



Daniel Ramos Louzada

**Desenvolvimento de um transdutor de pressão de alta
sensibilidade, baseado no fenômeno de
Magnetoimpedância Gigante, para aplicação biomédica.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Programa de Pós-Graduação em
Metrologia da PUC-Rio.

Professores Orientadores:

Elisabeth Costa Monteiro, Ph.D.
PósMQI/PUC-Rio

Carlos Roberto Hall Barbosa Ph.D.
PósMQI/PUC-Rio

Rio de Janeiro
abril de 2006



Daniel Ramos Louzada

**Desenvolvimento de um transdutor de pressão de alta sensibilidade,
baseado no fenômeno de Magnetoimpedância Gigante, para
aplicação biomédica.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora e homologada pela Coordenação Setorial de Pós-Graduação, formalizado pelas respectivas assinaturas abaixo assinada.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Elisabeth Costa Monteiro
Orientadora

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro(PUC-Rio)

Prof. Dr. Carlos Roberto Hall Barbosa
Co-orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro(PUC-Rio)

Prof. Dr. Fernando Luís de Araújo Machado
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Marcio Nogueira de Souza
COPPE /UFRJ

Prof. Dr. Paula Medeiros Proença de Gouvêa
Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI/PUC-Rio)

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Coordenação Setorial de Pós-Graduação:

Prof. José Eugênio Leal
Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico
(PUC-Rio)

Rio de Janeiro, 20 de abril de 2006.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Daniel Ramos Louzada

Graduado em Licenciatura plena em Física, no mês de janeiro de 2003, pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ.

Ficha Catalográfica

Louzada, Daniel Ramos

Desenvolvimento de um transdutor de pressão de alta sensibilidade, baseado no fenômeno de Magnetoimpedância Gigante, para aplicação biomédica / Daniel Ramos Louzada ; orientadores: Elisabeth Costa Monteiro, Carlos Roberto Hall Barbosa. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação, 2006.

107 f. : il.(col.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação.

Inclui referências bibliográficas.

1. Metrologia – Teses. 2. Metrologia. 3. Transdutor de pressão. 4. Magnetoimpedância Gigante – MIG. 5. Aquisição de sinais cardiovasculares. I. Monteiro, Elisabeth Costa. II. Barbosa, Carlos Roberto Hall. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação. IV. Título.

CDD: 389.1

Dedico todo este trabalho ao meu querido pai,
Ruy Carlos e a minha saudosa mãe,
Maria Hermínea que sempre preencheram os dias da minha vida.

Agradecimentos

Aos meus pais que sempre me apoiaram nas minhas decisões.

A toda a minha família que sempre esteve presente nos momentos mais difíceis.

Aos meus irmãos, Rebeca e Tiago pelas cobranças e incentivos.

Aos meus orientadores, Elisabeth Costa Monteiro e Carlos Roberto Hall Barbosa, pelo constante apoio e incentivo. Em especial à Beth que sempre manteve o seu otimismo e ao Hall por sempre manter as minhas ações em perspectiva.

Ao professor Luiz Gusmão que tanto contribuiu para o desenvolvimento do projeto, sempre solícito no laboratório.

Ao programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio que me concedeu a oportunidade de participar desse projeto.

Ao professor Fernando Machado e a sua equipe que gentilmente forneceram amostras das fitas utilizadas neste projeto.

Ao professor Maurício Frota, por estar sempre me apoiando, principalmente no início do curso.

Às secretárias da Pós-MQI, Eliane Abernaz e Márcia Ribeiro, pelo incansável apoio.

Aos meus amigos, Jorge, Mônica, Franky, Carol, Flavia, Jaime que dentre outros sempre estiveram próximos em todos os momentos, ajudando e aconselhando.

À CAPES, à PUC-Rio e ao Fundo Verde Amarelo, pelo apoio recebido.

Resumo

Ramos Louzada, Daniel. **Desenvolvimento de um transdutor de pressão de alta sensibilidade, baseado no fenômeno de Magnetoimpedância Gigante, para aplicação biomédica.** Rio de Janeiro, 2006. 107p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação (PósMQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente dissertação apresenta o desenvolvimento de um transdutor de pressão de alta sensibilidade, desenvolvido para aplicações biomédicas. O transdutor é baseado em um sensor de magnetoimpedância gigante (MIG), anteriormente desenvolvido, pelo Laboratório de Biometrologia da PUC-Rio. O conhecimento a cerca das principais características do fenômeno MIG serviu de guia para as ações que foram tomadas, a fim de se estabelecer uma configuração que apresentasse maior sensibilidade ao transdutor. Mesmo que algumas dificuldades encontradas, principalmente devidas a características acústicas não levadas em consideração, apontem para a necessidade de aperfeiçoamentos, com a configuração desenvolvida no presente trabalho já é possível obter o registro do pulso arterial carotídeo. Comparações entre o transdutor ora desenvolvido e com outros transdutores de pressão existentes no mercado também destinados a aplicações biomédicas, apontam para uma sensibilidade do transdutor ora desenvolvido de magnitude igual ou mesmo superior aos convencionais.

Palavras-chave

Metrologia; Transdutor de Pressão; Magnetoimpedância Gigante - MIG; Aquisição de sinais Cardiovasculares.

Abstract

Ramos Louzada, Daniel. **Development of a high sensitivity pressure transducer, based on the phenomenon of giant magnetoimpedance effect, for biomedical application.** Rio de Janeiro, 2006. 107p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação (PósMQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation presents a high sensitivity pressure transducer, developed for biomedical applications. The transducer is based on a Giant Magnetoimpedance (GMI) sensor previously developed at the Laboratory of Biometrology of PUC-Rio. Knowing the main characteristics of the phenomenon and of the GMI strips used, the configuration which should yield the highest possible sensitivity has been implemented. Even though some enhancements in the acoustic characteristics of the transducer are still necessary, it was already possible to record the carotid arterial pulse. Comparing the transducer herein presented with other pressure transducers also destined to biomedical applications, it already has a sensitivity of the same order of magnitude or even higher.

Palavras-chave

Metrology; Pressure transducer; Giant Magnetoimpedance; cardiovascular signal acquisition.

Sumário

1 Introdução.	19
1.1. Justificativa e motivação para o projeto.	19
1.2. Custos da Tecnologia Biomédica.	20
1.3. Confiabilidade Metrológica de equipamentos eletromédicos EEM.	22
1.4. Estrutura da Dissertação.	24
2 Bases fisiológicas da ausculta cardio-pulmonar.	26
2.1. Coração.	26
2.1.1. Ativação elétrica cardíaca.	27
2.1.2. Hemodinâmica Cardiovascular.	29
2.2. Biofísica da ausculta.	30
2.2.1. Propagação dos sons cardíacos.	31
2.2.2. Gênese dos sons cardíacos.	32
2.2.3. Sons cardíacos.	32
2.3. Pulso Arterial.	33
2.3.1. Pulso Carotídeo.	34
2.4. Pulmão.	35
2.4.1. Biofísica da auscultação pulmonar.	37
2.5. Limites auditivos.	37
3 Estetoscópios.	40
3.1. Contextualização Histórica.	40
3.2. Estetoscópio convencional.	41
3.3. Amplificação do som através do estetoscópio convencional.	43
3.4. Determinantes das frequências de ressonância dos receptores de estetoscópio.	43
3.4.1. Características da membrana.	43
3.4.2. Características do receptor sonoro (sino).	44
3.5. Eficiência dos estetoscópios com relação às dimensões dos tubos flexíveis e olivas.	44

3.6. Estetoscópios Eletrônicos.	45
4 Transdutor de pressão baseado no efeito de Magnetoimpedância Gigante (MIG).	47
4.1. Materiais Magnéticos.	47
4.1.1. Estrutura magnética interna de materiais ferromagnéticos (domínios magnéticos).	48
4.1.2. Ligas ferromagnéticas amorfas.	49
4.2. Magneto Impedância Gigante – O fenômeno.	49
4.2.1. Magnetoimpedância gigante do tipo Longitudinal MIL.	51
4.2.2. MIL – Curvas típicas ($Z \times \vec{H}$).	55
4.3. Transdutor de pressão MIG.	56
4.3.1. Sensor MIG.	56
4.3.2. Transdutor completo – Descrição.	58
4.3.3. Circuito Eletrônico.	58
5 Simulações.	61
5.1. Simulações para o Campo Magnético Gerado por um Ímã Permanente.	61
5.1.1. Mapas B_x , B_y e B_z .	64
5.2. Simulações de vibração da membrana de estetoscópios.	65
5.3. Simulação da distância ótima entre o ímã e as fitas MIG no transdutor.	68
5.4. Simulação do campo magnético sentido pelo transdutor.	70
6 Medições.	71
6.1. Caracterização do campo magnético gerado por um ímã permanente (Campo magnético externo).	71
6.1.1. Estimativa da magnetização do ímã.	72
6.2. Medições dos parâmetros da membrana (diafragma) usado no transdutor.	73
6.3. Caracterização das fitas MIG.	75
6.4. Determinação experimental da posição ótima do ímã no protótipo.	77

6.5. Determinação da Sensibilidade do transdutor.	78
6.6. Medições do pulso carotídeo utilizando o transdutor desenvolvido.	80
7 Discussões, Conclusões e Trabalhos Futuros.	83
7.1. Discussão.	83
7.2. Trabalhos Futuros.	84
7.3. Conclusão.	84
Apêndices.	89
Apêndice I. – Tabela de caracterização das fitas.	90
Apêndice II. – Tabela de medições para cálculo da melhor posição do ímã no transdutor.	91
Apêndice III. – Tabela das medições para cálculo da sensibilidade das fitas.	92
Apêndice IV. - Artigo publicado nos anais da XX Conferência Nacional de Engenharia Biomédica.	93
Apêndice V. – Apresentação de dissertação de Mestrado.	98
Anexos.	105
Anexo A. – Diagrama do Circuito Eletrônico do Transdutor.	106

Lista de figuras

Figura 1 - Óbitos no Brasil.	20
Figura 2 - Óbitos causados por doenças cardio-respiratórias.	21
Figura 3 - Gastos com saúde no Brasil.	21
Figura 5 - Tecidos especializados que participam da ativação elétrica cardíaca.	28
Figura 7 - Representação de ondas sonoras de diferentes timbres.	31
Figura 8 - Bulhas cardíacas.	32
Figura 9 - Pulso Carotídeo.	34
Figura 10 - Representação dos órgãos do sistema respiratório.	36
Figura 11 - Processo mecânico da respiração.	36
Figura 12 - Representação do ouvido.	38
Figura 13 - Gráfico de sensibilidade auditiva.	39
Figura 15 - Modelos de estetoscópios propostos após Laënnec.	41
Figura 16 - Estetoscópio mecânico e seus componentes.	42
Figura 17 - Tipos de receptores de sons (sino) em estetoscópios. Em (a) pode-se observar o receptor do tipo campânula e em (b) o tipo diafragma.	42
Figura 18 - Representação da sensibilidade auditiva em relação à frequência e a amplitude da vibração sonora cardíaca.	46
Figura 19 - Custos de sete estetoscópios convencionais e um digital pertencentes à mesma marca.	46
Figura 20 - Representação da magnetização de um material ferromagnético, (a) desmagnetizado e (b) magnetizado.	48
Figura 21 - Representação do campo magnético externo atuando sobre uma amostra metálica, em forma de fita, submetida a uma corrente elétrica AC.	52
Figura 22 - A ilustração (a) exemplifica a distribuição dos domínios magnéticos em uma amostra. Já a ilustração (b) mostra como fica a configuração dos momentos magnéticos quando aplicado um campo magnético longitudinal.	54

Figura 23 - Configuração dos domínios magnéticos numa fita MIG com a aplicação de um campo magnético externo longitudinal, e de um campo induzido pela corrente de medição.	54
Figura 24 - Dependência da impedância Z com o campo magnético externo H_{ext} para uma fita de (Fe 0.053Co 0.947)70Si12B18, na faixa de frequência mediana (900 kHz), com corrente de excitação de 5 mA. (a) antes de sofrer tratamento térmico, (b) depois de passar por tratamento térmico. [27]	56
Figura 25 - Elemento sensor MIG do transdutor de pressão desenvolvido.	56
Figura 26 - a) O sensor MIG pronto para ser colocado no transdutor. b) Pode-se observar as pontes que ligam as fitas MIG. c) Desenho esquemático das pontes mostradas.	57
Figura 27 - Figura do Transdutor aberto (a), e do transdutor fechado (b).	58
Figura 28 - Foto do transdutor com o parafuso em evidência.	58
Figura 29 - Diagrama em blocos do circuito eletrônico.	59
Figura 30 - Vista do circuito elétrico já encapsulado	60
Figura 31 - Esquema da posição do ímã nos eixos cartesianos.	61
Figura 32 - Localização do ímã na simulação	64
Figura 33 - Componentes x , y e z do campo magnético gerado por um ímã permanente.	65
Figura 34 - Cada gráfico representa uma posição de uma fatia da membrana em um instante de tempo. O eixo x corresponde à distância em metros e o eixo y corresponde à amplitude da vibração também em metros.	68
Figura 35 - Desenho esquemático de parte da fita MIG deslocada da sua posição de repouso.	69
Figura 36 - Gráfico de otimização da posição do ímã no transdutor.	69
Figura 37 - Simulação do campo magnético sentido pelas fitas MIG quando postas a vibrar sob influência de uma deflexão inicial.	70
Figura 38 - Mesa graduada e sensor magnético usados na caracterização do campo do ímã permanente.	71
Figura 39 - Gráfico de caracterização do campo magnético gerado pelo ímã permanente	72

Figura 40 - Curva de campo magnético teórica ajustada aos pontos experimentais.	73
Figura 41 - Representação da membrana usada.	75
Figura 42 - Fitas MIG no interior da bobina de Helmholtz, prontas para as medições de caracterização.	76
Figura 43 - Gráfico de caracterização das fitas MIG.	77
Figura 44 - Determinação experimental da posição ótima do ímã em relação as fitas MIG.	78
Figura 45 - Gráfico da sensibilidade do transdutor.	79
Figura 46 - Sinal do Pulso Arterial Carotídeo, adquirido com o transdutor de pressão desenvolvido.	80
Figura 47 - No gráfico (a) estão apresentadas as componentes de frequência de interesse do sinal medido. O gráfico (b) mostra com maiores detalhes essas frequências. No último gráfico (c) pode-se observar o ruído de $60Hz$	81
Figura 48 - Sinal do pulso carotídeo adquirido com o transdutor de pressão. (a) Com filtro passa baixa, (b) uma superposição do sinal com e sem filtro.	82

Lista de tabelas

Tabela 1 –Medições da massa da membrana	74
Tabela 2 - Valor medido do diâmetro da membrana usada no transdutor.	74
Tabela 3 - Valor medido da espessura da membrana usada no transdutor.	74

Lista de quadros

Quadro 1 - Relação de unidade de pressão.	27
Quadro 2 – Intensidades aproximada de alguns sons.	38
Quadro 3 – Comparação de sensibilidade entre transdutores de pressão.	80

Lista de Abreviaturas e Símbolos

A – Área do ímã.

a - Velocidade da onda de vibração.

AC – Corrente alternada.

AM – Amplitude Modulada.

ANVISA – Agencia Nacional de Vigilância Sanitária.

B – Campo de Dipolo Magnético.

b - Constante de amortecimento.

c – Velocidade da luz no vácuo.

D – Diâmetro da Membrana vibratória.

ECG - Eletrocardiograma

EEM – Equipamento Eletroeletrônico

Gerais para Segurança e normas técnicas particulares brasileiras.

H - Campo magnético.

h - Campo magnético transversal.

H_a - Campo de anisotropia

H_{ext} - Campo externo.

H_{reff} Campo magnético de referência.

I - Corrente elétrica.

IEM – Interferência eletromagnética

I_1 - Intensidade sonora característica do limiar de audição.

I_2 – Intensidade sonora característica de determinado som.

k Constante de elasticidade.

L – Comprimento da fita MIG.

l - Comprimento do ímã.

L_R – Intensidade sonora relativa.

M – Magnetização.

m - Momento de dipolo magnético.

MIG – Magnetoimpedância Gigante.

MIL – Magnetoimpedância Longitudinal.

MIP – Magnetoimpedância Perpendicular

MIT – Magnetoimpedância Transversal

NBR IEC 60601.1 – Equipamento Eletromédico. Parte 1 Prescrições

NBR IEC 60601.2 – Norma colateral: Confiabilidade eletromédica – prescrições e ensaios.

PUC-Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

PósMQI – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Metrologia para a Qualidade e Inovação) da PUC-Rio.

R - Resistência.

$R(r)$ - Função de vibração radial.

r – Função de posição.

SI – Sistema Internacional.

SIM – Sistema de Informação sobre Mortalidade

SIOPS – Sistema de Informação sobre Orçamentos Públicos em Saúde.

$T(t)$ - Função de vibração temporal.

t – Tempo.

u - Função de vibração.

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco.

V – Tensão.

W – Largura da fita MIG.

X – Reatância indutiva.

Z - Impedância.

χ - Suscetibilidade Magnética.

δ - Profundidade de penetração da corrente.

ϕ - Fase da corrente.

μ - Permeabilidade Magnética.

ρ - Densidade da Membrana vibratória.

σ - Condutividade.

ω - Frequência da corrente.

É necessário começar pelas coisas importantes
e aquelas mais facilmente reconhecíveis.
É necessário estudar tudo aquilo que se pode ver, sentir e ouvir.
Hipócrates.