haverá um fenômeno de interferência, resultando em um sinal de energia igual a soma da energia do ruído mais o sinal. Caso sejam próximas, haverá uma pulsação chamada de efeito de narrow band.

No caso de as frequências, fases e amplitudes terem um determinado valor específico, poderá haver uma interferência destrutiva, aniquilando o sinal.

Neste caso não ocorre dissipação de energia. A dissipação ocorre quando a amplitude decresce na propagação devido a absorção (parte da energia é utilizada para elevar a agitação térmica das moléculas e é assim absorvida) ou por redistribuição de energia (em uma onda esférica em que a amplitude decresce com o quadrado da distancia em relação a fonte emissora).

Será mostrado que a energia foi absorvido pelo sistema que gera o sinal. O trabalho desenvolvido estuda algoritmos para gerar um sinal nesta condição especial.

O teorema de Parseval relaciona a energia nos dois domínios (tempo e frequência) através da seguinte formula:

$$\frac{1}{2\pi} \int x^2(t) dt = \int |X(\omega)|^2 d\omega \quad (2.1)$$

Assim, pode-se calcular a energia do sinal resultante como a soma das amplitudes ao quadrado ou a área do espectro obtido pela Transformada de Fourier. Estas duas abordagens serão utilizadas para análise da eficiência do cancelamento.

Para teste dos algoritmos foi construído um duto de secção retangular ^[25] e outro cilíndrico será construído futuramente.

Os dutos tem condições experimentais favoráveis, pois são de fácil construção, condições de contorno adequadas, solução do modelo matemático por separação de variáveis, e em certas regiões de frequências permitem a passagem de apenas ondas planas.

Há dois tipos de controle que podem ser utilizados: ativo ou passivo.

O controle passivo utiliza barreiras mecânicas a propagação sonora. Tem bons resultados em altas frequências e com sinais de alta intensidade.

O controle ativo tem sua área de aplicação na região de baixa frequência, utiliza som para cancelamento (energia acústica) obtido por alto-falantes e microfones como sensores. Na figura 2.1 pode-se ver os resultados da atenuação em diferentes frequências para as duas técnicas.

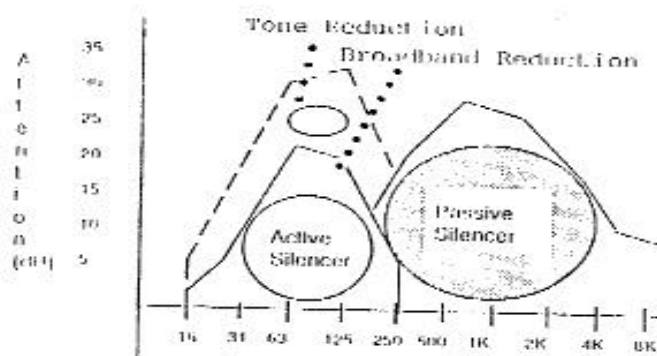


Fig. 2.1: Atenuação dos controles ativo e passivo para as regiões de frequência [20].

O controle deve ser executado em tempo real, usando algoritmos com convergência rápida. Precisa adaptar-se a variações no tempo do ruído e das condições acústicas devido a flutuações de temperatura e pressão. Tem que ter facilidade de portabilidade para novas configurações.

O controlador tem que tratar o problema do feedback acústico (realimentação do sinal gerado para cancelamento do som no microfone de controle), que acarreta uma função de transferência complexa, utilizando uma montagem feedforward associado com feedback.

3. Modelamento matemático do duto retangular [9] [10] [18].

No caso do duto com uma fonte de ruídos no extremo, pode-se escrever a equação de ondas e as condições de contorno da seguinte forma:

$$\nabla^2 p - \frac{\partial^2 p}{c^2 \partial t^2} = -\rho_0 \frac{\partial (Q_0 e^{i\omega t})}{\partial t} \delta(x-x') \delta(y-y') \delta(z-z') \quad (3.1)$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Conservação de momento linear.} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial v} \Big|_{\text{parede}} = 0 \quad \text{Velocidade na superfície de contorno.} \quad (3.3)$$

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

Uma solução particular pode ser obtida pelo método de separação de variáveis:

$$p(x,y,z,t) = X(x) Y(y) Z(z) T(t) = \psi_{mn}(x,y) Z(z) T(t) = \psi_{mn}(x,y) [a_{mn} \exp\{i\omega t - i\omega z/c_{mn}\} + b_{mn} \exp\{i\omega t + i\omega z/c_{mn}\}] \quad (3.4)$$

onde

$$(3.5)$$

$$\frac{\partial \psi_{mn}(x,y)}{\partial v} \Big|_{\text{parede}} = 0 \quad v \text{ normal a parede.}$$

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

As condições de contorno do extremo do duto definem as ondas estacionárias. No caso do duto estar fechado, o extremo terá um nó, e estando aberto, um ventre.

3.1 Interferência entre ondas progressivas.

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

$$Y = A \sin(kx + \omega t) \tag{3.6}$$

onde k é o número de onda ω/c ou $2\pi/\lambda$.

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:

- interferência construtiva, quando a defasagem for zero ou múltiplo de 2π e as amplitudes são somadas.
- interferência destrutiva, a defasagem é múltipla ímpar de π , e as amplitudes são subtraídas.
- outros valores de defasagem, podendo haver batimento

Na figura 3.1 pode-se verificar a variação da amplitude, frequência e fase para valores próximos do valor de interferência destrutiva.

Para a utilização do efeito de interferência destrutiva por algoritmos ativos, é preciso determinar quão concentrado é o valor da interferência.

Na fig. 3.2 foi feita a variação da frequência (mantidas as fases e amplitudes corretas) para verificar o valor da energia do sinal somado. Pode-se verificar que o valor em que ocorre a interferência é um poço muito concentrado em torno do valor exato (30 Hz).

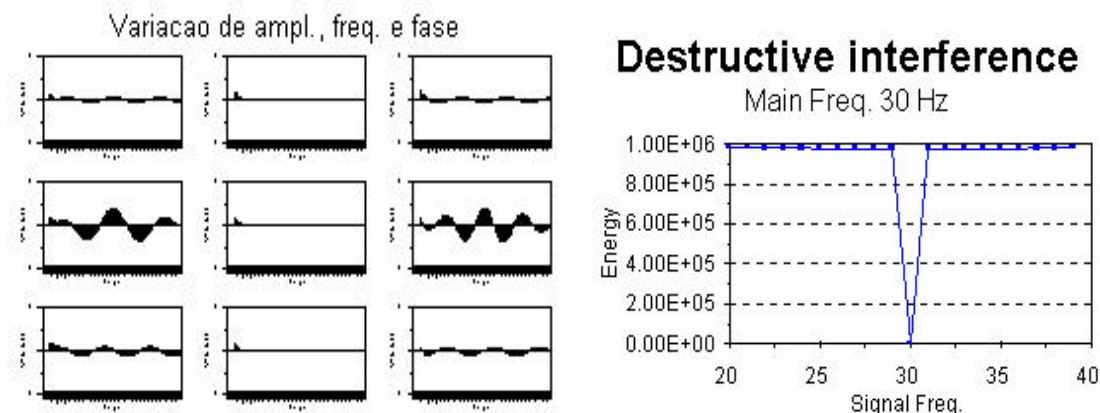


Fig. 3.1: Interferência variando a amplitude,

frequência e fase em torno do cancelamento.

Fig. 3.2: Poço de interferência do valor destrutivo.

Outro problema que pode ser verificado é que os valores de energia em torno do poço não apontam na direção do poço, isto é, a energia não é uma função monótona crescente ou decrescente. Há oscilações muito pequenas com mínimos e máximos locais e que podem levar o algoritmo de pesquisa para longe do valor de interferência.

3.2 Onde vai a energia acústica usada no controle ativo ? [24]

No controle ativo é injetada uma onda no duto que carrega energia para cancelar o ruído.

No caso de os sinais se cancelarem, para onde foi a energia ?

Para este estudo foi utilizada a montagem de Swinbanks [11] apresentada na fig. 3.3.

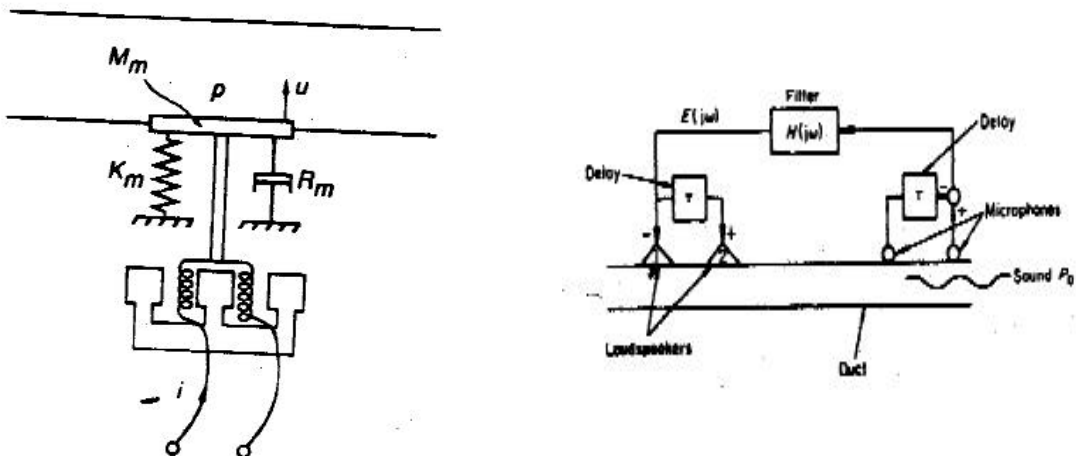


Fig 3.3: Modelo do alto-falante e montagem experimental.

A potência elétrica dissipada pelo alto-falante pode ser dividida nas seguintes parcelas: (3.7)

$$W_e = \text{perdas elétricas} + \text{perdas mecânicas} + \text{perdas acústicas} = \frac{|I|^2 R}{2} + \frac{|u|^2 R_m}{2} + \frac{\text{Re} \{ p q^* \}}{2}$$

onde

$q = u * A =$ velocidade volumétrica total produzida pelo pistão

$R =$ resistência elétrica

Como $\text{Re} \{ p q^* \} / 2$ pode ser menor que zero, no caso de uma absorção, com uma menor potência elétrica dissipada.

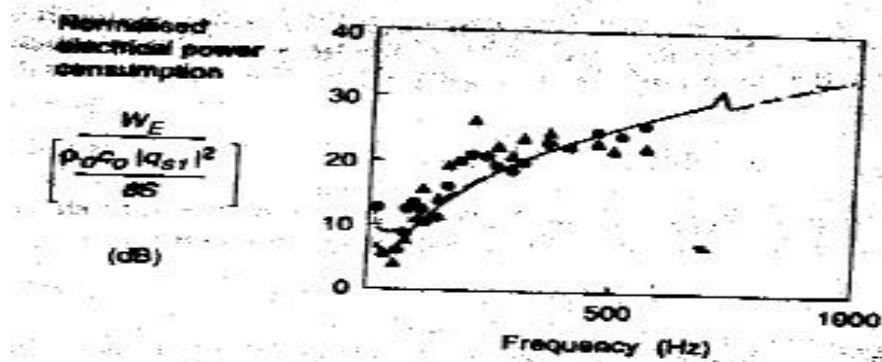


Fig. 3.4: Comparação da potência consumida teórica e experimental na montagem de Swinbanks (Bola: alto-falante anel 1; Triângulo: alto-falante anel 2; Traço: previsão teórica dos alto-falantes 1 e 2).

4 Montagem experimental.

4.1 Duto retangular.

A montagem experimental utilizada ^[25] consiste em um duto de 6 metros de comprimento onde no extremo foi colocado um alto-falante de 10 polegadas para geração dos ruídos a serem cancelados.

A 3.5 metros de distancia, estão colocados 4 alto-falantes de 6 polegadas, nas 4 paredes do duto.

Podem ser utilizados dois microfones que estão colocados em um suporte móvel que pode se deslocar pelo duto.

Nas figuras 4.1 e 4.2 esquemas e fotos da montagem experimental.

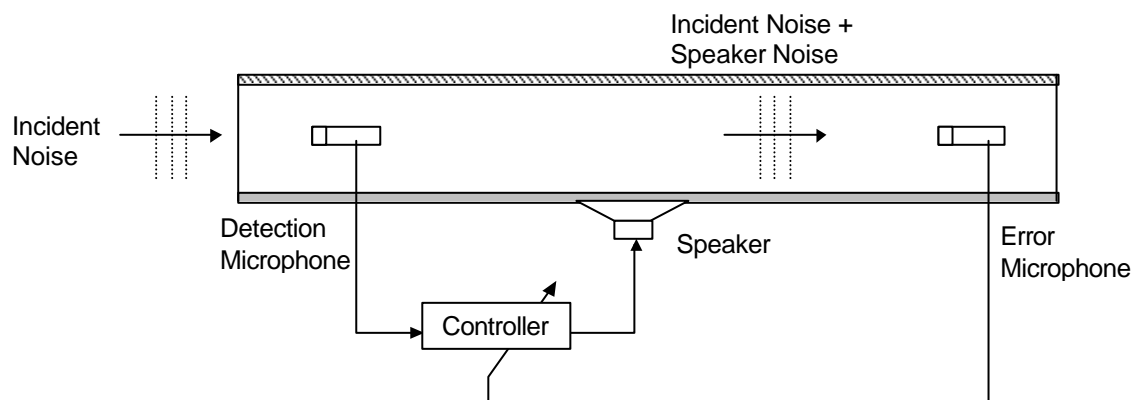


Fig. 4.1: Esquema da montagem experimental.



Fig. 4.2: Fotos dos equipamentos da montagem experimental.

4.2 Sistema de aquisição e controle.

O diagrama de blocos dos módulos do sistema de aquisição esta na fig. 4.3.

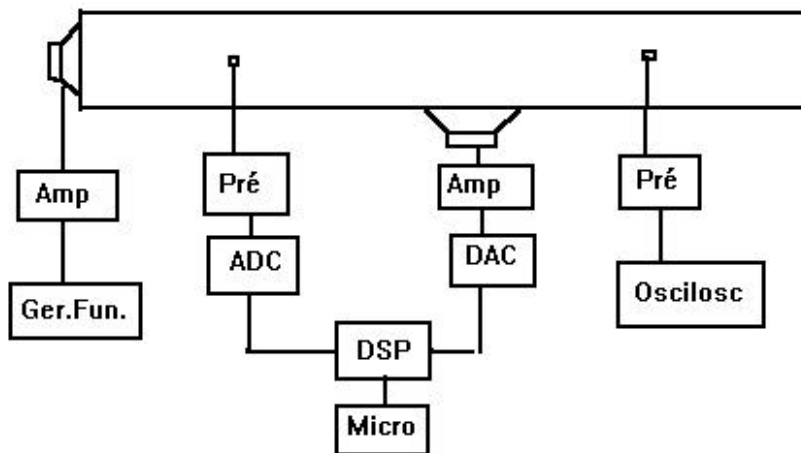


Fig. 4.3: Diagrama de blocos da montagem experimental.

Os componentes do sistema de aquisição de dados são descritos a seguir:

- Micro: IBMPC 286.
- DSP utilizado: TMS320C25 com 20 KB de programa e 4 KB dados.
- ADC: 16 bits, 17 μ s
- DAC 16 bits, 3 μ s
- Sample rate: 78 Hz a 58.8 kHz.
- Filtro: Butterworth de oitava ordem, corte em 3.9 kHz, 48 dB/oitava.
- Alto-falante principal: Arlen 100W 1010L de 23.5 cm (10").
- Alto-falante secundário: Arlen 50W 6AF/B de 14.5 cm (6").
- Microfones: B&K 2633 de 1.1 cm diâmetro.
- Duto: 6 metros de comprimento, 250 mm de largura e altura.

-Frequência máxima da onda plana:

$$f_c = \frac{c}{2L} = \frac{340}{2 * 0.25} = 680 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

- Ambiente de software.

-Compilador C e Assembler: responsável em traduzir o programa em linguagem C para código de máquina executável pelo DSP.

-Simulador: permite a execução em um micro IBMPC dos comandos em linguagem de máquina do DSP.

-Debugger: ferramenta de verificação da execução do programa passo a passo ou até breakpoints.

5 O simulador.

Para testar os algoritmos de controle, foi desenvolvido um simulador em Sistema Operacional Unix (Linux) ^[30], desenvolvido em linguagem C, que simula uma onda plana de pressão saindo do alto-falante principal (ruído) interagindo com uma onda circular (do alto-falante secundário). Apenas atrasos são considerados na função de transferência. São usadas as condições geométricas do duto real.

A figura 5.1 mostra a estrutura dos módulos do simulador.

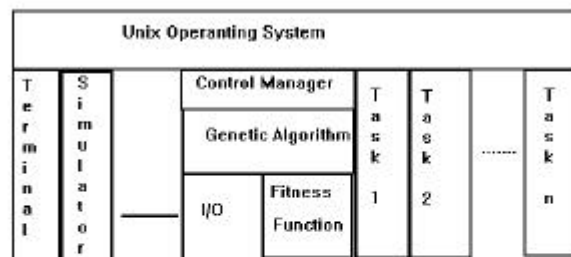


Fig. 5.1: Módulos do emulador para teste dos algoritmos.

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**: contem 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 function**: calcula a função objetivo para o buffer de dados.

-**Genetic Algorithm**: contem os algoritmos genético, iterativo, adaptativo, para calculo do sinal de cancelamento.

-**Control manager**: toma as decisões em função do resultado obtido, tais como, recomeçar o GA, ou recalculer o estagio iterativo, abandonar a atuação caso esteja saindo de controle, etc.

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

6. Função objetivo (Fitness).

Para avaliar o resultado de um sistema de controle, precisa-se definir um índice de desempenho a ser minimizado ou maximizado pelo algoritmo de controle.

No caso de sistemas acústicos, um dos índices é a intensidade sonora na região do espaço onde está o microfone, que pode ser obtida pela seguinte função objetivo:

$$W = \Sigma \text{ amplitude}^2 \quad (6.1)$$

Para reduzir a intensidade sonora em uma região do espaço, deve-se minimizar a função objetivo através de um algoritmo de pesquisa que varie a frequência, fase e amplitude ou coeficientes de um filtro qualquer. A interferência do ruído original e dos sinais gerados darão diferentes valores de intensidade sonora.

O algoritmo genético é uma técnica que promete bons resultados na pesquisa.

7. Estado d'Arte.

A primeira aplicação de controle utilizou os conceitos clássicos de controle [26] [27] [28] sem bons resultados.

Vários autores desenvolveram outras abordagens experimentais [11] [12] [13] [15] [16] posicionando anéis de alto-falantes a distâncias fixas, função da frequência a ser cancelada.

Outra abordagem usava filtros FIR [3] [21], IIR [3] [4] [14] [21] e IIR com algoritmos genéticos [5].

7.1 Uso de controle ativo adaptativo.

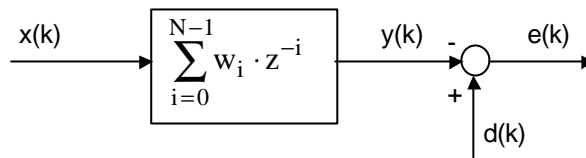
Filtros adaptativos [6][7] são filtros temporais discretos que tem seus parâmetros ajustados ao longo do tempo para acompanhar as mudanças no sistema onde são utilizadas. Estes parâmetros ajustados são obtidos para reduzir o sinal de erro que pode ser medido ou medido a partir das saídas do sistema.

Em um sistema de controle acústico ativo, filtros adaptativos podem ser aplicados de um modo simples usando o microfone de detecção como filtro de entrada, o filtro de saída como sinal para o alto-falante e o microfone de erro como sinal de erro. Durante a operação do sistema, o filtro é continuamente ajustado para fazer a saída do alto-falante cancelar o ruído acústico, minimizando deste modo o sinal do microfone de erro. Se as características acústicas do sistema mudarem, os parâmetros do filtro vão também mudar para manter o sinal de saída o mais baixo o possível.

Há muitos algoritmos diferentes que podem ser utilizados no ajuste dos parâmetros em filtros adaptativos. Neste trabalho, algoritmos adaptativos baseados em técnicas de pesquisa usando o gradiente, mínimos quadrados recursivos e outros são utilizados, com o objetivo de controlar o sistema em tempo real. Estes algoritmos são testados em configurações de mono e multi processamento, em níveis distintos de complexidade, para obter o melhor resultado de robustez e velocidade de convergência.

7.2 Algoritmos adaptativos comumente usados.

O algoritmo Least Mean Squares (LMS) usa um filtro discreto com zeros, para evitar instabilidades.



$x(k)$ - filter input

$d(k)$ - filter desired response

$y(k) = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{X}_k$ - filter output

$\mathbf{W} = [w_0 \ w_1 \ \dots \ w_{N-1}]^T$ - vector of filter coefficients

$\mathbf{X}_k = [x(k) \ x(k-1) \ \dots \ x(k-N+1)]^T$ - vector of the last N inputs

$e(k) = d(k) - y(k) = d(k) - \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{X}_k$ - output error

O erro quadratico medio da saída $E[e^2]$ pode ser minimizado pelo ajuste continuo dos pesos do filtro de acordo com o algoritmo:

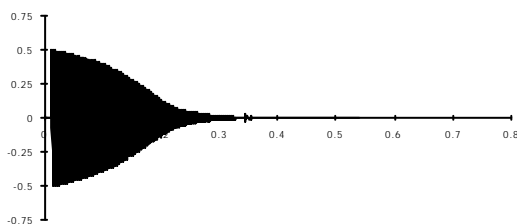
$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + 2 \cdot \mu \cdot e(k) \cdot \mathbf{X}_k$$

onde μ é um ganho que regula a estabilidade e a velocidade de convergencia.

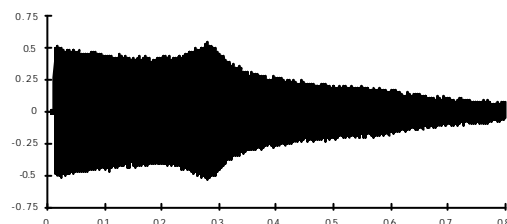
O Recursive Least Mean Squares (RLMS) é similar ao LMS, mas contem polos e zeros na função de transferencia. A presença dos polos reduz a quantidade de coeficientes do filtro, mas pode tornar o sistema instavel.

O Filtered-X LMS é usado quando a saída de erro passa por algum tipo de planta e não pode ser medida diretamente. Um filtro temporal discreto, com uma função de transferencia similar a planta é usada para compensar o efeito da planta sobre o sinal de saída, filtrando, e depois alimentando o algoritmo adaptativo. Na fig. 7.1 resultados da simulação.

Tom puro de 300 Hz - Filtered-X LMS - 20 Coeficientes



Tom puro 400Hz - Filtered-X LMS - 20 Coeficientes



8 Conceitos do algoritmo genético.

A evolução e 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 a 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.

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).

Define-se genótipo como sendo a constituição gênica do indivíduo. Chama-se fenótipo o caráter exibido pelo indivíduo, reflexo do genótipo.

Todos os seres vivos apresentam uma grande quantidade de mutações que os diferenciam um dos outros, bem como uma espécie das demais. Assim é que existem diferentes cores de olhos (azuis, castanhos, verdes), tipos de cabelos (liso, crespo, encarapinhado), cor de 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).

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

O algoritmo genético ^[2] procura reproduzir este mecanismo natural através de uma sequência de etapas:

- 1- estudo das variáveis que influem no processo.
- 2- determinação da sensibilidade de cada uma das variáveis, a fim de determinar o tamanho ideal do segmento cromossômico responsável por cada variável.
- 3- determinação do tamanho do cromossomo (soma do tamanho de todos os segmentos cromossômicos).
- 4- criação de uma população distinta, que representa o espaço amostral e seja o mais disperso o 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 que 0.5) ou 1 (número maior que 0.5).
- 5- para cada indivíduo da população é calculado, obtido através de medida ou obtido em uma pesquisa em uma tabela pré determinada o valor do índice de desempenho. Este índice mede o desempenho do indivíduo em relação as condições do ambiente.
- 6- seleção dos indivíduos com melhor índice de desempenho para cruzamento, que é feito através do crossover de seus cromossomos, seguido de um cálculo estatístico para geração de mutação gênica.
- 7- cálculo do índice de desempenho da nova geração como no passo 5.
- 8- verificação da dispersão da população para término do cálculo. Se os valores convergirem, vai para o passo 9, se não vai para o passo 6.
- 9- 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 esta representado cada etapa do algoritmo genético ^[31] a ser implantado no programa de computador:

Inicialização da população

Passo 1 : Seleção dos parentes.

| | Primeira população | Valor objetivo $z=f(x,y)$ |
|---|--------------------|---------------------------|
| | 1100110110101000 | 3.481746 |
| | 0101010110110101 | 3.668023 |
| ⇒ | 1000010100110110 | 6.261380 |
| ⇒ | 1101011111001100 | 12.864222 |

Passo 2: Crossover

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

Passo 3: Mutação

| | | |
|------------------|--|------------------|
| 1101010100110110 | | 1000011111001100 |
| | | |
| V | | V |
| 1111010100100110 | | 1000011111001100 |
| $z = 8.044$ | | $z = 6.092$ |

Passo 4: Reinserção

| | Segunda população | Valor objetivo $z=f(x,y)$ |
|---|-------------------|---------------------------|
| ⇒ | 1111010100100110 | 8.044 |
| ⇒ | 1000011111001100 | 6.092 |
| | 1000010100110110 | 6.261380 |
| | 1101011111001100 | 12.864222 |

Passo 5: se o resultado não convergiu, vai para o passo 1.

Desta forma são obtidas as melhores soluções para um problema com as características:

- o número de soluções é muito grande, e deve atender a algum índice de desempenho. Ocorre na evolução dos seres vivos e na obtenção do sinal ótimo para redução do ruído.

- não é possível fazer o levantamento do índice de desempenho de todas as possíveis combinações de cromossomos.

- o sistema deve ir aprendendo com o tempo e se adaptando a novas condições externas. Sugere a associação com algoritmos adaptativos.

- o cálculo deve ser feito em tempo real para atuação imediata.

- o algoritmo apresenta uma característica de paralelismo muito acentuada e ótima para ser explorada com processamento paralelo. Uma vez selecionados os pares a serem cruzados, o cruzamento e o cálculo do índice de desempenho pode ser feito independentemente.

Na figura 8.1 e 8.2 esta simulado um caso de pesquisa com uma função de fitness bastante particular com vários máximos locais, e o caminho seguido pelo algoritmo para obtenção do máximo global.

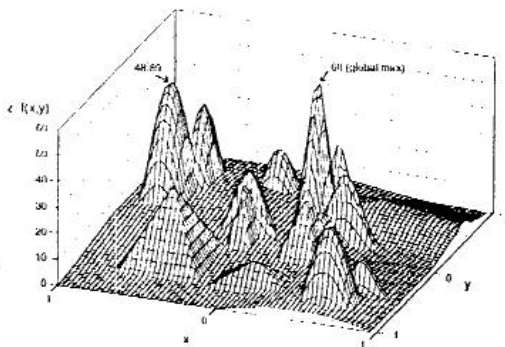


Fig. 8.1: Função objetivo modelo.

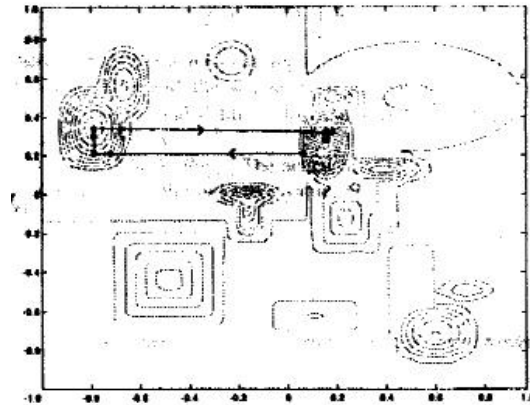


Fig. 8.2: Caminho realizado para pesquisa do máximo.

9 Simple Genetic Algorithms (SGA) aplicado ao cancelamento de ruído.

Neste algoritmo foi utilizado o conceito descrito anteriormente, onde foram codificados no cromossomo a frequência (10 bits com valores entre 10 e 50Hz), fase (10 bits, entre 0 e 2π) e a amplitude (10 bits, entre 80 e 120).

O ruído gerado era de 30 Hz, amplitude 100.

A população era formada por 80 indivíduos, máximo número de gerações 80, probabilidade de Crossover 0.5 e probabilidade de Mutação 0.05

Na figura 9.1 estão mostrados os resultados de uma simulação. Nos gráficos, a ordenada representa a geração e na abcissa o valor da frequência, fase, amplitude e energia media de cada indivíduo.

Pode-se observar que os indivíduos não convergem para nenhum valor, e que a energia não varia significativamente.

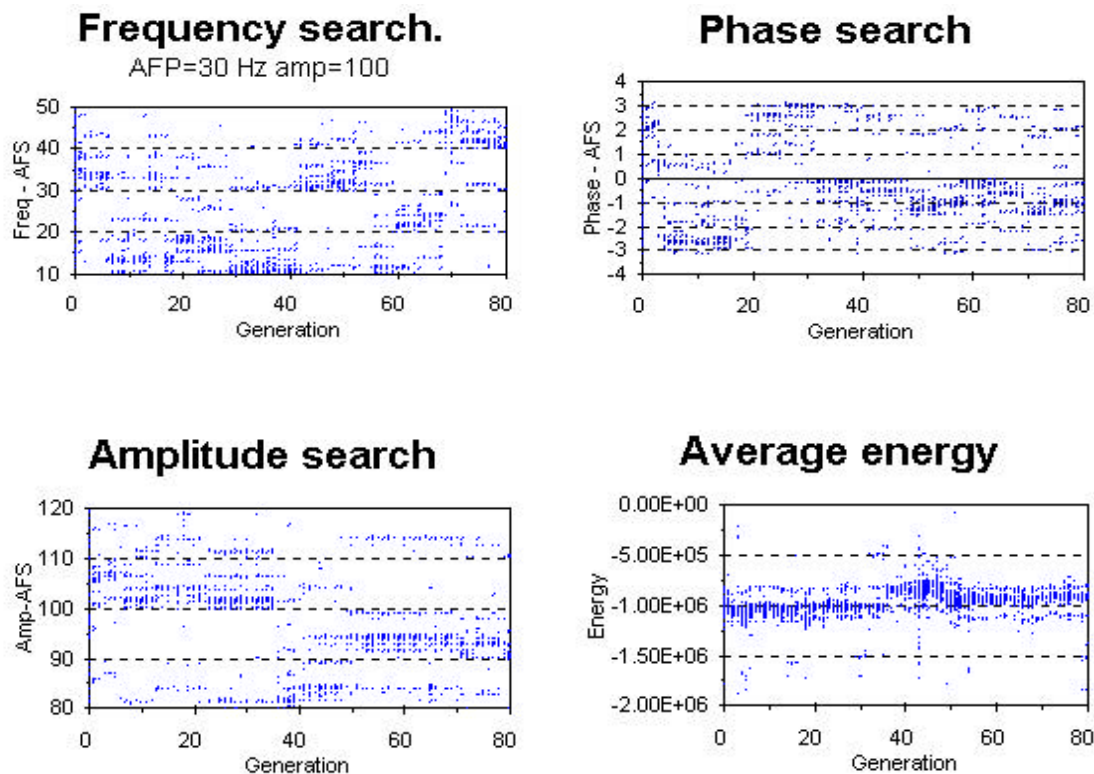


Fig. 9.1: Resultados da frequência, fase, amplitude e energia media para SAGA para cada indivíduo de cada geração.

Pode-se concluir que o Simple Genetic Algorithms não converge por que a interferência destrutiva tem frequência, fase e amplitude muito sensível a pequenas variações introduzidas pelo intervalo de pesquisa e há muitos mínimos locais na função objetivo com valores muito próximos entre si.

10 Algoritmo iterativo: Golden section search em uma dimensão.

A fim de buscar o máximo, mínimo ou raízes de uma função, este algoritmo define uma estratégia de busca através da comparação dos valores dos extremos e do meio do intervalo de interesse.

A cada comparação, dependendo do objetivo a ser atingido e dos valores um dos segmentos é descartado e a pesquisa continua no outro.

A convergência fica definida quando o comprimento do segmento for suficientemente pequeno. A figura 10.1 mostra estes passos.

O algoritmo pode ser esquematizado da seguinte forma: dada uma função definida no intervalo (a,b) com uma raiz contida no intervalo (a,b) - pontos 1 e 2.

- Calcular a função em um ponto intermediário x , e nos extremos - ponto 3.

- Obter dois intervalos menores (a,x) e (x,b) - pontos 1, 3 e 3,2.

-Selecionar o intervalo onde a raiz, o máximo ou mínimo ocorre - intervalo 3,2.

-O processo continua ate que o tamanho do intervalo seja aceitável.

Algumas técnicas como “Steepest descent” generalizam este conceito para mais dimensões.

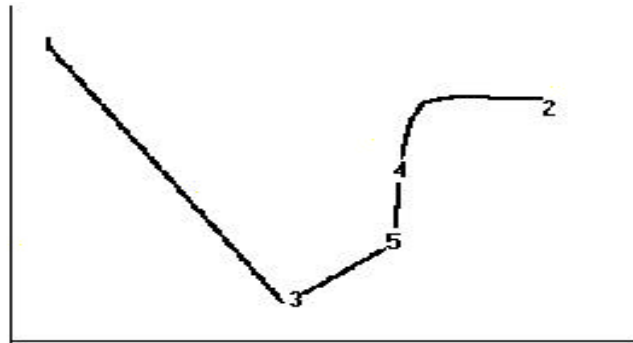


Fig. 10.1: Três ciclos de iteração usando Golden Section search.

10.1 Iterative Genetic Algorithms (IGA).

Para achar o valor da interferência destrutiva, foi combinado o algoritmo genético ao algoritmo Golden Section Search.

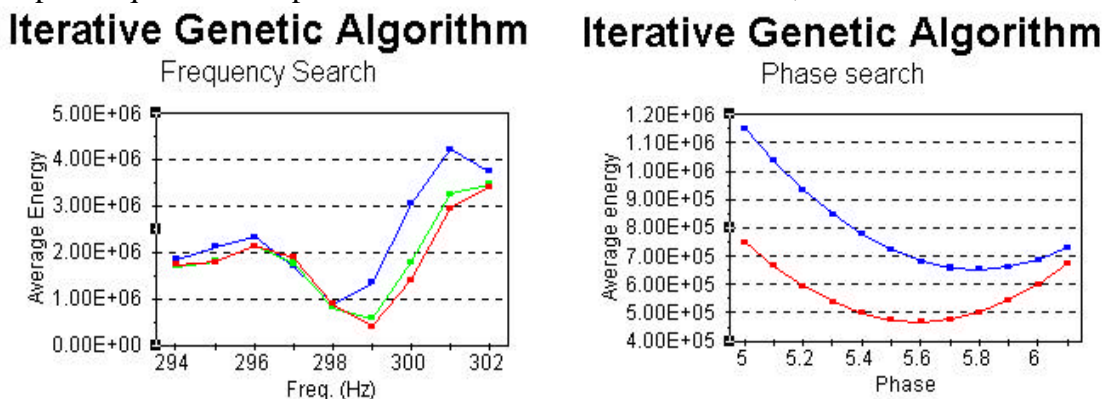
O algoritmo genético faz a pesquisa dos valores de frequência e dos limites onde pode estar o ponto de interferência.

Foi utilizado como função objetivo a área dos canais da transformada de Fourier obtida através de FFT, com um cromossomo que codifica os valores de frequência.

Nos pontos onde ocorre cada convergência do algoritmo genético, é utilizado um algoritmo iterativo para cada uma das variáveis: frequência (limitada entre os valores dos extremos do pico), amplitude (proporcional a área do pico de frequência) e a fase (0 a 2π).

As sequências de iterações seguem a ordem frequência, fase, amplitude, que se repetem ate convergir.

A figura 10.2 mostra que o algoritmo convergiu para valores de frequência, fase e amplitude que não correspondem ao valor de interferência destrutiva, mas a um mínimo local.



Iterative genetic algorithm

Amplitude search

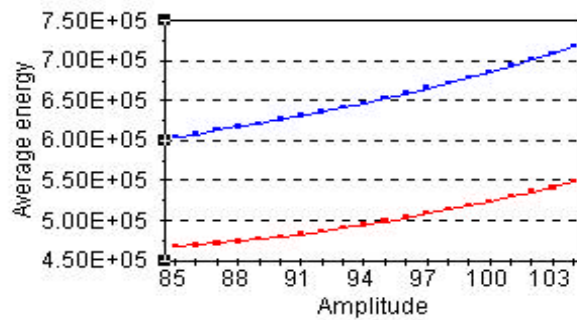


Fig. 10.2: Resultados da iteração para um valor de convergência do GA.

Pode-se concluir sobre o Iterative Genetic Algorithms que converge para a frequência correta no nível do GA, mas não encontra o mínimo global, apenas o local (no nível iterativo).

A velocidade de cálculo do algoritmo foi extremamente satisfatória.

11 Successive approach genetic algorithms (SAGA)- Embedded.

O principal problema encontrado no IGA é consequência da pesquisa começar pelos extremos do intervalo de cada variável, encontrando os mínimos locais.

Se o algoritmo de pesquisa partisse de vários pontos distintos, poderia convergir para o valor global.

Assim, substituiu-se o algoritmo iterativo por um segundo algoritmo genético.

Cada geração tem vários indivíduos distribuídos aleatoriamente e homoganeamente em todo o intervalo, e algum deve cair ou ser gerado sobre os valores de interferência destrutiva.

O cromossomo utilizado codifica a frequência, fase e amplitude entre os limites definidos no primeiro GA. A função objetivo calcula a energia média do sinal resultante.

Na primeira aplicação foi utilizado um tom puro de frequência 300Hz, e amplitude 100. O algoritmo encontrou para cancelar o ruído um sinal de frequência 299.96 Hz, amplitude 100.6 e fase 4.44 rad.

O resultado esta na figura 11.1, com uma redução de 43 dB.

Successive Approach GA

Noise cancellation

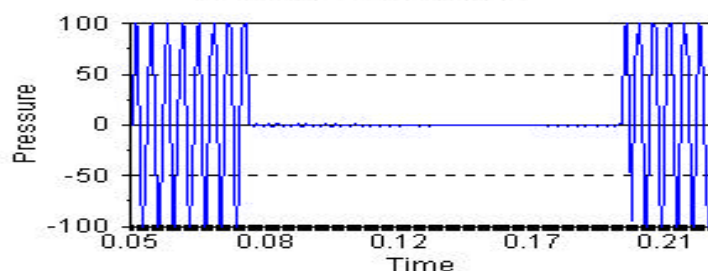


Fig.11.1: Resultado do SAGA para tom puro.

Para um ruído com múltiplas frequências foram utilizados os valores: 200, 250, 300, 350 Hz, com amplitude 100 e energia total: 19940.

Na tabela 11.1 estão mostradas as frequências encontradas pelo algoritmo genético, a energia do sinal resultante e a redução para o primeiro ciclo de indivíduos obtidos pelo GA. Na fig. 11.2 o ruído utilizado e os resultados do primeiro, segundo e terceiro ciclo no domínio do tempo e da frequência.

A fig. 11.3 mostra a queda de intensidade em função do numero de componentes usados no sinal. Pode-se concluir que rapidamente (com quatro componentes) o algoritmo elimina boa parte do sinal.

Conforme mais frequências foram sendo geradas, maior foi sendo a redução do ruído (comportamento assintótico).

| Frequência | Amplitude | Fase | Energia | Redução (dB) |
|------------|-----------|------|---------|--------------|
| 249 | 92 | 0.04 | 14935 | -1.25 |
| 349 | 103 | 3.53 | 10004 | -2.99 |
| 198 | 108 | 2.84 | 5235 | -5.88 |
| 299 | 92 | 4.41 | 580 | -15.3 |
| 197 | 28 | 1.05 | 540 | -15.6 |
| 348 | 26 | 1.54 | 465 | -16.3 |
| 249 | 24 | .66 | 493 | -16.0 |
| 344 | 18 | 2.78 | 496 | -16.0 |
| 303 | 28 | 2.33 | 657 | -14.8 |
| 202 | 27 | 6.08 | 501 | -15.9 |
| 355 | 23 | 4.39 | 397 | -17.0 |
| 343 | 8 | .12 | 356 | -17.4 |
| 194 | 6 | 4.24 | 368 | -17.3 |

Tab. 11.1: Componentes encontradas pelo SAGA no primeiro ciclo de calculo.

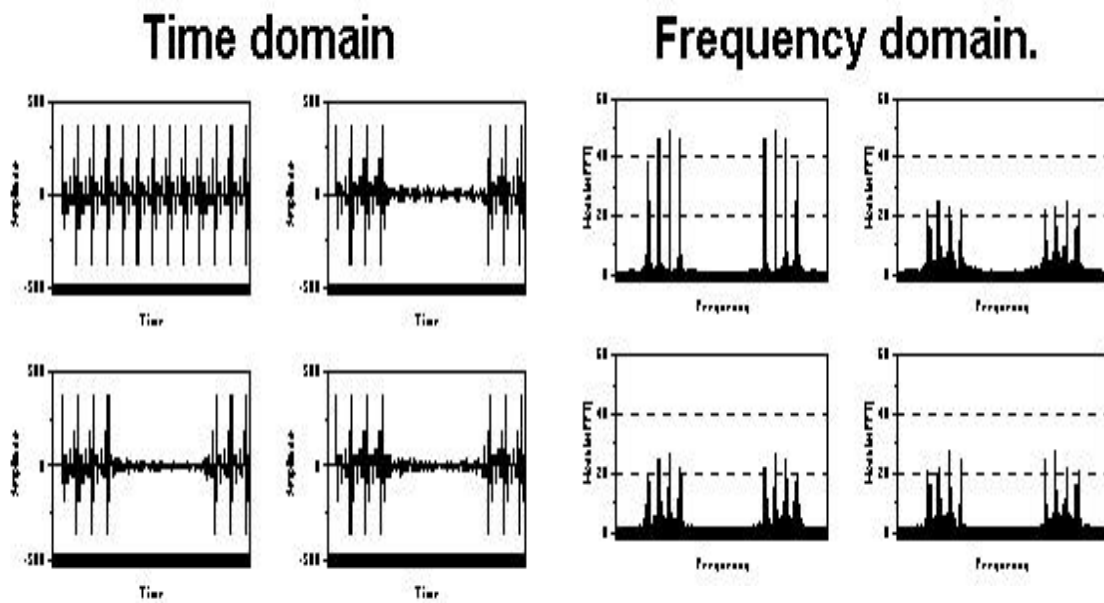


Fig. 11.2: Sinal resultante no domínio de tempo e frequência para vários ciclos de calculo.

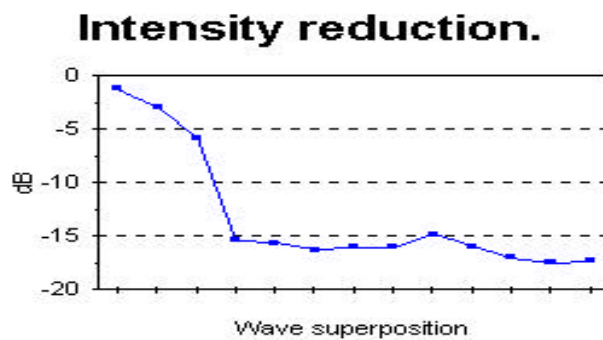


Fig. 11.3: Redução de intensidade do sinal sobreposto.

Pode-se concluir sobre o SAGA que convergiu para o valor de interferência destrutiva. Além disso, ele utiliza um algoritmo que pode explorar as seguintes técnicas computacionais:

- processamento paralelo para calcular o nível 1.
- técnicas de processamento paralelo para o nível 2 com as seguintes possibilidades:
 - cada processador com alguns indivíduos.
 - cada processador calculando um algoritmo genético independente.
 - processamento paralelo de um algoritmo genético.

Será levado em conta o menor tempo de processamento. Com este desenvolvimento, estaremos capacitados a desenvolver sistemas paralelos complexos.

12 Frequência variando no tempo.

Outro caso possível de aplicação é aquele em que a frequência varia no tempo, em sistemas que ainda não atingiram regime ou em que a frequência varia sempre no tempo, como motores de veículos onde a velocidade varia continuamente.

Para analisar o espectro de frequência, tomamos um sinal onde a frequência variava linearmente de 280 a 300Hz, 260 a 300Hz, e de 200 a 300Hz. Na figura 12.1 resultado da transformada de Fourier para os vários casos.

Pode-se observar que quanto maior a faixa de variação da frequência, maior será a largura do pico. Para o algoritmo genético isto implica em termos vários indivíduos igualmente adaptados, porém com frequências diferentes. Estas frequências poderão interferir entre si, dificultando o cancelamento, e até criando mais ruído.

Por outro lado, dependendo da taxa de amostragem, do tamanho do buffer de dados e da velocidade do processador, se a variação da frequência for pequena durante o ciclo de processamento, haverá apenas um pequeno alargamento dos picos. Esta condição já foi tratada com sucesso.

No caso de descontinuidades na frequência (como dente de serra, por exemplo), haverá componentes do sinal com altas frequências e então o efeito de alising é um fator importante.

O filtro anti-aliasing impede que as frequências mais altas que a frequência de corte definida pela condição de Nyquist interfiram no resultado da transformada em baixas frequências.

O algoritmo genético pode se basear no resultado da transformada para calcular as frequências a serem utilizadas no cancelamento. A energia carregada pelas altas frequências não serão canceladas, e o resultado será parcial.

No caso de um ruído aleatório ^[29], o algoritmo genético deverá ser utilizado em combinação com outros algoritmos do tipo adaptativo para surtir bom resultado.

Freq. variando no tempo

Larg. 20, 40 e 100

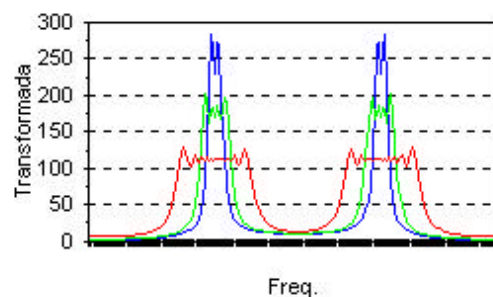


Fig. 12.1: Alargamento dos picos causado pela variação da frequência no tempo.

13 Proposta de trabalho.

- O IGA poderá convergir se uma técnica mais complexa for utilizada, tal como Steepest descent ou tree dimensional golden section search.

- Desenvolvimento do SAGA para um DSP TMS320C25 enquanto a plataforma multiprocessada não estiver disponível.
 - Um projeto expandindo o sistema para 3 TMS320C40 pDSP e um TMS320C32 para aquisição de dados (32 entradas e 2 saídas) esta sendo estudado para desenvolvimento do SAGA para a plataforma multiprocessada.
 - Analise do efeito da geometria no algoritmo, utilizando um duto de cano de PVC, permitindo o estudo da modificação na geometria do duto, posicionamento dos microfones e alto-falantes e condições físicas dentro do duto.
 - Estudo de viabilidade e prototipação da aplicação dos algoritmos em geradores de ruídos reais:
 - Turbina de avião (possibilidade de aterrissagem nas cidades).
 - Sistema de ar condicionado (silencio nos escritórios).
 - Bombas, motores e turbinas (redução de ruído industrial).
 - Sistemas de alivio de pressão (redução de ruído industrial).
 - Veículos (redução de ruído nas ruas).
- Serão estudados:
- instrumentação de leitura e atuação necessária em cada caso.
 - redução esperada.
 - custo da implementação.
 - extensão da região de atuação.
 - velocidade de convergência.

Bibliografia.

- [1] Basile,R.; Magalhães, L. E.; “Citologia e genética” - Editora Cultrix(1976)
- [2] Goldberg,D.E.; “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning” - Addison-Wheesley (1989)
- [3] Nelson, P.A.; Elliott, S.L.; “Active Control of Sound” - Academic Press (1994)
- [4] Hamada, H.; Takashine,N.; Nelson,P.A.; “Genetic algoritms used for active control of sound - search and identification of noise sources” - Active 95
- [5] Wangler,C.; Hansen, C.; “Genetic algorithm adaptation of IIR filters by direct adjustment of poles and zeroes for active control of sound and vibration” - Active 95
- [6] Widrow, B.; Stearns, S.D. ; “Adaptive signal processing” - Englewood-Clifs Prentice-Hall (1985)
- [7] Haykin, S.; “Introduction to adaptative filters” - New York MacMillan (1984)
- [8] Uto,S.; Hamada, H.; “Transform domain adaptive audio equalizer for active control of sound field” - Active 95.
- [9] 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 vibration (1973) 31 (1), 1-72.
- [10] 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 vibration (1973) 31 (2), 137-174.
- [11] Swinbanks, M.A.; “The active control of sound propagation in long ducts” - Journal of sound vibration (1973) 27(3), 411-436.
- [12] Munjal, M.L.; Eriksson,L.J.; “An analytical, one dimensional, standing-wave model of a linear active noise control system in a duct” - JASA 84(3), 1086-1093.
- [13] Xuesong,G; Qunli,W.; Fu,L.S.; “A single sensor ANC system based on the fast least square algorithm” - Active 95.
- [14] Eriksson,L.J.; Allie, M.C.; Greiner, R.A; “The selection and application of an IIR adaptive filter for use in active sound attenuation” IEEE Trans. Acoustic, Speech, and signal processing Vol. ASSP-35, N. 4 , April 1987.
- [15] Eghtesadi, K.; Leventhall, H.G.; “An active attenuation of noise-The monopole system”JASA 71(3),1982.
- [16] Poole,J.H.B.; Leventhal, H.G.; “An experimental study of Swinbanks method of active attenuation of sound in ducts” J. sound vibration 49(2) 257-266 1976.
- [17] Macedo,H.; “Dicionário de física ilustrado” Ed. Nova Fronteira, 1976
- [18] Butkov; Física Matemática
- [19] Sears & Zemansky; “Física” Ao livro tecnico 1962.
- [20] Hanis,D.A.; “Noise Control Manual”
- [21] Antonious,A; “Digital Filters: analysis, design and application” McGraw Hill 1993.
- [22] French,A.P.; “Vibraciones y ondas”Ed. Reverte, S.A. 1974.
- [23] Kinsler,L.; Feyl,A.; Copers,A.B.; Sanders ,J.V.; “Fundamentals of acoustic” John Wiley 1982.
- [24] Sheperd,I.C; Cabelli,A.;LaFontaine,R.F.; “Characteristics of soundpeakers operating in an active noise attenuator” Journal of Sound and Vibration (1986) 110(3), 471-481.
- [25] Rodrigues,R.R.; “Sistema de controle ativo de ruidos acusticos em dutos”Trabalho de graduação (1992).
- [26] Distefano,J.J.; Stublbaud,A.R.; Williams,I.J.; “Sistema de retroação e controle (realimentação)”McGraw Hill 1972.
- [27] Kuo,B.C.; “Sistemas de controle automatico” Prentice Hall 1985.
- [28] Ogata,K.; “Engenharia de controle moderno” Prentice Hall 1993.
- [29] Newland,D.E.; “Introduction to Random vibration, spectral and wavelet analysis” Longman 1993.
- [30] Balluder,K.;Salles,J.A.; Schroeter,C.; Smith,M.L.; “Selecting an operanting system, Part IV:Linux’ Computing in physics, vol 10, n.1 jan/fev 1996.

- [31] Man,K.F.; Tang,K.S.; Kwong,S.; “Genetic Algorithms: concepts and applications” IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 43 N. 5 (1996).