

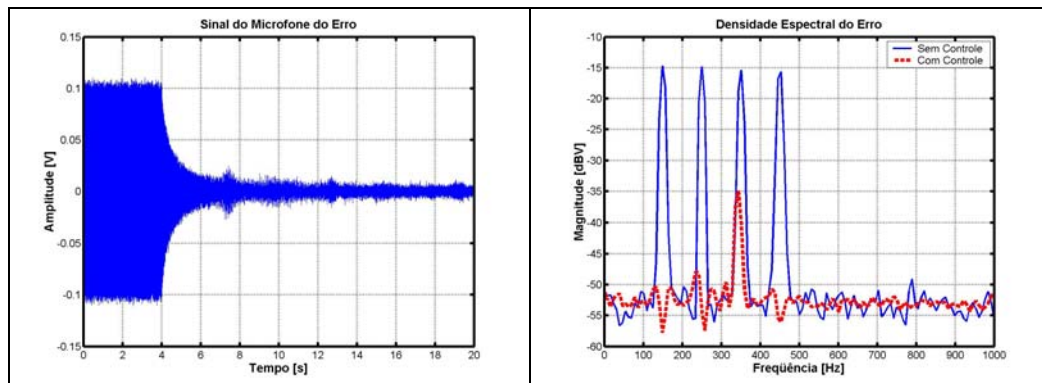


Figura 5.11 Densidade espectral do erro para o ensaio FXLMS Híbrido.

As frequências de excitação utilizadas neste ensaio foram as mesmas dos ensaios anteriores. Na figura 5.11 é observada uma atenuação significativa e inclusive apresentando um melhor desempenho quando comparado aos outros dois sistemas de controle, *feedforward* e *feedback*.

O sistema híbrido também apresentou um bom desempenho no que diz respeito ao tempo de acomodação do sistema controlado. Este fato é observado no gráfico do sinal no tempo mostrado em 5.11.

A seguir são apresentadas as simulações numéricas para o controle ativo de ruído com o mecanismo de adaptação *on-line* do caminho secundário. A técnica utilizada foi a de Eriksson (1989).

5.2.4 Simulações Numéricas para o Controle FXLMS *Feedforward* Eriksson

Novamente o algoritmo de controle foi excitado com funções mono e multi tonais. É possível observar na figura 5.12 que este controlador também apresenta um ótimo desempenho nas frequências de excitação mono tonal.

No entanto, para excitações do tipo multi tonal o sistema não se comporta com a mesma eficiência, demonstrando a importância de uma boa estimativa do caminho secundário, para a obtenção de um controlador eficiente.

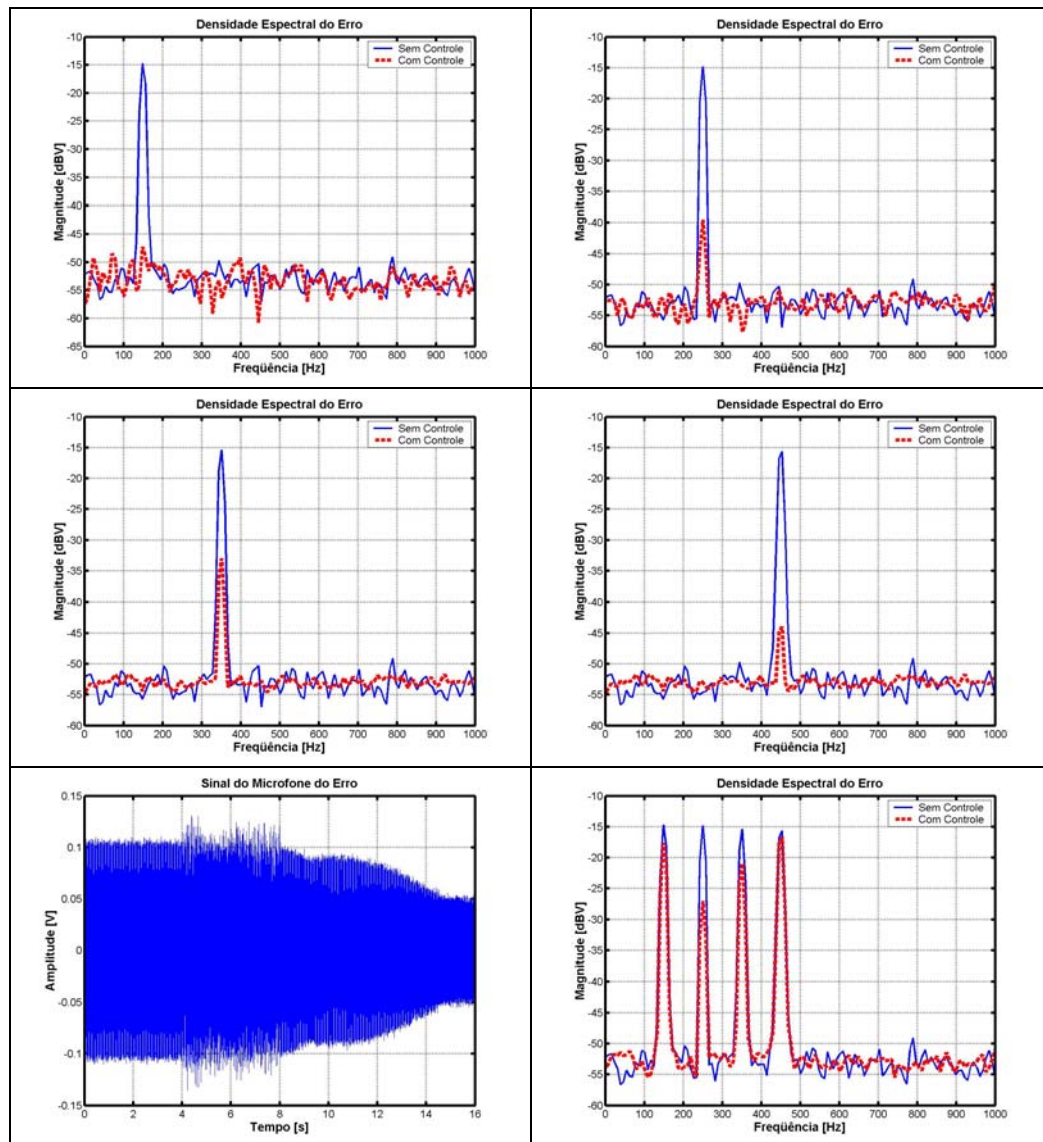


Figura 5.12 Densidade Espectral do Erro para o ensaio *Feedforward* – Mecanismo *on-line*.

5.2.5 Simulações Numéricas para o Controle FXLMS *Feedback* Eriksson

Pode-se observar na figura a seguir, que o algoritmo de controle *feedback* com mecanismo *on-line* da estimativa do caminho secundário, não apresenta bons resultados.

A explicação da baixa performance deste controlador deve-se ao fato da necessidade de se efetuar diferentes estimativas, sinal de referência e caminho secundário, realizadas neste processo de controle. Estas estimativas estão normalmente contaminadas de erro que comprometem uma boa estabilidade em algumas frequências, como se pode observar na figura 5.13 (caso multi tonal).

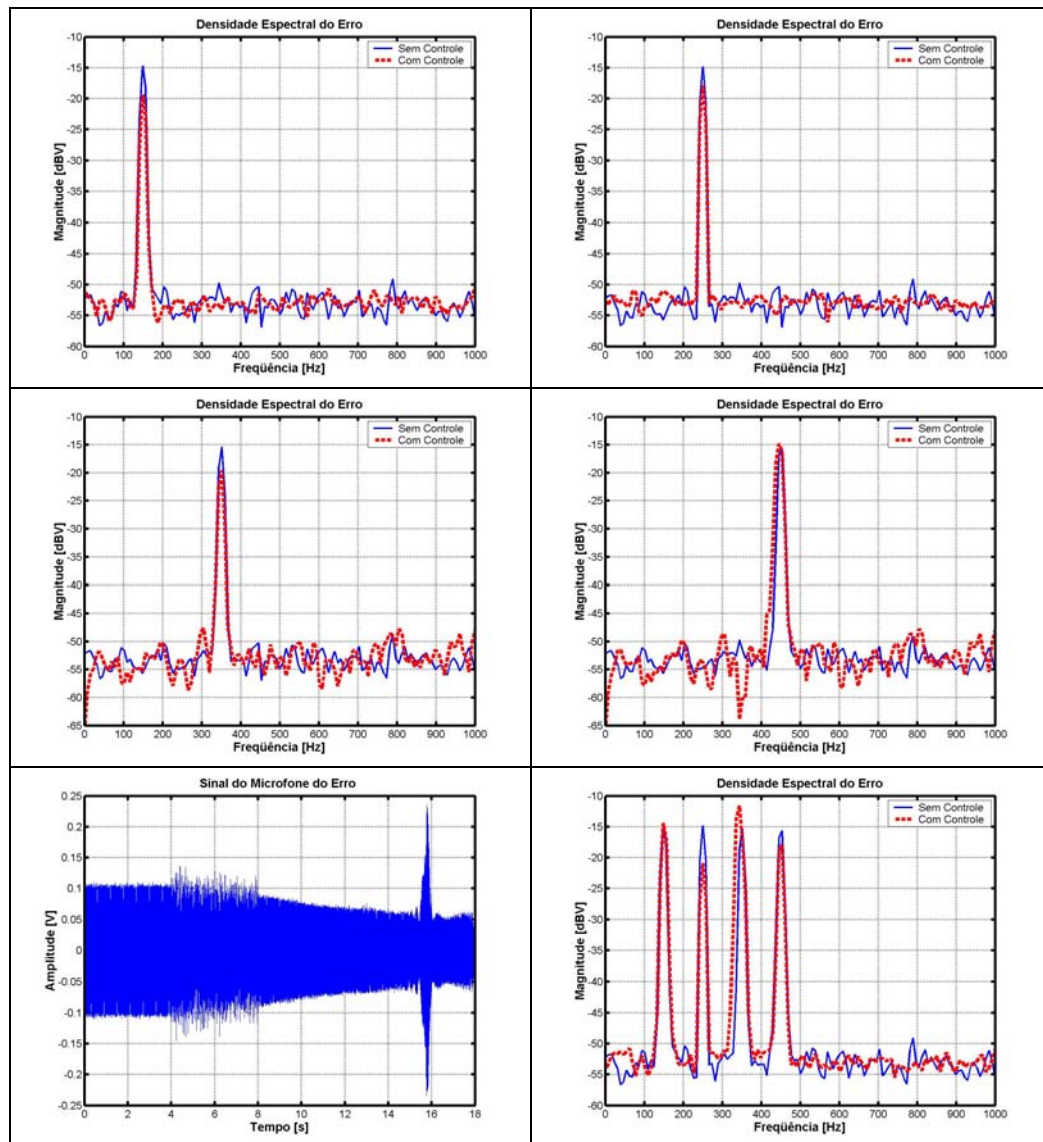


Figura 5.13 Densidade Espectral do Erro para o ensaio *Feedback* – Mecanismo *on-line*.

5.2.6 Simulações Numéricas para o Controle FXLMS Híbrido Eriksson

Na figura 5.14 (excitação multi tonal), verificou-se que o tempo de acomodação do sinal do microfone do erro é maior quando comparado com os métodos não adaptativos (caminho secundário – *off-line*). Este fenômeno se deve ao tempo que o controlador precisa para realizar sua sintonia.

O sistema de controle híbrido mostrou-se mais eficiente e mais robusto quando comparado aos métodos *on-line feedforward* e *feedback*, particularmente para sinais multi tonais.

Nas simulações numéricas foi possível observar que ao longo do tempo o desempenho deste controlador melhora significativamente diminuindo o nível de ruído (Vide figura 5.14 – caso multi ton).

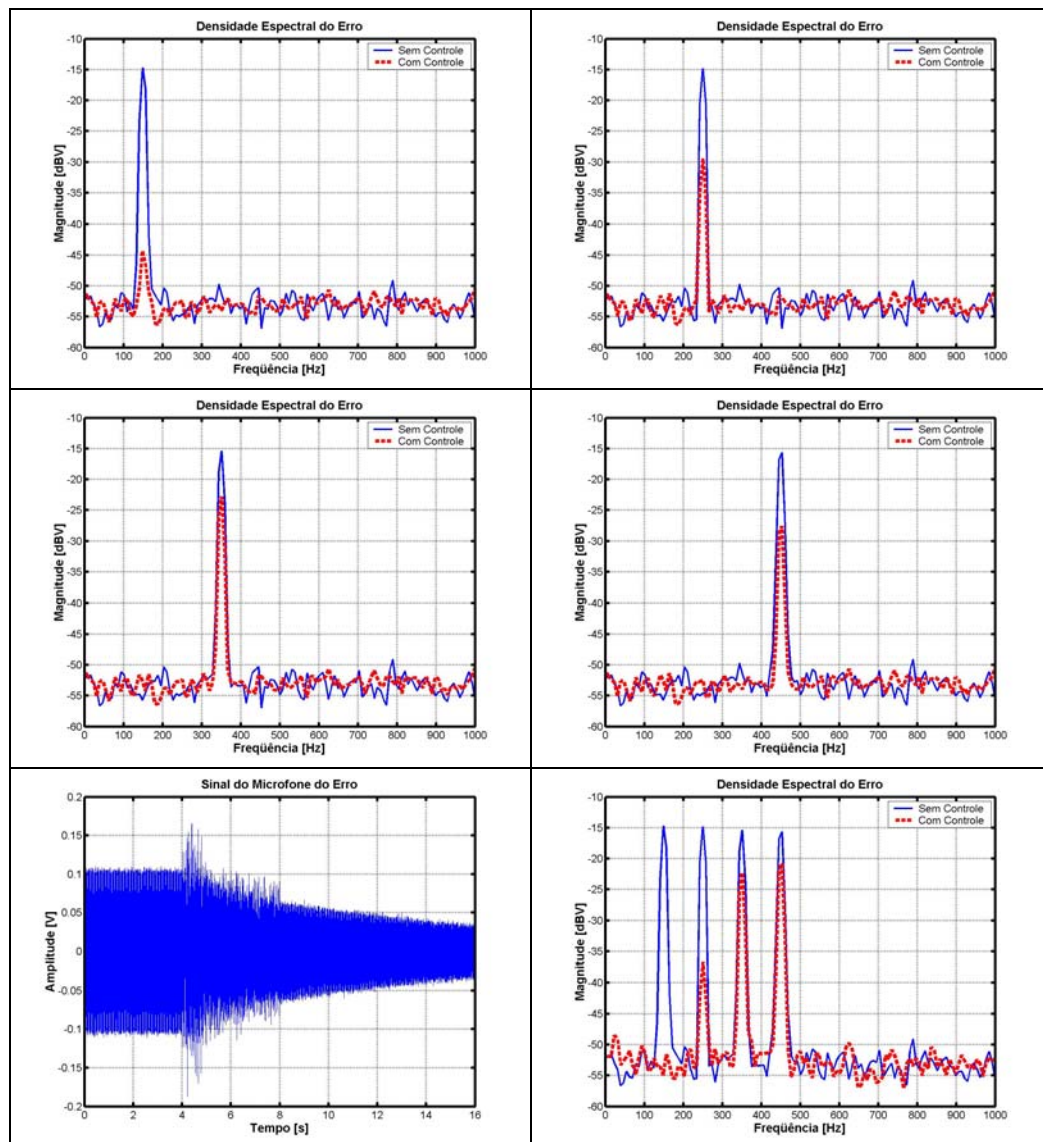


Figura 5.14 Densidade Espectral do Erro para o ensaio Híbrido – Mecanismo *on-line*.

Tendo em vista a avaliação experimental do comportamento numérico observado, os três tipos de controladores com identificação *on-line* e *off-line* foram investigados em laboratório e são apresentados na seção seguinte.

5.3 Avaliação Experimental para o CAR Mono Canal de um Duto Acústico

Para testar experimentalmente os diferentes sistemas de controle apresentados, foi montada uma bancada experimental constituído por um duto de PVC que foi instrumentado com alto falantes (atuadores) e microfones (sensores).

Os alto falantes utilizados nesta bancada experimental foram da marca Bravox modelo BA6SS que possuem uma potência máxima de 60 Watts RMS e resposta em frequência de 50Hz a 20KHz.

Foram projetados e construídos amplificadores e condicionadores de sinais para realizar a interface entre os transdutores e a respectiva plataforma de controle dSPACE. Estes circuitos eletrônicos foram baseados no amplificador de áudio TDA2030. Estes amplificadores são circuitos integrados para o uso de amplificadores do tipo AB em baixa frequência. Tipicamente eles garantem 12W de potência de saída em cargas de 4Ω e 8W em 8Ω (Delfino, 2005).

Foram utilizados microfones do tipo eletreto unidirecionais JL-061C amplamente utilizados em telefonia. Estes microfones possuem sensibilidade de $-58\text{dB}/\mu\text{bar}$, com impedância de $2\text{K}\Omega$, faixa de frequências de 20Hz a 20KHz e relação sinal/ruído superior a 55dB (Jameco Electronics, 2004).

Também foram construídos circuitos eletrônicos para a polarização e o tratamento dos sinais provenientes dos microfones. Nestes circuitos, foram utilizados amplificadores operacionais comuns do tipo TL074. A baixa distorção harmônica e o baixo ruído fazem esta série ideal para aplicações de alta fidelidade em pré-amplificadores de áudio.

Os filtros antialiasing e de reconstituição foram projetados para banda de frequência de 500 Hz excluindo o nível DC. O nível DC presente no sinal pode levar a um processo de *overflow* por ocasião do tratamento dos dados ocasionando instabilidade no sistema. Para eliminar este problema utilizou-se um filtro digital passa alta “*notch*” com frequência de corte próxima de zero (Minguez, 1998). Na Figura 5.15 é apresentado o diagrama do processo de controle da bancada experimental.

O duto, mostrado na figura 5.15, possui um comprimento de 3.5m e um diâmetro de 0.15m. O alto-falante de ruído foi posicionado numa das extremidades e o alto-falante de controle posicionado a 2.35m do alto-falante de ruído. O microfone de referência foi colocado a uma distância de 0.25m e finalmente o microfone de erro a 3.36m do alto falante de ruído, respectivamente.

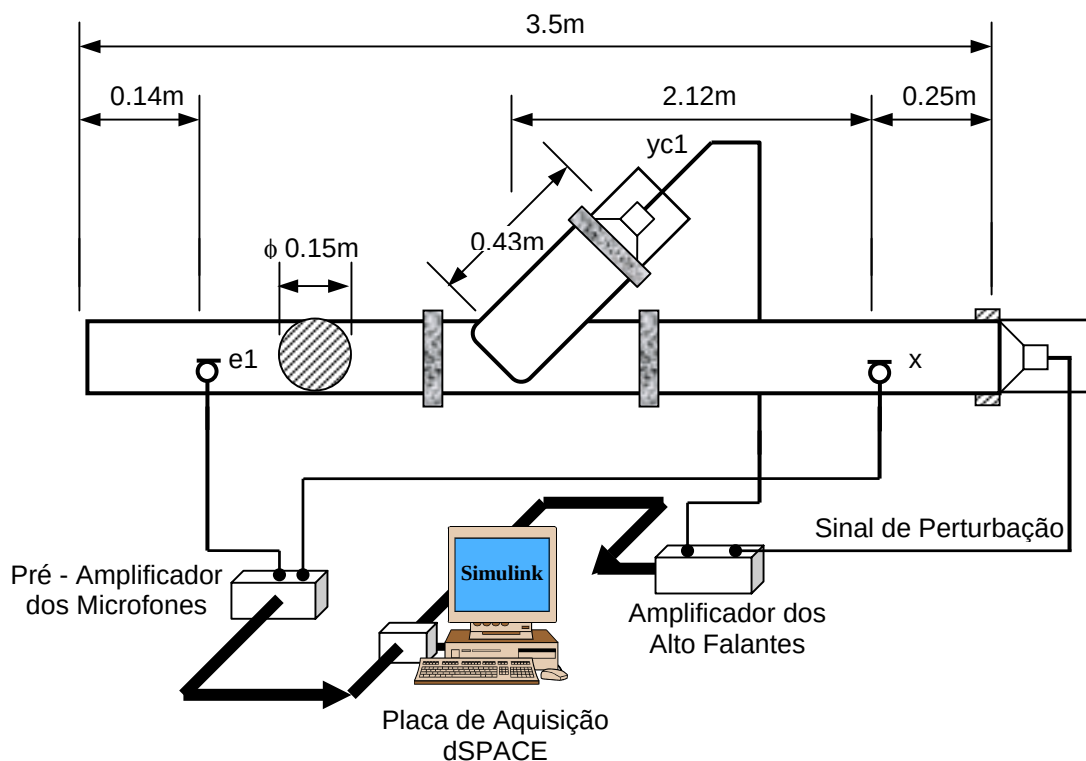


Figura 5.15 Esquema da Bancada Experimental do Duto Acústico - Caso Mono Canal.

Os algoritmos de controle foram implementados no Matlab-Simulink® e testados a partir da plataforma de aquisição de dados dSPACE®.

Nesta plataforma foram utilizados 2 canais de conversão analógico digital (A/D), com 16 bits de resolução e *Sample and Hold* (S/H), para aquisição dos sinais provenientes dos microfones.

Para gerar o sinal de ruído e o sinal controle foram utilizados também 2 canais de conversão digital analógica (D/A) nesta mesma plataforma. A frequência de amostragem utilizada foi de 2 KHz.

Na Figura 5.16 temos a foto do sistema físico utilizado:

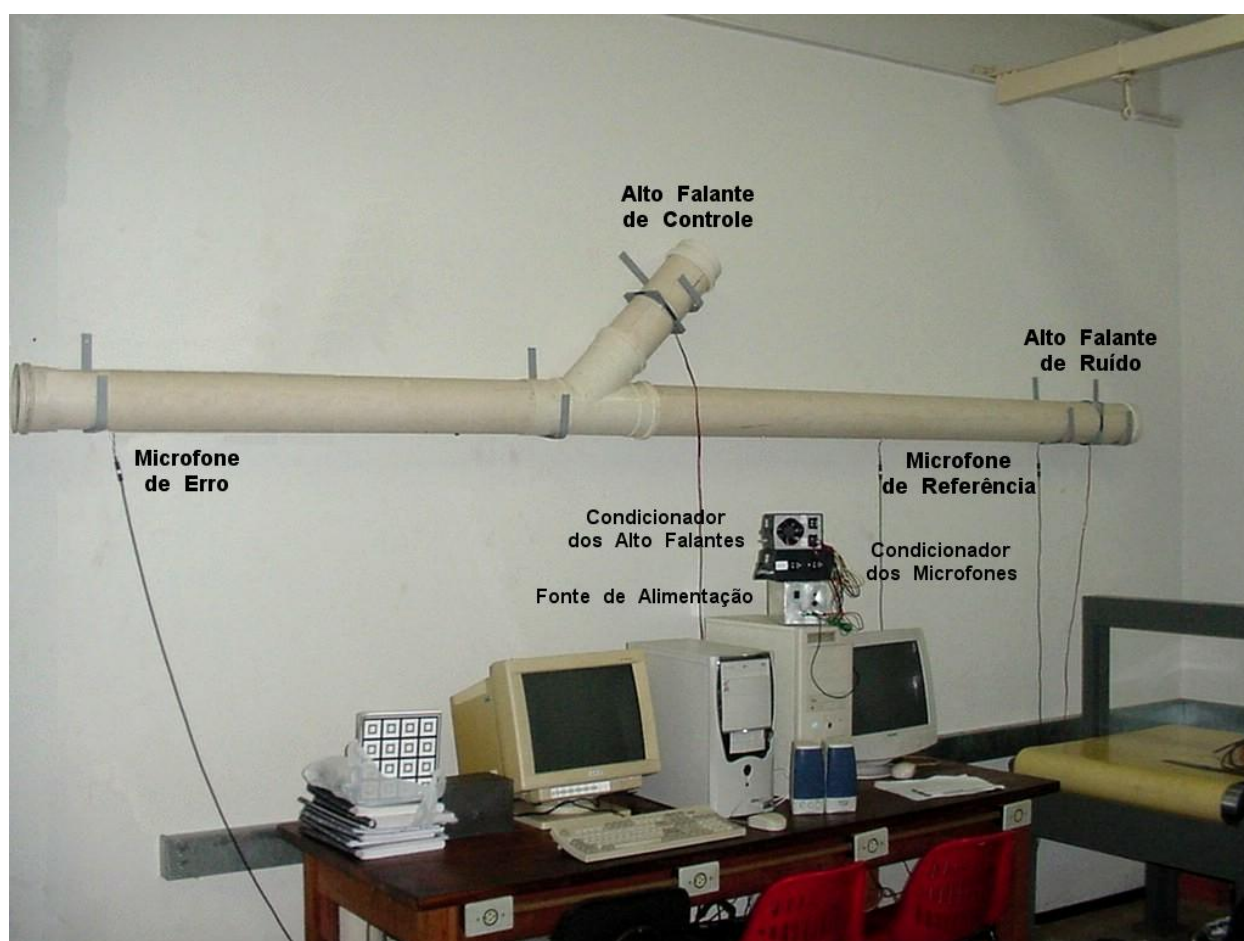


Figura 5.16 Foto do Sistema de Controle Completo.



Figura 5.17 Foto detalhada dos alto falantes e Microfones.

As funções de resposta em frequência envolvidas no duto podem ser vistas na Figura 5.18. Estas foram obtidas através da excitação do sistema com ruído branco de média nula.

Cada alto-falante foi excitado individualmente e os dados foram coletados pelos microfones com a frequência de amostragem de 2KHz, utilizando janela retangular e 30 médias.

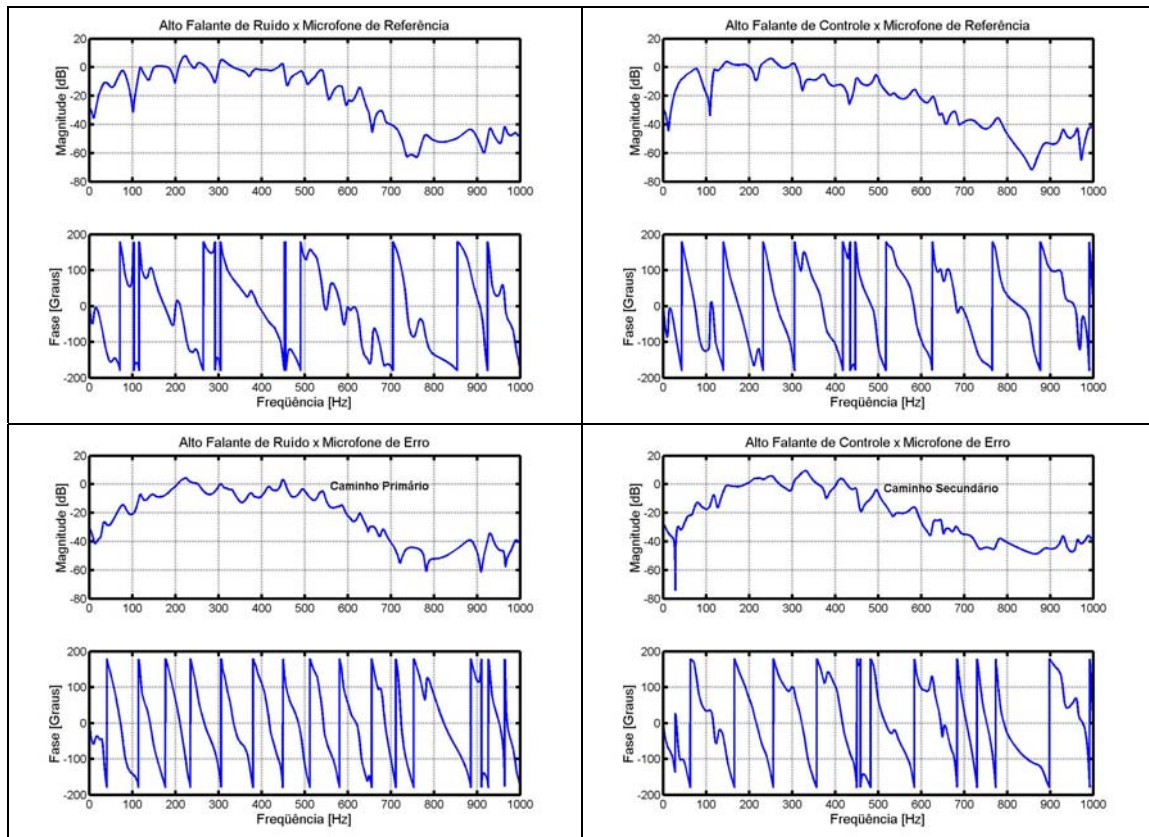


Figura 5.18 Diagrama de Bode do Sistema Físico – Duto PVC – Caso Mono Canal.

Antes de iniciar os ensaios experimentais de controle, primeiramente, foi realizado o ajuste *off-line* do caminho secundário a partir de um modelo ARX, em seguida, proceder-se com os resultados de controle do respectivo sistema.

5.3.1 Formulação do Modelo ARX Utilizado para Estimar o Caminho Secundário

A função de transferência do caminho secundário foi estimada *off-line* utilizando-se uma aproximação polinomial por um modelo do tipo ARX. O modelo ARX utilizado possui a seguinte formulação (Aguirre, 2000):

$$A(k) \cdot y(t) = B(k) \cdot u(t - q) \quad (5.2)$$

Expandindo o modelo ARX e isolando o termo $y(t)$, tem-se:

$$y(t) = [b_1 \cdot u(t-q) + b_2 \cdot u(t-q-1) + \dots + b_{nb} \cdot u(t-q-nb+1)] - [a_1 \cdot y(t-1) + a_2 \cdot y(t-2) + \dots + a_{na} \cdot y(t-na)] \quad (5.3)$$

onde:

- na = número de pólos;
- nb = número de zeros + 1;
- q = atraso de tempo do sistema.

O modelo ARX dado pela expressão acima relaciona a saída atual, $y(t)$, a um número finito de saídas, $y(t-k)$, e entradas, $u(t-k)$, passadas.

Os coeficientes, $A(k)$ e $B(k)$, são encontrados minimizando-se o erro quadrático entre a saída estimada e a saída real do caminho secundário, obtido através de um ensaio experimental. Isto foi feito usando o *toolbox* do Matlab.

No ensaio aplicou-se ao atuador (alto falante de controle) um sinal elétrico do tipo ruído de banda estreita de 2Hz a 2KHz com nível RMS de 500mV.

Os parâmetros do modelo ARX ajustado foram:

- número de pólos igual a 70 ($na = 70$);
- número de zeros igual a 1 ($nb = 1$);
- atraso no tempo igual a zero ($q = 0$).

A frequência de amostragem utilizada foi de 2KHz, a mesma utilizada para o processo de controle.

Na Figura 5.20 tem-se, em uma janela no tempo, o sinal de saída do caminho secundário (adquirido experimentalmente) e a saída do caminho secundário estimado (simulado pelo modelo ARX).

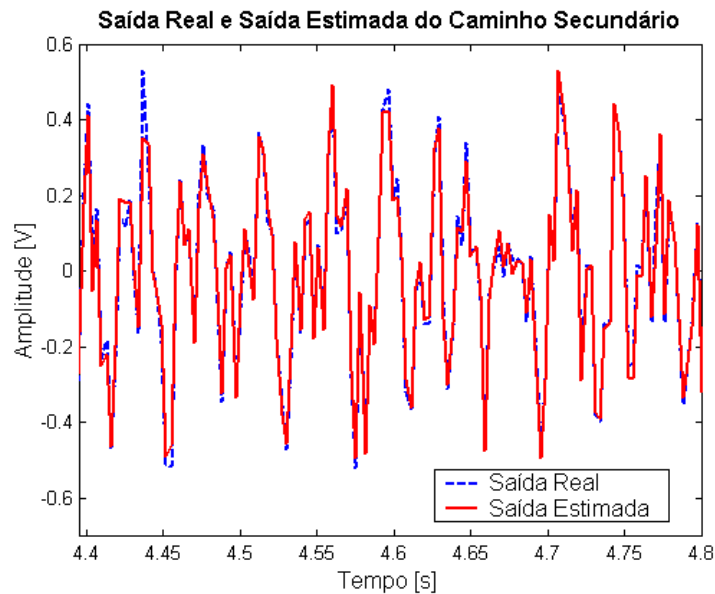


Figura 5.19 Validação do Modelo.ARX.

A seguir são apresentados os testes experimentais realizados para avaliar os sistemas de controle de ruído multicanal apresentados nas simulações numéricas, seção 5.2.

Para testar o desempenho dos algoritmos de controle, o sistema físico foi submetido por perturbações do tipo mono tonal em frequências de 150, 250, 350 e 450 Hz. Para verificar a robustez dos controladores o sistema físico também foi perturbado por uma função multi tonal composta por quatro funções senoidais com frequências de 150, 250, 350 e 450 Hz. Foram utilizados 60 coeficientes para os filtros FIR utilizados no processo de controle.

O sinal de perturbação foi gerado através do próprio Simulink®. Cabe destacar que o passo de adaptação μ (seção 3.3.1.2) utilizado nestes experimentos foi do tipo adaptativo limitado a 1% do seu valor máximo.

Os sinais de interesse foram adquiridos a partir do dSPACE® e posteriormente analisados com ajuda do software Matlab®.

5.3.2 Controle Ativo de Ruído FXLMS *Feedforward* Mono Canal

Na Figura 5.20 tem-se a densidade espectral do sinal de erro (saída do sistema) quando o sistema esta sobre a ação da perturbação de ruído.

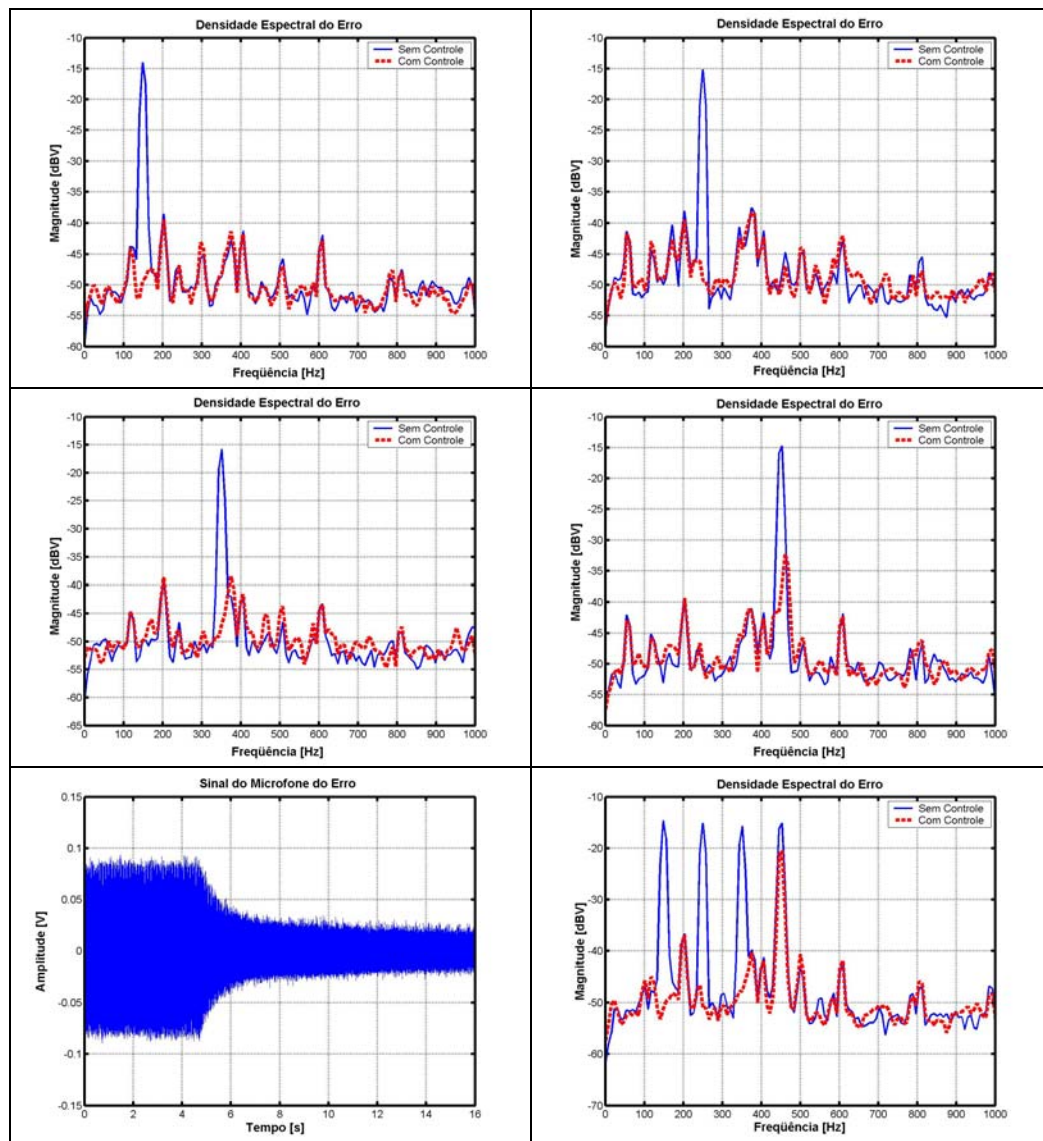


Figura 5.20 Densidade espectral do erro para o ensaio experimental FXLMS *feedforward*.

Nota-se na Figura 5.20 que o controlador FXLMS *feedforward* reduziu significativamente o nível de ruído do sistema dentro das freqüências de interesse. Observa-se um comportamento mais pobre em 450 Hz.

Também podemos observar nesta figura, para o caso multi tonal, o sinal no tempo do respectivo ensaio. Neste ensaio, o processo de controle é ativado em 4.0 segundos. Observa-se uma diminuição significativa da amplitude do erro com a evolução do tempo.

5.3.3 Controle Ativo de Ruído FXLMS *Feedback* Mono Canal

No controlador *feedback* observou-se também uma boa performance para as frequências de 150–350 Hz. No entanto para a frequência de 450 Hz o controlador não apresenta uma bom desempenho.

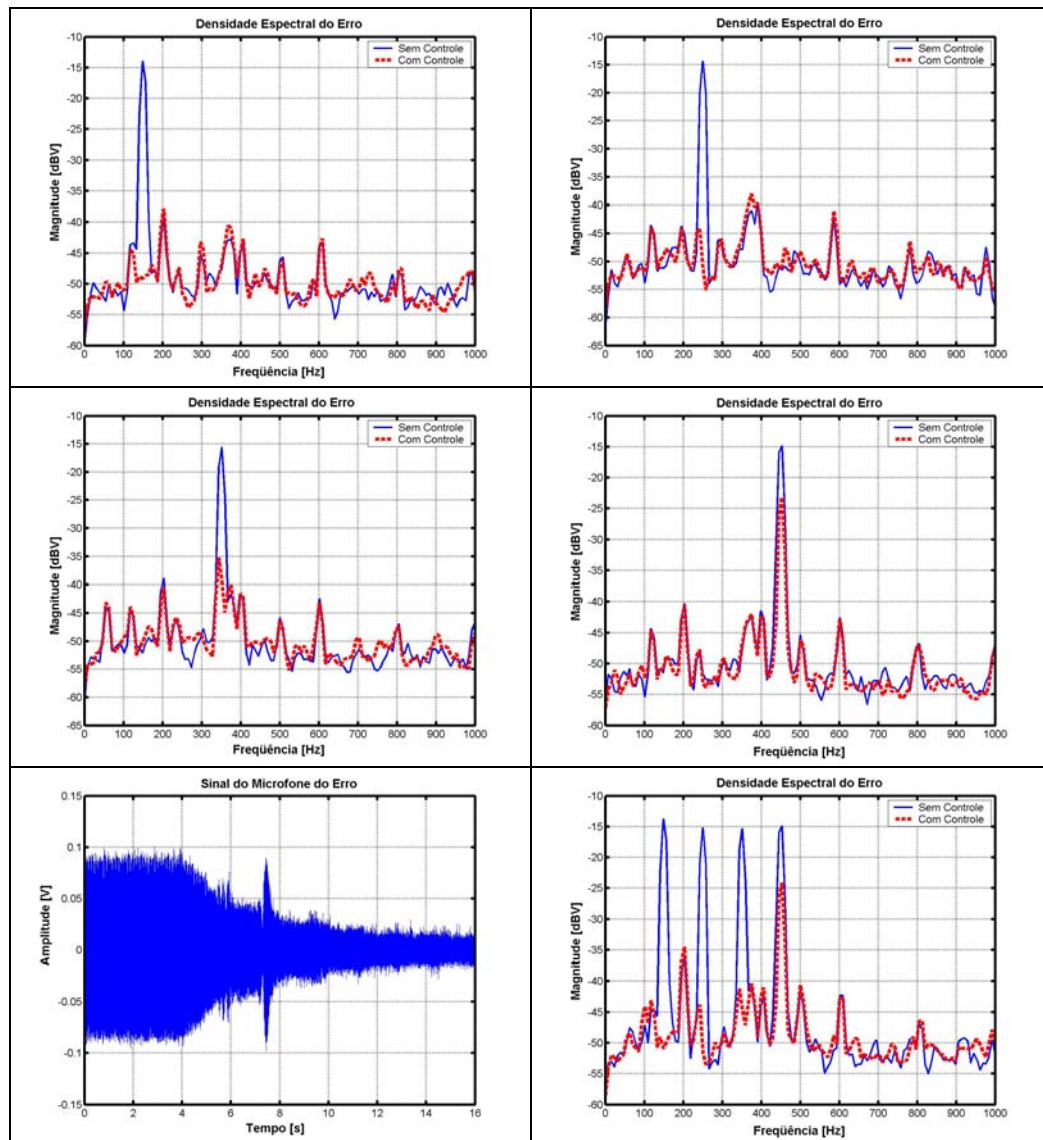


Figura 5.21 Densidade espectral do erro para o ensaio experimental FXLMS *feedback*.

Ensaio em laboratório não registrados nos permitem afirmar que a baixa eficiência do controlador, como na frequência de 450 Hz por exemplo, pode ser melhorada a partir da diminuição do passo de adaptação μ (Nuñez *et al.*, 2004).

5.3.4 Controle Ativo de Ruído FXLMS Híbrido Mono Canal

Com relação ao sistema Híbrido, observaram-se excelentes resultados, superiores inclusive aos sistemas de controle *feedforward* e *feedback*, particularmente no caso multicanal.

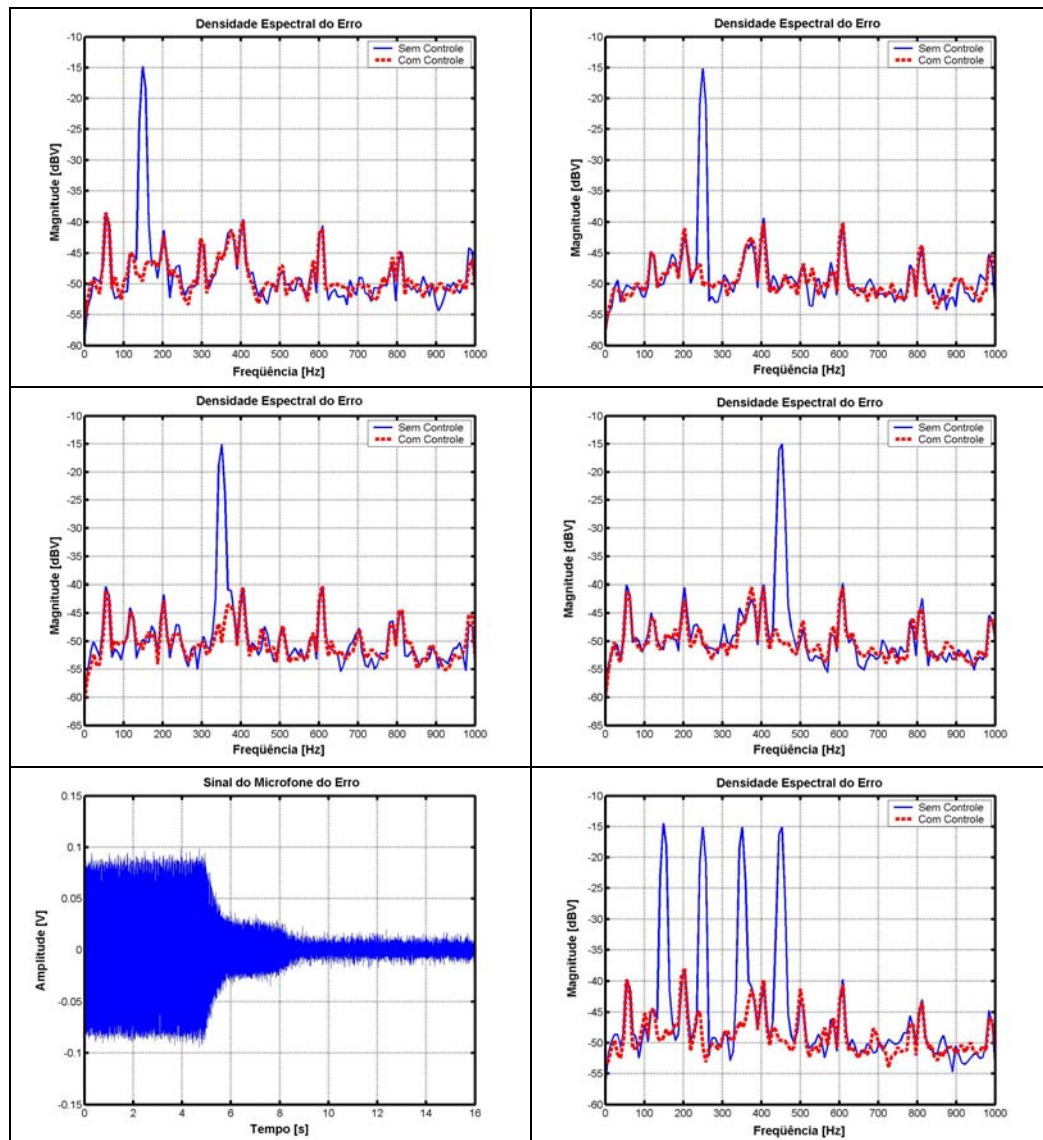


Figura 5.22 Densidade espectral do erro para o ensaio experimental FXLMS híbrido.

Para o caso da excitação multi tonal podemos observar que a convergência do algoritmo se mostrou mais rápida, eficiente e robusta. Quanto à estabilidade e a banda de controle, o algoritmo apresentou melhores resultados que as metodologias experimentais *feedforward* e *feedback*.

A seguir são apresentados os mecanismos de controle mono canal com a diferença que o caminho secundário é sintonizado de forma automática a partir do método de Eriksson.

5.3.5 Controle Ativo de Ruído FXLMS *Feedforward* Mono Canal Eriksson

Nesta proposta aplicou-se um ruído branco com a seguinte característica: ruído de banda estreita de 0Hz a 1KHz com nível RMS de 60mV. Como se vê na figura 5.23 esta metodologia apresentou bons resultados com atenuações em todas as frequências excitadas.

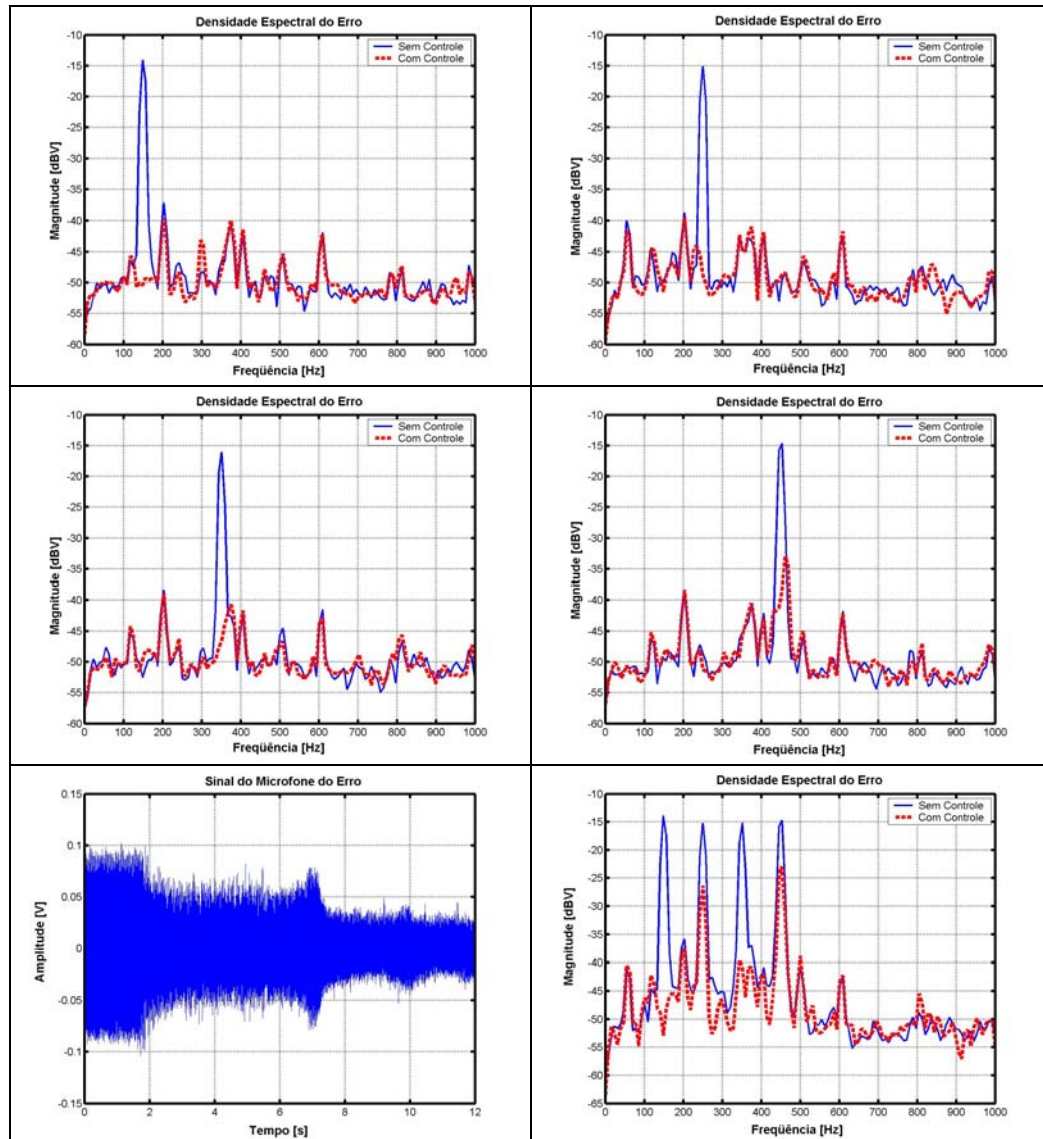


Figura 5.23 Densidade espectral do erro para o ensaio *feedforward* – Mecanismo *on-line*.

Na figura 5.23, é possível observar que o comportamento deste controlador é similar ao comportamento obtido nas simulações numéricas. Também, verificou-se, um desempenho mais pobre destes controladores nas frequências de 250 e 450Hz (caso multi tom). A baixa performance nestas frequências, se deve provavelmente, por imprecisões na estimativa ruim do caminho secundário.

5.3.6 Controle Ativo de Ruído FXLMS *Feedback* Mono Canal Eriksson

Na figura 5.24 é possível observar que o controlador FXLMS *feedback*, com mecanismo *on-line* do caminho secundário apresentou um comportamento pouco eficiente quando comparado ao controlador *feedforward*. Possivelmente, o problema decorre da necessidade de se estimar o sinal de referência e também realizar a estimativa do caminho secundário, fazendo com que o sistema de controle se torne mais complexo na sua sintonia.

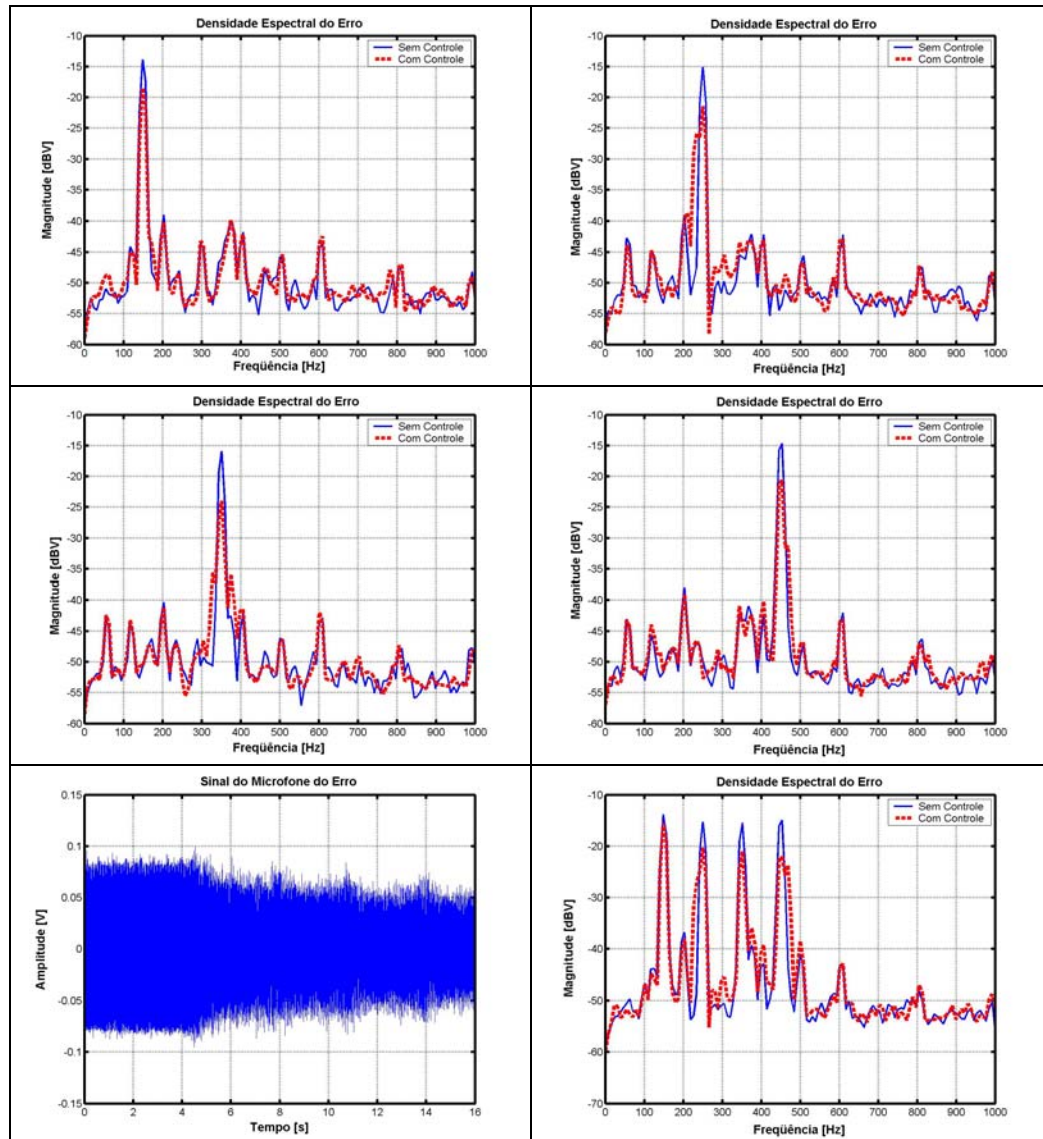


Figura 5.24 Densidade espectral do erro para o ensaio *feedback* – Mecanismo *on-line*.

No entanto, cabe destacar que o sistema de controle não diverge, porém o desempenho é comprometido.

5.3.7 Controle do sistema FXLMS Híbrido Mono Canal Eriksson

Como de certa forma, antecipado pelas simulações numéricas, o sistema de controle híbrido com mecanismo automático de adaptação *on-line* do caminho secundário, obteve excelente desempenho nas diferentes frequências analisadas. Observa-se, no caso da excitação multi tonal maior dificuldade com a componente de alta frequência (450Hz).

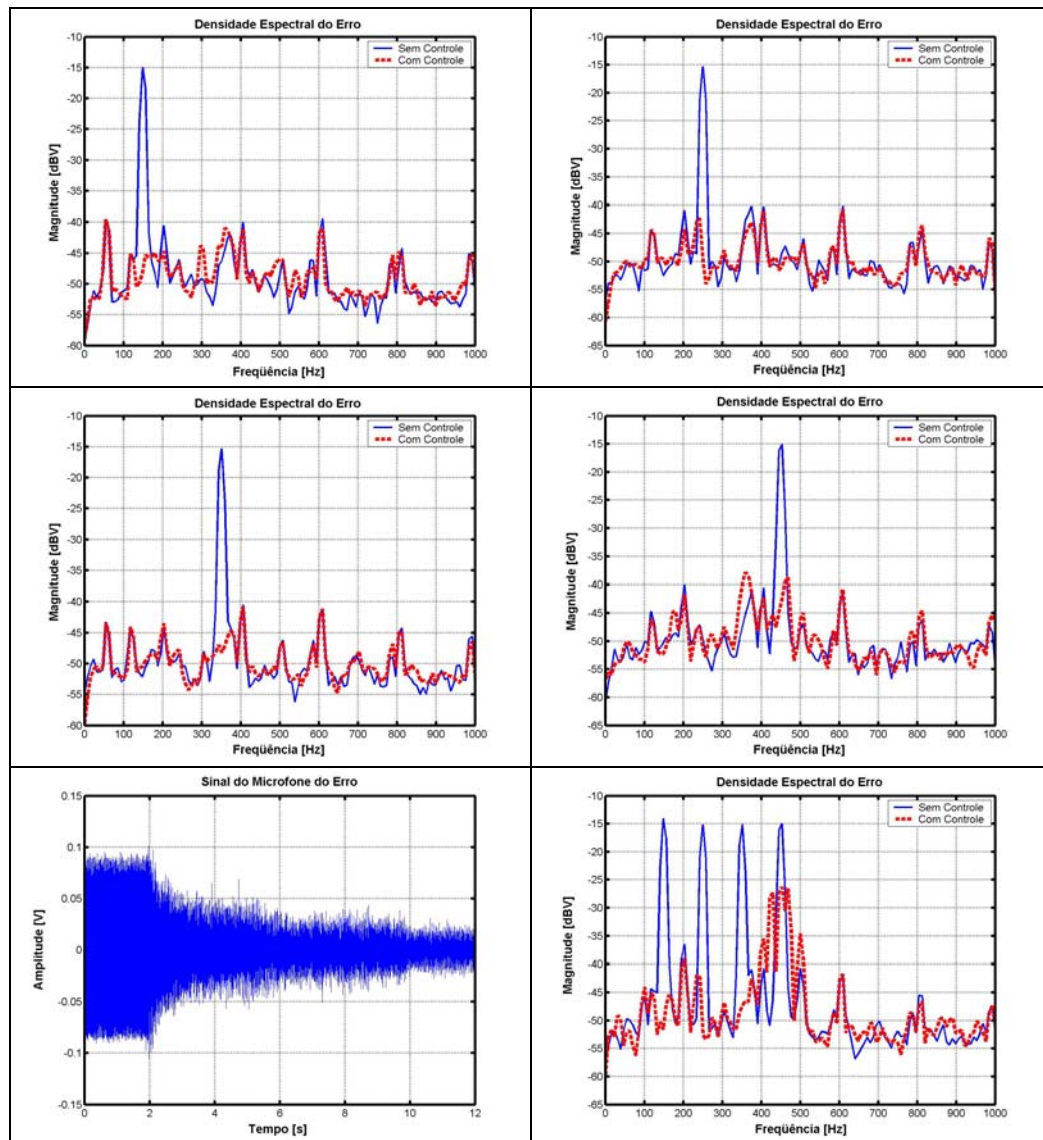


Figura 5.25 Densidade espectral do erro para o ensaio Híbrido – Mecanismo *on-line*.

Com base na experiência conduzida, pode-se concluir:

- (a) Todas as metodologias apresentam algumas deficiências nas frequências mais elevadas dentro da banda de interesse, que nos casos estudados foi de 0 a 500 Hz.

- (b) Em baixas frequências e nos casos multi tonais os algoritmos que envolvem identificação *off-line* apresentam desempenhos semelhantes.
- (c) Das metodologias que envolvem identificação *off-line*, a estrutura híbrida foi a que demonstrou mais eficiência e a *feedback* a menos eficiente, embora menos onerosa em hardware. Esta diferença ficou mais evidente nos experimentos multi tonais e em altas frequências.
- (d) No caso da estimativa *on-line*, segundo a proposta de Eriksson, o método *feedback* não se mostrou eficaz, seja nos testes mono tonais e multi tonais.
- (e) O controlador híbrido com estimativa *on-line* revelou-se superior ao controlador *feedforward*, sendo ambos no entanto bastante eficientes.

Finalmente, cabe destacar que o caminho secundário é peça fundamental na utilização destes sistemas de controle FXLMS, conseqüentemente uma estimativa ruim faz com que o desempenho também se torne pouco eficiente. A estrutura de controle *feedback* adaptativa deve ser utilizado somente para pequenos sistemas físicos ou com fontes de ruído com pouco espalhamento espectral.

Após ter realizado o estudo das diversas técnicas de controle ativo de ruído, aplicado a uma estrutura com um único sensor e um único atuador, na seção seguinte será realizado o estudo experimental para o controle ativo de ruído com vários sensores e vários atuadores denominado sistemas de controle ativo de ruído multicanal.