

Controle Ativo de Ruído em Campo Aberto

G. F. Paolillo, IMT e J. C. Souza Jr, IMT

Resumo— Este trabalho propõe a implementação de um sistema de cancelamento ativo de ruídos para aplicação em subestações de energia elétrica. São apresentados os resultados obtidos em implementação prática em campo aberto e comparativos de desempenho com diferentes geometrias para a mesma arquitetura de hardware.

Palavras-chave— Ruído, Controle ativo, Transformadores

I. INTRODUÇÃO

Materiais destinados a redução de pressão acústica são pouco eficientes para ruídos de baixa frequência, como os produzidos por motores, transformadores elétricos e ou máquinas industriais.

O enclausuramento destas fontes de ruído pode produzir bons resultados, porém esta técnica muitas vezes é inviável e bastante onerosa.

O aprimoramento dos processadores digitais viabilizou a utilização de técnicas de controle ativo de ruídos, bastante eficiente na região das frequências baixas.

Sistemas para controle de ruídos em transformadores elétricos vêm sendo estudados ao longo dos últimos anos para proporcionar redução do seu ruído característico, de baixa frequência, principalmente em áreas urbanas.

Bons resultados vêm sendo obtidos com o emprego de atuadores para controle ativo de vibração estrutural [29] ou com o uso de controle ativo de ruídos multicanal [13].

Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos em montagem experimental e os esforços para aproximar a técnica de um produto com custo reduzido e adequado para emprego em subestações de energia elétrica.

Estratégias de controle

Apresenta-se a seguir um breve descritivo das técnicas aplicadas neste estudo:

Feedforward

Neste método o sinal de referência, captado nas imediações do transformador ou fonte de ruído, é utilizado como sinal de entrada do controlador.

O controlador aciona o atuador, que emite o sinal de controle para produzir interferência acústica destrutiva.

O desempenho do sistema é quantizado por um microfone de erro posicionado na região de controle. Este sinal realimenta o sistema, capaz de modificar os parâmetros de um filtro adaptativo alterando o sinal de controle emitido para a minimização do sinal de erro captado.

O algoritmo LMS *least-mean square* foi utilizado para esta tarefa devido a facilidade de implementação, robustez e pela fonte de ruído não apresentar variações significativas em suas características com o tempo.

Para minimizar a interferência do caminho acústico existente entre o atuador e o microfone de erro utilizou-se a técnica de filtrar o sinal de entrada por uma estimativa deste caminho acústico, obtida antes da operação do sistema. Esta modificação é conhecida como *Filtered-LMS* FXLMS.

A Figura 1 apresenta o diagrama de blocos de um sistema FXLMS.

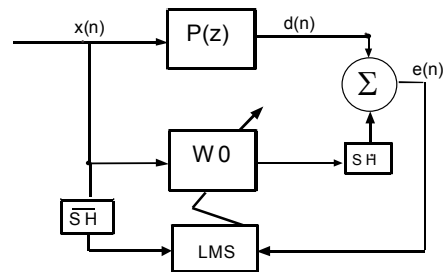


Figura 1. Sistema FXLMS.

Feedback

O Controle por *feedback* consiste em reintroduzir o sinal captado pelo microfone de erro no sistema de controle.

Em sistemas de controle ativo de ruído o sinal $d(n)$ não pode ser aproveitado durante a operação do sistema por ser atenuado pelo sinal proveniente do atuador. Devido a este fato, emprega-se um sinal estimado como referência $x(n)$ para o controlador.

A Figura 2 apresenta o diagrama em blocos de um sistema *feedback* adaptativo FXLMS, para compensar os efeitos do caminho acústico SH.

G. F. Paolillo, engenheiro eletrônico, atua no Centro de Pesquisas do Instituto Mauá de Tecnologia (e-mail: gustavo@maua.br).

J.C. Souza Jr., engenheiro eletrônico, atua na Escola de Engenharia Mauá do Instituto Mauá de Tecnologia (e-mail: jcarlos@maua.br).

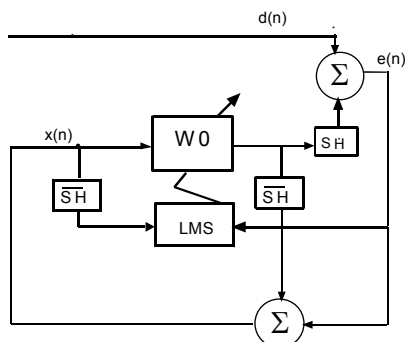


Figura 2. Sistema feedback FXLMS.

Hardware Experimental

Na montagem experimental realizada em campo aberto empregou-se como sensores microfones de eletreto marca Lesson e circuitos pré-amplificadores com transmissão diferencial.

Utilizou-se processador digital de sinais marca Analog Devices, modelo ADSP21065L.

A transmissão diferencial dos sinais apresentou bons resultados para aplicação em subestações de energia considerando a imunidade a ruído e o custo final da instalação.

Todas as caixas acústicas utilizam transdutor de 15 polegadas e incorporam amplificador de potência com frequência de corte de aproximadamente 700 Hz

Devido às longas respostas impulsivas do sistema físico, apenas o controle de canal simples pode ser implementado com o hardware utilizado por limitações na capacidade de processamento.

Dados experimentais

Foram avaliadas 3 geometrias para controle utilizando a estratégia de controle por feedback. Resultados semelhantes, em termos de redução da intensidade de pressão acústica, foram obtidos para a estratégia de controle feedforward.

O sinal interferente utilizado nos testes foi sintetizado para aproximar-se do ruído característico emitido por transformadores, com frequência fundamental de 120 Hz e harmônicos de menor intensidade nas frequências de 180 Hz, 240 Hz e 300 Hz.

Por limitações do processador de sinais, apenas 400 coeficientes foram utilizados para mapear a resposta impulsiva entre a caixa de controle e o microfone de erro, tarefa realizada com emissão de ruído branco antes da operação do sistema. Também, 128 coeficientes foram empregados no filtro adaptativo de controle com algoritmo LMS.

Mesmo com um modelamento impreciso do caminho acústico entre atuador e sensor, obteve-se a convergência com coeficiente de adaptação reduzido após aproximadamente 200 segundos.

As intensidades de pressão acústica foram mensuradas em campo aberto e os resultados interpolados são apresentados em formato de curvas de superfície.

A figura 3 apresenta a distribuição na planta da intensidade de pressão acústica emitida pela fonte de ruído na ausência de controle.

Nas figuras 3, 5 e 8 cada divisão do quadriculado representa 1 metro de distância e a escala de intensidades está graduada em decibéis - curva A.

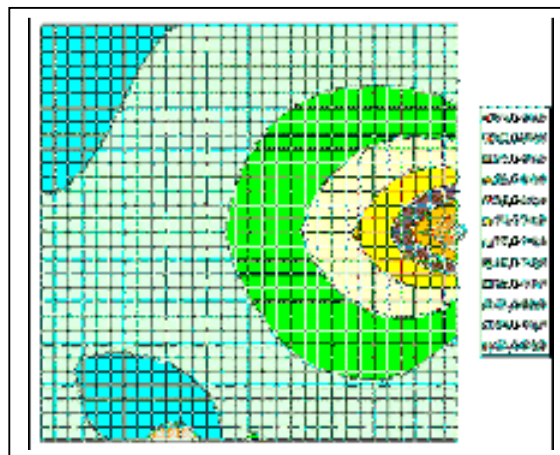


Figura 3. Distribuição da Intensidade de pressão acústica na ausência de controle.

A intensidade do ruído foi ajustada para que a pressão acústica média, a 15 metros da fonte, fosse de aproximadamente 70 dB na escala de ponderação A.

Geometria 1

Nesta montagem o atuador de controle foi direcionado para a fonte de ruído.

A figura 4 apresenta os posicionamentos e distâncias empregadas no experimento, onde o microfone de erro foi posicionado a 6 metros do atuador de controle e este a 9 metros da fonte de ruído. Em todos os experimentos o microfone de erro foi mantido a 1,2 m do solo.

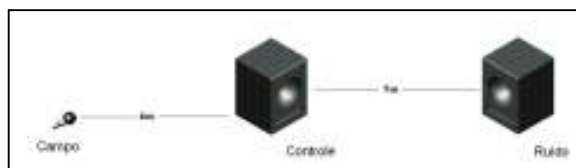


Figura 4. Atuador direcionado para a fonte de ruído.

Os resultados obtidos indicam ação eficiente do sistema de controle, com reduções de até 20 dB na região próxima ao microfone de captação de erro. Nota-se um gradiente de atenuação que tem como ponto de máximo o microfone de erro, caracterizando uma região de controle com aspecto geométrico triangular.

A figura 5 apresenta os resultados obtidos com a geometria 1.

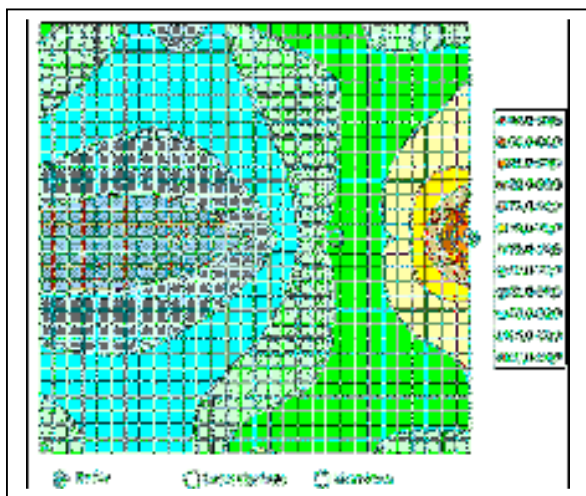


Figura 5. Atuador direcionado para a fonte de ruído.

Geometria 2

Nesta montagem o atuador de controle foi direcionado para o microfone de erro.

A figura 6 apresenta os posicionamentos e distâncias empregadas no experimento, onde o microfone de erro foi posicionado a 6 metros do atuador de controle e este a 9 metros da fonte de ruído.



Figura 6. Atuador direcionado para o microfone de erro.

A alteração da posição do atuador, direcionado agora para o microfone de erro ou para o campo distante da fonte de ruído, não apresentou melhorias em relação ao observado para a geometria 1. Nota-se uma menor atenuação do sinal interferente, embora a característica triangular da zona de silêncio tenha se conservado.

Geometria 3

Com o atuador de controle direcionado para a fonte de ruído posicionou-se o microfone de erro a aproximadamente 30 graus em relação a fonte de ruído.

A figura 7 apresenta os posicionamentos dos elementos de controle.

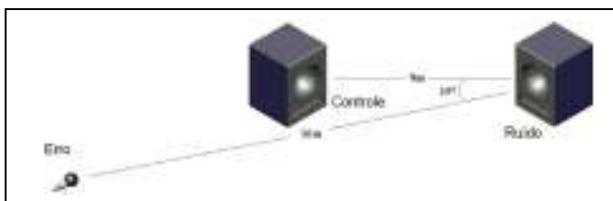


Figura 7. Microfone de erro formando ângulo de 30 graus com a fonte de ruído.

Um ângulo de aproximadamente 30 graus entre a caixa de controle e o microfone de erro causa grande prejuízo ao desempenho do sistema. O gráfico elaborado com os dados coletados em campo evidencia a concentração da região de baixa intensidade de pressão acústica ao redor do microfone de erro. Um efeito de espelhamento é observado em relação ao eixo central do sistema de controle.

A figura 8 apresenta o mapeamento dos resultados obtidos.

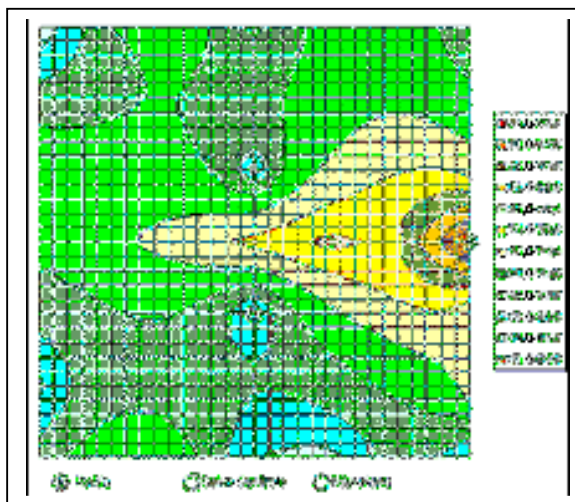


Figura 8. Microfone de erro formando ângulo de 30 graus com a fonte de ruído.

Estudo da Subestação de Santa Bárbara do Oeste

Com base nas análises experimentais, foi proposta uma geometria de controle com o intuito de minimizar a intensidade de pressão acústica emitida por um grupo de transformadores na subestação de Santa Bárbara do Oeste.

A figura 9 apresenta o posicionamento previsto para os sensores e atuadores para um determinado grupo de transformadores. A distância dos atuadores aos transformadores é de aproximadamente 11 metros e dos microfones de erro aos transformadores de aproximadamente 22 metros.

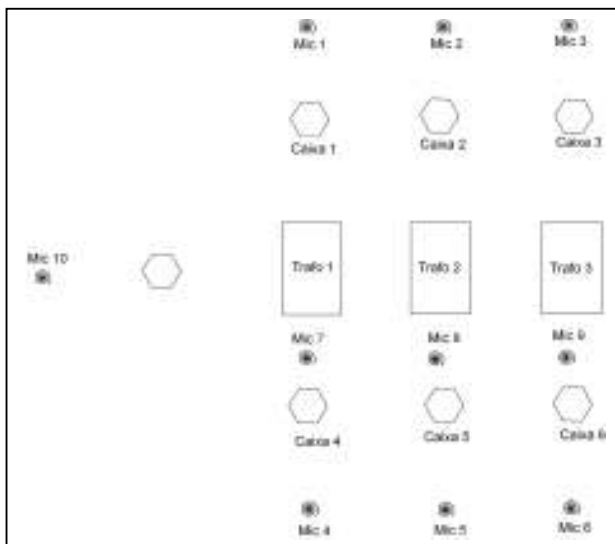


Figura 9. Posicionamento proposto para os sensores e atuadores na subestação de Santa Bárbara do Oeste.

Para o sistema multicanal proposto, uma nova placa de processamento foi desenvolvida utilizando processador Texas Modelo DSP6713, com capacidade de trabalhar com até 8 canais de áudio simultâneos.

A figura 10 apresenta foto da placa projetada e construída para esta aplicação.

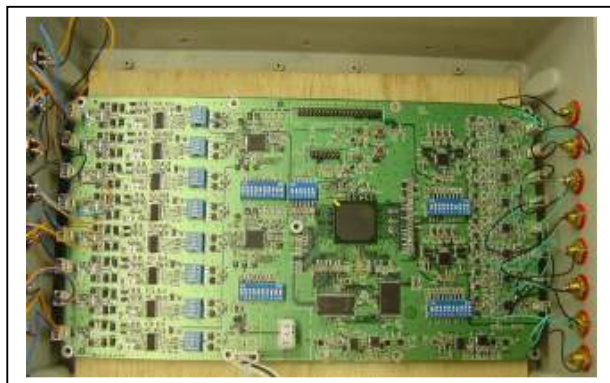


Figura 10. Processador Texas DSP6713.

Os resultados obtidos com a montagem do sistema de controle ativo de ruídos proposto será alvo de artigo técnico futuro.

II. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem toda a equipe da subestação de energia de Santa Bárbara do Oeste pelo apoio durante as medições e implementações experimentais.

III. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] [1] SWINBANKS, M. A. The active control of sound propagation in long ducts. *Journal of Sound and Vibration*, v. 27, p. 411–436, april 1973.
- [2] HAMADA, H. et al. Adaptive noise control system in air-condition ducts. In: *Proceedings of Inter-noise 88*. France: Soci'et'e Fran,caise d'Acoustique,1988. p. 1017–1020.
- [3] ELLIOTT, S. J. et al. In-flight experiments on the active control of propeller-induced cabin noise. *Journal of Sound and Vibration*, v. 140, n. 2, p. 219–238, 1990.
- [4] SAUNDERS, T. J.; SUTTON, T. J.; STOTHERS, I. M. Active control of random sound in enclosures. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Vehicle Comfort*. It'alia: [s.n.], 1992. p. 749–753.
- [5] SUTTON, T. J.; ELLIOTT, S. J.; MCDONALD, A. M. Active control of road noise inside vehicles. *Noise Control Engineering Journal*, v. 42, p.137–147, 1994.
- [6] GUO, J.; PAN, J. Increasing the insertion loss of noise barriers using a active control system. *Journal of Acoustical Society of America*, v. 104, n. 6, p. 3408–3416, December 1998.
- [7] JAKOB, A.; MOSER, M. Active control of double-glazed windows. Part I: Feedback control. *Applied Acoustics*, n. 64, p. 163–182, July 2003.
- [8] JAKOB, A.; MOSER, M. Active control of double-glazed windows. Part II: Feedback control. *Applied Acoustics*, n. 64, p. 183–196, July 2003.
- [9] RAFAELY, B. Feedback control of sound. Tese (Doutorado) — University of Southampton, USA, 1997.
- [10] ALEXANDER, S. T. *Adaptive Signal Processing Theory and Applications*. 1. ed. [S.I.]: Springer-Verlag, 1986.
- [11] HAYKIN, S. *Adaptive Filter Theory*. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall,1996.
- [12] DINIZ, P. S. *Adaptive Filtering*. 1. ed. [S.I.]: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [13] KUO, S.M.; MORGAN, D. R. *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*. 1. ed. New York: Wiley, 1996.
- [14] NELSON, P. A.; ELLIOTT, S. J. *Active Control of Sound*. 1. ed. Great Britain: Academic Press, 1995.
- [15] ERICKSSON, L. J.; ALLIE, M. C. Use of random noise for on-line transducer modelling in an adaptive active attenuation system. *Journal of Acoustic Soc. Am.*, v. 85, p. 797–802, February 1989.
- [16] TAPIA, J.; KUO, S. M. New adaptive on-line modelling techniques for active noise control systems. *Proceedings IEEE International Conference on Systems Engineering*, p. 280–283, August 1990.
- [17] DATTA, A.; OCHOA, J. Adaptive internal model control: Design and stability analysis. *Automatica*, v. 32, p. 261–266, 1996.
- [18] ELLIOTT, S. J.; SUTTON, T. J. Performance of feedforward and feedback systems for active control. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, v. 4, n. 3, May 1996.
- [19] NAM, H. do; HONG, S.-K.; HAN, K. Active control of noise in an enclosure using hybrid control techniques. *International Conference on Information, Communications and Signal Processing*, p. 758–761, September 1997.
- [20] TSENG, W. K.; RAFAEL, Y. B.; ELLIOTT, S. J. Combined feedback fedforward active control of sound in a room. *Acoustical Society of America*, v. 104, n. 6, p. 3417–3425, December 1998.
- [21] DEVICES, A. *ADSP-2106x SHARC User's Manual*. 2. ed. USA, Maio 1997.
- [22] BONITO, J. G.; J.ELLIOTT, S.; BOUCHER, C. C. A virtual microphone arrangement in a practical active headrest. In: *Proceedings of Inter-noise 96*. Liverpool: [s.n.], 1996. p. 1115–1120.
- [23] KONG, X.; KUO, S. M. Study of causality constraint on feedforward active noise control systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, v. 46, n. 2, p. 183–186, February 1999.
- [24] NEPOMUCENO, L. X. *Acústica Técnica*. 1. ed. SãoPaulo: Etegil, 1968.
- [25] JOJOA, P. E. Um Algoritmo Acelerador de Parâmetros. Tese (Doutorado)— Universidade de SãoPaulo, SãoPaulo, 2003.
- [26] KINSLER, L. E.; FREG, A. R. *Fundamentals of Acoustics*. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [27] AHMED, I. *Digital Control Applications with the TMS320 Family*. 1. ed. [S.I.], 1991.
- [28] HAMMING, R. W. *Digital Filters*. 3. ed. New York: Dover Publications, 1998.
- [29] HANSEN, C. H.; SNYDER, S. D. *Active Control of Noise and Vibration*. 1. ed. London: E & FN Spon, 1997.
- [30] HOWARD, D. M.; ANGUS, J. *Acoustics and Psychoacoustics*. 3. ed. Oxford: Focal Press, 1995.
- [31] OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. *Discrete Time Signal Processing*. 2. ed. [S.I.]: Prentice Hall, 1998.
- [32] ELLIOTT, S. *Signal Processing for Active Control*. 1. ed. london: Academic Press, 2001.
- [33] MOORE, B. C. J. *Introduction to the physiology of hearing*. 1. ed. London: University Park Press, 1977.
- [34] DUHAMEL, D. et al. Measurement of active control efficiency around noise barriers. *Elsevier*, v. 55, n. 3, p. 217–241, October 1998.
- [35] SAS, P. et al. Active control of sound transmission trough a double panel partition. *Journal of Sound and Vibration*, v. 180, n. 4, p. 609–625, November 1995.
- [36] SAKAI, H.; MIYAGI, S. Analysis of the adaptive filter algorithm for feedback-type active noise control. *Signal Processing*, n. 83, p. 1291–1298, September 2003.
- [37] SAKAI, H.; SOMEDA, T.; MIYAGI, S. Analysis Of An Adaptive Filter Algorithm for Hybrid ANC System. Japan: [s.n.], 2002. Kyoto University.
- [38] MORGAN, D. R.; QUINLAN, D. A. Local silencing of room acoustic noise using broadband active noise control. In: *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*. New Paltz,USA: [s.n.], 1993. p. 23–25.
- [39] GERGES, S. N. Y. *Ruído: fundamentos e controle*. 1. ed. Florianópolis: S.N.Y. Gerges, 1992.