

Para utilização deste sinal no filtro adaptativo, o parâmetro μ (razão de convergência) é modificado para o valor de 0,01. Os outros parâmetros se mantêm os mesmo da simulação inicial.

O resultado obtido com a utilização do filtro LMS e a varredura da Fig. 4.42 está mostrado na Fig. 4.43-a. Na Fig. 4.43-b está mostrado o erro absoluto (varredura teórica menos varredura estimada) entre a varredura estimada e a varredura teórica.

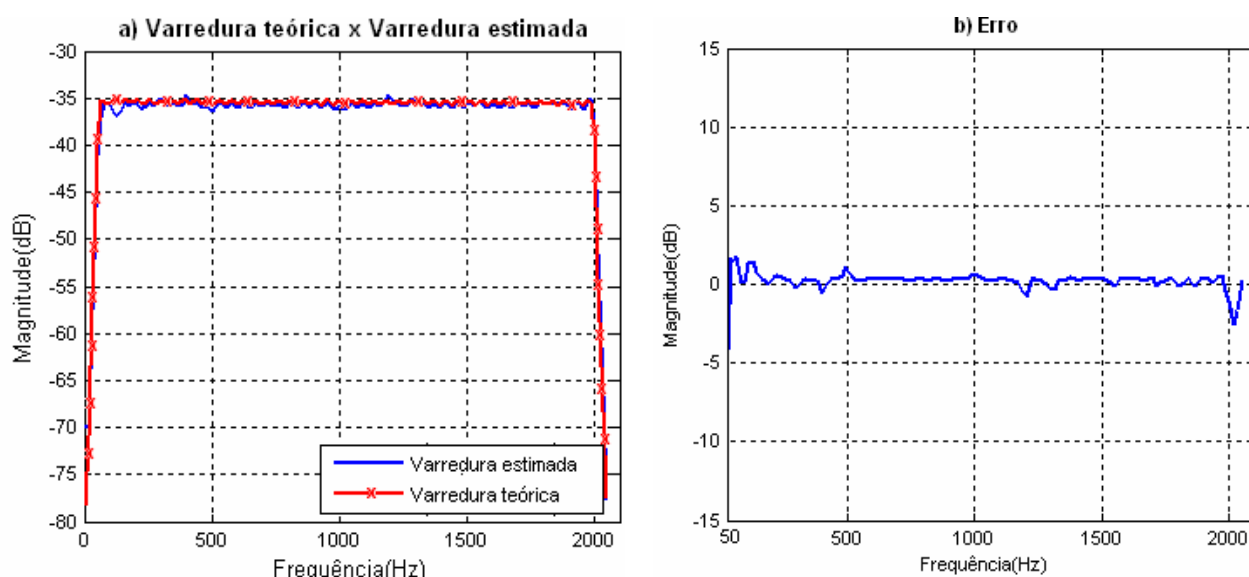


Figura 4.43: a) - Comparação entre a varredura estimada e a varredura teórica no ponto receptor. b) Erro absoluto entre a varredura teórica e a varredura estimada (varredura teórica – varredura estimada).

Analisando as Figs. 4.43-a e 4.43-b pode-se concluir que a mudança ocorrida nesta simulação com relação à simulação inicial (utilizando varredura ascendente) é a redução do valor do erro. Esta mudança é melhor observada analisando as Figs. 4.39-b e 4.43-b, onde nota-se que a redução ocorre nos picos citados na Fig. 4.41-b. No entanto esta redução é da ordem de 0,25 dB.

Observa-se que o erro mostrado na Fig. 4.43-b não atinge valores maiores que 1 dB dentro da faixa de frequência 50 Hz - 2000 Hz.

4.8 Simulação 6 - Três fontes sonoras e fonte de referência com amplitude variável

Nesta simulação é usado o mesmo modelo da simulação 5, mantendo as mesmas fontes e a varredura ascendente durante 10 segundos. A modificação nesta simulação é quanto à varredura que atinge o receptor, onde o mesmo possui amplitude variável, ou seja, atenuação da amplitude com o aumento da frequência de acordo com a equação da reta expressa na Eq. (4.7):

$$A = 2,6153 - 0,0013f \quad (4.7)$$

onde A é a amplitude da varredura e f é a frequência do sinal em Hz.

Com esta varredura de amplitude variável, pretende-se modelar o que acontece na propagação sonora em campo livre, ou seja, atenuação da amplitude à medida que aumenta a frequência. A varredura senoidal mantém a mesma velocidade de varredura, portanto os parâmetros do filtro não modificarão em relação à simulação 5 ($\mu = 5 \times 10^{-3}$) para a varredura ascendente.

Os sinais de entrada do diagrama do filtro LMS (Fig. 4.35) estão mostrados na Fig. 4.44-a e 4.44-c.

Analisando a Fig. 4.44-b observa-se que a energia do sinal da varredura senoidal diminui à medida que aumenta a frequência, permanecendo, nas altas frequências, apenas as frequências provenientes das fontes 1, 2 e 3, as quais não possuem redução de energia. O fato descrito é melhor observado comparando as Fig. 4.36-b e 4.44-b.

Os picos presentes na Fig. 4.44-b são os mesmos presentes na Fig. 4.36-b.

Observa-se ainda na Fig. 4.44 que o sinal de referência, ou seja, sinal obtido próximo ao gerador de varredura possui amplitude constante. Desta maneira, a conclusão obtida na análise de sensibilidade, quanto à influência do nível de energia do sinal de referência nos resultados estimados pelo filtro, pode ser comprovada mais uma vez.

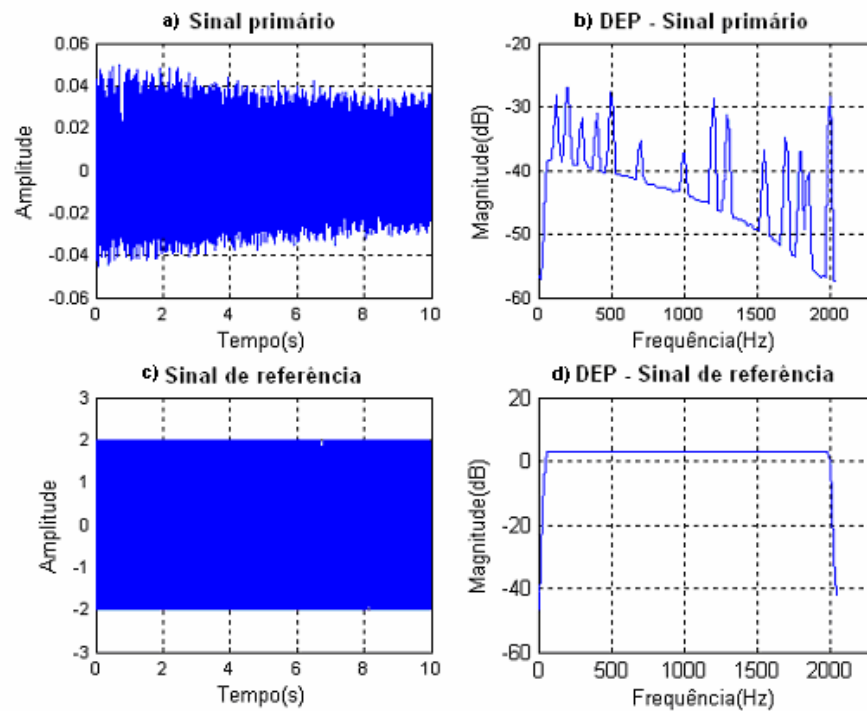


Figura 4.44 - Simulação 6: a) Sinal estimado no receptor, ou sinal primário. b) DEP – Densidade espectral de potência do sinal primário. c) Sinal estimado próximo ao gerador de Varredura, ou sinal de Referência. d) DEP do sinal de Referência.

O resultado obtido com o filtro adaptativo é mostrado na Fig. 4.45-a. Na Fig. 4.45-b é mostrado a varredura teórica (obtida numericamente) que atinge o receptor para fins de comparação com o sinal estimado.

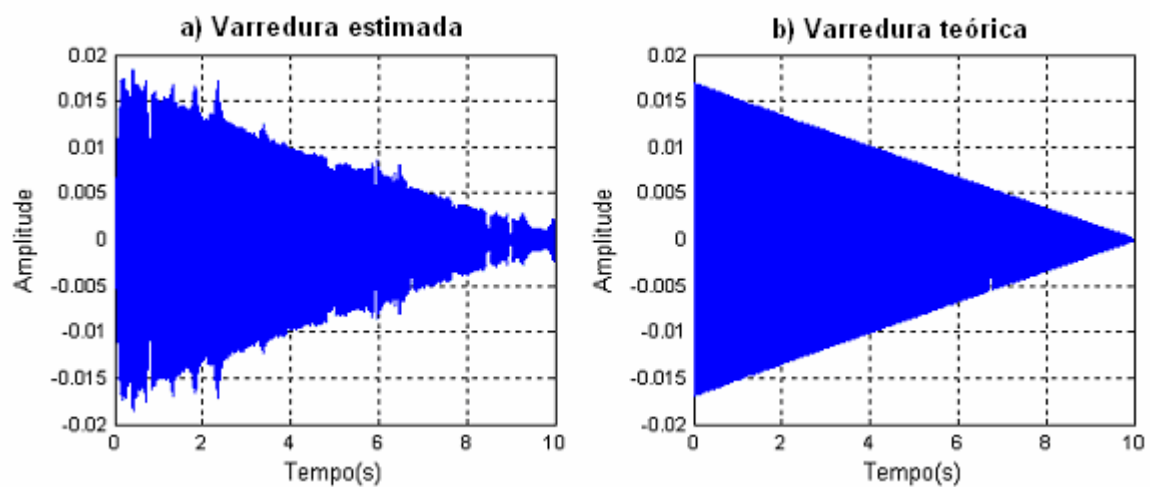


Figura 4.45 - Resultados da simulação 6.

Na Fig. 4.46-a estão mostrados os dois sinais da Fig. 4.45, ambos no domínio da frequência. Na Fig. 4.46-b é mostrado o erro absoluto (varredura teórica menos varredura estimada) entre os dois sinais da Figura 4.46-a.

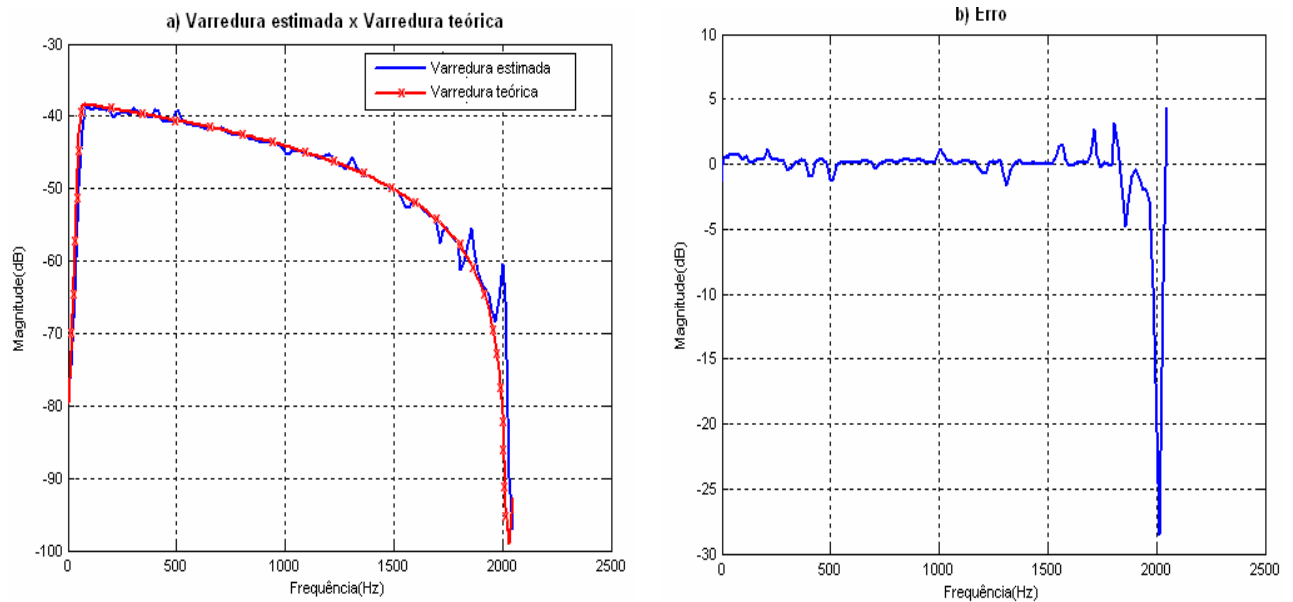


Figura 4.46 – a) Comparação entre a varredura estimada e a varredura teórica no ponto receptor. b) Erro entre a varredura estimada e a varredura teórica.

Analisando a Fig. 4.46-a pode-se observar que o filtro consegue eliminar grande parte da energia provinda da contribuição das Fontes 1, 2 e 3, no entanto, nas altas frequências (acima de 1750 Hz) esta afirmação não é verdadeira. Isto pode ser explicado pelo fato de que nas altas frequências a contribuição em energia do gerador de varredura é menor se comparada com a contribuição das Fontes 1, 2 e 3 juntas. Então, esta simulação tem como intuito validar mais uma vez a análise de sensibilidade realizada no início deste capítulo.

Analisando a Fig. 4.46-b tem-se que o erro possui valor máximo de -5 dB até 1875 Hz. Acima de 1875 Hz o erro atinge o valor máximo de -28 dB, e se deve ao fato de a contribuição em energia da varredura no ponto receptor ser menor do que a contribuição das outras fontes.

4.9 Simulação 7 - Três fontes sonoras e presença de uma barreira

Nesta simulação é mantido o mesmo modelo da simulação 6 (Fig. 4.33), mantendo a varredura com atenuação da amplitude à medida que aumenta a frequência (utilizou a Eq. 4.7), porém, a modificação realizada é que no ponto receptor é adicionada uma nova varredura com um *delay* em relação à varredura original (o qual é a varredura utilizada na simulação 6), ou seja, um atraso temporal, pretendendo então simular o efeito de uma reflexão causada pela presença de uma barreira no ambiente.

Assim, no ponto receptor têm-se contribuições das seguintes fontes: Fonte1, Fonte2, Fonte3, varredura com amplitude variável, e a mesma varredura também com amplitude variável, porém, com um atraso (*delay*) de 0,0175 segundos (este tempo de atraso representa a presença de uma barreira a 6 metros do receptor) em relação à varredura original. Na Fig. 4.47 está mostrada a diferença de fase existente entre as duas varreduras (original e com *delay*), assim é possível avaliar o comportamento do filtro quanto à diferença de fase.

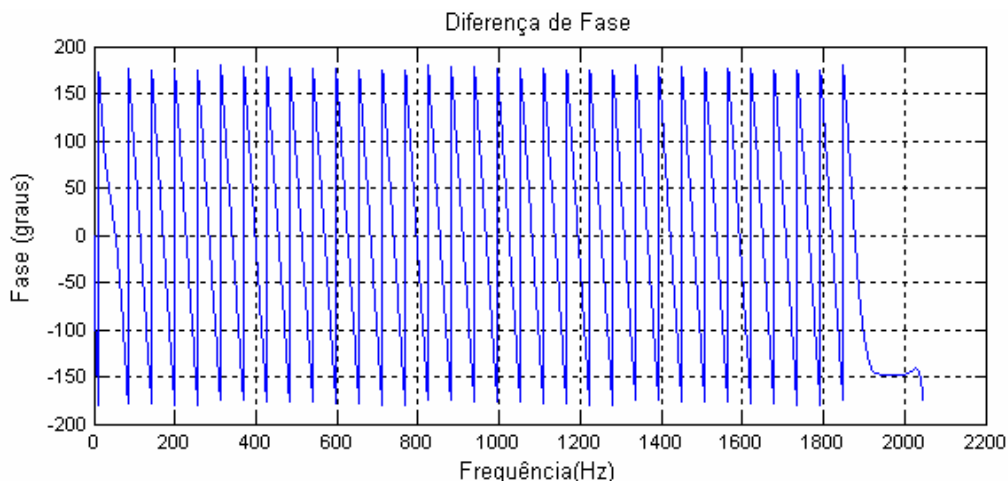


Figura 4.47 – Fase entre a varredura original e a varredura com *delay* que chegam até o ponto receptor.

Assim, os sinais de entrada do algoritmo de filtragem adaptativa estão mostrados nas Figs. 4.48-a e 4.48-c.

O resultado obtido com o filtro LMS é mostrado nas Figs. 4.49 e 4.50, onde estão mostrados as varreduras teóricas e estimadas no domínio do tempo e da frequência, respectivamente. O erro absoluto (varredura teórica menos varredura estimada) entre os dois sinais da Fig. 4.50-a está mostrado na Fig. 4.50-b.

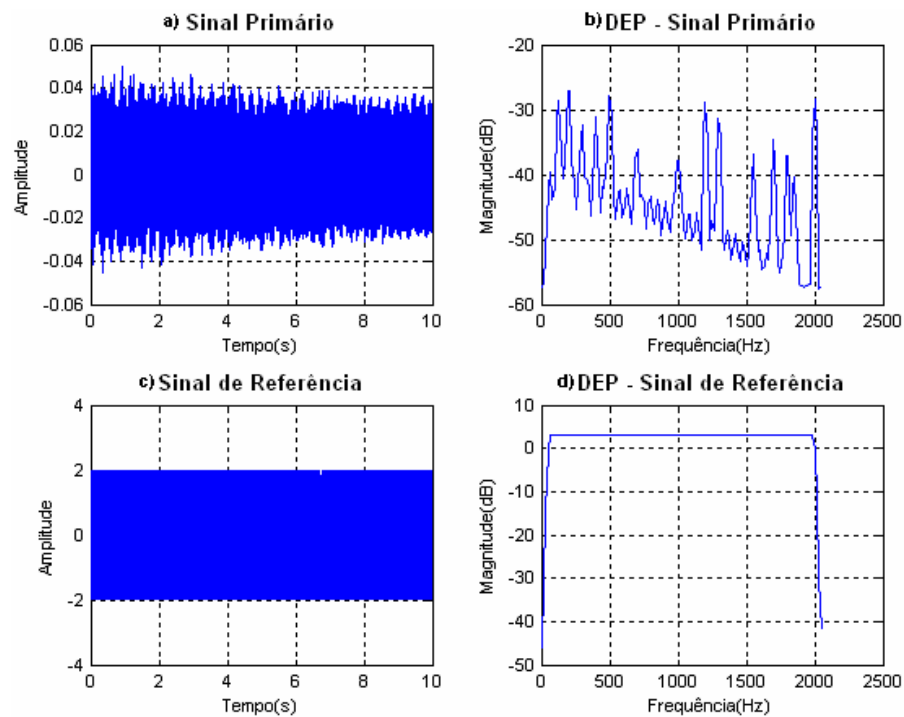


Figura 4.48 - Simulação 7: a) Sinal estimado no receptor, ou sinal primário. b) DEP – Densidade espectral de potência do sinal primário. c) Sinal estimado próximo ao gerador de Varredura, ou sinal de Referência. d) DEP do sinal de Referência.

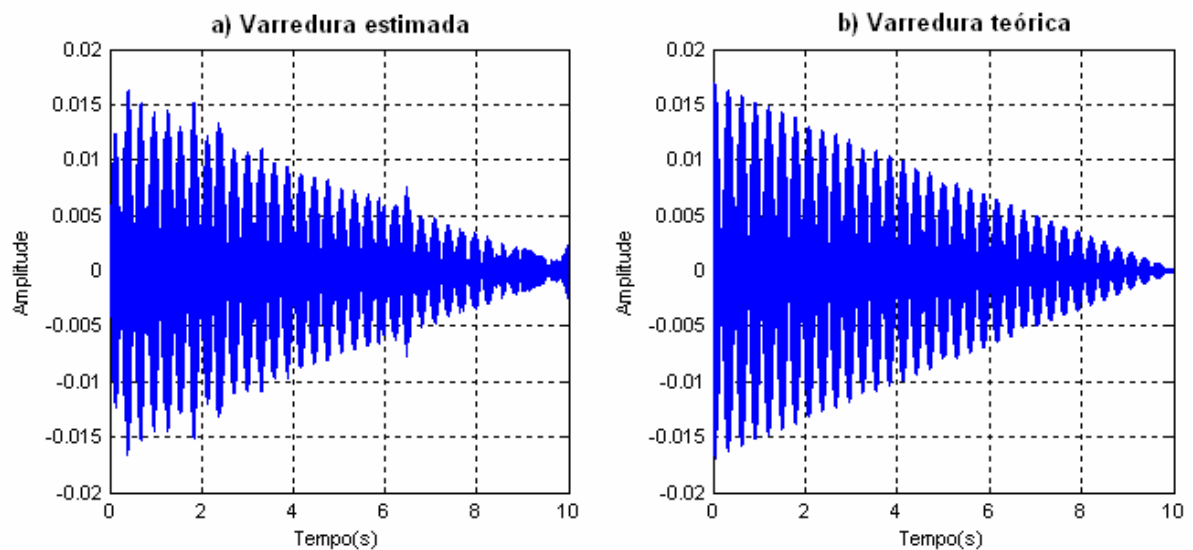


Figura 4.49 - Resultado da simulação 7 no domínio do tempo.

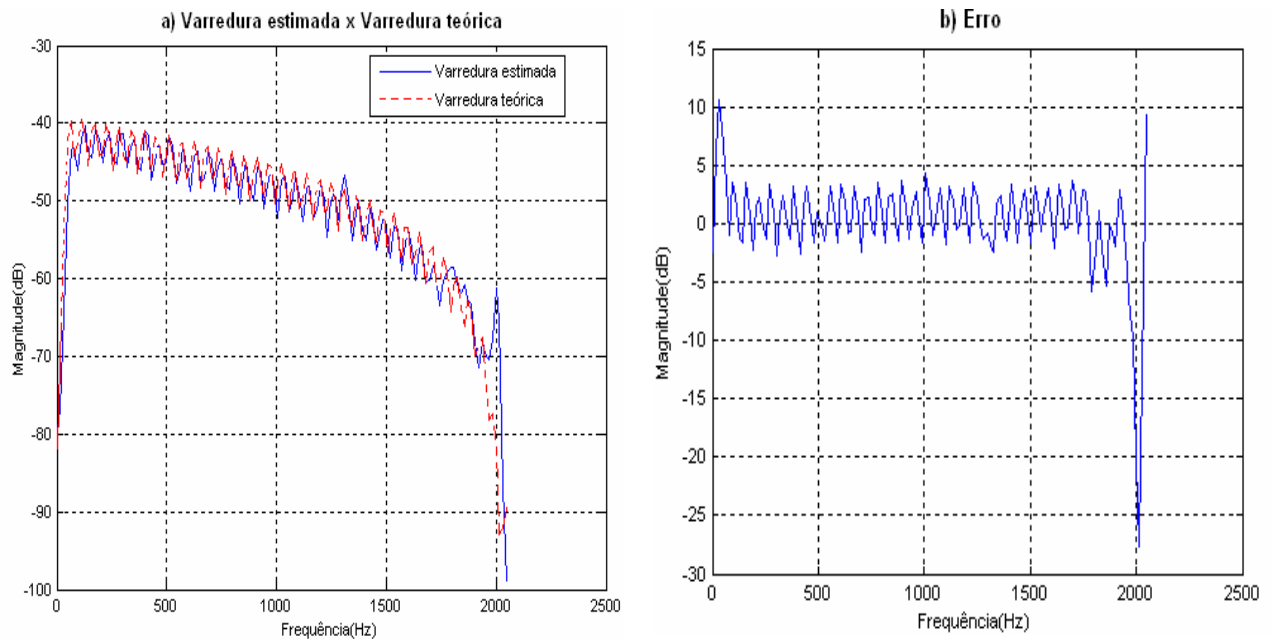


Figura 4.50 - a) Comparação entre a varredura estimada e a varredura teórica no ponto receptor. b) Erro entre a varredura estimada e a varredura teórica (varredura teórica – varredura estimada).

Analisando as Figs. 4.50-a e 4.50-b, observa que o erro aumenta acima da frequência de 1875 Hz como já explicado na simulação 6. No entanto, conclui-se também que o filtro não consegue eliminar a varredura que possui o atraso temporal (*delay*), o qual atinge o receptor, isto é explicado pelo fato deste filtro ser um filtro de correlação, o que é um bom indicativo para estimativa da função transferência, ou seja, esta pode ser obtida mesmo na presença de caminhos de transmissão complexos.

A Função Transferência desta simulação está mostrada na Fig. 4.51-a, e o erro absoluto entre a função transferência estimada e teórica está mostrada na Fig. 4.51-b.

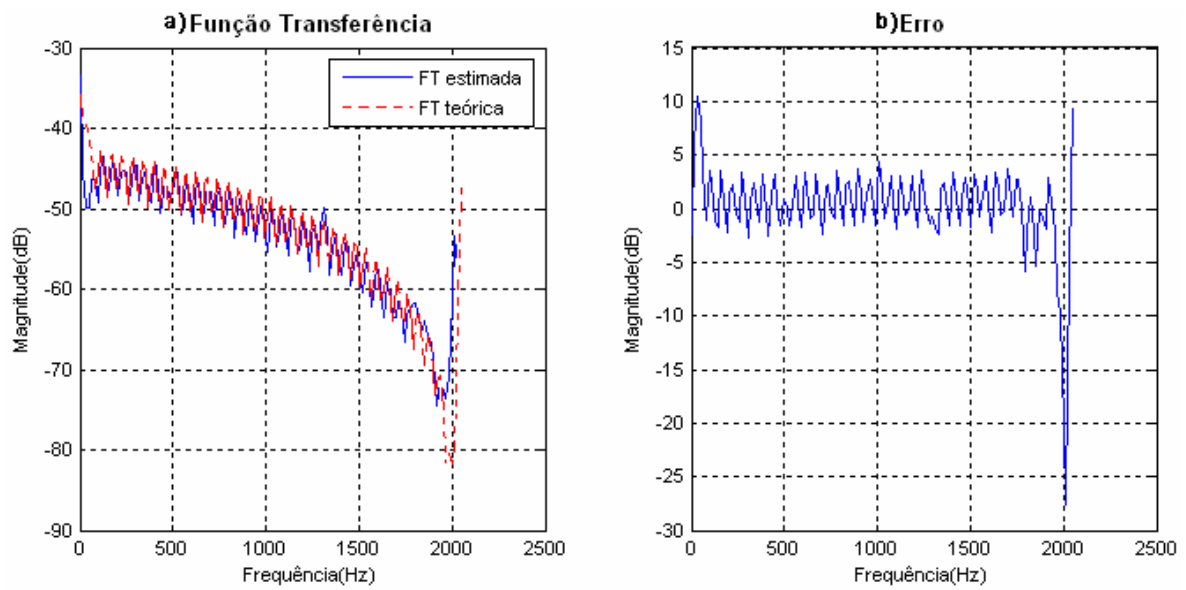


Figura 4.51 - a) Função Transferência entre a varredura estimada e teórica. b) Erro entre as duas Funções Transferências (FT teórica – FT estimada).

A próxima etapa a ser desenvolvida neste trabalho é a realização de experimentos para validar a metodologia proposta, e então verificar a validação das simulações teóricas.

CAPÍTULO V

Procedimento Experimental

5.1 Introdução

O procedimento experimental tem como objetivo validar as simulações numéricas, bem como as conclusões obtidas nestas. Para tais validações, serão realizados experimentos em dois tipos de campo acústico: reverberante (fechado) e livre (aberto).

A ‘bancada experimental’ é composta de fontes sonoras, as quais são alto falantes, gerando ruído de fontes industriais, propagando por um caminho de transmissão até atingir o ponto receptor, onde está localizado um microfone, ou seja, o receptor.

Três tipos de ruídos foram armazenados em CD (*Compact Disc*) para posterior reprodução nos alto falantes. São estes: o ruído de um exaustor e o ruído produzido por um gerador de ruído rosa, ambos obtidos em laboratório com um sistema de aquisição utilizando um microfone capacitivo. O ruído do exaustor foi obtido adquirindo o sinal de pressão sonora de um exaustor localizado no laboratório. O terceiro tipo de ruído foi obtido através da geração de um sinal do tipo Varredura Senoidal em ambiente Matlab[®] através da função *chirp*, o qual posteriormente foi convertido para um arquivo do tipo *WAV* (*Wave Sound*, ou seja, áudio).

Então, com a bancada experimental, contendo os componentes descritos acima, montada em um ambiente acústico de interesse (reverberante ou livre), a metodologia de quantificação de fontes sonoras pode ser avaliada na prática.

Neste capítulo é descrito o procedimento experimental do trabalho proposto, bem como apresentação dos resultados obtidos e análise dos mesmos.

5.2 Procedimentos Experimentais

5.2.1 Ajuste dos Parâmetros do Filtro Adaptativo

Antes de iniciar o procedimento experimental o primeiro passo a ser realizado é a determinação dos parâmetros do filtro para a varredura a ser utilizada nos experimentos, de modo que o filtro possua bom desempenho e convergência, e até mesmo boa capacidade de filtragem. Para determinação dos parâmetros ótimos do filtro adaptativo, foi realizada uma simulação numérica em ambiente Matlab[®], tal como descrito no capítulo 4.

Como já mencionado no capítulo 4, os parâmetros do filtro adaptativo dependem das características da varredura a ser utilizada, principalmente de sua velocidade de varredura na faixa de frequência de trabalho.

Quando se diz parâmetros do filtro, está se referindo aos parâmetros iniciais do algoritmo LMS, ou seja, números de pesos do filtro (L), razão de convergência (μ) e fator de esquecimento (α). O parâmetro σ , ou seja, potência do sinal de entrada no filtro é unitária.

A varredura utilizada neste capítulo possui como características:

- Linear com amplitude constante igual a 1.
- Fase nula.
- Faixa de frequência 50 Hz a 2000 Hz em 80 segundos, sendo que durante os primeiros 40 segundos ele inicia na frequência de 50 Hz até atingir 2000 Hz (ascendente) e nos próximos 40 segundos ele possui um comportamento descendente, onde se inicia na frequência de 2000 Hz até 50 Hz.

Um diagrama tempo-frequência deste sinal pode ser visto na Fig. 5.1.

Para a simulação de ajuste dos parâmetros do filtro LMS, simulou-se um ambiente em campo livre com duas fontes, onde uma das fontes é o gerador de varredura e está localizado próximo à fonte que se quer identificar (Fig. 4.5 do Capítulo 4). A configuração do modelo desta simulação é igual à simulação 1 do capítulo 4.

Na Fig. 5.2 estão mostrados os sinais estimados próximos às fontes de ruído para o modelo proposto. Na Fig. 5.2-b e 5.2-d estão mostrados as densidades espectrais de potência (DEP) da fonte de ruído e do gerador de varredura respectivamente. Nas Fig. 5.2-b está indicada a faixa de trabalho (50 a 2000 Hz) da varredura utilizada.

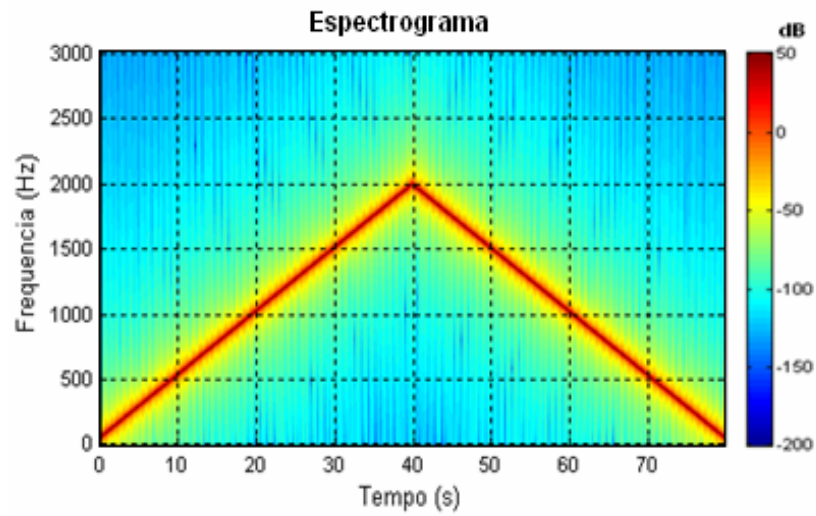


Figura 5.1 - Diagrama Tempo-Frequência da varredura utilizada no procedimento experimental.

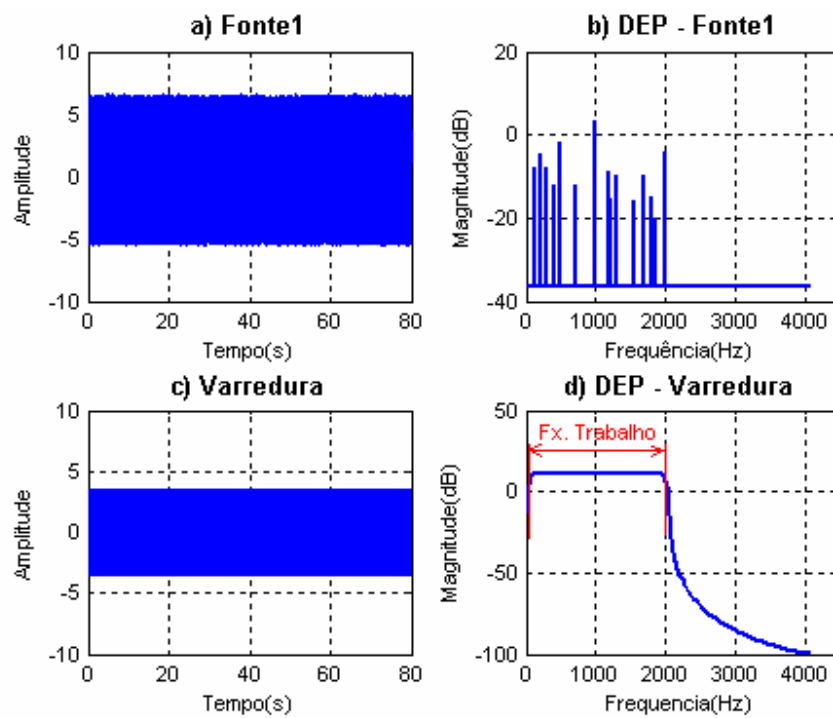


Figura 5.2 - Sinais estimados próximos às fontes de ruído do modelo.

Os sinais de entrada no diagrama do filtro adaptativo LMS (Fig. 4.9) estão mostrados na Fig. 5.3.

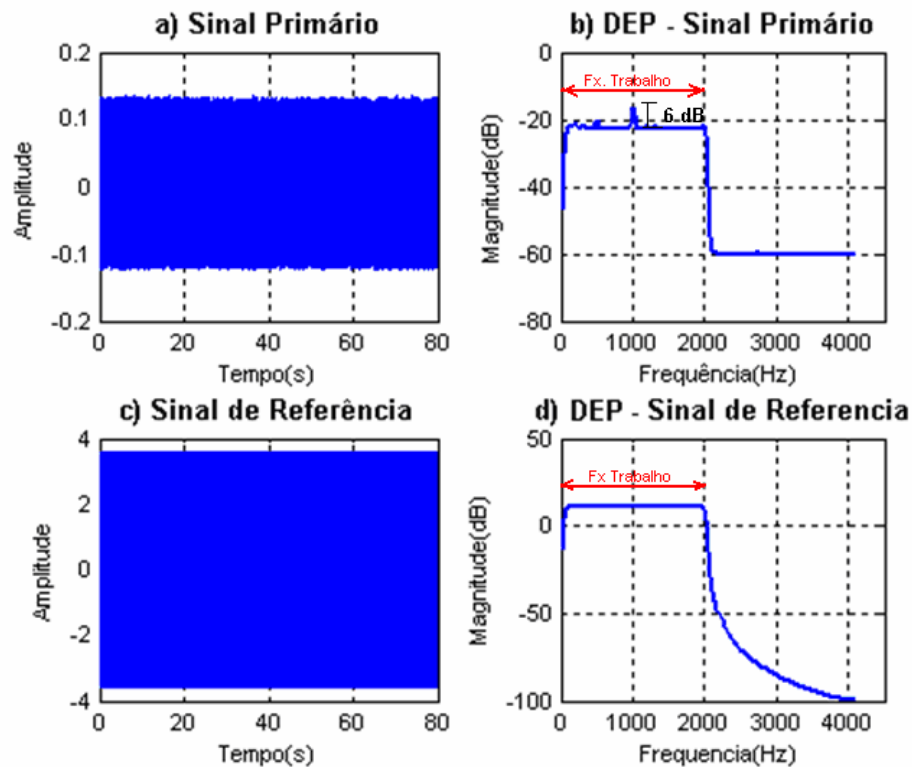


Figura 5.3 - Sinais de entrada no algoritmo LMS.

Na Fig. 5.3 o sinal primário é o sinal estimado no ponto receptor, o qual possui a contribuição da fonte de ruído e do gerador de varredura, e o sinal de referência é o sinal estimado próximo (aproximadamente a 1 metro) ao gerador de varredura.

A escolha dos parâmetros μ , α e L para utilização no filtro adaptativo foi feita após um processo de otimização randômica destes, onde a função objetivo é a minimização do erro entre a varredura estimada (obtido com a utilização do filtro adaptativo) e a varredura teórica (obtido numericamente) no ponto receptor. Os valores iniciais para os parâmetros obedeceram as faixas de variação descritas no item 3.2.3.1 do capítulo 3.

Assim, os parâmetros ótimos encontrados para a varredura a ser utilizada nos experimentos são: $L = 20$; $\mu = 0,05$ e $\alpha = 0,02$.

Na Fig. 5.4-a está mostrada a magnitude da densidade espectral de potência da varredura estimada com o filtro adaptativo e a varredura teórica, ambos obtidos no ponto receptor e com os parâmetros citados acima. Na Fig. 5.4-b está mostrado o erro absoluto (varredura teórica menos varredura estimada) entre as duas DEPs.

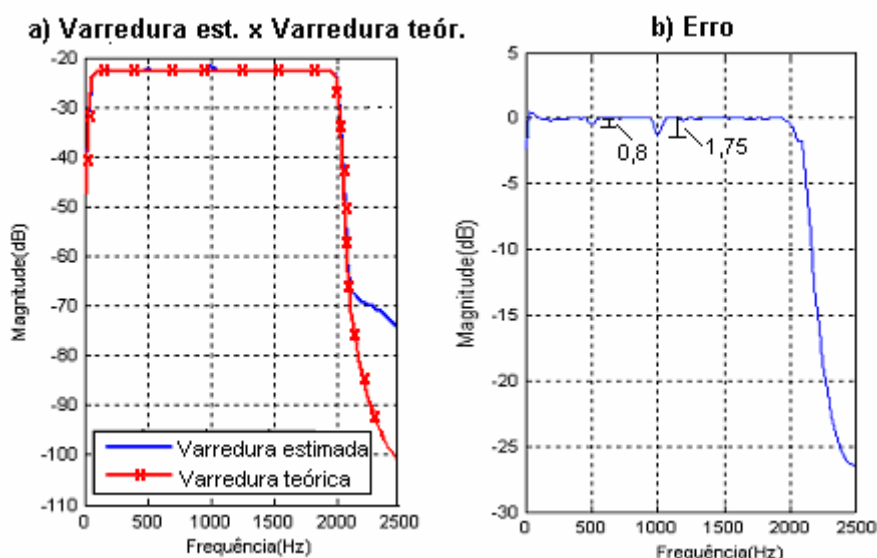


Figura 5.4 - a) DEP entre a varredura estimada e teórica. b) Erro absoluto entre as duas DEPs da Fig. 5.4-a.

Analisando a Fig. 5.4-a observa-se que a varredura estimada aproxima-se da varredura teórica, exceto na frequência de 500 e 1.000 Hz, onde se observa a contribuição da fonte de ruído (Fonte1) no sinal filtrado. Na Fig. 5.4-b pode-se observar que o maior erro obtido está na frequência de 1.000 Hz, onde atinge o valor de -1,75 dB. Ressalta-se que o erro deve ser analisado na faixa de 50 a 2.000 Hz, a qual é a faixa de frequência utilizada na varredura.

Para justificar o valor do erro na frequência de 1.000 Hz, na Fig. 5.5 está mostrado a contribuição da Fonte1 e do gerador de varredura no ponto receptor.

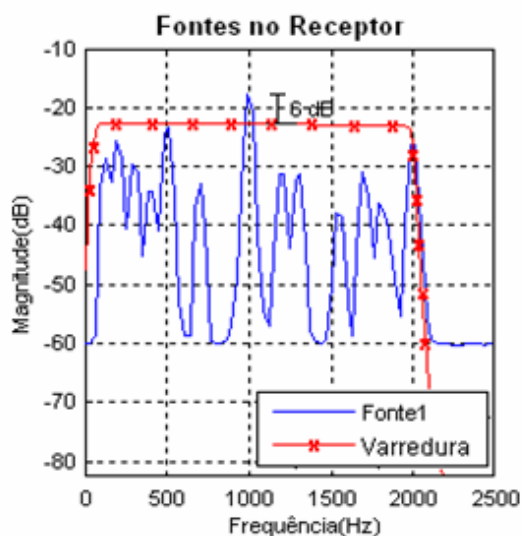


Figura 5.5 – Sinais obtidos no ponto receptor.

Analisando a Fig. 5.5 temos que a contribuição de energia da Fonte1 no ponto receptor, na frequência de 1.000 Hz, é maior que a contribuição de energia do gerador de varredura nesta mesma frequência. Como já concluído nas simulações numéricas (capítulo 4), este fato justifica o valor de erro anteriormente citado. No entanto, observa-se na Fig. 5.5, que na frequência de 1.000 Hz, a diferença entre os níveis de energia dos dois sinais é de 6 dB, e no entanto, o erro máximo obtido com os parâmetros do filtro (Fig. 5.4-b) é de 1,75 dB.

De posse dos parâmetros do filtro que melhor se adaptam à varredura utilizada, ou seja, os valores otimizados, a metodologia proposta no trabalho será testada em dois casos práticos, campo reverberante e campo livre, os quais serão descritos a seguir juntamente com os resultados obtidos.

5.2.2 Campo Reverberante

O primeiro caso experimental foi realizado em um campo reverberante, ou seja, em um ambiente fechado onde há reflexão sonora nas paredes.

Na Fig. 5.6 está mostrado uma representação esquemática sem escala do ambiente utilizado para realização das medições de ruído e posterior aplicação do filtro adaptativo LMS.

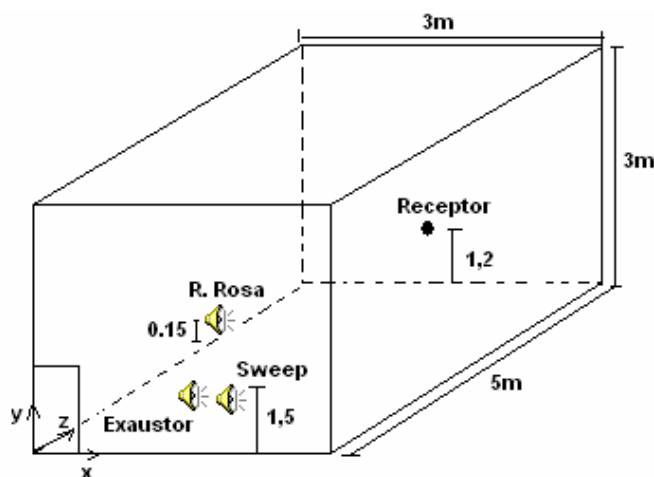


Figura 5.6 – Representação esquemática da sala utilizada para realização do experimento 1.

No ambiente da Fig. 5.6 as paredes são de alvenaria com reboco pintado, o qual possui coeficiente de absorção médio igual a 0,08.

As fontes sonoras presentes na Fig. 5.6 são alto-falantes emitindo ruídos característicos das seguintes fontes: exaustor, ruído rosa e uma varredura senoidal (Fonte

‘Sweep’). As coordenadas das fontes (x; y; z) estão descritas na Tab. 5.1. Bem como o receptor que é um microfone capacitivo B&K Tipo 2669.

Tabela 5.1 – Coordenadas (x,y,z) das fontes e do receptor da Fig. 5.6.

Fonte Sonora	x (m)	y (m)	z (m)
Exaustor	1,5	1,5	0,3
Ruído Rosa	0,3	0,15	2,0
<i>Sweep</i>	1,6	1,5	0,3
Receptor			
Microfone	1,5	1,2	4,7

O microfone (receptor) está conectado a um sistema de aquisição o qual é composto dos seguintes componentes:

- Placa de aquisição NI BNC – 2110.
- Condicionador de Sinal B&K Tipo 5935.
- Cabo BNC (para conexão da placa de aquisição com o condicionador de sinal).
- Notebook para armazenamento dos dados.

O sistema de aquisição foi calibrado antes e depois do procedimento de aquisição dos dados. Para calibração do microfone utilizou um calibrador do tipo pistonfone B&K Tipo 4231.

Com a configuração do sistema mostrado na Fig. 5.6, pretende-se estimar a função transferência entre o exaustor e o receptor, por isto o alto-falante que emite o ruído da varredura (‘Sweep’) se encontra ao lado do alto-falante que emite o som do exaustor. Desta maneira, aplicando o filtro LMS, pretende-se obter somente o sinal da varredura que chega no receptor a partir de um sinal obtido neste ponto com todas as fontes ligadas.

Na Fig. 5.7 está mostrada a contribuição sonora de cada fonte no ponto receptor, juntamente com a DEP (Densidade Espectral de Potência) correspondente.

Para composição do sinal primário, o qual é a entrada do algoritmo LMS, fez-se a soma dos três sinais da Fig. 5.7 (Fig. 5.7-a, 5.7-c e 5.7-e) no domínio do tempo. Esta soma resulta na contribuição das três fontes no ponto receptor. O sinal resultante, ou seja, o sinal primário está mostrado na Fig. 5.8-a. Já o sinal de referência, o qual é composto pelo sinal obtido a 1 metro do alto-falante que gera a varredura senoidal, está mostrado na Fig. 5.8-c.

Ressalta-se que o sinal de referência também foi medido dentro da sala na mesma condição mostrada na Fig. 5.6.

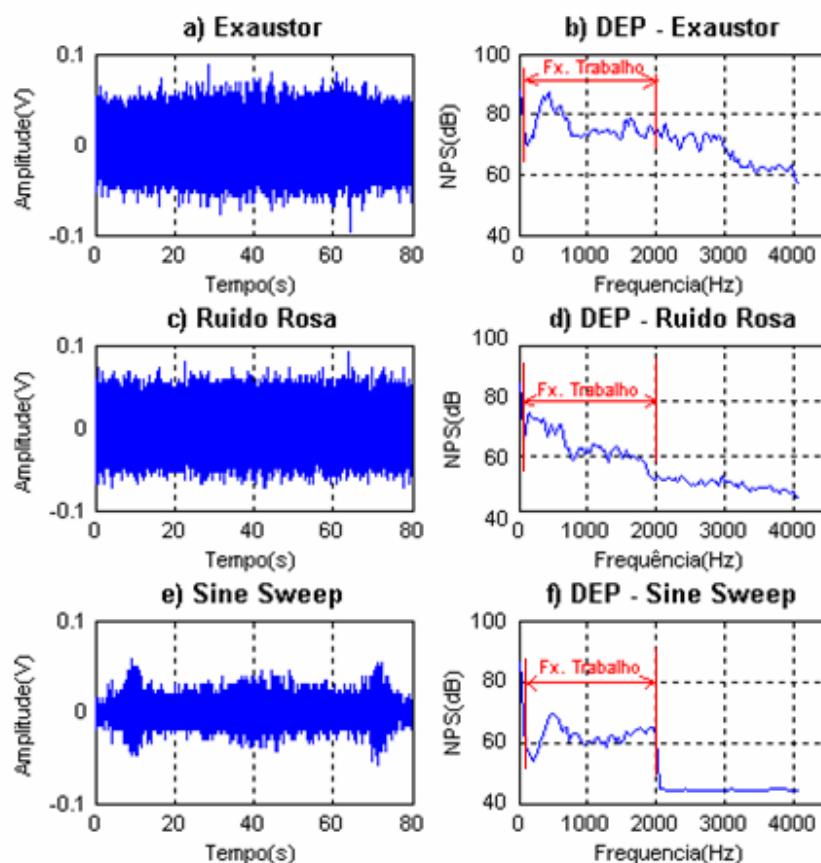


Figura 5.7 - Contribuição das fontes sonoras no ponto receptor.

De posse dos sinais das Figs. 5.8-a e 5.8-c, aplica-se a filtragem adaptativa para obtenção da varredura que chega ao receptor. Os parâmetros do filtro são os definidos no item 5.2.

O resultado obtido com o filtro adaptativo, no domínio do tempo, está mostrado na Fig. 5.9. Nesta mesma figura está mostrado o sinal medido (em vermelho) para comparação com o sinal estimado com o filtro (em azul).

Analisando a Fig. 5.9, observa-se que o filtro possui bom desempenho, pois ele consegue seguir com precisão o sinal de referência eliminando a influência das outras fontes. No entanto, a análise do sinal no domínio do tempo não é de fácil compreensão, devido a isto, estes dois sinais estão mostrados na Fig. 5.10-a onde os mesmos estão no domínio da frequência. Na Fig. 5.10-b está mostrado o erro absoluto (varredura medida menos varredura estimada) entre os dois sinais da Fig. 5.10-a.

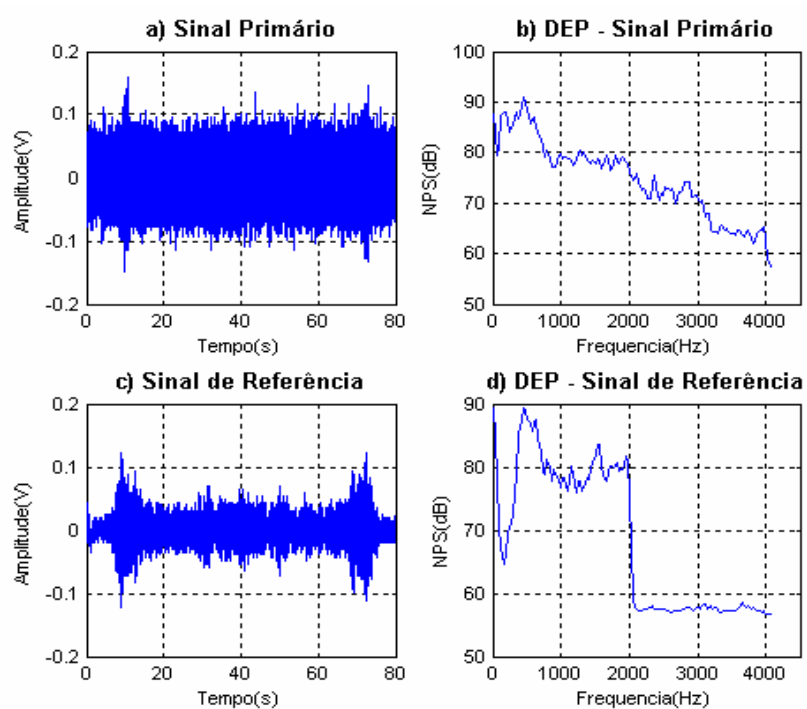


Figura 5.8 - Sinais de entrada no algoritmo LMS.

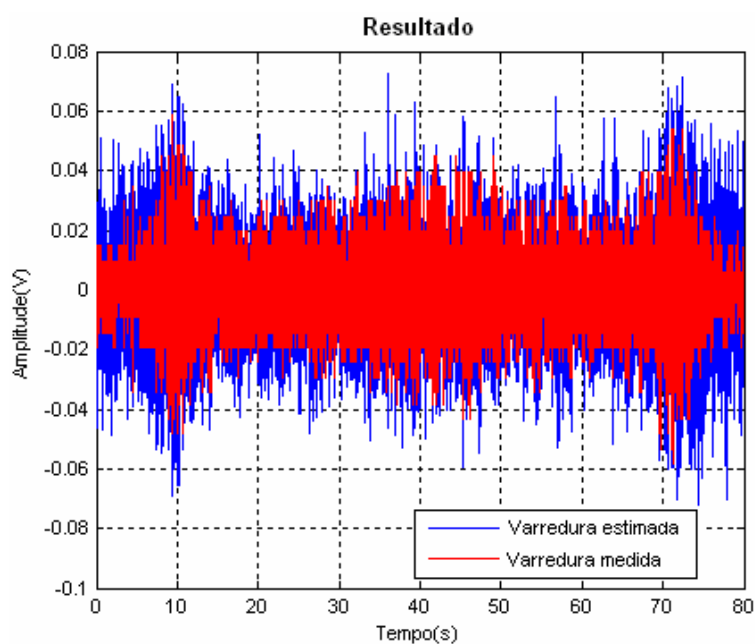


Figura 5.9 - Resultado obtido com o filtro LMS.

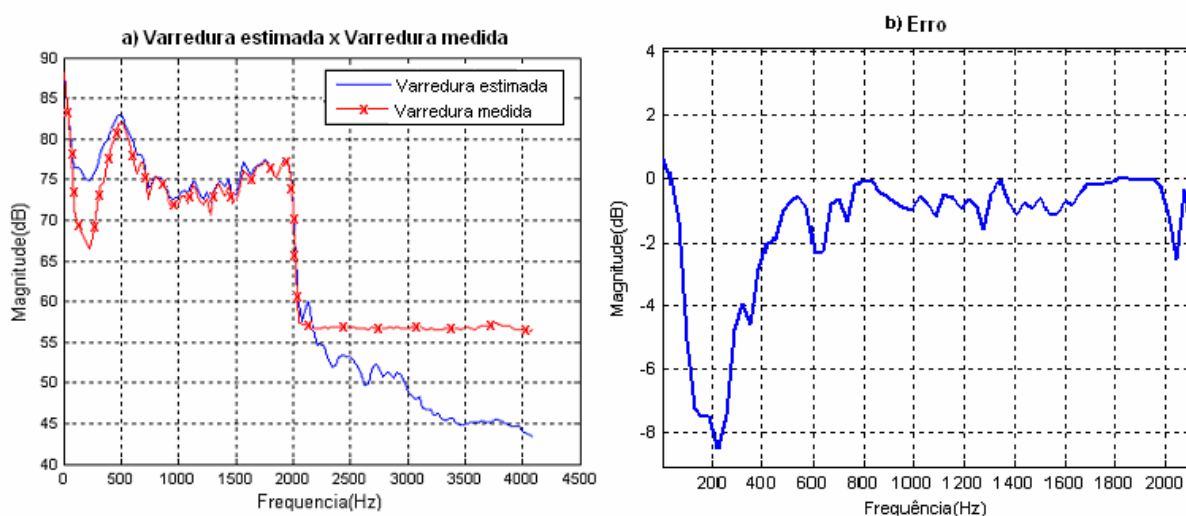


Figura 5.10 - a) DEP da varredura estimada e da varredura medida. b) Erro entre os dois sinais da Fig. 5.10-b.

Analisando a Fig. 5.10-a pode-se dizer que a varredura que chega até o ponto receptor pode ser obtida com a técnica da filtragem adaptativa mesmo em um campo reverberante. Já analisando a Fig. 5.10-b observa-se que o erro é maior nas baixas frequências (50 Hz a 400 Hz). A partir das conclusões obtidas na análise de sensibilidade do capítulo 4, a respeito do comportamento do filtro quanto às quantidades de energia dos sinais emitidos pelas fontes no ponto receptor, pode-se dizer que nas baixas frequências a energia das fontes, exaustor e ruído rosa, são maiores que a energia emitida pela fonte ‘Sweep’, por isso o erro é maior nas baixas frequências (até 400 Hz), onde o filtro não consegue atingir seu objetivo, ou seja, eliminar do sinal estimado a contribuição sonora de fontes indesejáveis. Já na faixa de frequência, 500 Hz a 2.000 Hz, o erro atinge valores de -1 dB até -2 dB, tal valor de erro continua sendo explicado pelo resultado obtido na análise de sensibilidade do capítulo 4. No entanto, na faixa de frequência de 1700 Hz a 1950 Hz o erro é próximo de zero, pois nesta faixa de frequência a energia das fontes: exaustor e ruído rosa (energia no ponto receptor) é superior à energia emitida pela fonte ‘Sweep’ também no ponto receptor.

Na Fig. 5.11 está mostrada a DEP (Densidade Espectral de Potência) das fontes sonoras no ponto receptor.

Observa-se na Fig. 5.11 que a varredura possui energia inferior se comparado com a contribuição das duas outras fontes (Ruído Rosa e Exaustor) na faixa de frequência entre 50 até 1700 Hz.

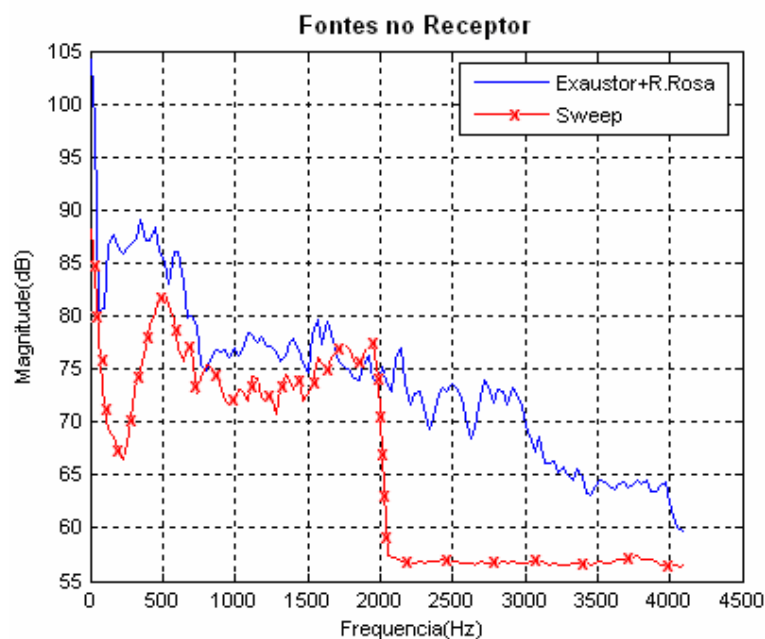


Figura 5.11 - DEP das fontes sonoras no ponto receptor.

A fim de validar, na prática, a conclusão já obtida no capítulo anterior, fez-se duas aplicações com o filtro adaptativo utilizando sinais primários compostos de diferentes níveis de energia da varredura.

5.2.2.1 Configuração 1 – Varredura Senoidal com maior energia em relação às fontes, Exaustor e Ruído Rosa, no ponto receptor.

A primeira configuração do sinal primário (configuração 1) é composta de: sinal emitido pelo exaustor (Fig. 5.7-a) + sinal emitido pelo alto-falante produzindo o ruído rosa (Fig. 5.7-c) mais duas vezes a amplitude do sinal obtido com o gerador de varredura (Fig. 5.7-e), sendo todos estes sinais medidos no ponto receptor. A densidade espectral do sinal resultante é mostrada na Fig. 5.12. O sinal de referência foi mantido o mesmo (Fig. 5.8-c).

Comparando a Fig. 5.11 com a Fig. 5.12 observa-se que a mudança ocorrida nesta última com relação à primeira é somente na composição do sinal de varredura, o qual possui energia duas vezes maior do que a varredura da Fig. 5.11. A energia das fontes, Exaustor e Ruído Rosa se mantêm nas duas figuras (5.11 e 5.12).

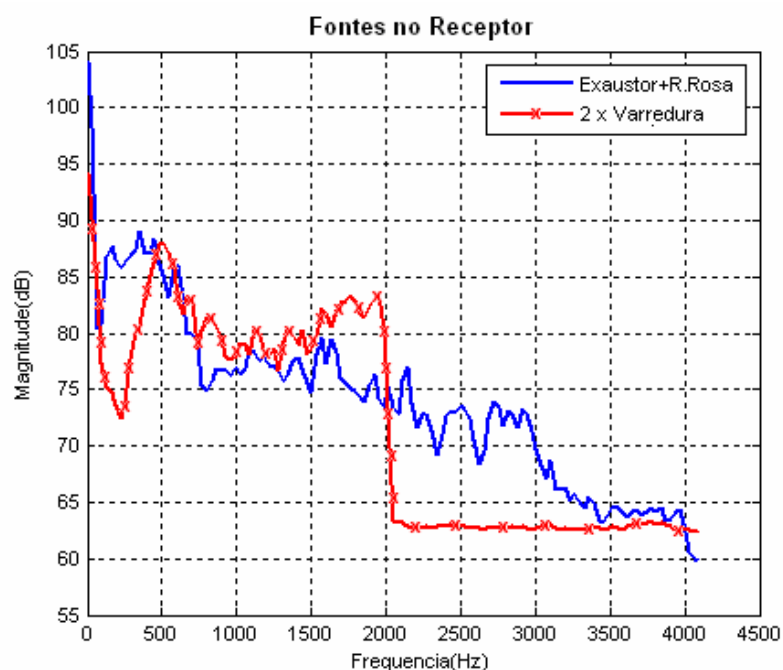


Figura 5.12 – Contribuição das fontes sonoras no receptor.

A varredura estimada com o filtro para esta configuração está mostrada na Fig. 5.13-a. Na Fig. 5.13-b está mostrado o erro absoluto (varredura medida menos varredura estimada) entre os dois sinais da fig. 5.13-a.

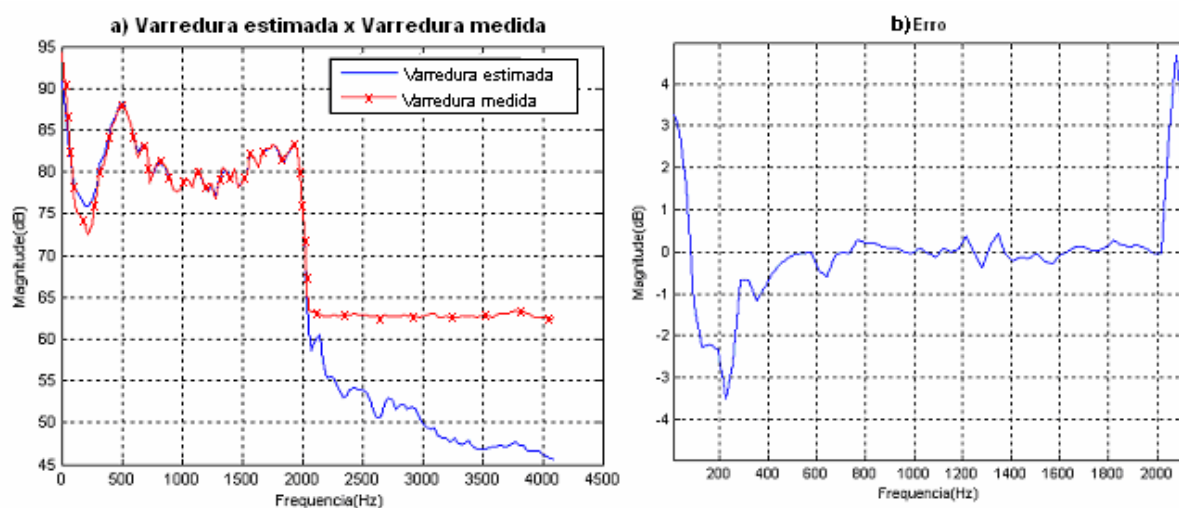


Figura 5.13 - DEP da varredura estimada e medida para a configuração 1 do sinal primário.

Da análise da Fig. 5.13-a pode-se observar que as duas varreduras, medida e estimada, possuem boa concordância e aproximação. O erro mostrado na Fig. 5.13-b não possui valores maiores que -1 dB na faixa de frequência 250 Hz a 2000 Hz. No entanto, na faixa de

freqüência de 50 Hz a 250 Hz o erro atinge valores da ordem de -3.5 dB, o que pode ser explicado pelo fato da energia da varredura ser menor que a energia das duas fontes (exaustor e ruído rosa), sendo esta diferença de até 15 dB, como pode ser visto na Fig. 5.12.

5.2.2.2 Configuração 2 – Varredura Senoidal com menor energia em relação às fontes, Exaustor e Ruído Rosa, no ponto receptor.

Nesta configuração (configuração 2) o sinal primário é composto de: sinal emitido pelo exaustor (Fig. 5.7-a) mais o sinal emitido pelo alto-falante gerando o ruído rosa (Fig. 5.7-c) mais 70 % da amplitude do sinal obtido com o gerador de varredura (Fig. 5.7-e). A densidade espectral de potência destas contribuições no ponto receptor é observada na Fig. 5.14.

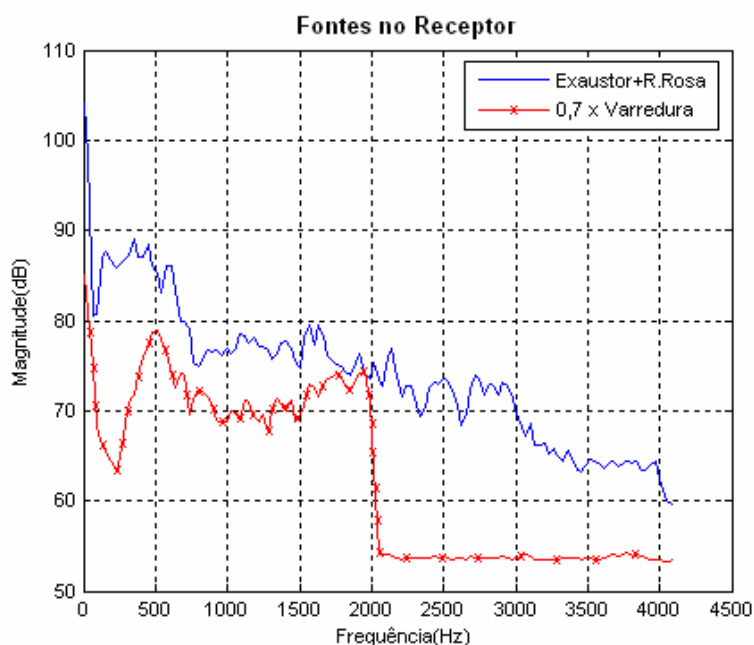


Figura 5.14 - Contribuição das fontes sonoras no ponto receptor para a configuração 2.

O resultado obtido com o filtro, varredura estimado, é mostrado na Fig. 5.15-a. O erro absoluto (varredura medida menos varredura estimada) obtido com esta segunda configuração é mostrado na Fig. 5.15-b.

Observa-se na Fig. 5.15-b que o erro atinge valores maiores se comparado com a configuração 1, o que valida as conclusões obtidas nas simulações numéricas.

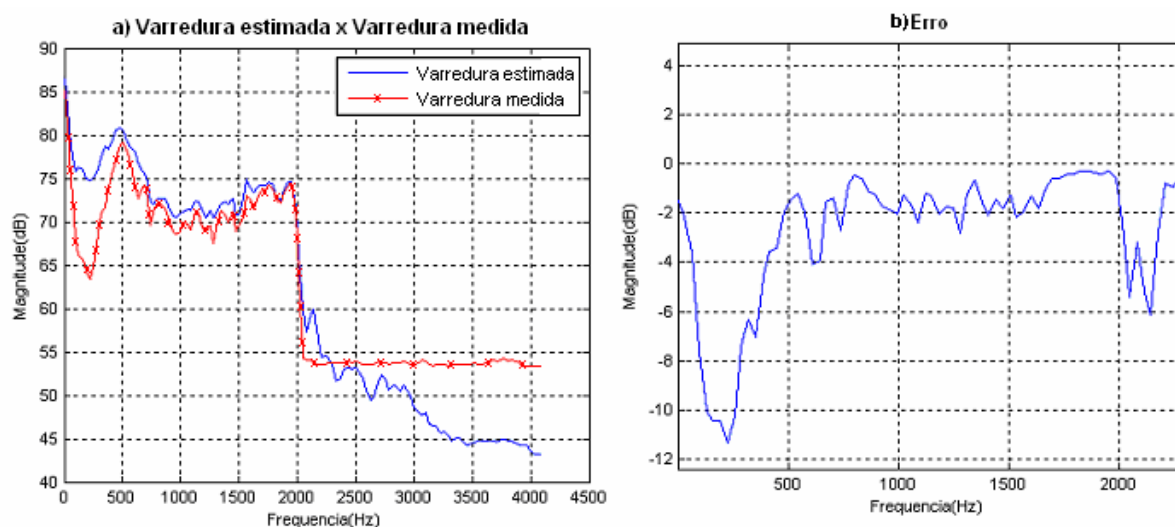


Figura 5.15 - a) DEP da varredura estimada e varredura medida. b) Erro absoluto entre os sinais da Fig.5.15-a.

No entanto, a obtenção de uma configuração real ou prática onde o nível de energia da varredura seja maior que o nível de energia das outras fontes de ruído no ponto receptor, nem sempre é possível. Outro fato é que se obtido um nível de energia de varredura bem maior que o ruído de fundo (diferença maior que 6 dB), a utilização do filtro não seria necessária segundo fundamentos da acústica.

5.2.2.3 – Procedimento para obtenção da Varredura Senoidal média

A partir do sinal medido no ponto receptor, onde este contém a contribuição sonora de todas as fontes (Fig. 5.8-a), propõe-se conseguir uma configuração deste semelhante à configuração 1 (item 5.2.2.3), ou seja, no ponto receptor a varredura possui maior energia em relação às outras fontes presentes no ambiente. Para isto uma metodologia foi desenvolvida visando reduzir a energia das fontes de ruído do ambiente, porém, mantendo a mesma energia presente na varredura.

Para aplicação de tal metodologia, o primeiro passo é a coleta de várias medições no ponto receptor, onde todas as fontes devem estar ligadas para geração do ruído total, e posteriormente, fazer a média entre estas aquisições, pois assim, o ruído proveniente do exaustor e do ruído rosa seria reduzido, considerando que haverá cancelamento dos sinais devido às diferenças de fases entre estes. Já a energia da varredura se manteria, uma vez que a fase deste se mantém a mesma para todas as medições.

O resultado da média entre as dez medições realizadas no ponto receptor, com todas as fontes ligadas, está mostrado na Fig. 5.16, onde se encontra um espectrograma da média computada.

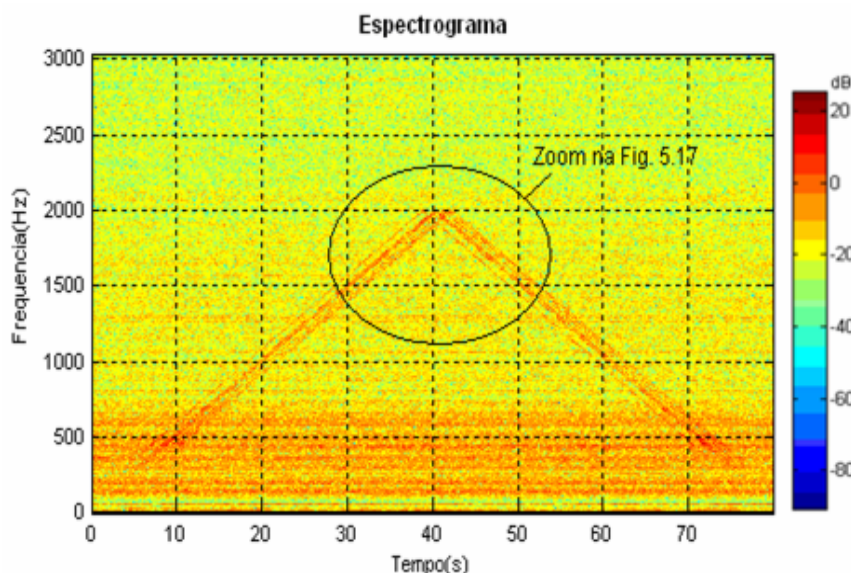


Figura 5.16 - Espectrograma da média de dez aquisições no ponto receptor.

Analisando a Fig. 5.16, observa-se que a varredura não possui a mesma fase nas dez aquisições obtidas, pois se observa claramente os atrasos (*delays*) existentes entre as varreduras que compõe o sinal médio, ou seja, quando se fez a média, o resultado é a presença de várias varreduras, como pode ser observado na Fig. 5.17, a qual é um zoom feito na Fig. 5.16. Tais diferenças de fases se devem ao tempo de início de aquisição, ou seja, causado pelo manuseio do sistema de aquisição.

Desta maneira, com o resultado obtido, a energia da varredura também é reduzida por causa dos cancelamentos de fases entre estes sinais, o que não é nosso objetivo.

Para que a média das dez medições no ponto receptor reduza a energia das outras fontes mantendo a energia da varredura, é necessário que as varreduras se iniciem no mesmo instante de tempo. Para isto é necessário corrigir os atrasos (*delays*) existentes entre estes. Tal correção é conseguida obtendo o tempo exato (em uma resolução de $dt=1/8192$ s) em que cada varredura começa. A partir da varredura que se inicia no maior instante de tempo, têm-se este como referência, e consegue-se corrigir as outras varreduras iniciando-os no mesmo instante de tempo do de referência.

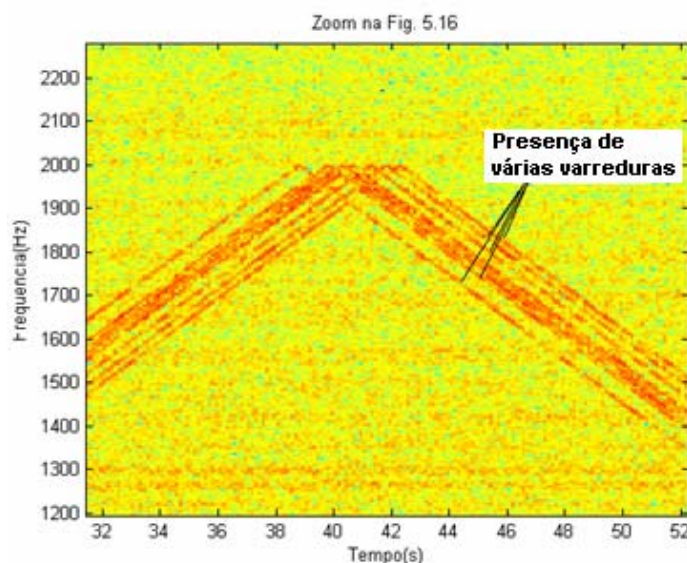


Figura 5.17 – Zoom aplicado na Fig. 5.16.

Para esta metodologia, ou seja, obter o instante de tempo exato de início de cada varredura, é utilizado um ajuste via mínimos quadrados entre pontos marcados sobre a reta da varredura em um diagrama tempo-frequência, e assim obtém-se o ponto em que a reta da varredura intercepta o eixo x (tempo) na frequência de 50 Hz (frequência inicial da varredura).

Para aplicação desta metodologia (ajuste via mínimos quadrados) é necessária a utilização de um diagrama tempo-frequência com boa resolução no tempo, ou seja, possua um incremento de tempo de $1/8192$ s, para que assim possa obter o tempo exato de início da varredura. Tal fato não se consegue com o uso do espectrograma. Esta resolução pode ser conseguida com a utilização de uma distribuição tempo-frequência de Choi-Williams. Uma breve teoria sobre a distribuição de Choi-Williams encontra-se descrita no Anexo IV.

Aplicando a distribuição de Choi - Williams em um determinado segmento do sinal obtido no receptor, obtém-se o diagrama tempo-frequência deste, como pode ser observado na Fig. 5.18. A aplicação desta distribuição em todo o sinal possui um custo computacional muito alto, por isso a aplicação foi limitada somente a um segmento do sinal.

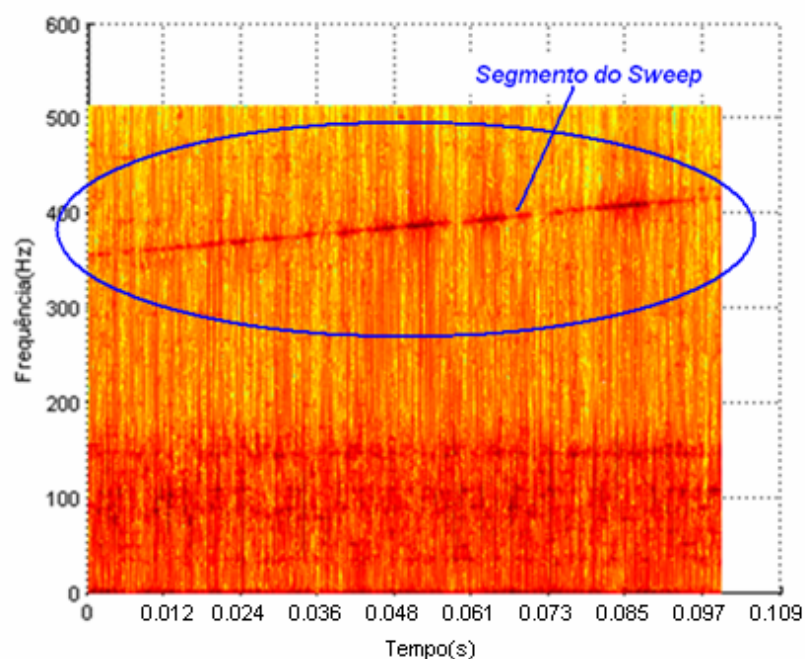


Figura 5.18 - Análise Tempo-Frequência utilizando Distribuição de Choi-Williams.

A partir do diagrama tempo-frequência obtido (Fig. 5.18), é possível, via mínimos quadrados, interpolar uma reta sobre pontos selecionados no gráfico (pontos selecionados visando estimar uma reta sobre a varredura). Tais pontos são selecionados sobre a reta em cor vermelha (marcada pelo círculo em azul na Fig. 5.18), a qual pode ser vista na Fig. 5.18 entre as frequências 360 Hz a 420 Hz. Assim, é possível estimar onde esta reta, ou seja, a varredura intercepta o eixo x (tempo) na frequência inferior (início) da varredura (50 Hz). Realizando este procedimento para cada uma das dez (10) medições, têm-se o instante em segundos em que cada varredura se inicia. A partir destes tempos amostrais, corrigem-se os sinais, ou seja, eliminam-se os *delays* entre eles, e novamente faz-se a média das dez medições. O resultado obtido é mostrado na Fig. 5.19.

Na Fig. 5.20 está mostrado um zoom feito na Fig. 5.19 para melhor análise desta.

Analisando a Fig. 5.20, observa-se que a varredura resultante da média não está em perfeita concordância de fase entre as varreduras que compõem as dez medições, ou seja, ainda possui *delays* entre eles. Isto se deve ao fato de que para o procedimento via mínimos quadrados, há dependência da precisão com que os pontos são marcados no diagrama tempo-frequência, já que o incremento de tempo é da ordem de 10^{-1} milissegundos, no entanto o erro provavelmente se deve à imprecisão dos pontos marcados. Então, para resolver este problema, propõe-se uma metodologia complementar a esta, como é descrita a seguir.

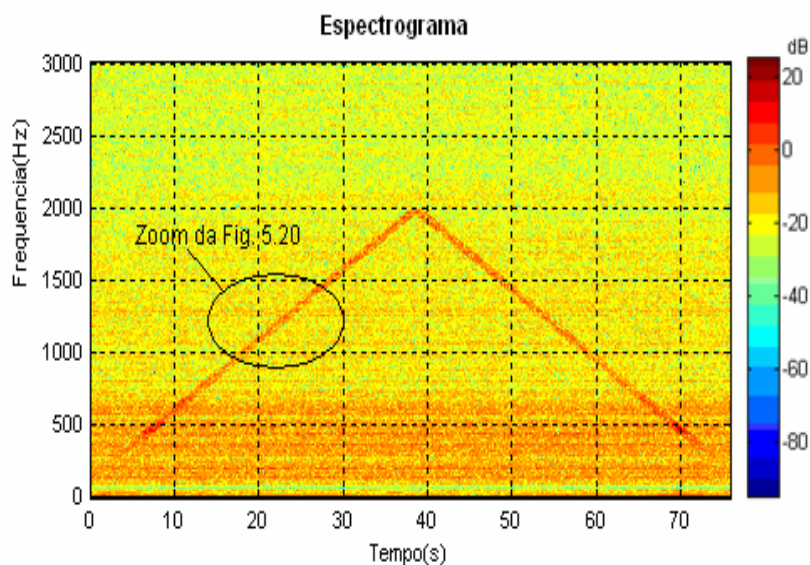


Figura 5.19 - Média entre as dez medições após correção de fase utilizando distribuição de Choi-Williams e ajuste via mínimos quadrados.

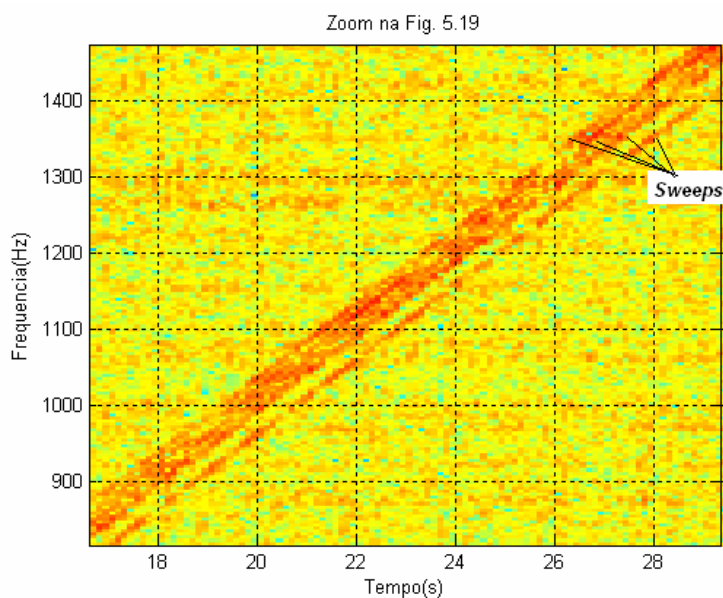


Figura 5.20 – Zoom feito na Fig. 5.19.

Visando eliminar a pequena diferença de fase existente entre as varreduras (pode ser visto na Fig. 5.20), propõe-se a utilização do Cepstrum, o qual é uma técnica que tem como objetivo a detecção de repetibilidade do sinal. Na acústica, o Cepstrum é muito utilizado na detecção de ecos. Com a utilização do Cepstrum é possível calcular o atraso (*delay*) entre dois sinais com a resolução de tempo desejada (neste caso, uma resolução de 10^{-1} milissegundos).

Segundo Randall (1987), a definição mais utilizada, atualmente, para o Cepstrum é o inverso da Transformada de Fourier do logaritmo do espectro de potência. A escala logarítmica da amplitude enfatiza a estrutura harmônica do espectro e reduz a influência de qualquer caminho de transmissão aleatória. O que define o Cepstrum não é o fato de ser o espectro do espectro, mas sim, a conversão logarítmica do espectro original.

Uma definição alternativa desta técnica de análise de sinais está definida na Eq. (5.1) (BRAUN, 1986):

$$c(\tau) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \log_e |S(f)|^2 \right\} \quad (5.1)$$

onde $c(\tau)$ representa o Cepstrum de Potência do sinal; τ denota deslocamento no tempo em segundos; $\mathfrak{F}$ representa o operador Transformada de Fourier e $|S(f)|^2$ é a função densidade espectral de potência do sinal $s(t)$.

Aplicando esta teoria ao trabalho proposto, temos que após aplicação do ajuste via mínimos quadrados, sabe-se em qual das dez aquisições a varredura possui o maior tempo de início, ou seja, possui o maior atraso (*delay*) entre os sinais das medições. Para aplicação do Cepstrum, toma-se esta medição (a que possui o maior atraso) como referência e calcula o *delay* entre cada medição e o de referência (maior atraso). A aplicação do Cepstrum é feita aplicando a Eq. 5.1 em um sinal, onde este corresponde à soma do sinal de referência com um sinal proveniente das dez medições. Assim este procedimento é feito nove vezes, visto que foram feitas dez medições.

Na Fig. 5.21 está mostrado o resultado do Cepstrum aplicado ao sinal resultante da soma entre a medição 5 (referência) e a medição 1. Com o Cepstrum é possível determinar o atraso exato em segundos, entre estes dois sinais, como pode ser visto na Fig. 5.21. A posição, no eixo x, em que ocorre o pico do sinal mostrado em zoom na Fig. 5.21 corresponde ao atraso entre os dois sinais.

Após aplicação de toda a metodologia (distribuição de Choi-Williams, ajuste via mínimos quadrados e aplicação do Cepstrum) para correção dos *delays* entre as varreduras das dez medições, realizou-se a média entre os sinais corrigidos obtendo o resultado mostrado na Fig. 5.22-b, onde nota-se que o atraso entre as varreduras foi corrigido.

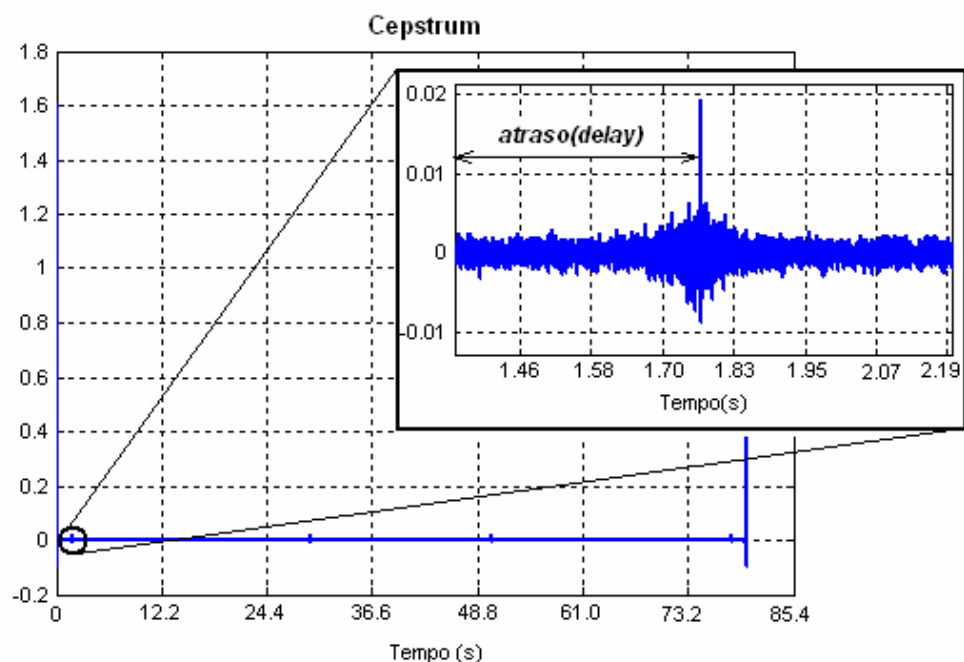


Figura 5.21 - Cepstrum entre a medição 5 (referência) e a medição 1.

Na Fig. 5.22-a está mostrado o espectrograma de apenas uma aquisição obtida no ponto receptor para comparação dos níveis de energia com a Fig. 5.22-b.

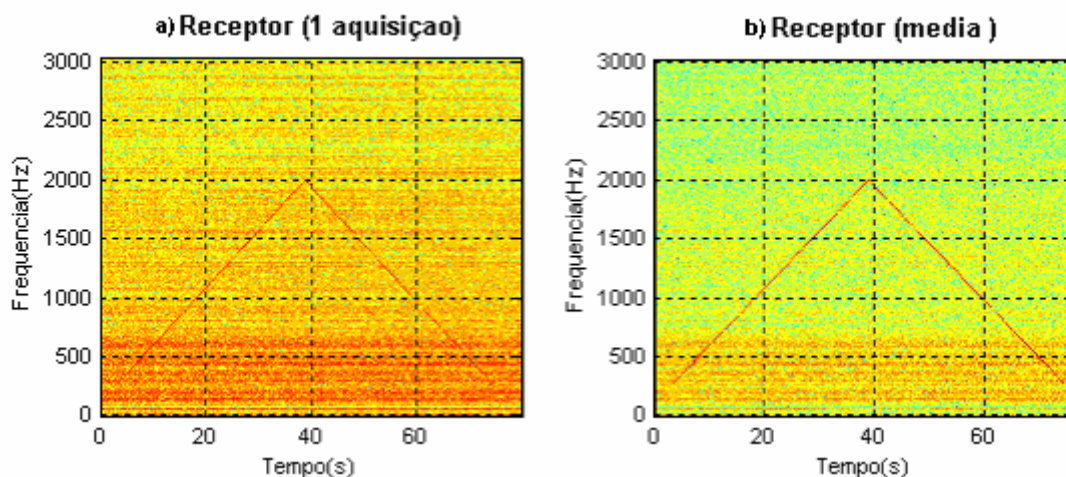


Figura 5.22 - a) Sinal obtido com uma aquisição. b) Resultado obtido com aplicação do Cepstrum e realização da média.

Comparando as duas figuras (5.22-a e 5.22-b), observa-se que o nível de energia proveniente das duas fontes, exaustor e ruído rosa, foi reduzido, o que é facilmente observado na Fig. 5.22b, onde a intensidade das linhas horizontais em vermelho possui menor

intensidade na faixa de frequência 50 Hz a 2000 Hz. Já as duas retas inclinadas que compõem a varredura não alteraram a quantidade de energia comparando as duas figuras (Fig. 5.22-a e 5.22-b). Esta queda de energia dos sinais das duas fontes após realização da média, se deve à diferença de fase existente entre os sinais provenientes das dez medições, pois quando se faz a soma das medições ocorre o cancelamento de fase e diminuição da energia, o que não acontece com a varredura visto que as fases destes sinais estão em concordância nas dez medições (após correção realizada).

Ainda analisando a Fig. 5.22, pode-se dizer que nas altas frequências (700 Hz a 2000 Hz), a influência das fontes (exaustor e ruído rosa) é eliminada, restando influências destas apenas nas baixas e médias frequências (50 Hz a 650 Hz), porém com menor intensidade se comparado com o nível de energia proveniente de apenas uma aquisição. Este resultado nos leva ao objetivo proposto, ou seja, tem-se em mãos um sinal onde o nível de energia da varredura é maior do que às das outras fontes.

Para comparação entre as Figs. 5.22-a e 5.22-b no domínio da frequência, na Fig. 5.23 está mostrado a DEP de uma aquisição e do sinal médio (média das dez aquisições), obtido através da metodologia descrita acima, no receptor.

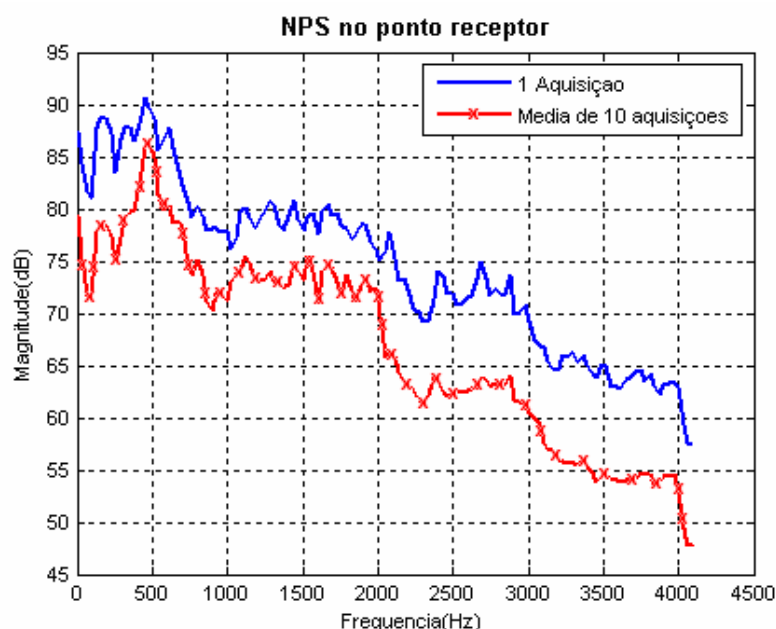


Figura 5.23 - Sinais obtidos no ponto receptor: uma aquisição e a média.

Utilizando o sinal médio corrigido como sendo o sinal primário do filtro LMS, e mantendo os parâmetros do filtro já definidos, o resultado obtido é mostrado na Fig. 5.24.

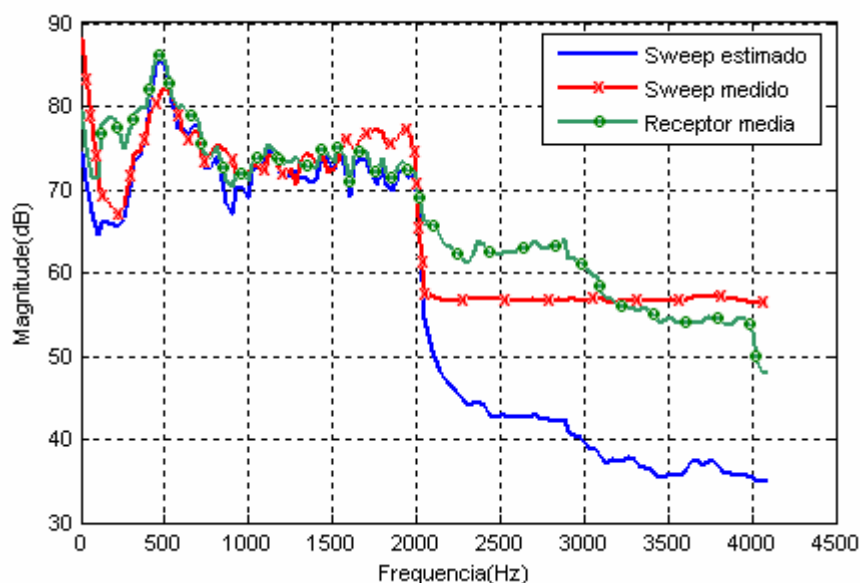


Figura 5.24 - Contribuição da varredura no ponto receptor obtido com o filtro LMS.

Analisando a Fig. 5.24 pode-se concluir que a varredura estimada com o filtro (sinal em azul) se aproxima do sinal médio calculado no receptor (verde), exceto nas baixas frequências (50 Hz a 400 Hz). Assim, conclui-se que com a metodologia composta de realização da média de várias medições após correção de fase das varreduras que compõem estas, consegue-se eliminar em grande parte a energia proveniente das fontes adjacentes ao gerador de varredura.

Ainda na mesma figura está mostrado a DEP da varredura medida no ponto receptor, para fins de comparação. Em um campo livre, a varredura estimada (azul) seria aproximadamente igual à varredura medida (vermelho) para um desempenho ótimo do filtro LMS, no entanto não é o que acontece na Fig. 5.24, pois como o experimento ocorre em um campo reverberante qualquer mudança de posição entre o microfone e o receptor é capaz de provocar mudanças na Função Transferência entre o emissor e o receptor.

Na Fig. 5.25-b está mostrado o espectrograma da varredura estimada com o filtro, e para comparação, na Fig. 5.25-a está mostrado o espectrograma do sinal médio no receptor.

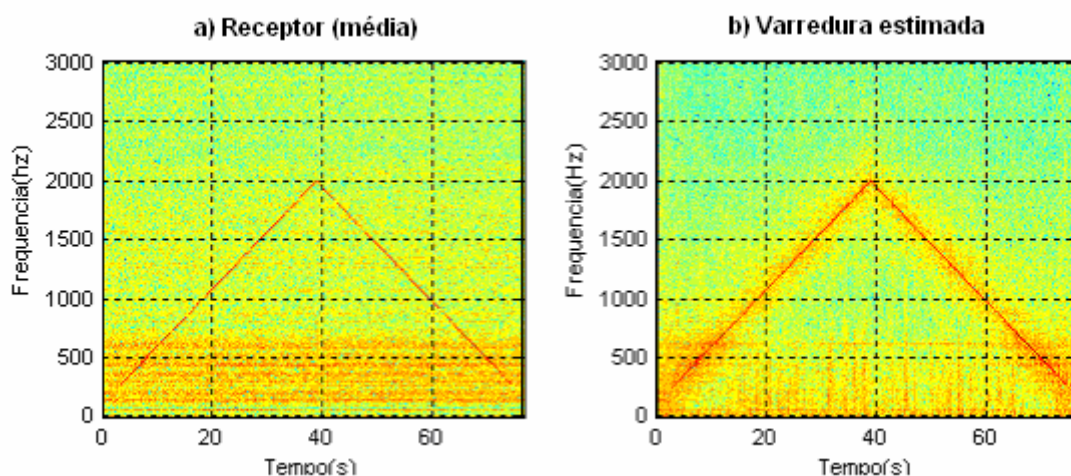


Figura 5.25 - a) Espectrograma do sinal médio no receptor. b) Espectrograma da varredura estimada.

Analisando as duas figuras, 5.25-a e 5.25-b, se consegue observar a capacidade do filtro em eliminar grande parte da energia provenientes das fontes nas baixas e médias frequências (50 Hz a 650 Hz).

A função transferência entre o alto-falante gerador de varredura e o microfone pode ser visto na Fig. 5.26, a qual é a função transferência entre o exaustor e o receptor. De posse desta função transferência, é possível determinar quanto de ruído chega até o receptor proveniente somente do ruído do exaustor, bastando multiplicar esta função transferência pelo sinal de entrada do sistema (sinal medido próximo ao alto-falante reproduzindo o ruído do exaustor) no domínio da frequência, uma vez que o alto-falante do gerador de varredura esteja localizado próximo ao alto-falante do exaustor.

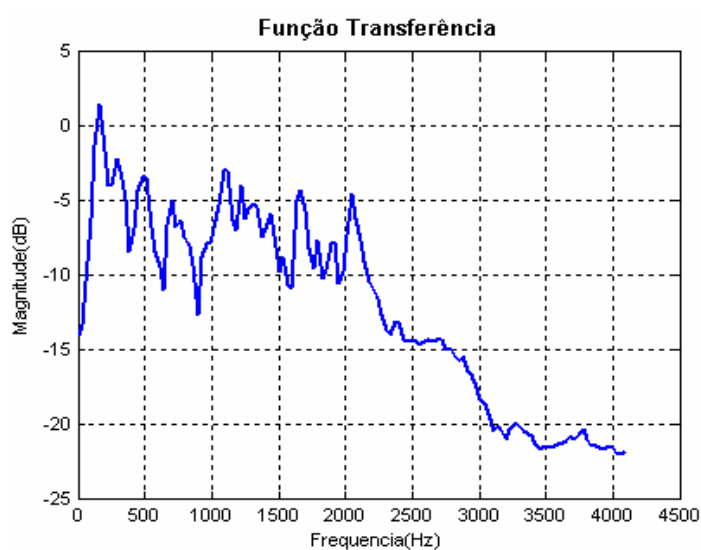


Figura 5.26 - Função transferência entre o exaustor e o microfone.

5.2.3 Campo Livre

O mesmo sistema testado em campo reverberante, também foi testado em ambiente caracterizado com propagação sonora em campo livre. Neste sistema, foram utilizadas as mesmas fontes sonoras, instrumentação e sistema de aquisição.

O esquema representativo da área experimental está mostrado na Fig. 5.27.

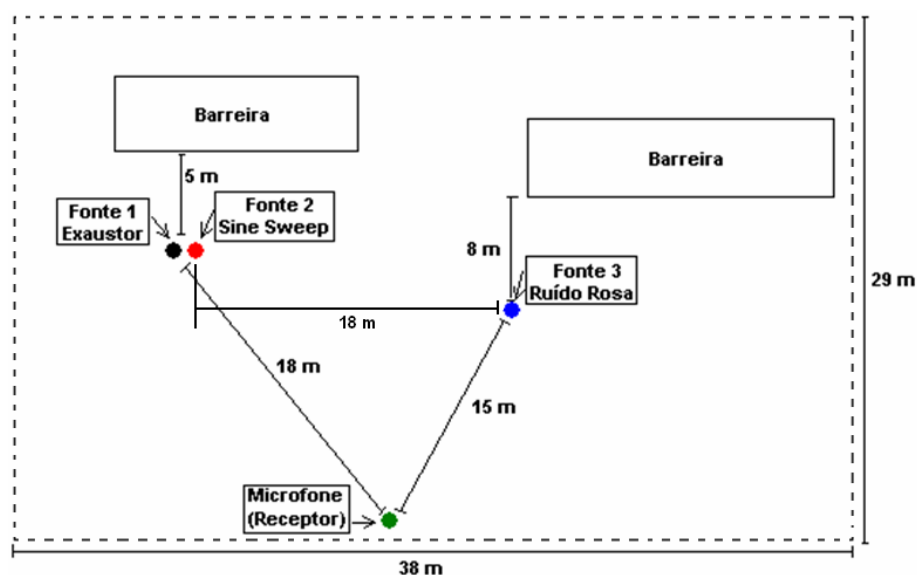


Figure 5.27 - Esquema da área experimental utilizada.

Para melhor visualização da área e dos equipamentos utilizados, nas Figs. 5.28 e 5.29 estão mostradas as fotos do local do experimento. Como a área de trabalho possui grandes dimensões, não foi possível mostrar a área completa em apenas uma fotografia.



Figure 5.28 - Caminho de transmissão entre a Fonte1 (Fonte2 também) e o receptor.

A mesma metodologia utilizada no item anterior (campo reverberante) é utilizada neste experimento, ou seja, realização de dez aquisições no ponto receptor para posterior realização da média.

Como pode ser observado na Fig. 5.28, o microfone está fixado em um tripé para evitar qualquer tipo de oscilação no caminho de transmissão entre o emissor e o receptor, durante a realização das dez aquisições.

O sistema de aquisição dos dados utilizado está mostrado na Fig. 5.30.

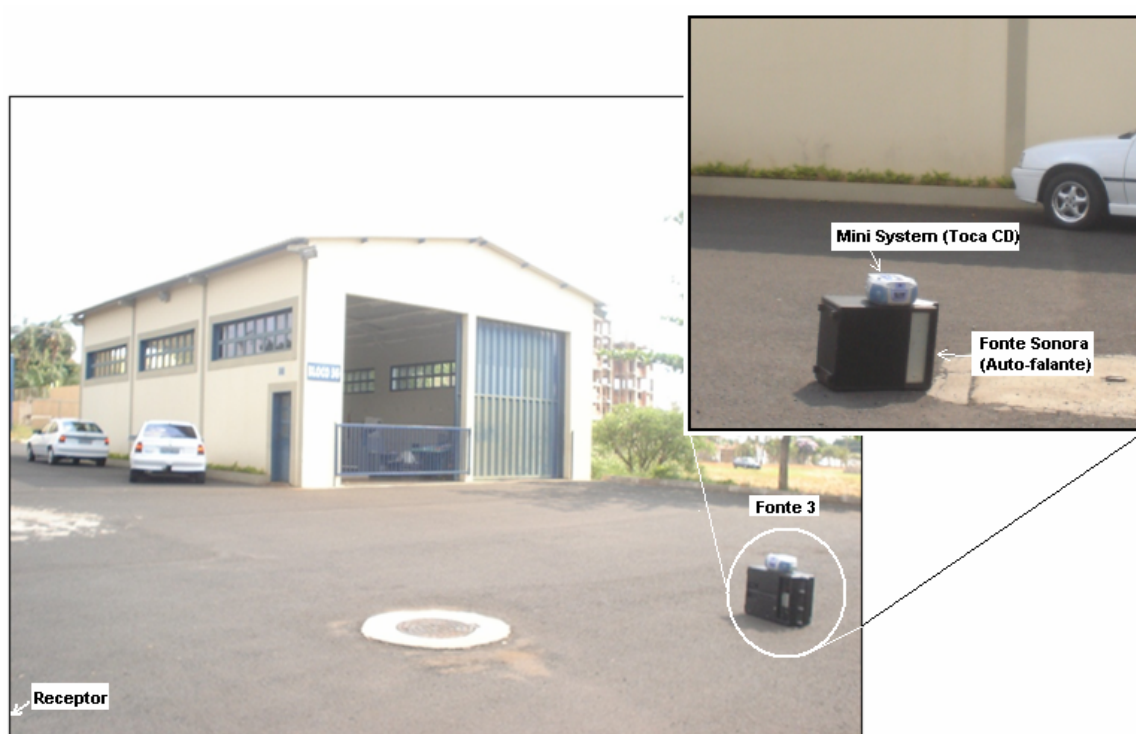


Figure 5.29 - Caminho de transmissão entre a Fonte 3 e o receptor .

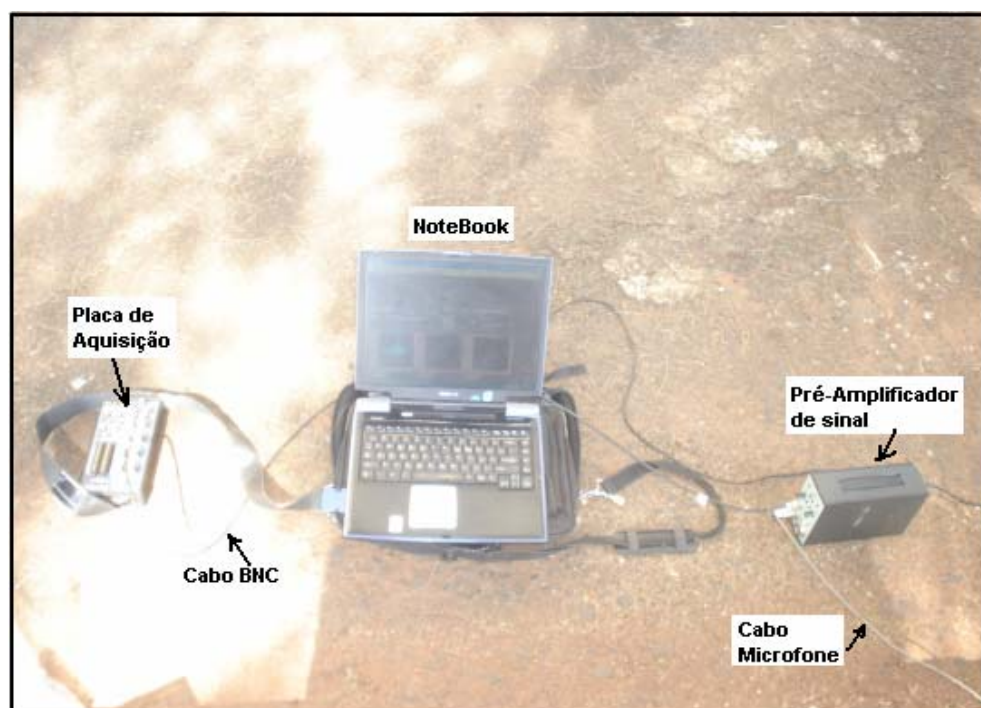


Figure 5.30 – Sistema de aquisição de dados.

A aquisição dos dados foi realizada com frequência de aquisição de 8192 Hz durante 80 segundos com um ganho de 40 dB. A calibração foi realizada antes e depois do