



Sociedade de Engenharia de Áudio

Artigo de Congresso

Apresentado no 5º Congresso de Engenharia de Áudio
11ª Convenção Nacional da AES Brasil
21 a 23 de Maio de 2007, São Paulo, SP

Este artigo foi reproduzido do original final entregue pelo autor, sem edições, correções ou considerações feitas pelo comitê técnico. A AES Brasil não se responsabiliza pelo conteúdo. Outros artigos podem ser adquiridos através da Audio Engineering Society, 60 East 42nd Street, New York, New York 10165-2520, USA, www.aes.org. Informações sobre a seção Brasileira podem ser obtidas em www.aesbrasil.org. Todos os direitos são reservados. Não é permitida a reprodução total ou parcial deste artigo sem autorização expressa da AES Brasil.

Sistemas de Áudio no Controle Ativo de Ruído

Bruno S. Masiero¹ e Vítor H. Nascimento¹

¹ Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Laboratório de Processamento de Sinais
Av. Prof. Luciano Gualberto, trav. 3, n° 158, São Paulo, SP, 05508-970, Brasil

bruno.masiero@poli.usp.br, vitor@lps.usp.br

RESUMO

A primeira idéia que vem em mente quando falamos de sistemas de áudio é a reprodução/amplificação de sons. A idéia de utilizar alto-falantes e microfones para reduzir os níveis sonoros de um ambiente parece então contraditória. Mas desde meados do século XX a técnica de Controle Ativo de Ruído vem sendo constantemente estudada, apesar de até o momento existirem poucas soluções comerciais. A aplicação mais conhecida desta técnica são os fones de ouvido que buscam reduzir o ruído ambiente escutado pelo usuário, enquanto reproduzindo o sinal sonoro desejado pelo usuário. Outra aplicação já bastante desenvolvida é o controle de ruído emitido por tubulações, como chaminés industriais ou dutos de ar-condicionado. Mas algumas aplicações, apesar da intensa pesquisa realizada, ainda não apresentam soluções comercialmente viáveis, como é o caso do cancelamento do ruído de transformadores de potência.

Este artigo é dividido em duas partes. Na primeira parte, realiza-se uma revisão histórica e teórica do controle ativo de ruído, descrevendo as tendências mais recentes nesta área. Na segunda parte descreve-se os experimentos realizados para o controle de ruído ativo em transformadores de potência em campo.

Parte I

1 INTRODUÇÃO HISTÓRICA

O resumo histórico que segue foi baseado no tutorial publicado por Nelson e Elliott em 1993 [1]. Se-

gundo eles, as idéias básicas do controle ativo de ruído já são antigas, sendo a primeira patente deste tipo atribuída a Paul Lueg em 1936 (citado em [1]). Nessa patente é descrito um sistema que capta o campo sonoro com um microfone (microfone de referência), manipula este sinal eletronicamente e injeta o sinal em um duto por meio de uma fonte secundária localizada a jusante do microfone de referência. Lueg previa a aplicação desse aparato para o controle de ruído em dutos, considerando a propagação de uma onda sonora plana. A superposição da onda originada pela fonte primária com a onda gerada pela fonte secundária resultaria em uma interferência destrutiva e, conseqüentemente, silêncio na região a jusante da fonte secundária.

Em 1953, Olson e May (citado em [1]) publicaram um artigo descrevendo um “absorvedor sonoro eletrônico”, para ser usado na redução de ruído em aeronaves ou automóveis, tentando gerar uma “zona de silêncio” próxima à cabeça dos ocupantes. Seu sistema dispunha de um microfone próximo a um alto-falante, ambos no encosto de cabeça do assento, e um controlador realimentado tentava minimizar a pressão sonora no microfone, gerando então a “zona de silêncio”.

Na mesma época, William Conover (citado em [1]) trabalhava em um sistema de ANC para transformadores de potência. O ruído radiado por esses equipamentos possui algumas características espectrais que tornam propícia a aplicação da técnica ANC no seu controle. Conover realizava o controle das harmônicas manualmente, alterando ganho e fase da frequência de interesse. Esse sistema necessita de ajustes constantes para corrigir as variações do ruído ocorridas por causa de variações de tensão da rede ou das condições meteorológicas. Conover comentou a possibilidade do uso de um sistema automático de controle, que só foi introduzido em aplicações ANC em 1975 por Kido (citado em [1]). O processamento digital de sinais (PDS) permite a realização, com relativa facilidade, de filtros adaptativos para o ajuste do sinal de cancelamento. Filtros adaptativos ajustam automaticamente seus coeficientes com o objetivo de minimizar um sinal de erro e podem ser realizados de diversas formas [2]. A forma mais comum de filtro adaptativo usado em aplicações de ANC é o filtro de resposta ao impulso finita (FIR) com adaptação por mínimos quadrados (LMS).

2 ASPECTOS PRÁTICOS

Não importa como o sistema de controle é implementado, o princípio acústico em que qualquer sistema de controle ativo de ruído se baseia é o mesmo: o princípio físico da *superposição*. Wright publicou uma série de artigos descrevendo um sistema de controle ativo de ruído ambiental por meio do uso de uma parede de alto-falantes, que geram um campo secundário que tenta cancelar um ruído em campo aberto por meio da superposição de ondas [6].

O princípio da superposição é válido para qualquer sistema linear, e a propagação de uma onda acústica de amplitude não absurdamente elevada (abaixo de 140 dB) pode ser considerado um processo linear. Em ANC, a mais provável causa de não-linearidade está presente nos alto-falantes de bobina móvel usados como fonte secundária, quando, por exemplo, eles são forçados a reproduzir um sinal senoidal de baixa frequência com alta amplitude. A frequência de excitação não será ouvida por causa da interferência destrutiva, mas as harmônicas superiores geradas pela não-linearidade do alto-falante nestas condições podem se tornar um incômodo. Em geral, com o uso de alto-falantes adequadamente projetados, a não-linearidade presente será pequena e poderá ser ignorada sem infligir grandes perdas ao sistema.

O sistema de Olson e May propunha que o microfone de erro ficasse posicionado próximo à fonte secundária. Com isso, a amplitude do sinal necessário para o cancelamento da pressão no ponto do microfone seria pequena, e pontos afastados da fonte secundária não seriam afetados. Essa arquitetura produziria atenuação apenas em uma região próxima aos transdutores (a “zona de silêncio”), deixando o campo distante praticamente inalterado. Isso permite a atenuação de baixas frequências ao redor da cabeça de um passageiro, mas não é viável para a atenuação de uma fonte de ruído de grande porte. Se for possível posicionar a fonte secundária (ou um arranjo de fontes secundárias) tal que ela reproduza tanto temporal como espacialmente o campo gerado pela fonte primária, é possível obter um controle “global” do campo sonoro, ou ao menos controlar uma maior região.

Agora, tentar produzir um controle global do campo sonoro usando apenas um sensor de erro distante das fontes primárias e secundárias poderia ter um resultado catastrófico. Como o sensor de erro estará distante da fonte secundária, esta terá de ser alimentada com um sinal de amplitude elevada para conseguir cancelar o campo nesse ponto, e apesar de ocorrer um cancelamento da pressão sonora no microfone, corre-se o risco de no restante do campo acústico ocorrer um acréscimo significativo do nível de pressão sonora. Por causa deste fato é importante realizar simulações do sistema acústico para procurar otimizar o posicionamento dos alto-falantes e microfones tentando garantir uma atenuação “global” nesta região.

3 APLICAÇÕES

Não é de se esperar que em um futuro próximo, um sistema ANC universal esteja disponível nas prateleiras dos mercados, para simplesmente ser posicionado ao lado de uma fonte de ruído e ao ser ligado, como que em um passe de mágica, cancelar todo ruído emitido por esta fonte. Para cada situação de ruído (característica espectral, tamanho da fonte, campo sonoro aberto ou reverberante, etc) um tipo adequado de sistema ANC irá fornecer a melhor atenuação. E apesar de o desempenho do sistema eventualmente até melhorar com o acréscimo do número de alto-falantes ou microfones ou com o uso de um sistema de controle mais potente, existirão sempre limitações físicas para o nível de atenuação que será obtido em cada caso. A mais importante destas limitações é o fato que o sistema ANC só apresenta atenuação considerável quando a distância entre as fontes primárias e as fontes secundárias for menor do que o comprimento de onda de interesse [1]. Por esta razão as aplicações onde os sistemas ANC apresentam bom desempenho se limitam a problemas onde o ruído em baixas frequências é dominante. O fato interessante é que técnicas passivas de atenuação não são tão eficientes em baixas frequências. Isso leva obrigatoriamente à idéia de utilizar as duas técnicas em conjunto

para realizar atenuação numa faixa espectral a mais ampla possível.

Após muitos anos apenas como experimento em laboratório, os fones de ouvido com controle ativo do ruído externo estão se tornando itens comercialmente viáveis. Os primeiros fones de ouvido ativos foram desenvolvidos para ocupações específicas, como para motoristas de ambulância e carros de bombeiros. Esses equipamentos recebiam um sinal de referência, correlacionado com o sinal que se deseja atenuar, visto que se conhece exatamente a excitação enviada à sirene, e com isso uma boa atenuação pode ser atingida nestas frequências específicas. Esses fones reproduziam apenas o “anti-ruído”, ou seja, eram apenas protetores auriculares. Para algumas outras ocupações, como piloto de helicóptero ou pilotos de carros de corrida, era necessário que o fone reproduzisse sinais de voz além do anti-ruído. Este equipamento é o antecessor dos fones de ouvido encontrados hoje em dia no mercado. Esses fones de ouvido são projetados para reduzir o ruído externo (sendo este ruído cíclico ou aleatório), reproduzindo com qualidade o sinal sonoro desejado pelo usuário (música, rádio, televisão, etc). Em geral esses fones de ouvido são fones fechados, ou seja, vedam a orelha do ouvinte do meio externo. O material plástico geralmente usado para a casca do fone de ouvido consegue atenuar ruídos de alta frequência, e complementa a atuação do sistema ANC. O sistema ativo em fones de ouvido costuma apresentar atenuações de 10-15 dB na faixa de frequência até 500 Hz [3].

O controle de ondas planas que se propagam em dutos também já é comercialmente viável. Nesses sistemas, uma referência do ruído é extraída por um microfone de referência próximo à fonte primária ou por tacômetros, no caso de um duto de ventilação forçada, e os alto-falantes de controle e sensores de erro são posicionados já próximos à saída do duto onde se deseja atenuação. Por causa da extensão dos dutos, muitas vezes a faixa de frequências que o sistema ANC consegue atuar é relativamente pequena quando comparado com um fone de ouvido ativo.

Sistemas para o controle de ruído em ambientes fechados também têm sido constantemente estudados. Existem sistemas para atenuação de ruído em salas que chegam a produzir atenuação de até 15 dB numa região específica usando uma única fonte de controle [3]. O desenvolvimento destes sistemas está voltado principalmente para a redução do nível de ruído no interior de cabine de aviões e carros de passeio. Para estas aplicações, faz-se necessário o uso de soluções multicanais, que passam a requerer algoritmos de controle mais eficientes. Até o momento, apesar das inúmeras tentativas, ainda não há modelos comerciais de sistemas ANC que sejam “itens de série” para esses equipamentos. Soluções de laboratório já conseguiram reduzir o ruído do motor dentro de um automóvel em 10 a 15 dB [3]. Mas o maior desafio está em reduzir o ruído do pneu e do vento, para os quais não é possível extrair um

sinal correlacionado para ser usado como referência.

Como já mencionado, os transformadores de potência apresentam característica espectral ideal para o uso de sistemas ANC. Mas, por causa de seu tamanho, até hoje não foi possível se verificar um sistema que apresente uma atenuação adequada em todas as direções ao redor de um transformador. Foram verificadas atenuações de cerca de 15 dB em um azimuth de 30° em 120 Hz [3]. O problema é que é necessário posicionar os sensores de erros no campo distante do transformador para se obter uma atenuação considerável, mas muitas vezes o transformador está localizado próximo a muros ou paredes corta-fogo, que impede o posicionamento do sensor no campo distante e reduz o nível de atenuação obtido.

A função de transferência entre um auto-falante e um microfone é denominada “caminho acústico”, e deve ser bem estimada para garantir o estabilidade em um sistema ANC. Sua estimação é geralmente feita usando-se um filtro adaptativo na configuração de estimador, excitado por um ruído conhecido e descorrelacionado com o sinal de controle (geralmente usa-se ruído branco para estimar o caminho secundário). Mas a estimativa do caminho secundário passa a ficar comprometida quando os microfones estão posicionados longe dos auto-falantes, gerando mais uma restrição ao posicionamento dos transdutores.

Parte II

1 PESQUISA DESENVOLVIDA

Este artigo foi motivado pelo projeto de pesquisa e desenvolvimento em que os autores se encontram envolvidos, para o desenvolvimento de uma solução de controle ativo de ruído para um transformador de potência em uma subestação abaixadora na cidade de São Paulo. O objetivo inicial era obter atenuação de cerca de 10 dB na direção de uma das faces do transformador, desenvolvendo para isto um sistema de controle, especificando o sistema de áudio e definindo o posicionamento ótimo dos alto-falantes e microfones.

Os testes do sistema ANC montado, primeiramente testado em um gramado (campo aberto) e posteriormente na subestação de interesse, serão descritos a seguir.

2 EQUIPAMENTO UTILIZADO

A precisão do sistema de controle é de suma importância no desempenho global do sistema ANC. O uso de um filtro digital adaptativo como elemento de controle do sistema ANC pode fornecer a precisão que os sistemas ANC requerem. Para o sistema de controle, comprou-se a placa EZ-ANC da empresa Causal Systems, uma placa de processamento digital de sinais desenvolvida para aplicações ANC. Esta placa possui seis saídas para fontes de controle e seis entradas, sendo

uma entrada para o sinal de referência e cinco entrada para sensores de erro. A placa EZ-ANC possui o algoritmo de controle direto LMS filtrado (FxLMS) programado, sendo que a estimação do caminho secundário pode ser feita com ruído branco ou com o próprio sinal de controle, o segundo um método proprietário desta empresa. O usuário pode alterar todos os parâmetros do controle adaptativo via comunicação serial com um micro-computador. Pode-se alterar, entre outras coisas, o número de coeficientes e taxa de convergência do filtro adaptativo, ganho dos sinais de entrada e a taxa de amostragem dos conversores A/D e D/A. A placa EZ-ANC também permite que o sinal de referência seja filtrado digitalmente por um filtro FIR fornecido pelo usuário.

Para o sistema de áudio, adquiriram-se seis caixas acústicas, seis microfones, três amplificadores de potência, uma mesa mixadora e cabos.

As caixas acústicas adquiridas são de fibra de vidro. Utilizou-se este material já que as caixas acústicas terão de ficar expostas ao tempo, e têm de ser à prova de água. Os alto-falantes tiveram uma camada de silicone aplicada a seus cones para elevar sua resistência à água. As caixas acústicas foram dimensionadas para apresentarem melhor desempenho na faixa média de frequência, faixa onde a maior parte da energia do ruído do transformador se concentra. Para alimentar estes alto-falantes, foram comprados três amplificadores de potência Z300 da StudioR.

Foram adquiridos microfones de medição ECM8000 da Behringer, com característica omnidirecional e resposta em frequência plana na faixa espectral de interesse. Para ficarem expostos ao tempo, estes microfones irão precisar de alguma forma de proteção, como uma caixa metálica, por exemplo. Para a alimentação "Phanton Power" e pré-amplificação dos sinais do microfone, adquiriu-se uma mesa mixadora CSM 16 R da Ciclotron.

Como a placa EZ-ANC funciona com um algoritmo de controle direto, é necessário fornecer à placa um sinal de referência com a frequência exata que se deseja atenuar na planta. Para o controle de ruído em transformadores, o sinal de referência é normalmente extraído da própria rede elétrica. Por causa das características físicas dos transformadores, a frequência de vibração é o dobro da frequência de excitação. Portanto é necessário um circuito que retire uma amostra da frequência de rede e forneça na sua saída um sinal com o dobro desta frequência e com amplitude dentro da faixa dinâmica dos conversores A/D. Foi montado um circuito para realizar esta operação. Primeiro o sinal da rede passa por um transformador de tensão, que reduz o sinal de 110 V para 5 V, além de desacoplar o circuito da rede. O sinal que sai do transformador passa então por uma ponte de diodos, cuja saída é aproximadamente o módulo (valor absoluto) da tensão de entrada, o que efetivamente dobra a frequência do sinal, além de inserir uma componente de corrente contínua e harmônicas

superiores. O sinal que sai da ponte de diodos ainda passa por um divisor de tensão, para que sua amplitude fique dentro da faixa dinâmica do conversor A/D e por um filtro passa-bandas (com frequência de corte inferior em 10 Hz e superior em 800 Hz), para eliminar a componente de corrente contínua e as harmônicas superiores inseridas pela retificação de onda completa, além de ruído de alta frequência.

3 TESTES DE LABORATÓRIO

O funcionamento do sistema ANC montado foi testado em um gramado da Escola Politécnica. Os testes foram realizados usando-se um dos alto-falantes como fonte de ruído senoidal, dois alto-falantes como fonte de controle, posicionados a cerca de 30 cm de cada lado da fonte primária, três microfones como sensores de erro, posicionados a cerca de 2 m da fonte de ruído, e um microfone foi usado para monitorar o campo acústico. O posicionamento esquemático dos transdutores é mostrado na figura 1. Para a estimação do caminho secundário, utilizou-se o método proprietário da placa EZ-ANC, que usa o próprio sinal de controle para estimar do caminho acústico secundário, sendo cada caminho secundário estimado por um filtro FIR de dez coeficientes. Para o filtro adaptativo de controle usado foi um filtro FIR de quinze coeficientes, com taxa de adaptação suficientemente baixa. Como sinal de referência usou-se o próprio sinal de excitação.

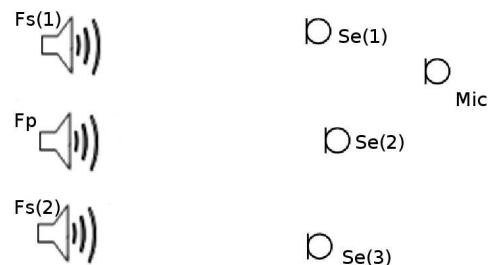


Figura 1: Posicionamento esquemático dos transdutores da fonte de ruído (Fp), das duas fontes de controle (Fs), dos três sensores de erro (Se) e do microfone de monitoramento (Mic).

Com o arranjo da figura 1, verificou-se atenuações na casa dos 10 dB para a frequência de excitação. Foi possível observar a presença de harmônicas superiores¹ do sinal de excitação no sinal no microfone monitor, com considerável elevação em seus níveis quando o sistema ANC entra em funcionamento, como pode ser visto na tabela 1. Apesar da atenuação da frequência de excitação, a sensação psicoacústica é mais desagradável com o ANC ligado, por causa da presença das harmônicas superiores no sinal audível.

¹Em campo aberto é necessário trabalhar com níveis de excitação mais elevados que o nível do ruído de fundo, caso contrário o sinal

Tabela 1: Atenuação medida em um microfone monitor para controle ativo de ruído senoidal em campo aberto.

Freq. (Hz)	Atenuação (dB)
120	10.3
240	-2.6
360	-8.5

Vale ressaltar que em um dia de testes choveu e as caixas acústicas resistiram bem à água, um de seus requisitos de projeto.

4 TESTES NA SUBESTAÇÃO

Como última etapa do projeto, o sistema de controle de ruído projetado foi testado em campo, em uma das subestações da AES Eletropaulo, onde várias combinações de quantidade e posicionamento de alto-falantes e microfones foram testada (tanto os alto-falantes quando os microfones ficaram sempre posicionados a 1,5 m do solo), verificando-se a atenuação obtida tanto nos microfones de erro quanto em posições ao redor destes microfones. Para o sistema de controle foi usada a placa EZ-ANC, com a referência extraída da rede elétrica. Nos primeiros testes os alto-falantes usados estavam localizados em uma plataforma localizada diretamente à frente do transformador. Posteriormente eles foram todos colocados mais próximos ao transformador, diretamente sobre a base de concreto, próximo à base do tanque do transformador. A posição dos microfones variou bastante.

4.1 Uma Fonte de Controle e Dois Sensores de Erro

A disposição dos transdutores é mostrada esquematicamente na figura 2, assim como a posição relativa onde se mediu a pressão sonora. O auto-falante estavam cerca de 1 m a frente do transformador e os microfones estavam cerca de 6 m do transformador, distando cerca de 1,5 m entre si. Verifica-se, como esperado, que entre os dois microfones há uma região de atenuação. Foi surpreendente verificar que no lado externo dos microfones também ocorreu atenuação da pressão sonora. Já atrás dos microfones houve um acréscimo de pressão sonora, provavelmente efeito do muro que estava a cerca de 1 m deste ponto de medição. Os valores de atenuação medidos são mostrados na tabela 2.

4.2 Duas Fontes de Controle e Quatro Sensores de Erro

Aumentou-se a quantidade de transdutores, sendo agora dois auto-falantes e quatro microfones em uso. Os auto-falante estavam cerca de 1 m a frente do transformador, distando aproximadamente 1 m entre si, e

de excitação não será ouvido, o que acabou forçando o alto-falante a trabalhar numa faixa de resposta não-linear.

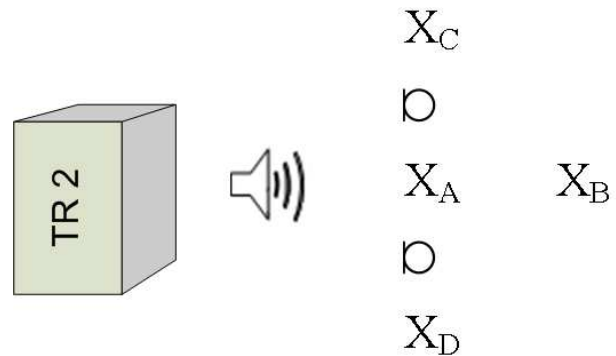


Figura 2: Posicionamento esquemático dos transdutores e dos pontos de medição (X) para uma fonte de controle e dois sensores de erro.

Tabela 2: Atenuação medida em cada um dos pontos considerados para um sistema ANC com uma fonte de controle e dois sensores de erro.

Ponto	Atenuação (dB)
X _A	10
X _B	-6
X _C	2
X _D	5

os microfones estavam cerca de 6 m do transformador, distando cerca de 1,5 m entre si. Esta disposição é mostrada esquematicamente na figura 3. Nesta configuração mediu-se apenas a atenuação próxima aos microfones de erro.

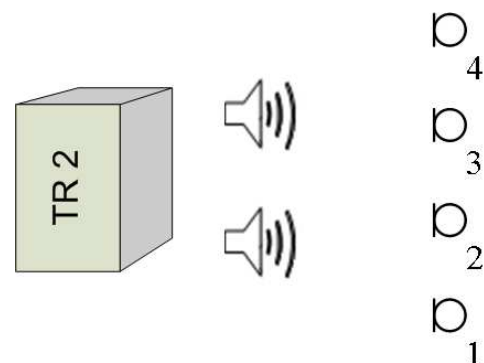


Figura 3: Posicionamento esquemático dos transdutores para duas fontes de controle e quatro sensores de erro.

O resultado não foi satisfatório, ou seja, as duas fontes de controle não estavam sendo capazes de atenuar a pressão sonora em todos os microfones de erro, mas apenas em dois deles, como mostrado na tabela 3, sendo que em um dos microfones verificou-se inclusive um

aumento do nível de ruído. O fato deste único microfone apresentar ganho de ruído, ao invés de atenuação, pode estar relacionado com o fato do nível de ruído do transformador medido neste microfone ser cerca de 20 dB menor do que o nível de ruído medido nos demais microfones. Com o sistema ANC ativo, o nível de ruído medido no microfone 1 ficou no mesmo patamar do nível de ruído medido nos microfones 2 e 4.

Tabela 3: Atenuação medida nos microfones de erro para um sistema ANC com duas fontes de controle e quatro sensores de erro.

Microfone	Atenuação (dB)
1	-12
2	10
3	0
4	8

4.3 Três Fontes de Controle e Quatro Sensores de Erro

Mantendo-se a posição dos microfones, aumentou-se novamente a quantidade de alto-falantes, sendo agora 3 fontes de controle em uso, todos distando cerca de 1 m do transformador e 1 m entre si. A configuração esquemática é mostrada na figura 4.

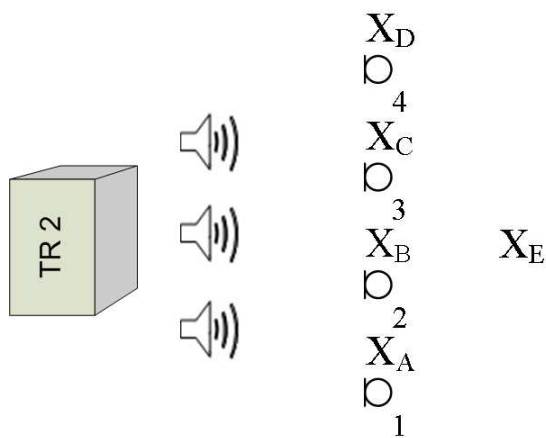


Figura 4: Posicionamento esquemático dos transdutores e dos pontos de medição (X) para três fontes de controle e quatro sensores de erro.

A atenuação nos microfones (exceto o microfone 2) ficou praticamente inalterada, apesar da adição de mais uma fonte secundária, como se verifica na tabela 4. Isto aconteceu porque o sistema de controle convergiu para coeficientes de valores muito pequenos para a nova fonte de controle, praticamente excluindo-a do sistema de controle de ruído. A provável razão para este fato é que os alto-falantes estavam posicionados muito próximos uns dos outros ou muito distante da fonte de

ruído. Alterou-se então a posição dos alto-falantes, para verificar se esta suposição era verdadeira.

Tabela 4: Atenuação medida nos microfones de erro para um sistema ANC com três fontes de controle e quatro sensores de erro.

Microfone	Atenuação (dB)
1	-10
2	20
3	-3
4	10

Os alto-falantes, que até então estavam dispostos sobre uma plataforma de acesso ao painel foram reposicionados sobre base do transformador, com distância de aproximadamente 2,5 m entre eles. A posição dos microfones foi mantida inalterada. Verifica-se agora uma melhora considerável nos níveis de atenuação medidos (tabela 5)², evidenciando a influência do posicionamento dos transdutores no desempenho do sistema ANC, e justificando uma etapa de simulação para otimizar o posicionamento dos transdutores.

Tabela 5: Atenuação medida nos microfones de erro para um sistema ANC com as três fontes de controle reposicionadas e os quatro sensores de erro na mesma posição.

Microfone	Atenuação (dB)
1	2
2	11
3	15
4	20

Mediu-se também a pressão sonora em pontos entre os microfones, e foi possível verificar atenuação em todos os pontos entre os microfones, como mostrado na tabela 6, que mostra a atenuação obtida nos pontos de medição relativos à figura 4.

4.4 Quatro Fontes de Controle e Quatro Sensores de Erro

O último teste foi feito com um número igual de sensores de erro e fontes de controle. Os quatro alto-falantes foram posicionados sobre a base de concreto do transformador, distando cerca de 2,5 m entre si, enquanto que os microfones tiveram sua posição inalterada em relação ao último teste. Com um número igual de fontes de controle e sensores de erro, é esperado que todos os microfones tenham a pressão sonora ao seu redor anulada. O que foi verificado é que todos os

²O microfone 1, que apresenta pequena atenuação, está numa região onde o campo sonoro primário é bem menor que nos demais microfones, como já previamente comentado.

Tabela 6: Atenuação medida em cada um dos pontos considerados para um sistema ANC com três fontes de controle e quatro sensores de erro.

Ponto	Atenuação (dB)
X_A	8
X_B	5
X_C	5
X_D	5
X_E	-10

microfones apresentaram atenuação, mas nenhum deles teve atenuação maior do que 20 dB. O microfone 1, que antes tinha uma atenuação de apenas 2 dB, nesta configuração apresenta atenuação de 10 dB.

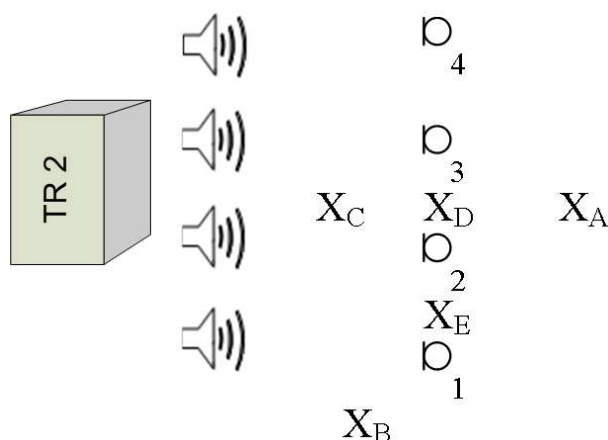


Figura 5: Posicionamento esquemático dos transdutores e dos pontos de medição (X) para quatro fontes de controle e quatro sensores de erro.

A pressão sonora foi medida em alguns pontos ao redor dos microfones, pontos estes esquematizados na figura 5. Os pontos X_D e X_E foram medidos 1m acima da linha horizontal dos microfones. A surpresa nestes testes foi verificar atenuação no ponto X_B , que já estava um pouco distante dos microfones. Os demais pontos apresentaram ou pouca atenuação (X_C e X_D) ou aumento da pressão sonora, como mostrado na tabela 7.

5 SIMULAÇÃO DO SISTEMA ACÚSTICO

O projeto da distribuição física dos transdutores é feito sempre buscando minimizar algum tipo de medida da perturbação que se deseja atenuar. Em geral, para problemas em campo aberto, o que se deseja minimizar é a potência sonora estimada em uma superfície de controle. Para isto, algoritmos de otimização devem realizar dois cálculos distintos: 1) calcular a máxima atenuação possível para um dado arranjo de transdutores e 2) achar o arranjo de transdutores ótimo.

Tabela 7: Atenuação medida em cada um dos pontos considerados para um sistema ANC com quatro fontes de controle e quatro sensores de erro.

Ponto	Atenuação (dB)
X_A	-8
X_B	5
X_C	1
X_D	0
X_E	-5

A primeira etapa é realizada baseada em simulações acústicas. A segunda etapa envolve algum tipo de busca coordenada, sendo algoritmos genéticos comumente usados para este fim.

Para determinar a máxima atenuação possível para um dado arranjo de transdutores, é necessário saber o valor da pressão gerada tanto pela fonte primária quanto pelas fontes secundárias em cada um dos sensores de erro. Neste projeto, o valor da pressão primária foi estimado baseado em medidas de vibração da parede do tanque do transformador. Como sons em baixa frequência são geralmente irradiados de forma omnidirecional por alto-falantes, as fontes secundárias foram simuladas como fontes pontuais de irradiação esférica.

6 MODELAGEM DO CAMPO SONORO PRIMÁRIO

A maneira mais precisa de se determinar o campo sonoro primário produzido pelo transformador seria realizar uma medição em campo, o que é bastante difícil de se fazer no caso de um transformador de potência por causa de suas dimensões físicas e também por restrições de segurança.

Usry *et al.* propõem um método simplificado para a estimação do campo acústico produzido por transformadores de potência [5], baseado na equação de Helmholtz para fontes contínuas de som e nas equações de Pierce para a difração em quinas [4]. Este método considera cada elemento de área como se fosse um pistão em uma parede infinita e calcula a pressão gerada em um dado ponto pela onda direta vinda deste “pistão”, a onda refletida no solo e as ondas difratadas nas quinas do transformador. Somando-se o efeito de cada elemento de área no ponto desejado, obtém-se a estimativa da pressão gerada pela fonte primária no ponto de observação.

O nível de vibração foi medido em cerca de cem pontos distribuídos pela superfície do transformador. Esta técnica se mostrou bastante atrativa no início por permitir que o nível de pressão fosse estimado em qualquer ponto ao redor do transformador, permitindo uma maior flexibilidade na escolha da posição dos sensores nas simulações (caso houvessem sido usados níveis medidos, as posições de sensores de erro e controle forne-

Tabela 8: Nível de Pressão Sonora medido no campo.

	1	2	3	4	5	6	7	8
D	61,3	66,5	63,5	71,5	63,0	60,0	49,2	55,8
C	63,5	64,0	59,6	66,6	62,7	70,0	66,7	54,0
B	64,2	65,1	63,0	65,8	62,8	67,5	62,2	54,1
A	60,8	65,1	56,1	64,3	66,1	68,7	63,0	62,5

Tabela 9: Nível de Pressão Sonora estimado pelo método de Usry.

	1	2	3	4	5	6	7	8
D	66,6	66,8	67,1	68,6	69,1	71,1	70,5	69,5
C	62,5	48,0	59,4	65,2	65,9	63,9	61,3	62,4
B	56,0	56,2	66,1	70,1	69,6	63,4	58,5	61,0
A	59,3	65,9	70,5	73,5	73,8	71,6	69,5	66,0

cidas aos algoritmos de otimização ficaria restrita aos pontos medidos).

Infelizmente os níveis de ruído estimados com este método não apresentaram boa correlação com os níveis medidos em campo. As tabelas 8 e 9 mostram respectivamente os níveis medidos e estimados em 120 Hz, a 6 m do transformador, entre o transformador e o prédio vizinho. As medições foram feitas em quatro cotas igualmente espaçadas na vertical e oito pontos igualmente espaçados na horizontal. A cota A é a mais baixa, a 1,5 m do chão e a cota D é a mais alta a 6 m do chão. O ponto 1 é o mais à esquerda e o ponto 8 o mais à direita de um observador voltado para o transformador. A tabela 9 mostra os níveis sonoros estimados pelo método de Usry para os mesmos pontos da tabela 8. Por meio de uma simples comparação ponto a ponto é possível constatar que as estimativas não são boas. Em especial, na coluna 8 da tabela 8, os valores medidos apresentam uma redução significativa se comparados com os demais pontos da tabela, mas nem mesmo uma tendência de redução pode ser verificada na coluna 8 da tabela 9.

7 CONCLUSÃO

Na primeira parte do artigo fez-se uma revisão histórica (baseada em [1]) e técnica do controle ativo de ruído, uma aplicação que utiliza equipamentos de sonorização para *reduzir* o nível sonoro de um ambiente, exatamente o contrário de sua aplicação usual de *amplificação* do nível sonoro em um ambiente. Mostrou-se que diversas aplicações para esta técnica vêm sendo desenvolvidas, sendo que algumas dessas soluções já estão disponíveis no mercado. Com o desenvolvimento das pesquisas nesta área, inovações nas técnicas de redução de ruído, principalmente nas indústrias aeronáutica e automobilística podem ser esperadas, elevando consideravelmente o conforto dos passageiros destes veículos.

Na segunda parte do artigo expôs-se os resultados de uma pesquisa sobre o controle ativo do ruído de um

transformador de potência. O sistema ANC montado em uma subestação apresentou atenuação do campo sonoro próximo aos microfones de erro e em algumas regiões entre estes microfones. Faz-se agora necessário determinar o melhor posicionamento das fontes de controle e sensores de erro para que uma área qualquer, distante dos microfones de erro, possa ser atenuada, e não somente as regiões próximas aos microfones de erro.

A principal dificuldade encontrada neste projeto foi a caracterização do campo sonoro radiado pelo transformador. A falta de conhecimento sobre o campo gerado pelo transformador praticamente inviabiliza o uso de simulações para otimização do posicionamento dos transdutores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. J. Elliott and P. A. Nelson. Active Noise Control. *IEEE Signal Processing Magazine*, pages 12–35, October 1993.
- [2] S. Haykin. *Adaptive Filter Theory*. Prentice Hall, 4rd edition, 2002.
- [3] Sen M. Kuo and Dennis R. Morgan. Active Noise Control: A Tutorial Review. *Proceedings of the IEEE*, 87(6):943–973, June 1999.
- [4] Allan D. Pierce. Diffraction of sound around corners and over wide barriers. *Journal of the Acoustic Society of America*, 55(5):941–955, May 1974.
- [5] G. O. Usry, P. Saha, J. Hadden, and A. Pierce. Prediction of far-field sound radiation from transformers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 99(1):358–364, January 1980.
- [6] S. E. Wright and B. Vuksanovic. Active control of environmental noise. *Journal of Sound and Vibration*, 190(3):565–585, 1996.