

CONTROLE ATIVO DE RUÍDO EM DUTOS UTILIZANDO MÉTODO DE MULTICANAL

João Gabriel Oliveira de Miranda, jgmiranda@mestrado.ufu.br
Prof. José Francisco Ribeiro, jribeiro@mecanica.ufu.br
Prof. Marcus Antônio Viana Duarte, mvduarte@mecanica.ufu.br

Resumo: Desenvolver uma metodologia e experimentalmente um controle ativo de ruído em um duto de multicanal (múltiplas-entradas e/ou múltiplas-saídas) para otimização da atenuação do ruído de uma fonte sonora utilizando o duto como caminho desta fonte. Neste estudo de caso, será utilizado de uma fonte sonora (ruído branco) e dois auto-falantes (multicanal de entrada) para que o controle tenha uma melhor eficiência.

Palavras-chave: Controle ativo, caminho primário, caminho secundário, filtro LMS

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a saúde e bem estar do ser humano é o grande motivador deste trabalho. Ruídos acústicos são considerados fontes de poluição sonora que podem causar efeitos adversos na vida humana. Para solucionar estes problemas, interesse considerável tem sido mostrado em Controle Ativo de Ruído (ANC – Active Noise Control ou em português CAR- Controle Ativo de Ruído).

A exposição da população ao Ruído Ambiente, particularmente nas zonas urbanas, tem merecido uma atenção crescente por parte da comunidade. Uma das grandes preocupações trata-se de analisar a influência do ruído industrial, na qualidade do ambiente exterior onde as pessoas circulam ou permanecem, sendo este tipo de ruído uma das maiores causas de reclamações das comunidades no órgão competente de sua cidade (Handley, 1995).

O ruído transiente a partir de 35 dB(A) já provoca reações vegetativas no ser humano. A partir de 70 dB(A), a longo prazo, o efeito do ruído induz a hipertensão arterial, secreção elevada de catecolaminas e de hormônio corticosteroides e adrenocorticotróficos, úlcera péptica, stress, irritação, excitação maníaco-depressiva, arteriosclerose e infarto, entre outros males (Cantrel, 1974; WHO, 1980; Rai et al, 1981; Vacheron, 1993). Rai et al observaram em trabalhadores submetidos a jornadas de trabalho de cerca de 7 horas em ambientes com níveis de ruído da ordem de 97 dB(A) aumentos de 46% no colesterol livre e 31% no cortisol, ou seja: bombardeados pela poluição sonora dos centros urbanos, os cidadãos estão “ingerindo muita gordura e outros venenos pelo ouvido”.

Há duas formas de se atenuar o ruído acústico. A forma tradicional utiliza técnicas passivas tais como cercas, barreiras e silenciadores. Normalmente, os silenciadores são classificados como passivos, resistivos ou reativos. Os silenciadores passivos usam o conceito de mudança da impedância para atenuar o ruído, enquanto que os resistivos utilizam o conceito de perda de energia causada pela propagação do som em dutos alinhados com materiais absorventes. Já os silenciadores reativos utilizam a combinação de diafragmas e tubos para atenuar o som indesejado. Os reativos são comumente utilizados como escapamentos em máquinas de combustão interna, enquanto que os resistivos são utilizados em dutos de ventilação. Estes silenciadores são eficientes em frequências altas, entretanto, são volumosos, caros e ineficientes em baixas frequências.

Para solucionar o problema de ruído em baixa frequência, interesse considerável tem sido observado na área de controle ativo de ruídos. O sistema de controle ativo de ruído contém um dispositivo eletroacústico que atenua o som indesejado pela geração de uma onda sonora (anti-ruído) de igual amplitude e fase oposta. O ruído primário, indesejado, e o anti-ruído se combinam acusticamente, resultando no cancelamento de ambos. A Figura 1 mostra as formas de ondas do ruído indesejado, do anti-ruído e do ruído residual quando eles se superpõem. O desempenho do cancelamento do ruído primário depende da precisão em amplitude e fase do anti-ruído gerado.

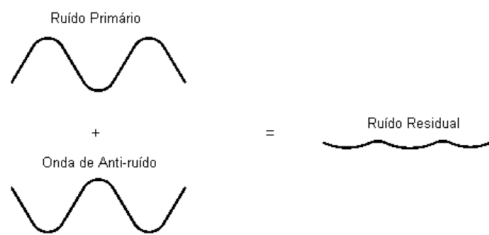


Figura 1. Conceito físico de cancelamento de ruído.

Trabalhos anteriores como a dissertação de mestrado do Eng. Ms. Leandro César Delfino (Controle Ativo de Ruído em Dutos Utilizando Processadores Digitais De Sinais) e da Tese de Doutorado do Prof. Dr. Israel J.C. Nuñez (Controle Ativo de Ruído Um Estudo Teórico-Experimental) ambos de 2005 apontam dificuldades e possível continuidade nos projetos de controle ativo de ruído em dutos. Levando em consideração estes estudos entre vários outros do passado, o trabalho proposto pretende dar continuidade a estes estudos abrangendo um seguimento pouco discutido nos referenciados, o controle ativo de dutos utilizando Multicanal de grande complexidade conforme analisado nos trabalhos anteriores.

2. METODOLOGIA

2.1 Controle Ativo de Ruído

Desde a proposta de Lueg em 1936, as metodologias de controle ativo de ruído se subdividiram em três categorias: a metodologia em malha aberta *feedforward*, a metodologia em malha fechada *feedback* e a metodologia híbrida. A escolha correta depende de vários fatores envolvidos no problema, tais como: disponibilidade de uma referência não-acústica, tamanho do sistema físico, banda de controle, dentre outros (Bai et al., 2000).

Se sinais não-acústicos do ruído primário estão disponíveis, as estruturas *feedforward* e híbrida serão eficientes (Kuo et al., 1996). Mesmo quando esta referência não-acústica estiver indisponível, as estruturas *feedforward* e híbrida têm sido amplamente utilizadas como alternativa, onde um sensor acústico é utilizado como sinal de referência. Se o sistema é pequeno, tal como um protetor auricular ativo, a estrutura *feedback* pode ser uma alternativa viável (Bai et al., 1997). Se o problema não é tão simples, uma aplicação direta do controle *feedback* pode garantir atenuação apenas em uma banda estreita de frequências (Bai et al., 1998).

Um sistema de controle ativo de ruído é constituído dos seguintes elementos:

- **Sensores:** Microfones, acelerômetros, tacômetros ou outros dispositivos capazes de oferecer referências dos níveis de ruído a cancelar.
- **Atuadores:** Dispositivos eletroacústicos, através dos quais se modifica o campo acústico com a finalidade de obter uma diminuição da pressão acústica. Podem ser atuadores eletromecânicos.
- **Planta:** Ambiente acústico a controlar. Exemplos clássicos são ondas planas acústicas em dutos, o ruído no interior de um veículo, etc.
- **Controlador:** Sistema eletrônico que processa os sinais dos sensores e mediante algum conhecimento prévio da planta, gera um sinal que será transformado em ondas acústicas pelos atuadores.

No controle de malha aberta *feedforward*, o ruído de referência é sentido antes de se propagar através do alto-falante de cancelamento. No controle de malha fechada *feedback*, o controlador cancela o ruído sem nenhum benefício da informação anterior da entrada de referência (Widrow et al., 1985).

2.1.1 Sistema de Controle em Malha Aberta (*Feedforward*) de Banda Larga

Uma quantidade considerável de ruído de banda larga é produzida em dutos, tais como sistemas de ventilação e exaustão. Um simples esquema de sistema de controle em malha aberta de banda larga (*Broadband Feedforward ANC*)

para um duto pode ser visto na Figura 5 Quando se dispõe de um sinal que serve como referência do ruído que se deseja cancelar, diz-se que o sistema é de malha aberta. Nesta configuração o sensor de referência mede o sinal indesejado em um ponto anterior e então alimenta um controlador para se obter o cancelamento do ruído em um ponto posterior. Em outras palavras, um sinal de referência $x(n)$ é medido por um microfone próximo à fonte de ruído antes que este passe pelo alto-falante. O controlador digital utiliza o sinal de referência para gerar um sinal $y(n)$ de igual amplitude e fase oposta (180°). O sinal de anti-ruído é utilizado para guiar o alto-falante para produzir um som de cancelamento que atenua o ruído acústico primário no duto.

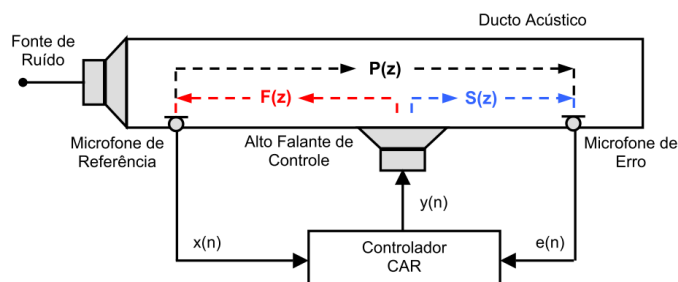


Figura 5: Controle Ativo de Ruído em malha aberta de banda larga

A distância entre o microfone de referência e o alto-falante de cancelamento deve satisfazer o princípio da causalidade. Isto significa dizer que o atraso do sinal acústico entre o microfone de referência e o alto-falante deve ser maior ou no mínimo igual ao atraso entre a fonte de ruído e o microfone de referência somado ao atraso entre o alto-falante e o microfone de erro. De outra forma, a causalidade significa que o sinal de referência deve ser medido de tal forma que exista tempo para se gerar o anti-ruído antes que o ruído chegue ao alto-falante de cancelamento. Além dos atrasos acústicos, deve-se também considerar o atraso gerado pelos cálculos realizados pelo controlador digital (Nelson, 1992).

A principal tarefa do controlador é se antecipar ao fenômeno físico, de forma preditiva, através das informações captadas pelo sensor de referência, de modo que o ruído seja cancelado no sensor de erro. Assim, o sinal de referência medido pelo sensor de entrada e o sinal proveniente do sensor de erro devem possuir alta correlação.

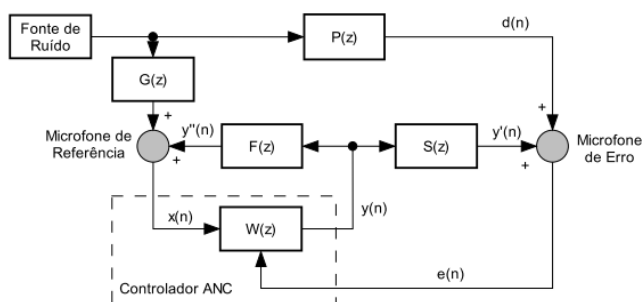


Figura 6: Diagrama de blocos para um CAR malha aberta de banda larga

Na maioria das metodologias, o controlador é um filtro digital cujos coeficientes são modificados (adaptados) segundo uma estratégia definida. O microfone de erro mede o sinal de erro (ou resíduo) $e(n)$, que é comumente utilizado como um índice de performance para adaptar os coeficientes do controlador. O uso de um sinal de erro para ajustar os coeficientes do filtro não constitui uma realimentação (malha fechada), pois o sinal de erro não é comparado com o sinal de referência. Além disto, ele não é entrada do filtro adaptativo, sendo utilizado somente na adaptação. O diagrama de blocos deste esquema pode ser visto, considerando a Transformada Z, na Figura 6.

Os sinais e funções de transferência são:

$d(n) \equiv$ Sinal da fonte de ruído no microfone de erro.

$e(n) \equiv$ Sinal de erro ou resíduo.

$x(n) \equiv$ Sinal de referência (entrada) do controlador.

$y(n) \equiv$ Sinal de saída do controlador.

$P(z) \equiv$ Função entre a fonte de ruído e o microfone de erro (Caminho Primário).

$G(z) \equiv$ Função de transferência entre a fonte de ruído e o microfone de referência.

$S(z) \equiv$ Função entre o atuador e o microfone de erro (Caminho Secundário).

$F(z) \equiv$ Função entre o atuador e o microfone de referência (Caminho de Realimentação).

$W(z) \equiv$ Função de transferência do sistema de controle.

Segundo à Figura 6, a fonte de ruído produz um sinal indesejado que sofre mudanças em suas propriedades ao longo dos caminhos $G(z)$ e $P(z)$, tornando-se $u(n)$ e $d(n)$, respectivamente. O controlador $W(z)$ recebe o sinal de referência $x(n)$, produzindo uma saída estimada $y(n)$. Esta saída também sofre mudanças ao longo dos caminhos $F(z)$ e $S(z)$, tornando-se $y''(n)$ e $y'(n)$, respectivamente. Este por sua vez, é somado acusticamente com o sinal $d(n)$, gerando o resíduo do ruído $e(n)$. A realimentação acústica indesejada $y''(n)$ pode causar problemas de instabilidade no sistema. Alguns autores desconsideram a existência da função $G(z)$, devido ao posicionamento do sensor ser muito próximo à fonte de ruído.

2.2 Montagem do equipamento

O intuito deste trabalho é utilizar dos algoritmos de Controle Ativo de Ruído presentes na literatura, sendo eles malha aberta (*feedforward*) e de malha fechada (*feedback*) juntamente com filtro LMS e otimizar esse controle utilizando uma placa de aquisição de sinais dSPACE (Processador Digital de Sinais de última geração) e software como o SIMULINK do MATLAB® para criar o programa de controle com o objetivo de atenuar o máximo possível o ruído que passa pelo duto, sendo este ruído gerado por um gerador de sinais padrão. O trabalho consiste em adaptar o melhor método de controle para este caso do duto de multicanal para que se possível dar continuidade futuramente em uma tese onde será realizado em campo aberto (sem duto). Utilizando de uma bancada experimental de tubo PVC, será utilizado uma bancada conforme exemplo da figura 4 para realização dos experimentos.

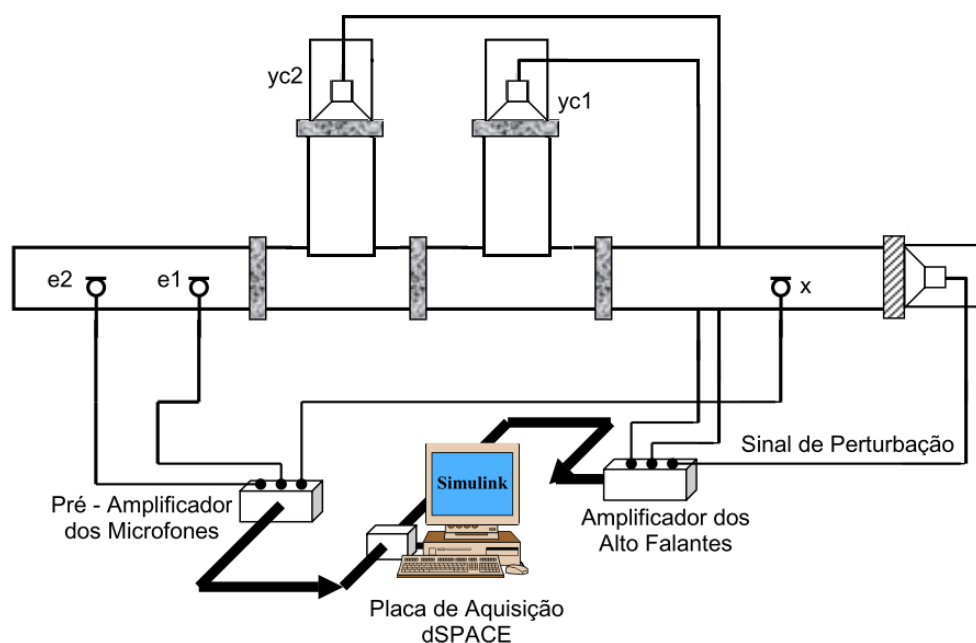


Figura 2. Exemplo da bancada experimental (Duto acústico Multicanal)

Embora conceitualmente simples, há inúmeras dificuldades e limitações a serem vencidas quando se pretende implementar um controlador ativo de ruído. Dentre estas destacam-se:

- Variações inesperadas do ambiente em decorrência de mudanças climáticas, das suas características acústicas, da presença mais/menos de pessoas, etc;
- Limitações tecnológicas dos transdutores eletroacústicos, sendo que em muitos casos os transdutores utilizados para o controle têm que trabalhar em ambientes muito agressivos com acentuadas taxas de poeira, umidade e altas temperaturas;
- Dependência acentuada do volume físico de controle e da localização dos sensores e atuadores neste volume;
- A complexidade de implementação dos algoritmos de controle utilizados. Neste caso deve-se observar atentamente os requisitos de velocidade e dimensão do software, como também o ajuste adequado dos parâmetros do controlador tendo em vista sua estabilidade e eficiência e
- As características não lineares dos sensores e atuadores que introduzem complexidade no projeto do controlador, (Kou et al., 1996).

Para contornar algumas destas dificuldades têm sido propostos os controladores automaticamente adaptáveis. Tais controladores são filtros adaptativos, implementados em processadores digitais de sinais (DSP) que buscam, por meio de ajustes "on-line" dos seus coeficientes, minimizar o ruído do sistema, (Goodwin et al., 1984; Clarkson, 1993). Nestes procedimentos os filtros mais comumente usados são os do tipo resposta finita ao impulso ("finite impulse response - FIR") e resposta infinita ao impulso ("infinite impulse response - IIR"). Os mecanismos mais comumente usados no ajuste dos coeficientes dos filtros são os algoritmos de ajustes por mínimos quadrados (LMS – Least Mean Square) (Widrow, 1975).

O trabalho irá tratar também de métodos dos caminhos primários e secundários do controle, onde poderão ser definidos como Off-line ou Online. O método Online pouco visto nos trabalhos citados devido suas dificuldades faz com que ocorra a modelagem do caminho primário e secundário em tempo real, ou seja, o ambiente pode ser alterado em tempo real e o controle ativo continuará funcionando "Não interfere o controle de ruído". Com a bancada experimental será testado este método Online para efeito de comparação e dependendo dos resultados ampliando conhecimentos para dar continuidade no controle em campo aberto.

Utilizando de uma bancada já existente conforme figura 3, será possível realizar as adaptações necessárias para que o complexo tubular seja transformado em um duto acústico de multicanal conforme exemplificado na figura 2.



Figura 3. Bancada experimental montada, aguardando adaptação para multicanal.

Será utilizado uma placa de aquisição dSPACE modelo CP1104 conforme figura 4, um osciloscópio Tektronix modelo TDS 2012C conforme figura 5, dois amplificadores, sendo eles, um amplificador para os dois microfones tipo PCB (Microfone de Referência e Microfone de Erro) e um amplificador para os 2 alto-falantes (Auto-falantes de controle) conforme figura 6. Microfone ¼” da Bruel & Kjaer modelo 4957 de alta precisão e relativamente de custo elevado, sendo que os mesmos já possuem pré-amplificadores embutidos conforme figura 7. Uma fonte de alimentação especial com transformador de saída 12V para os amplificadores conforme figura 8. O alto-falante de referência emitira o ruído a partir de um gerador de sinal da Stanford Research Systems (SRS) modelo DS360 conforme figura 9. Por fim será utilizado um PC tipo Desktop de altíssima poder de processamento onde a a placa de aquisição dSPACE está instalada juntamente com um “Pendrive Hardlock” (chave de segurança) apropriado para a utilização do sistema. Neste Desktop será realizado a programação apropriada dentro do programa Simulink-Matlab® que já possui uma interface com a placa de aquisição dSPACE, conforme figura 10 ilustrativa de como é a interface do programa. Por fim um decibelímetro modelo Larson Davis modelo LxT1 para adquirir a pressão sonora em Decibel para confirmar o quanto atenuou o ruído a partir do CAR (Controle Ativo de Ruído) implementado conforme figura 11.



Figura 4. Placa de aquisição de sinais dSPACE.

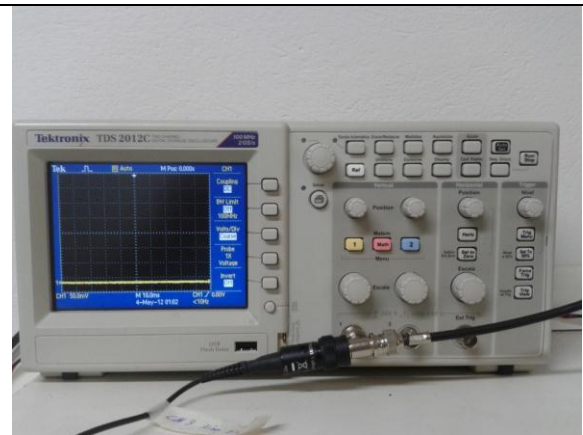


Figura 5. Osciloscópio, acompanhamento em tempo real dos sinais.

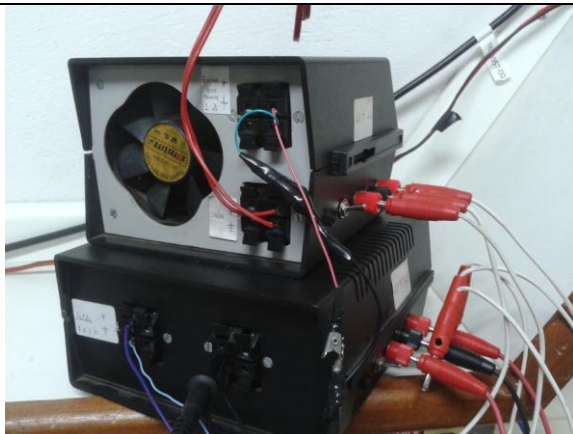


Figura 6. Amplificadores para microfones e alto-falantes.



Figura 7. Microfone da B&K alta precisão



Figura 8. Fonte de alimentação com transformador de 12V para os amplificadores.



Figura 9. Gerador de sinais Stanford Research Systems (SRS) modelo DS360

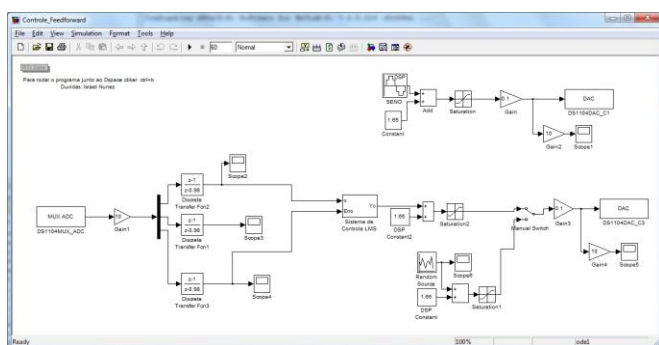


Figura 10. Figura ilustrativa do programa Simulink-Matlab® com interface com a dSPACE



Figura 11. Decibelímetro Larson Davis modelo LxT1 de alta precisão.

3. Resultados e expectativas do trabalho proposto

Este trabalho ainda não está em andamento, no entanto o entendimento do processo de controle ativo de ruído e as formas as quais será realizado o procedimento já estão tomando forma.

O entendimento do sistema com o uso de mono-canal é imprescindível para que o método de Multi-canal tenha sucesso, para o modelo monocanal já temos resultados, montagem da bancada experimental conforme figura 3. O esquema de programação da D-space para mono-canal já está funcionando conforme figura 10. Foi utilizado um gerador de sinais conforme figura 9 para gerar um sinal senoidal a 250Hz e amplitude de 0,2 Vrms.

Esquema de funcionamento do experimento pode ser entendido conforme figura 11:

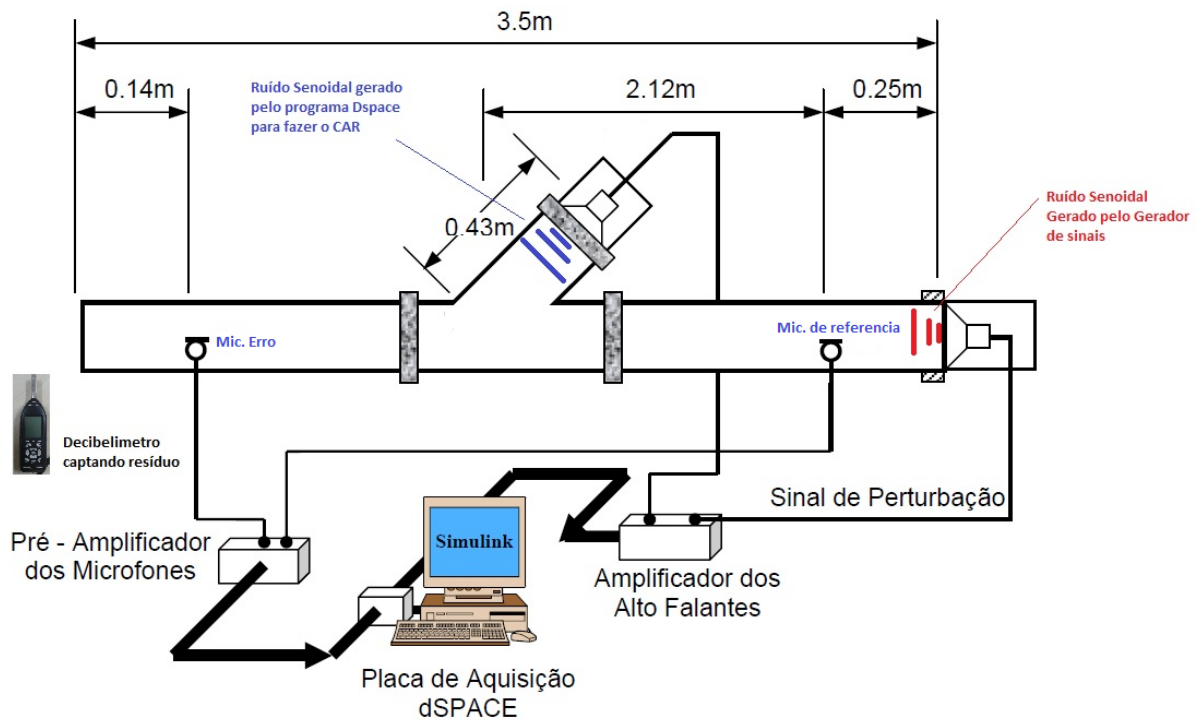


Figura 11. Figura ilustrativa da bancada experimental para Monocanal

A figura a seguir demonstra o Ruído caminhando pelo tubo sem controle nenhum conforme figura 12 e em seguida na figura 13 o Controle Ativo de Ruído adaptativo funcionando para efetuar atenuação do ruído.

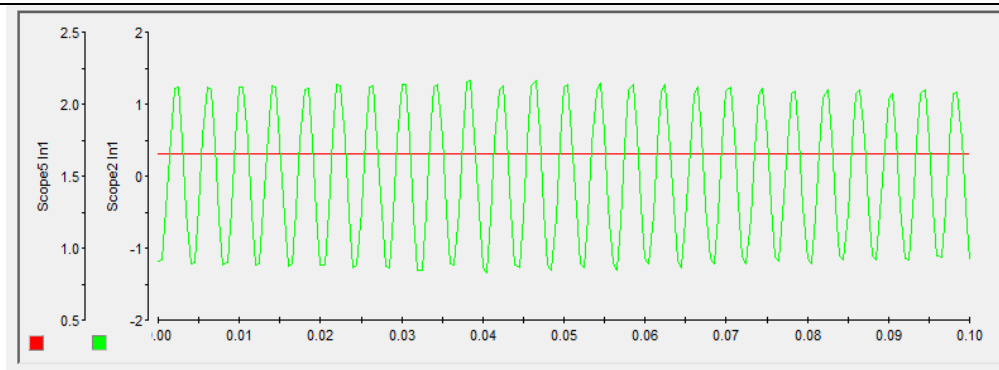


Figura 12. Ruído sem controle

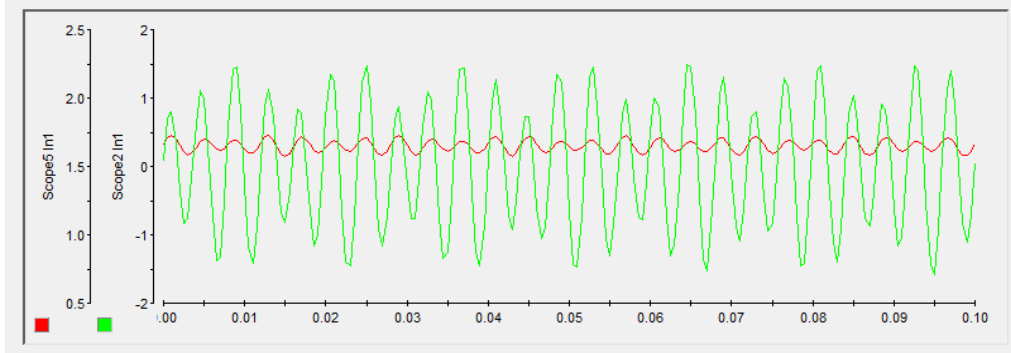


Figura 13. Ruído sendo controlado pelo programa simulink

Como resultado obtido do controle de ruído obtivemos uma atenuação de 21,6 dB conforme visto nas figura 14 e 15 do decibelímetro mostrando um nível de 83,7 antes do controle entrar em ação e 62,1 com o controle ativo de ruído em funcionamento. Futuramente será gerado um arquivo de vídeo demonstrando o funcionamento do processo para mono-canal e posteriormente com multicanal.



Figura 14. Decibelímetro medindo 83,7 dB antes do Controle Ativo de Ruído

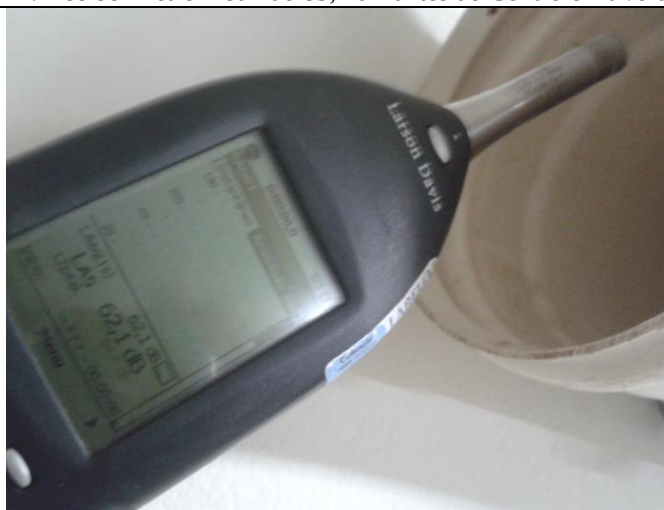


Figura 14. Decibelímetro medindo 62,1 dB durante o Controle Ativo de Ruído

Isto demonstra que o funcionamento do controle ativo de ruído é um sucesso na atenuação de nível de pressão sonora no fim do tubo.

Agora a atividade é montar o equipamento para multicanal e ter como ruído o Ruído Branco para controlar ao invés de ruído senoidal.

4. Referências Bibliográficas

- [1] Bai, M. R. and Chen, H., “Active cancellation of noise in a car cabin using the zero spillover controller”, Journal of Sound and Vibration, 235, (5), 787-800, 2000.
- [2] Bai, M. R. and LIN, Z., “Active noise cancellation for a three-dimensional enclosure by using multiple-channel adaptive control and H_∞ control”, ASME, Journal of Vibration Acoustics 120, 958-964, 1998.
- [3] CANTREL, RW, 1974 . Prolonged Exposure to Intermittent Noise: Audiometric, Biomechanical, Motor, Psychological and Sleep Effects. The Laryngoscope, suppl. 1, 84(10/2): 1-55.
- [4] GERGES, Samir N. Y. Ruído: Fundamentos e Controle, Santa Catarina: Editora NR, 2000.
- [5] Goodwin G. C. and Sin K. S., “Adaptive Filtering Prediction and Control,” Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1984.
- [6] HANDLEY, J. M., 1995. Controle de Ruído Industrial. Revista Acústica e Vibrações. 15.ed.
- [7] Nelson, P.A e Elliot, "Active noise Control of sound", San Diego, CA: Academic, 1992
- [8] Kuo S., Panahai I., Chung K., Horner T., Nadeski M., Chyan J., “Design of Active Noise Control Systems With the TMS320 Family”, Texas Instruments (SPRA042), 1996.
- [9] Widrow, B. and Stearns, S. D., “Adaptive Signal Processing”, Englewood Cliffs, NJ: PrenticeHall, 1985.

- [10] Widrow, B., Glover, J. R., McCool, J. M., Kaunitz, J., Williams, C. S., Hern, R. H., Zeidler, J. R., Dong, E. and Goodlin, R. C., “Adaptive Noise Canceling: Principles and Applications”, Proc. of IEEE, Vol. 63, No. 12, pp. 1692–1716, December 1975.