

CONTROLE EM TEMPO REAL DA TEMPERATURA DA BOBINA E DO DESLOCAMENTO DO CONE DE ALTO-FALANTES PARA OPERAÇÃO EM ALTA POTÊNCIA

Constâncio Bortoni, Sidnei Noceti Filho, Rui Seara e Rosalfonso Bortoni

LINSE – Laboratório de Circuitos e Processamento de Sinais
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina
CEP 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil
E-mails: {cbortoni, sidnei, seara, bortoni}@linse.ufsc.br

Resumo—Com o alto-falante operando em sistema de alta potência (comum em sistemas de PA), o superaquecimento da bobina e o deslocamento excessivo do cone são as principais causas de danos e falhas. Esses problemas estão relacionados à baixa eficiência e limitação do deslocamento do cone, respectivamente. Este trabalho apresenta um procedimento de medida e controle digital da temperatura da bobina e do deslocamento do cone usando um processador de sinal digital (DSP). A temperatura da bobina e o deslocamento do cone são obtidos indiretamente pela variação de resistência da bobina para corrente contínua (DC) e através da medida de aceleração do cone, respectivamente. Essa abordagem leva em consideração (através de medidas) as características reais do alto-falante, como suas inerentes não-linearidades. Assim, podemos obter o máximo do sistema de sonorização, visto que agora se pode operar sem a margem de segurança usual requerida para tais sistemas.

Palavras-Chave—Alto-falantes, controle de temperatura e deslocamento do cone, temperatura da bobina móvel.

REAL-TIME VOICE-COIL TEMPERATURE AND CONE DISPLACEMENT CONTROL OF LOUDSPEAKERS

Abstract—With loudspeakers operating in a high power environment (common in PA systems), the voice-coil overheating and the excessive cone displacement are the main causes of damages and faults. These drawbacks are related to the low efficiency and cone displacement limitation, respectively. This paper proposes a procedure to measure and control both the voice-coil temperature and cone displacement by using a digital signal processor (DSP). The voice-coil temperature and cone displacement are indirectly obtained from the coil DC resistance variation and the cone acceleration, respectively. This approach takes into account (by measuring) some real characteristics of the loudspeaker, as its inherent nonlinearities. Thus, we can obtain the most from the sound system, since it may now work without the usual safety margin required for such systems.

Keywords—Loudspeakers, voice-coil temperature, temperature and cone displacement control.

I. INTRODUÇÃO

Alto-falantes são transdutores que convertem sinais elétricos em ondas sonoras. Entretanto, a maior parte da energia elétrica de excitação não é transformada em energia acústica. A eficiência de conversão de energia nos alto-falantes é muito baixa, tipicamente de 1 a 5% para sistemas de radiação direta e de 10 a 40% para sistemas tipo corneta [1]. Para se obter altos níveis de pressão sonora em sistemas de radiação direta, deve-se aplicar altos níveis de potência elétrica, visto que cerca de 95 a 99% dessa potência é transformada em calor na bobina móvel do alto-falante [2], [3]. O superaquecimento da bobina é uma das principais causas de danos e falhas em alto-falantes. Uma outra causa de danos irreversíveis é o deslocamento excessivo do cone que altera as características de funcionamento e que pode levar à sua completa paralisação.

De fato, para uma operação segura, sob o ponto de vista térmico e de deslocamento do cone, apenas a informação da potência máxima admitida não é suficiente, pois a temperatura da bobina e o deslocamento do cone dependem de outros fatores, tais como capacidade de dissipação de calor da bobina, tempo de operação, frequências envolvidas, forma de onda do sinal e tipo de amplificador (com saída em tensão ou corrente) [4], [5].

Assim, quando se aplica um sinal elétrico em um alto-falante, mesmo que sejam respeitados todos os valores máximos especificados pelo fabricante, um dano irreversível pode ser causado pelo excesso de temperatura da bobina. Em [6]-[10], alguns procedimentos de medida de temperatura da bobina são apresentados. Tais abordagens não consideram a medida de deslocamento do cone do alto-falante. Além do mais, as abordagens discutidas em [6]-[9] não usam a informação da temperatura para o controle de potência no alto-falante. Em [10], o sistema de controle de temperatura é efetuado considerando apenas o valor de potência máxima, o que nem sempre é muito eficaz como mencionado anteriormente. Em [11], [12], é apresentado um sistema de medição e controle da temperatura e do deslocamento do cone. Tal sistema é relativamente complexo e de alto custo comercial.

Este trabalho propõe uma abordagem de controle da temperatura da bobina e do deslocamento do cone relativamente simples e de baixo custo de implementação. O controle é baseado na temperatura da bobina em tempo real (e não na potência máxima) e em parâmetros do deslocamento do cone, os quais são medidos previamente em função de um sinal específico aplicado ao alto-falante. Dessa

Artigo Submetido em 24/08/2004. Primeira Revisão em 30/09/2004.
Aceito sob recomendação do Editor Especial Prof. Pedro Francisco Donoso-Garcia.

forma, uma eficiência máxima do sistema de sonorização é obtida sem a necessidade de uso de grandes margens de segurança, procedimento empregado usualmente para a proteção de alto-falantes em sistemas de sonorização.

II. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

O esquema geral do sistema de aquisição de dados, controle e monitoração da temperatura da bobina e do deslocamento do cone é mostrado na Figura 1. Em nossa abordagem, os estágios de controle da temperatura e do deslocamento do cone são essencialmente diferentes na forma de aquisição de dados e de controle propriamente dito.

No caso da temperatura, devido à dinâmica do processo envolvido, as etapas de aquisição e controle são efetuadas simultaneamente (*on-line*). A temperatura da bobina é obtida da razão entre a tensão e a corrente medidas nos terminais do alto-falante. Tal informação é usada diretamente para controlar a potência elétrica entregue ao alto-falante.

Diferentemente da abordagem considerada para controlar a temperatura, a estratégia usada para o controle do deslocamento do cone consiste de duas fases. Na primeira, os parâmetros do deslocamento são obtidos em um processo de aquisição *off-line*, considerando um sinal senoidal de teste com uma frequência correspondente à frequência de máximo deslocamento do cone. Esses dados adquiridos são então armazenados para serem usados em uma segunda etapa, isto é, o controle do deslocamento propriamente dito. Considerando a dinâmica do processo em questão, tal abordagem permite realizar um controle de deslocamento preventivo. Note que o controle deve atuar antes que ocorra qualquer dano no alto-falante.

Além disso, durante todo o processo, uma monitoração em tempo real do deslocamento ocorrido pode ser armazenada e mostrada em um *display*, tanto para uma verificação dos limites máximos do deslocamento obtido quanto para uma atualização dos valores dos parâmetros de deslocamento para o sistema de controle, quando necessário.

Nas próximas seções, o sistema de controle é descrito em mais detalhes.

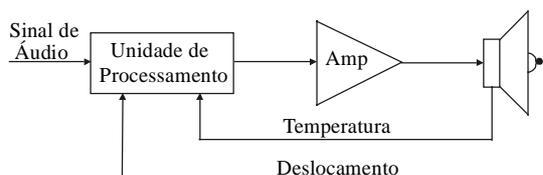


Fig. 1. Diagrama geral do sistema de aquisição de dados, controle e monitoração da temperatura da bobina e deslocamento do cone.

A. Controle da temperatura da bobina

Para determinar a temperatura da bobina, utilizamos a taxa de variação da resistência da bobina para corrente contínua (DC) com respeito à temperatura [8], [9], [13], dada por

$$T(n) = T(n-1) + \left[\frac{R(n)}{R(n-1)} - 1 \right] \left[T(n-1) - T_A + \frac{1}{\alpha_{T_A}} \right], \quad (1)$$

onde $T(n)$ caracteriza a temperatura da bobina do alto-falante no instante atual; $T(n-1)$ é a temperatura no

instante anterior ($n-1$); $R(n)$ é a resistência DC da bobina do alto-falante no instante atual; $R(n-1)$ é a resistência DC no instante anterior ($n-1$); α_{T_A} [$^{\circ}\text{C}^{-1}$] é o coeficiente de temperatura do material do fio da bobina para $T_A = 25^{\circ}\text{C}$.

A Figura 2 mostra uma curva típica de variação da resistência DC da bobina em função da temperatura.

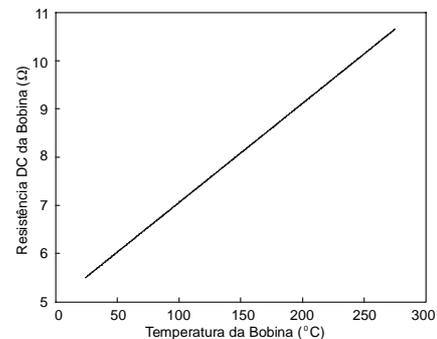


Fig. 2. Curva típica da resistência DC da bobina versus temperatura.

Como mencionado anteriormente, a forma usada para determinar a resistência DC da bobina medir a tensão e corrente nos terminais do alto-falante em condições normais de operação.

Devido à impossibilidade da operação com sinais DC no sistema de conversão A/D usado (em nosso caso), realizamos a medição da tensão e corrente usando um valor de frequência diferente de zero. Seleccionamos um valor de frequência para o qual a magnitude da impedância da bobina possa ser confundida com a sua resistência DC R_e [8], [14], [15] (ver Figura 3). Em nossa implementação, excitamos o alto-falante com o sinal original somado com um sinal senoidal de baixa frequência (~ 5 Hz).

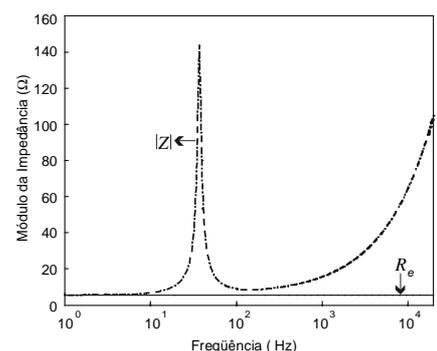


Fig. 3. Curva típica da resistência DC da bobina para a temperatura de 25°C de um alto-falante profissional e módulo de sua impedância, desconsiderando a impedância acústica.

A Figura 4 mostra o esquema utilizado para a medição de tensão e corrente nos terminais do alto-falante.

O controle da temperatura é efetuado através de um fator de ganho, que tem característica inversa similar à variação da temperatura da bobina no tempo. Tal ganho modifica o nível do sinal de áudio na entrada do alto-falante [16].

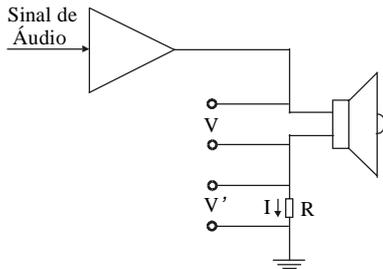


Fig. 4. Esquema para determinar a tensão e a corrente nos terminais do alto-falante.

A Figura 5 mostra o diagrama de bloco básico do controle da temperatura da bobina. Nessa estrutura, G denota o ganho controlado pela temperatura T ; AD e DA representam os conversores analógico-digital e digital-analógico, respectivamente.

Um exemplo ilustrativo da característica de variação da temperatura da bobina considerando o controle de temperatura é mostrado na Figura 6. A Figura 7 ilustra a respectiva característica de ganho controlado pela temperatura conforme Figura 6.

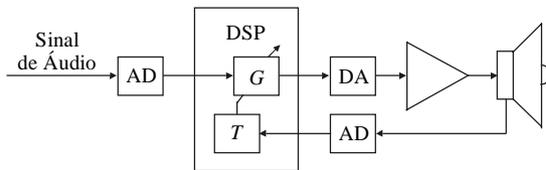


Fig. 5. Diagrama de bloco do controle de temperatura da bobina do alto-falante.

Através da Figura 6, verifica-se que a temperatura da bobina é dependente da potência aplicada como também do tempo. Assim, para uma dada potência constante aplicada ao alto-falante, mede-se a temperatura da bobina T_1 no instante t_1 . Mantida a potência, mede-se a temperatura T_2 no instante t_2 , que é maior do que T_1 . Agora, considerando T_1 e T_2 como limiares inferior e superior, respectivamente, pode-se controlar a temperatura mantendo-a entre esses limites. Dessa forma, uma vez acionado o controle de temperatura em T_2 , uma redução de temperatura se inicia, decrescendo a temperatura para o nível T_1 , no instante t_3 . Nesse instante, o controle é desativado e o processo de aumento da temperatura é reiniciado; e assim um novo ciclo é iniciado (ver Figura 6). As temperaturas T_1 e T_2 são determinadas na fase de projeto do sistema de controle, sendo $T_1 < T_2$. A temperatura T_2 é dependente da temperatura máxima da bobina, geralmente fornecida pelo fabricante do alto-falante. A Figura 7 ilustra a curva de ganho (com correspondente variação de potência), visando o controle de temperatura da bobina.

A partir do instante em que a temperatura da bobina é maior do que T_1 , os valores de temperatura em instantes sucessivos de tempo, entre T_1 e T_2 , são armazenados (N amostras de temperatura). Tais valores representam a curva de temperatura no tempo de T_1 até T_2 . Através desse resultado, uma curva de ganho *versus* tempo pode ser obtida.

Tal curva deve ter uma característica inversa da curva de aumento de temperatura obtida. Essa curva é inicialmente ajustada para um valor constante de 0 dB até o instante de tempo t_2 . De T_2 até T_1 , a curva de ganho é modelada por (2). Desse momento em diante, sempre de T_1 até T_2 , o ganho deve sofrer acréscimos gradativos até o instante que o seu valor seja 0 dB ou a temperatura da bobina seja igual a T_2 (ver Figura 7).

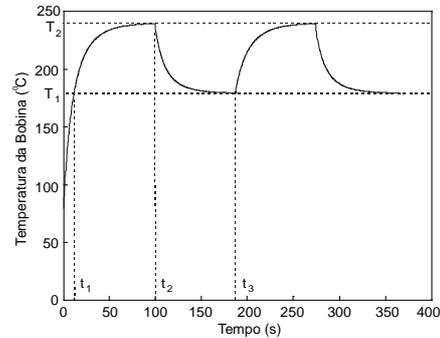


Fig. 6. Esboço de curva de variação da temperatura da bobina com a atuação do controle de temperatura.

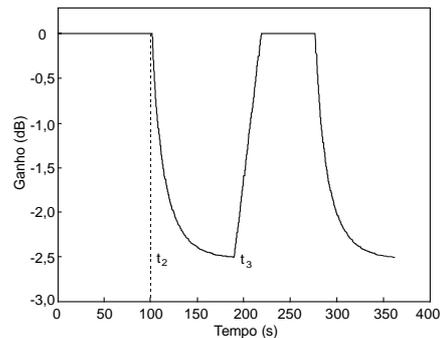


Fig. 7. Curva de ganho de controle da temperatura conforme Figura 6.

$$G(n)|_{\text{dB}} = 20 \log \prod_{n=1}^n \left[\sqrt{\frac{T_s(n-1)}{T_s(n)}} \right], \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

onde $G(n)$ representa o ganho entre T_2 e T_1 ; $T_s(n)$ e $T_s(n-1)$ denotam a temperatura armazenada no instante atual e anterior, respectivamente. Em (2), é usado como condição inicial $T_s(0) = T_s(1)$.

B. Controle do deslocamento do cone do alto-falante

Como mencionado anteriormente, o processo de controle do deslocamento do cone é realizado em duas etapas distintas:

- i) Fase de aquisição dos parâmetros;
- ii) Controle do deslocamento através de uma regra de compressão *ad-hoc* e monitoração do deslocamento do cone.

1) *Aquisição dos parâmetro* – Esta fase consiste na utilização de um sinal de teste (sinal senoidal na frequência de máximo deslocamento do cone) para se obter valores de deslocamento associado à amplitude do sinal de tensão aplicado. Nesse caso, consideraremos dois valores de deslocamento *versus* amplitude:

- Nível do sinal de entrada L_1 , correspondente a um deslocamento x_1 que resulta em uma distorção harmônica de 10 %;
- Nível do sinal de entrada L_2 , correspondente a um deslocamento equivalente x_2 de 80 % do deslocamento máximo daquele que provoca danos irreversíveis no alto-falante.

Note que os valores percentuais usados para nível de distorção e margem de segurança são escolhidos por critérios de projeto.

O deslocamento do cone é medido usando-se um acelerômetro localizado na calota protetora da bobina móvel no centro do alto-falante. Para uma correta medição, o acelerômetro deve estar perpendicular ao correspondente movimento do cone. Através de um processo de integração dupla, o valor da aceleração é convertido em deslocamento.

O esquema usado para a aquisição dos parâmetros ($L_1 \rightarrow x_1$, e $L_2 \rightarrow x_2$) é mostrado na Figura 8.

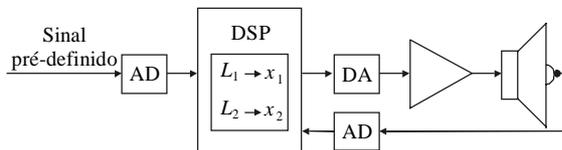


Fig. 8. Diagrama básico para aquisição dos parâmetros.

Na Figura 8, os parâmetros x_1 e x_2 são os deslocamentos correspondentes aos níveis L_1 e L_2 , respectivamente.

2) *Controle e monitoração do deslocamento do cone* - A Figura 9 mostra o diagrama básico de controle e monitoração do deslocamento do cone. Nessa figura, C caracteriza a regra de compressão usada (3), que é uma função dos parâmetros L_1 e L_2 obtidos na fase de aquisição.

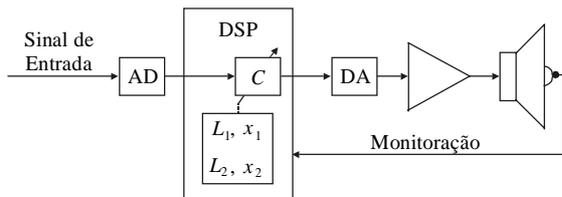


Fig. 9. Diagrama básico do controle do deslocamento do cone do alto-falante.

$$s_o(n) = \frac{2L_2}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{s_i(n)}{L_1} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi L_1}{2L_2} \right) \right], \quad (3)$$

onde $s_o(n)$ e $s_i(n)$ representam, respectivamente, as amostras dos sinais de áudio de saída e entrada do sistema de controle do deslocamento, quando o controle é ativado.

Em nosso sistema, é usado um *buffer* de entrada para armazenar 100 ms do sinal de áudio. As amostras do sinal armazenado (em magnitude) são então comparadas com o limite L_1 . Sempre que o nível do sinal for maior do que o nível L_1 , o controle de deslocamento é ativado. Então, usando-se a regra de compressão (3), prevenimos qualquer excessivo deslocamento do cone além daquele previamente estabelecido.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de mostrar o funcionamento do sistema de controle elaborado, inicialmente discutimos alguns resultados obtidos através de simulação. Em seguida, apresentamos resultados de implementação, considerando o sistema de controle formulado.

Na fase de simulação, usamos um nível de sinal de entrada constante e maior do que L_1 . São também considerados modelos lineares de deslocamento do cone e térmico do alto-falante [1] e [15].

Os dados usados nas simulações são de um alto-falante típico profissional. Considerou-se o efeito do aumento da resistência DC da bobina com o aumento da temperatura, o deslocamento máximo do cone de 12 mm e as temperaturas limiares inferior $T_1 = 110^\circ\text{C}$ e superior $T_2 = 120^\circ\text{C}$. Os parâmetros usados para o modelo do alto-falante, considerando a temperatura ambiente $T_A = 25^\circ\text{C}$, são:

- Coeficiente térmico do fio da bobina: $\alpha_{25} = 0,0039^\circ\text{C}^{-1}$;
- Resistência DC da bobina: $R_e = 5,5 \Omega$;
- Coeficiente da resistência de perdas: $K_{rm} = 13,621 \text{ m}\Omega$;
- Coeficiente da indutância da bobina: $K_{xm} = 160,686 \text{ mH}$;
- Expoente da resistência de perdas da bobina: $E_{rm} = 0,754$;
- Expoente da indutância da bobina: $E_{xm} = 0,508$;
- Fator de força: $B\ell = 20,8 \text{ Tm}$;
- Frequência de ressonância: $F_s = 36 \text{ Hz}$;
- Compliância mecânica: $C_{ms} = 167,1 \mu\text{m/N}$;
- Fator de qualidade mecânica: $Q_{ms} = 12,78$;
- Área efetiva do cone: $S_d = 0,0814 \text{ m}^2$
- Fator de qualidade total: $Q_{ts} = 0,33$.

A frequência do sinal senoidal de teste usado para a medida do deslocamento do cone é $f_{\text{mcd}} = 25 \text{ Hz}$, levando aos deslocamentos $x_1 = 9 \text{ mm}$ e $x_2 = 12 \text{ mm}$ para os níveis de sinal de entrada $L_1 = 300 \text{ mV}$ e $L_2 = 380 \text{ mV}$, respectivamente.

A Figura 10 ilustra as características de operação considerando apenas o controle da temperatura da bobina. De acordo com os parâmetros adotados para o exemplo, a Figura 10(a) representa a curva de temperatura da bobina. Através desse resultado, podemos verificar a atuação do controle no fator de ganho do sistema, mantendo a temperatura entre os dois valores pré-definidos. As Figuras 10(b) e (c) mostram, respectivamente, as curvas de potência instantânea e o fator de ganho. Os resultados obtidos estão de acordo com os esperados, ressaltando-se a correta atuação desse estágio de controle. As Figuras 11 e 12 mostram, respectivamente, os resultados para um sistema de potência de áudio sem e com o controle do deslocamento do cone. A Figura 11(a) mostra a curva da potência instantânea sem controle e a Figura 12(a), quando o controle do deslocamento é considerado. Podemos notar claramente a alteração no valor da potência instantânea da Figura 12(a), quando comparado àquele mostrado na Figura 11(a). As

Figuras 11(b) e 12(b) ilustram, respectivamente, para tempo e frequência, o comportamento da magnitude do deslocamento do cone sem e com a atuação do controle. Para esse caso, pode-se verificar a correta operação da estratégia de controle usada. Finalmente, a Figura 13 mostra, considerando tempo e frequência, o sistema completo de controle (temperatura da bobina e deslocamento do cone) em operação. Similarmente aos outros resultados previamente mostrados, o funcionamento em conjunto dos estágios de controle (temperatura e deslocamento) também leva a resultados muito bons. Através dessas figuras, podemos observar o acoplamento existente entre as duas estratégias de controle, quando trabalham simultaneamente.

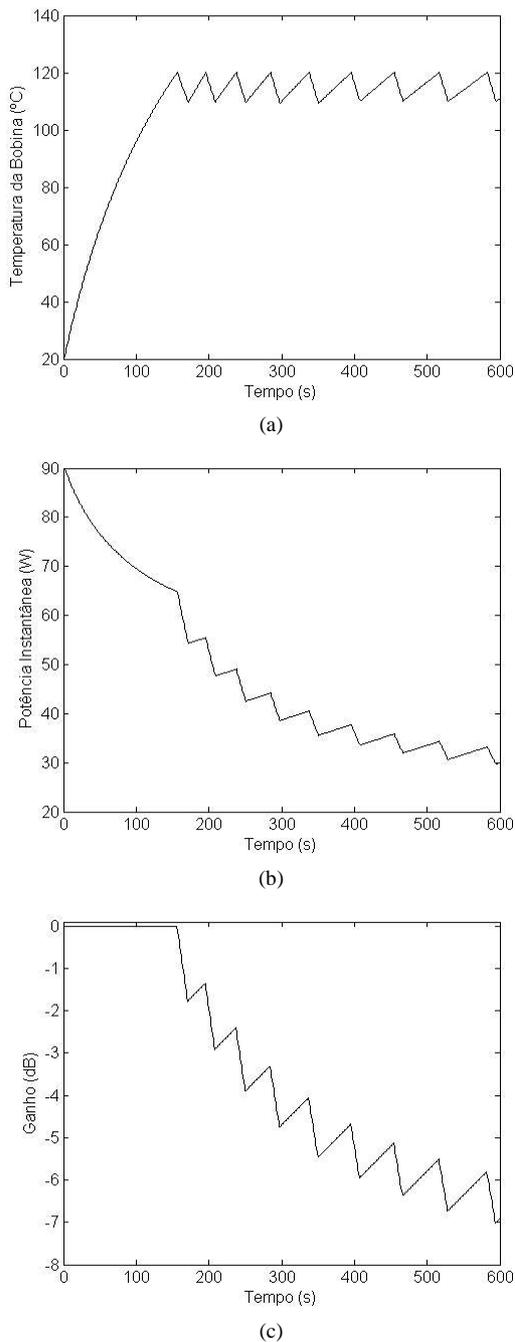


Fig. 10. Controle da Temperatura. (a) Curva da Temperatura da bobina. (b) Curva da potência instantânea. (c) Curva do fator de ganho.

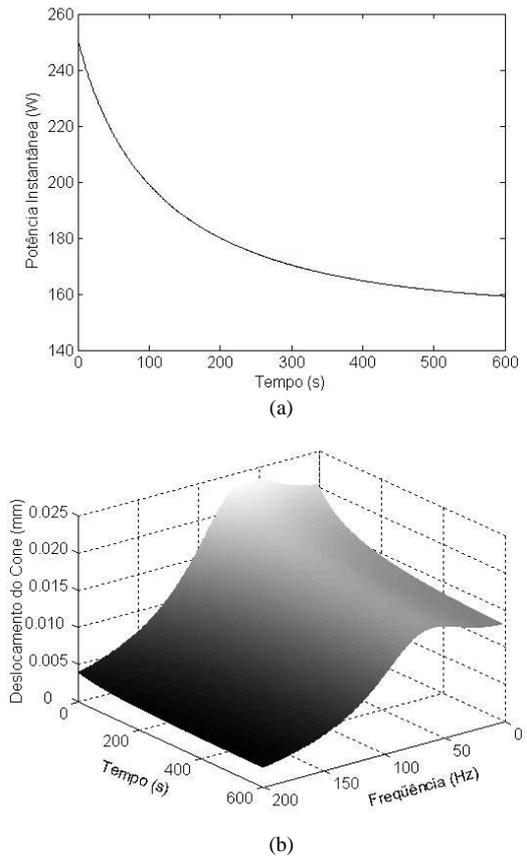


Fig. 11. Sistema sem controle. (a) Curva da potência instantânea. (b) Curva do deslocamento do cone *versus* tempo e frequência.

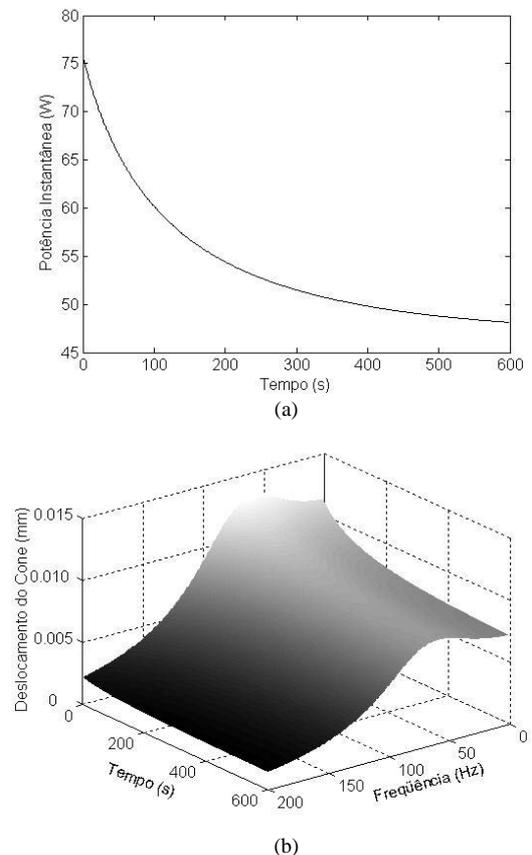
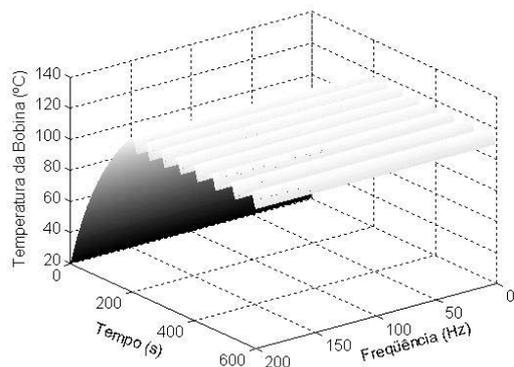
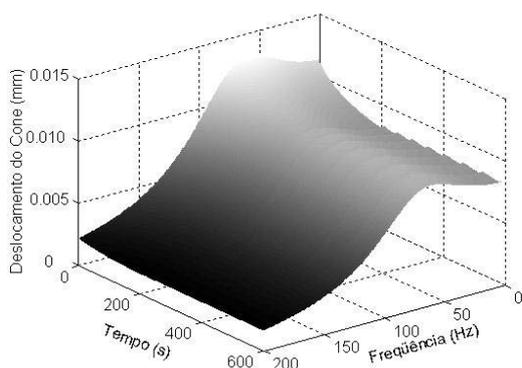


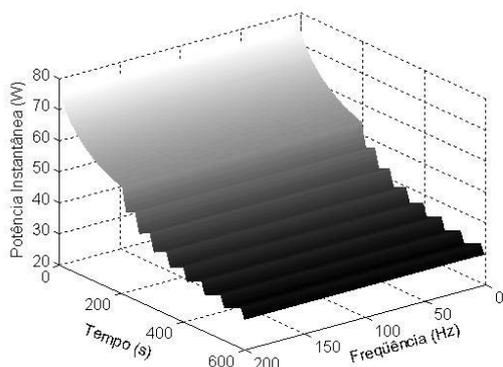
Fig. 12. Sistema com controle. (a) Curva da potência instantânea. (b) Curva do deslocamento do cone *versus* tempo e frequência.



(a)



(b)



(c)

Fig. 13. Controle simultâneo de temperatura e deslocamento. (a) Curva da temperatura da bobina *versus* tempo e frequência. (b) Curva do deslocamento do cone. (c) Curva da potência instantânea.

A implementação do sistema de controle seguiu as etapas, critérios e procedimentos para a aquisição dos dados, controle e monitoração descritos anteriormente. Considerando todas as fases necessárias de operação, inicialmente, o controle da temperatura foi implementado, seguido do controle do deslocamento.

Os equipamentos utilizados para a realização da implementação do sistema são:

- Amplificador de Áudio – STR – AV320 – Sony;
- Analisador de Sinal Digital – DSA601A – Tektronix;

- Osciloscópio Digital – 2232 - 100 MHz – Tektronix;
- Ambiente de desenvolvimento Crosscore Development Tools 3.1 – Analog Devices;
- Kit de desenvolvimento ADSS – BF533 – EZ-KIT Lite – Analog Devices;
- Micro-computador – 256 Mb RAM – Athlon XP 2000;
- Acelerômetro BK 4375 – Bruel & Kjaer;
- Amplificador de Carga BK 2635 – Bruel & Kjaer;
- Caixa Acústica Refletores de Graves;
- Alto-falante Subwoofer – 15SW1P – Selenium;
- Driver de Compressão – D3300Ti – Selenium;
- Corneta HL14-50.

O projeto foi desenvolvido utilizando o *kit* e o ambiente de desenvolvimento, citados acima, e um algoritmo implementado em linguagem C, o qual é gravado do ambiente para o *kit*, através de interface USB.

Os quatro canais de entradas do *kit* estão conectados às seguintes fontes de sinal:

- Canal *ADC1_LEFT* → Sinal de entrada original ou sinal de teste, obtidos por computador e por um gerador de funções, respectivamente;
- Canal *ADC1_RIGHT* → Sinal de corrente dos terminais do alto-falante;
- Canal *ADC2_LEFT* → Sinal de tensão dos terminais do alto-falante;
- Canal *ADC2_RIGHT* → Sinal de deslocamento do cone.

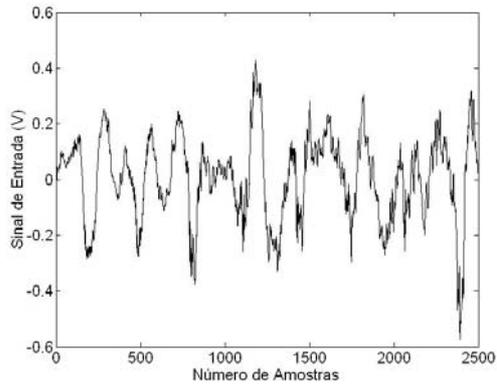
Somente um canal de saída é utilizado (*DAC1_LEFT*) para excitar o amplificador de áudio que está conectado à caixa acústica.

Durante o período de testes, foram utilizados um osciloscópio e um analisador de sinal para verificar o correto funcionamento do sistema, comparar as formas de onda dos sinais de entrada e saída, e monitorar o processo. Para garantir a integridade dos testes, estes foram realizados em uma câmara anecóica do Laboratório de Vibrações e Acústica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. O sistema de controle foi testado para um sinal de áudio de entrada de 2500 amostras e para uma frequência de amostragem de 48 kHz.

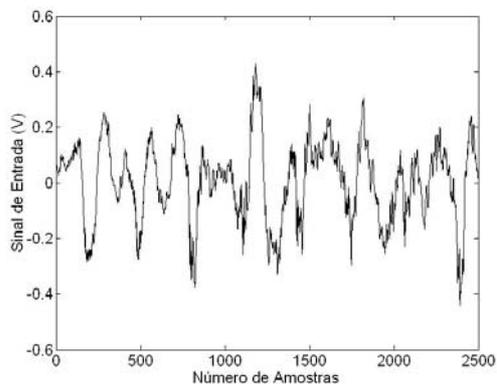
As Figuras 14 e 15 mostram os resultados obtidos através da implementação. A Figura 14(a) apresenta uma amostra do sinal de áudio de entrada original usado para os testes. A Figura 14(b) apresenta o resultado do controle de temperatura da bobina aplicado para o sinal mostrado na Figura 14(a). As Figuras 14(c) e (d) descrevem, respectivamente, a temperatura da bobina e o correspondente fator de ganho. Através desses resultados, podemos verificar a correta operação do estágio de controle de temperatura.

A Figura 15(a) mostra o sinal apresentado na Figura 14(a) sendo controlado apenas pelo controle do deslocamento do cone. As Figuras 15(b) e (c) mostram os deslocamentos resultantes do cone sem e com a atuação do controle.

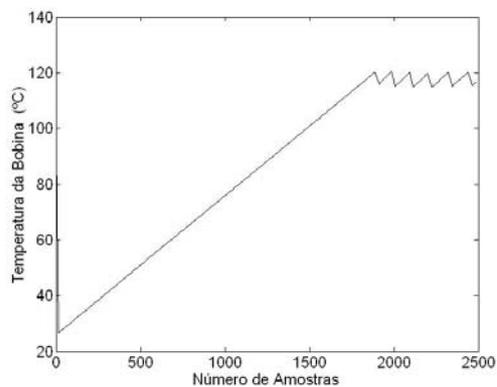
Como pode ser verificado através dos resultados de implementação, o sistema de controle concebido também apresenta uma adequada operação para sinais reais.



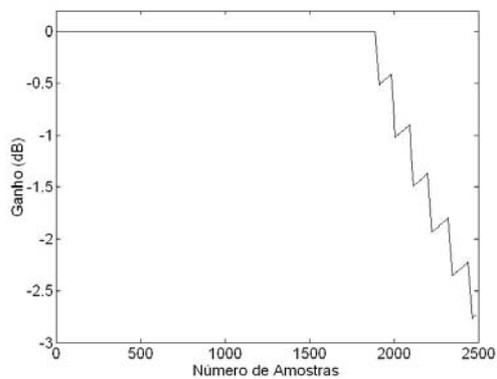
(a)



(b)

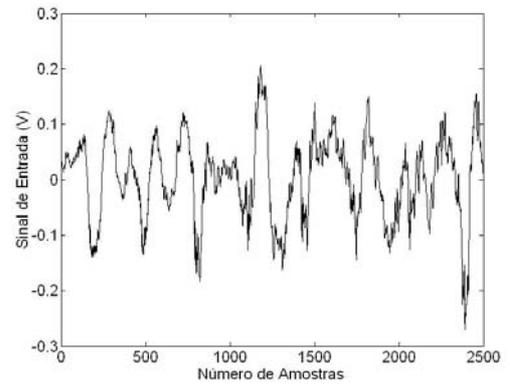


(c)

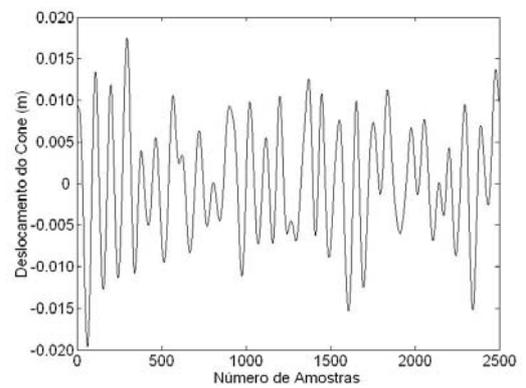


(d)

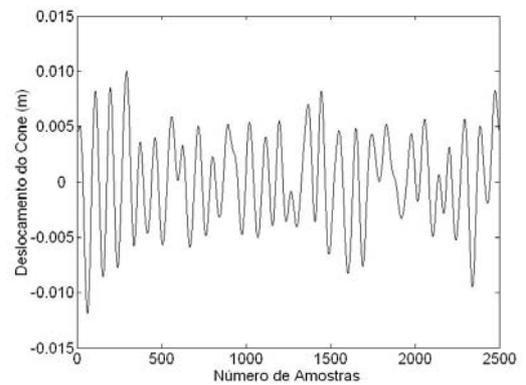
Fig. 14. Controle de temperatura com sinal real. (a) Sinal de áudio de entrada original usado para os testes. (b) Sinal de áudio controlado. (c) Temperatura da bobina controlada. (d) Fator de ganho.



(a)



(b)



(c)

Fig. 15. Controle de deslocamento usando sinal real. (a) Sinal de áudio controlado. (b) Deslocamento do cone sem controle. (c) Deslocamento do cone com atuação do controle.

IV. CONCLUSÕES

Um novo método para medir e controlar a temperatura da bobina e o deslocamento do cone usando um processador de sinal digital é proposto. Por meio deste sistema de controle, podemos prevenir o superaquecimento da bobina e o deslocamento excessivo do cone, que são os principais causadores de danos e falhas em alto-falantes. Nosso método considera as características reais do alto-falante, incluindo as não-linearidades. Os resultados obtidos através de simulação e implementação corroboram a boa performance e a eficácia do sistema de controle proposto. Dessa maneira, podemos obter o máximo do sistema de sonorização, uma vez que agora se pode trabalhar sem a usual margem de segurança imposta para tais sistemas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Eng. Walter Antônio Gontijo pela ajuda na fase de implementação do controlador usando DSP e ao Eng. Homero Sette Silva pelas muitas discussões envolvendo o presente trabalho, como também alguns esclarecimentos sobre alto-falantes.

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Zuccatti, "Thermal Parameters and Power Ratings of Loudspeakers," *J Audio Eng. Soc.*, vol. 38, no. 1/2, pp. 34-39, Jan./Feb. 1990.
- [2] D. J. Button, "Heat Dissipation and Power Compression in Loudspeakers," *J Audio Eng. Soc.*, vol. 40, no. 1/2, pp. 32-41, Jan./Feb. 1992.
- [3] P. J. Chapman, "Thermal Simulation of Loudspeakers," 104th *AES Convention*, AES Preprint no. 4667, 1998.
- [4] W. Klippel, "Nonlinear Modeling of the Heat Transfer in Loudspeakers," *J Audio Eng. Soc.*, vol. 52, no. 1/2, Jan./Feb. 2004.
- [5] R. Bortoni, S. Noceti Filho, and R. Seara, "Comparative Analysis of Moving-Coil Loudspeakers Driven By Voltage and Current Sources," 115th *AES Convention*, AES Preprint no. 4667, 2003.
- [6] M. Buck, "Measuring Loudspeakers Voicecoil Temperature," 106th *AES Convention*, AES Preprint no. 4969, 1999.
- [7] C. A. Henricksen, "Heat-Transfer in Loudspeakers: Analysis, Measurement, and Design," *J Audio Eng. Soc.*, vol. 35, no. 10, pp. 778-791, Oct. 1987.
- [8] H. S. Silva, "O Alto-falante em Regime de Grandes Sinais," 1^o SEMEA - Seminário de Engenharia de Áudio, Belo Horizonte, MG, Brasil, CD-ROM, Junho 2002.
- [9] G. Penkov and P. Valtchev, "Overheat Protection Circuits for Moving-Coil Loudspeakers," 90th *AES Convention*, AES Preprint no. 3036, 1991.
- [10] I. G. Behler, "Measuring the Loudspeaker's Impedance During Operation for the Derivation of the Voice Coil Temperature," 98th *AES Convention*, AES Preprint no. 4001, 1995.
- [11] W. Klippel, "Measurement of Large-Signal Parameters of Electrodynamical Transducer," 107th *AES Convention*, AES Preprint no. 5008, 1999.
- [12] W. Klippel, "Nonlinear Adaptive Controller for Loudspeakers with Current Sensor," 106th *AES Convention*, AES Preprint no. 4864, 1999.
- [13] H. S. Silva, "Variação da Resistência da Bobina Móvel em Função da Temperatura," 1^o SEMEA - Seminário de Engenharia de Áudio, Belo Horizonte, MG, Brasil, CD-ROM, Junho 2002.
- [14] J. R. Wright, "An Empirical Model for Loudspeakers Motor Impedance," *J Audio Eng. Soc.*, vol. 38, no. 10, pp. 749-754, Outubro 1990.
- [15] H. S. Silva, "Modelo não Linear do Alto-Falante para Pequenos Sinais," 1^o SEMEA - Seminário de Engenharia de Áudio, Belo Horizonte, MG, CD-ROM, Brasil, Junho 2002.

- [16] P. Chapman, "Complete Protection of an Active Loudspeaker," 108th *AES Convention*, AES Preprint no. 5112, 2000.

DADOS BIOGRÁFICOS

Constâncio Bortoni graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, em 2002. Está atualmente cursando o Mestrado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Interesse de pesquisa inclui processamento digital de sinais e projeto e análise de circuitos.

Sidnei Noceti Filho graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, em 1975. Obteve o título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pela UFSC em 1980. Obteve o título de Doutor em Engenharia Elétrica - Área de Eletrônica - na COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ em 1985. É Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC, onde desenvolve atividades de pesquisa e ensino nas áreas de filtros analógicos, instrumentação eletrônica, processamento de sinais e projeto de circuitos integrados.

Rui Seara graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, em 1975. Obteve o título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pela UFSC em 1980. Especializou-se em Instrumentação-Metrologia pela Ecole Supérieure d'Electricité de Paris, França em 1982. Obteve o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela Université Sud de Paris, França em 1984. É Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC, onde desenvolve atividades de pesquisa e ensino nas áreas de processamento digital de sinais, processamento de voz e imagem, filtragem adaptativa e comunicações digitais.

Rosalfonso Bortoni graduou-se em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), Santa Rita do Sapucaí, MG, em 1993. Em 1999, obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC. Está atualmente cursando o Doutorado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Interesse de pesquisa inclui processamento de sinais e projeto e análise de circuitos.