

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

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

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

CONSTÂNCIO BORTONI

Florianópolis, Agosto de 2005.

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

Constâncio Bortoni

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Comunicações e Processamento de Sinais*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Prof. Sidnei Noceti Filho, D.Sc.
Orientador

Prof. Alexandre Trofino Neto, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Sidnei Noceti Filho, D.Sc.
Presidente

Prof. Rui Seara, Dr.

Prof. Ênio Valmor Kassick, Dr.

Prof. Walter Pereira Carpes Jr., Dr.

Prof. José João de Espíndola, Ph.D.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo o apoio e incentivo dispensados nesses anos de estudo.

Ao Prof. Sidnei Noceti Filho, pela amizade e orientação deste trabalho.

Ao Prof. Rui Seara, pela amizade e co-orientação deste trabalho.

Ao M.Eng. Rosalfonso Bortoni, por toda a ajuda e pelas muitas discussões envolvendo o presente trabalho, essenciais para a realização do mesmo.

Ao Eng. Walter Antônio Gontijo pela ajuda na fase de implementação do controlador usando DSP.

Ao Eng. Homero Sette Silva, pela sugestão do tema e pelas muitas discussões envolvendo o presente trabalho, como também alguns esclarecimentos sobre alto-falantes.

Aos membros da banca examinadora, pelas valiosas correções e sugestões.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Aos Prof. José João de Espíndola e Eng. Eduardo Márcio de Oliveira Lopes, pela ajuda na parte acústica desse trabalho e por disponibilizarem a câmara anecóica do Laboratório de Vibrações Acústicas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a realização das medidas necessárias.

À lingüista Thais Eliane Chaves, pela ajuda na revisão de texto.

Aos amigos do LINSE, pelos seis anos de ótimo convívio.

A todos os meus amigos que, de alguma forma, ajudaram-me na realização deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

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

Constâncio Bortoni

Agosto/2005

Orientador: Prof. Sidnei Noceti Filho, D.Sc.

Co-orientador: Prof. Rui Seara, Dr.

Área de Concentração: Comunicações e Processamento de Sinais.

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

Número de Páginas: 81.

RESUMO: Com o alto-falante operando em sistema de alta potência (comum em sistemas de sonorização profissional), 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 (CC) 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, pode-se obter o máximo do sistema de sonorização, visto que agora pode-se operar sem a consideração da margem de segurança usual requerida para estes sistemas.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR THE REAL-TIME VOICE-COIL TEMPERATURE AND CONE DISPLACEMENT CONTROL OF LOUDSPEAKERS AT HIGH POWER OPERATION

Constância Bortoni

August/2005

Advisor: Prof. Sidnei Noceti Filho, D.Sc.

Co-advisor: Prof. Rui Seara, Dr.

Area of Concentration: Communications and Signal Processing.

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

Number of Pages: 81.

ABSTRACT: With loudspeakers operating in a high power environment (common in system of professional sound equipment), 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 research work 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, one can obtain the maximum from the sound system, since it may now work without the usual safety margin required for these systems.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Teoria Geral – Alto-falante	8
2.1 Alto-falante.....	8
2.1.1 Sistema Motor	9
2.1.2 Diafragma	9
2.1.3 Suspensão	10
2.2 Modelo Eletromecânico-acústico do Alto-falante.....	10
2.2.1 Análise para o <i>baffle</i> infinito	15
2.2.2 Análise para caixa sintonizada	16
2.3 Conclusões.....	18
Capítulo 3 - Características da Temperatura da Bobina e do Deslocamento do Cone do Alto-falante	19
3.1 Características da Temperatura da Bobina.....	19
3.2 Características do Deslocamento do Cone	21
3.2.1 Análise para <i>baffle</i> infinito	23
3.2.2 Análise para caixa sintonizada	24
3.3 Conclusões.....	25
Capítulo 4 - Abordagens Inicialmente Testadas	27
4.1 Abordagem Inicial de Controle de Temperatura da Bobina.....	27
4.2 Abordagens Iniciais do Controle de Deslocamento do Cone.....	31
4.2.1 <i>Hard Control</i>	31
4.2.2 Controle Preditivo	33
4.2.3 Controle Adaptativo	40
4.3 Conclusões.....	47

Capítulo 5 - Sistema de Controle da Temperatura da Bobina – Abordagem Usada ..	48
5.1 Aquisição da Temperatura.....	48
5.2 Controle da Temperatura da Bobina.....	49
5.3 Conclusões.....	51
Capítulo 6 - Sistema de Controle do Deslocamento do Cone – Abordagem Usada ...	52
6.1 Aquisição de Dados	52
6.2 Controle e Monitoração do Deslocamento do Cone.....	53
6.3 Conclusões.....	57
Capítulo 7 - Resultados de Simulação	58
7.1 Controle da Temperatura da Bobina.....	58
7.2 Controle do Deslocamento do Cone.....	60
7.3 Atuação Conjunta do Controle de Temperatura da Bobina e de Deslocamento do Cone.....	61
7.4 Conclusões.....	63
Capítulo 8 - Resultados Experimentais	64
8.1 Controle da Temperatura da Bobina.....	68
8.2 Controle do Deslocamento do Cone.....	70
8.3 Conclusões.....	72
Capítulo 9 - Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos	73
Referências Bibliográficas	75
Apêndices.....	78
APÊNDICE A	78
APÊNDICE B	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama geral do sistema de aquisição de dados, controle e monitoração da temperatura da bobina e deslocamento do cone -----	6
Figura 2. Vista em corte de um típico alto-falante eletrodinâmico-----	8
Figura 3. Circuito equivalente eletromecânico-acústico de um alto-falante com uma impedância acústica genérica -----	11
Figura 4. Componentes da impedância de radiação do ar refletidos para o lado mecânico-----	12
Figura 5. Circuito equivalente de um alto-falante visto pelo lado elétrico -----	12
Figura 6. Circuito equivalente de um alto-falante visto pelo lado elétrico, com os componentes agrupados-----	13
Figura 7. Curva típica da resistência CC da bobina para a temperatura de 25C de um alto-falante profissional e do módulo de sua impedância, para um <i>baffle</i> infinito -----	15
Figura 8. (a) Alto-falante montado em uma caixa sintonizada (b) circuito equivalente do sistema -----	16
Figura 9. Curva típica da resistência CC da bobina para a temperatura de 25C de um alto-falante profissional e do módulo de sua impedância, para uma caixa sintonizada-----	18
Figura 10. Curva típica da resistência CC da bobina <i>versus</i> temperatura -----	20
Figura 11. Curva da temperatura da bobina em função do tempo e da potência instantânea aplicada -----	20
Figura 12. Curvas de temperatura da bobina em função da potência instantânea para diferentes tempos -----	20
Figura 13. Curvas de temperatura da bobina em função do tempo para diferentes potências instantâneas-----	21
Figura 14. Circuito eletromecânico-acústico equivalente de um alto-falante com uma impedância acústica genérica excitado por fonte de tensão -----	21

Figura 15. Deslocamento do cone do alto-falante excitado por fonte de tensão para um <i>baffle</i> infinito em função da tensão aplicada e da frequência -----	23
Figura 16. Deslocamento do cone do alto-falante excitado por fonte de tensão para um <i>baffle</i> infinito em função da frequência, para diferentes tensões -----	24
Figura 17. Deslocamento do cone do alto-falante excitado por fonte de tensão em uma caixa sintonizada em função da tensão aplicada e da frequência-----	25
Figura 18. Deslocamento do cone do alto-falante excitado por fonte de tensão em uma caixa sintonizada em função da frequência, para diferentes tensões-----	25
Figura 21. Curva da temperatura controlada -----	30
Figura 22. Curva da potência entregue ao alto-falante controlada -----	30
Figura 23. Curva do fator ganho para o controle da temperatura-----	30
Figura 24. Curva da potência entregue ao alto-falante desconsiderando o sistema de controle para o deslocamento do cone -----	32
Figura 25. Curva do deslocamento do cone desconsiderando o sistema de controle para o deslocamento do cone-----	32
Figura 26. Curva da potência entregue ao alto-falante com atuação do sistema de controle para o deslocamento do cone-----	33
Figura 27. Curva do deslocamento do cone com atuação do sistema de controle para o deslocamento do cone-----	33
Figura 28. Diagrama de bloco do controle preditivo do deslocamento do cone-----	34
Figura 29. Curva do deslocamento do cone desconsiderando o sistema preditivo de controle-----	37
Figura 30. Curva da potência entregue ao alto-falante desconsiderando o sistema preditivo de controle -----	37
Figura 31. Curva da tensão de entrada desconsiderando o sistema preditivo de controle-----	38

Figura 32. Curva do deslocamento do cone em função da potência instantânea entregue ao alto-falante desconsiderando o sistema preditivo de controle-----	38
Figura 33. Curva do deslocamento do cone com atuação do sistema preditivo de controle-----	38
Figura 34. Curva da potência entregue ao alto-falante com a atuação do sistema preditivo de controle -----	39
Figura 35. Curva da tensão de entrada com a atuação do sistema preditivo de controle ---	39
Figura 36. Curva do deslocamento do cone em função da potência instantânea entregue ao alto-falante com a atuação do sistema preditivo de controle-----	39
Figura 37. Curva do fator de ganho do sistema preditivo de controle -----	40
Figura 38. Diagrama de bloco do controle adaptativo do deslocamento do cone -----	41
Figura 39. Curva do deslocamento do cone desconsiderando o sistema adaptativo de controle-----	43
Figura 40. Curva da potência instantânea entregue ao alto-falante desconsiderando o sistema adaptativo de controle -----	43
Figura 41. Curva do sinal de entrada desconsiderando o sistema adaptativo de controle-----	44
Figura 42. Curva do deslocamento do cone com a atuação do sistema adaptativo de controle-----	44
Figura 43. Curva da potência instantânea entregue ao alto-falante com a atuação do sistema adaptativo de controle-----	44
Figura 44. Curva do sinal de entrada com a atuação do sistema adaptativo de controle ---	45
Figura 45. Curva do fator de ganho do sistema adaptativo de controle-----	45
Figura 46. Curva resultante do deslocamento do cone com a atuação do sistema adaptativo de controle com defasagem entre os sinais de tensão e deslocamento do cone-----	46

Figura 47. Curva resultante da potência instantânea entregue ao alto-falante com a atuação do sistema adaptativo de controle com defasagem entre os sinais de tensão e deslocamento do cone -----	46
Figura 48. Curva resultante do sinal de entrada com a atuação do sistema adaptativo de controle com defasagem entre os sinais de tensão e deslocamento do cone -----	46
Figura 49. Esquema para determinar a tensão e a corrente nos terminais do alto-falante --	48
Figura 50. Diagrama de bloco do controle de temperatura da bobina do alto-falante -----	49
Figura 51. Esboço de curva de variação da temperatura da bobina com a atuação do controle de temperatura -----	49
Figura 52. Curva de ganho de controle da temperatura conforme Figura 51 -----	50
Figura 53. Diagrama básico para aquisição dos parâmetros -----	53
Figura 54. Diagrama básico do controle do deslocamento do cone do alto-falante -----	53
Figura 55. Compressão por um fator de 25% para o máximo nível do sinal de entrada----	54
Figura 56. Transformada de Fourier do sinal de entrada -----	55
Figura 57. Transformada de Fourier do sinal de saída -----	55
Figura 58. Controle de temperatura (a) curva da temperatura da bobina (b) curva da potência instantânea (c) curva do fator de ganho -----	59
Figura 59. Sistema sem controle (a) curva da potência instantânea (b) curva do deslocamento do cone <i>versus</i> tempo e frequência-----	60
Figura 60. Sistema com controle (a) curva da potência instantânea (b) curva do deslocamento do cone <i>versus</i> tempo e frequência-----	61
Figura 61. Controle simultâneo de temperatura e deslocamento (a) curva da potência instantânea controlada (b) curva da temperatura da bobina <i>versus</i> tempo e frequência (c) curva do deslocamento do cone <i>versus</i> tempo e frequência-----	62
Figura 62. Esquema de montagem dos equipamentos para a implementação do sistema de controle de temperatura da bobina e deslocamento do cone -----	65
Figura 63. A fixação do acelerômetro ao alto-falante-----	66

Figura 64. Montagem dos equipamentos utilizados na implementação do sistema de controle-----	67
Figura 65. Outra vista da montagem dos equipamentos utilizados-----	67
Figura 66. <i>Kit</i> de desenvolvimento ADSS – BF533 – EZ-KIT Lite – Analog Devices ----	67
Figura 67. 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-----	70
Figura 68. Controle de deslocamento usando sinal real (a) sinal de áudio de entrada original usado para os testes (b) sinal de áudio controlado (c) deslocamento do cone sem controle (d) deslocamento do cone com atuação do controle -----	72

Introdução

O fundamento de funcionamento do alto-falante atual começou a ser desenvolvido em 1874, quando Ernst W. Siemens descreveu o primeiro transdutor dinâmico ou de bobina móvel, o qual possuía uma bobina circular de fio em um campo magnético e fixada de tal maneira que pudesse se mover axialmente. Contudo, inicialmente, Siemens não usou seu dispositivo para a transmissão audível. O mesmo Siemens em 1877 desenvolveu, da mesma forma que o radiador sonoro de um transdutor de bobina móvel, um diafragma não magnético. O diafragma tinha a forma de um cone de extremidades exponencialmente alargadas como uma trombeta. Surgiu assim, o alto-falante corneta que fora utilizado na maioria dos fonógrafos¹ mecânicos nessa era acústica. Esse alto-falante sofreu melhorias, em 1898, quando Oliver Lodge desenvolveu espaçadores não magnéticos para manter a abertura de ar entre os pólos internos e externos de um transdutor de bobina móvel. E em 1908 quando Anton Pollak desenvolveu a “aranha” (centragem) [1].

Chester W. Rice e Edward W. Kellogg, em 1925, patentearam o alto-falante com bobina móvel e radiador direto, que se transformou no projeto proeminente para todos os atuais alto-falantes, estabelecendo o princípio básico do alto-falante de radiação direta com um pequeno diafragma de massa controlada, bobina excitável e resposta uniforme em larga escala de frequências. O alto-falante de Rice e Kellogg começou a ser vendido em 1926 aos consumidores sob o nome de “Radiola”, e foram superiores a qualquer outro alto-falante inventado previamente, abaixando a distorção sonora e aumentando a qualidade do áudio para o consumidor. Esses alto-falantes surgiram como dispositivos capazes de reproduzir o som produzido pelos fonógrafos elétricos primitivos [1]. Desde então, o fundamento de funcionamento do alto-falante de Rice e Kellogg vem sendo utilizado nos projetos de alto-falantes.

¹ Antigo aparelho destinado a reproduzir sons gravados em cilindros ou discos metálicos. Aparelho que reproduz os sons gravados em discos sob a forma de sulcos espiralados; gramofone.

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 [2].

Para se obter altos níveis de pressão sonora em sistemas de radiação direta, devem-se aplicar altos níveis de potência elétrica, visto que cerca de 95 a 99% dessa potência é transformada em calor, através do efeito Joule, na bobina móvel do alto-falante [3], [4], [5]. 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 completa paralisação do funcionamento do alto-falante [5].

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) [6], [7], [8]. 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 devido ao excesso de temperatura da bobina.

Em [9]-[13], 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 [9]-[12] não usam a informação da temperatura para o controle de potência no alto-falante. Os procedimentos de determinação da temperatura da bobina apresentados em [9]-[11] consistem em aplicar uma corrente constante e de valor conhecido direta ao alto-falante em condições normais de funcionamento, e medir a tensão na bobina gerada pela circulação dessa corrente. Com a informação da tensão e da corrente na bobina e o conhecimento do coeficiente térmico da resistividade do fio da bobina e da temperatura ambiente, o aumento da temperatura da bobina é obtido. Em [12], o procedimento de determinação da temperatura é feito em tempo real e com o transdutor sob circunstâncias de funcionamento normais e sem adição de qualquer outro sinal. A tensão e a corrente na bobina são medidas e empregadas para determinar a impedância do alto-falante em teste. A variação da resistência CC da bobina é

derivada da parte real da impedância. Dessa forma, com o conhecimento da resistência CC da bobina, da temperatura ambiente e do coeficiente térmico da resistividade do fio da bobina, a temperatura da bobina é calculada. A corrente e a tensão na bobina são medidas sem uma direta conexão com o alto-falante, e para esta finalidade são usados transformadores. Os transformadores utilizados como sensores de corrente e tensão são conectados nas entradas dos amplificadores de medição. As saídas dos amplificadores de medição estão conectadas ao sistema de processamento de sinal, composto de conversores A/D e um processador de sinal digital (DSP). E, finalmente, um microcomputador é utilizado para mostrar os dados. Porém, devido ao fato de o procedimento utilizado para determinar a impedância não considerar as não-linearidades inerentes aos alto-falantes, a tensão e a corrente na bobina devem ser medidas apenas para a condição de pequenos sinais.

Em [13], são apresentados dois procedimentos de medição da temperatura da bobina, da resistência térmica e da constante de tempo térmica do alto-falante com o transdutor não estando sob circunstâncias de funcionamento normais. Ambos os procedimentos têm como principal função definir a temperatura máxima suportada pela bobina. Para a realização do primeiro procedimento é aplicada uma fonte de tensão senoidal em um resistor de valor igual ao da impedância nominal do alto-falante em teste e a corrente que circula pelo resistor é registrada. Depois, a mesma tensão senoidal é aplicada ao alto-falante e a resistência da bobina começa a aumentar devido ao aumento da temperatura. Em consequência, a corrente começa a diminuir. Com esses dados armazenados e juntamente com o conhecimento da temperatura ambiente e do coeficiente térmico da resistividade do fio da bobina, a temperatura da bobina é determinada. O segundo procedimento consiste na montagem de um circuito eletrônico que estabelece uma relação direta entre a tensão fornecida em sua saída e a temperatura da bobina, no qual uma tensão dependente da temperatura é obtida na saída do circuito. Assim, através de um registrador de nível na saída do circuito, a temperatura da bobina é obtida.

O método de controle da temperatura da bobina apresentado em [13] é função dos parâmetros térmicos do alto-falante: resistência térmica total, máxima temperatura permissível e da constante de tempo térmica. Entretanto, as não-linearidades do alto-falante não são consideradas. O sistema de proteção nesse método é composto de um bloco *squarer*, um bloco *averager* e um bloco de controle propriamente dito. Para modelar

o processo térmico e obter um sinal que corresponde à temperatura instantânea, o circuito de proteção processa o sinal usando as operações "calcular a função ao quadrado" e "calcular a média". Calculada a média, considerando-se uma constante de tempo igual à constante de tempo térmica do alto-falante, o sinal na entrada do bloco de controle torna-se proporcional ao aumento da temperatura. O ponto inicial da ativação do bloco de controle é determinado pela máxima temperatura permissível. Quando ativado esse bloco, o sinal que é enviado ao alto-falante é desligado ou é restringido pelo circuito de controle de modo que a temperatura seja mantida dentro de limites seguros.

Em [14] e [15], é apresentado um sistema de medição e controle de temperatura da bobina e deslocamento do cone. Com esse método apresentado efetuam-se medidas não destrutivas dos parâmetros lineares, não-lineares e térmicos, e da informação instantânea do estado do alto-falante. O transdutor é medido sob condições de funcionamento normais enquanto reproduz ruído ou um sinal de áudio com amplitudes elevadas. Um sistema de controle digital estima os parâmetros do modelo eletroacústico adaptativo do alto-falante, identifica a escala segura de operação do alto-falante automaticamente e protege o transdutor de sobrecargas térmicas e mecânicas. A técnica de identificação é baseada na medida dos sinais elétricos nos terminais do alto-falante. A identificação do modelo do transdutor é realizada em tempo real usando-se técnicas de processamento de sinal para efetuar as medidas e para formar o sistema autônomo adaptando-se ao transdutor automaticamente. Os principais componentes do sistema compreendem uma plataforma DSP, um amplificador de potência, um microcomputador com entrada USB (*universal serial bus*) e, se desejar, uma fonte externa de áudio. A plataforma DSP fornece meios para medir a tensão e a corrente nos terminais do transdutor e convertê-las para o domínio digital. A identificação do sistema e a funcionalidade restante são realizadas internamente ao DSP. A estimação dos parâmetros é combinada com a detecção da força contra-eletromotriz (EMF) para dispensar o uso de um sensor adicional. O controlador acomoda a unidade de controle de ganho e um sistema de proteção. No início do procedimento de medida o sinal de excitação é atenuado para impedir uma sobrecarga no transdutor não identificado. Lentamente, o ganho do sinal de excitação é aumentado e, então, a temperatura da bobina, os parâmetros não-lineares e a potência elétrica de entrada são determinados. Em todo o caso, se uma das quantidades controladas exceder um ponto inicial predefinido, o ganho do sinal de excitação é atenuado pelo sistema de proteção. O

sistema de proteção também prediz o deslocamento máximo e ativa um filtro passa-altas com frequência de corte variável para manter a excursão na escala segura, impedindo assim uma sobrecarga mecânica. Somente os valores iniciais são definidos pelo usuário, sendo que a escala de operação segura é identificada para cada alto-falante particular de forma automática.

Os parâmetros medidos no início do procedimento de medida, quando a amplitude de excitação é ainda pequena, correspondem aos parâmetros de pequenos sinais. Os parâmetros para grandes sinais medidos na escala máxima da operação podem ser classificados em parâmetros constantes, não-lineares e térmicos. Porém, tal sistema é relativamente complexo e de alto custo de implementação.

Como os métodos de medição e controle de temperatura da bobina e de deslocamento do cone, considerando as não-linearidades do alto-falante, não permitem a máxima eficiência do sistema de sonorização ou são relativamente complexos e de alto custo de implementação, é proposto neste trabalho um sistema de controle que satisfaça todos esses requisitos. Por essa razão, propõe-se uma abordagem de controle de temperatura da bobina e de deslocamento do cone relativamente simples, de baixo custo de implementação e que considera integralmente todas as características do alto-falante do sistema.

O controle é baseado na medida de 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 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).

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. Nesta 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.

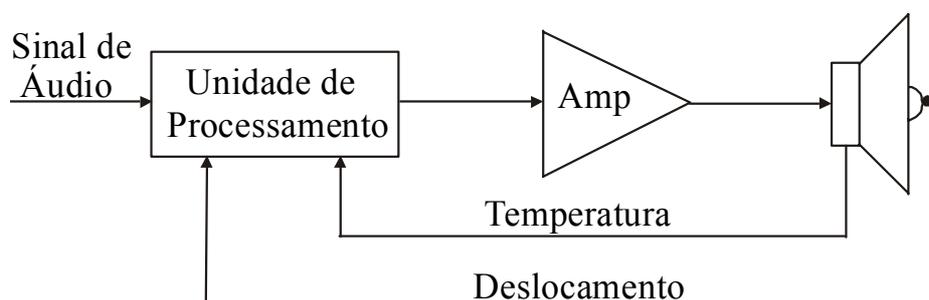


Figura 1. Diagrama geral do sistema de aquisição de dados, controle e monitoração da temperatura da bobina e deslocamento do cone.

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-se 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-se a dinâmica do processo em questão, tal abordagem permite realizar um controle de deslocamento preventivo. Note-se 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 verificação dos limites máximos do deslocamento obtido, quanto para atualização dos valores dos parâmetros de deslocamento para o sistema de controle, quando necessário.

A abordagem proposta no presente trabalho é explicitada em detalhes nos Capítulos seguintes. O Capítulo 2 apresenta, de forma sintética, a teoria geral de alto-falantes. As características da temperatura da bobina e do deslocamento do cone são discutidas no Capítulo 3. No Capítulo 4, são apresentadas as abordagens inicialmente testadas, descrevendo o que foi feito até se chegar ao esquema final de controle. O esquema usado para o controle da temperatura da bobina é detalhado no Capítulo 5, e no Capítulo 6 é discutida a abordagem considerada para o controle do deslocamento do cone. Os resultados

obtidos por simulações são apresentados no Capítulo 7. No Capítulo 8, são mostrados os resultados experimentais do sistema de controle proposto. Finalmente, no Capítulo 9, são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

Teoria Geral – Alto-falante

Os transdutores eletrodinâmicos baseiam-se no mesmo conceito: um diafragma em movimento, devido a um campo eletromagnético modulado em amplitude, atuando em conjunto com um ímã permanente. Esse mecanismo é análogo ao de um motor elétrico, sendo que no caso do alto-falante o rotor é substituído pela bobina móvel [16].

2.1 Alto-falante

A Figura 2 mostra uma vista em corte de um típico alto-falante eletrodinâmico. Quando se aplica corrente à bobina móvel, um campo eletromagnético é produzido perpendicularmente ao fluxo da corrente e ao campo do ímã permanente. A força mecânica resultante obriga o diafragma (ou cone) a deslocar-se em um movimento perpendicular ao campo magnético no entreferro, movimentando o ar em ambos os lados do cone [16].

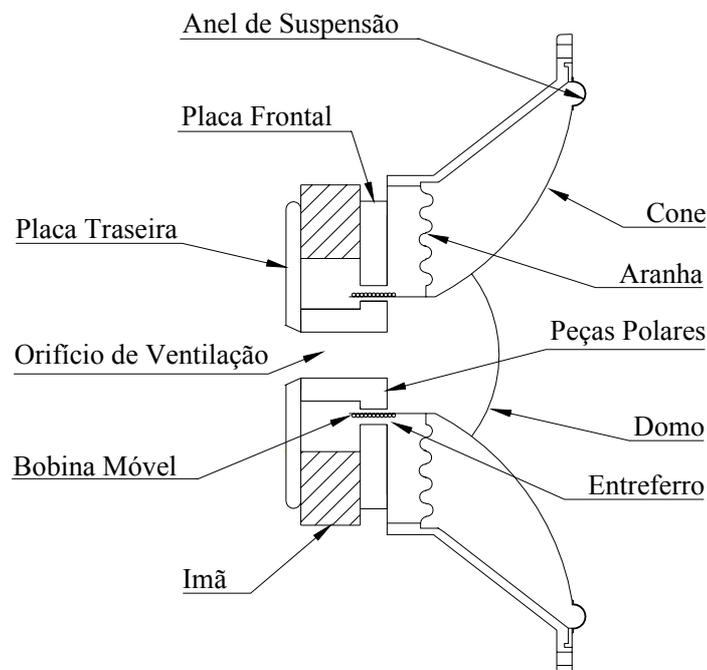


Figura 2. Vista em corte de um típico alto-falante eletrodinâmico.

Três sistemas distintos, mas interligados entre si, operam em uníssono em um transdutor eletrodinâmico [16].

- Sistema Motor: composto pela placa frontal, peça polar, ímã permanente, bobina móvel e placa traseira;
- Diafragma: normalmente um cone, com um domo protetor;
- Suspensão: consistindo de aranha e do anel de suspensão.

2.1.1 Sistema Motor

O sistema motor é composto basicamente por cinco partes, que são: placa frontal e peça polar que, em conjunto, compõem o entreferro, ímã permanente, bobina móvel e placa traseira. As placas traseira e frontal e a peça polar são construídas de um material de alta permissividade, como o ferro, e proporcionam um caminho cômodo para o fluxo magnético do ímã. O ímã é usualmente feito de ferrite cerâmica, em forma de anel. O circuito magnético fecha-se no entreferro, produzindo um campo magnético intenso entre a peça polar e a placa frontal [16]. Caso uma corrente alternada senoidal seja aplicada à bobina móvel, ter-se-á um fluxo de corrente em um determinado sentido durante o semiciclo positivo, o que deslocará o cone em uma dada direção. Quando o fluxo de corrente se inverte durante o semiciclo negativo, a polaridade do campo magnético se inverterá também, obrigando o deslocamento do cone a tomar o sentido oposto, consequência das sucessivas atrações e repulsões dos dois campos [16].

2.1.2 Diafragma

Explicar a física dos cones dos alto-falantes geralmente implica em iniciar por uma discussão teórica sobre a radiação de um pistão, infinitamente rígido, comprimindo o ar, sendo que a transferência de movimento do pistão para o ar ficaria limitada, em termos de frequência. O limite na faixa inferior do espectro de áudio seria dado por sua frequência de ressonância (abaixo da qual a capacidade de transferir energia diminui, devido a restrições mecânicas), e o limite na faixa superior sendo imposto tanto pela própria natureza da impedância de radiação do ar, quanto pelo raio da superfície irradiante. O ar impõe uma oposição ao movimento, ou seja, uma impedância de radiação, que diminui com a frequência, até o ponto a partir do qual qualquer acréscimo adicional na frequência

encontrará a mesma resistência. No caso prático, os cones não são infinitamente rígidos e irão deformar-se de algum modo, dependendo das características do material com que foram construídos [16].

A largura do entreferro nos alto-falantes pode variar desde vários milímetros, no caso de alto-falantes de grandes diâmetros, até a espessura de uma folha grossa de papel, no caso de pequenos *tweeters*. Independente do diâmetro do alto-falante, essa largura é mantida a menor possível, visando maximizar a densidade de fluxo, permitindo que os efeitos da dilatação térmica e do desalinhamento da bobina sejam acomodados. Durante a operação de fixar a bobina ao cone, o espaço entre ela e o entreferro é preenchido com um calço provisório, a fim de que um alinhamento preciso seja obtido. Esse procedimento deixa o espaço existente entre a bobina e a peça polar exposto a partículas estranhas, que poderiam ali se alojar, criando graves inconvenientes. A solução para esse tipo de problema é a utilização de um domo para proteger tal região [16].

2.1.3 Suspensão

O sistema de suspensão de um alto-falante é composto por dois elementos: o anel externo e a “aranha” (centragem). O anel da suspensão, geralmente construído de borracha, espuma ou linho tratado, desempenha várias funções: ajuda a manter o cone centrado, fornece parte da energia responsável pelo retorno do cone à posição de repouso e, também, propicia uma terminação amortecida para a borda do cone. A aranha, normalmente confeccionada de linho corrugado, mantém a bobina centrada na peça polar e fornece o resto da energia necessária para seu retorno à posição de repouso [16].

2.2 Modelo Eletromecânico-acústico do Alto-falante

A partir da década de 70 com o surgimento do modelo Thiele-Small [8], o alto-falante passou a ter uma abordagem científica. A teoria por eles apresentada possibilitou a análise da resposta em baixas frequências (de alto-falantes e caixas acústicas) a partir da teoria de circuitos elétricos RLC lineares. O alto-falante é modelado por um circuito equivalente eletromecânico-acústico (Figura 3) cuja função de transferência da pressão sonora é análoga à de um filtro passa-altas de segunda ordem ou maior [7, 8, 17, 18].

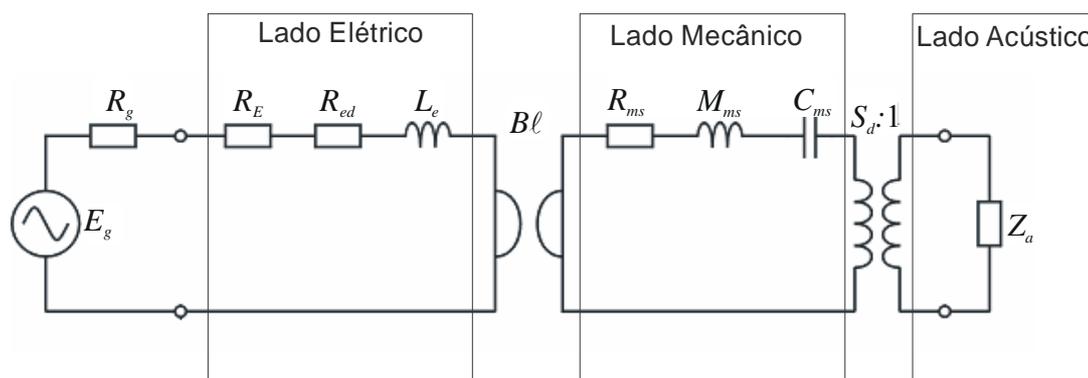


Figura 3. Circuito equivalente eletromecânico-acústico de um alto-falante com uma impedância acústica genérica.

No modelo caracterizado por um filtro de segunda ordem, mostrado na Figura 3, o amplificador é representado por um gerador de tensão senoidal E_g em série com uma impedância puramente resistiva R_g , os elementos R_E , R_{ed} e L_e denotam, respectivamente, a resistência CC da bobina; as perdas devido às correntes induzidas nas peças polares do conjunto magnético, que são dependentes da frequência; e a indutância da bobina, dependente também da frequência (lado elétrico). Os parâmetros R_{ms} , M_{ms} e C_{ms} representam as perdas, a massa, e a compliância do conjunto móvel do alto-falante (lado mecânico). A impedância acústica genérica Z_a (lado acústico) reproduz a carga vista pelo alto-falante. Finalmente, B caracteriza a indução magnética no entreferro, ℓ é o comprimento efetivo da bobina dentro do entreferro e S_d é a área efetiva do cone do alto-falante.

A impedância da bobina de um alto-falante é composta não apenas pelas resistências e reatâncias dos componentes ali existentes fisicamente no lado elétrico, como também por aqueles componentes localizados no lado mecânico e acústico que se refletem na bobina móvel. Assim, componentes residindo no lado mecânico, ou no lado acústico, têm influência na corrente circulando pela bobina.

Refletindo-se a impedância acústica da Figura 3 para o lado mecânico, obtém-se o circuito da Figura 4, onde Z_{am} é a impedância acústica refletida para o lado mecânico. A reflexão é dada tal como em um transformador, em que a corrente no primário depende da carga aplicada no secundário, uma vez que essa se reflete no primário proporcionalmente

ao quadrado da relação de espiras $(N_p/N_s)^2$. No caso do alto-falante, essa relação é S_d^2 [18].

$$Z_{am} = S_d^2 Z_a. \tag{1}$$

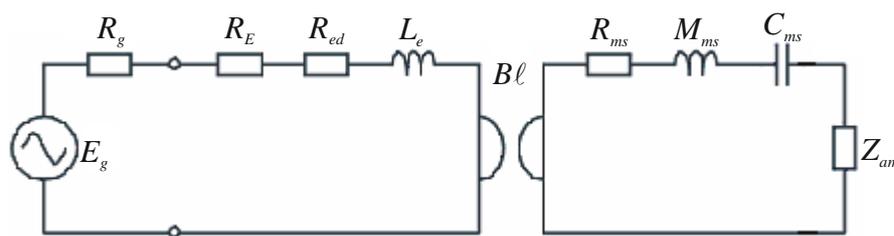


Figura 4. Componentes da impedância de radiação do ar refletidos para o lado mecânico.

Refletindo-se separadamente cada um dos componentes da Figura 4 para o lado elétrico, obtém-se o circuito mostrado na Figura 5, que é o circuito equivalente de um alto-falante visto pelo lado elétrico. Pelo efeito do girador, que faz o acoplamento entre os lados elétrico e mecânico, é refletido para o lado elétrico o dual do circuito existente no lado mecânico.

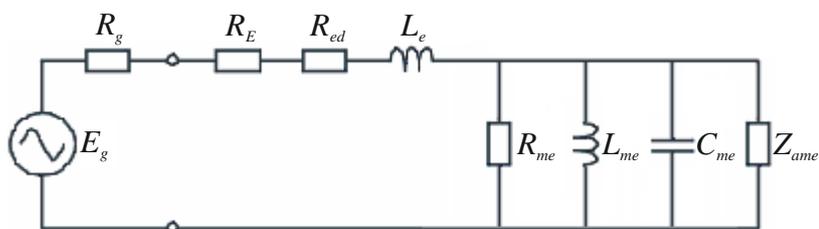


Figura 5. Circuito equivalente de um alto-falante visto pelo lado elétrico.

$$Z_{ame} = \frac{(B\ell)^2}{Z_{am}}, \tag{2}$$

$$C_{me} = \frac{M_{ms}}{(B\ell)^2}, \tag{3}$$

$$L_{me} = (B\ell)^2 C_{ms}, \quad (4)$$

e

$$R_{me} = \frac{(B\ell)^2}{R_{ms}}. \quad (5)$$

Em (2)-(5) Z_{ame} e R_{me} denotam a impedância refletida resultante do lado acústico para o lado elétrico e as perdas do conjunto móvel do alto-falante (lado mecânico) refletidas para o lado elétrico, respectivamente; L_{me} representa a compliância mecânica da suspensão do alto-falante refletida para o lado elétrico; C_{me} representa a capacitância devido à massa móvel do diafragma refletida para o lado elétrico.

O circuito com agrupamento dos componentes da Figura 5 provenientes do mesmo lado de origem (elétrico, mecânico e acústico) é apresentado na Figura 6. Tal agrupamento permite uma melhor visualização da influência dos componentes refletidos do lado mecânico e acústico na impedância do alto-falante.

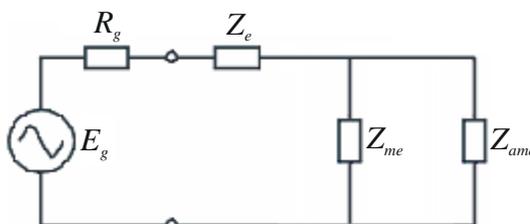


Figura 6. Circuito equivalente de um alto-falante visto pelo lado elétrico, com os componentes agrupados.

$$Z_e = R_E + R_{ed} + j\omega L_e, \quad (6)$$

onde

$$R_{ed} = K_{rm} \omega^{E_{rm}}, \quad (7)$$

$$L_e = K_{xm} \omega^{(E_{xm} - 1)}, \quad (8)$$

e

$$Z_{me} = \frac{sL_{me}}{1 + \frac{sL_{me}}{R_{me}} + s^2 L_{me} C_{me}}. \quad (9)$$

Em (6)-(9), Z_e e Z_{me} representam a impedância do lado elétrico e a impedância refletida resultante do lado mecânico para o lado elétrico do alto-falante; K e E são coeficientes obtidos a partir da medição do módulo e do ângulo de fase da impedância em duas frequências distintas. Tais coeficientes são geralmente fornecidos pelo fabricante do alto-falante. As equações (7) e (8), ambas função de ω , podem ser aplicadas às equações bastando fazer $s = j\omega$, como demonstrado no Apêndice A.

A impedância da bobina do alto-falante Z é obtida equacionando o circuito apresentado na Figura 6.

$$Z = Z_e + \frac{Z_{me} Z_{ame}}{Z_{me} + Z_{ame}}. \quad (10)$$

Substituindo-se (6) e (9) em (10), tem-se a equação final da impedância do alto-falante para uma impedância acústica genérica.

$$Z = R_E + R_{ed} + j\omega L_e + \frac{j\omega L_{me}}{1 + j\omega L_{me} \left(\frac{1}{R_{me}} + \frac{1}{Z_{ame}} \right) - \omega^2 L_{me} C_{me}}. \quad (11)$$

A impedância acústica é dependente de onde o alto-falante está fixado [8], assumindo valor de acordo com o modelo da caixa-acústica utilizada.

Nesse trabalho serão analisadas as características do alto-falante em um *baffle* infinito² e em uma caixa sintonizada. Assim, ter-se-ão as características do alto-falante sem

² Um *baffle* infinito não existe na prática, porém pode ser aproximado por uma superfície de dimensões muito maiores do que o diâmetro do alto-falante ou por uma caixa de volume interno V_b superior ao volume equivalente do alto-falante (V_{as}).

influências das caixas-acústicas e as características do alto-falante com as influências da caixa sintonizada utilizada para realizar as medições na implementação do controle proposto nesse trabalho.

2.2.1 Análise para o *baffle* infinito

Para o *baffle* infinito, a impedância acústica Z_a é considerada igual a zero, pois sua ordem de grandeza é desconsiderável em relação às outras impedâncias envolvidas [8], obtendo-se uma impedância refletida resultante do lado acústico para o lado elétrico tendendo ao infinito $Z_{ame} \rightarrow \infty$. A impedância resultante do alto-falante em um *baffle* infinito é dada por

$$Z = R_E + R_{ed} + j\omega L_e + \frac{j\omega L_{me}}{1 + j\omega \frac{L_{me}}{R_{me}} - \omega^2 L_{me} C_{me}}. \quad (12)$$

A Figura 7 mostra as curvas típicas do módulo da impedância e da resistência CC da bobina de um alto-falante profissional para um *baffle* infinito.

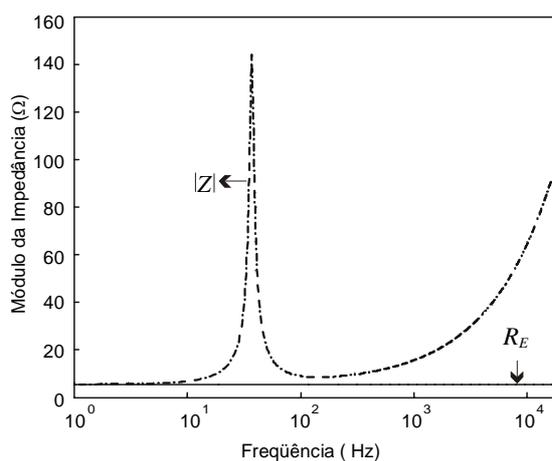


Figura 7. Curva típica da resistência CC da bobina para a temperatura de 25 C de um alto-falante profissional e do módulo de sua impedância, para um *baffle* infinito.

2.2.2 Análise para caixa sintonizada (*vented box*)

A caixa sintonizada caracteriza-se por ter uma câmara com volume interno V_b e um duto (ou pórtilo), permitindo a comunicação entre o interior e o meio externo (Figura 8(a)). A interação do duto com o volume interno da caixa resulta em uma frequência de sintonia f_b .

Através da teoria do ressonador de Helmholtz, onde o volume de ar confinado dentro da caixa acústica tem um comportamento capacitivo C_{ab} e a massa acústica de ar no duto atua como um indutor M_{ap} , a impedância acústica Z_a da caixa sintonizada é modelada por uma compliância acústica C_{ab} em paralelo com uma massa acústica M_{ap} e por uma resistência R_{al} que representa as perdas por vazamento (Figura 8(b)). Então, do circuito da Figura 8(b), tem-se [8]

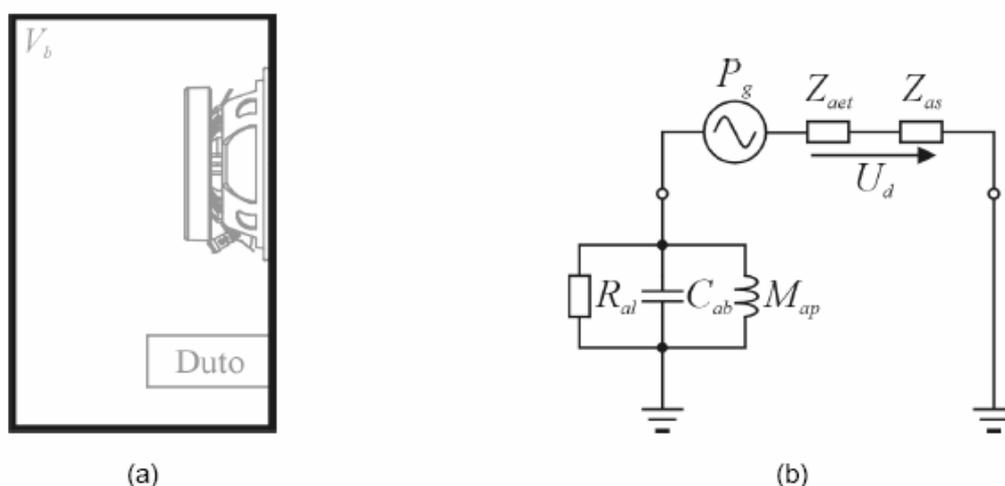


Figura 8. (a) Alto-falante montado em uma caixa sintonizada (b) circuito equivalente do sistema.

$$Z_a = \frac{s}{C_{ab} \left(s^2 + \frac{s\omega_b}{Q_l} + \omega_b^2 \right)}, \quad (13)$$

com

$$\omega_b = 2\pi f_b, \quad (14)$$

$$f_b = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{ap}C_{ab}}}, \quad (15)$$

$$Q_l = \omega_b C_{ab} R_{al}, \quad (16)$$

e

$$C_{ab} = \frac{S_d^2 C_{ms} V_b}{V_{as}}. \quad (17)$$

onde Q_l é o fator de mérito da caixa devido às perdas por vazamento e V_{as} é o volume equivalente do alto-falante. Alterando-se o volume interno da caixa V_b (que altera C_{ab}) e/ou as dimensões do duto (que altera M_{ap}), alteram-se as características de transferência do sistema. A estrutura da caixa sintonizada caracteriza um sistema de 4ª ordem [8].

Refletindo-se a impedância acústica Z_a da caixa sintonizada para o lado elétrico através de (1) e (2), tem-se a impedância refletida resultante do lado acústico para o lado elétrico. Assim,

$$Z_{ame} = \frac{(B\ell)^2 C_{ab}}{(S_d)^2 s} \left(s^2 + \frac{s\omega_b}{Q_l} + \omega_b^2 \right). \quad (18)$$

A impedância resultante do alto-falante em uma caixa sintonizada é dada por

$$Z = R_E + R_{ed} + j\omega L_e + \frac{j\omega L_{me}}{1 + j\omega L_{me} \left(\frac{1}{R_{me}} + \frac{1}{\frac{(B\ell)^2 C_{ab}}{(S_d)^2 j\omega} \left(-\omega^2 + \frac{j\omega\omega_b}{Q_l} + \omega_b^2 \right)} \right) - \omega^2 L_{me} C_{me}}}. \quad (19)$$

A Figura 9 mostra as curvas típicas do módulo da impedância e da resistência CC da bobina de um alto-falante profissional em uma caixa sintonizada, considerando-se o alto-falante montado em uma caixa sintonizada com as mesmas características da caixa sintonizada usada na implementação do controle $f_b = 40 \text{ Hz}$, $\alpha = 1,2$ e $Q_l = 7$.

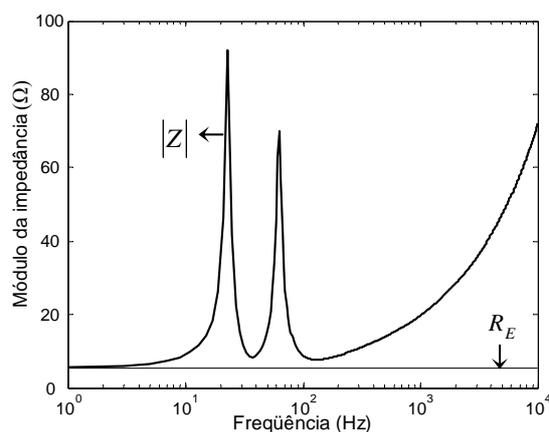


Figura 9. Curva típica da resistência CC da bobina para a temperatura de 25 C de um alto-falante profissional e do módulo de sua impedância, para uma caixa sintonizada.

2.3 Conclusões

Neste capítulo, foi apresentada de forma sintética a teoria geral do alto-falante. Foram descritos o princípio de funcionamento, o modelo eletromecânico-acústico e as partes que compõem o alto-falante, como também as características de sua impedância quando instalado em um *baffle* infinito ou em uma caixa sintonizada. Mostrou-se que para frequências abaixo de 10 Hz, em ambos os casos (*baffle* infinito ou caixa sintonizada), a impedância do alto-falante é aproximadamente igual a resistência da bobina para corrente contínua. No caso de caixa sintonizada, houve o aparecimento de um vale na característica de impedância do alto-falante na frequência de ressonância da caixa acústica. No Capítulo 3 são descritas as características da temperatura da bobina e deslocamento do cone dos alto-falantes. Tais características serão consideradas nas abordagens de controle de temperatura da bobina detalhadas nos Capítulo 4 e Capítulo 5.

Características da Temperatura da Bobina e do Deslocamento do Cone do Alto-falante

Nesse trabalho serão analisadas as características da temperatura da bobina e do deslocamento do cone do alto-falante para um amplificador de saída em tensão, ou seja, o alto-falante sendo excitado por uma fonte de tensão.

3.1 Características da Temperatura da Bobina

Alto-falantes são transdutores que convertem sinais elétricos em ondas sonoras. Entretanto, devido ao fato da eficiência de conversão de energia dos alto-falantes ser muito baixa, a maior parte da energia elétrica de excitação não é transformada em energia acústica. Assim, uma grande parte da energia elétrica é convertida, por efeito Joule, em calor na bobina.

A determinação da temperatura da bobina é baseada na taxa de variação da resistência da bobina para corrente contínua (CC) com respeito à temperatura [11], [12], [13], [19], a qual é dada por

$$t_B(n) = t_B(n-1) + \left[\frac{R_E(n)}{R_E(n-1)} - 1 \right] \left[t_B(n-1) - t_A + \frac{1}{\alpha_{t_A}} \right]. \quad (20)$$

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

A Figura 10 mostra uma curva típica de variação da resistência CC da bobina em função da temperatura.

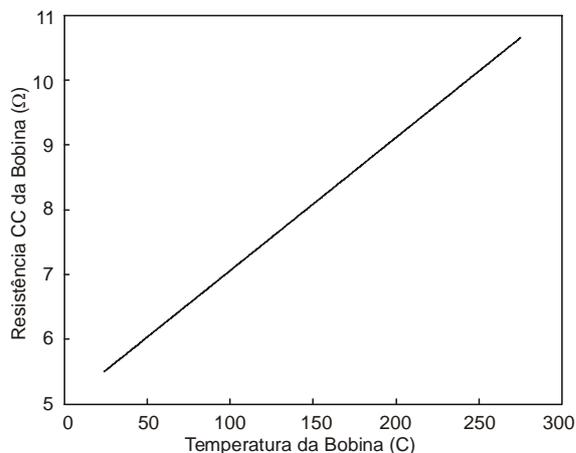


Figura 10. Curva típica da resistência CC da bobina *versus* temperatura.

As Figuras 11, 12 e 13 apresentam as curvas de temperatura da bobina, para um alto-falante profissional, em função do tempo e da potência instantânea aplicada ao alto-falante. As curvas de temperatura da bobina foram geradas usando-se o modelo térmico do alto-falante apresentado em [2].

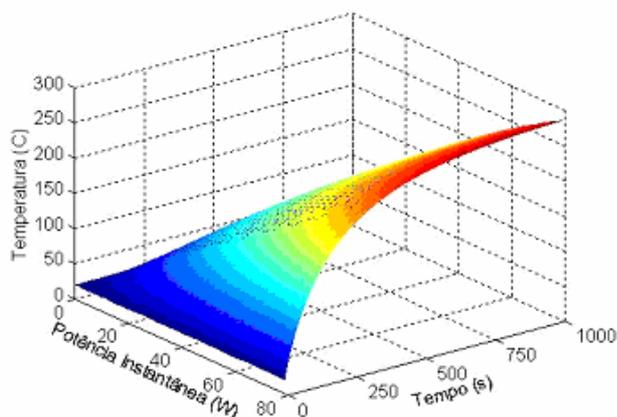


Figura 11. Curva da temperatura da bobina em função do tempo e da potência instantânea aplicada.

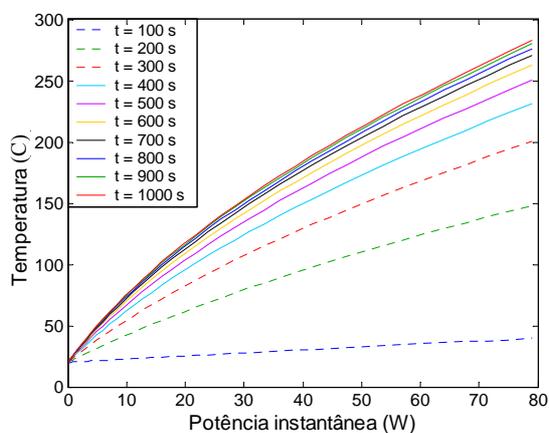


Figura 12. Curvas de temperatura da bobina em função da potência instantânea para diferentes tempos.

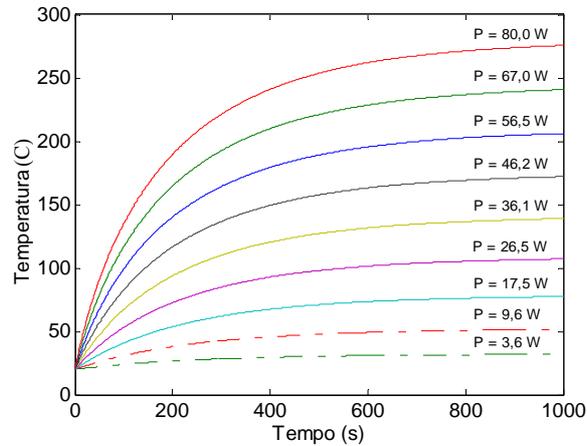


Figura 13. Curvas de temperatura da bobina em função do tempo para diferentes potências instantâneas.

3.2 Características do Deslocamento do Cone

Para maior facilidade na análise do deslocamento do cone, os componentes provenientes do mesmo lado (elétrico, mecânico e acústico) do circuito apresentado na Figura 3 foram agrupados, gerando o circuito mostrado na Figura 14.

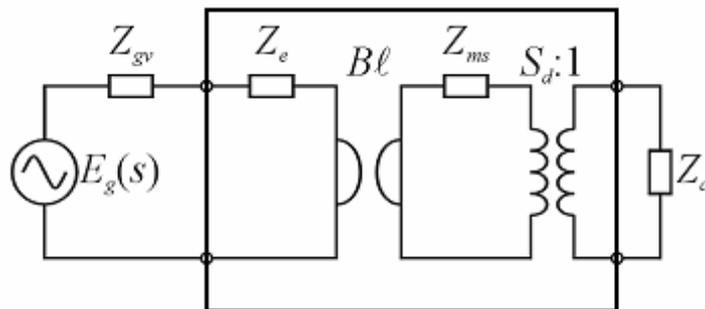


Figura 14. Circuito eletromecânico-acústico equivalente de um alto-falante com uma impedância acústica genérica excitado por fonte de tensão.

A impedância Z_e é dada por (6) e a impedância Z_{ms} por

$$Z_{ms} = R_{ms} + sM_{ms} + \frac{1}{sC_{ms}} \tag{21}$$

Levando-se os componentes elétricos e mecânicos (Figura 14) para o lado acústico, tem-se a pressão acústica $P_{gv}(j\omega)$, a impedância resultante refletida do lado elétrico para o

lado acústico Z_{aev} e a impedância refletida resultante do lado mecânico para o lado acústico Z_{as} [7], [8], dadas por

$$P_{gv}(j\omega) = \frac{B\ell}{S_d} \cdot \frac{E_g}{Z_{gv} + Z_e}, \quad (22)$$

$$Z_{aev} = \frac{(B\ell)^2}{S_d^2(Z_{gv} + Z_e)}, \quad (23)$$

e

$$Z_{as} = \frac{1}{S_d^2 C_{ms}} \frac{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s Q_{ms}} + 1}{s}, \quad (24)$$

com

$$Q_{ms} = \frac{1}{\omega_s C_{ms} R_{ms}}, \quad (25)$$

e

$$\omega_s = 2\pi f_s, \quad (26)$$

onde Q_{ms} é o fator de mérito mecânico do alto-falante e ω_s é a frequência angular de ressonância do alto-falante, para o ar livre.

A vazão (de ar) $U_{dv}(j\omega)$ (análoga à corrente elétrica) é a pressão acústica $P_{gv}(j\omega)$ (análoga à tensão elétrica) dividida pela impedância acústica total [7], [8]. Assim,

$$U_{dv}(j\omega) = \frac{P_{gv}(j\omega)}{Z_{aev} + Z_{as} + Z_a}. \quad (27)$$

Dividindo-se a vazão (de ar) $U_{dv}(j\omega)$ pela área efetiva do cone do alto-falante S_d , obtém-se a velocidade de deslocamento do cone $V_{dv}(j\omega)$. Integrando-se essa velocidade, obtém-se o deslocamento do cone $X_v(j\omega)$ [7], [8]. Assim,

$$V_{dv}(j\omega) = \frac{U_{dv}(j\omega)}{S_d}, \tag{28}$$

$$X_v(j\omega) = \frac{U_{dv}(j\omega)}{j\omega S_d}. \tag{29}$$

3.2.1 Análise para *baffle* infinito

Considerando-se $Z_{gv} \rightarrow 0$, que é característica idealizada da impedância interna do gerador de tensão, e desprezando-se Z_a , pois $Z_a \ll Z_{as}$ e $Z_a \ll Z_{aev}$, tem-se que o deslocamento do cone excitado por fonte de tensão é dado por

$$X_v(j\omega) = \frac{E_g B \ell}{j\omega S_d^2 Z_e} \frac{1}{\frac{(B\ell)^2}{S_d^2 Z_e} + \frac{1}{S_d^2 C_{ms}} \frac{-\omega^2 + \frac{j\omega}{\omega_s Q_{ms}} + 1}{j\omega}}. \tag{30}$$

As Figuras 15 e 16 apresentam a característica do deslocamento do cone do alto-falante instalado em um *baffle* infinito.

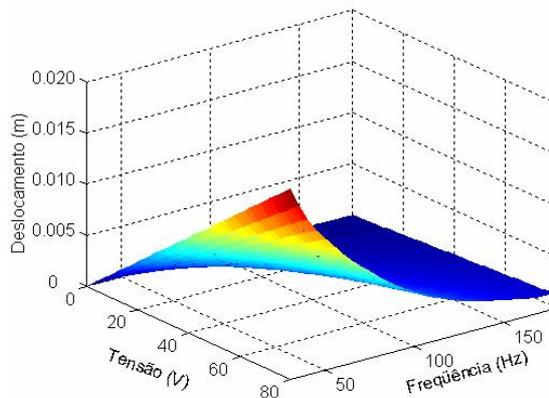


Figura 15. Deslocamento do cone do alto-falante excitado por fonte de tensão para um *baffle* infinito em função da tensão aplicada e da frequência.

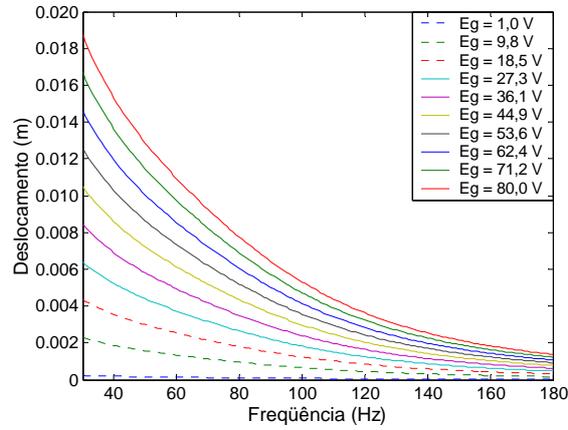


Figura 16. Deslocamento do cone do alto-falante excitado por fonte de tensão para um *baffle* infinito em função da freqüência, para diferentes tensões.

3.2.2 Análise para caixa sintonizada

Considerando-se $Z_{gv} \rightarrow 0$, que é característica idealizada da impedância interna do gerador de tensão, e sendo Z_a para caixa sintonizada dada por (13) tem-se que o deslocamento do cone excitado por fonte de tensão é

$$X_v(j\omega) = \frac{E_g B \ell}{j\omega S_d^2 Z_e} \frac{1}{\frac{(B\ell)^2}{S_d^2 Z_e} + \frac{1}{S_d^2 C_{ms}} \frac{-\omega^2 + \frac{j\omega}{\omega_s Q_{ms}} + 1}{j\omega} + \frac{(B\ell)^2 C_{ab}}{(S_d)^2 j\omega} \left(-\omega^2 + \frac{j\omega\omega_b}{Q_l} + \omega_b^2 \right)} \quad (31)$$

Considerando-se o alto-falante montado em uma caixa sintonizada com as mesmas características da caixa sintonizada usada na implementação do controle, $f_b = 40$ Hz, $\alpha = 1,2$ e $Q_l = 7$, obtém-se a característica do deslocamento do cone mostrada nas Figuras 17 e 18.

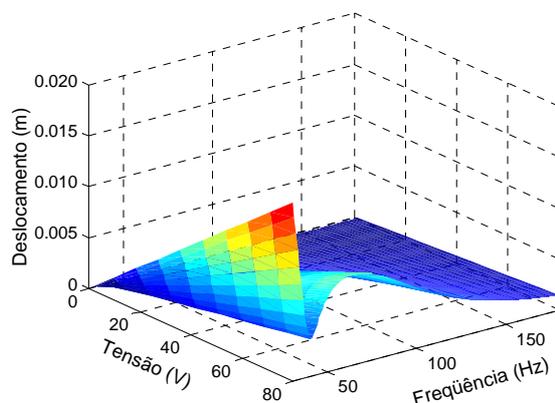


Figura 17. Deslocamento do cone do alto-falante excitado por fonte de tensão em uma caixa sintonizada em função da tensão aplicada e da frequência.

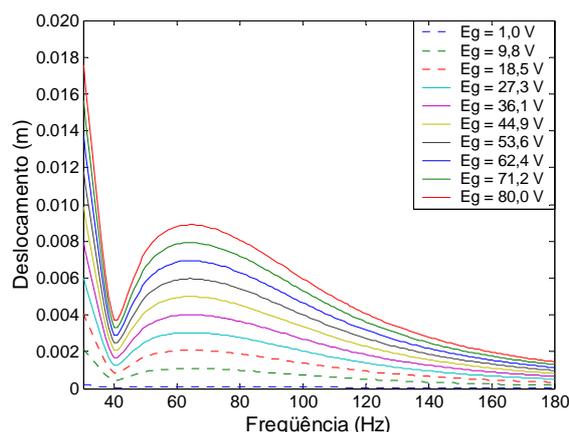


Figura 18. Deslocamento do cone do alto-falante excitado por fonte de tensão em uma caixa sintonizada em função da frequência, para diferentes tensões.

3.3 Conclusões

Neste capítulo, foram apresentadas as características da temperatura da bobina e do deslocamento do cone do alto-falante instalado em um *baffle* infinito como também em uma caixa sintonizada. Uma propriedade importante é a dependência das características do deslocamento do cone com o anteparo em que o alto-falante está instalado. No caso da caixa sintonizada, diferentemente do *baffle* infinito, houve o aparecimento de um vale na resposta em frequência do deslocamento do cone na região de ressonância da caixa acústica. Além do mais, mostrou-se que, mesmo com altos níveis de tensão aplicada ao

alto-falante, em altas frequências o deslocamento do cone é pequeno. Com as características da impedância do alto-falante estudadas no Capítulo 2 e conhecidas às características da temperatura da bobina e do deslocamento do cone, pode-se agora descrever as abordagens iniciais de controle de temperatura da bobina e do deslocamento do cone, que serão os assuntos do Capítulo 4.

Abordagens Inicialmente Testadas

Antes de ser obtido o esquema final de controle da temperatura da bobina (apresentado no Capítulo 5) e do deslocamento do cone (apresentado no Capítulo 6) foram inicialmente testadas diferentes abordagens de controle de temperatura da bobina e do deslocamento do cone. Para o controle de temperatura da bobina, inicialmente foi considerada apenas uma abordagem e para o controle do deslocamento do cone foram inicialmente testadas três abordagens: *hard control*, controle preditivo e controle adaptativo.

4.1 Abordagem Inicial de Controle de Temperatura da Bobina

A abordagem aqui considerada sugere o controle de temperatura da bobina levando-se em consideração as características do alto-falante, conceito esse utilizado no esquema final de controle de temperatura da bobina, diferindo, no entanto, quanto à concepção do fator de ganho. Tal controle é efetuado através de uma característica de ganho temporal que deve ser inversa à variação da temperatura da bobina relativa ao tempo. Sendo assim, o controle de temperatura é feito através do controle de ganho do sinal de áudio que vai ser amplificado e enviado ao alto-falante [21].

Um exemplo ilustrativo da curva de variação de temperatura da bobina com a atuação do controle de temperatura é mostrado na Figura 19. A Figura 20 ilustra a respectiva curva de ganho para o controle de temperatura da Figura 19.

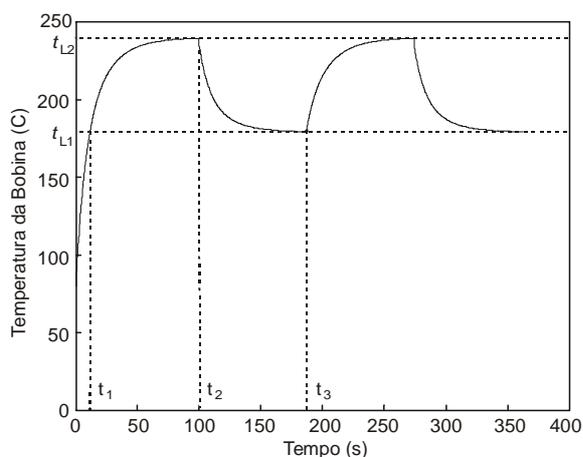


Figura 19. Exemplo de curva de variação da temperatura da bobina com a atuação do controle de temperatura.

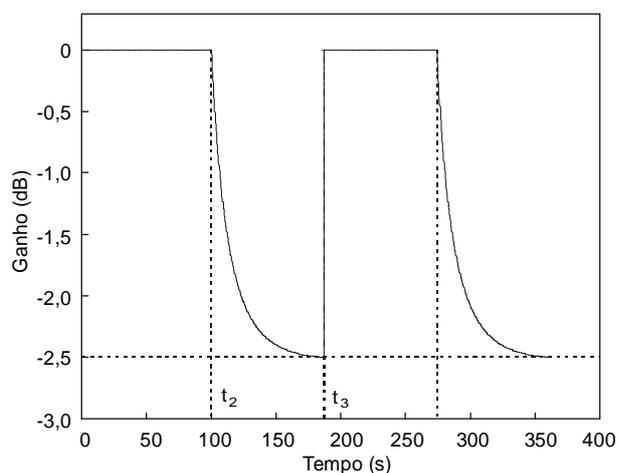


Figura 20. Curva de ganho para o controle da temperatura.

Observando-se a Figura 19, verifica-se que a curva de variação de temperatura da bobina é dependente não só da potência aplicada como também do tempo. Assim, para uma dada potência constante aplicada ao alto-falante, mede-se no instante t_1 a temperatura da bobina, que é t_{L1} . Mantida a potência, em um segundo instante t_2 , a temperatura da bobina será t_{L2} , sendo maior do que t_{L1} . Considerando-se agora t_{L1} e t_{L2} como limiares inferior e superior, respectivamente, pode-se fazer atuar o controle para esses níveis de temperatura. Dessa forma, uma vez que seja acionado o controle de temperatura em t_{L2} , uma redução de temperatura se inicia, decrescendo a temperatura para o nível t_{L1} , no instante t_3 . Cessada a atuação do controle no instante t_3 , o processo de aumento da temperatura é reiniciado, e um novo ciclo tem origem, conforme mostrado na Figura 19. As temperaturas t_{L1} e t_{L2} são predeterminadas na fase de projeto do sistema de controle,

sendo $t_{L1} < t_{L2}$, e t_{L2} dependente da temperatura máxima da bobina. A Figura 20 ilustra a variação de ganho (com conseqüente variação de potência), visando o controle de temperatura da bobina.

A partir do instante em que a temperatura da bobina é maior do que a temperatura t_{L1} , os valores de temperatura em instantes sucessivos de tempo, entre t_{L1} e t_{L2} , são armazenados. Tais valores são interpolados, gerando uma curva de variação da temperatura entre os limiares t_{L1} e t_{L2} . Com auxílio dessa característica, uma curva de ganho *versus* tempo para o controle de temperatura pode ser obtida. Tal curva deve ter uma característica inversa da curva de aumento de temperatura com o tempo. Ela deve ser ajustada em 0 dB para os instantes de tempo em que a temperatura está situada entre t_{L1} e t_{L2} , e segue a expressão (32), que modela a característica inversa da curva de temperatura função do tempo, para os instantes referentes ao intervalo de temperatura entre t_{L2} e t_{L1} .

$$G(n)_{\text{dB}} = 10 \log \frac{t_s(0)}{t_s(n)}, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (32)$$

onde $G(n)$ representa o ganho entre t_{L2} e t_{L1} ; $t_s(n)$ e $t_s(0)$ denotam a temperatura armazenada no instante atual e inicial, respectivamente. Em (32), é usado como temperatura inicial $t_s(0) = t_1(0)$.

Para demonstrar o funcionamento do sistema de controle de temperatura da bobina do alto-falante, foram feitas simulações usando o modelo térmico do alto-falante apresentado em [2].

Os dados usados nas simulações, obtidos através do catálogo do fornecedor (Apêndice B) [22], são de um típico alto-falante profissional. Considerou-se o efeito do aumento da resistência CC da bobina com o aumento da temperatura e as temperaturas limiares inferior $t_{L1} = 110 \text{ C}$ e superior $t_{L2} = 120 \text{ C}$. O coeficiente térmico do fio da bobina e a resistência CC para temperatura ambiente $t_A = 25 \text{ C}$ são $\alpha_{25} = 0,0039 \text{ C}^{-1}$ e $R_E = 5,5 \Omega$. O 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 $E_{rm} = 0,754$ e expoente da indutância da bobina $E_{xm} = 0,508$.

As Figuras 21, 22 e 23 ilustram o funcionamento do sistema de controle da temperatura da bobina, representando a curva da temperatura controlada da bobina, a curva de potência controlada entregue ao alto-falante e a curva do fator de ganho para o controle da temperatura, respectivamente.

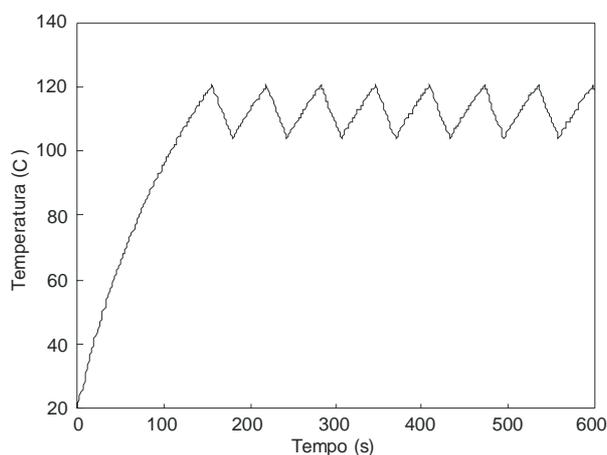


Figura 21. Curva da temperatura controlada.

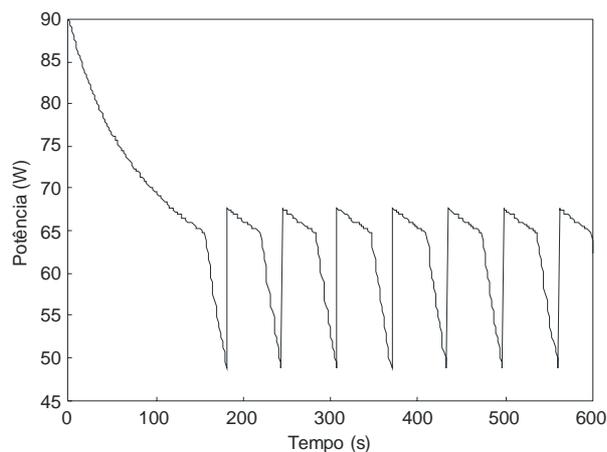


Figura 22. Curva da potência controlada entregue ao alto-falante.

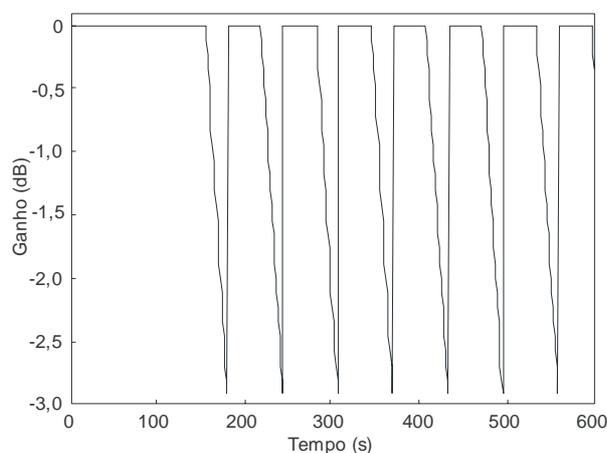


Figura 23. Curva do fator de ganho para o controle da temperatura.

O insucesso dessa abordagem para o controle de temperatura da bobina é devido ao fato de o fator de ganho ter uma descontinuidade no instante em que o controle passa de um estado (atuando) para o outro estado (não atuando), como pode ser visto na Figura 23, gerando assim, uma grande variação instantânea da potência fornecida ao alto-falante (Figura 22). Essa variação resulta em uma variação da pressão sonora, que é perceptível auditivamente.

4.2 Abordagens Iniciais do Controle de Deslocamento do Cone

4.2.1 *Hard Control*

A abordagem inicial de *hard control* para o controle do deslocamento do cone foi feita através de um limitador de deslocamento. O limite foi dado como uma porcentagem do deslocamento máximo do cone, fornecido pelo fabricante do alto-falante. Assim, o deslocamento do cone é mantido dentro dos limites dados pelo fabricante.

Como o deslocamento do cone e a potência entregue ao alto-falante são obtidos em tempo real, programa-se que quando o deslocamento do cone for maior do que o limite predefinido, pela primeira vez, esse valor de potência é então armazenado. Dessa forma, quando o deslocamento do cone tender a ser maior do que tal limite, a potência entregue ao alto-falante será limitada ao valor da potência armazenada, evitando-se, assim, que o alto-falante seja danificado.

Para ilustrar o funcionamento de tal sistema de controle, foram feitas simulações usando-se o modelo do deslocamento do cone do alto-falante em um *baffle* infinito apresentado no Capítulo 3, e os dados usados nas simulações, obtidos através do catálogo do fornecedor (Apêndice B) [22], foram os de um alto-falante profissional típico de 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 $S_d = 0,0814 \text{ m}^2$ e fator de qualidade total $Q_{ts} = 0,33$, considerando-se um deslocamento máximo do cone de 12 mm.

As Figuras 24, 25, 26 e 27 ilustram o funcionamento do sistema de controle do deslocamento do cone. A curva da potência instantânea entregue ao alto-falante e a curva

do deslocamento do cone desconsiderando-se o sistema de controle para o deslocamento do cone estão mostrados nas Figuras 24 e 25, respectivamente. As Figuras 26 e 27 apresentam, respectivamente, a curva da potência instantânea entregue ao alto-falante e a curva do deslocamento do cone considerando-se o sistema de controle para o deslocamento do cone.

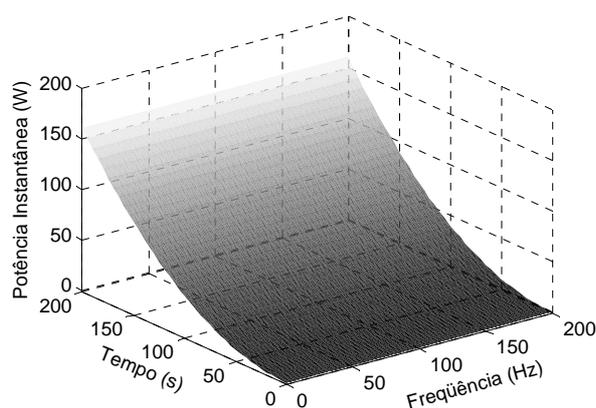


Figura 24. Curva da potência entregue ao alto-falante desconsiderando o sistema de controle para o deslocamento do cone.

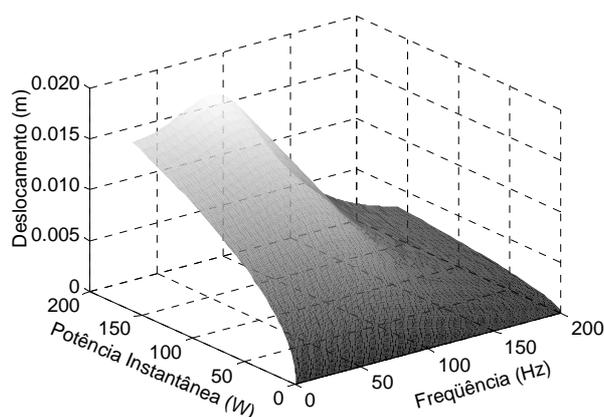


Figura 25. Curva do deslocamento do cone desconsiderando o sistema de controle para o deslocamento do cone.

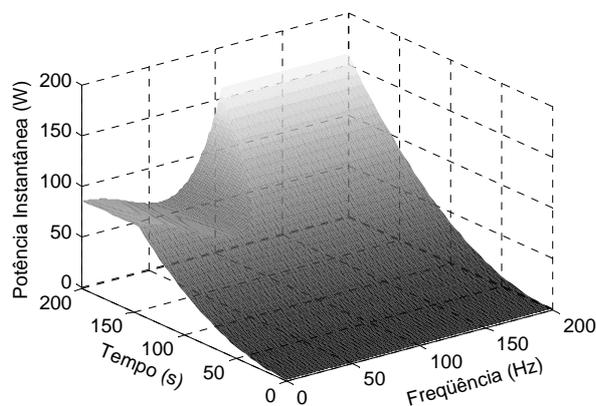


Figura 26. Curva da potência entregue ao alto-falante com atuação do sistema de controle para o deslocamento do cone.

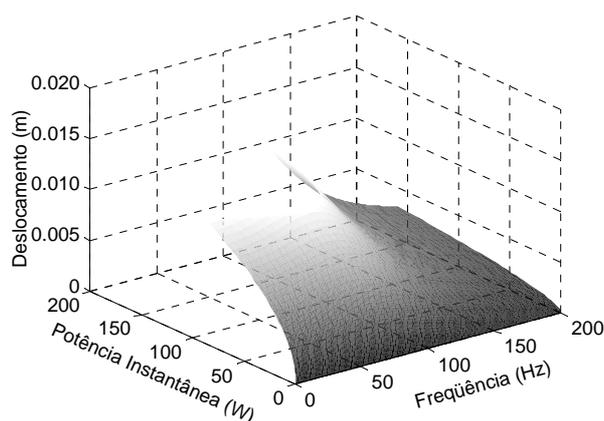


Figura 27. Curva do deslocamento do cone com atuação do sistema de controle para o deslocamento do cone.

Essa abordagem para o controle do deslocamento do cone foi insatisfatória devido ao fato de não levar em consideração as características do deslocamento do cone para realizar o controle e, quando atua, limita bruscamente o deslocamento, como mostrado na Figura 27. Com isso, o sinal aplicado ao alto-falante é ceifado quando o controle atua e, conseqüentemente, a potência instantânea fornecida ao alto-falante sofre o mesmo efeito (Figura 26). Isso gera uma grande distorção que é perceptível auditivamente.

4.2.2 Controle Preditivo

Para a realização do controle preditivo é considerada a aproximação de que a curva do deslocamento do cone em função da tensão fornecida ao alto-falante, quando dividida

em pequenas partes, pode ser representada por uma equação de reta, expressão (33). O controle é então efetuado através de um fator de ganho que é função do coeficiente angular dessa reta. Esse ganho modifica o nível do sinal de áudio na entrada do alto-falante (expressão 34) controlando, assim, o deslocamento do cone.

A Figura 28 mostra o diagrama de bloco simplificado do controle preditivo do deslocamento do cone. Nessa estrutura, C_{pre} denota o controle preditivo do deslocamento d , V_{in} tensão de entrada e V_{inc} a tensão de entrada controlada.

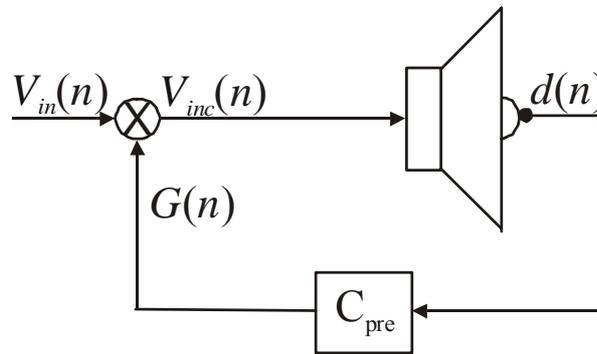


Figura 28. Diagrama de bloco do controle preditivo do deslocamento do cone.

$$d(n) = b + aV_{inc}(n), \quad (33)$$

$$V_{inc}(n) = V_{in}(n)G(n), \quad (34)$$

onde $G(n)$ representa o ganho no instante atual, considerando-se uma condição inicial $G(0)|_{dB} = 0$ dB.

Como o deslocamento do cone e a tensão entregue ao alto-falante são medidos em tempo real, pode-se obter o coeficiente angular a e o coeficiente linear b de (33). O coeficiente angular é definido como sendo a relação entre a variação do deslocamento do cone e a variação da tensão fornecida ao alto-falante.

$$a = \frac{d(n) - d(n-1)}{V_{inc}(n) - V_{inc}(n-1)}. \quad (35)$$

Substituindo-se o coeficiente angular a de (35) em (33) e através da simples manipulação algébrica, obtém-se uma expressão para determinar o coeficiente linear. Assim,

$$b = d(n) - V_{inc}(n) \frac{d(n) - d(n-1)}{V_{inc}(n) - V_{inc}(n-1)}. \quad (36)$$

Com a aproximação da curva do deslocamento do cone em função da tensão entregue ao alto-falante por uma reta, obtém-se a máxima tensão V_{max} que pode ser entregue ao alto-falante. Portanto,

$$V_{max} = \frac{d_{max} - b}{a}. \quad (37)$$

Substituindo-se as respectivas expressões do coeficiente angular e linear em (37), tem-se a expressão final para o cálculo da máxima tensão. Assim,

$$V_{max} = \frac{[V_{inc}(n) - V_{inc}(n-1)][d_{max} - d(n)]}{d(n) - d(n-1)}. \quad (38)$$

Através do conhecimento de V_{max} e da tensão entregue ao alto-falante no instante atual e anterior, obtém-se o número de iterações N_i necessário para que a tensão entregue ao alto-falante seja igual a V_{max} . Então,

$$N_i = \frac{V_{max}(n) - V_{inc}(n)}{V_{inc}(n) - V_{inc}(n-1)}. \quad (39)$$

Agora, considerando N_{def} como sendo um número predefinido do limiar inferior de iterações, pode-se controlar o deslocamento mantendo-o abaixo do deslocamento máximo d_{max} . Dessa forma, uma vez que N_i seja menor que N_{def} , indicando que o valor da tensão fornecida ao alto-falante no instante atual está próximo da máxima tensão permitida e conseqüentemente levando a um elevado deslocamento do cone, o controle do

deslocamento é acionado, e uma redução do coeficiente angular ocorre. O número de iterações N_{def} é determinado na fase de projeto do sistema de controle.

A redução do coeficiente angular é dada através do aumento do número de iterações, diminuindo-se assim a inclinação da reta, ou seja, para uma mesma variação da tensão do sinal de entrada resulta em uma variação menor do deslocamento do cone. O novo número de iterações N_{novo} é definido como sendo 20 % maior do que N_{def} .

$$N_{\text{novo}} = 1,2N_{\text{def}}. \quad (40)$$

Utilizando-se (37) e N_{novo} , obtém-se o novo valor da tensão máxima que pode ser entregue ao alto-falante. Assim,

$$V_{\text{maxnovo}} = N_{\text{novo}} (V_{\text{inc}}(n) - V_{\text{inc}}(n-1)) + V_{\text{inc}}(n). \quad (41)$$

Com o novo valor da tensão máxima que pode ser entregue ao alto-falante, calcula-se o novo coeficiente angular, que irá resultar em um novo fator de ganho.

$$a_{\text{novo}} = \frac{d_{\text{max}} - d(n)}{V_{\text{maxnovo}} - V_{\text{inc}}(n)}, \quad (42)$$

e

$$G(n) = G(n-1) \frac{a_{\text{novo}}}{a}. \quad (43)$$

Para demonstrar o funcionamento do sistema preditivo de controle de deslocamento do cone, foram feitas simulações usando-se o modelo do deslocamento do cone do alto-falante em um *baffle* infinito apresentado no Capítulo 3, e os dados usados nas simulações, obtidos através do catálogo do fornecedor (Apêndice B) [22], foram os de um alto-falante profissional típico de 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 $S_d = 0,0814 \text{ m}^2$ e fator de qualidade total $Q_{ts} = 0,33$,

considerando-se um deslocamento máximo do cone de $d_{\max} = 12 \text{ mm}$ e um número mínimo de iterações $N_{\text{def}} = 20$.

Os resultados de simulação do sistema preditivo de controle de deslocamento do cone são mostrados através dos gráficos apresentados a seguir. Primeiramente, desconsiderando-se o controle, tem-se a curva de deslocamento do cone (Figura 29), a curva da potência instantânea entregue ao alto-falante (Figura 30), a curva da tensão de entrada (Figura 31) e a curva do deslocamento em função da potência entregue ao alto-falante (Figura 32). Então, considerando-se a atuação do sistema de controle preditivo, tem-se a curva do deslocamento do cone (Figura 33), a curva da potência instantânea entregue ao alto-falante (Figura 34), a curva da tensão de entrada (Figura 35), a curva do deslocamento em função da potência entregue ao alto-falante (Figura 36) e a curva do fator de ganho (Figura 37).

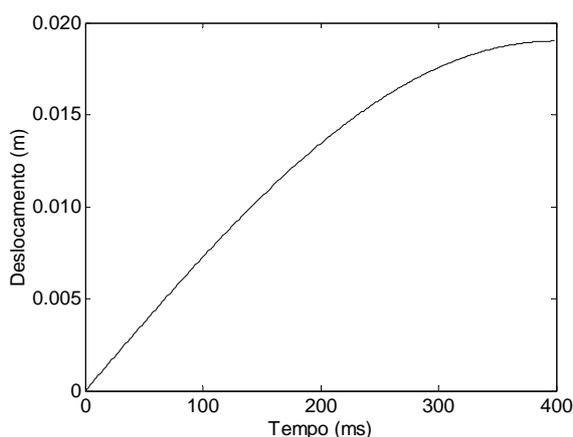


Figura 29. Curva do deslocamento do cone desconsiderando o sistema preditivo de controle.

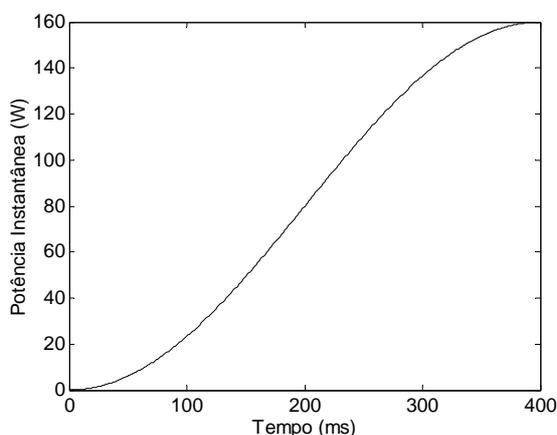


Figura 30. Curva da potência entregue ao alto-falante desconsiderando o sistema preditivo de controle.

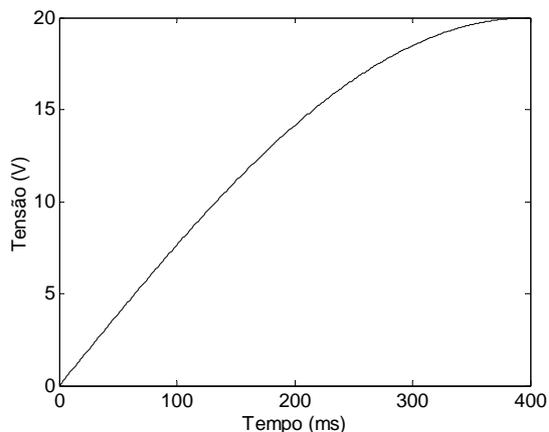


Figura 31. Curva da tensão de entrada desconsiderando o sistema preditivo de controle.

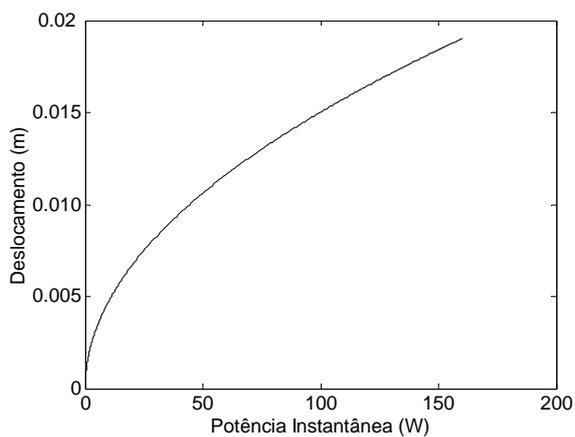


Figura 32. Curva do deslocamento do cone em função da potência instantânea entregue ao alto-falante desconsiderando o sistema preditivo de controle.

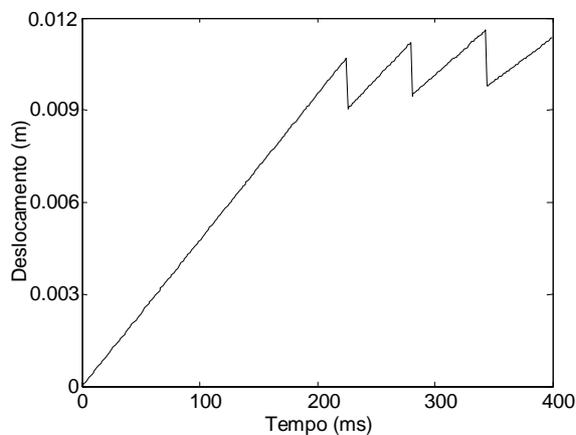


Figura 33. Curva do deslocamento do cone com atuação do sistema preditivo de controle.

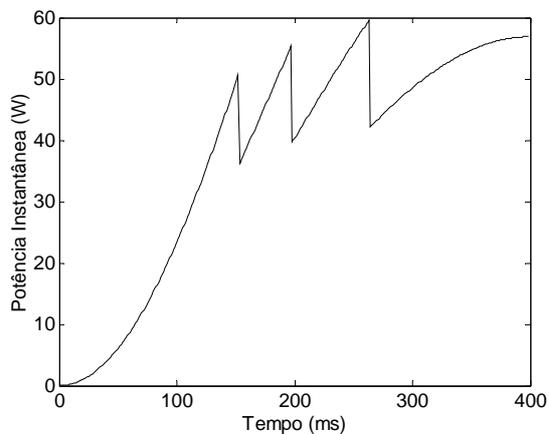


Figura 34. Curva da potência entregue ao alto-falante com a atuação do sistema preditivo de controle.

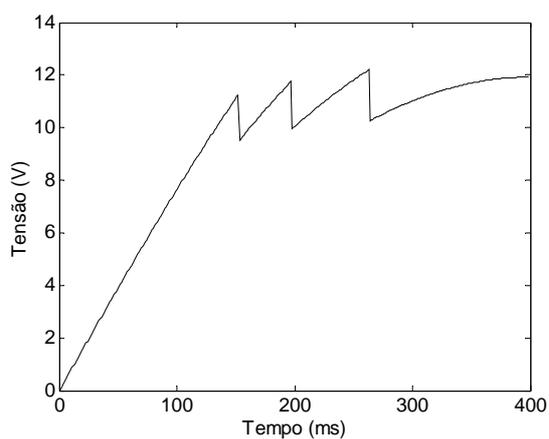


Figura 35. Curva da tensão de entrada com a atuação do sistema preditivo de controle.

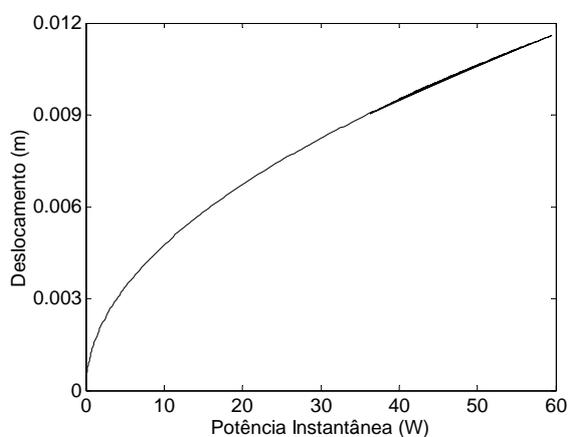


Figura 36. Curva do deslocamento do cone em função da potência instantânea entregue ao alto-falante com a atuação do sistema preditivo de controle.

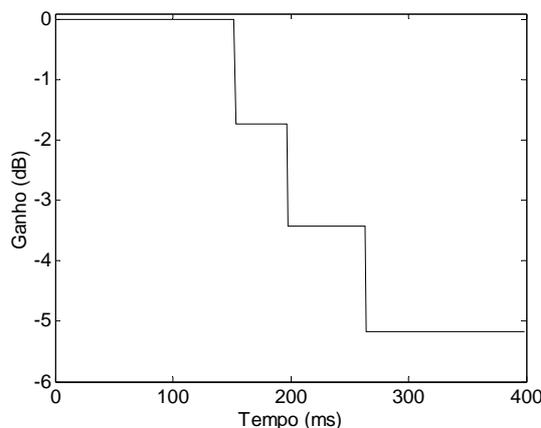


Figura 37. Curva do fator de ganho do sistema preditivo de controle.

O insucesso do controle preditivo para atuar sobre deslocamento do cone deve-se ao fato de o fator de ganho apresentar descontinuidades no instante em que o controle atua e altera o coeficiente angular, como pode ser observado através da Figura 37. Tais descontinuidades geram uma brusca variação do sinal aplicado ao alto-falante (Figura 35) e conseqüentemente uma grande variação do deslocamento (Figura 33), sendo perceptível auditivamente e podendo até danificar o alto-falante.

4.2.3 Controle Adaptativo

Uma outra abordagem avaliada foi o controle adaptativo de deslocamento do cone. Tal controle é realizado através de um fator de ganho variável, que é função da média do deslocamento, para um determinado número de iterações, e do deslocamento máximo do cone, esse último fornecido pelo fabricante. O referido ganho modifica o nível do sinal de áudio na entrada do alto-falante [expressão (44)], controlando, assim, o deslocamento do cone.

A Figura 38 mostra o diagrama de bloco simplificado do controle adaptativo do deslocamento do cone. Nesta estrutura, C denota o controle adaptativo de deslocamento do cone d , μ é o valor médio do deslocamento para um determinado número de iterações, V_{in} representa a tensão de entrada e V_{inc} , a tensão de entrada controlada.

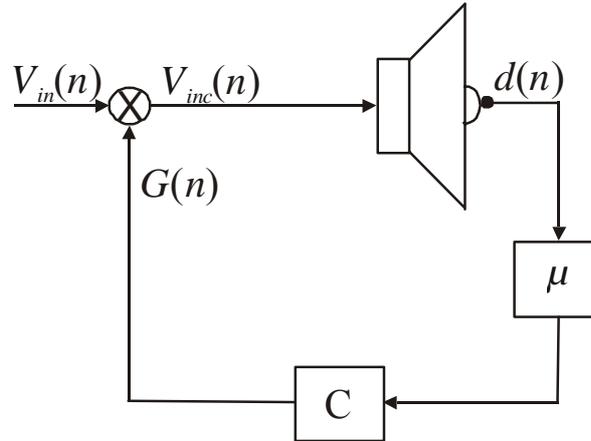


Figura 38. Diagrama de bloco do controle adaptativo do deslocamento do cone.

$$V_{inc}(n) = G(n)V_{in}(n), \quad (44)$$

onde $G(n)$ representa o ganho no instante atual, considerando-se uma condição inicial $G(0)|_{dB} = 0$ dB.

O controle adaptativo de deslocamento atua somente quando a média do deslocamento do cone for maior do que um predefinido limiar inferior de deslocamento d_0 , onde d_0 é dependente do deslocamento máximo d_{max} e definido na fase de projeto do sistema de controle. A média do deslocamento do cone para N iterações é definida por

$$\mu(n) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} d(n-j) = \frac{1}{N} d(n) + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-1} d(n-j), \quad (45)$$

onde,

$$\sum_{j=1}^{N-1} d(n-j) \approx (N-1)\mu(n-1). \quad (46)$$

Substituindo-se (46) em (45), tem-se

$$\mu(n) \cong \frac{1}{N} d(n) + \frac{(N-1)}{N} \mu(n-1). \quad (47)$$

Rearranjando-se (47), obtém-se a expressão final para o cálculo da média do deslocamento do cone. Assim,

$$\mu(n) = \mu(n-1) + \frac{1}{N} [d(n) - \mu(n-1)]. \quad (48)$$

A expressão do fator de ganho é definida em função do ganho inicial G_0 , do predefinido limiar inferior de deslocamento d_0 , deslocamento máximo d_{\max} e da média do deslocamento do cone. Então,

$$G(n) = G_0 - A(n)[\mu(n) - d_0], \quad (49)$$

com $A(n) = 0$ para o instante inicial e para os instantes em que a média do deslocamento do cone for menor do que o limiar d_0 . Para os instantes em que a média do deslocamento do cone for igual ou maior do que o limiar d_0 , tem-se

$$A(n) = a^{\left(\frac{\mu(n)}{d_{\max}}\right)}, \quad (50)$$

onde

$$a = \frac{\left(G_0 - \frac{d_{\max}}{V_{\max}}\right)}{d_{\max} - d_0}. \quad (51)$$

Para mostrar o funcionamento do sistema adaptativo de controle de deslocamento do cone, foram feitas simulações usando-se o modelo do deslocamento do cone do alto-falante em um *baffle* infinito apresentado no Capítulo 3, com os dados do alto-falante usados nas simulações anteriores. O limite de deslocamento para atuar o controle é $d_0 = 9 \text{ mm}$, o ganho inicial é $G_0|_{\text{dB}} = 0 \text{ dB}$ e o número de iterações para calcular a média $N = 12$.

Os resultados de simulação desta técnica são mostrados através dos gráficos apresentados a seguir. Primeiramente, na ausência de atuação de controle, tem-se a curva do deslocamento do cone (Figura 39), a curva da potência instantânea entregue ao alto-falante (Figura 40) e a curva da tensão de entrada (Figura 41). Então, considerando-se a atuação do sistema de controle, tem-se a curva do deslocamento do cone (Figura 42), a curva da potência instantânea entregue ao alto-falante (Figura 43), a curva da tensão de entrada (Figura 44) e a curva do fator de ganho (Figura 45).

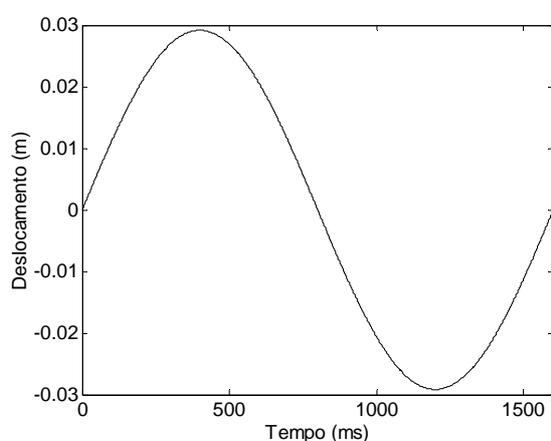


Figura 39. Curva do deslocamento do cone desconsiderando o sistema adaptativo de controle.

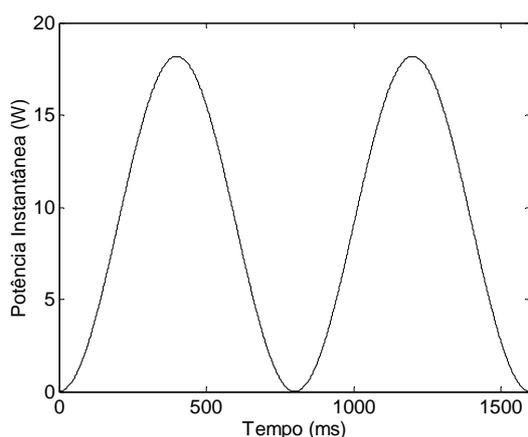


Figura 40. Curva da potência instantânea entregue ao alto-falante desconsiderando o sistema adaptativo de controle.

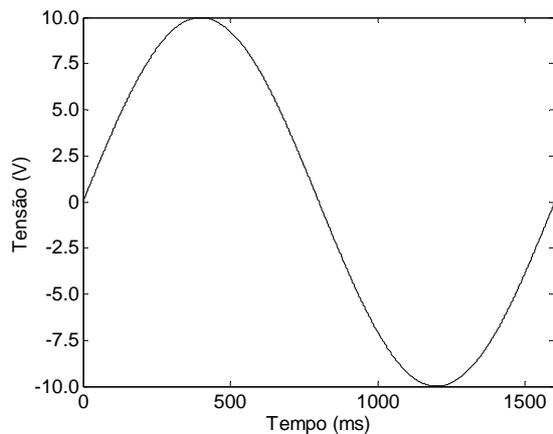


Figura 41. Curva do sinal de entrada desconsiderando o sistema adaptativo de controle.

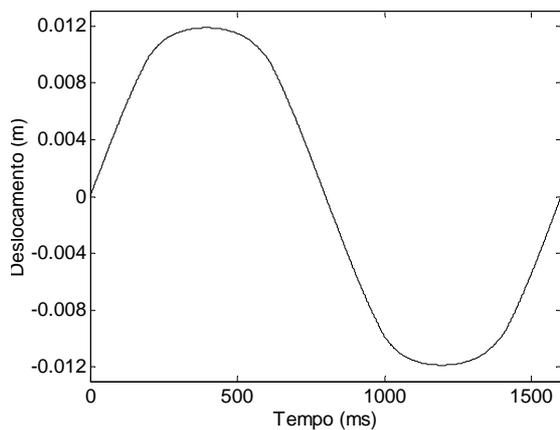


Figura 42. Curva do deslocamento do cone com a atuação do sistema adaptativo de controle.

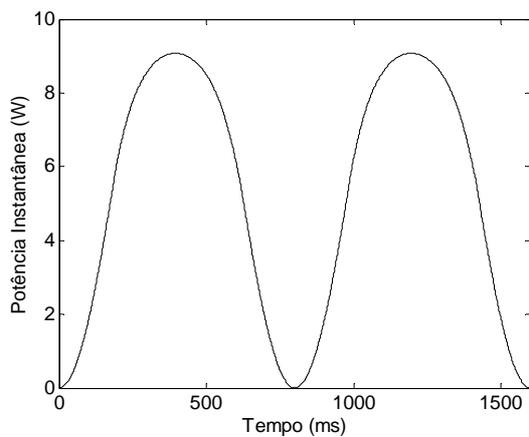


Figura 43. Curva da potência instantânea entregue ao alto-falante com a atuação do sistema adaptativo de controle.

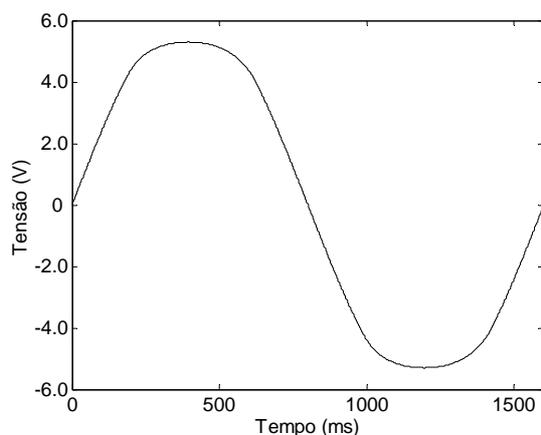


Figura 44. Curva do sinal de entrada com a atuação do sistema adaptativo de controle.

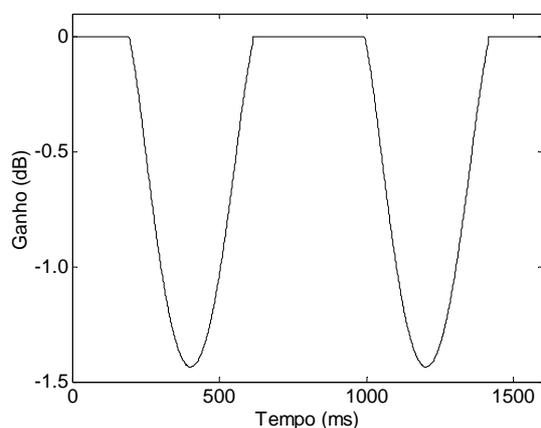


Figura 45. Curva do fator de ganho do sistema adaptativo de controle.

Essa estratégia de controle de deslocamento do cone é altamente dependente da fase do sinal fornecido ao alto-falante como também da fase do sinal do deslocamento do cone medido pelo acelerômetro. Caso esses sinais estejam defasados entre si, o controle adaptativo não será eficiente, pois não irá atuar no instante devido. Assim, poderá ocorrer o excessivo deslocamento do cone, danificando o alto-falante. Note-se que o controle deve atuar antes que ocorra qualquer dano no alto-falante.

Para ilustrar o problema discutido anteriormente, foi realizada uma simulação da atuação do sistema de controle adaptativo considerando-se os mesmos dados da simulação anterior, porém agora com defasagem entre o sinal entregue ao alto-falante e o sinal do deslocamento medido. A Figura 46 mostra a curva resultante do deslocamento do cone, a curva resultante da potência instantânea entregue ao alto-falante é representada pela Figura 47 e a curva resultante da tensão de entrada, pela Figura 48. Através dessas figuras,

constata-se que o sistema de controle não atuou corretamente, permitindo que o deslocamento do cone fosse maior do que o deslocamento máximo $d_{\max} = 12 \text{ mm}$.

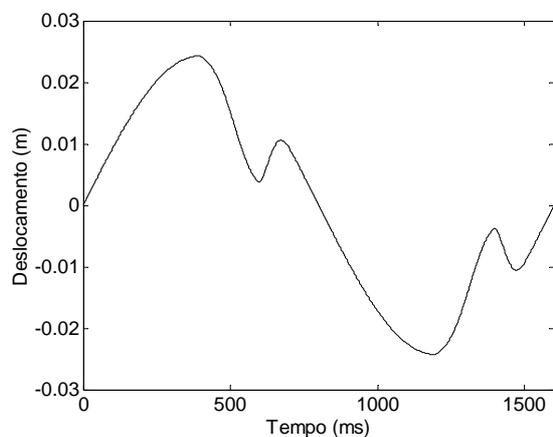


Figura 46. Curva resultante do deslocamento do cone com a atuação do sistema adaptativo de controle com defasagem entre os sinais de tensão e deslocamento do cone.

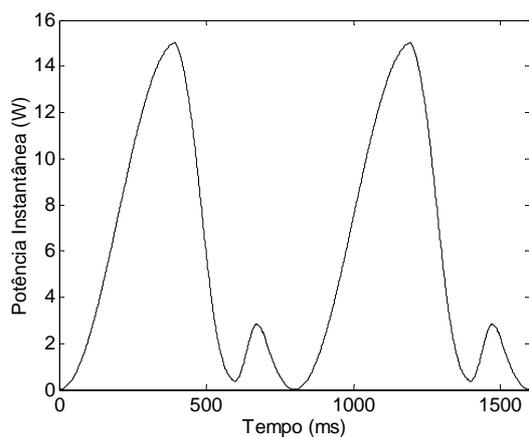


Figura 47. Curva resultante da potência instantânea entregue ao alto-falante com a atuação do sistema adaptativo de controle com defasagem entre os sinais de tensão e deslocamento do cone.

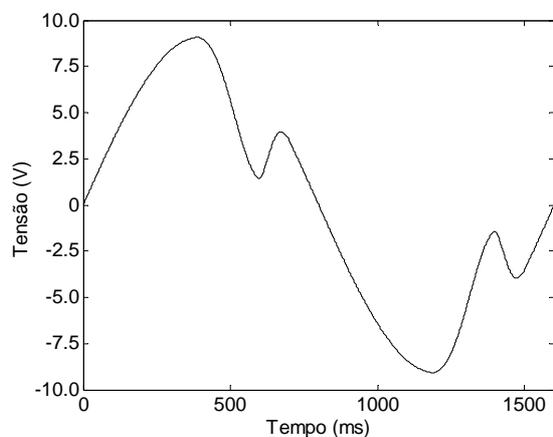


Figura 48. Curva resultante do sinal de entrada da atuação do sistema adaptativo de controle com defasagem entre os sinais de tensão e deslocamento do cone.

4.3 Conclusões

Neste capítulo, discutiu-se a abordagem inicial testada para o controle de temperatura da bobina e as abordagens inicialmente testadas de controle do deslocamento do cone: *hard control*, controle preditivo e controle adaptativo. O insucesso da abordagem inicial de controle de temperatura e das abordagens *hard control* e controle preditivo do deslocamento do cone foi devido ao fato da atuação dos sistemas de controle alterarem as característica do sinal fornecido ao alto-falante e gerarem uma brusca variação da potência fornecida ao alto-falante e, conseqüentemente, resultando em uma variação da pressão sonora, que é perceptível auditivamente. A abordagem inicial de controle adaptativo do deslocamento do cone foi ineficaz devido ao fato de que quando o sinal fornecido ao alto-falante estava defasado do sinal medido de deslocamento do cone, o controle não atuava no instante devido. Com as características da impedância do alto-falante (Capítulo 2), da temperatura da bobina e do deslocamento do cone do alto-falante (Capítulo 3), e com o conhecimento dos pontos falhos das abordagens iniciais de controle apontados neste capítulo, pode-se agora descrever as abordagens usadas de controle de temperatura da bobina e do deslocamento do cone, que são os assuntos do Capítulo 5 e Capítulo 6, respectivamente.

Sistema de Controle da Temperatura da Bobina – Abordagem Usada

Como mencionado anteriormente, devido à dinâmica do processo envolvido, as etapas de aquisição e controle de temperatura são efetuadas simultaneamente (*on-line*). Utiliza-se a taxa de variação da resistência da bobina, para corrente contínua (CC), com respeito à temperatura para calcular a temperatura da bobina, expressão (20). Tal informação é usada para controlar a potência elétrica entregue ao alto-falante. Essa estratégia é detalhada a seguir.

5.1 Aquisição da Temperatura

Devido à impossibilidade da operação com sinais CC no sistema de conversão A/D usado (neste caso), realizou-se a medição da tensão e corrente usando um valor de frequência diferente de zero. Selecionou-se um valor de frequência para o qual a magnitude da impedância da bobina possa ser considerada como sendo sua resistência CC R_E [11], [18], [20] (ver Figuras 7 e 9). Nessa implementação, excitou-se o alto-falante com o sinal original somado com um sinal senoidal de baixa frequência (~ 5 Hz). A Figura 49 ilustra o esquema utilizado para a medição de tensão e corrente nos terminais do alto-falante.

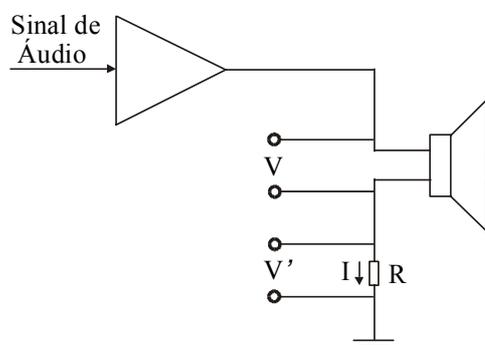


Figura. 49. Esquema para determinar a tensão e a corrente nos terminais do alto-falante.

5.2 Controle da Temperatura da Bobina

O controle da temperatura é efetuado através de um fator de ganho, que tem característica inversa similar à variação no tempo da temperatura da bobina. Tal ganho modifica o nível do sinal de áudio na entrada do alto-falante [21].

A Figura 50 mostra o diagrama 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.

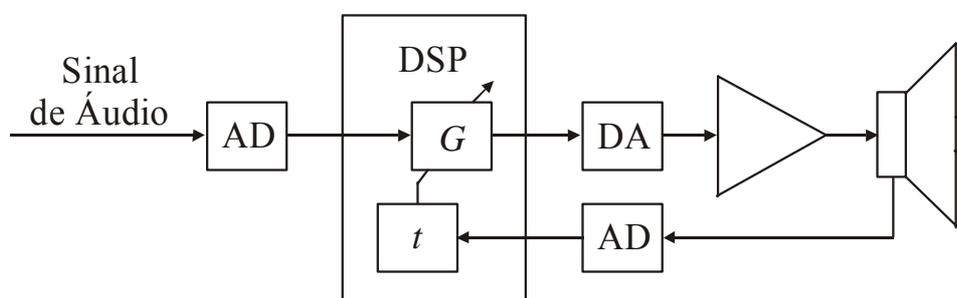


Figura 50. Diagrama do controle de temperatura da bobina do alto-falante.

Um exemplo ilustrativo da característica de variação da temperatura da bobina considerando o controle de temperatura é mostrado na Figura 51. A Figura 52 ilustra a respectiva característica de ganho controlado pela temperatura conforme Figura 51.

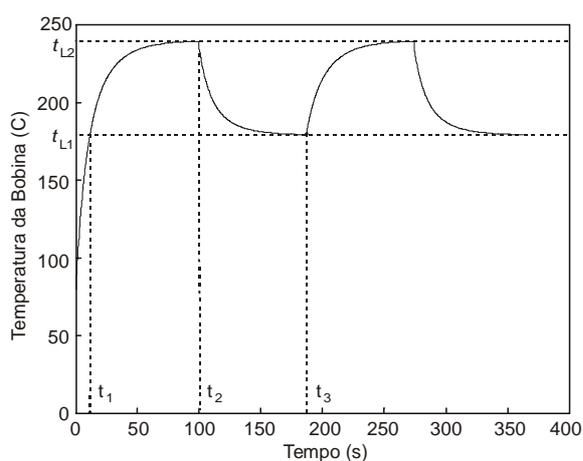


Figura 51. Esboço de curva de variação da temperatura da bobina com a atuação do controle de temperatura.

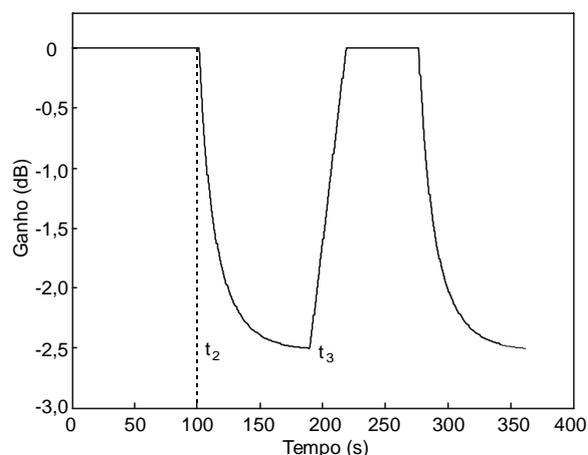


Figura 52. Curva de ganho de controle da temperatura conforme Figura 51.

Através da Figura 51 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_{L1} no instante t_1 . Mantida a potência, mede-se a temperatura t_{L2} no instante t_2 , que é maior do que t_{L1} . Agora, considerando t_{L1} e t_{L2} 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_{L2} , a redução de temperatura se inicia, decrescendo a temperatura para o nível t_{L1} , no instante t_3 . Nesse instante, o controle é desativado e o processo de aumento da temperatura é reiniciado; e assim, um novo ciclo inicia (ver Figura 51). As temperaturas t_{L1} e t_{L2} são determinadas na fase de projeto do sistema de controle, sendo $t_{L1} < t_{L2}$. A temperatura t_{L2} é dependente da temperatura máxima da bobina, geralmente fornecida pelo fabricante do alto-falante. A Figura 52 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_{L1} , os valores de temperatura em instantes sucessivos de tempo, entre t_{L1} e t_{L2} , são armazenados (N amostras de temperatura). Tais valores representam a curva de temperatura no tempo de t_{L1} até t_{L2} . Através desse resultado, uma curva de ganho *versus* tempo pode ser obtida. Tal curva deve ter uma característica inversa à 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_{L2} até t_{L1} , a curva de ganho é modelada por (52). Desse momento em diante, sempre de t_{L1} até t_{L2} , o fator de ganho deve sofrer acréscimos gradativos até o instante em que o seu valor seja 0 dB ou a temperatura da bobina seja igual a t_{L2} (ver Figura 52).

$$G(n)_{\text{dB}} = 10 \log \frac{t_s(0)}{t_s(n)}, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (52)$$

Onde $G(n)$ representa o ganho entre t_{L2} e t_{L1} ; $t_s(n)$ e $t_s(0)$ denotam a temperatura armazenada no instante atual e inicial, respectivamente. Em (52), é usado como temperatura inicial $t_s(0) = t_1(0)$.

5.3 Conclusões

Neste capítulo apresentou-se a abordagem usada do sistema de controle de temperatura da bobina, descrevendo-se o processo de aquisição da temperatura e o controle propriamente dito da temperatura da bobina. Observa-se que na abordagem usada às características do alto-falante foram consideradas, e essa abordagem difere-se em relação à abordagem inicial de controle de temperatura (Seção 4.1) apenas quanto à concepção do fator de ganho. Uma vez que, no caso da abordagem usada, a partir do instante no qual o controle passou a não mais atuar, o fator de ganho sofreu acréscimos gradativos até o instante em que o seu valor é 0 dB ou a temperatura da bobina é igual a temperatura limiar superior. Dessa forma, não mais ocorreu descontinuidade no fator de ganho e, conseqüentemente, a atuação do controle não mais gerou grande variação instantânea da potência fornecida ao alto-falante. No próximo capítulo apresentar-se-á a abordagem usada do sistema de controle do deslocamento do cone.

Sistema de Controle do Deslocamento do Cone – Abordagem Usada

Como mencionado anteriormente, devido à dinâmica do processo em questão, a estratégia aqui adotada realizará um controle de deslocamento preventivo, pois o controle deve atuar antes que ocorra qualquer dano no alto-falante. Com isso, o processo de controle de deslocamento do cone é efetuado em duas etapas distintas:

- i) fase de aquisição dos parâmetros;
- ii) controle de deslocamento através de uma regra de compressão *ad-hoc* e monitoração do referido deslocamento.

6.1 Aquisição de Dados

Essa 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, consideram-se dois valores de deslocamento *versus* amplitude:

- a) nível do sinal de entrada L_1 , o qual corresponde ao deslocamento x_1 que resulta em uma distorção harmônica de 10 %;
- b) nível do sinal de entrada L_2 , correspondente ao deslocamento equivalente x_2 igual a 80 % do deslocamento máximo (acima do qual tem-se danos irreversíveis no alto-falante).

Notar 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 obtida é convertido em deslocamento.

O esquema usado para a aquisição dos parâmetros L_1 e L_2 ($L_1 \rightarrow x_1$, e $L_2 \rightarrow x_2$) é ilustrado pela Figura 53.

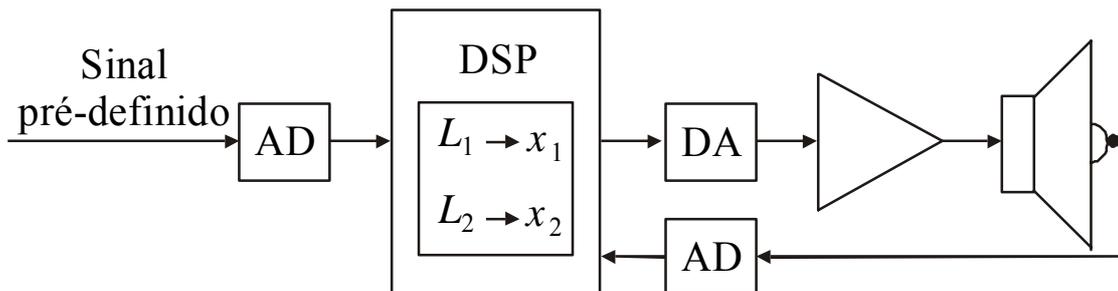


Figura 53. Diagrama básico para aquisição dos parâmetros.

Na Figura 53, os parâmetros x_1 e x_2 são os deslocamentos correspondentes aos níveis L_1 e L_2 , respectivamente.

6.2 Controle e Monitoração do Deslocamento do Cone

A Figura 54 ilustra o diagrama básico de controle e monitoração do deslocamento do cone. Nessa figura, C caracteriza a regra de compressão usada (62), que é uma função dos parâmetros L_1 e L_2 obtidos na fase de aquisição de dados.

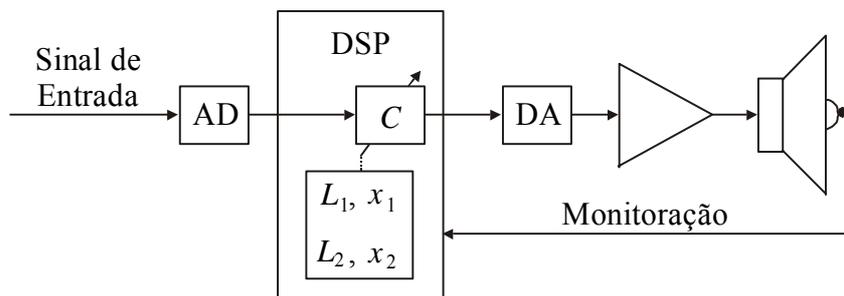


Figura 54. Diagrama básico do controle do deslocamento do cone do alto-falante.

A regra de compressão não pode gerar distorções no sinal de áudio. Ela só deve atuar quando o nível do sinal de entrada for maior do que o nível L_1 e o máximo nível permitido do sinal de saída deve ser igual ao nível L_2 .

As características desejadas, baixo nível de distorção, sinal de saída igual ao sinal de entrada para níveis menores ou iguais a L_1 e máximo nível do sinal de saída igual a L_2 , estão melhores representadas pela regra de compressão (53)

$$s_o(n) = a \tan^{-1}[bs_i(n)], \quad (53)$$

onde $s_i(n)$ e $s_o(n)$ representam, respectivamente, os sinais de entrada e de saída da regra de compressão, a e b são os parâmetros que definem o fator e a característica de compressão.

A Figura 55 ilustra a aplicação da regra de compressão (53) para um sinal de entrada senoidal de 5 kHz normalizado em amplitude e considerando uma compressão de 25% para o máximo nível do sinal de entrada.

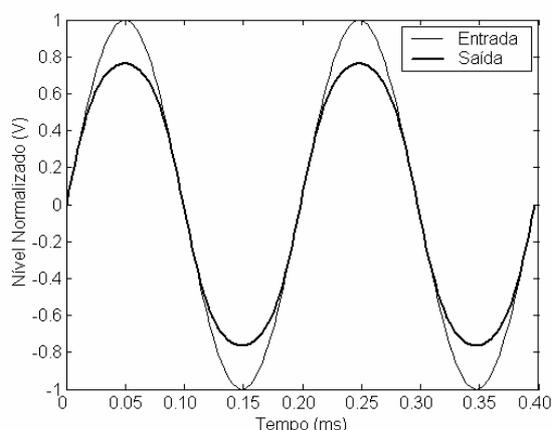


Figura 55. Compressão por um fator de 25% para o máximo nível do sinal de entrada.

Para fazer a análise do comportamento da regra de compressão (53) em relação à distorção, os sinais de entrada e de saída da Figura 55 são decompostos nos seus componentes de frequência e suas respectivas amplitudes, através da transformada de Fourier. Obviamente, a distorção do sinal gera o aparecimento de novos componentes em frequência. Assim, um sinal distorcido terá os seus componentes em frequência originais mais os componentes em frequência gerados pela distorção. E quanto menores forem as amplitudes desses componentes em frequência, menor será o nível da distorção.

As Figuras 56 e 57 mostram a transformada de Fourier do sinal de entrada e de saída da Figura 55, respectivamente.

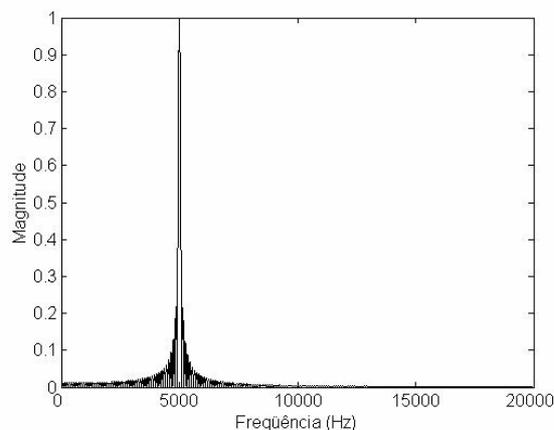


Figura 56. Transformada de Fourier do sinal de entrada.

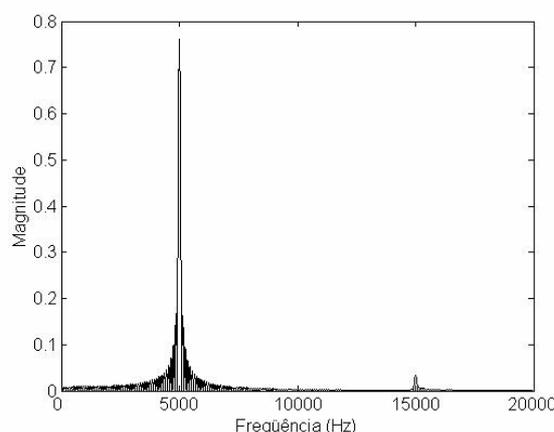


Figura 57. Transformada de Fourier do sinal de saída.

Analisando-se a Figura 56 e a Figura 57 nota-se que a amplitude do novo componente em frequência de 15 kHz é muito pequena em relação à amplitude do componente em frequência original, comprovando-se que essa regra de compressão gera um baixo nível de distorção.

Para que a condição de máximo nível de saída L_2 seja respeitada é necessário que quando a $\tan^{-1}[bs_i(n)]$ de (53) tenha o seu máximo valor,

$$\tan^{-1}[bs_i(n)] = \frac{\pi}{2}, \quad (54)$$

o sinal de saída da regra de compressão seja,

$$s_o(n) = L_2. \quad (55)$$

Substituindo-se as expressões (54) e (55) em (53), tem-se

$$L_2 = \frac{a\pi}{2}, \quad (56)$$

de onde pode-se obter o parâmetro a

$$a = \frac{2L_2}{\pi}. \quad (57)$$

Para respeitar a condição do sinal de saída igual ao sinal de entrada para níveis de sinais de entrada menores ou iguais a L_1 , é necessário que quando

$$s_i(n) = L_1, \quad (58)$$

o sinal de saída da regra de compressão seja

$$s_o(n) = L_1, \quad (59)$$

e substituindo-se (57), (58) e (59) em (53), tem-se

$$L_1 = \frac{2L_2}{\pi} \tan^{-1}[bL_1], \quad (60)$$

de onde pode-se obter o parâmetro b .

$$b = \frac{1}{L_1} \tan\left(\frac{L_1}{L_2} \frac{2}{\pi}\right). \quad (61)$$

Finalmente, substituindo-se os parâmetros a e b obtidos por (57) e (61) em (53), tem-se a expressão da regra de compressão.

$$s_o(n) = \frac{2L_2}{\pi} \tan^{-1}\left[\frac{s_i(n)}{L_1} \tan\left(\frac{\pi L_1}{2L_2}\right)\right]. \quad (62)$$

Neste 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 ao 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 (62), previne-se qualquer deslocamento do cone que exceda o previamente estabelecido.

6.3 Conclusões

Neste capítulo foi mostrada a abordagem proposta para o controle do deslocamento do cone. Foram descritas a fase de aquisição de dados e a fase de monitoração e controle propriamente dito do deslocamento do cone. Observa-se que em tal abordagem foram consideradas as características do alto-falante e, diferentemente das abordagens iniciais, a abordagem usada do sistema de controle é preventiva e foi realizada em duas etapas distintas. O deslocamento foi controlado através de uma regra de compressão que atuou sobre o sinal fornecido ao alto-falante. Tal regra é função dos parâmetros obtidos previamente na fase de aquisição de dados. Conhecidas as abordagens usadas para o controle de temperatura da bobina e do deslocamento do cone, no próximo capítulo, serão apresentados os resultados simulados para essas abordagens.

Resultados de Simulação

Neste trabalho, as simulações das técnicas usadas do controle de temperatura da bobina e do deslocamento do cone foram realizadas no ambiente MATLAB.

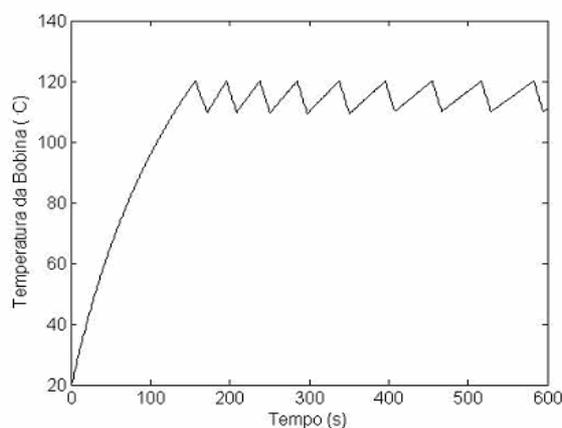
Na fase de simulação, usou-se um nível de sinal de entrada constante e maior que L_1 . Considerou-se também o modelo térmico do alto-falante [2] e o modelo de deslocamento do cone apresentado no Capítulo 3.

Os dados usados para o alto-falante nas simulações são os mesmos considerados no Capítulo 4. O coeficiente térmico do fio da bobina e a resistência CC para a temperatura ambiente $t_A = 25\text{ C}$ são respectivamente $\alpha_{25} = 0,0039\text{ C}^{-1}$ e $R_E = 5,5\ \Omega$. O coeficiente da resistência de perdas é $K_{rm} = 13,621\text{ m}\Omega$; o coeficiente da indutância da bobina, $K_{xm} = 160,686\text{ mH}$; o expoente da resistência de perdas da bobina, $E_{rm} = 0,754$; o expoente da indutância da bobina, $E_{xm} = 0,508$; o fator de força, $B\ell = 20,8\text{ Tm}$; a frequência de ressonância, $f_s = 36\text{ Hz}$; a compliância mecânica, $C_{ms} = 167,1\ \mu\text{m/N}$; o fator de qualidade mecânico, $Q_{ms} = 12,78$; a área efetiva do cone, $S_d = 0,0814\text{ m}^2$; o fator de qualidade total, $Q_{ts} = 0,33$. O deslocamento máximo do cone é de 12 mm e as temperaturas limiares são $t_{L1} = 110\text{ C}$ e $t_{L2} = 120\text{ C}$. A frequência do sinal senoidal de teste usado para a medida do deslocamento do cone é $f_{mcd} = 25\text{ Hz}$, 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.

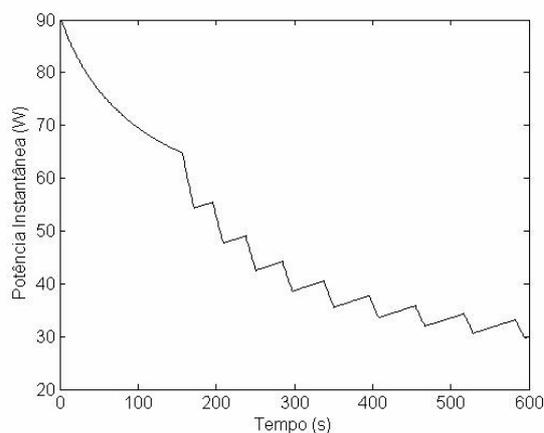
7.1 Controle da Temperatura da Bobina

A Figura 58 ilustra as características de operação considerando apenas o controle da temperatura da bobina. De acordo com os parâmetros adotados no exemplo, a Figura 58(a) mostra a curva de temperatura da bobina em função do tempo. Através desse resultado, verifica-se a atuação do controle no fator de ganho do sistema, mantendo a temperatura

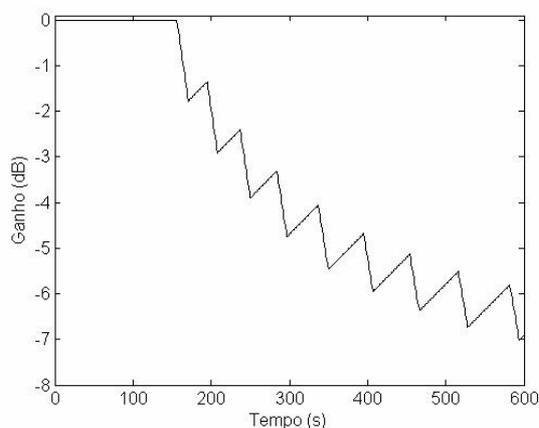
entre os dois valores predefinidos. As Figuras 58(b) e (c) ilustram, respectivamente, as curvas de potência instantânea e o fator de ganho em função do tempo. Os resultados obtidos estão de acordo com os esperados, evidenciando a adequada atuação do estágio de controle.



(a)



(b)

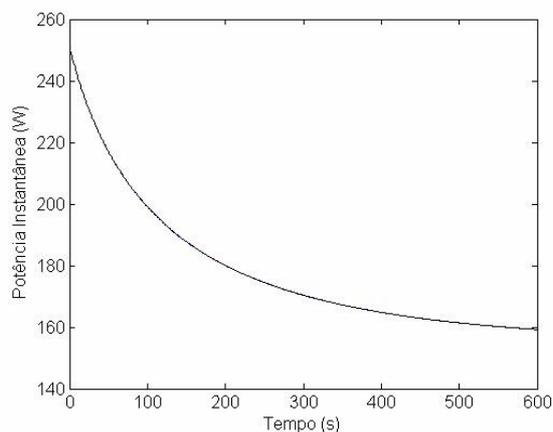


(c)

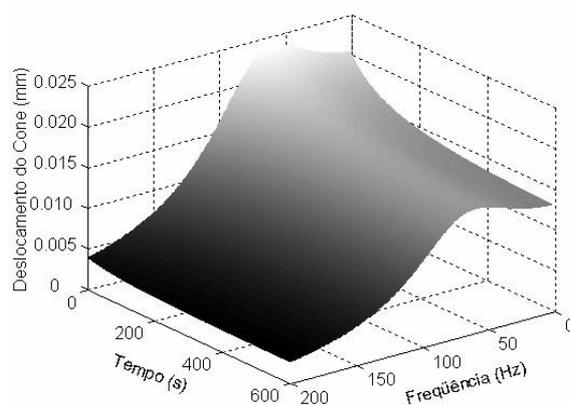
Figura 58. Controle de temperatura. (a) Curva da temperatura da bobina. (b) Curva da potência instantânea. (c) Curva do fator de ganho.

7.2 Controle do Deslocamento do Cone

As Figuras 59 e 60 mostram, respectivamente, os resultados para um sistema de potência de áudio sem e com o controle do deslocamento do cone. A Figura 59(a) mostra a curva da potência instantânea sem controle, e a Figura 60(a), quando o controle do deslocamento é considerado. Pode-se notar claramente a mudança no nível de potência instantânea da Figura 60(a), em comparação com a da Figura 59(a). As Figuras 59(b) e 60(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.

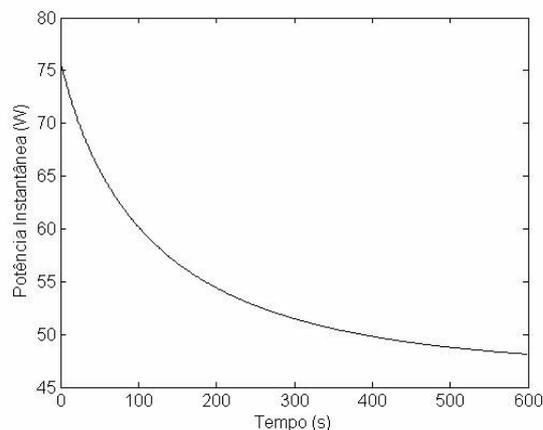


(a)

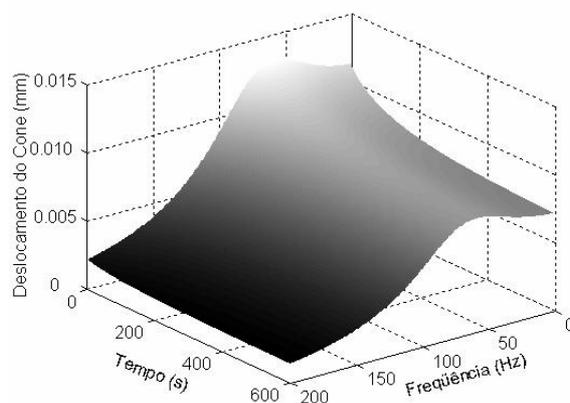


(b)

Figura 59. Sistema sem controle. (a) Curva da potência instantânea. (b) Curva do deslocamento do cone versus tempo e frequência.



(a)



(b)

Figura 60. Sistema com controle. (a) Curva da potência instantânea. (b) Curva do deslocamento do cone *versus* tempo e frequência.

7.3 Atuação Conjunta do Controle de Temperatura da Bobina e de Deslocamento do Cone

Finalmente, na Figura 61, considerando tempo e frequência, é apresentado 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 que mostram a correta atuação dos estágios de controle em conjunto, mantendo a temperatura da bobina e o deslocamento do cone sempre dentro dos respectivos limites previamente definidos. A Figura 61(a) representa a curva de potência instantânea entregue ao alto-falante e as Figuras 61(b) e (c) ilustram, respectivamente, as curvas de temperatura da bobina *versus* tempo e frequência, e do deslocamento do cone *versus* tempo e

freqüência. Através dessas figuras pode-se observar o acoplamento existente entre as duas estratégias de controle, quando trabalham simultaneamente.

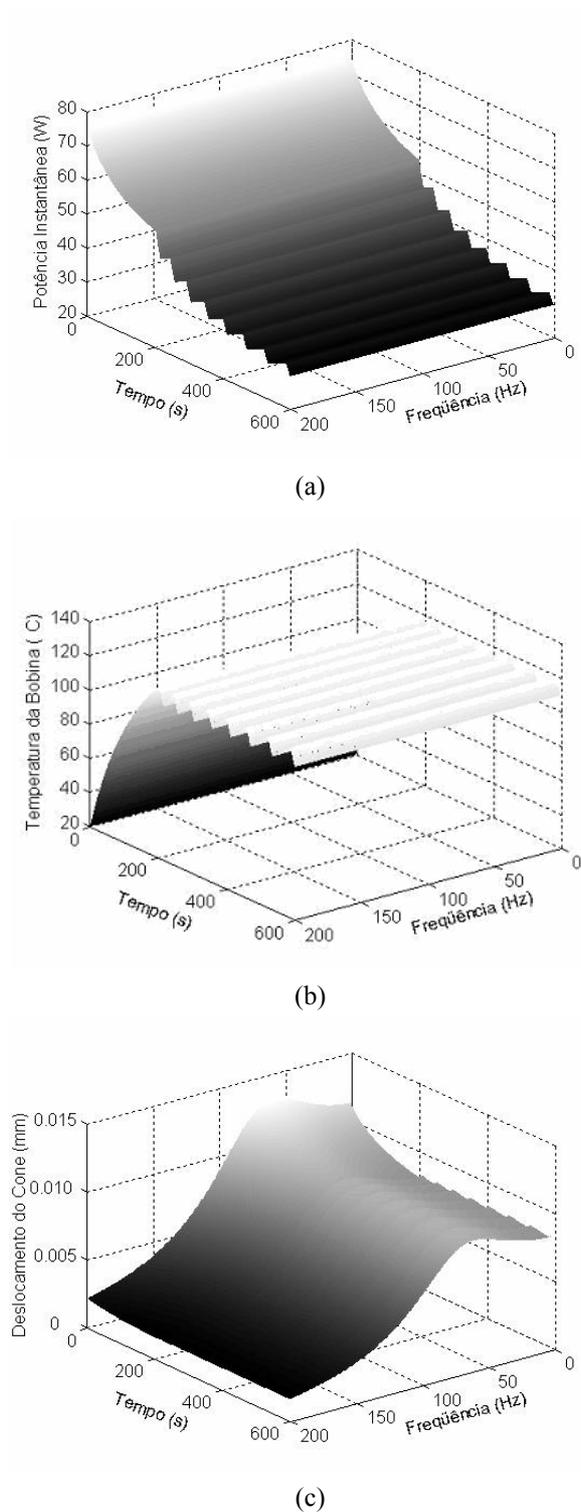


Figura 61. Controle simultâneo de temperatura e deslocamento. (a) Curva da potência instantânea controlada. (b) Curva da temperatura da bobina *versus* tempo e freqüência. (c) Curva do deslocamento do cone *versus* tempo e freqüência.

Comparando-se a Figura 61(a) com as Figuras 58(b) e 60(a), pode-se notar que o controle de deslocamento atuou antes do controle de temperatura, visto que, desde o início, existe uma redução do nível de potência instantânea entregue ao alto-falante. Com tal redução a temperatura da bobina passa a ser diretamente dependente da potência (pois o controle de deslocamento já está atuando), e o início da atuação do controle da temperatura será adiado em relação ao caso em que somente houver sua atuação. Porém, mesmo para essa circunstância não ocorre alteração do correto funcionamento do controle, como pode ser visto comparando-se as Figuras 58(a) e 61(b).

Através das Figuras 60(b) e 61(c) percebe-se que a atuação do controle da temperatura da bobina gera pequenas oscilações no deslocamento do cone, porém, também não altera o adequado funcionamento do controle do deslocamento.

7.4 Conclusões

Neste capítulo, mostram-se os resultados de simulação para a atuação em separado e em conjunto das abordagens usadas dos sistemas de controle de temperatura da bobina e do deslocamento do cone. Verifica-se através dos resultados simulados que tais abordagens mantiveram a temperatura e o deslocamento entre os valores predefinidos, sem gerar descontinuidades ou bruscas variações do sinal aplicado ao alto-falante, evidenciando a adequada atuação dos estágios de controle. No próximo capítulo serão apresentados os resultados experimentais para essas abordagens.

Resultados Experimentais

A implementação do sistema de controle seguiu as etapas, critérios e procedimentos para a aquisição dos dados, controle e monitoração descritos anteriormente. Inicialmente foi feita a implementação para o controle de temperatura e posteriormente para o controle de deslocamento, considerando todas as fases necessárias para cada tipo de controle.

Os equipamentos utilizados para a implementação do sistema foram:

- Amplificador de Áudio – STR – AV320 – Sony;
- Analisador de Sinal Digital – DSA601A – Tektronix;
- Osciloscópio Digital – 2232 - 100 MHz – Tektronix;
- Gerador de Função - CFG280 – Tektronix;
- Ambiente de desenvolvimento *Crosscore Development Tools 3.1* – Analog Devices;
- *Kit* de desenvolvimento ADSS – BF533 – EZ-KIT Lite – Analog Devices;
- Microcomputador – Athlon XP 2000–256 Mb RAM;
- Acelerômetro BK 4375 – Bruel & Kjaer;
- Amplificador de Carga BK 2635 – Bruel & Kjaer;
- Caixa Acústica Refletora de Graves composta de um Alto-falante *Subwoofer* – 16SW1P – Selenium, um *Driver* de Compressão – D3300Ti – Selenium e uma Corneta HL14-50– Selenium.

A Figura 62 ilustra o esquema de montagem dos equipamentos para a implementação do sistema de controle da temperatura da bobina e deslocamento do cone.

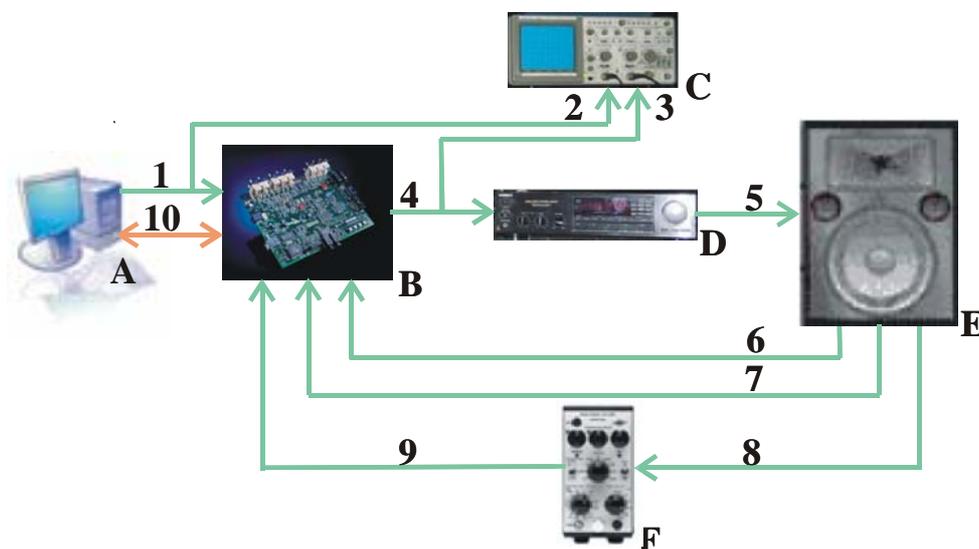


Figura 62. Esquema de montagem dos equipamentos para a implementação do sistema de controle de temperatura da bobina e deslocamento do cone.

Na Figura 62 **A** representa o microcomputador; **B** o *kit* de desenvolvimento ADSS – BF533; **C** o osciloscópio digital – 2232 ; **D** o amplificador de áudio STR-AV320; **E** o conjunto acelerômetro BK 4375 e caixa acústica refletora de graves e **F**, o amplificador de carga BK 2635.

As conexões da Figura 62 estão dispostas como segue:

- 1:** Conecta a saída de áudio do microcomputador ao canal de entrada do *kit* de desenvolvimento *ADC1_LEFT*;
- 2:** Conecta o canal de entrada do *kit* de desenvolvimento *ADC1_LEFT* ao canal esquerdo de entrada do osciloscópio;
- 3:** Conecta o canal de saída do *kit* de desenvolvimento *DAC1_LEFT* ao canal direito de entrada do osciloscópio;
- 4:** Conecta o canal de saída do *kit* de desenvolvimento *DAC1_LEFT* à entrada do amplificador de áudio;
- 5:** Conecta a saída do amplificador de áudio à caixa acústica;
- 6:** Conecta o sinal de corrente dos terminais do alto-falante ao canal de entrada do *kit* de desenvolvimento *ADC1_RIGHT*;
- 7:** Conecta o sinal de tensão dos terminais do alto-falante ao canal de entrada do *kit* de desenvolvimento *ADC2_LEFT*;

- 8:** Conecta o sinal de aceleração do cone proveniente do acelerômetro à entrada do amplificador de carga;
- 9:** Conecta a saída do amplificador de carga ao canal de entrada do *kit* de desenvolvimento *ADC2_RIGHT*;
- 10:** Caracteriza a conexão de comunicação de dados entre o computador e o *kit* de desenvolvimento.

A Figura 63 ilustra como está fixado o acelerômetro ao alto-falante. As Figuras 64 e 65 mostram a montagem dos equipamentos utilizados na implementação do sistema de controle na câmara anecóica e a Figura 66 o *kit* de desenvolvimento ADSS – BF533 – EZ-KIT Lite – Analog Devices utilizado.



Figura 63. A fixação do acelerômetro ao alto-falante.



Figura 64. Montagem dos equipamentos utilizados na implementação do sistema de controle.



Figura 65. Outra vista da montagem dos equipamentos utilizados.



Figura 66. Kit de desenvolvimento ADSS – BF533 – EZ-KIT Lite – Analog Devices.

O sistema de controle foi implementado utilizando-se o *kit* e o ambiente de desenvolvimento, citados anteriormente, um algoritmo implementado em linguagem C, o qual é transferido do ambiente para o *kit* de desenvolvimento através de uma interface USB do microcomputador.

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

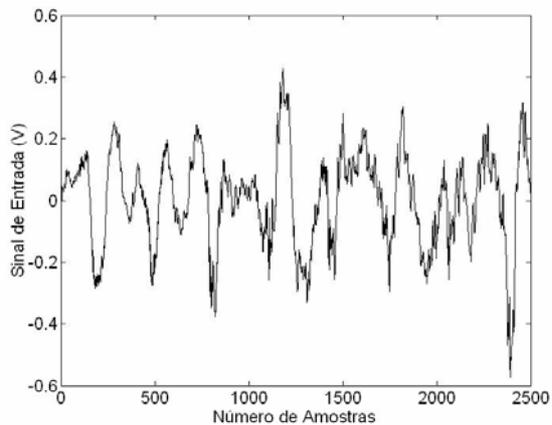
- Canal *ADC1_LEFT* → Sinal de entrada original ou sinal de teste, obtidos por computador e por um gerador de funções, respectivamente;
- Canal *ADC1_RIGHT* → Sinal de corrente dos terminais do alto-falante;
- Canal *ADC2_LEFT* → Sinal de tensão dos terminais do alto-falante;
- Canal *ADC2_RIGHT* → Sinal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

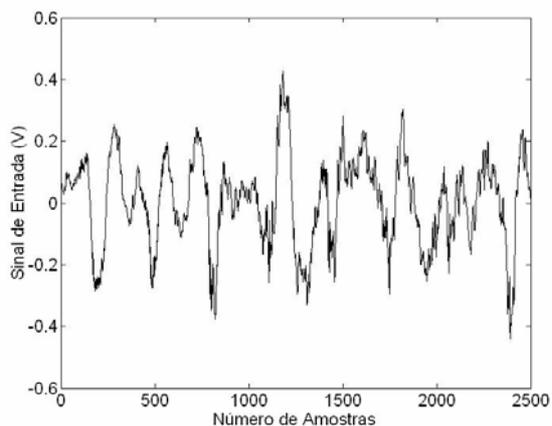
Durante o período de testes, um osciloscópio e um analisador de sinal foram utilizados para verificar e monitorar o funcionamento do sistema de controle, comparando as formas de onda dos sinais de entrada do canal *ADC1_LEFT* e de saída do canal *DAC1_LEFT*. Para garantir a integridade dos testes, eles foram realizados em uma câmara anecóica do Laboratório de Vibrações Acústicas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. O sistema de controle foi testado com um sinal de áudio de entrada de 2500 amostras e frequência de amostragem igual a 48 kHz.

8.1 Controle da Temperatura da Bobina

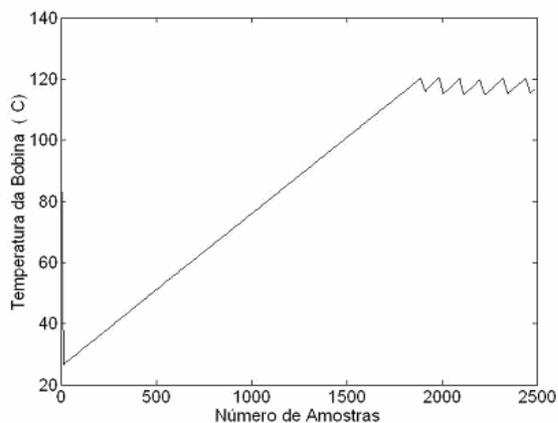
A Figura 67 mostra o resultado obtido na implementação do controle da temperatura da bobina. A Figura 67(a) apresenta um segmento de sinal de áudio de entrada original usado para os testes. A Figura 67(b) é o resultado do controle de temperatura da bobina aplicado ao sinal mostrado na Figura 67(a). As Figuras 67(c) e (d) ilustram, respectivamente, a temperatura da bobina e o correspondente fator de ganho. Através desses resultados pode-se verificar a correta operação do estágio de controle de temperatura.



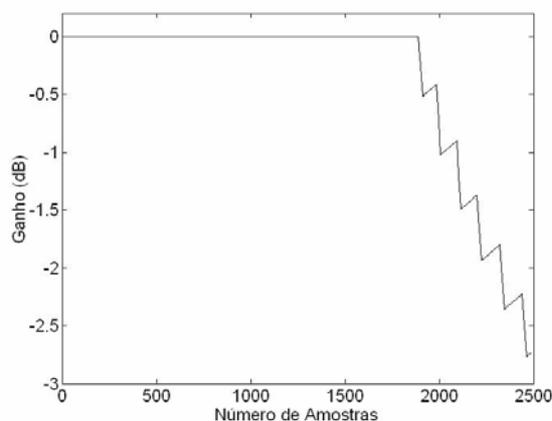
(a)



(b)



(c)



(d)

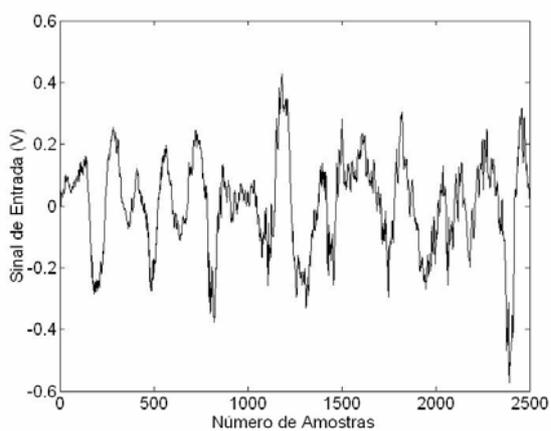
Figura 67. Controle de temperatura com sinal real. (a) Sinal de áudio de entrada original usado para os testes. (b) Sinal de áudio controlado. (c) temperatura da bobina controlada. (d) Fator de ganho.

Devido à dinâmica da temperatura da bobina e à reduzida capacidade de memória do *kit* de desenvolvimento, não foi possível armazenar o número de amostras de temperatura necessárias para se criar o *buffer* utilizado no sistema de controle. Sendo assim, para conseguir criar um *buffer*, foi necessário simular o rápido crescimento da temperatura da bobina. Essa simulação deu-se através da associação em série de um potenciômetro com a bobina, onde a variação da resistência do potenciômetro representou a variação da resistência CC da bobina com respeito à temperatura. Resultando assim, na redução do número de amostras. Dessa forma, foi possível armazenar todas as amostras necessárias para a implementação do controle.

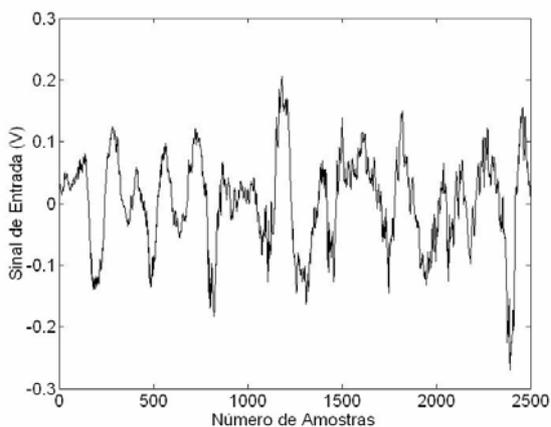
8.2 Controle do Deslocamento do Cone

A Figura 68 mostra os resultados obtidos através da implementação do controle do deslocamento do cone para o mesmo segmento de sinal de áudio de entrada original usado no teste do controle da temperatura, mostrado na Figura 68(a). A Figura 68(b) ilustra o sinal da Figura 68(a) sendo controlado apenas pelo controle do deslocamento do cone. As Figuras 68(c) e (d) mostram os deslocamentos resultantes do cone sem e com a atuação do controle.

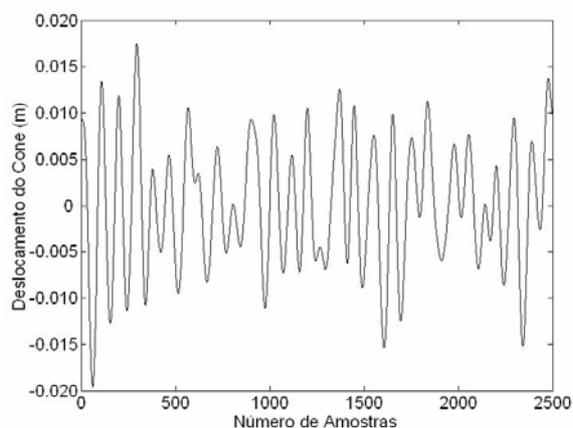
Como pode ser verificado através dos resultados de implementação, o sistema de controle do deslocamento do cone concebido também mostra uma adequada operação para sinais reais.



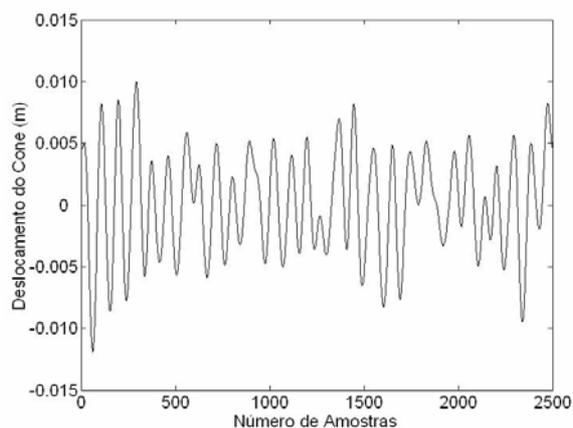
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 68. Controle de deslocamento usando sinal real. (a) Sinal de áudio de entrada original usado para os testes. (b) Sinal de áudio controlado. (c) Deslocamento do cone sem controle. (d) Deslocamento do cone com atuação do controle.

8.3 Conclusões

Este capítulo apresentou os resultados experimentais, o esquema de montagem e as conexões dos equipamentos para a implementação do sistema de controle de temperatura da bobina e deslocamento do cone. Em geral, pode-se afirmar que os resultados experimentais dos sistemas de controle usando sinal real foram satisfatórios. A temperatura da bobina e o deslocamento do cone foram mantidos entre os limites predefinidos e, ao atuar, os sistemas de controle atenuaram o sinal de áudio entregue ao alto-falante sem degradação significativas em suas características.

Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos

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, e para se obter altos níveis de pressão sonora em sistemas de radiação direta, devem-se aplicar altos níveis de potência elétrica, visto que cerca de 95 a 99% dessa potência é transformada em calor, através do efeito Joule, na bobina móvel do alto-falante.

Quando se aplicam altos níveis de potência elétrica a um alto-falante, gera-se, além do superaquecimento da bobina, uma corrente de alto valor circulando pela bobina móvel, e um respectivo campo eletromagnético é produzido perpendicularmente ao fluxo da corrente e ao campo do ímã permanente. A força mecânica resultante fará com que o deslocamento do cone seja muito grande. Como a excursão do deslocamento do cone é limitada, o excessivo deslocamento altera as características de funcionamento, podendo causar danos permanentes ao alto-falante.

Uma vez que os métodos de medição e controle de temperatura da bobina e de deslocamento do cone, considerando as não-linearidades do alto-falante, não permitem a máxima eficiência do sistema de sonorização ou são relativamente complexos e de alto custo de implementação, foi desenvolvido nesse trabalho um sistema de controle que atendeu simultaneamente a todos esses requisitos.

Um novo método para medir e controlar a temperatura da bobina e o deslocamento do cone usando um processador de sinal digital foi proposto. Por meio desse sistema de controle, pode-se prevenir o superaquecimento da bobina e o deslocamento excessivo do cone.

O sistema de controle de temperatura da bobina foi realizado através de um fator de ganho com característica inversa ao crescimento da temperatura da bobina e com atuação sobre o sinal de áudio de entrada no alto-falante. Devido à dinâmica do processo, as etapas de aquisição dos dados e atuação do controle foram realizadas simultaneamente (*on-line*).

A temperatura foi obtida da razão entre a tensão e corrente medidas nos terminais do alto-falante, considerando a direta relação da variação da resistência CC com a variação da temperatura da bobina. Os valores de temperatura foram armazenados em um *buffer* a partir do instante em que a temperatura da bobina foi maior do que o limiar inferior predefinido. Quando a temperatura da bobina foi maior ou igual ao limiar superior predefinido, o controle passou a atuar alterando o fator de ganho e reduzindo o nível do sinal de entrada e conseqüentemente a temperatura. O controle de temperatura atuou até o instante em que a temperatura da bobina voltou a ser igual ou menor do que o limiar inferior. Nesse instante, o controle foi desativado, e um novo ciclo do processo foi reiniciado.

O controle de deslocamento do cone foi realizado através de uma regra de compressão com atuação sobre o sinal de áudio de entrada no alto-falante. Devido à dinâmica do processo, a estratégia adotada realizou o controle preventivo do deslocamento, sendo efetuada em duas etapas. A primeira etapa consistiu na aquisição *off-line* dos parâmetros do deslocamento do cone através de um acelerômetro. Tais parâmetros foram utilizados na segunda etapa para fazer o controle propriamente dito. O controle de deslocamento foi ativado sempre que o nível do sinal de entrada no alto-falante foi maior que um limiar inferior predefinido.

Este método considerou as características reais do alto-falante, incluindo as não-linearidades, tempo de operação, freqüências envolvidas e forma de onda do sinal. Os resultados obtidos através de simulação e posterior implementação corroboram o bom desempenho e a eficácia do sistema de controle proposto. Dessa maneira, pode-se obter o máximo do sistema de sonorização, uma vez que agora se pode trabalhar sem a usual margem de segurança imposta para estes sistemas.

Uma sugestão para futuros trabalhos é obter o deslocamento diretamente através do sinal elétrico medido no alto-falante, considerando-se todas as não-linearidades do alto-falante, e não mais a utilização de um acelerômetro para medi-lo. Com essa nova forma de obtenção do deslocamento, pode-se realizar um estudo e o desenvolvimento de um controle de deslocamento *on-line*.

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

- [1] S. E. Schoenherr, “Loudspeaker History,” Disponível em: <<http://inventors.about.com/library/inventors/blloudspeaker.htm>> Acesso em 10 março. 2005
- [2] C. Zuccatti, “Thermal Parameters and Power Ratings of Loudspeakers,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 38, no. 1/2, pp. 34-39, Jan./Feb., 1990.
- [3] 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.
- [4] P. J. Chapman, “Thermal Simulation of Loudspeakers,” 104th *AES Convention*, AES Preprint no. 4667, Amsterdam, May 16-19, 1998, pp. 1-30.
- [5] C. C. da Silva e H. S. Silva, “Alto-falante e Caixas Acústicas, Características e Utilização,” 1º SEMEA - Seminário de Engenharia de Áudio, Belo Horizonte, MG, Brasil, CD-ROM, Junho 2002, pp. 1-21.
- [6] W. Klippel, “Nonlinear Modeling of the Heat Transfer in Loudspeakers,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 52, no. 1/2, Jan./Feb. 2004.
- [7] R. Bortoni, S. Noceti Filho, and R. Seara, “Comparative Analysis of Moving-Coil Loudspeakers Driven By Voltage and Current Sources,” 115th *AES Convention*, Preprint no. 4667, New York, Oct. 10-13, 2003, pp. 1-14.
- [8] R. Bortoni, “Considerações Sobre o Uso de Alto-falantes e Caixas Acústicas Excitados por Fonte de Corrente,” Florianópolis, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [9] M. Buck, “Measuring Loudspeakers Voicecoil Temperature,” 106th *AES Convention*, AES Preprint no. 4969, Munich, May 8-11, 1999, pp. 1-7.
- [10] C. A. Henricksen, “Heat-Transfer in Loudspeakers: Analysis, Measurement, and Design,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 35, no. 10, pp. 778-791, Oct. 1987.

- [11] H. S. Silva, “O Alto-falante em Regime de Grandes Sinais,” 1º SEMEA - Seminário de Engenharia de Áudio, Belo Horizonte, MG, Brasil, CD-ROM, Junho 2002, pp. 1-16.
- [12] G. Behler, “Measuring the Loudspeaker’s Impedance During Operation for the Derivation of the Voice Coil Temperature,” 98th AES Convention, AES Preprint no. 4001, Paris, Feb. 25-28, 1995, pp. 1-12.
- [13] G. Penkov and P. Valtchev, “Overheat Protection Circuits for Moving-Coil Loudspeakers,” 90th AES Convention, AES Preprint no. 3036, Paris, Feb. 19-22, 1991, pp. 1-17.
- [14] W. Klippel, “Nonlinear Adaptive Controller for Loudspeakers with Current Sensor,” 106th AES Convention, AES Preprint no. 4864, Munich, May 8-11, 1999, pp. 1-18.
- [15] W. Klippel, “Measurement of Large-Signal Parameters of Electrodynamic Transducer,” 107th AES Convention, AES Preprint no. 5008, New York, Sep. 24-27, 1999, pp. 1-21.
- [16] V. Dickason, “Caixas Acústicas e Alto-falantes,” 5. ed., H. Sheldon Serviços de Marketing Ltda., Rio de Janeiro, 1997.
- [17] H. S. Silva, “Análise e Síntese de Alto-falantes e Caixas Acústicas pelo Método de Thiele-Small,” 1ª Edição, H. Sheldon Serviços de Marketing Ltda., Rio de Janeiro, 1996.
- [18] H. S. Silva, “Modelo Não-Linear do Alto-Falante para Pequenos Sinais,” 1º SEMEA - Seminário de Engenharia de Áudio, Belo Horizonte, MG, CD-ROM, Brasil, Junho 2002, pp. 1-128.
- [19] H. S. Silva, “Variação da Resistência da Bobina Móvel em Função da Temperatura,” 1º SEMEA - Seminário de Engenharia de Áudio, Belo Horizonte, MG, Brasil, CD-ROM, Junho 2002, pp. 1-31.
- [20] J. R. Wright, “An Empirical Model for Loudspeakers Motor Impedance,” *J Audio Eng. Soc.*, vol. 38, no. 10, pp. 749-754, Oct., 1990.
- [21] P. Chapman, “Complete Thermal Protection of an Active Loudspeaker,” 108th AES Convention, AES Preprint no. 5112, Paris, Feb. 19-22, 2000, pp. 1-21.

- [22] ELETRÔNICA SELENIUM S.A. **Linha Profissional**. Disponível em: <http://www.selenium.com.br/site2000/linha_profissional/subwoofers/pdfs/15sw1p.pdf> Acesso em: 15 fev. 2004.

Apêndice A

As expressões de R_{ed} e L_e , ambas função de ω , podem ser aplicadas às equações bastando fazer $s = j\omega$, como demonstrado a seguir.

Considera-se o sinal abaixo, cuja entrada é um sinal senoidal e os coeficientes são dependentes da frequência do sinal.

$$\begin{bmatrix} a_{11}(\omega) & \cdots & a_{1N}(\omega) \\ \vdots & & \vdots \\ a_{N1}(\omega) & \cdots & a_{NN}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11}(\omega) & \cdots & b_{1N}(\omega) \\ \vdots & & \vdots \\ b_{N1}(\omega) & \cdots & b_{NN}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_N(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1(t) \\ \vdots \\ c_N(t) \end{bmatrix} [\cos(\omega t)]$$

Aplica-se a transformada de Fourier ao sistema, mas no domínio Ω . Desta forma, pode-se considerar o sistema linear e invariante no tempo. Tem-se então:

$$\begin{bmatrix} a_{11}(\omega) & \cdots & a_{1N}(\omega) \\ \vdots & & \vdots \\ a_{N1}(\omega) & \cdots & a_{NN}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j\Omega X_1(\Omega) \\ \vdots \\ j\Omega X_N(\Omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11}(\omega) & \cdots & b_{1N}(\omega) \\ \vdots & & \vdots \\ b_{N1}(\omega) & \cdots & b_{NN}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(\Omega) \\ \vdots \\ X_N(\Omega) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1(\omega) \\ \vdots \\ c_N(\omega) \end{bmatrix} [\pi(\delta(\Omega - \omega) + \delta(\Omega + \omega))]$$

Definindo as matrizes

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} a_{11}(\omega) & \cdots & a_{1N}(\omega) \\ \vdots & & \vdots \\ a_{N1}(\omega) & \cdots & a_{NN}(\omega) \end{bmatrix}, \quad B(\omega) = \begin{bmatrix} b_{11}(\omega) & \cdots & b_{1N}(\omega) \\ \vdots & & \vdots \\ b_{N1}(\omega) & \cdots & b_{NN}(\omega) \end{bmatrix}, \quad C(\omega) = \begin{bmatrix} c_{11}(\omega) & \cdots & c_{1N}(\omega) \\ \vdots & & \vdots \\ c_{N1}(\omega) & \cdots & c_{NN}(\omega) \end{bmatrix}$$

$$X(\Omega) = \begin{bmatrix} X_1(\Omega) \\ \vdots \\ X_N(\Omega) \end{bmatrix}, \quad x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_N(t) \end{bmatrix} \text{ e a função } U(\Omega) = [\pi(\delta(\Omega - \omega) + \delta(\Omega + \omega))], \text{ tem-se}$$

$$X(j\Omega) = [j\Omega A(\omega) - B(\omega)]^{-1} C(\omega) U(\Omega)$$

Entretanto, $U(\Omega)$ é igual a zero para quaisquer valores de Ω diferentes de ω e $-\omega$.

Portanto, as saídas $x_i(t)$ são senoidais e valem

$$x(t) = \left| [j\omega A(\omega) - B(\omega)]^{-1} C(\omega) \right| \cos\left(\omega t + \angle\left([j\omega A(\omega) - B(\omega)]^{-1} C(\omega)\right)\right)$$

Pode-se afirmar que, em regime permanente senoidal, a resposta de módulo e fase do sistema é dada por $H(j\omega) = [j\omega A(\omega) - B(\omega)]^{-1} C(\omega)$. Donde conclui-se que R_{ed} e L_e são válidas bastando fazer $s = j\omega$.

Apêndice B

SELENIUM
ALTO-FALANTES

LINHA PROFISSIONAL - Subwoofer 15SW1P

Subwoofer profissional de 15" desenvolvido especialmente para atender às exigências dos sistemas de reprodução sonora de alta potência na faixa de subgraves, capaz de suportar 800 watts RMS com grande deslocamento linear do cone.

O conjunto móvel utiliza aranha dupla de Polyamide Fiber, que garante a linearidade de excursão mesmo com temperaturas elevadas. A bobina móvel possui 100 mm (4") de diâmetro, fôrma de fibra de vidro e fio chato de alumínio revestido com cobre.

O conjunto magnético foi projetado com software de elementos finitos, proporcionando o máximo aproveitamento do fluxo magnético. A utilização de peça polar estendida garante uma maior linearidade do campo magnético ao longo do deslocamento da bobina, o que reduz significativamente a distorção.

Um sistema triplo de ventilação (furo central, seis furos na arruela inferior e seis janelas na carcaça) garante a necessária refrigeração de modo que os elevados valores de potência possam ser suportados.

O cone não prensado, é impregnado para oferecer grande rigidez aos elevados esforços mecânicos existentes e apresentar elevada resistência à umidade.

A carcaça em alumínio injetado possui grande rigidez estrutural e atua como dissipador de calor, além de não introduzir perdas no fluxo magnético.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Diâmetro nominal	380 (15)	mm (in)
Impedância nominal	8	Ω
Impedância mínima @ 118 Hz	7,2	Ω
Potência		
Programa Musical ¹	1.600	W
RMS (NBR 10.303) ²	800	W
AES ³	800	W
Sensibilidade (1W/1m) média entre 80 e 250 Hz	96	dB SPL
Compressão de potência @ 0 dB (Pot. nom.)	3,5	dB
Compressão de potência @ -3 dB (Pot. nom.)/2	2,8	dB
Compressão de potência @ -10 dB (Pot. nom.)/10	0,8	dB
Resposta de frequência @ -10 dB	30 a 2.500	Hz

¹ Especificações para uso de programa musical e de voz, permitindo distorção harmônica máxima no amplificador de 5%, sendo a potência calculada em função da tensão na saída do amplificador e da impedância nominal do transdutor.

² Norma Brasileira NBR 10.303, com a aplicação de ruído rosa durante 2 horas ininterruptas.

³ Norma AES (60 - 800 Hz).

PARÂMETROS DE THIELE-SMALL

Fs (frequência de ressonância)	36	Hz
Vas (volume equivalente do falante)	155	l
Qts (fator de qualidade total)	0,33	
Qes (fator de qualidade elétrico)	0,34	
Qms (fator de qualidade mecânico)	12,78	
ηo (eficiência de referência em meio espaço)	2,84	%
Sd (área efetiva do cone)	0,0814	m ²
Vd (volume deslocado)	350,0	cm ³
Xmáx (deslocamento máx. (pico) @ 10% distorção)	9,3	mm
Xlim (deslocamento máx. (pico) antes do dano)	25,0	mm

Condições atmosféricas no local de medição dos parâmetros TS:

Temperatura	27	°C
Pressão atmosférica	1.010	mb
Umidade relativa do ar	51	%

Parâmetros de Thiele-Small medidos após amaciamento de 2 horas com metade da potência NBR.
É admitida uma tolerância de ± 15% nos valores especificados.

PARÂMETROS ADICIONAIS

BL	20,8	Tm
Densidade de fluxo no gap	0,90	T
Diâmetro da bobina	100	mm
Comprimento do fio da bobina	39,7	m
Coefficiente de temperatura do fio (α25)	0,00372	1/°C
Temperatura máxima da bobina	275	°C
θvc (temperatura máx. da bobina/potência máx.)	0,34	°C/W
Hvc (altura do enrolamento da bobina)	32,0	mm
Hag (altura do gap)	13,5	mm
Re (resistência da bobina)	5,5	Ω
Mms (massa móvel)	119,0	g
Cms (compliance mecânica)	167,1	µm/N
Rms (resistência mecânica da suspensão)	2,1	kg/s

PARÂMETROS NÃO-LINEARES

Le @ Fs (indutância da bobina na ressonância)	12,327	mH
Le @ 1 kHz (indutância da bobina em 1 kHz)	2,183	mH
Le @ 20 kHz (indutância da bobina em 20 kHz)	0,501	mH
Red @ Fs (resistência de perdas na ressonância)	0,67	Ω
Red @ 1 kHz (resistência de perdas em 1 kHz)	9,18	Ω
Red @ 20 kHz (resistência de perdas em 20 kHz)	85,49	Ω
Krm (coeficiente da resistência de perdas)	13,621	mΩ
Kxm (coeficiente da indutância da bobina)	160,686	mH
Ern (expoente da resistência de perdas da bobina)	0,745	
Exm (expoente da indutância da bobina)	0,508	

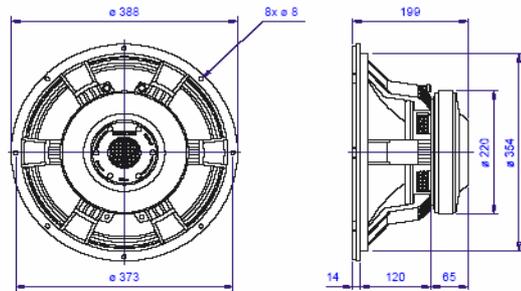


INFORMAÇÕES ADICIONAIS

Material do ímã	Ferrite de bário
Peso do ímã	3.440 g
Diâmetro x altura do ímã	220 x 24 mm
Peso do conjunto magnético	11.800 g
Material da carcaça	Alumínio injetado
Acabamento da carcaça	Pintura epoxi, cor preta
Acabamento das arruelas	Cromatização azul
Material do fio da bobina	CCAW flat
Material da fôrma da bobina	Fibra de vidro
Material do cone	Celulose fibra longa não prensada
Volume ocupado pelo falante	6,8 l
Peso líquido do falante	13.920 g
Peso total (incluindo embalagem)	14.700 g
Dimensões da embalagem (C x L x A)	43 x 43 x 23 cm

INFORMAÇÕES PARA MONTAGEM

Número de furos de fixação	8
Diâmetro dos furos de fixação	8,0 mm
Diâmetro do círculo dos furos de fixação	373 mm
Diâmetro do corte para montagem frontal	345 mm
Diâmetro do corte para montagem traseira	355 mm
Tipo do conector	Pressão p/ fio nu
Polaridade	Tensão + no borne vermelho; deslocamento p/ frente
Distância mín. entre parede da caixa e a traseira do falante	75 mm

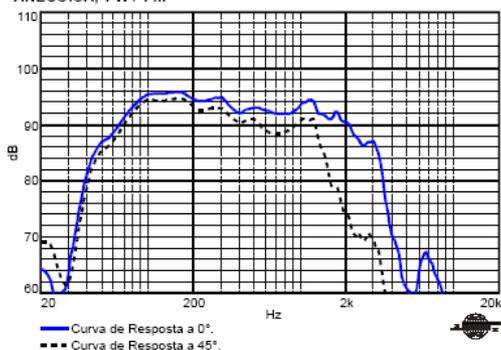


Dimensões em mm.

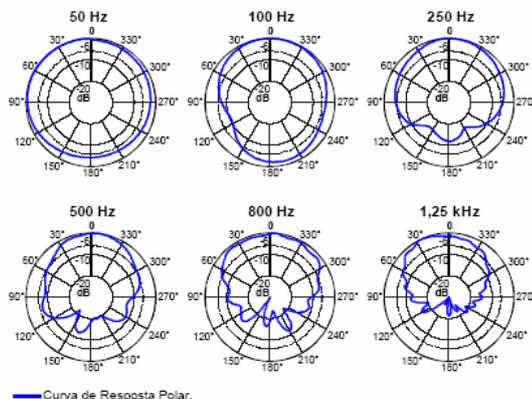


LINHA PROFISSIONAL - Subwoofer 15SW1P

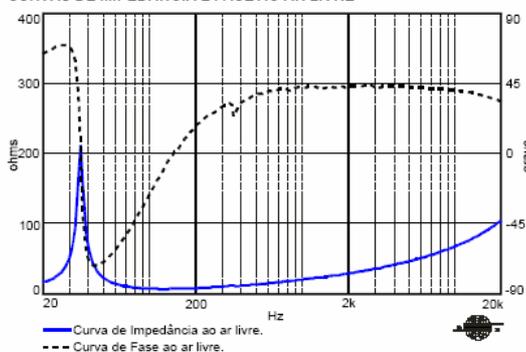
CURVAS DE RESPOSTA (0° e 45°) NA CAIXA DE TESTE EM CÂMARA ANECÓICA, 1 W / 1 m



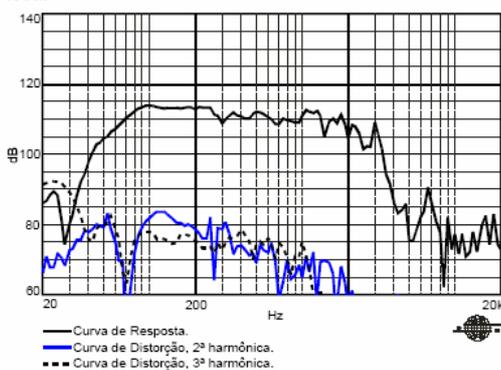
CURVAS DE RESPOSTA POLAR



CURVAS DE IMPEDÂNCIA E FASE AO AR LIVRE



CURVAS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA A 10% DA POTÊNCIA NBR, A 1 m



COMO ESCOLHER O AMPLIFICADOR

O amplificador deve ser capaz de fornecer o dobro da potência RMS do alto-falante. Este headroom de 3 dB deve-se à necessidade de acomodar os picos que caracterizam o sinal musical.

CALCULANDO A TEMPERATURA DA BOBINA

Evitar que a temperatura da bobina ultrapasse seu valor máximo é extremamente importante para a durabilidade do produto. A temperatura da bobina pode ser calculada através da equação:

$$T_b = T_a + \left(\frac{R_b}{R_a} - 1 \right) \left(T_a - 25 + \frac{1}{\alpha_{35}} \right)$$

T_a, T_b = temperaturas da bobina em °C.

R_a, R_b = resistência da bobina nas temperaturas T_a e T_b respectivamente.

α_{35} = coeficiente de temperatura do condutor, a 25 °C.

COMPRESSÃO DE POTÊNCIA

A elevação da resistência da bobina com a temperatura provoca uma redução na eficiência do alto-falante. Por esse motivo, se ao dobrarmos a potência elétrica aplicada obtivermos um acréscimo de 2 dB no SPL ao invés dos 3 dB esperados, podemos dizer que houve uma compressão de potência de 1 dB.

COMPONENTES NÃO-LINEARES DA BOBINA

Devido ao acoplamento com a ferragem do conjunto magnético, a bobina dos alto-falantes eletrodinâmicos exibe um comportamento não-linear que pode ser modelado através de diversos parâmetros. Os parâmetros K_{rm} , K_{xm} , E_{rm} , E_{xm} , por exemplo, permitem calcular o valor da resistência e da indutância da bobina em função da frequência.

PROJETO(S) DE CAIXA(S) ACÚSTICA(S) SUGERIDA(S)

HB1502B1 HB1505D1

Para outros projetos de caixas acústicas, consulte nossa home-page.

CAIXA DE TESTE UTILIZADA

Caixa bass reflex c/ 1 duto ø 12,5 cm e 2 cm de comprimento, volume interno de 110 litros.

Kapton®: Marca Registrada da DuPont.

MCS® (Multi Cooling System): Marca Registrada da Selenium.

Devido aos avanços tecnológicos, reservamo-nos o direito de inserir modificações sem prévio aviso.
Página: 2/2 Ed.: 00 - 09/01

ELETRÔNICA SELENIUM S.A.
BR 388 - Km 435 - 92.480-000
Nova Santa Rita - RS - Brasil
Tel.: (51) 479-4000 - Fax: (51) 479-1042
Atendimento Técnico 0800 51 4161
Atendimento Comercial 0800 51 4114
www.selenium.com.br